

Ročná správa o riešení projektu za rok 2013

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 u príjemcu, ako aj spolupríjemcu podpory APVV vzhľadom na harmonogram riešenia projektu**
- 2. Rozbor výsledkov riešenia vzhľadom na stanovené ciele**
- 3. Zoznam výstupov a prínosov projektu za posledný rok – uvedte v prílohe – formulár Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie (priložte kópie deklarovanych výstupov)**
- 4. Upresnenie harmonogramu prác a cieľov na nasledujúci rok**

↓↓

Základné informácie o projekte, jeho riešiteľoch, cieľoch a aktuálne informácie o výsledkoch, publikáciách a popularizačných aktivitách možno nájsť na internetových adresách:

http://dcps.sav.sk/olejnik/projects/apvv_0050_11/ (v anglickom jazyku),
http://dcps.sav.sk/olejnik/projects/apvv_0050_11/sk/ (v slovenskom jazyku).

1. Postup prác pri riešení projektu u príjemcu, ako aj spolupríjemcov podpory APVV vzhľadom na harmonogram riešenia projektu

Projekt bol v roku 2013 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 31.12.2013 prekrývalo s časťou 1. etapy riešenia projektu a so začiatkom jeho 2. etapy.

V návrhu projektu boli hlavné ciele rozdelené do štyroch skupín. V tejto a ďalších častiach správy zhrnieme postup prác, pokrok pri riešení, dosiahnuté výsledky a plány na rok 2014 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 vákua kvantovej chromodynamiky

Výrazný pokrok bol dosiahnutý v ústrednom probléme tohto výskumného smeru, pri skúmaní vlnového funkcionálu základného stavu kvantovej chromodynamiky (QCD) v temporálnej kalibrácii (projektové ciele 1.1 a 1.2). Uskutočnili sme rozsiahle simulácie SU(2) gluodynamiky na mriežke za účelom výpočtu štvorca vákuového vlnového funkcionálu (VVF) tejto teórie v (3+1)-rozmernom časopriestore. Využívali sme pri tom metódu relatívnych váh (relative-weights method) [I.1], ktorá umožňuje určiť pomery štvorcov VVF konfigurácií kalibračných polí pre rôzne súbory testovacích konfigurácií. Výsledky sme porovnávali s predpoveďami VVF, ktorý zodpovedá tzv. dimenzionálnej redukcii [I.2], ďalej s približným tvarom, ktorý sme navrhli a úspešne testovali pred niekoľkými rokmi v (2+1) rozmeroch [I.3], a konečne s tvarom VVF, ktorý je inšpirovaný prácami Karabali, Kima a Naira [I.4].

V prípade konfigurácií konštantných abelovských polí nie je možné tri navrhnuté tvary odlíšiť. Výsledky pre tieto konfigurácie slúžili iba na kalibrovanie použitého programu a na overenie ich závislosti od veľkosti použitej mriežky. Počítačové možnosti na sklonku 80. rokov minulého storočia umožnili realizovať podobné výpočty iba na veľmi malých mriežkach, v článku [I.1] sa preto používali mriežky veľkosti 6^4 a 8^4 . Naše terajšie simulácie boli uskutočnené na oveľa väčších mriežkach 16^4 a 20^4 , časť dokonca 24^4 a 30^4 [I.5]. Ukazuje sa, že parameter μ , ktorý charakterizuje dimenzionálno-redukčný VVF, prakticky nevykazuje závislosť od rozmerov mriežky.

Zaujímavejšie sú výsledky pre VVF konfigurácií abelovských rovinných vlín [I.6]. Výsledky sa nezhodujú so žiadnym z navrhnutých vákuových vlnových funkcionálov, ktoré sme spomínali vyššie. Získali sme však sľubnú indikáciu, že najlepší fit k nameraným hodnotám sa v spojitom limite blíži k tvaru, ktorý sme navrhli v práci [I.3].

II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch

V roku 2013 sme študovali prejavy efektov kvantovej koherencie a farebnej priezračnosti v produkcii vektorových mezónov v elektrón-iónových zrážkach, ktoré sa plánujú skúmať v navrhovaných projektoch zrážача elektrónov s iónmi (*Electron-Ion Collider*, EIC) [II.1].

V prehľadovom článku [II.2] boli prezentované očakávané prejavy jadrových efektov v produkcii hadrónov v nukleón-jadrových interakciách. Hlavný dôraz bol kladený na prejavy tzv. Croninovho javu, ako aj efektov kvantovej koherencie spôsobujúcich silné jadrové potlačenie hlavne v kinematickej oblasti LHC. (Tento článok vzbudil pomerne veľký ohlas, zoznam doterajších citácií sa nachádza vo formulári „*Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie 2013*“.)

V rámci priblíženia farebného dipólu bola študovaná produkcia priamych fotónov v protón-jadrových a jadro-jadrových interakciách pri energiách RHIC a LHC [II.3]. Priame fotóny, ktoré vznikajú v jadrovej zrážke, nie sú sprevádzané žiadnou interakciou konečného stavu, ani energetickými stratami či absorpciou. Preto v energetickej oblasti zodpovedajúcej RHIC sa okrem malých izotopických korekcií neočakávajú žiadne jadrové efekty pri veľkých hodnotách priečnej hybnosti p_T . Avšak údaje z experimentu PHENIX indikujú signifikantné potlačenie v d+Au a centrálnych Au+Au interakciách, ktoré nemôže byť spôsobené efektami koherencie. Bolo ukázané, že takýto neočakávaný výsledok môže byť len prejavom ohraničení spôsobených zachovaním energie pri počiatkových mnohonásobných rozptyloch partónov (efekty ISI) pri veľkých hodnotách p_T alebo pri dopredných rapiditách. V kinematickej oblasti LHC sú korekcie ISI efektov irelevantné pri nulových rapiditách, ale spôsobujú silné potlačenie pri dopredných rapiditách. Ako prvé vôbec boli prezentované predpovede pre očakávané jadrové efekty pri veľkých hodnotách p_T v p+Pb a Pb+Pb interakciách pri rôznych rapiditách. Taktiež bol zahrnutý a analyzovaný príspevok javov koherencie spojených s tienením gluónov, ktoré modifikujú jadrové efekty predovšetkým pri malých a stredných hodnotách p_T .

V prácach [II.4, II.5] bola skúmaná produkcia hadrónov s veľkými p_T v rámci QCD-zdokonaleného partónového modelu v protón-protónových a protón-jadrových zrážkach pri rozdielnych energiách zodpovedajúcich experimentom na urýchľovačoch RHIC a LHC. Bola dodatočne zahrnutá jadrová modifikácia partónových rozdeľovacích funkcií a jadrového rozšírenia v rámci prístupu farebného dipólu s rôznymi parametrizáciami dipólového účinného prierezu. Bolo ukázané, že doplnkový efekt ISI spôsobuje silné potlačenie pre veľké p_T a dopredné rapidity. Bol prezentovaný dobrý opis Croninovho javu pri

stredných hodnotách p_T a jadrové potlačenie pre veľké p_T v súlade s existujúcimi dátami získanými na urýchľovačoch RHIC a LHC. V kinematickej oblasti LHC toto potlačenie pri vysokých hodnotách p_T očakávané pri dopredných rapiditách môže byť verifikované budúcimi meraniami.

Skúmanie jadrových efektov v produkcii hadrónov s veľkými p_T v nukleón-jadrových zrážkach bolo rozšírené aj na oblasť nízkych energií zodpovedajúcich experimentom s pevnými terčikmi [II.6]. V tejto kinematickej oblasti predpovedáme silný prejav ISI efektov v súlade s hodnotami z experimentov na SPS a vo FNAL.

V závere tohto roka sme predpovede pre jadrové potlačenie a azimutálnu asymetriu získané v rámci poruchovej QCD [II.7, II.8, II.9] skombinovali s hydrodynamickými výpočtami, čo umožnilo opísať inkluzívnu produkciu častíc pri rôznych energiách, rapiditách a centralitách zrážky v celom rozsahu hodnôt hadrónových pričných hybností. Hadróny vzniknuté inkluzívne s veľkými p_T v zrážkach pri vysokých energiách sú vytvorené z jetov, ktorých energia a virtualita sú porovnateľné. Toto spôsobuje veľmi intenzívnu gluónovú radiáciu a energetické straty počas štádia hadronizácie. Takéto jety sa vyznačujú tým, že hlavná časť ich energie je unesená vzniknutým hadrónom. Ohraničenia spôsobené zachovaním energie spôsobujú potom krátke trvanie farebnej neutralizácie. Vzniknutý bezfarebný dipól už ďalej nestráca energiu a iba formuje hadrónovú vlnovú funkciu. Oblasť malých a stredných p_T je dominovaná hydrodynamickým mechanizmom produkcie hadrónov z horúcej jadrovej matérie. Náhly prechod medzi hydrodynamickým a poruchoým QCD mechanizmom vytvára výrazné minimá v závislosti jadrového modifikačného faktora a azimutálnej asymetrie od p_T .

Dosiahnuté výsledky boli prezentované aj na medzinárodných konferenciách a workshopoch (viď nižšie).

III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov

V súlade s projektovým cieľom 3.5 sme vyšetrovali vplyv jetov na hydrodynamicky sa správajúce médium. Na tejto úlohe spolupracujeme s Ing. M. Schulcom z JFI ČVUT v Prahe. Odladili sme a následne testovali algoritmus na 3D simuláciu horúcej jadrovej hmoty, ktorý zahŕňa aj zdrojové členy na simuláciu deponovanej energie z vysokoenergetických častíc. Existujúci softvér zatiaľ počíta s ideálnou kvapalinou. Použitá je stavová rovnica, ktorá najlepšie reprodukuje výsledky získané z výpočtov QCD na mriežke. Simuláciu sme niekoľkokrát v priebehu roka aktualizovali, kým sme vybrali najlepšiu stavovú rovnicu a odstránili všetky chyby vzniknuté pri programovaní. Podarilo sa nasimulovať niekoľko konfigurácií, kde jety deponujú energiu a hybnosť do statického média. Výber z týchto výsledkov bol publikovaný v článku [III.1].

Následne sme upravili program do podoby vhodnej pre simulovanie expandujúceho fireballu. Výrazná dominancia pozdĺžneho rozpínania vedie k zavedeniu krivočiarych súradníc a potrebe transformácie rovníc do nových súradníc. Tieto zmeny v programe boli urobené a program bol znova odladený. V súčasnosti sme v stave, keď máme fungujúci softvér a plánujeme na počítačovom klastri spúšťať veľký počet simulácií.

K tomuto cieľu patrí aj paralelne spracovávaný projekt, v rámci ktorého vyvíjame nezávislú hydrodynamickú simuláciu v inom programovacom jazyku a s využitím iného algoritmu. Je to zároveň aj projekt dizertačnej práce Z. Feckovej. Doposiaľ sa podarilo vyvinúť a odladiť algoritmus pre jednorozmerný vývoj kvapaliny. To je podstatná časť celkového algoritmu, pretože 3D algoritmus využíva jednoduchší 1D algoritmus.

Nejaký čas sme venovali aj štúdiu vplyvu zachovania náboja a hybnosti na azimutálne korelačné funkcie produkovaných hadrónov [III.2]. Merané azimutálne korelačné funkcie sú interpretované ako signály chirálneho magnetického javu vyplývajúceho z narušenia P a CP symetrie. Nepodarilo sa nám zo simulácií presvedčivo dokázať vplyv zachovania náboja a hybnosti na korelačné funkcie.

Po analýze novej literatúry a situácie s dostupnosťou experimentálnych dát sme sa rozhodli utlmiť projekt zameraný na vývoj Monte Carlo generátora hadrónov rešpektujúceho zákony zachovania energie, hybnosti a náboja. Takéto výsledky boli totiž nedávno publikované inými skupinami (hlavne L. Ferroni, pozri napr. [III.3]).

Namiesto toho sme zamerali svoju pozornosť na analýzu identifikovaných hadrónových spektier v pričnej hybnosti, ktoré sú dostupné z jadrových zrážok na LHC. V literatúre totiž neexistuje analýza

týchto spektier pomocou modelu rázovej vlny (blast wave model), ktorá by korektne uvážila všetky príspevky k hadrónovej produkcii z rozpadov rezonancií. Umožňuje to však náš Monte Carlo generátor DRAGON [III.4]. Pomocou neho sme generovali spektrá, ktoré sme porovnávali s experimentálnymi údajmi. Vzhľadom na zvolenú metódu – jedínú možnú pri zahrnutí všetkých rozpadov rezonancií – sú výpočty veľmi náročné na výpočtovú kapacitu a čas. Pri simuláciách využívame aj kapacitu výpočtového strediska na UMB v Banskej Bystrici (High Performance Computing Centre, HPCC).

Analýza kvantových kinetických rovníc, ktorú zahájil E. E. Kolomeitsev v spolupráci s D. N. Voskresenskym už v r. 2012 (v súlade s III. cieľom projektu), bola rozšírená a zahŕňa teraz všeobecný postup, ako je možné mieru časového trvania procesu zaviesť v klasickej mechanike, elektrodynamike, kvantovej teórii poľa a kvantovej kinetike. Boli analyzované podmienky objavenia sa časového oneskorenia alebo predstihu v reakcii systému na externú poruchu. Boli zdôraznené nejednoznačnosti pri definícii časovej miery a zväžené rôzne alternatívny definície času.

Vedľajším produktom tohto výskumu je analýza a návrh riešenia paradoxu zdanlivej nadsvetelnej rýchlosti pri kvantovomechanickom tunelovaní (Hartmanov jav).

Práca bola publikovaná ako „Topical Review“ v časopise Journal of Physics G [III.5].

IV. Chladná a hustá jadrová hmota

V júli 2013 sa E. E. Kolomeitsev zúčastnil na workshope *Neutron Stars: Nuclear Physics, Gravitational Waves and Astronomy* v Surrey, kde boli diskutované problémy stability rotujúcich neutrónových hviezd. V neutrónovej hviezde, ktorá rotuje s frekvenciou vyššou ako istá kritická hodnota, sa objavujú nestabilné excitačné módy (tzv. *r-módy*), ktoré rastú v dôsledku emisie gravitačných vln. Ak by tieto módy neboli utlmené, hviezda by stratila svoj moment hybnosti a prestala by rotovať.

Mechanizmom tlmenia *r-módov* je viskozita hmoty neutrónovej hviezdy. Viskózne koeficienty, ktoré boli doteraz vypočítané, nie sú dostatočne veľké na vysvetlenie vlastností pozorovaných rýchlo rotujúcich neutrónových hviezd. E. E. Kolomeitsev a D. N. Voskresensky navrhli nové mechanizmy, ktoré by mohli viesť k nárastu viskozity hmoty neutrónových hviezd. Článok na túto tému je pred dokončením [IV.1].

Doplňujúce informácie o riešení projektu

Zapojenie doktorandov do riešenia projektu: V projekte je priamo zapojená Z. Fecková, doktorandka UPJŠ v Košiciach, ktorej školiteľom je B. Tomášik a na projekte sa zúčastňuje 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 jednou z tém projektu (konkrétne s III. témou uvedenou vyššie).

S problémami projektu úzko súvisia aj zadania dizertačných prác troch doktorandov KF FJFI ČVUT v Prahe, dvoch z nich školí J. Nemčík a jedného B. Tomášik. (Ing. J. Čepila, doktorand J. Nemčíka, obhájil dizertačnú prácu 22.1.2014.)

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 Čile (univerzita a vedecké pracoviská vo Valparaíse), z RF (Moskovský fyzikálno-inžiniersky inštitút) a z USA (Štátna univerzita v San Franciscu). Výmena skúseností, výsledkov a časté konzultácie prebiehajú aj s pracovníkmi v Maďarsku, Nemecku, Rakúsku, Ukrajine a i.

Z prostriedkov grantu boli hrazené náklady spojené s návštevou dr. Olega Borisenka z Bogolubovovho ústavu teoretickej fyziky v Kyjeve, ktorý vo FÚ SAV predniesol seminár o výsledkoch svojho výskumu a s ktorým sme diskutovali o možnostiach spolupráce na problémoch štruktúry základného stavu QCD. ÚEF SAV navštívila za účelom intenzívnych konzultácií dr. Jana Bielčíková z Ústavu jadrovej fyziky AV ČR, v.v.i., v Řeži pri Prahe.

Prezentácia výsledkov na medzinárodných konferenciách: Výsledky projektu boli prezentované na viacerých konferenciách:

E. E. Kolomeitsev predniesol plenárnu prednášku na konferencii *Strangeness in Quark Matter 2013* v Birminghame (Veľká Británia), J. Nemčík pozvané prednášky na workshope *Physics Opportunities at an Electron-Ion Collider (POETIC 2013)*, Valparaíso (Čile), a na konferencii *EDS Blois 2013: The 15th Conference*

on *Elastic and Diffractive scattering* v Saariselkä (Fínsko) [II.7], Š. Olejník pozvanú prednášku na workshope *QCD-TNT-III From quarks and gluons to hadronic matter: A bridge too far?* v Trente (Taliansko) a B. Tomášik pozvanú prednášku na *20. konferencii slovenských fyzikov* v Bratislave.

J. Nemčík ďalej prednášal na workshope *5th International Workshop "High Energy Physics in the LHC Era"* vo Valparaíse (Čile), E. E. Kolomeitsev na workshope *Neutron Stars: Nuclear Physics, Gravitational Waves and Astronomy* v Surrey (Veľká Británia), na medzinárodnom workshope *ISTROS 2013* v Častej-Papierničke (SR) a na konferencii *Prague Synergy 2013* v Prahe (ČR), Z. Fecková a I. Melo na zimnej škole *2013 Zimányi Winter School on Heavy Ion Collisions* v Budapešti (Maďarsko). Výsledky projektu, dosiahnuté v spolupráci s J. Nemčíkom, prezentoval na medzinárodnej konferencii *Hadron Structure '13* v Tatranských Matliaroch (SR) jeho doktorand M. Křelina a na dvoch ďalších konferenciách Nemčíkov zahraničný spolupracovník B. Z. Kopeliovich.

Výsledky boli prezentované aj na 6 postroch [Z. Fecková, *51. Internationale Universitätswochen für Theoretische Physik*, Schladming (Rakúsko); Z. Fecková, *Ecole Joliot Curie 2013: A Colourful Journey: From Hadrons to Quark-Gluon Plasma*, Frejus (Francúzsko); J. Čepila (spolupráca s J. Nemčíkom), *International Nuclear Physics Conference, INPC 2013*, Florencia (Taliansko); M. Křelina (spolupráca s J. Nemčíkom), *ibid.*; M. Křelina (spolupráca s J. Nemčíkom), *LHCP 2013 – First Large Hadron Collider Physics Conference*, Barcelona (Španielsko); Š. Olejník, *Lattice 2013*, Mainz (SRN)]. Z. Fecková pripravila a predniesla študentskú prednášku na podujatí *2013 Student Practice in JINR Fields of Research* v Dubne (RF).

2. Rozbor výsledkov riešenia vzhľadom na stanovené ciele

Obdobie, za ktoré podávame túto správu, uzatvára prvých 18 z plánovaných 42 mesiacov riešenia projektu, čo tvorí necelých 45% celkového času. Boli už dosiahnuté viaceré dôležité výsledky, ďalšie zaujímavé témy sú rozpracované. Ako sme v návrhu projektu avizovali, niektoré ciele bude nutné upresniť a/alebo modifikovať. Opäť zhrnieme súčasný stav po jednotlivých tematických okruhoch projektu:

I. **Uväznenie farby a štruktúra vákua kvantovej chromodynamiky**

Výsledky výpočtov štvorca VVF pre testovacie súbory konfigurácií sú zaujímavé a sú nimi do značnej miery naplnené ciele 1.1 a 1.2, ktoré boli uvedené v návrhu projektu. V roku 2013 boli uverejnené v dvoch príspevkoch v zborníkoch z konferencií [I.5, I.6]. Konečné výsledky štúdia VVF pre neabelovské konštantné polia a abelovské rovinné vlny budú uverejnené čoskoro v odbornom časopise *Physical Review D* [I.7].

Zatiaľ sa nám, napriek viacerým pokusom, nepodarilo nájsť priamu metódu na generáciu konfigurácií kalibračných polí s rozdelením podľa nášho návrhu približného VVF v (3+1) rozmeroch. Komplikácie, ktoré spôsobujú Bianchiho podmienky v (3+1) rozmeroch, sa nateraz javia ako neprekonateľné.

Čo sa týka štúdia teórie s kalibračnou grupou G_2 , početná skupina na Univerzite v Jene, ktorá sa problému intenzívne venuje, uskutočnila v uplynulom roku výrazný skok v simuláciách tejto teórie pri nulovej i konečnej teplote [I.8]. Analyzujeme v súčasnosti otázku, či je možné – s našimi obmedzenými ľudskými a počítačovými možnosťami – získať v tomto smere relevantné a konkurencie schopné vedecké výsledky.

II. **Tvrde sondy v procesoch na jadrových terčoch**

Ciele projektu v tomto výskumnom smere sa priebežne plnia v súlade s pôvodným návrhom projektu.

Najskôr sme študovali rôzne prejavy jadrových efektov vo forme jadrového pohltienia a azimutálnej asymetrie v inkluzívnej produkcii hadrónov, priamych a virtuálnych fotónov v hadrón-jadrových zrážkach. Toto štúdium sa uskutočnilo pri rôznych hodnotách rapidity a v závislosti od energie zrážky. Neskôr sme skúmali jadrové pohltienie pri veľkých hodnotách priečnej hybnosti p_T vzniknutých častíc a Feynmanovej premennej x_F . Modelové predpovede sú v dobrom súhlase s existujúcimi experimentálnymi hodnotami.

V ďalšej etape riešenia sa skúmali jadrové efekty v produkcii častíc v zrážkach ťažkých iónov. Analyzovali sme vplyv efektov spojených so zákonom zachovania v počiatočných rozptyloch partónov pri rôznych energiách, centralitách zrážky, rapiditách a p_T . V rámci prístupu farebného dipólu založeného na formalizme Greenových funkcií boli stanovené hodnoty transportného koeficientu vzniknutej jadrovej matérie.

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 urýchľovačoch RHIC a LHC.

III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov

V oblasti opisu dynamiky fireballu a produkcie hadrónov sme publikovali článok [III.1], v ktorom prezentujeme výsledky simulácií statickej kvarkovo-gluónovej plazmy, do ktorej je z jedného alebo dvoch vysoko-energetických partónov deponovaná energia a hybnosť. Tento výsledok znamená, že sme schopní simulovať vplyv tvrdých partónov na médium. Predovšetkým však potvrdzuje predchádzajúce predpoklady Tomášika a Lévaia [III.6], že prúdy vzniknuté v plazme na seba vplývajú a môžu sa zlievať. Na základe tohto predpokladu dospeli autori k záveru, že viacero tvrdých partónov deponujúcich energiu a hybnosť môže viesť k príspevku k eliptickému toku. Vo svetle dnes známych dát sa dá konštatovať, že tento proces môže mať dôležité príspevky nielen k eliptickému toku, ale aj k vyšším zložkám azimutálnej anizotropie toku.

Predbežné výsledky analýzy identifikovaných hadrónových spektier pomocou modelu DRAGON naznačujú nezvyčajne nízku teplotu kinematického vymrznutia spektier. Naša teplota je nižšia ako všetky doteraz publikované výsledky. Rozdiel oproti iným analýzám spočíva v úplnom zahrnutí rozpadov rezonancií v našom prístupe. Aktuálne výsledky boli konzultované s niektorými zástupcami experimentu ALICE v CERNe (hlavne v súvislosti s výsledkami v článku [III.7]) a prezentované začiatkom decembra 2013 na Zimányi Winter School, zimnej škole venovanej fyzike ťažkých iónov [III.8].

Analýza časových mier, ktorú uskutočnili E. E. Kolomeitsev a D. N. Voskresensky [III.5], je relevantná pre pochopenie vzniku a evolúcie rezonančných stavov, ktoré sú podstatnou zložkou horúcej jadrovej hmoty produkovanej v zrážkach ťažkých iónov.

IV. Chladná a hustá jadrová hmota

Štúdium viskozity hustej a chladnej jadrovej hmoty, ktorá je zodpovedná za tlmenie r-módovej nestability v neutrónovej hviezde, ukázalo, že existujú príspevky, ktoré môžu byť dôležité aj v prípade horúcej jadrovej hmoty (napr. radiačná viskozita). Zrážky ťažkých iónov najlepšie opisuje neideálna hydrodynamika a spoľahlivé odhady viskózných koeficientov sú nanajvyš potrebné.

Súhrnné vyjadrenie o splnení cieľov

Celkovo možno konštatovať, že ciele projektu stanovené na rok 2013 boli v prevažnej miere splnené. Niektoré parciálne problémy sú rozpracované. Boli dosiahnuté a publikované zaujímavé výsledky, všetky v odborných časopisoch vysokej medzinárodnej úrovne. V rokoch 2012 a 2013 vyšlo zatiaľ 5 publikácií s výsledkami projektu v karentovaných vedeckých časopisoch (šiesta je v tlači). Dve z nich sú mimoriadne rozsiahle ([II.2] má 82 str. a [III.5] dokonca 122 str.).

Realizáciu cieľov projektu zhodnotil aj verejný výročný seminár (minikonferencia) projektu (6.11.2013 na KF FPV UMB v Banskej Bystrici). Odznali na ňom o.i. príspevky všetkých riešiteľov o výsledkoch čiastkových úloh projektu a boli prediskutované ciele a plány na najbližšie obdobie.

3. Zoznam výstupov a prínosov projektu za posledný rok

Úplný zoznam je uvedený v prílohe, vo formulári „*Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie 2013*“. Publikácie, ktoré vyšli v priebehu roku 2013, sú k tejto správe priložené.

4. Upresnenie harmonogramu prác a cieľov na nasledujúci rok

V štyroch tematických okruhoch projektu budú v roku 2014 skúmané hlavne tieto problémy resp. plánujeme splniť nasledujúce ciele:

I. Uväznenie farby a štruktúra vákua kvantovej chromodynamiky

Problémom metódy relatívnych váh [I.1], ktorú používame na výpočty VVF QCD v numerických simuláciách SU(2) kalibračnej teórie na mriežke, je nevyhnutnosť obmedziť sa na súbory jednoduchých konfigurácií polí, ktoré sú k sebe pomerne blízke. Súbory neabelovských konštantných polí a abelovských

rovinných vlín, ktoré sme doteraz skúmali, sú značne atypické. Bolo by žiaduce aplikovať metódu na také súbory, ktoré sú malými variáciami okolo realistických termalizovaných mriežkových konfigurácií. Budeme sa o to v nadchádzajúcom období usilovať, najprv skúšobne v (2+1) a potom v (3+1) rozmeroch.

Ako sme už spomínali v časti 2, v prípade teórie s kalibračnou grupou G_2 uskutočníme niekoľko testov, aby sme rozhodli, či je možné získať v tomto smere kompetitívne vedecké výsledky.

Ďalšou alternatívou, ktorú v súčasnosti analyzujeme, je problém, ktorý sme sčasti rozpracovali v staršom článku [I.9]. Tam sme určovali obsah konštituentných gluónov v trubici medzi statickým kvarkom a anti-kvarkom v coulombovskej kalibrácii. Obmedzili sme sa na jednu triedu operátorov stavov trubice s jedným a dvoma gluónmi. Domnievame sa, že výsledky práce [I.9] je možné vylepšiť zahrnutím širšej množiny jedno- a viac-gluónových operátorov. Tento problém súvisí s cieľom 1.4 pôvodného projektu.

II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch

V roku 2014 sa v rámci tejto témy plánujeme zaoberať predovšetkým nasledujúcimi problémami:

- Štúdium Croninovho javu pri rôznych energiách zrážky a hodnotách rapidity.
- Teoretický výskum produkcie jetov v protón-jadrových interakciách a v zrážkach ťažkých iónov.
- Teoretický výpočet inkluzívnej produkcie hadrónov v zrážkach ťažkých iónov v rámci kvark-partónového modelu pri rôznych energiách, centralitách zrážky a rapiditách zodpovedajúcich experimentom na RHIC a LHC.
- Štúdium jadrových efektov v produkcii jetov pri veľkých hodnotách priechnej hybnosti p_T .
- Skúmanie jadrových efektov v produkcii ťažkých kvarkov pri veľkých hodnotách priechnej hybnosti p_T .

III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov

Projekt hydrodynamických simulácií zahŕňajúcich tvrdé partóny je dobre rozbehnutý a v roku 2014 plánujeme prvé relevantné výsledky porovnateľné s experimentálnymi dátami. Veľká pozornosť je aktuálne venovaná nielen eliptickej zložke anizotropie rozdelenia častíc, ale aj vyšším harmonickým zložkám. Tie sú interpretované ako dôsledok nehomogenít v počiatočnom stave vývoja horúcej hmoty. Chceme ukázať, ako môžu anizotropie hadrónového rozdelenia vznikáť pod vplyvom deponovania energie z jetov do média. Tieto procesy sú v každej individuálnej zrážke iné.

Preto začneme simuláciou pomerne veľkého množstva jadrových zrážok na veľkom počítačovom klastri. V každej z nich bude rozloženie tvrdých partónov iné. Analyzujeme priestorové a hybnostné anizotropie vyvíjajúceho sa fireballu a to, ako je ich časový vývoj ovplyvnený jetmi. Potom aplikujeme metódu Coopera a Fryea [III.9] na simulácie rozdelenia hadrónov. Následne môžeme analyzovať uhlové rozdelenia hadrónov. Prvé výsledky chceme prezentovať na konferencii *Quark Matter 2014* v máji v Darmstade a článok zhrňujúci všetky výsledky by mal byť dokončený a zaslaný na uverejnenie v lete.

V ďalšom kroku zahrnieme do našich simulácií aj transportné javy (objemovú a šmykovú viskozitu).

Paralelne vyvíjaný hydrodynamický model by mal byť tiež dokončený a odskúšaný. Tento vývoj by sa mal stať obsahom projektu dizertačnej práce Z. Feckovej. Po dizertačnej skúške by sme algoritmus chceli použiť na štúdium vplyvu anizotropného tvaru zrážajúcich sa jadier na konečné rozdelenie produkovaných hadrónov.

V roku 2014 chceme tiež skompletizovať analýzu identifikovaných hadrónových spektier z Pb+Pb zrážok na LHC. Pri veľmi nízkych hodnotách teploty, ktoré sa nám teraz ukazujú a ktoré sa veľmi líšia od teplôt chemického vymrznutia, môže byť veľmi dôležité správne zahrnutie chemických potenciálov do simulácií teoretických spektier. Preto ich chceme zahrnúť prv, ako štúdiu zašleme na uverejnenie. Tieto výsledky by sme chceli tiež prezentovať na konferencii *Quark Matter 2014*. V ďalších krokoch našu analýzu zjemníme a zahrnieme aj eliptický tok. Druhým smerom rozšírenia bude analýza energetickej závislosti, teda fitovanie identifikovaných hadrónových spektier z jadrových zrážok pri nižších energiách na LHC a RHIC.

IV. Chladná a hustá jadrová hmota

Zámer skúmať Landauove–Migdalove parametre v normálnych a párových kanáloch a ich vzájomné vzťahy je odsunutý na neskôr akútnejšou potrebou skúmať stabilitu r-módov v neutrónových hviezdach. Túto tému by mal E. E. Kolomeitsev završiť v priebehu r. 2014.

V oblasti výskumu zmagnetizovaných neutrónových hviezd plánujeme zvážiť možnosť nového javu feromagnetickkej supratekutosti, ktorý sa môže objaviť v hmote so spinovo-tripletným fermiónovým párovaním, ktoré existuje v jadrách neutrónových hviezd.

Odkazy na literatúru

- [I.1] J. Greensite, J. Iwasaki, Phys. Lett. B **223** (1989) 207.
- [I.2] J. Greensite, Nucl. Phys. **B158** (1979) 469; M. Halpern, Phys. Rev. D **19** (1979) 517.
- [I.3] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **77** (2008) 065003.
- [I.4] D. Karabali, C.-j. Kim, V. Nair, Phys. Lett. B **434** (1998) 103.
- [I.5] J. Greensite, Š. Olejník, Proc. Sci., PoS(QCD-TNT-III)027 (2013).
- [I.6] J. Greensite, Š. Olejník, Proc. Sci., PoS(LATTICE 2013)027 (2013).
- [I.7] J. Greensite, Š. Olejník, preprint <http://arxiv.org/abs/1310.6706> [hep-lat] (2013), Phys. Rev. D **89** (2014) v tlači.
- [I.8] B. H. Wellegehausen, A. Maas, A. Wipf, L. von Smekal, preprint <http://arxiv.org/abs/1312.5579> [hep-lat] (2013).
- [I.9] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **79** (2009) 114501.
- [II.1] J. Nemchik, B. Z. Kopeliovich, I. K. Potashnikova, AIP Conference Proceedings **1523** (2013) 67.
- [II.2] J. L. Albacete, ... , J. Nemchik, *et al.*, Int. J. Modern Phys. E **22** (2013) 1330007.
- [II.3] J. Cepila, J. Nemchik, *Direct photons at large pT: from RHIC to LHC*, výjde v EPJ Web Conf. (2014).
- [II.4] M. Krelina, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **60** (2013) 20023.
- [II.5] M. Krelina, J. Nemchik, *Cronin effect at different energies: from RHIC to LHC*, výjde v EPJ Web Conf. (2014).
- [II.6] M. Krelina, J. Nemchik, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **245** (2013) 239.
- [II.7] J. Nemchik, preprint <http://arxiv.org/abs/1310.3455> [hep-ph] (2013).
- [II.8] B. Z. Kopeliovich (v spolupráci s J. Nemčikom *et al.*), pozvaná prednáška na *International Conference on New Frontiers in Physics*, 28.8.-5.9.2013, Kolymbari, Kréta, Grécko, výjde v EPJ Web Conf. (2014).
- [II.9] B. Z. Kopeliovich (v spolupráci s J. Nemčikom *et al.*), pozvaná prednáška na *9th International Workshop on High-pT Physics at LHC*, 24.-28.9.2013, LPSC Grenoble, Francúzsko.
- [III.1] M. Schulc, B. Tomášik, J. Phys. G **40** (2013) 125104.
- [III.2] Z. Fecková, B. Tomášik, *Influence of momentum and charge conservation on azimuthally sensitive correlations*, in: *Physics in Collision 2012*, ed. D. Bruncko, P. Stríženec, J. Urban (ÚEF SAV, Košice, 2013), str. 391-394.
- [III.3] L. Ferroni, F. Becattini, Acta Phys. Polon. B **43** (2012) 571.
- [III.4] B. Tomášik, Comput. Phys. Commun. **180** (2009) 1642.
- [III.5] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, J. Phys. G **40** (2013) 113101.
- [III.6] B. Tomášik, P. Lévai, J. Phys. G **38** (2011) 095101.
- [III.7] ALICE Collaboration (B. Abelev *et al.*), Phys. Rev. C **88** (2013) 044910.
- [III.8] I. Melo, B. Tomášik, *Analysis of Pt spectra from PbPb at LHC*, <http://dcps.sav.sk/seminars/melo1213.pdf>, prednáška na zimnej škole 2013 *Zimányi Winter School on Heavy Ion Collisions*, Budapešť, Maďarsko (2.-6.12.2013).
- [III.9] F. Cooper, G. Frye, Phys. Rev. D **10** (1974) 186.
- [IV.1] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, pripravovaný článok.

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

Zodpovedný riešiteľ

RNDr. Štefan Olejník, DrSc.

V Bratislave 29. 01. 2014

Štatutárny zástupca príjemcu

RNDr. Stanislav Hlaváč, CSc,

V Bratislave 29. 01. 2014

.....
podpis zodpovedného riešiteľa

.....
podpis štatutárneho zástupcu príjemcu