

## Ročná správa o riešení projektu za rok 2014

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/](http://dcps.sav.sk/olejnik/projects/apvv_0050_11/) (v anglickom jazyku),  
[http://dcps.sav.sk/olejnik/projects/apvv\\_0050\\_11/sk/](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**

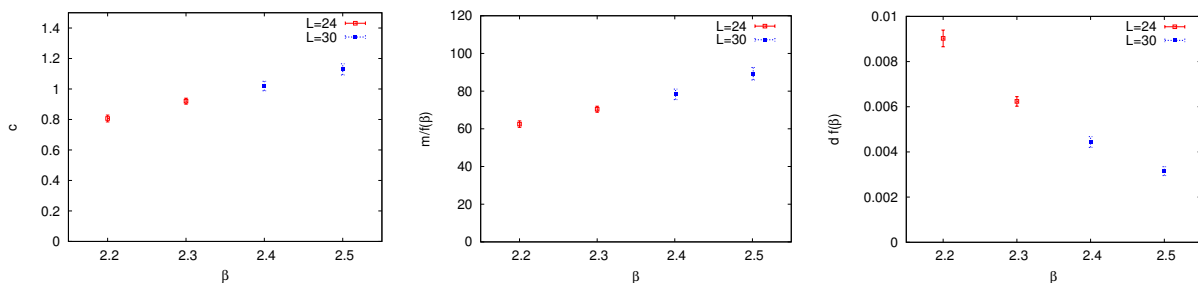
Projekt bol v roku 2014 riešený nezmeneným kolektívom riešiteľov – piatich vedeckých pracovníkov FÚ SAV, UMB a ÚEF SAV a jednej doktorandky. Podľa harmonogramu (časť VV-B schváleného projektu) sa obdobie od 1.1. do 31.12.2014 prekrývalo s časťou 2. etapy riešenia projektu a so začiatkom jeho 3. etapy.

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 2015 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

Aj v roku 2014 bolo úsilie sústredené na ústredný problém tohto výskumného smeru, skúmanie vlnového funkcionálu základného stavu kvantovej chromodynamiky (QCD) v temporálnej kalibrácii. Začiatkom roku boli v odbornom časopise *Physical Review D* [I.1] uverejnené výsledky testov približného vákuového vlnového funkcionálu (VVF) tejto teórie v (3+1)-rozmernom časopriestore, ktorý sme navrhli pred niekoľkými rokmi [I.2]. Váhy rôznych konfigurácií kalibračných polí, ktoré sme určili numerickými simuláciami Yangovej-Millsovej (YM) teórie s kalibračnou grupou SU(2) na mriežke, boli porovnané s očakávaniami, ktoré vyplývajú z navrhnutého VVF, a to pre súbory neabelovských konštantných poľných konfigurácií a abelovských rovinných vlín. Najlepší fit k nameraným hodnotám pre abelovské rovinné vlny závisí od troch parametrov  $c$ ,  $m$  a  $d$ , z ktorých posledný parametrizuje opravu k približnému tvaru, ktorý sme navrhli v práci [I.2]. Povzbudivým výsledkom našich numerických simulácií je skutočnosť, že oprava  $d$  sa v spojitom limite s veľkou pravdepodobnosťou blíži k nule, zatiaľ čo hodnoty  $c$  a  $m$  sa menia iba pomaly a ich pomer je konštantný (obr. 1). To naznačuje, že skutočný VVF sa (prinajmenšom pre skúmané jednoduché súbory konfigurácií) aj v (3+1) rozmeroch blíži k navrhnutému približnému tvaru.



Obr. 1

Súbory, ktoré sme doteraz skúmali, sú značne atypické a v skutočnom vákuu QCD hrajú nevýznamnú úlohu. Preto sme sa v tomto období sústredili na také súbory, ktoré sú bližšie k realistickým rovnovážnym mriežkovým konfiguráciám, zatiaľ iba v menej náročnom prípade (2+1) rozmerov. Napísali a odladili sme počítačový kód, ktorý uskutočňuje rýchlu fourierovskú transformáciu reálnych vákuových konfigurácií vo fixovanom čase (napr.  $t = 0$ ), generuje z nich súbory blízkych konfigurácií s modifikovanou vybranou zložkou hybnosti  $k$ , spätne ich transformuje do súradnicového priestoru a následne určuje relatívne váhy konfigurácií v numerických simuláciách. Výsledky, ktoré sme doteraz analyzovali, neumožňujú ešte formulovať spoľahlivé závery; potrebné bude vyšetriť rôzne spôsoby vypínania/zapínania módov v priestore hybností, rôzne modifikácie konfigurácií, rôzne typy súborov pri rôznych hodnotách väzbovej konštanty, atď.

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.

Čo sa týka štúdia teórie s kalibračnou grupou  $G_2$ , oživil sme starší program na jej numerickú simuláciu. V priebehu roka však boli publikované nové práce (napr. [I.3 a I.4]), ktoré ukazujú, že s našimi obmedzenými počítačovými a ľudskými zdrojmi nebudeme schopní získať v tejto oblasti kompetitívne vedecké výsledky.

### II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch

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

V rámci zjednodušeného modelu pre evolúciu v jadrovej materii započítajúc efekty farebnej filtrácie sme študovali produkciu vedúcich hadronov pri veľkých hodnotách priečnej hybnosti  $p_T$  v zrážkach ťažkých iónov [II.1]. V rámci daného modelu sme analyzovali niekoľko dôležitých zdrojov jadrového potlačenia pozorovaného v súčasnosti na urýchľovačoch RHIC a LHC. Krátka produkčná dĺžka vedúcich hadronov  $l_p$

spôsobuje silný nábeh efektov farebnej priezračnosti, ktoré sa prejavujú ako silný rast jadrového modifikačného faktora  $R_{AA}(p_T)$  pri veľkých hodnotách  $p_T$ . Dominancia kvarkov s väčšou hodnotou  $l_p$  vedie na slabšie potlačenie na urýchľovači RHIC než na LHC. V RHIC kinematickej oblasti sme započítali dodatočný faktor potlačenia, ktorý vyplýva z efektívnych energetických strát partónov počas počiatocného štádia procesu pred zrážkou ťažkých iónov. Tento faktor je prakticky irelevantný na LHC, avšak spôsobuje takmer konštantnú závislosť  $R_{AA}(p_T)$  od  $p_T$  na urýchľovači RHIC. Výpočty obsahujú iba nastavenie hustoty matérie a pre počiatocnú časovú škálu 1 fm sme našli energeticky závislé maximálne hodnoty transportného koeficientu, ktoré nadobúdajú hodnoty 0.7 GeV<sup>2</sup>/fm pri energii zrážky 62 GeV, 1.0 GeV<sup>2</sup>/fm pri energii zrážky 200 GeV a 1.3 GeV<sup>2</sup>/fm pri energii zrážky v ťažiskovej sústave 2760 GeV. Prezentovali sme široké spektrum predpovedí pre jadrový modifikačný faktor a azimutálnu asymetriu v dobrom súhlase s existujúcimi experimentálnymi hodnotami z urýchľovačov RHIC a LHC.

V prácach [II.2, II.6] sme analyzovali všetky súčasti spôsobujúce silné jadrové potlačenie v zrážkach ťažkých iónov. V tvrdej zrážke vytvorený partón s veľkým  $p_T$  postupne regeneruje svoje farebné pole, intenzívne vyžaruje gluóny a stráca energiu. Tento proces nemôže trvať dlho, ak sa má ukončiť produkciou vedúceho hadróna, ktorý unáša dominantnú časť  $z_h$  počiatocnej partónovej hybnosti. Preto je zodpovedajúca časová škála ovplyvnená ohraničeniami spôsobenými zachovaním energie. Hlavnou príčinou pre utlmenie hadrónov tak nie sú energetické straty, ale oslabenie vytvoreného bezfarebného dipólu v hustej matérii, ktorá vznikla po zrážke ťažkých iónov.

Prehľadový článok [II.3] je venovaný ohraničeniam spôsobeným zachovaním energie v procesoch s produkciou častíc s veľkými hodnotami  $p_T$  na jadrových terčoch. Croninov efekt bol úspešne predpovedaný ešte pred prvými meraniami na urýchľovačoch RHIC a LHC. Efektívne energetické straty sa prejavujú v pA interakciách pri veľkých hodnotách  $x_F \rightarrow 1$  a  $x_T \rightarrow 1$  a spôsobujú potlačenie, ktoré bolo naozaj pozorované experimentálne v produkcii hadrónov pri dopredných rapiditách a veľkých  $p_T$ . Intenzívna disipácia energie prostredníctvom gluónovej radiácie vysoko virtuálnym partónom spôsobuje, že farebná neutralizácia a vytvorenie bezfarebného dipólu musí prebehnúť rýchlo.

V práci [II.4] sme študovali produkciu hadrónov s veľkými  $p_T$  s použitím modelu, založeného na QCD faktorizácii v protón-protónových a protón-jadrových interakciách pri rôznych energiách. Započítali sme dodatočne jadrovú modifikáciu partónových rozdeľovacích funkcií, jadrové rozšírenie v rámci prístupu farebného dipólu, korekcie na izotopický spin, ako aj dôsledky efektívnych energetických strát v počiatocnom štádiu pred tvrdou zrážkou. Bol prezentovaný dobrý opis Croninovho javu pri stredných hodnotách  $p_T$  a jadrového potlačenia pri veľkých  $p_T$  v dobrom súhlase s experimentálnymi hodnotami na urýchľovačoch RHIC a LHC. Ako dôsledok efektívnych energetických strát bolo predpovedané silné jadrové potlačenie pri dopredných rapiditách, ktoré môže byť verifikované v budúcnosti experimentami na LHC.

V práci [II.5] sme vyšetrovali produkciu priamych fotónov v pA a AB interakciách v rámci priblíženia farebného dipólu. Priame fotóny, ktoré vznikajú v tvrdej zrážke, nie sú doprevádzané ani energetickými stratami, ani absorpciou. Preto v kinematickej oblasti RHIC okrem slabých korekcií na izotopický spin neočakávame žiadne jadrové efekty pri veľkých hodnotách  $p_T$ . Avšak dáta z experimentu PHENIX indikujú silné jadrové potlačenie v dAu a centrálnych AuAu interakciách, ktoré nemôžu byť interpretované pomocou koherentných javov. Ukázali sme, že tento neočakávaný výsledok je možné zdôvodniť pomocou efektívnych energetických strát a z nich vyplývajúcich korekcií. Ukázali sme, že dané korekcie sú dôležité v kinematickej oblasti RHIC a pri dopredných rapiditách, kde spôsobujú silné jadrové potlačenie. Formulovali sme aj predpovede pre očakávané jadrové efekty na LHC pri veľkých hodnotách  $p_T$  v pPb a PbPb interakciách pri rôznych rapiditách. Taktiež sme analyzovali príspevok koherentných javov spojených s gluónovým tienením, ktoré modifikuje oblasť malých hodnôt  $p_T$ .

### **III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov**

Pracovali sme na rekonštrukcii koncového stavu fireballu v zrážkach Pb+Pb pri energii zrážky 2,76 TeV na nukleón-nukleónový pár, pomocou analýzy spektier rôznych druhov hadrónov v priechnej hybnosti. Toto bol hlavný projekt I. Mela. Experimentálne údaje pochádzali z experimentu ALICE na LHC. Z predbežných výsledkov na začiatku roku sme zistili, že algoritmus na generovanie Monte Carlo eventov nepracuje celkom správne. Problémy sme identifikovali a odstránili. Okrem toho sme sa venovali aj optimalizácii

generátora, ktorý teraz pracuje niekoľkonásobne rýchlejšie. To bolo dôležité, pretože pri analýze je potrebné generovať veľké množstvo dátových súborov, čo je časovo veľmi náročné. Na túto procedúru využívame počítačový klaster zriadený a udržiavaný na Univerzite Mateja Bela v rámci projektu *Slovenská infraštruktúra pre vysokovýkonné počítanie*. Oproti stavu analýz na začiatku roka sme pridali ďalší analyzovaný parameter, takže v súčasnosti z porovnania s experimentálnymi údajmi určujeme tri parametre. Fitujeme spektrá piónov, protónov a kaónov,  $V_0$  častíc a viacnásobne podivných častíc. Simulované dáta sme v druhej polovici roka dopĺňali a kompletizovali tak, aby sme mohli porovnávať so všetkými spomenutými druhmi častíc a vo všetkých meraných centralitách. Asi 80% porovnaní sa nám podarilo už sumarizovať v rukopise pripravovaného článku [III.1]. Zostávajúce porovnania sú v čase prípravy tejto správy prakticky hotové a rukopis bude o ne doplnený.

V roku 2014 sme dokončili a publikovali trojrozmernú simuláciu expandujúceho fireballu, využívajúcu model ideálnej hydrodynamiky a zahŕňajúcu zdrojové členy [III.2]. Tie reprezentujú tvrdé partóny, ktoré deponujú svoju energiu a hybnosť do rozpínajúcej sa kvarkovo-gluónovej plazmy. Tento projekt je témou dizertačnej práce M. Schulca (FJFI ČVUT), ktorý pracuje pod vedením B. Tomášika. V prvej polovici roka sme odladili programy na numerické simulovanie a oboznámili sme sa s dostupným s balíkom THERMINATOR2 [III.3], pomocou ktorého sme generovali konečné Monte Carlo udalosti. Následne sme generovali sady udalostí pre dve rôzne centrality a rôzne nastavenia rýchlosti deponovania hybnosti do plazmy. Táto fáza trvala niekoľko týždňov, pretože bolo treba generovať 500 udalostí pre každé nastavenie parametrov. Následne sme v MC udalostiach vyhodnocovali anizotropie hadrónových rozdelení.

V budúcnosti chceme podobné simulácie robiť na reálnejšom modeli, ktorý zahŕňa aj viskozitu. Počas roka na jeho vývoji pracovala Z. Fecková v rámci projektu svojej dizertačnej práce. Odvodila, napísala a odladila algoritmus, ktorý možno použiť pri numerickom riešení hydrodynamických rovníc. Kritickým bodom algoritmu je jeho schopnosť počítať korektne aj v situáciách, v ktorých vznikajú šokové vlny. Keďže Z. Fecková je študentka, časť roka trávila aj na školách a konferenciách, na ktorých rozširovala svoje vedomosti. Jej účasť bola často pokrytá štipendiom od organizátorov alebo jej aspoň bol odpustený účastnícky poplatok.

#### **IV. Chladná a hustá jadrová hmota**

V roku 2014 sa E. Kolomeitsev venoval hlavne problému stability rýchlo rotujúcich neutrónových hviezd. V neutrónových hviezdach, ktoré rotujú s frekvenciou vyššou ako určitá kritická hodnota, sa objavujú nestabilné excitačné módy (tzv.  $r$ -módy), ktoré rastú v dôsledku emisie gravitačných vln. Ak by tieto módy neboli tlmené, hviezda by strácala moment hybnosti a jej rotácia by sa zastavila. Možným mechanizmom tlmenia  $r$ -módov je viskozita hmoty neutrónovej hviezdy, avšak koeficienty viskozity, ktoré boli doteraz vypočítané, nie sú dostatočne veľké na vysvetlenie vlastností rýchlo rotujúcich neutrónových hviezd. Tento problém je možné prekonať, ak stavová rovnica jadrovej hmoty umožňuje tzv. priame Urca reakcie a/alebo prímies hyperónov vo vnútri hviezd. Takáto stavová rovnica sa však javí ako „mäkká“ na vysvetlenie hmotností hviezd a ochladzovania neutrónových hviezd. Bolo potrebné tento problém znovu analyzovať [IV.1]. Vypočítali sme nanovo koeficienty viskozity hmoty neutrónovej hviezdy a zohľadnili pritom efekty média (*in-medium effects*). Zistili sme, že objemová viskozita (*bulk viscosity*) výrazne rastie, ak sa zoberie do úvahy oslabovanie piónových stupňov voľnosti v hustej jadrovej hmote. Objavili sme tiež nové príspevky k šmykovej viskozite, ktoré zapríčiňujú čiastočný záchyt neutrín v horúcej neutrónovej hviezde a fonóny v neutrónovej supratekutine, a príspevky k objemovej viskozite v dôsledku emisie neutrín (tzv. radiačná viskozita) [IV.2].

Pokrok bol dosiahnutý v snahe skonštruovať novú stavovú rovnicu v rámci relativistických modelov stredného poľa s hadrónovými hmotnosťami a väzbovými konštantami, ktoré selfkonzistentným spôsobom závisia od poľa  $\sigma$ -mezónov. Zabudovaná bola možnosť hyperonizácie vo vnútrach hustých neutronových hviezd. Naše stavové rovnice spĺňajú väčšinu väzbových podmienok, ktoré vyplývajú z experimentálnych údajov: väzbu medzi tlakom a hustotou toku v zrážkach ťažkých iónov, priamu Urca podmienku, väzbu medzi baryónovou a gravitačnou hmotnosťou a podmienku maximálnej hmotnosti neutrónových hviezd.

### **Doplňujúce informácie o riešení projektu**

Zapojenie diplomantov a 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 súviseli resp. súvisia zadania troch dizertačných prác doktorandov KF FJFI ČVUT v Prahe. Ing. J. Čepila, doktorand J. Nemčíka, v roku 2014 dizertačnú prácu úspešne obhájil. Naďalej podľa študijného plánu pokračuje doktorandské štúdium ďalších dvoch doktorandov, jedného školí J. Nemčík a druhého B. Tomášik.

S projektom súvisí aj téma, na ktorej pracuje diplomantka KF FJFI ČVUT R. Kopečná; jej školiteľom je tiež B. Tomášik.

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 hradené náklady spojené s návštevami troch významných zahraničných odborníkov vo Fyzikálnom ústave SAV (Ing. J. Hošek, DrSc., ÚJF AV ČR, Řež, ČR; prof. J. Řídký, DrSc., FzÚ AV ČR, Praha, ČR; dr. Tomáš Brauner, PhD., TU Viedeň, Rakúsko). Každý z nich predniesol vo FÚ SAV seminár o výsledkoch svojho výskumu, diskutovali sme s nimi o výsledkoch nášho projektu a o riešení rôznych problémov, s ktorými sa v rámci neho potýkame.

## **2.**

### **Rozbor výsledkov riešenia vzhľadom na stanovené ciele**

Obdobie, za ktoré podávame túto správu, uzatvára 30 z plánovaných 42 mesiacov riešenia projektu, čo je už vyše 70% celkového času. V projekte boli dosiahnuté mnohé dôležité výsledky, ďalšie zaujímavé témy sú rozpracované. Ako sme v návrhu projektu avizovali a zdôraznili aj v správe za r. 2013, niektoré ciele projektu sa priebežne upresňujú a/alebo modifikujú.

Opäť zhrnieme súčasný stav po jednotlivých tematických okruhoch projektu:

#### **1. 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 2014 boli uverejnené v odbornom časopise *Physical Review D* [I.1] a na medzinárodnej konferencii [I.5]. Táto problematika nepatrí k „mainstreamu“ výskumu kalibračných teórií, isté oživenie záujmu však dokumentuje nedávna dizertačná práca S. Kruga [I.6], ktorú zodpovedný riešiteľ tohto projektu oponoval.

Problém hľadania priamej metódy na generáciu konfigurácií kalibračných polí s rozdelením podľa nášho návrhu približného VVF v (3+1) rozmeroch je komplikovaný a nebol v ňom v tomto roku dosiahnutý zásadnejší pokrok.

Teórii s kalibračnou grupou  $G_2$  bola v nedávnom období venovaná značná pozornosť, je pravdepodobné, že v tejto oblasti s našimi obmedzenými prostriedkami máme veľmi malú šancu získať kompetitívne výsledky.

K problému obsahu konštituentných gluónov v prúdovej trubici medzi statickým kvarkom a antikvarkom bol nedávno publikovaný článok nášho spolupracovníka [I.7]. Zvažujeme jeho dôsledky pre zahrnutie širšej množiny jedno- a viac-gluónových operátorov do numerickej procedúry na určenie obsahu prúdovej trubice.

Výsledky skúmania vlnového funkcionálu základného stavu QCD boli prednesené na sympóziu *DISCRETE 2014* v Londýne v decembri 2014 [I.5]. Konalo sa v znamení 150. výročia Maxwellovej teórie elektromagnetických interakcií, 60. výročia Yangovej-Millsovej teórie neabelovských kalibračných polí a ďalších výročí významných fyzikálnych objavov. Š. Olejník bol pozvaný predniesť na sympóziu prednášku o 35 rokoch výskumu vlnového funkcionálu základného stavu YM teórie.

## **II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch**

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

Rôzne prejavy jadrových efektov sa študovali v protón-jadrových, ako aj jadro-jadrových interakciách. Veľkosť jadrového potlačenia, ako aj azimutálnej asymetrie bola skúmaná v inkluzívnej produkcii rôznych ľahkých hadrónov, ako aj priamych fotónov pri rôznych hodnotách priechnej hybnosti, energie zrážky a rapidity. Opis odpovedajúcich procesov sa realizoval v rámci dvoch nosných modelov – v modeli založenom na QCD faktorizácii a vo formalizme farebného dipólu. Predpovede v rámci oboch modelov sú v dobrom súhlase s existujúcimi experimentálnymi hodnotami.

V ďalšej etape riešenia projektu sa skúmali prejavy jadrových efektov v produkcii častíc v zrážkach ťažkých iónov pomocou zjednodušeného modelu, ktorý opisuje evolúciu bezfarebného systému (dipólu, pred-hadrónu) pri prechode hustou jadrovou matériou. Stanovené hodnoty transportného koeficientu pri rôznych energiách z experimentálnych údajov v rámci zjednodušeného modelu sa takmer nelíšia od hodnôt získaných v rámci sofistikovanejšieho, avšak komplikovanejšieho prístupu, ktorý je založený na formalizme Greenových funkcií. To podporuje oprávnenosť a zdôrazňuje výhody použitia zjednodušeného modelu pri analýze a predpovediach získaných experimentálnych údajov na urýchľovačoch RHIC a LHC.

Výsledky prezentovali J. Nemčík alebo jeho doktorandi na niekoľkých konferenciách [II.7, II.8, II.9].

## **III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov**

Pri analýze spektier v priechnej hybnosti sa ukázalo, že rozpady rezonancií sú dôležitým príspevkom k produkcii hadrónov pre všetky typy hadrónov a všetky intervaly  $p_T$ . Ak ideme od centrálnych zrážok k periférnym, tak teplota vymrznutia rastie a zároveň priemerná priechna rýchlosť expanzie klesá. Podivné a hlavne viacnásobne podivné hadróny naznačujú vymrznutie pri trochu vyšších teplotách ako nepodivné. Zaujímavé je, že spektrum piónov v oblasti pri veľmi nízkych  $p_T$  sme nedokázali v našom modeli dostatočne dobre zreprodukovať. Dáta naznačujú možný chemický potenciál pre pióny. Naše výsledky sme predstavili vo forme postera na konferencii *Quark Matter* (Darmstadt, máj 2014) a v prednáškach I. Mela na *Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy* (Gyongyos, Maďarsko, august 2014) a *18. konferencii českých a slovenských fyzikov* (Olomouc, september 2014). Článok s výsledkami by mal byť dokončený v priebehu niekoľkých dní.

Naše hydrodynamické simulácie s vloženými tvrdými partónmi ukázali, že dôležitá časť pozorovaných anizotropií hadrónových rozdelení môže byť spôsobená práve mechanizmom, ktorý sme navrhli. Toto sme síce očakávali, ale teraz máme výsledok potvrdený relevantnou simuláciou. Príslušná práca bola publikovaná v časopise *Physical Review C* [III.2] a predstavená ako poster na konferencii *Quark Matter* (Darmstadt, máj 2014) a v prednáškach B. Tomášika na konferenciách *PANIC* (Hamburg, august 2014) a *International Workshop on Collectivity in Relativistic Nuclear Collisions* (Kolymbari, Kréta, september 2014). K oboj konferenciám sme tiež napísali príspevky do zborníkov, ktoré sú v tlači [III.4, III.5].

Nový algoritmus na riešenie hydrodynamických rovníc spolu s jeho testami predstavila Zuzana Fecková v prednáškach na konferencii *Hot Quarks* (Las Vegas, Španielsko, september 2014) a na *18. konferencii českých a slovenských fyzikov* (Olomouc, september 2014). K oboj konferenciám sme napísali príspevky do zborníka, zborník z konferencie *Hot Quarks* je recenzovaný a príspevok je už akceptovaný v *Journal of Physics: Conference Series* [III.6].

## **IV. Chladná a hustá jadrová hmota**

Pomocou novo vypočítaného koeficientu viskozity hmoty neutrónovej hviezdy sme ukázali, že stabilitu tzv.  $r$ -módov v mladých rýchlo rotujúcich pulzaroch je možné vysvetliť, ak zoberieme do úvahy silné modifikácie nukleon-nukleonovej interakcie v médiu v dôsledku oslabovania piónových stupňov voľnosti v hustej jadrovej hmote. Prítomnosť veľmi rýchlych priamych Urca procesov nie je nevyhnutná. V našom

modeli by najrýchlejšie rotujúci pozorovaný mladý pulzar PSR J0537-6910 mal mať hmotnosť väčšiu alebo rovnú 1,8-násobku slnečnej hmotnosti. Žiaden konvenčný príspevok k viskozite však nie je schopný vysvetliť stabilitu rýchlej rotácie starých recyklovaných röntgenovských binárnych pulzarov. Na vyriešenie tohto problému navrhujeme nový efektívny mechanizmus, ktorý súvisí s vznikom kondenzátov nižších módov bozónových excitácií s konečnou hybnosťou a/alebo s nárastom nehomogénnych piónových/kaónových kondenzátov v niektorých častiach hviezdy, ak uhlová rýchlosť presiahne kritickú hodnotu.

Výsledky výskumu boli v r. 2014 uverejnené v jednom odbornom článku v časopise *European Physical Journal A* [IV.1], dva preprinty boli zaslané na uverejnenie: [IV.2] (*Physical Review C*, v tlači) a [IV.3] (*Europhysics Letters*, v recenznom konaní).

O výsledkoch referoval E. Kolomeitsev v pozvaných prednáškach na *3rd International Symposium on Non-equilibrium Dynamics and the 4th Network I3-HP3 Workshop on Theory of UltraRelativistic Heavy Ion Collisions* (Hersonissos, Kréta, Grécko, jún 2014), na *Helmholtz International Summer School "Nuclear Theory and Astrophysical Applications"* (Dubna, RF, júl 2014) na *XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics"* (Dubna, RF, september 2014).

### **Súhrnné vyjadrenie o plnení cieľov**

Celkovo možno konštatovať, že ciele projektu stanovené na rok 2014 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 2012-2014 vzniklo v rámci projektu zatiaľ 9 publikácií v karentovaných vedeckých časopisoch. Tri z nich majú charakter rozsiahleho prehľadového článku („review“ alebo „topical review“, jedná sa o dve práce z roku 2013 a prácu [II.3] z roku 2014). Priemerný impakt-faktor časopisov, v ktorých boli výsledky doteraz uverejnené, je 3,345. Na práce s výsledkami projektu registrujeme k 31.12.2014 spolu 68 citácií, z nich je 36 v časopisoch sledovaných vo Web of Science, zvyšok v konferenčných príspevkoch, doteraz nepublikovaných preprintoch, dizertačných prácach a pod. Mimoriadny ohlas má hlavne prehľadový článok z minulého roka [J. L. Albacete et al., *Int. J. Mod. Phys. E* **22** (2013) 1330007], ktorý bol citovaný 59-krát.

Vzhľadom na to, že APVV neposkytla v r. 2014 na projekt celú sumu podľa schváleného rozpočtu, upustili sme od verejného výročného seminára (minikonferencie) projektu, ktorý sa mal v r. 2014 uskutočniť na pôde ÚEF SAV v Košiciach. Ďalšie takéto verejné bilancovanie výsledkov plánujeme uskutočniť buď na jar alebo až koncom roku 2015.

## **3.**

### **Zoznam výstupov a prínosov projektu za posledný rok**

Úplný zoznam je uvedený v prílohe, vo formulári „*Výstupy a prínosy projektu za rok/obdobie 2014*“. Publikácie, ktoré vyšli v priebehu roku 2014, sú k tejto správe priložené.

## **4.**

### **Upresnenie harmonogramu prác a cieľov na nasledujúci rok**

Rok 2015 je posledným rokom riešenia tohto projektu. Sústredíme sa preto na završenie jeho hlavných rozpracovaných výskumných problémov, publikovanie dosiahnutých výsledkov a ich prezentáciu na medzinárodných vedeckých podujatiach.

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**

Budeme sa venovať hlavne završeniu štúdia VVF QCD v numerických simuláciách SU(2) kalibračnej teórie na mriežke. Budeme pokračovať v započatých výpočtoch relatívnych váh rôznych realistických termalizovaných mriežkových konfigurácií v (2+1) rozmeroch a, v prípade sľubných výsledkov, v (3+1) rozmeroch. Výsledky pripravíme na uverejnenie a predniesieme na vedeckých podujatiach (najbližšie už vo februári 2015 v pozvanej prednáške na konferencii *4th Winter Workshop on Nonperturbative Quantum Field Theory*, Nice–Sophia Antipolis, Franc.).

Časť úsilia venujeme vývoju priamej metódy na generáciu konfigurácií kalibračných polí s rozdelením podľa nášho návrhu približného VVF v (3+1) rozmeroch. Ako sme však už viackrát zdôraznili, doriešenie tohto problému nie je pred koncom súčasného projektu zaručené.

### **II. Tvrdé sondy v procesoch na jadrových terčoch**

Budeme sa zaoberať predovšetkých nasledujúcimi problémami:

- Teoretické štúdium reálnej a virtuálnej produkcie fotónov v interakciách na jadrových terčoch s použitím formalizmu Greenových funkcií.

- Implementácia energetickej závislosti transportného koeficientu do teoretických výpočtov ako dôsledok korekcií vyšších rádov. To by malo viesť k silnejšiemu jadrovému potlačeniu pri veľkých hodnotách  $p_T$ .

- Formalizmus Greenových funkcií bude rozšírený aj pre teoretické štúdium jadrového potlačenia a azimutálnej asymetrie v produkcii ťažkých mezónov (D, B, ...) v zrážkach ťažkých iónov. Ako dôsledok očakávaného menšieho jadrového potlačenia pre hadróny s menším stredným polomerom očakávame tiež slabší prejav azimutálnej asymetrie. Teoretické predpovede budú porovnané s existujúcimi experimentálnymi hodnotami.

### **III. Produkcia hadrónov v zrážkach ťažkých iónov**

V krátkom čase odošleme do časopisu na uverejnenie analýzu koncového stavu fireballu na základe spektier v priečnej hybnosti. Ukázalo sa, že spektrá piónov asi vyžadujú zahrnutie chemického potenciálu. To si vyžiada úpravu existujúceho modelu DRAGON, ktorý na analýzu používame. S takto upraveným modelom následne budeme znovu analyzovať spektrá v priečnej hybnosti z jadrových zrážok na LHC a začneme študovať aj závislosť parametrov fireballu pri vymrznutí od energie zrážky. To znamená, že budeme analyzovať spektrá z experimentov na urýchľovači RHIC.

Hydrodynamické simulácie v rámci ideálnej hydrodynamiky ďalej pokračovať nebudú. (Spomeňme, že M. Schulc, ktorý na nich pracoval, v krátkom čase dokončí a odovzdá text svojej dizertačnej práce.) Simulácie budú ďalej pokračovať s vylepšeným modelom Z. Feckovej. Napred ho ešte otestujeme v troch rozmeroch, potom zreprodukujeme výsledky M. Schulca a naostatok rozšírime simulácie o viskozitu a fluktuácie počiatočných podmienok.

Pre vyťaženosť na iných výskumných témach sa nám doposiaľ nepodarilo završiť kinetickú simuláciu produkcie podivných hadrónov v zrážkach jadier pri podprahových energiách v experimente HADES. Keďže v tejto oblasti sa objavujú nové zaujímavé experimentálne výsledky, chceme sa tejto téme venovať v roku 2015.

### **IV. Chladná a hustá jadrová hmota**

V najbližšom čase dokončíme článok s výsledkami o stavovej rovnici jadrovej hmoty a zašleme ho na uverejnenie do odborného časopisu (*Nuclear Physics A*). Potom plánujeme rozšíriť našu stavovú rovnicu pre prípad konečných teplôt, ktoré sú relevantné v podmienkach výbuchov supernov a zrážok ťažkých iónov.

Práce o stabilite  $r$ -módov budú doplnené analýzou rotačného vývoja hviezdy.





## Odkazy na literatúru

- [I.1] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **89** (2014) 034504.
- [I.2] J. Greensite, Š. Olejník, Phys. Rev. D **77** (2008) 065003.
- [I.3] M. Bruno, M. Caselle, M. Panero, R. Pellegrini, preprint <http://arxiv.org/abs/1409.8305> (2014).
- [I.4] C. Bonati, preprint <http://arxiv.org/abs/1501.01172> (2014).
- [I.5] Š. Olejník, „*The Yang-Mills vacuum wave-functional thirty-five years later*“, pozvaná prednáška na sympóziu *DISCRETE 2014: Fourth Symposium on Prospects in the Physics of Discrete Symmetries*, King's College, Strand Campus, Londýn, Spojené kráľovstvo (2.-6.12.2014).
- [I.6] S. Krug, PhD thesis, Univ. Autònoma de Barcelona, <http://arxiv.org/abs/1404.7005> (2014).
- [I.7] J. Greensite, A. Szczepaniak, preprint <http://arxiv.org/abs/1410.3525> (2014).
- [II.1] J. Nemchik, R. Pasechnik, I.K. Potashnikova, preprint Lundskej univerzity č. LU-TP-14-27, <http://arxiv.org/abs/1407.2781> (2014), zaslané do Eur. Phys. J. C.
- [II.2] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, EPJ Web Conf. **71** (2014) 00070.
- [II.3] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, Int. J. Mod. Phys. E **23** (2014) 1430006 [review article].
- [II.4] M. Krelina, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **66** (2014) 04016.
- [II.5] J. Cepila, J. Nemchik, EPJ Web Conf. **66** (2014) 04006.
- [II.6] B. Z. Kopeliovich, J. Nemchik, I. K. Potashnikova, I. Schmidt, preprint <http://arxiv.org/abs/1402.2012>.
- [II.7] M. Krelina, J. Nemchik, „*Nuclear effects in nucleon–nucleus collisions and nucleus–nucleus collisions*“, prednáška na *18. konferencii českých a slovenských fyzikov*, Olomouc, ČR, 16-19.9.2014.
- [II.8] M. Krelina, J. Nemchik, J. Cepila, „*Challenges of direct photon production at forward rapidities and large  $p_T$* “, prednáška na *10th International Workshop on High- $p_T$  Physics in the RHIC/LHC era*, SUBATECH Nantes, Franc., 9. až 12.9.2014.
- [II.9] M. Krelina, „*Nuclear effects of high- $p_T$  hadrons in  $pA$  interactions*“, prednáška na workshope *ENPP 2014*, Bílý Potok, ČR, 11.-18.1.2014.
- [III.1] I. Melo, B. Tomášik, pripravovaný článok.
- [III.2] M. Schulc, B. Tomášik, Phys. Rev. C **90** (2014) 064910.
- [III.3] M. Chojnacki *et al.*, Comput. Phys. Comm. **183** (2012) 746.
- [III.4] B. Tomášik, M. Schulc, preprint <http://arxiv.org/abs/1410.8711> (2014).
- [III.5] B. Tomášik, M. Schulc, preprint <http://arxiv.org/abs/1501.00788> (2015).
- [III.6] Z. Fecková, B. Tomášik, preprint <http://arxiv.org/abs/1501.01411> (2015).
- [IV.1] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, Eur. Phys. J. A **50** (2014) 180.
- [IV.2] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, preprint <http://arxiv.org/abs/1412.0314> (2014).
- [IV.3] E. E. Kolomeitsev, D. N. Voskresensky, preprint <http://arxiv.org/abs/1501.00731> (2015).

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

**Zodpovedný riešiteľ**

RNDr. Štefan Olejník, DrSc.

V Bratislave 20. 01. 2015

**Štatutárny zástupca príjemcu**

RNDr. Stanislav Hlaváč, CSc,

V Bratislave 20. 01. 2015

.....  
podpis zodpovedného riešiteľa

.....  
podpis štatutárneho zástupcu príjemcu