



Záverečná správa o riešení projektu

Názov projektu **Silno interagujúca hmota v extrémnych podmienkach (SIMEX)** Evidenčné číslo projektu **APVV-0050-11**

Zodpovedný riešiteľ **RNDr. Štefan Olejník, DrSc.**
Príjemca **Fyzikálny ústav SAV**

Začiatok riešenia projektu **07/12**

Koniec riešenia projektu **12/15**

ROZBOR RIEŠENIA PROJEKTU (max. 10 strán)

Uvedte podľa nasledujúcej záväznej osnovy:

- 1. Postup prác pri riešení projektu za posledný rok/obdobie u príjemcu, ako aj spolupríjemcov podpory APVV vzhľadom na harmonogram riešenia projektu**
- 2. Rozbor výsledkov za celé obdobie riešenia vzhľadom na stanovené ciele**
- 3. Zoznam výstupov a prínosov projektu za posledný rok/obdobie** – uvedte v prílohe – formulár Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie (priložte kópie deklarovanych výstupov)

↓↓

1.

Postup prác pri riešení projektu za posledný rok u príjemcu, ako aj spolupríjemcov podpory APVV vzhľadom na harmonogram riešenia projektu

Projekt bol v roku 2015 riešený nezmeneným kolektívom riešiteľov – piatich vedeckých pracovníkov FÚ SAV, UMB a ÚEF SAV a jednej doktorandky. Podľa harmonogramu (časť VV-B schváleného projektu) sa obdobie od 1.1. do 31.12.2015 prekrývalo s časťou 3. etapy riešenia projektu a s poslednou etapou, fázou finalizácie projektu. Ako sme uviedli v upresnení harmonogramu prác na r. 2015 (4. časť správy o riešení projektu za r. 2014) hlavným cieľom bolo završenie rozpracovaných kľúčových výskumných problémov, publikovanie dosiahnutých výsledkov a ich prezentácia na medzinárodných vedeckých podujatiach. Tomu zodpovedá aj publikačná produkcia, ktorá bola v r. 2015 vyššia ako za celých predchádzajúcich dva a pol roka riešenia projektu (pozri zoznam na jeho webovej stránke <http://tinyurl.com/APVV-0050-11-Publikacie>).

V návrhu projektu boli hlavné ciele rozdelené do štyroch skupín. V 1. a 2. časti správy zhrnieme preto postup prác a pokrok pri riešení v r. 2015 resp. dosiahnuté výsledky za celé obdobie riešenia v každej skupine zvlášť. Čísla v hranatých zátvorkách odkazujú na odborné články, ktorých zoznam sa nachádza na konci tejto správy.

I. *Uväznenie farby a štruktúra vákuu kvantovej chromodynamiky*

Počas roka 2015 sme pokračovali vo výskume vlnového funkcionálu základného stavu kvantovej chromodynamiky (QCD) v temporálnej kalibrácii. V minulosti sme porovnávali relatívne váhy konfigurácií neabelovských konštantných kalibračných polí a abelovských rovinných vln v (2+1)- a (3+1)-rozmernom časopriestore, ktoré sme určili numerickými simuláciami Yangovej–Millsovej (YM) teórie s kalibračnou grupou SU(2) na mriežke, s očakávaniami, ktoré vyplývajú z približného vákuového vlnového funkcionálu (VVF) [I.1], a našli dobrú zhodu [I.2]. Takéto súbory sú však netypické a v reálnom vákuu QCD nemajú významnú úlohu. Preto sme sa v tomto roku sústredili na štúdium konfigurácií polí, ktoré sú bližšie k realistickým rovnovážnym mriežkovým konfiguráciám. Z reálnych vákuových konfigurácií vo fixovanom čase sme pomocou rýchlej fourierovskej transformácie selektovali komponentu s vybranou zložkou hybnosti k , jej modifikáciami sme získali súbory blízkych konfigurácií, ktoré sme spätne transformovali do súradnicového priestoru a následne určovali ich relatívne váhy v numerických simuláciách. Vyšetrovali sme rôzne spôsoby vypínania/zapínania módov v priestore hybností, rôzne modifikácie konfigurácií, rôzne typy súborov pri rôznych hodnotách väzbovej konštanty, atď. Z výsledkov, ktoré sme v priebehu roka získali, ešte nevyplývajú jednoznačné závery. Naďalej v tomto výskume pokračujeme, uskutočňujeme simulácie, výsledky analyzujeme a budeme ich v budúcnosti publikovať.

Doterajšie výsledky boli prehľadne zhrnuté v článku [I.3] a v pozvanej prednáške na konferencii *4th Winter Workshop on Nonperturbative Quantum Field Theory*. Prednáška mala byť uverejnená v časopise *Conference Papers in Science*, organizátori však kvôli neserióznemu prístupu a neprimeraným finančným požiadavkám vydavateľa (Hindawi Publishing Corp.) od vydania zborníka ustúpili. Preto sme text prednášky zverejnili iba na webe [I.4].

Ďalším našim úsilím bolo nájsť efektívnu priamu metódu na generáciu konfigurácií kalibračných polí s rozdelením podľa nášho návrhu približného VVF v (3+1) rozmeroch. Uskutočnili sme viacero pokusov, no problémy v dôsledku Bianchiho podmienok sa zatiaľ nepodarilo vyriešiť. Sľubný impulz sme získali počas novembrového pobytu dr. O. Borisenka vo FÚ SAV. Upozornil nás na svoju dávnejšiu prácu [I.5], v ktorej boli riešené problémy prechodu od intenzít farebných polí na mriežke k potenciálom. Práca obsahuje explicitné vzťahy, ktorých implementáciu a využitie v našej metóde v súčasnosti zvažujeme.

II. *Tvrde sondy v procesoch na jadrových terčoch*

Pokračovali sme vo výskume jadrových efektov v produkcii rôznych častíc (hadronov, priamych fotónov, Drellových–Yanových párov) v protón-jadrových interakciách a v zrážkach ťažkých iónov.

Študovali sme produkciu vedúcich častíc s veľkými priečnymi hybnosťami p_T v zrážkach ťažkých iónov vyvinutím modelu pre evolúciu bezfarebného dipólu v jadrovej hmote so započítaním efektov farebnej filtrácie [II.1]. Krátka produkčná dĺžka vedúcich hadronov spôsobuje silný prejav efektov farebnej priezračnosti. To vedie k silnému rastu jadrového modifikačného faktora $R_{AA}(p_T)$ pri veľkých hadronových p_T . V kinematickej oblasti zariadenia RHIC sme započítali doplnujúce potlačenie produkcie častíc, ktoré súvisí s ohraničeniami, spôsobenými zachovaním energie. Výpočty obsahujú len jediný parameter, súvisiaci s jadrovou hustotou, a našli sme energeticky závislé maximálne hodnoty transportného koeficientu $q_0 = 0.7, 1.0$ and $1.3 \text{ GeV}^2/\text{fm}$, zodpovedajúce energiám zrážky $\sqrt{s} = 62 \text{ GeV}, 200 \text{ GeV}$ and 2.76 TeV . Prezentovali sme širokú paletu predpovedí pre jadrový modifikačný faktor a azimutálnu asymetriu, ktoré sú v dobrom súhlase s dostupnými údajmi zo zariadení RHIC a LHC.

Práca [II.2] je venovaná analýze hlavných príčin, ktoré spôsobujú silné jadrové potlačenie produkcie častíc v zrážkach ťažkých iónov. Proces hadronizácie po tvrdej zrážke môže byť interpretovaný ako šírenie partónu s veľkým p_T , ktorý postupne regeneruje svoje farebné pole, intenzívne vyžaruje gluóny a stráca popri tom energiu. Pokiaľ tento proces končí produkciou vedúcich častíc, nemôže trvať dlho, pretože vzniknutá častica unesie podstatnú časť hybnosti partónu. V dôsledku toho energetické straty partónu nie sú hlavnou príčinou „zhášania“ hadronov, pozorovaného v zrážkach ťažkých iónov. Jadrové potlačenie je možné potom opísať ako oslabenie vytvoreného bezfarebného dipólu po skončení procesu hadronizácie v jadrovej hmote. Tento mechanizmus bol opísaný pomocou metódy dráhových integrálov a je v súlade s dostupnými experimentálnymi hodnotami pre jadrové potlačenie a azimutálnu asymetriu v produkcii hadronov v širokom intervale energií a priečných hybností.

V práci [II.3] prezentujeme rozsiahlu fenomenologickú štúdiu produkcie Drellových–Yanových (DY) párov v protón-protónových zrážkach pri rôznych energiách v rámci prístupu farebného dipólu. Okrem predtým študovanej produkcie virtuálnych fotónov sme zahrnuli po prvý raz aj príspevok Z^0 bozónu pri

veľkých invariantných hmotnostiach dileptónov. Skúmali sme diferenciálny účinný prierez produkcie DY párov ako funkciu invariantnej hmotnosti, rapidity a priečnej hybnosti dileptónového páru produkovaného pri energiách zodpovedajúcich urýchľovačom RHIC a LHC. Analyzovali sme tri rozdielne fenomenologické modely pre dipólový účinný prierez a našli sme rozumný súhlas s dostupnými experimentálnymi hodnotami. Ako ďalší test formalizmu farebného dipólu sme skúmali korelačnú funkciu azimutálneho uhla medzi dileptónovým párom a dopredným piónom pre rozdielne energie, dileptónové rapidity a invariantné hmotnosti. Charakteristická štruktúra dvojitého maxima okolo uhla 180° predpovedaná pre veľmi dopredné pióny a dileptónové páry nízkych invariantných hmotností je citlivá na saturačné efekty a môže byť testovaná budúcimi meraniami produkcie DY párov a piónov v protón-protónových zrážkach.

Práca [II.4] je venovaná hlavne štúdiu azimutálnej korelačnej funkcie medzi DY páromi pri centrálnej rapidite a centrálnymi/doprednými piónmi. Takéto štúdium je kľúčové pre pochopenie pozadia v produkcii ťažkých kvarkónií (napr. J/Ψ , Y) pri veľkých priečných hybnostiach, ktoré môžu byť sprevádzané hadrónom s veľkým p_T z fragmentácie dodatočného gluónu. Takéto štúdium sa realizovalo v rámci farebne-singletného modelu. Najprv sme prezentovali predpovede pre účinné prierezy produkcie J/Ψ a Y ako funkcie priečnej hybnosti v dobrom súhlase s existujúcimi experimentálnymi hodnotami pri rôznych energiách. Potom sme navrhli študovať korelácie medzi jetmi s veľkými p_T a J/Ψ (Y) v dileptónovom kanáli pri centrálnych rapiditách.

Skúmali sme ďalej prejavy jadrových efektov v produkcii DY párov a priamych fotónov v protón-jadrových zrážkach [II.5]. Po prvý raz boli tieto efekty študované v rámci formalizmu Greenových funkcií, ktorý prirodzene zahŕňa efekty farebnej priezračnosti a kvantovej koherencie. Numerické výsledky pre jadrový modifikačný faktor boli porovnané s existujúcimi experimentálnymi hodnotami. Prezentovali sme aj množstvo predpovedí pre jadrové potlačenie ako funkcie p_T , rapidity a invariantnej hmotnosti leptónového páru, ktoré môžu byť verifikované experimentami na RHIC a LHC. Zistili sme, že jadrové potlačenie je spôsobené predovšetkým efektami kvantovej koherencie, ako aj efektívnymi energetickými stratami indukovanými mnohonásobnými interakciami partónov, ktoré nastanú ešte pred tvrdou zrážkou.

V práci [II.6] sme analyzovali produkciu DY párov v protón-jadrových interakciách v kinematickej oblasti, zodpovedajúcej experimentom na LHC, v rámci formalizmu farebného dipólu. Leptónové páry produkované v tvrdej zrážke nie sú sprevádzané žiadnou interakciou v konečnom štádiu, ani energetickými stratami či absorpciou. Preto dileptóny môžu slúžiť ako čistejšia sonda pre štúdium prejavu jadrových efektov ako inkluzívna produkcia hadrónov. Uskutočnili sme systematickú analýzu týchto efektov v produkcii DY párov v zrážkach p+Pb na LHC. Predpovede pre jadrové potlačenie ako funkcie p_T , rapidity a dileptónovej invariantnej hmotnosti môžu byť verifikované experimentami na LHC. Analyzovali sme gluónové tienenie, ktoré dominuje hlavne pri malých a stredných hodnotách p_T .

Výsledky štúdia jadrových efektov v produkcii hadrónov, ťažkých kvarkónií, DY párov a priamych fotónov boli prezentované na viacerých medzinárodných konferenciách [II.7-II.10]. Jeden z posterov M. Křelínu [II.10], doktoranda J. Nemčíka, s výsledkami projektu získal na konferencii *ISMD 2015* ocenenie *Franco Rimondi Association* za najlepší teoretický poster.

III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov

V čiastočnom súlade s cieľom 3.1 dosiahol E. E. Kolomeitsev v spolupráci s M. F. M. Lutzom z GSI v Darmstadte a C. L. Korpom z Pécskej univerzity významný pokrok v pochopení analytickej štruktúry u - a t - diagramov hadrón-hadrónových interakcií [III.1]. Bola stanovená všeobecná reprezentácia, platná v prípade anomálnych energetických prahov, rozpadov častíc, prípadne prekrývajúcich sa ľavo- a pravotočivých štruktúr rezov, s akými sa často stretávame v hadrónovej fyzike.

Na pochopenie mechanizmu produkcie rezonancií v ultrarelativistických jadrových zrážkach (cieľ 3.3) sa ukázalo byť kľúčovým, aby sme dokázali zrekonštruovať konečný stav horúcej zóny. Toto sa tak stalo hlavným problémom, ktorému sa venovali I. Melo a B. Tomášik. Zahŕňa znalosť teploty a rýchlosti priečnej expanzie v momente, kedy sa od horúcej kvapky oddeľujú jednotlivé hadróny. Pri takejto analýze sa porovnávajú merané rozdelenia identifikovaných častíc podľa priečnej hybnosti s výsledkami teoretického modelu. Dôležitým prvkom v teoretickom výpočte je zahrnutie vplyvu rezonancií na produkciu hadrónov. Takýto teoretický výpočet sa však dá žiaľ realizovať len v Monte Carlo simulácii.

V roku 2015 sme dokončili článok a zaslali ho na uverejnenie [III.2]. Zároveň sme začali pracovať na ďalšom vylepšení modelu, pretože sa ukázalo, že experimentálne údaje si môžu vyžadovať nenulový chemický potenciál pre produkované častice.

Jedným z ďalších prirodzených krokov pri porozumení dynamiky fireballu je pochopenie jeho anizotropickej expanzie. Tá bola detailne študovaná v druhom ráde, ale nie je dostatočne prebádaná v treťom ráde. Na projekte sme začali spolupracovať v roku 2015 s M. Csanádom a S. Lökösom z Univerzity R. Eötvösa v Budapešti. Tiež sa do neho zapojil jeden študent bakalárskeho stupňa.

V roku 2015 sme tiež využili už skôr zostrojené rozšírenie štatistického modelu [III.3]. V práci [III.4] B. Tomášik a E. E. Kolomeitsev argumentovali, aby tento model bol akceptovaný ako referenčný pri identifikácii vplyvov jadrovej hmoty na vlastnosti častíc. Spoľahlivé meranie si však vyžaduje identifikáciu všetkých druhov podivných častíc v budúcich experimentoch na zariadení NICA v SÚJV Dubna, ako riešitelia tohto projektu navrhli v práci [III.5].

K cieľu 3.4 je možné zaradiť krátku štúdiu, na ktorej sme spolupracovali v posledných týždňoch tohto projektu s kolegami z Frankfurt Institute for Advanced Studies. Zamerali sme sa na fluktuácie počtu protónov od zrážky k zrážke, a zvlášť na tretí a štvrtý moment rozdelenia protónovej multiplicity. Tie sa merajú v závislosti od energie zrážky, pretože je možné dať ich do súvisu s baryónovými susceptibilitami, ktoré majú netriviálnu závislosť na baryónovom chemickom potenciáli. Cieľom je pomocou nich identifikovať polohu kritického bodu vo fázovom diagrame silno interagujúcej hmoty. V práci [III.6] sme poukázali na dôležitý vplyv procesu formovania deuterónov na pozorované veličiny. Túto štúdiu sme uskutočnili aj vďaka pobytu B. Tomášika a Z. Feckovej vo Frankfurte. Pobyt Z. Feckovej bol podporený nemeckou nadáciou DAAD.

Veľkú pozornosť sme venovali vývoju hydrodynamických simulácií na opis dynamiky horúcej a hustej hmoty v ultrarelativistických jadrových zrážkach so zvláštnym zreteľom na zahrnutie deponovania energie a hybnosti z tvrdých partónov prelietajúcich plazmou (cieľ 3.5). Na tejto časti projektu sme pracovali počas celej doby projektu. Vývoju a využitiu simulácií v rámci modelu ideálnej hydrodynamiky sa venoval doktorand M. Schulc pod vedením B. Tomášika.

Vývoj a aplikácia viskózneho hydrodynamického modelu sa stali témou dizertačnej práce Z. Feckovej (školiteľ B. Tomášik). Model sme v roku 2015 dostali do takej podoby, že je modulárny, takže je možné napríklad implementovať ľubovoľnú stavovú rovnicu. Forma, akou je implementovaný, je dôležitá pre budúcu funkcionálnosť celého modelu. Existujúca schéma zatiaľ rieši rovnice ideálnej hydrodynamiky. To je však podstatný krok pri celkovom riešení, pretože rovnice disipatívnej hydrodynamiky sa riešia v dvoch krokoch: napred ideálna časť a potom disipatívna.

Pri štúdiách anizotropií rozdelenia hadrónov a tiež s ohľadom na nové poznatky v literatúre sa ukázalo ako užitočné skonštruovať metódu na triedenie zrážok podľa ich tvaru. V roku 2015 sa tomuto problému preto venovali dvaja diplomanti pod vedením B. Tomášika. R. Kopečná implementovala triediaci algoritmus a testovala ho na umelých dátach z jednoduchého Monte Carlo generátora. Úlohou J. Tótha je skonštruovať efektívny softvér, ktorý bude využívať masívne paralelné počítanie a bude efektívny pre analýzu veľkých dátových súborov.

IV. Chladná a hustá jadrová hmota

V roku 2015 sme publikovali viaceré práce začaté v predchádzajúcom roku. E. E. Kolomeitsev sa venoval problému viskozity v chladnej a hustej jadrovej hmote, akú možno nájsť vo vnútri neutrónových hviezd. Boli vypočítané viaceré príspevky k šmykovej ako aj objemovej viskozite, aj s ohľadom na modifikáciu nukleónových interakcií pri vysokých hustotách. Tiež boli vzaté do úvahy vplyvy párovania nukleónov, ktoré vedú k supratekutosti a supravodivosti jadrovej hmoty. Boli nájdené nové príspevky k šmykovej aj objemovej viskozite, ako napríklad príspevok k šmykovej viskozite v dôsledku Goldstonových módov v prítomnosti nukleónového párovania, od čiastočne uväznených neutrín, radiačná objemová viskozita a iné. Tiež bol analyzovaný vplyv viskozity na rotáciu neutrónových hviezd a bola vysvetlená stabilita mladého a rýchlo rotujúceho pulzaru PSR J0537-6910.

V rámci pokračovania predchádzajúcej témy a naplnenia cieľa 4.3 študovali E. E. Kolomeitsev a D. N. Voskresensky javy, ktoré sa môžu objaviť v pohybujúcich sa kvantových kvapalinách, ako sú napr. supratekutý systém bozónov (hélium-4), systém fermiónov s párovaním (hmota neutrónovej hviezdy) a Fermiho kvapalina (jadrová hmota). Ukázali, že v excitovanom systéme s nízkou energiou, ale dostatočne vysokou hybnosťou môžu excitácie kondenzovať, ak je rýchlosť systému vyššia ako istá kritická hodnota. Vzniknutý kondenzát nesie časť hybnosti systému a minimalizuje jeho celkovú energiu. Tento jav sa môže prejavovať v rotujúcej neutrónovej hviezde.

Výnimočný úspech sa podarilo dosiahnuť pri práci na cieľoch 4.1 a 4.2. E. E. Kolomeitsev v spolupráci s K. A. Maslovom a D. N. Voskresenskym (obaja z MEPHl v Moskve) študovali relativistické modely stredného poľa s hmotnosťami hadrónov a väzbovými konštantami, ktoré self-konzistentne záviseli od hodnoty skalárneho stredného poľa. Všetky hmotnosti hadrónov univerzálne klesajú pri rastúcej hodnote skalárneho stredného poľa, zatiaľ čo väzbové konštanty medzi mezónmi a nukleónmi sa môžu meniť oboma smermi. Skonstruovaných bolo niekoľko stavových rovníc pre hustú baryónovú hmotu (vrátane nukleónov a hyperónov), ktoré spĺňajú väčšinu podmienok kladených pozorovaniami vlastností neutrónových hviezd a opisom jadrových zrážok.

Medzinárodná spolupráca

Riešitelia projektu majú dlhoročné medzinárodné kontakty a neformálne spolupráce. Na doterajších publikáciách v rámci projektu boli spoluautormi pracovníci z ČR (FJFI ČVUT v Prahe), z Čie (univerzita a vedecké pracoviská vo Valparaíse), z Maďarska (Pécska univ.), z RF (Moskovský fyzikálno-inžiniersky inštitút), zo SRN (Frankfurt Institute for Advanced Studies), zo Švédska (Lundská univ.) a z USA (SFSU). Výmena skúseností, výsledkov a konzultácie prebiehali aj s pracovníkmi v Rakúsku, na Ukrajine a i.

Z prostriedkov grantu boli hradené náklady spojené s návštevami troch zahraničných odborníkov vo Fyzikálnom ústave SAV v Bratislave: jednodňovej návštevy prof. M. Fabera z TU vo Viedni a jeho hosťa S. M. Hosseini Nejada z Teheránskej univ. za účelom konzultácií o problémoch projektu, ako aj dvojtýždňovej návštevy dr. O. Borisenka z Ukrajinskej AV. Dr. Borisenko predniesol vo FÚ SAV seminár o výsledkoch svojho výskumu, diskutovali sme s ním o výsledkoch nášho projektu a o riešeníach rôznych problémov, s ktorými sa v jeho rámci potýkame (pozri vyššie). Ďalej boli z prostriedkov grantu APVV hradené pobytové náklady dr. J. Bielčíka z FJFI ČVUT v Prahe, ktorý za účelom konzultácií a spolupráce navštívil Ústav experimentálnej fyziky SAV v Košiciach, a dr. S. Lökösa z Univ. R. Eötvösa v Budapešti na UMB v Banskej Bystrici kvôli spolupráci na skúmaní anizotropie rozdelenia hadrónov v treťom ráde. Predniesol tiež na Fakulte prírodných vied UMB seminár o svojich výsledkoch.

2.

Rozbor výsledkov za celé obdobie riešenia vzhľadom na stanovené ciele

V projekte boli dosiahnuté mnohé dôležité výsledky, niektoré témy z jeho návrhu sú v pokročilom štádiu rozpracovanosti, časť výsledkov bola publikovaná a zvyšok zverejníme v ďalších rokoch (s poďakovaním za podporu APVV). Ako sme v návrhu projektu avizovali a zdôraznili aj v správach za r. 2013 a 2014, niektoré ciele projektu boli počas riešenia upresnené, modifikované alebo nahradené zaujímavejšími príbuznými problémami.

Opäť rozoberieme výsledky po jednotlivých tematických okruhoch projektu:

I. Uväznenie farby a štruktúra vákua kvantovej chromodynamiky

Ústredným problémom tu bolo skúmanie vákuového stavu QCD. Získali sme numerickú evidenciu, že nami navrhnutý približný vlnový funkcionál vákua QCD v (2+1)- aj v (3+1)-rozmernom časopriestore v temporálnej kalibrácii je veľmi dobrým priblížením k skutočnému vákuovému vlnovému funkcionálu tejto teórie [I.2-I.4,I.6]. Tieto výsledky v prevažnej miere naplnili ciele 1.1 a 1.2 z návrhu projektu. Zatiaľ nie je uspokojivo vyriešený problém priamej metódy na generáciu konfigurácií kalibračných polí s rozdelením podľa nášho návrhu približného VVF v (3+1) rozmeroch a naďalej sa mu venujeme.

Problému identifikácie lokálnych vákuových domén v G_2 kalibračnej teórii a štúdiu ich perkolačných vlastností (cieľ 1.3 návrhu) sme sa venovali iba okrajovo. Oživil sme starší program na numerickú simuláciu G_2 teórie. V priebehu riešenia projektu však boli publikované nové výsledky rozsiahlych numerických simulácií tejto teórie, ktoré ukázali, že s našimi obmedzenými zdrojmi by sme nemohli získať v tejto oblasti kompetitívne vedecké výsledky.

Problém obsahu konštituentných gluónov v prúdovej trubici medzi statickým kvarkom a antikvarkom (zamýšľaná náhrada problému 1.4) bol v priebehu roka 2015 v podstate vyriešený autormi prác [I.7].

II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch

Ciele projektu v tomto okruhu tém sa priebežne plnili v súlade s pôvodným návrhom projektu.

Skúmali sa jadrové efekty a ich prejavy v produkcii rôznych častíc v nukleón-jadrových a jadro-jadrových zrážkach. Porovnanie teoretických predpovedí s dostupnými experimentálnymi hodnotami na urýchľovačoch RHIC a LHC nám poskytuje cenné informácie nielen o miere aplikovateľnosti rôznych

modelov, ale aj o vlastnostiach hmoty, vytvorenej v zrážkach ťažkých iónov. Rôzne jadrové efekty sa prejavujú rozdielnym spôsobom v závislosti od typu vzniknutej častice a mechanizmu, ktorý je zodpovedný za proces jej vytvorenia, ako aj od kinematickej oblasti, v ktorej sa interakcia s jadrovými terčikmi skúma.

Počas riešenia projektu boli skúmané a interpretované nasledujúce jadrové efekty v procesoch na jadrových terčikoch:

i) Prejavy a vlastnosti efektov farebnej priezračnosti, vyplývajúcich z teórie silných interakcií, QCD, v procesoch koherentnej a nekoherentnej produkcie vektorových mezónov v elektrón-jadrových interakciách [II.11]. Rast jadrového modifikačného faktora s virtuálnosťou fotónu je charakteristickým prejavom daného efektu, ktorý sa môže skúmať v budúcich experimentoch na plánovaných urýchľovačoch, kde sa budú zrážať elektróny s jadrovými terčikmi (napr. projekty eRHIC, EIC, atď.). Podobný rast jadrového modifikačného faktora s priechnou hybnosťou sa pozoruje aj v inkluzívnej produkcii ľahkých hadrónov v experimentoch ALICE a CMS na urýchľovači LHC [II.12,II.1].

ii) V inkluzívnej produkcii ľahkých hadrónov v zrážkach ťažkých iónov bol skúmaný mechanizmus hadronizácie a jeho vplyv na pozorované jadrové potlačenie v interakciách s jadrovými terčikmi [II.13,II.14]. Intenzívna disipácia energie (vákuové a indukované energetické straty) prostredníctvom radiácie gluónov vysoko-virtuálnym partónom vytvoreným s veľkou hodnotou p_T spôsobuje, že je nemožné, aby tento proces trval dlhú dobu. Farebná neutralizácia a vytvorenie bezfarebného dipólu musí prebehnúť rýchlo. Ak sa tak stane vo vnútri horúcej hmoty vytvorenej v jadro-jadrových zrážkach, oslabenie vytvoreného bezfarebného dipólu (pre-hadróna), skôr než indukované energetické straty, sa stáva dominantným mechanizmom pre potlačenie hadrónov s veľkými hodnotami p_T . Evolúcia v jadrovej hmote daného pre-hadróna bola opísaná v rámci prístupu farebného dipólu založeného buď na navrhnutom jednoduchom modeli [II.1], ako aj pomocou sofistikovaného formalizmu Greenových funkcií [II.12]. Ako charakteristika vlastností vzniknutej jadrovej matérie boli stanovené hodnoty transportného koeficientu pri rôznych energiách.

iii) Bol analyzovaný Croninov efekt, čo je jadrové zosilnenie produkcie hadrónov pri vysokých hodnotách p_T v protón-jadrových zrážkach, a bol úspešne predpovedaný ešte pred prvými meraniami na urýchľovačoch RHIC a LHC [II.15,II.16].

iv) Boli skúmané efekty spôsobujúce dodatočné jadrové potlačenie, ktoré súvisia s mnohonásobnými interakciami partónov v jadrovej hmote v počiatočnom štádiu procesu ešte pred tvrdou zrážkou. To vedie následne k ohraničeniam spôsobeným zachovaním energie (ISI efekty), teda k deficitu energie pri produkcii častíc v interakciách s jadrovými terčikmi pri veľkých hodnotách Feynmanovej premennej x_F a/alebo premennej $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$ blízkyh ku kinematickej hranici $x_{F,T} = 1$. Pri nízkych energiách môžeme vylúčiť prejavy iných efektov, spôsobujúce jadrové potlačenie. Potom predpovedané potlačenie v dôsledku ISI efektov bolo naozaj pozorované pre hadróny produkované pri dopredných rapiditách a veľkých hodnotách p_T . Analyzovali sme vplyv týchto ISI efektov spojených so zákonom zachovania v počiatočných rozptyloch partónov pri rôznych energiách, centralitách zrážky, rapiditách a p_T v inkluzívnej produkcii hadrónov, priamych fotónov, Drellových–Yanových párov a ťažkých mezónov [II.12-II.14,II.16-19,II.1-3,II.5-6].

v) Efekty kvantovej koherencie spôsobujú jadrové tienenie pri malých hodnotách Bjorkenovej premennej x , t.j. pri vysokých energiách, dopredných rapiditách a malých p_T . Ich prejavy sa analyzovali vo forme tienenia gluónov a jeho príspevku k celkovému potlačeniu v inkluzívnej produkcii rôznych častíc na jadrových terčikoch [II.16-19,II.5-6].

Sumarizujúc, študovali sme rôzne prejavy hore uvedených jadrových efektov vo forme jadrového potlačenia a azimutálnej asymetrie v inkluzívnej produkcii hadrónov, priamych a virtuálnych fotónov v hadrón-jadrových interakciách a v zrážkach ťažkých iónov. Toto štúdium sa uskutočnilo pri rôznych hodnotách rapidity a v závislosti od energie zrážky. Neskôr sme skúmali jadrové pohltenie pri veľkých hodnotách priechnej hybnosti p_T vzniknutých častíc a Feynmanovej premennej x_F . Modelové predpovede sú v dobrom súhlase s existujúcimi experimentálnymi hodnotami. Nakoniec boli naše predpovede pre jadrové efekty popisujúce oblasť veľkých p_T skombinované s rôznymi hydrodynamickými modelmi, použiteľnými pre malé a stredné hodnoty p_T , s cieľom opísať inkluzívnu produkciu častíc v celej oblasti hodnôt p_T , v dobrom súhlase s hodnotami z experimentov na experimentálnych komplexoch RHIC a LHC [II.20].

III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov

Výsledkom našej analýzy konečného stavu fireballu v zrážkach Pb+Pb na LHC boli hodnoty teploty a profil prierečnej expanzie po zahrnutí rezonančných rozpadov. Tento výsledok možno priradiť k cieľu 3.3. Ukázali sme jasne, že často používané zjednodušené analýzy, ktoré ignorujú rozpady rezonancií, poskytujú chybné výsledky. Výsledky boli publikované [III.2] a referovali sme o nich na niekoľkých medzinárodných konferenciách [III.7,III.8].

Štúdia o fluktuáciách protónovej multiplicity, ktorú sme voľne zaradili k cieľu 3.4, bola uverejnená koncom roku 2015 [III.6]. Ukázali sme, ako dokáže formovanie deuterónov silne ovplyvniť rozdelenie multiplicity protónov zvlášť v oblasti energií zrážok, kde sa očakáva objavenie sa fázového prechodu prvého druhu. Tento výsledok je dôležitý, pretože vyzýva k opatrnosti pri interpretácii experimentálnych meraní tretieho a štvrtého momentu rozdelenia multiplicity.

Štúdie o vplyve tvrdých partónov na kolektívne správanie kvarkovo-gluónovej plazmy prinieslo niekoľko publikácií. Najprv sme ukázali, že vzniknuté prúdy, ktoré nesú deponovanú hybnosť, sa zlievajú s inými takými prúdmi [III.9]. To podporilo hypotézu, že viacero partónov by mohlo posilniť eliptický tok v necentrálnych zrážkach.

Táto hypotéza sa potvrdila v simuláciách s realistickou trojrozmernou dynamikou [III.10]. Tu sme odhadli prínos navrhovaného mechanizmu k anizotropiám rozdelenia hadrónov v prvom až štvrtom ráde. Tieto výsledky boli prezentované na viacerých konferenciách [III.11-III.13]. Následne sme tiež ukázali [III.14], že anizotropie rozdelenia hadrónov sú menšie, ak je všetka hybnosť deponovaná už v počiatočných podmienkach pre hydrodynamické rozpínanie.

Pri vývoji hydrodynamického modelu sme ho testovali na niektorých štandardných situáciách, ako je Riemannov problém a šírenie akustickej vlny, pomocou ktorej sme tiež odhadli, že model má výnimočne nízku hodnotu numerickej viskozity. Tieto priebežné výsledky sú dokumentované v niekoľkých konferenčných príspevkoch [III.15,III.16].

Pri práci na ciele 3.1 sme detailne študovali analytickú štruktúru príspevkov u - a t -kanálu k rozptylovej amplitúde dvoch hadrónov. Našli sme jej všeobecnú reprezentáciu. Výsledky boli časopisom akceptované mimoriadne rýchlo a článok [III.1] bol v časopise uverejnený ako „*Editor's Suggestion*“, pričom editor Phys. Rev. D zdôraznil: „*Analyzing final state interactions in scattering processes in the non-perturbative regime of quantum chromodynamics (QCD), such as the hadron resonance region, is difficult. Using the analytic structure of partial-wave amplitudes derived from u - and t -channel exchange diagrams in $2 \rightarrow 2$ scattering, the authors put forward a systematic procedure for understanding the final state interactions in hadron processes.*“

Vyvinuli sme nový štatistický model s presným zachovaním podivnosti v každej zrážke (cieľ 3.3). Model bol aplikovaný na opis produkcie podivnosti pri podprahových energiách v jadrových zrážkach. Výsledky boli publikované [III.3,III.5] a tiež prednesené na niekoľkých konferenciách [III.4,III.7].

IV. Chladná a hustá jadrová hmota

Vypočítali sme objemovú a šmykovú viskozitu hustej a chladnej jadrovej hmoty a identifikovali sme niekoľko nových príspevkov k nej [IV.1]. Tieto výsledky pomohli vysvetliť stabilitu rýchlo rotujúcich mladých pulzarov voči potenciálnej nestabilite v dôsledku takzvaných r -módov [IV.2].

Bola skonštruovaná stavová rovnica hustej baryónovej hmoty, ktorá bola úspešne testovaná na pozorovaných vlastnostiach neutrónových hviezd a kolektívneho toku v jadrových zrážkach. Našli sme riešenie starého problému, tzv. hyperónovej záhady (prílišné zmäkčenie stavovej rovnice neutrónovej hviezdy po zahrnutí hyperónov) [IV.3]. Navrhli sme tiež nový mechanizmus, ktorý vedie k tvrdšej stavovej rovnici v relativistickom modeli stredného poľa [IV.4]. Výsledky boli prezentované na niekoľkých konferenciách, pozri napr. [IV.5].

Zapojenie doktorandov a diplomantov do riešenia projektu

V projekte bola priamo ako riešiteľka zapojená Z. Fecková, doktorandka UPJŠ v Košiciach, ktorej školiteľom je B. Tomášik, a na projekte sa zúčastňovala na čiastočnom úväzku v UMB v Banskej Bystrici v pozícii vedecko-výskumnej pracovníčky. Zadanie jej dizertačnej práce *Vlastnosti a vývoj horúcej jadrovej hmoty v extrémnych podmienkach* úzko súvisí s III. témou projektu.

S problémami projektu úzko súviseli resp. súvisia zadaná troch dizertačných prác doktorandov KF FJFI ČVUT v Prahe. Ing. J. Čepila, doktorand J. Nemčíka, v roku 2014 dizertačnú prácu úspešne obhájil.

Nadálej podľa študijného plánu pokračuje doktorandské štúdium ďalších dvoch doktorandov, Ing. M. Křelínu školí J. Nemčík a B. Tomášik je školiteľom Ing. M. Schulca.

S projektom súvisia aj témy, na ktorých pracujú dvaja diplomanti B. Tomášika: Bc. R. Kopečná z KF JFI ČVUT v Prahe a Bc. J. Tóth z UMB v Banskej Bystrici (študent odboru Aplikovaná informatika).

Súhrnné vyjadrenie o splnení cieľov projektu

Celkovo možno konštatovať, že ciele projektu boli v prevažnej miere splnené. Niektoré parciálne problémy sú rozpracované. Boli dosiahnuté a publikované zaujímavé výsledky, všetky v odborných časopisoch vysokej medzinárodnej úrovne. Ako sme zdôraznili v návrhu projektu: *„Jedná sa o projekt základného výskumu, ktorého cieľom je významne prispieť k teórii a fenomenológii silných interakcií. Pri riešení projektu sa budú využívať prísne vedecké metódy, dosiahnuté výsledky sa budú porovnávať a konfrontovať s výsledkami iných výskumných skupín vo svete a budú zasielané na uverejnenie v prominentných vedeckých časopisoch v danej vednej oblasti s vysokým impaktom. Naším cieľom nie je produkovať akékoľvek výsledky, ale výsledky dôležité a relevantné, ktoré posunú hranice poznania vo všetkých alebo aspoň niektorých skúmaných problémoch.“* (Citát je z návrhu projektu, časť VV-E, str. 3.)

Naplnenie tohto cieľa je možné dokumentovať niekoľkými údajmi:

1. V rokoch 2012-2015 vzniklo v rámci projektu zatiaľ 19 publikácií v karentovaných vedeckých časopisoch (vrátane tých, čo sú prijaté do tlače). Niekoľko ďalších článkov je v súčasnosti v recenznom konaní v časopisoch. Uverejnili sme tiež viacero príspevkov v nekarentovaných recenzovaných časopisoch a v zborníkoch (prevažne) z medzinárodných konferencií.
2. Štyri publikácie majú charakter rozsiahleho prehľadového článku („review“ alebo „topical review“). Jedná sa o dve práce [II.15,IV.6] z roku 2013, prácu [II.14] z roku 2014 a nedávny rozsiahly takmer 60-stranový preprint [IV.7], ktorý je zatiaľ v recenznom konaní.
3. Priemerný impakt-faktor časopisov, v ktorých boli výsledky uverejnené, je takmer 3,7.
4. Dve publikácie s výsledkami projektu vyšli v časopisoch Phys. Rev. C a Phys. Rev. D s označením „Editor’s Suggestion“ ([II.12] v r. 2012 a [III.1] v r. 2015, pozri vyššie).
5. Na práce s výsledkami projektu registrujeme k 31.12.2015 spolu 124 citácií, z nich je 74 v časopisoch sledovaných vo Web of Science, zvyšok v konferenčných príspevkoch, doteraz nepublikovaných preprintoch, dizertačných prácach a pod.
6. Mimoriadny ohlas má hlavne prehľadový článok [II.15], ktorý bol citovaný doteraz spolu 81-krát (z toho 51-krát v časopisoch sledovaných vo Web of Science). Tento článok je na webovej stránke vydavateľa časopisu Int. J. Mod. Phys. E uvedený v zozname najcitovanejších článkov, ktoré v ňom boli publikované, a dokonca na prvom mieste medzi článkami najčítanejšími. V databáze ISI Web of Knowledge je označený ako „Highly Cited Paper“ s vysvetlením, že „[the paper] received enough citations to place it in the top 1% of its academic field based on a highly cited threshold for the field and publication year.“
7. Okrem najcitovanejšej práce [II.15] bolo ďalších 18 článkov, ktoré vznikli počas riešenia tohto projektu, doteraz citovaných aspoň jedenkrát (podľa databáz Web of Science alebo INSPIRE).

Rozmanité boli aj popularizačné aktivity riešiteľov projektu, orientované hlavne na stredoškolskú mládež a širokú verejnosť. Nebudeme ich tu menovať, sú zhrnuté na webovskej stránke projektu http://dcps.sav.sk/olejnik/projects/apvv_0050_11/sk/ (v časti „Popularizácia“) a v zoznamoch výstupov a prínosov projektu za jednotlivé roky jeho riešenia.

3.

Zoznam výstupov a prínosov projektu za posledný rok

Úplný zoznam je uvedený v prílohe, vo formulári „Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie 2015“. Publikácie, ktoré vyšli v priebehu roku 2015 alebo boli prijaté do tlače, sú k tejto správe priložené.

Odkazy na literatúru

- [I.1] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **77** (2008) 065003.

- [I.2] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **89** (2014) 034504.
- [I.3] Š. Olejník, J. Phys.: Conf. Ser. **631** (2015) 012057.
- [I.4] Š. Olejník, http://www.dcps.sav.sk/olejnik/downloads/4WWNPQFT_Olejnik.pdf (2015).
- [I.5] O. Borisenko, S. Voloshin, M. Faber, Nucl. Phys. B **816** (2009) 399.
- [I.6] J. Greensite, Š. Olejník, Proc. Sci., PoS(Confinement X)054 (2013); Proc. Sci., PoS(LATTICE 2013)467 (2013); Proc. Sci., PoS(QCD-TNT-III)027 (2013).
- [I.7] J. Greensite, A. P. Szczepaniak, Phys. Rev. D **91** (2015) 034503; e-print <http://arXiv.org/abs/1505.05104>.
- [II.1] J. Nemchik, R. Pasechnik, I.K. Potashnikova, Eur. Phys. J. C **75** (2015) 95.
- [II.2] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, J. Phys. Conf. Ser. **589** (2015) 012013.
- [II.3] E. Basso, V.P. Goncalves, J. Nemchik, R. Pasechnik, M. Šumbera, Phys. Rev. D (2016), v tlači, e-print <http://arXiv.org/abs/1510.00650>.
- [II.4] E. Basso, V.P. Goncalves, J. Nemchik, R. Pasechnik, M. Šumbera, Proc. Sci., PoS(EPS-HEP2015)191 (2015).
- [II.5] M. Krelina, E. Basso, V.P. Goncalves, J. Nemchik, R. Pasechnik, *Nuclear effects in Drell-Yan production at the LHC*, EPJ Web Conf. (2016), v tlači.
- [II.6] M. Krelina, E. Basso, V.P. Goncalves, J. Nemchik, R. Pasechnik, *Systematic study of real photon and Drell-Yan pair production in p+A (d+A) interactions*, EPJ Web Conf. (2016), v tlači.
- [II.7] M. Šumbera, B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, R. Pasechnik, prednáška na *International Conference on High Energy Physics (EPS-HEP)*, Viedeň, Rakúsko (22.-29.7.2015).
- [II.8] E. Basso, V. P. Goncalves, M. Krelina, J. Nemchik, R. Pasechnik, 2 postery M. Křelinu na *XXV Int'l Conf. on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015)*, Kobe, Japonsko (27.9.-3.10.2015).
- [II.9] E. Basso, V. P. Goncalves, M. Krelina, J. Nemchik, R. Pasechnik, M. Šumbera, poster M. Šumberu na *XXV Int'l Conf. on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015)*, Kobe, Japonsko (27.9.-3.10.2015).
- [II.10] M. Krelina, E. Basso, V.P. Goncalves, J. Nemchik, R. Pasechnik, 2 postery na *XLV Int'l Symposium on Multiparticle Dynamics*, Wildbad, SRN (4.-9.10.2015).
- [II.11] J. Nemchik, B. Z. Kopeliovich, I. K. Potashnikova, AIP Conf. Proc. **1523** (2012) 67.
- [II.12] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, Phys. Rev. C **86** (2012) 054904.
- [II.13] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, EPJ Web Conf. **71** (2014) 00070.
- [II.14] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, Int. J. Mod. Phys. E **23** (2014) 1430006.
- [II.15] J. L. Albacete, ... , J. Nemchik *et al.*, Int. J. Modern Phys. E **22** (2013) 1330007.
- [II.16] M. Krelina, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **66** (2014) 04016.
- [II.17] M. Krelina, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **60** (2013) 20023.
- [II.18] M. Krelina, J. Nemchik, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **245** (2013) 239.
- [II.19] J. Cepila, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **66** (2014) 04006.
- [II.20] J. Nemchik *et al.*, e-print <http://arXiv.org/abs/1310.3455> (2013).
- [III.1] M. F. M. Lutz, E. E. Kolomeitsev, C. L. Korpa, Phys. Rev. D **92** (2015) 016003.
- [III.2] I. Melo, B. Tomášik, J. Phys. G **43** (2016) 015102.
- [III.3] E. E. Kolomeitsev, B. Tomášik, D. N. Voskresensky, Phys. Rev. C **86** (2012) 054909.
- [III.4] B. Tomášik, E. E. Kolomeitsev, J. Phys.: Conf. Ser. **668** (2016) 012089.
- [III.5] B. Tomášik, E.E. Kolomeitsev, Eur. Phys. J. A (2016), v tlači, e-print <http://arXiv.org/abs/1510.04349>.
- [III.6] Z. Fecková, J. Steinheimer, B. Tomášik, M. Bleicher, Phys. Rev. C **92** (2015) 064908.
- [III.7] E. E. Kolomeitsev, I. Melo, B. Tomášik, D. N. Voskresensky, Proc. Sci., PoS(Baldin ISHEPPXXII)071 (2015).
- [III.8] I. Melo, B. Tomášik, J. Phys.: Conf. Ser. **668** (2016) 012070.
- [III.9] M. Schulc, B. Tomášik, J. Phys G **40** (2013) 1125104.
- [III.10] M. Schulc, B. Tomášik, Phys. Rev. C **90** (2014) 064910.
- [III.11] B. Tomášik, M. Schulc, in *Proc. of the Workshop on Collectivity in Relativistic Heavy Ion Collisions*, ed. L.Bravina, V. Magas, A. Feijoo (Barcelona, 2015) 58.
- [III.12] B. Tomášik, M. Schulc, in *Proc. of the 20th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 14)*, ed. A. Schmidt, Ch. Sander (DESY, Hamburg, 2015) 259.
- [III.13] B. Tomášik, M. Schulc, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. **8** (2015) 433.
- [III.14] M. Schulc, B. Tomášik, e-print <http://arXiv.org/abs/1512.06215>.
- [III.15] Z. Fecková, B. Tomášik, J. Phys.: Conf. Ser. **612** (2015) 012051.
- [III.16] Z. Fecková, B. Tomášik, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. **8** (2015) 307.
- [IV.1] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, Phys. Rev. C **91** (2015) 025805.
- [IV.2] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky. Eur. Phys. J. A **50** (2015) 180.
- [IV.3] K. A. Maslov, E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, Phys. Lett. B **748** (2015) 369.
- [IV.4] K.A. Maslov, E.E. Kolomeitsev, D.N. Voskresensky, Phys. Rev. C **92** (2015) 052801(R).
- [IV.5] K. A. Maslov, E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, J. Phys.: Conf. Ser. **668** (2016) 012064.
- [IV.6] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, J. Phys. G **40** (2013) 113101.
- [IV.7] K. A. Maslov, E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, e-print <http://arxiv.org/abs/1509.02538> (2015).

Potvrdzujeme, že údaje uvedené v správe a jej prílohách sú pravdivé a úplné.

Zodpovedný riešiteľ

RNDr. Štefan Olejník, DrSc.

V Bratislave 22. 01. 2016

Štatutárny zástupca príjemcu

RNDr. Stanislav Hlaváč, CSc.

V Bratislave 22. 01. 2016

.....
podpis zodpovedného riešiteľa

.....
podpis štatutárneho zástupcu príjemcu