

Rešeršní práce

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM HORKÉ A HUSTÉ JADERNÉ HMOTY

V. POSPÍŠIL

OBSAH

1. Úvod	2
2. Teorie	2
2.1. Základní poznatky kvantové mechaniky a chromodynamiky	2
2.2. Současné představy o stavbě hmoty	2
2.3. Srážky těžkých iontů	4
2.4. Dynamika srážky těžkých iontů	4
2.5. Termodynamika jaderné hmoty	6
3. Experiment	7
3.1. Vhodné sondy	7
3.2. Detektory	8
3.3. Pozorovatelné fyzikální jevy	10
3.4. Některé ukončené experimenty	12
3.5. Současné a plánované experimenty	17
Reference	21

1. ÚVOD

[7] Již mnoho let stojí moderní fyzika před zajímavými otázkami. Protony a neutrony se shlukují buď do miniaturních objektů atomových jader ($\approx 10^{-15}$ m), nebo do neutronových hvězd ($\approx 10^4$ m) a nevytvářejí objekty, které by velikostí patřily "někam mezi". Proč? Zakazují fyzikální zákony jadernou hmotu, která by zaplnila tyto "prázdné prostory", nebo jsme ji zatím jen nebyli schopni pozorovat?

Dle současných představ se běžná hmota skládá z kvarků. Ty zatím nebyly pozorovány samostatně, vždy jen vázány po dvou či po třech. Je možné kvarky od sebe odtrhnout, mohou existovat volné?

Tyto jevy - jak tvorbu jaderné hmoty skládající se z mnoha kvarků, tak i volně se vyskytující kvarky - by teoreticky bylo možné pozorovat v raném vesmíru těsně po velkém třesku, kdy byl vesmír nesmírně horký a hustý. Tam se samozřejmě již podívat nemůžeme, jsme ale schopni si podobné podmínky vytvořit v laboratorních podmínkách a to za pomoci srážek velmi těžkých atomových jader ultrarelativistických energií ($\frac{T}{m_0c^2} \gg 10^{-2}$).

2. TEORIE

2.1. Základní poznatky kvantové mechaniky a chromodynamiky. [11] Kvantová chromodynamika (QCD) silně připomíná kvantovou elektrodynamiku (QED). Podobně jako QED popisuje interakci elektricky nabitých částic (třeba elektrony a pozitrony) prostřednictvím kvant elektromagnetického pole (fotonů), tak QCD pojednává o silně interagujících částicích (kvarky). Výměnné polní částice se v tomto případě nazývají *gluony*. Kvarky mají (stejně jako elektrony) nenulovou klidovou hmotnost a kromě elektrického náboje nesou i svůj specifický náboj nazývaný *barva*. Ten se ale nevyskytuje ve dvou variantách (+,-), nýbrž ve třech (červená, modrá, zelená). Gluony mají nulovou klidovou hmotnost, ale narozdíl od neutrálních fotonů nesou náboj stejného typu jako kvarky. Díky tomu existuje mezi gluony silové působení, což je zásadní rozdíl mezi silnou a elektromagnetickou interakcí.

QCD vzešla z pozorování chování a stavby jader atomů a nukleonů, nicméně jasná a přesná teorie hadronové struktury dosud neexistuje. Důvodem je přílišná síla jaderné (silné) interakce. Zatímco kvantová teorie elektromagnetického pole využívá aproximativního poruchového přístupu, v případě kvarků a gluonového pole nelze snadno zanedbat rozvojové členy vyšších řádů a výpočty se tak stávají nesmírně obtížnými. Poruchovou metodu lze použít pouze ve speciálním případě. Vazebná konstanta silné interakce α_s totiž závisí na velikosti přenesené čtyřhybnosti Q při reakci:

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln \frac{Q^2}{\Lambda_{QCD}^2}}$$

kde N_f je konstanta související s počtem různých typů kvarků a $\Lambda_{QCD} \approx 200 \text{ MeV}$ škálovací konstanta. Je-li $Q^2 \gg \Lambda_{QCD}^2$, pak je konstanta α_s malá a lze využít poruchovou teorii podobně jako u elektromagnetické interakce. Díky tomu je QCD úspěšná při procesech s vysokou energií, jako jsou například kolize ultrarelativistických těžkých iontů.

2.2. Současné představy o stavbě hmoty.

2.2.1. *Elementární částice.* [7]Podle Standardního Modelu se veškerá běžná hmota skládá z kvarků. Tyto částice existují v šesti variantách sdružených do dvojic. Jsou to kvarky

- up (u) - down (d)
- strange (s) - charm (c)
- top / true (t) - bottom / beauty (b)

v češtině obvykle nazývané *horní, dolní, podivný, půvabný, vrchní (pravdivý), spodní (krásný)*. Každý z kvarků může mít jednu ze tří barev a ke každému z nich existuje antičástice. Celkem tedy máme $2 \cdot 3 \cdot 6 = 36$ různých variant kvarků.

V normální hmotě se setkáváme pouze s první dvojicí. Proton je tvořen dvěma horními kvarky, každý s elektrickým nábojem $+\frac{2}{3}$, a jedním dolním, který má el. náboj $-\frac{1}{3}$. Každý z nich má jinou barvu. Dohromady (uud) mají tedy el. náboj 1 a jsou bezbarvé. Neutron se skládá z jednoho u a dvou d kvarků, jeho celkový elektrický i barevný náboj je tedy nulový. Ostatní kvarky byly nalezeny pouze v částicích s velmi krátkou dobou života.

2.2.2. *Struktura hadronů.* [11] Popis nízkoenergetických procesů a stavů - jako například stavba nukleonů - pomocí QCD zůstává závažným nevyřešeným problémem. Zatím je nutné spolehnout se na fenomenologické modely a experimentální data. Nejčastěji používaný koncept jsou konstituentní kvarky (*constituent quarks*). Zatímco původní kvarky *u* a *d* jsou velmi lehké (několik MeV), jejich efektivní hmotnost v nukleonu je kolem 300 MeV, což je přibližně třetina hmotnosti protonu či neutronu. Takto vysoká hmotnost těchto kvazičástic je dána charakterem silné interakce.

Rozdíl mezi hmotnostmi volného kvarku *s* a jeho efektivní hmotností je méně dramatický - 150 MeV/c² má volný a 450 MeV/c² vázaný. U těžkých kvarků *c*, *b* a *t* se rozdíl smazává úplně.

Předpokládá se, že kvarky tvořící hadron drží pohromadě gluony, nicméně přesná teorie doposud není vyhotovena. Taková teorie by musela popsat tzv. *uvěznění kvarků*, což je základní jev ve světě mikročástic. Stejně jako elektromagnetická interakce má tendenci formovat elektricky neutrální objekty (atomy), tak silná interakce tvoří objekty bezbarvé. Tři kvarky, ze kterých se skládají nukleony, mají každý různou barvu a nukleon je tedy bezbarvý. Mezony se pak skládají z kvarku a antikvarku, jejichž barva a antibarva dá dohromady také bezbarvý objekt. Existence samostatných barevných objektů (osamělý kvark či gluon) je zakázána. V principu je ovšem možná existence mnohakvarkových bezbarvých objektů.

Uvěznění kvarků má mnoho důsledků. Podívejme se na jeden z nich: vezmeme mezon složený ze dvou kvarků a pokusme se kvarky oddělit. S rostoucí vzdáleností kvarků roste přitažlivá síla, která na ně působí, neboť v interakčním potenciálu se vyskytuje člen lineární vůči vzdálenosti. Čím více kvarky oddalujeme, tím více energie na to musíme vynakládat. Vložíme-li do procesu dostatečné množství energie, vazba mezi kvarky "praskne" a obržime dva nové páry, tj. místo jednoho mezonu máme dva.

[17]Kvarky se tedy v přírodě běžně vyskytují pouze vázané po dvou (mezony) či po třech (baryony). Samotné je za normálních podmínek nelze pozorovat, neboť volný kvark ve vakuu by měl nekonečně velkou energii.

2.2.3. *QGP a podivná hmota.* [10] Výpočty kvantové chromodynamiky předpovídají, že za kritické teploty $T_C \approx 150 - 180$ MeV prodělá běžná jaderná hmota, kde jsou kvarky a gluony svázány v bezbarvé hadrony, fázový přechod do stavu, ve kterém se kvarky a gluony budou chovat jako volné částice. Důvod je ten, že $Q^2 \approx T^2$ a s roztoucí teplotou klesá hodnota α_s . Pro dostatečně vysoké T dostaneme nepříliš silně vázaný systém. Pokud by tento stav vydržel dostatečně dlouho, došlo by k rovnoměrnému přerozdělení energie a takto termalizovaný systém se pak nazývá *kvark-gluonové plasma*, zkráceně *QGP*.

[26] Získat jasný experimentální důkaz existence QGP je ale nesmírně obtížné. Hlavní problém tkví v krátkém čase, po který umíme udržet vhodné podmínky. I když dokážeme QGP laboratorně vytvořit, řádově po 10^{-23} sekund znovu zhadronizuje. Jakékoliv charakteristické projevy je tedy nutné buď zaznamenávat v tomto časovém intervalu, nebo použít vhodné sondy, které zaznamenají informaci v prvních okamžicích srážky a nejsou pak ovlivněny následnou hadronizací.

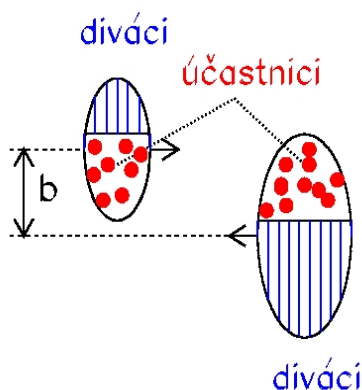
[7] Dřívější teoretické výpočty ukazují možnost shlukování kvarků do větších stabilních útvarů. Dosud nebyly pozorovány, nicméně žádný známý fyzikální zákon nebrání jejich existenci. Ale pokud existují, zcela jistě musí obsahovat i jiné kvarky než jen u a d , například podivné kvarky s . Kdyby totiž bylo možné snadno vytvořit větší útvary z kvarků u a d , například kdyby útvar ze tří u a tří d kvarků byl energeticky výhodnější než jádro deuteria ($uud + udd$), atomová jádra by samovolně přecházela v takové útvary a hmota jak ji známe by neexistovala.

2.3. **Srážky těžkých iontů.** Již v 70. letech se na urychlovači BEVALAC prokázalo, že při srážce těžkých jader dojde k vzniku horké a husté jaderné hmoty. Prokázat existenci QGP nicméně není tak jednoduché. V jaderné hmotě existuje několik dějů, které jsme schopni pozorovat a u kterých známe průběh při srážkách lehkých jader (proton - proton). Tyto děje probíhají stejným způsobem i u těžkých iontů. Vzikne-li ale při srážce QGP, měly by se podle teorií objevit anomální odchylky. Hledáním a měření takových odchylek nás může dovést k experimentálnímu potvrzení či vyvrácení existence QGP.

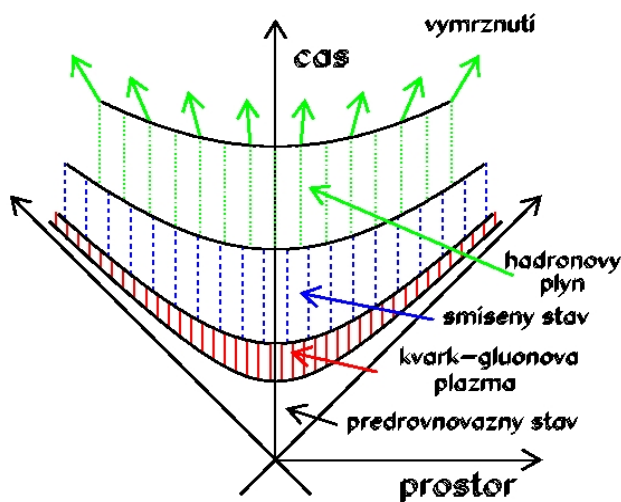
[1] Základní otázky výzkumu srážek těžkých iontů by mohly znít takto:

- Jaká je struktura hmoty, která se tvoří při srážkách těžkých iontů?
- Dosahuje vzniklý částicový systém termodynamické rovnováhy?
- Pokud ano, při jaké teplotě?
- Jaké jsou vlastnosti jaderné hmoty v závislosti na teplotě a hustotě (stavová rovnice)?
- Jakého druhu je fázový přechod (přechody)?

2.4. **Dynamika srážky těžkých iontů.** [11] Průběh srážky těžkých iontů velmi závisí na jejich energii. Je dobré ji vztahovat na jeden nukleon, nikoliv na celé jádro, neboť při energiích několika GeV na nukleon už jádro neinetraguje jako jeden celek. V takovém případě je totiž vazba mezi nukleony relativně slabá a srážky se tak účastní pouze ty části jádra, které se překrývají. Částice tvořící překrývající se části jádra nazýváme *účastníci*, ostatní pak *diváci*. Diváci neprodělávají žádné fázové přechody ani jiné změny stavů, pouze mění směr letu. Mohou ale působit těžkosti při měření.



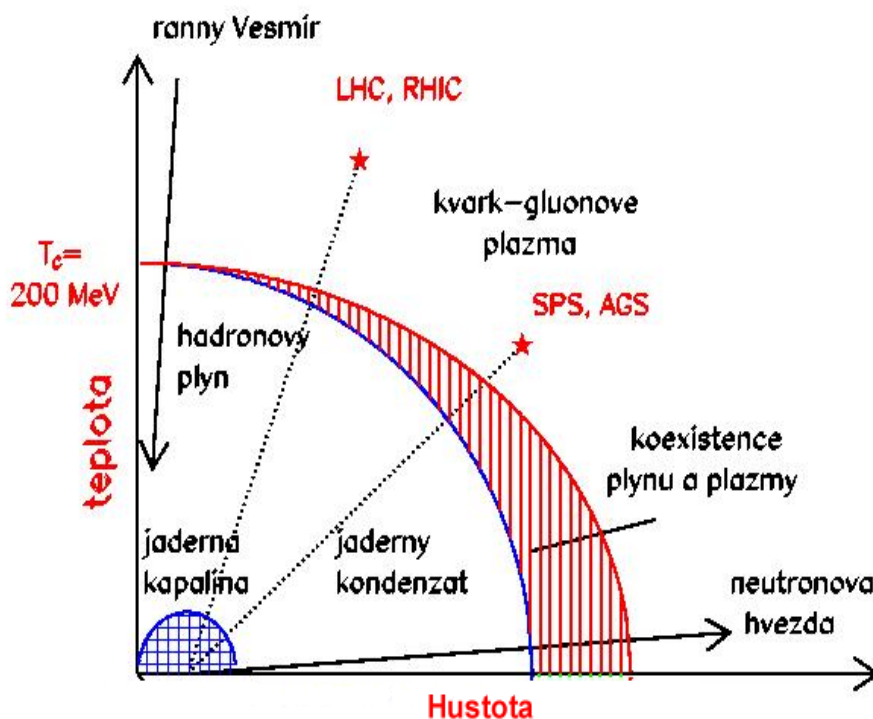
[30] Vysokoenergetická srážka těžkých iontů probíhá podle následujícího scénáře: Díky relativistické kontrakci délek se jádra jeví jako velmi ploché disky a při srážce je tedy jejich hmota "nahloučena" ve velmi malém prostoru. Díky tomu překrývající se části jader přejdou v horkou a hustou jadernou hmotu. V závislosti na dodané energii se kvarky uvolní a vytvoří QGP, nebo hmota zůstane ve formě hadronů. Systém pak začne expandovat a ochlazovat se. Jestliže vznikla QGP, musí částice projít fázovým přechodem, *hadronizací*, při kterém se kvarky a gluony opět svazují do bezbarvých útvarů. Systém pak dále expanduje. V okamžiku, kdy je teplota již tak nízká, že volná dráha jednotlivých hadronů překročí vlastní rozměry systému (respektive přeroste rozměry samotných hadronů), pak díky krátkým dosahům jaderných sil přestanou hadrony navzájem interagovat. Mezitím se rozpadnou případné vzniklé nestabilní částice. Moment, ve kterém dojde k přerušení vzájemných interakcí hadronů, se nazývá *vymrznutí* (*freeze out*). Z místa interakce se pak rozlétají diváci a nově vzniklé hadrony, které pak pozorujeme.



2.5. Termodynamika jaderné hmoty. [33] V klasické fenomenologické termodynamice bereme fázi jako oblast, kterou lze určit několika stavovými proměnnými, svázanými stavovou rovnicí (tedy se nachází v termodynamické rovnováze). V různých fázích (téže látky) musí být shodná teplota a tlak, ovšem ostatní stavové proměnné se mohou různit. Zejména jsou různé chemické (resp. Gibsovy) potenciály, které charakterizují energii vazeb mezi jednotlivými částicemi dané fáze.

Na rozhraní fází se tlak, teplota a tudíž i Gibbsov potenciál mění spojitě, nicméně jeho derivace nemusí. Podle toho, která derivace Gibbsova potenciálu je nespojitá, nazýváme fázový přechod prvního, resp. druhého druhu.

Při fázovém přechodu prvního druhu se vylučuje / pohlcuje jisté teplo, tzv. *latentní teplo*. Mezi typické příklady patří tání, vypařování či sublimace. Při fázovém přechodu druhého druhu teplo vylučováno není, mění se ale skokově tepelné kapacity, stlačitelnost a podobně. Jako příklad lze uvést přechod z normálního do supravodivého stavu či přechod feromagnetické fáze v paramagnetickou.



Na obrázku je fázový diagram jaderné hmoty. Můžeme rozlišit několik fází, a to vázaný stav jádra (jaderná kapalina), hadronový plyn (tj. shluk volných hadronů) a nakonec QGP (pokud ovšem existuje). Oblast předpokládaného fázového přechodu mezi hadronovým plynem a QGP je naznačena šrafovaně. K otázkám, které má zodpovědět zkoumání srážek těžkých iontů, patří mimo jiné i to, zda QGP stihne dosáhnout termodynamické rovnováhy a jakého druhu je fázový přechod mezi QGP a hadronovým plynem.

3. EXPERIMENT

K laboratorní přípravě husté a horké jaderné hmoty je nutné urychlit velká a těžká atomová jádra na relativistickou rychlost a předat jim dostatečnou energii. K tomu je zapotřebí kvalitní urychlovače. Ve vývoji a výstavbě těchto zařízení lze zhruba rozlišit tři etapy:

- urychlovače do 1 GeV/nukleon, pevný terč;
Bevalac, SIS, AGS; 1970 - 1990
- 200 GeV/nukleon, pevný terč;
SPS, AGS; 1990 - 2000
- 200 GeV/nukleon, collider;
RHIC, LHS; 2000 a dále

V první etapě bylo zjištěno, že při srážce dvou těžkých relativistických iontů opravdu dojde k vytvoření horké a husté jaderné hmoty, v další pak zdokonalovány metody pozorování projevů fázového přechodu od hadronového plynu ke QGP. V následujících letech snad bude podán přesvědčivý důkaz existence QGP.

3.1. Vhodné sondy. [1] Abychom dosáhli vytyčených cílů experimentu, je nutné zvolit vhodnou sondu, kterou budeme děje v horké a husté jaderné hmotě pozorovat. Ta musí být dostatečně citlivá, být schopna zaznamenat probíhající děj a pak se z interakční oblasti dostat ven neovlivněna dalšími ději či okolím. Máme několik možností:

3.1.1. Fotony. [1] Fotony jsou výlučně elektromagneticky interagující částice a ředpokládá se, že jejich střední volná dráha v jaderné hmotě je dlouhá. Fotony se po svém vzniku neúčastní dalších reakcí (respektive zúčastní-li se, zaniknou), a proto informaci ze srážkové oblasti odnesou nezkreslenou.

Spektrum a množství fotonů odráží termodynamický stav hmoty a jejich složek, ve které vznikají.

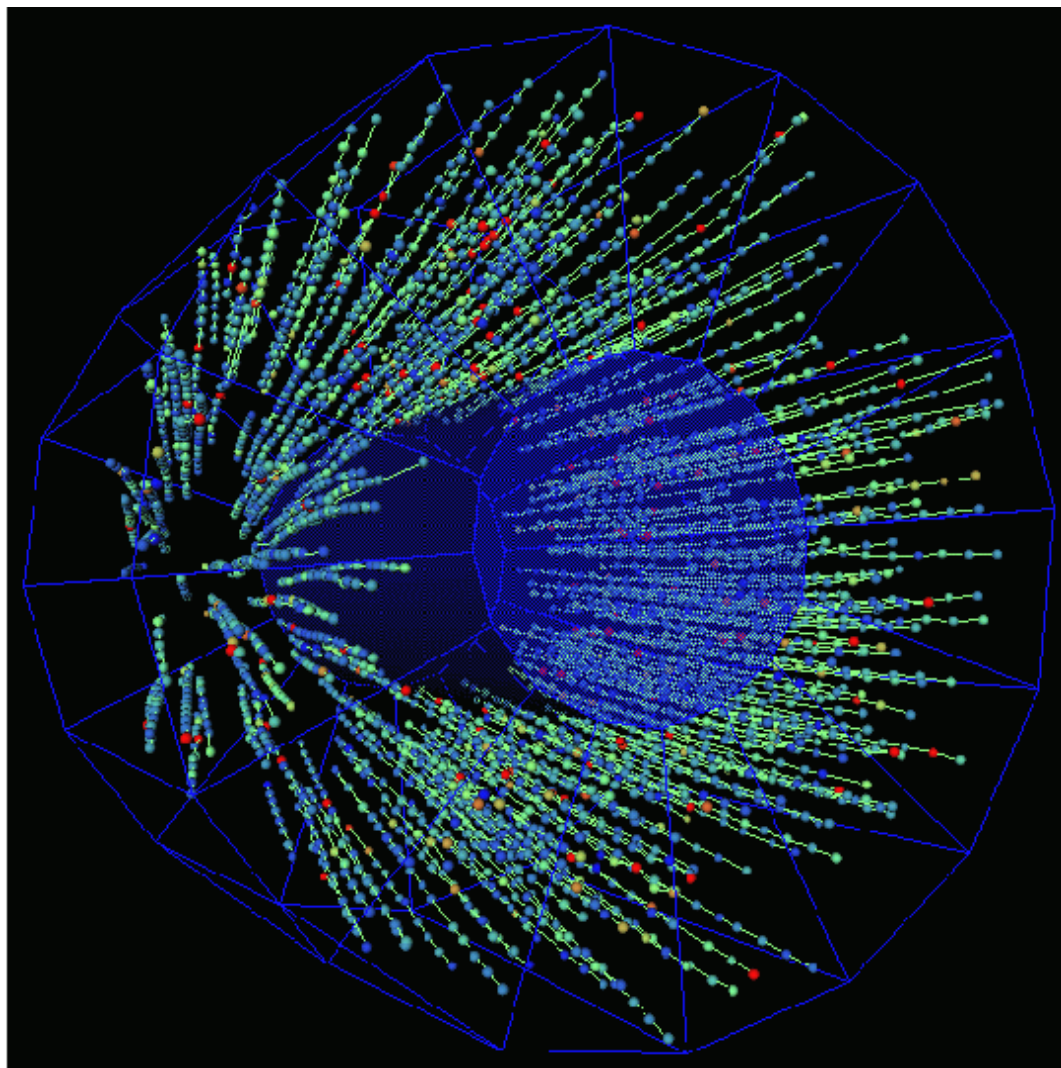
3.1.2. Hadrony. [30] Hadrony reagují silně a informaci z vnitřku interakční oblasti nám tedy nedonesou. Ovšem vzhledem k jejich hmotnosti a množství, ve kterém vznikají, můžeme předpokládat, že odnášejí většinu energie. Díky mnohým srážkám mezi silně interagujícími částicemi dochází přinejmenším k lokální termalizaci a hadrony nám tedy sdělí informaci o teplotě a hustotě energie v oblasti, ze které vyletěly - za předpokladu že jich pozorujeme dostatečné množství pro statistický popis.

3.1.3. Elektrony a pozitrony. [8] Velmi zajímavou sondou jsou také leptonové páry (jako elektron - pozitron). Narozdíl od hadronů (a ve shodě s fotony) jsou schopny přinést informaci přímo z prvních okamžiků srážky. Jelikož mají malou hmotnost, pohybují se relativistickými rychlostmi a ihned po vzniku velmi rychle opustí aktivní oblast. Navíc neinteragují silně a tedy jsou jen málo ovlivněny okolními částicemi (elektromagnetická interakce hraje v QGP pouze minoritní roli).

Na druhou stranu, experimentální pozorování elektronových párů je náročné. Při srážce vzniká velké množství částic, ale jen málo z nich jsou elektrony - o dva až tři řády méně než hadronů. Navíc je nutné rozpoznávat, které jsou podstatné. Mnoho elektronů přichází z pozadí či zdrojů nesouvisejících se srážkou, jako rozpady π^0 , či reakcí typu $\gamma \rightarrow e^+e^-$ díky fotonům z radiačního pozadí.

3.2. Detektory. V současné době se k pozorování dějů v mikrosvětě používají složité aparatury, sestávající se z mnoha jednotlivých detektorů. V této kapitole bude uvedeno několik druhů detektorů používaných v současnosti.

3.2.1. Time-Projection Chamber, TPC. [17] Při srážkách těžkých iontů typicky vzniká 1000 - 2000 nabitých částic a detekční aparatura musí být schopna je všechny zaznamenat, určit jejich trajektorie, hybnosti a klidové hmotnosti. K určení trajektorie slouží například i detektor nazývaný *Time-Projection Chamber*. V principu je to vlastně komora naplněná plynem, ve kterém letící nabitá částice zanechává stopu v podobě ionizovaných atomů. Elektrony vyražené částicí ze svých míst v elektronových obalech jsou pomocí elektrického pole kolmé na let částice odvedeny a dopadají na LCD display. Z obrazce, který na něm zanechají, lze trajektorii částice zrekonstruovat.



Trajektorie částic zachycené pomocí TPC na experimentu CERES. Upraveno počítačem.

3.2.2. *Silicon Pixel Detector*. Nejpřesnější (a ovšem také nejdražší) detektory určující trajektorie částic jsou integrované polovodičové prvky. Ionizační energie atomů polovodiče je v porovnání s plyny velmi nízká a částice zanechává v materiálu (nejčastěji křemík) silnou ionizovanou stopu. Náboj je odveden přiloženým napětím. Pomocí fotografických technologií lze na křemíkovou destičku nanést mřížkovou strukturu mnoha miniaturních buněk, zaznamenávajících průlet částice. Jejich signály dohromady velmi přesně určují dráhu sledovaných částic.

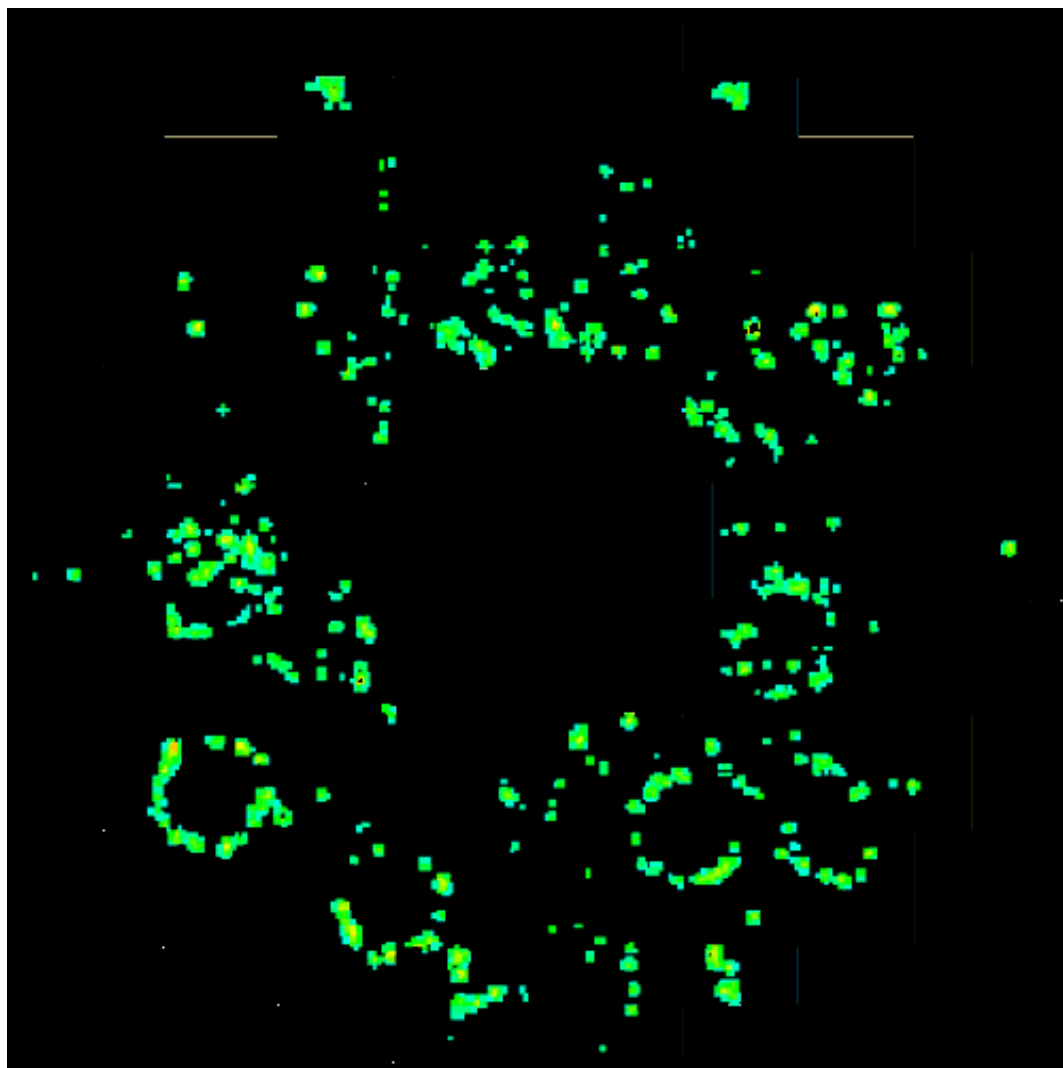
3.2.3. *Ring Imaging Cherenkovov Detector (RICH)*. [13] Kroužkový Čerenkovův detektor měří elektromagnetické záření, které vydává nabitá částice, pohybující se rychleji než světlo v daném prostředí. Toto záření je emitováno do pláště kužele, jehož vrcholový úhel závisí na rychlosti částice a je dán vzorcem

$$\cos \phi = \frac{1}{n\beta}$$

kde n je index lomu částice a β relativistická veličina $\frac{v}{c}$. To je nesmírně výhodné, správnou volbou materiálu lze dosáhnout toho, že detektor sleduje pouze velmi rychle se pohybující částice a pomalejší ignoruje. Tak lze snadno ze svazku "vytřídit" těžké (a při shodné energii tedy pomalé) částice.

Necháme-li kužel Čerenkovova záření dopadnout na LCD display, vytvoří kroužek a z jeho poloměru můžeme snadno vypočítat rychlost, jakou částice letěla. Změříme-li pak nějakým dalším způsobem její energii, lze zjistit, jakou měla částice klidovou hmotnost, a tedy ji identifikovat.

Toto zařízení se osvědčuje například při sledování leptonových párů. Pár $e^- - e^+$ zanechá na LCD display charakteristickou dvojici kroužků, podle kterých je lze dobře identifikovat a částečně i určit směr, kterým letěly.



Obrázek z detektoru RICH experimentu CERES.

3.2.4. *Time of Flight, TOF*. TOF je zařízení sloužící k odhadu rychlosti prolétající částice. V principu se jedná o dvě rovnoběžné stěny z hodoskopicky sestavených scintilátorů v určité vzdálenosti od sebe. Částice, která stěnami proletí, vyvolá reakci nejdříve v první a pak v druhé s určitým časovým odstupem. Rychlost je (při konstantní vzdálenosti stěn) přímo úměrná tomuto časovému rozdílu. Detektor tedy může snadno a rychle rozhodnout, zda jím prolétla rychlá či pomalá částice a podle potřeby ji ignorovat.

Ve srovnání s RICH je TOF méně přesný (zvláště při relativistických rychlostech), na druhou stranu je ale daleko rychlejší a je možné jej použít v reálném čase jako spoušť (trigger).

3.3. **Pozorovatelné fyzikální jevy.** Pozorování dějů na úrovni atomových jader je obtížné tím spíše, jedná-li se o děje trvající zlomky sekundy. Tvorba a existence

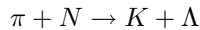
QGP je děj nesmírně krátký a pozorovat jej přímo nemůžeme. Existuje však několik fyzikálních jevů, které by měly doprovázet fázový přechod hadronové hmoty na QGP a zpět. Ty se snažíme potvrdit. Až dlouhé sledování těchto jevů nám může dát odpověď na to, zda QGP opravdu vzniká či nikoliv.

3.3.1. *Rozpínání a chlazení oblasti horké a husté hmoty.* [14] Při fázovém přechodu prvního druhu se skokem mění hustota energie a tlak. Tlak v hadronovém plynu je stejně jako v QGP úměrný čtvrté mocnině teploty, nicméně konstanta úměrnosti je pro QGP přibližně šestkrát vyšší. To znamená, že přítomnost QGP je charakterizována lokální oblastí vyššího tlaku. Na počátečním tlaku je ale závislý objem, při kterém dochází k vymrznutí, a to přibližně $V \approx p^{\frac{3}{4}}$. To znamená, že QGP vymrzá při větším objemu než hadronový plyn.

Objem vymrznutí závisí při srážce těžkých iontů také na její centralitě. Čím menší je srážkový parametr, tím více energie je deponováno v interakční oblasti a objem vymrznutí se zvětšuje. K tomuto systematickému zvětšení se pak přidá další, anomální, pokud srážka vede ke vzniku QGP.

Tímto jevem se zabývaly experimenty NA44 [23], NA45/CERES [24], NA49 [25], NA50 [26], NA52 [27], NA57/WA97 [28] a WA98 [29].

3.3.2. *Zastoupení různých typů hadronů (podivné částice).* [11] Kvark s má klidovou hmotnost kolem 150 MeV, na tvorbu páru $s - \bar{s}$ v prostředí QGP, kde se kvarky vyskytují volně, je tedy zapotřebí kolem 300 MeV. Za normálních podmínek nejpravděpodobnějším procesem, při kterém vznikají podivné kvarky, je



kde N označuje proton nebo neutron, ale práh této reakce je asi 500 MeV. Zatímco v prostředí QGP vznikají samotné s kvarky, které se pak do hadronů dostávají při fázovém přechodu (hadronizaci), za běžných podmínek se musí tvořit rovnou celé hadrony, což je energeticky náročnější. Z toho plyne, že dojde-li při srážce těžkých iontů k přechodu do QGP, bude se v produktech pozorovat více podivných částic, než když k fázovému přechodu nedojde.

Zastoupení podivných částic měřily například experimenty NA57/WA97 [28], NA49 [25] a NA50 [26].

3.3.3. *Potlačení produkce J/Ψ mezonů.* V roce 1986 T. Matsui a H. Satz předpověděli, že oproti hadronovému plynu bude silně potlačena produkce mezonů J/Ψ [9]. Mezony J/Ψ jsou tvořeny párem kvark c - antikvark \bar{c} . [26] [30] Vznikne-li takový pár v běžné hmotě, zůstane rovnou svázan a my pozorujeme tvorbu J/Ψ . V QGP ale nejsou kvarky uvězněny a vytvořený pár $c\bar{c}$ se rozletí. Při hadronizaci QGP pak dojde k tomu, že jen málo kvarků c a \bar{c} je dostatečně blízko u sebe a tudíž bude vznikat podstatně méně J/Ψ mezonů, než v běžné hmotě.

[26] V roce 1987 bylo na CERNském urychlovači SPS zahájeno pozorování mionových párů vznikajících při srážkách $p - p$ a těžších jader (O, S). Mionové páry mohou mít původ mimo jiné i v J/Ψ mezonech, které mají krátkou dobu života - jejich kvarky anihilují a dávají vzniknout právě páru mionů (tzv. Drell-Yanova tvorba).

[10] Vzhledem k tomu, že kvarky c a \bar{c} jsou velmi hmotné, je na jejich vytvoření třeba značné množství energie. Díky tomu mohou vznikat pouze v raných fázích srážky, kdy je hustota energie ještě dostatečně vysoká. J/Ψ jsou navíc velmi silně vázány a je těžké je rozbit. Pravděpodobnost, že se rozpadnou kvůli nějaké sekundární srážce s jinou silně interagující částicí, je malá. Dceřiné produkty jejich rozpadu (miony) neinteragují silně vůbec a snadno opustí oblast srážky. Díky všem těmto okolnostem je pozorování tohoto jevu patrně nejprůkaznějším potvrzením fázového přechodu QGP - hadronový plyn (a tudíž důkazem existence QGP).

Potlačení produkce J/Ψ mezonů se věnovaly experimenty NA38 [31] a NA50 [26].

3.3.4. *Přímá informace z fáze kvark-gluonového plazmatu.* [14] Jak QGP expanduje, klesá hustota energie a teplota. V okamžiku, kdy teplota dosáhne jisté kriticky nízké hodnoty, nastane fázový přechod a QGP zhadronizuje. Během doby své expanze v celém objemu QGP vznikají částice. Protože komponenty QGP vesměs nesou elektrický náboj, díky elektromagnetické interakci mezi nimi vyzařuje QGP *přímé fotony*. Důležitou informaci dávají fotony vznikající při srážkách kvarků s ostatními kvarky a gluony.

Fotony vznikají ale i při dalších procesech, jako například při rozpadech π^0 a ν^0 . Teoreticky je možné je rozlišit od přímých fotonů, neboť díky zákonu zachování hybnosti vznikají v párech s identickou vlnovou délkou. V praxi je to pochopitelně nesmírně obtížný úkol a přímé fotony zatím nebyly přesvědčivě pozorovány. V experimentech na SPS byl pouze určen horní limit jejich příspěvku 5-7 % z fotonů vzniklých v hadronové fázi. V experimentech na RHIC a LHC by však měly převažovat, takže snad získáme první přímou informaci z fáze QGP.

Přímé fotony sledoval například experiment WA98 [29].

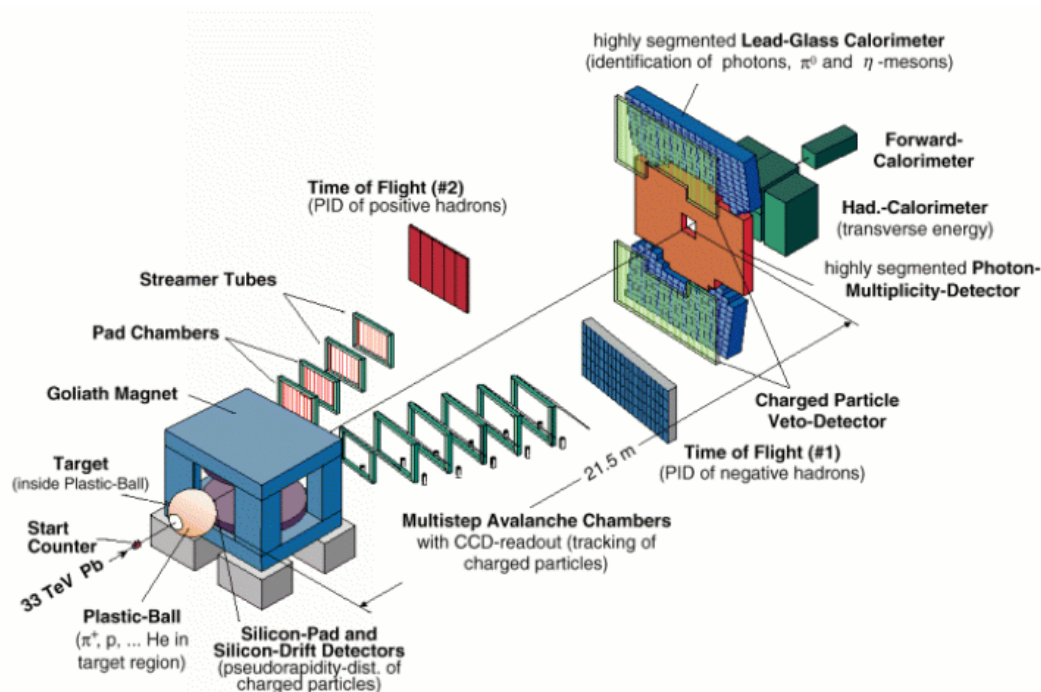
3.3.5. *Změna hmotností a dob života vektorových mezonů v husté a horké jaderné hmotě.* [30] K tomuto jevu má dle teoretických předpovědí docházet v prostředí s vysokou hustotou energie. Se vzrůstající energií by hmotnost konstituentních kvarků měla být shodná s hmotností normálních (tzv. nastolení chirální symetrie). Tento jev postihuje všechny částice, kvůli technickým problémům je ale možné jej pozorovat jen u některých. Nejvhodnějšími kandidáty jsou vektorové mezony ρ , Ω a Φ , protože mají krátkou dobu života (řádově desítky femtosekund) a rozpadají se na leptonové páry ještě před vymrznutím. Ty pak opustí prostor srážky neovlivněné okolím a z jejich energie lze odvodit hmotnost původní částice.

Tímto jevem se zabýval experiment NA45/CERES [24].

3.4. Některé ukončené experimenty.

3.4.1. *WA98 - CERN, urychlovač SPS.* [29] WA98 se zabýval studiem statistik fotonů, neutrálních hadronů a nabitých částic při srážkách jader olova. Důležitým počinem tohoto experimentu bylo například určení horní hranice příspěvku přímých fotonů z fáze QGP k celkovému spektru při srážkách těžkých jader na 3 - 4 procenta.

Uspořádání experimentu WA98 je patrné z obrázku:



- **Plastic-Ball detector** Kulový plastový detektor slouží k měření energie částic vyletující pod velkým úhlem na směr nalétávajících částic. Pokrývá celý azimutální úhel a polární od 30 do 160 a téměř úplně obklopuje terčík.
- **Silicon drift detector** (Křemíkový driftový detektor) - Rychlá nabitá částice prolétající polovodičem vytváří ionizaci okolních atomů sekundární náboje, které se díky přivedenému napětí začnou pohybovat kolmo na směr původní částice. Změřením doby jejich letu lze určit polohu původní částice s přesností na 10^{-6} m.
- **Silicon Pad Detector** (Křemíkový násobnostní detektor) - Detektor má 1012 částí a měří, kolik nabitých částic skrze něj prošlo. I v případě, že dvě částice zasáhnou tutéž část, je možné tuto událost rozeznat od zásahu jednou částicí ze síly signálu.
- **Multistep Avalanche Chambers** (ARM1, Spektrometr negativně nabitých částic) - Při průletu komorami vytváří nabitá částice elektronovou spršku, která excituje okolní prostředí a vzniklé fotony jsou snímány CCD kamerami. Z těchto záznamů je pak rekonstruována dráha částice a doba letu.
- **Pad Chambers, Streamer Tubes** (ARM2, Spektrometr pozitivně nabitých částic) - Měření probíhá analogicky jako u negativně nabitých částic, spršky jsou ale snímány přímo.
- **Photon-Multiplicity Detector** (Fotonový detektor) - Fotony jsou detekovány přes elektromagnetické spršky, které vyvolávají v olovené desce. Tato deska má tloušťku pouze tří radiačních délek a hadrony jí většinou bez povšimnutí projdou.

- **The Charged Particle Veto Detector** - Detektor používaný pro rozpoznání a vyloučení nabitých částic, které by mohly zasáhnout a zmařit detektor LEDA.
- **LEDA** (LEad glass Detector Array) - Detektor pro rozpoznání a rekonstrukci π^0 a η -mezonů.
- **MIRAC** (MIdRApidity Calorimeter) - Detektor měřící energii proudící kolmo na směr nalétávajících částic.
- **Zero Degree Calorimeter** (Kalorimetr pro přímý směr) - Kalorimetr měřící energii diváků (zbytků jader, která se přímo neúčastnila srážky).

3.4.2. *NA38, NA50 - CERN, urychlovač SPS.* [10] Na NA38 a NA50 proběhly intenzivní výzkumy tvorby mezonu J/Ψ při srážkách těžkých iontů. Cílem bylo najít dostatečně přesné schema, podle kterého J/Ψ vznikají, a prokázat tak existenci QGP a volných kvarků.

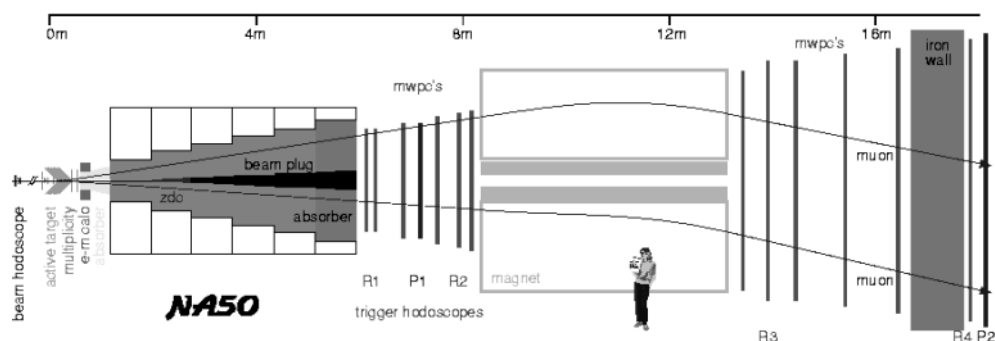
Experiment NA38 zahájil po roce 1986 sběr dat ze srážek protonů, kyslíku a síry. Analýza těchto dat ukázala, že výtěžek tvorby J/Ψ je ve shodě s předpovídaným pro běžnou hmotu. Ten klesá s rostoucím počtem nukleonů jader (neboť roste pravděpodobnost zachycení páru $c\bar{c}$ po jejich vzniku). Toto "normální" potlačení produkce J/Ψ určilo referenční hladinu, ke které se vztahují další měření.

První odchylka od této referenční hladiny byla pozorována na experimentu NA50 při srážkách jader olova o energii 158 GeV/nukleon v roce 1995. Na podrobné studium ale nebylo dostatečné množství dat. Celý jev totiž závisí na centralitě srážky a při malých intenzitách svazků je pravděpodobnost přímé čelní kolize příliš nízká.

V roce 1996 se zvýšila luminosita urychlovače natolik, že to umožnilo ztrojnásobit objem nasbíraných dat. Bylo zjištěno, že srážky Pb - Pb vykazují normální tvorbu J/Ψ až do okamžiku, kdy energie rozptýlená kolmo na směr letu jader olova přesáhne 40 GeV, což odpovídá srážkovému parametru kolem 8 fm. Za touto hranicí byl naměřen prudký pokles v produkci mezonů J/Ψ , což lze nejlépe vysvětlit fázovým přechodem na QGP.

Do roku 1998 se NA50 snažil co nejlépe rozeznat přímé centrální srážky jader, které umožňují nejlépe pozorovat daný jev. Při málo centrální srážce totiž rozbité fragmenty jader, které se přímo srážky neúčastnily (diváci) matou přístroje a po sekundárních odrazech vnášejí nepřesnosti do měření rozptylu energie v kolmém směru. Během roku 1998 NA50 zaznamenal přes 80 miliónů příznivých událostí (mionové páry). Po aplikování selektivních filtrů zbylo přibližně 40000 jevů tvorby J/Ψ .

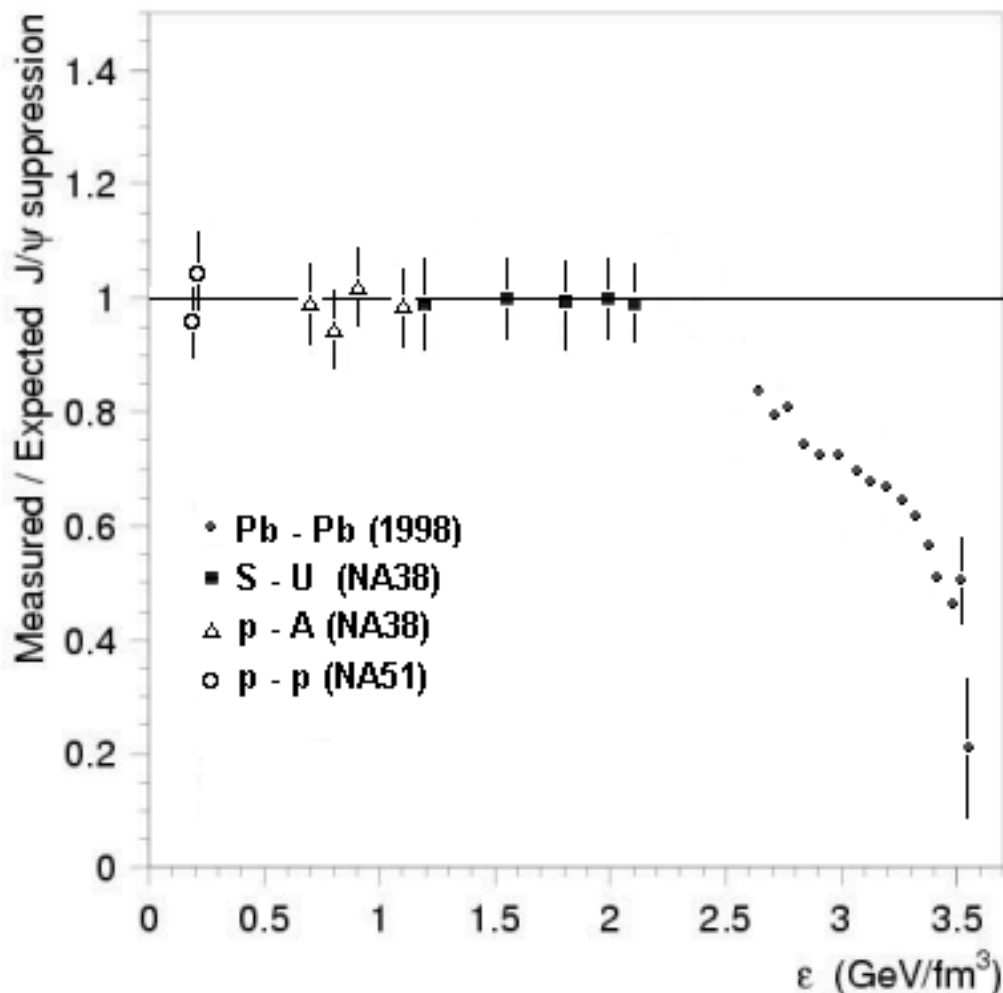
Uspořádání experimentu NA50 je patrné z obrázku.



Hlavní komponenty detektoru byly následující:

- spektrometr mionových párů
- elektromagnetický kalorimetr měřící energii uvolněnou v kolmém směru (E_T)
- přímý kalorimetr měřící energii jader, které proletěly terčem a žádné reakce se nezúčastnily (E_{ZDC})
- křemíkový stripový detektor pro měření počtu nabitých částic
- čítače rozlišující jednotlivé události (rozlišení časového intervalu po sobě jdoucích jader bylo kolem 20 ns)

V různých letech byly používány různé typy terčů. Zatímco v roce 1995 a 1996 bylo terčů několik za sebou v celkové tloušťce 7 mm resp. 12 mm, v roce 1998 tvořil cíl jediný tlustý terč široký 3mm. Takováto redukce celkové šířky terče významně snížila pravděpodobnost, že fragmenty rozbitých jader (diváci) vstoupí do nějaké sekundární interakce a naruší měření.

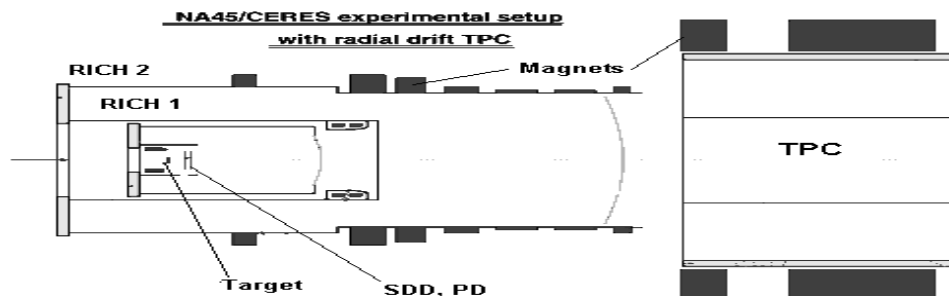


Graf zobrazuje anomální produkci J/Ψ mezonů vzhledem k očekávané. Porovnává čtyři experimenty. Data označená plným kolečkem pocházejí z experimentu NA50.

3.4.3. *CERES/NA45 - CERN, urychlovač SPS.* [13] Experiment CERES byl určen pro detekci elektronových párů s invariantní hmotností do $2\text{GeV}/c^2$. Původně se experiment sestával ze dvou Čerenkovových detektorů (RICH) umístěných před a za magnetickým polem. Tyto detektory identifikovaly částice a zjišťovaly jejich trajektorii, rozptyl v magnetickém poli pak určoval hybnost částic. Na tomto uspořádání byly pozorovány srážky p-Be, p-Au a S-Au.

V letech 1994 a 1995 byl detektor vylepšen, aby byl schopen pozorovat také srážky iontů s vysokým počtem nukleonů, jako třeba Pb-Au. K původnímu experimentálnímu uspořádání byly přidány dva křemíkové driftové detektory (SDD) a proporcionální čítač (PD). Tato rozšíření umožňovala přesněji určit dráhy částic vznikajících při srážce, určit jejich celkovou energii a násobnost.

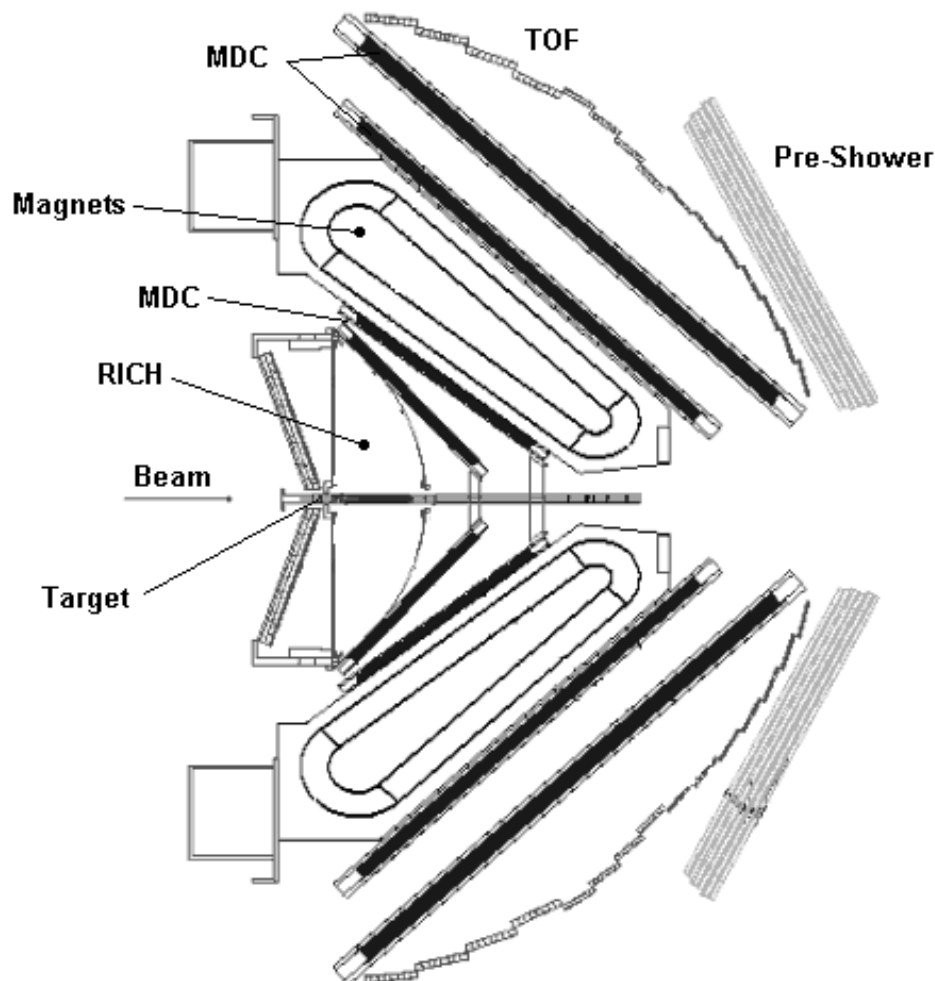
Další přístroj byl k detektoru přidán v roce 1998 a to *Time Projection Chamber* (TPC), zatímco proporcionální čítač byl odebrán. Zároveň mohlo být vypojeno magnetické pole mezi Čerenkovovými detektory. Ty se tak staly zcela rovnocennými, což zdvojilo data a zlepšilo statistiku. Přesnost celé aparatury značně vzrostla.



3.5. Současné a plánované experimenty.

3.5.1. *HADES - Darmstad.* [4] HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) je připravovaný spektrometr s vysokou přesností a rozlišením, určený pro pozorování dvojic elektron - pozitron, vznikajících při rozpadech vektorových mezonů. Z výskytu a energie leptonových dvojic bude schopen rozlišit klidovou hmotnost původního mezonu s přesností na 1 % a díky mohutným digitálním systémům znamená $\approx 10^7$ událostí za sekundu.

Uspořádání spektrometru HADES je na obrázku:



Hlavní komponenty detektoru jsou následující:

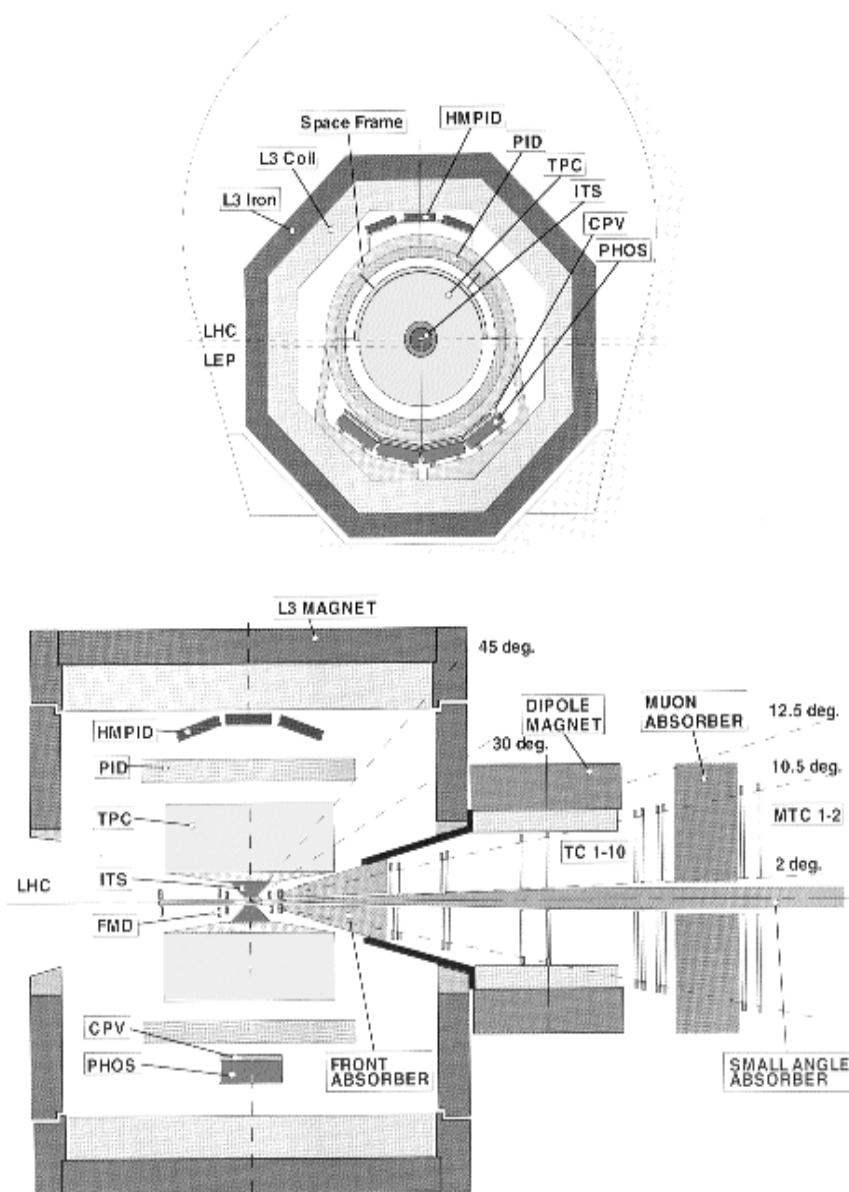
- **Time-Of-Flight Wall TOF** je sestava 1056 plastických scintilátorů uspořádaných do dvou stěn, obklopující interakční oblast. Vnitřní stěna sestává ze 14 modulů pokrývajících oblast $18^\circ - 45^\circ$ a vnější z osmi, $45^\circ - 85^\circ$. Tato konfigurace se ukázala jako nevhodnější po optimalizačních simulacích metodou Monte Carlo.

Detektor by měl být schopen rozlišit částice s dobou letu pod 12.5 ns a spolehlivě tak z dalšího pozorování vyloučit pomalé (a tedy těžké) částice. Z místa, kterým částice skrz stěny proletěla, lze navíc usoudit orientaci srážkového parametru (tedy směr, který určovala spojnice těžišť sráživších se jader).
- **Pre-Shower detector** Leptony letící v malém úhlu vzhledem k původnímu směru svazku jde velmi špatně odlišit od hadronů jen pomocí TOF.

Proto má HADES další zařízení k detekci leptonových párů - detektor elektromagnetických spršek (Pre-Shower detector). Ten je sestaven z olověných destiček tak, aby byla maximalizována pravděpodobnost iniciace elektromagnetické spršky prolétajícím elektronem a naopak minimalizována pravděpodobnost vzniku spršky hadronové.

- **Multi-wire Drift Chamber MDC** je magnetický spektrometr pro měření hybnosti nabitých částic. Magnety jsou schopny vyvinout pole o intenzitě až 0.7 Tesla.
- **Ring Imaging Cherenkovov Detector (RICH)** Tento detektor tvoří jádro HADESu. Je schopen spolehlivě ignorovat obrovské množství pomalých hadronů, vznikajících při srážkách těžkých iontů a s vysokou přesností změřit rychlosti leptonových párů (obou částic najednou). Předpokládá se, že na jeden vznik a rozpad vektorového mezonu s produkcí leptonového páru připadá více než sto hadronů, a s tím také počítá konstrukce RICH.
- **Spoušť (trigger) a sběr dat** Spouštěcí systém HADESu má dvě hardwareové úrovně. Jednak celkovou, centrální a druhou individuální, pro každý jednotlivý detektor zvlášť. O sběr dat se stará počítačový systém s průchodností 14 Mbyte/s.

3.5.2. *ALICE - CERN, urychlovač LHC.* [31] [32] ALICE (A Large Ion Collider Experiment) je experiment připravovaný na CERNském urychlovači LHC od roku 1993. Je optimalizován pro sledování srážek iontů olova při středních energiích kolem 5.5 TeV, plánovány jsou ale i pozorování reakcí p-p, p-jádro a srážek lehkých iontů.



Hlavní komponenty ALICE jsou následující:

- **Inner Tracking System, ITS** Vnitřní systém pro sledování částic je složen z šesti cylindrických vrstev křemíkových detektorů a obklopuje většinu srážkového prostoru. Jeho hlavní funkcí je identifikace částic s nízkou hybností a sledování rozpadů hyperonů a podivných částic.
- **TPC** Time Projection Chamber je hlavní systém ALICE pro sledování drah částic. Jejich rozlišení zajišťuje slabé magnetické pole, ve kterém je detektor umístěn.

- **Magnet L3** Velký solenoidální magnet generující slabé magnetické pole o intenzitě $0.2 T$. V prostoru TPC pole zajistí rozlišení částic podle hybností (kolem $100 MeVc^{-1}$, částice s nižšími hybnostmi zachytí ITS).
- **Particle Identification, PID** Detektor k identifikaci pomalých částic je tvořen systémy TOF.
- **High Momentum Particle Identification, HMPID** Systém pro identifikaci rychlých částic je složen z detektorů RICH
- **Photon Spectrometer, PHOS** Scintilační fotonový spektrometr určující fotony, π^0 a další lehké neutrální částice. Scintilátory jsou tvořeny krystalem $PbWO_4$ a výstupní záření je snímáno polovodičovými prvky (běžné fotonásobiče v magnetickém poli nefungují). Celá sestava pokrývá $18m^2$ a je tvořena 36 000 prvky.
- **Forward Muon Spectrometer** Mionový spektrometr zachycuje mionové páry vznikající při rozpadech J/Ψ mezonů a jiných kvarkových rezonancí. Pokrývá ostré úhly vzhledem ke svazkům srážejících se částic.

Výzkumný program na detektoru ALICE by měl být zahájen v roce 2006.

REFERENCE

- [1] Y. SCHUTZ: Photon physics at ultrarelativistic-energy heavy-ion collisions, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 50 (2000)
Rozvedení výhod a nevýhod fotonů jako sond pro zkoumání dějů při srážkách těžkých iontů.
- [2] H. LÖHNER: Detectors and techniques in relativistic heavy ion physics, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 50 (2000)
Popis měřících metod a detektorů používaných při výzkumu srážek těžkých iontů.
- [3] S. SCHRAMM: Effective chiral models of nuclear matter and nuclei, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 50 (2000)
Článek prezentuje fenomenologický chirální model $SU(3)$ popisující vlastnosti hadronů, jader a hyperjader, založený na obecných symetriích QCD.
- [4] A. KUGLER: High acceptance di-electron spectrometer - tool for study of hadron properties in the nuclear medium, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 50 (2000)
Popis detektoru HADES.
- [5] G. MARTÍNEZ: A photon detector for relativistic heavy ion collisions
Popis detektoru PHOS pro plánovaný experiment ALICE.
- [6] J. SCHUKRAFT: Ultra-relativistic heavy-ion collisions: Searching for the QGP, Nuclear Physics A553 (1993)
Přehledový článek
- [7] H. J. CRAWFORD, C. H. GREINER: The search for strange matter, Scientific American (Jan 1994)
- [8] CERES/NA45 COLLABORATION: Low-mass dilepton pair production in Pb-Au Collisions at 40 AGeV, PRAMANA journal of physics, Vol. 53 No. 6 (December 1999)
- [9] T. MATSUI, H. SATZ: J/Ψ suppression by quark-gluon plasma formation, Phys. Letters 178B (1986)
Teoretická předpověď

- [10] NA50 COLLABORATION: Evidence for deconfinement of quarks and gluons from the J/Ψ suppression pattern measured in Pb - Pb collisions at the CERN - SPS, Phys. Letters B477 (2000)
Zpráva o pozorování potlačení produkce J/Ψ mezonů při srážkách jader olova za vysokých energií.
- [11] STANISLAW MROWCZYNSKI: Quark Gluon Plasma, Acta Phys. Pol. B29 (1998)
Souhrnné základní informace o QGP
- [12] WA98 COLLABORATION: Direct Photon Production in 158 A GeV 208Pb + 208Pb collisions, Phys. Rev. C (2000)
- [13] GUNAR HERING: Dielectron production in heavy ion collisions at 158 GeV/c per nucleon, PhD thesis, Technischen Universität Darmstad, 2001
- [14] CHEUK-YIN WONG: Signatures of Quark-Gluon Plasma Phase Transition in High-Energy Nuclear Collisions
Popisy projevů fázového přechodu z hadronového plynu na QGP

MAPA WEBU

- [15] <http://www-hades.gsi.de/>
Stránky experimentu HADES
WWW.CERN.CH - *Stránky Evropské organizace pro jaderný výzkum (CERN)*
Výzkumné zprávy:
- [16] <http://cern.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/NewStateMatter/science.html>
Zpráva o nalezení kvarkové hmoty
Populární články a tiskové zprávy:
- [17] <http://alice.web.cern.ch/Alice/html/challenge/>
Základní výzkumy fyziky těžkých iontů
- [18] <http://cern.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/NewStateMatter//story.html>
Zpráva o nalezení kvarkové hmoty
Stránky CERNských experimentů:
- [19] <http://alice.web.cern.ch/Alice/>
A Large Ion Collider Experiment - plánovaný experiment na urychlovači LHC
- [20] <http://alice.web.cern.ch/Alice/TDR/>
Technické zprávy o experimentu ALICE
- [21] <http://www-aix.gsi.de/alice/>
Technický Dokumentační Projekt experimentu ALICE
- [22] <http://na38.web.cern.ch/NA38/>
Experiment NA38 - Studium tvorby vektorových mezonů a mionových párů při srážkách protonů, jader kyslíku a síry na urychlovači SPS v CERNu
- [23] <http://www.nbi.dk/na44/>
Experiment NA44 - The Focussing Spectrometer
- [24] <http://www.physi.uni-heidelberg.de/groups/ceres/>
Experiment CERES/NA45

- [25] <http://na49info.cern.ch/>
Experiment NA49 - Hadronový detektor s vysokým rozlišením
- [26] <http://na50.web.cern.ch/NA50/>
Experiment NA50 - Důkaz existence volných kvarků pozorováním potlačení produkce mezonů J/Ψ
- [27] <http://www.lhep.unibe.ch/newmass/>
Experiment NA52 - Hledání částiček kvarkové (podivné) hmoty
- [28] <http://wa97.web.cern.ch/WA97/>
Experimenty WA97 a NA57 - Tvorba podivných baryonů při srážkách iontů olova
- [29] <http://wa98.web.cern.ch/WA98/>
Experiment WA98 - Fotonový a hadronový spektrometr s vysokým rozlišením
- [HTTP://WWW.UJF.CAS.CZ/](http://WWW.UJF.CAS.CZ/) - *Stránky Ústavu Jaderného Výzkumu Řež*
- [30] <http://hp.ujf.cas.cz/wagner/prednasky/>
Přednášky V. Wagnera
- [31] <http://hp1.ujf.cas.cz/hades/>
Stránky experimentu HADES v Řeži

RŮZNÉ DALŠÍ ZDROJE

- [32] ALICE COLLABORATION: ALICE - Technical Proposal, CERN/LHCC/95-71 (1995)
Tištěný popis detektoru ALICE vydaný CERNem v roce 1995.
- [33] J. KVASNICA: Termodynamika
Učebnice fenomenologické termodynamiky.