

Электромагнитные и цветовые поля в релятивистских столкновениях тяжелых ионов

В. Воронюк (ВБЛФВЭ,ОИЯИ), Г. Зиновьев (ИТФ,Киев),
В. Кассинг(Ун-т,Гиссен), С. Молодцов (БЛТФ,ОИЯИ), В. Тонеев (БЛТФ,ОИЯИ)

Представленный цикл работ находится в русле мировой амбициозной экспериментальной программы по изучению столкновений тяжелых ионов при ультрарелятивистских энергиях с целью образования нового состояния материи – кварк-глюонной плазмы – и исследования ее свойств. Совершенно очевидно, что для этого требуются гигантские теоретические усилия в связи с тем, что необходимо проследить эволюцию сильновзаимодействующей системы, образуемой в таких столкновениях, от ее начального состояния до почти равновесного плазменного состояния и в конце концов до наблюдаемых конечных адронов. Общепринятой основой теории сильных взаимодействий является квантовая хромодинамика (КХД), характеризующаяся фундаментальным свойством "цвет" . Как предсказывает теория КХД на решетке, в ходе эволюции системы при температуре ~ 170 МэВ или плотности энергии $\epsilon \sim 1$ ГэВ/фм³ реализуется фазовый переход бесцветных адронов в состояние кварк-глюонной плазмы. Экспериментальный поиск сигналов фазового перехода есть одна из основных задач физики столкновения релятивистских ядер. Важное открытие было сделано в последнее время, когда вопреки первоначальным ожиданиям оказалось, что при более высоких ϵ горячая плотная система сильно-взаимодействующих партонов (кварк и глюонов) ведет себя не как газ свободных квазичастиц, а как идеальная жидкость с очень низким отношением коэффициента вязкости к энтропии. Свойства адронных и ядерных взаимодействий определяются динамикой сильных цветовых взаимодействий как в pp , так и AA столкновениях при релятивистских энергиях. При этом сами движущиеся частицы, обладающие зарядом (электрическим, цветовым и т.п.), порождают соответствующие поля.

Цель представленного цикла работ: исследовать формирование электромагнитных и цветовых полей в релятивистских ядерных столкновениях, изучить свойства этих полей, влияние на динамику взаимодействия и их возможные проявления в наблюдаемых характеристиках.

Основные результаты

В рамках модели ультра-релятивистской квантово-молекулярной динамики (UrQMD) дана первая динамическая оценка напряженности электромагнитного (ЭМ) поля при Au-Au - столкновениях, которая - как оказалось - при высокой энергии превышает значения любых ЭМ полей, встречающихся в природе.

Для уточнения сделанной оценки партон-адронная модель струнной динамики (PHSD) была обобщена на случай учета электромагнитных полей, генерируемых движущимся электрическим зарядом квазичастиц. Основанная на кинетических уравнениях Каданова-Бейма, PHSD модель включает вне-массовые эффекты взаимодействия и учитывает влияние ЭМ поля на траектории квазичастиц. Исследованы свойства ЭМ полей, генерируемых в ядерных столкновениях, и их распространение в среде. Представлены временные и пространственные распределения электрической и магнитной силы ЭМ поля в Au-Au столкновениях вплоть до максимальной энергии ускорителя RHIC.

Сравнением с экспериментом показано, что глобальные характеристики типа dN/dp_t , dN/dy , $v_2(p_t)$ практически нечувствительны к генерируемому ЭМ полю в симметричных Au-Au столкновениях. Установлено, что дополнительный учет флуктуаций положения нуклонов в ранний момент взаимодействия заметно влияет на величину эллиптической асимметрии $v_2(p_t)$, но которая также оказывается нечувствительной к генерируемому ЭМ полю высокой напряженности. Найдено решение этой загадки: эта нечувствительность обусловлена не коротким временем взаимодействия системы, а следует из эффекта взаимной компенсации между электрической и магнитной компонентами силы Лоренца для каждой пространственной компоненты.

В качестве примера, где может не быть указанной компенсации компонент ЭМ поля, проанализированы результаты экспериментов по поиску Кирального Магнитного Эффекта (КМЭ), связанного в силу киральной аномалии с порождением дополнительного электрического тока вдоль вектора напряженности магнитного поля. Показано, что PHSD модель с ЭМ полем, но без учета киральных свойств (т.е. рассматриваемая только как фон КМЭ) позволяет описать эксперименты по поиску КМЭ при энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} \lesssim 11$ ГэВ, что указывает на отсутствие этого эффекта в области энергий коллайдера НИКА. Обнаруженные расхождения с экспериментом при более высоких энергиях говорят о том, что здесь возможен вклад других источников, включая искомый КМЭ.

Найдено, что отмеченная компенсация между компонентами поля отсутствует в асимметричных столкновениях типа Cu-Au. Показано, что при учете ЭМ поля направленный поток v_1 для частиц с одинаковой массой становится зависящим от электрического заряда частицы, что открывает принципиальную возможность экспериментального доказательства формирования сильных полей в столкновении *асимметричных* ядер. Даны предсказания расщепления быстротных распределений и распределений по поперечному импульсу для прямого потока положительно v_1^+ и отрицательно v_1^- заряженных мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии НИКА.

Хромо-электрические и хромо-магнитные поля оценены для двух нерелятивистских зарядов, взаимодействующих по классической теории Янга-Миллса с $SU(2)$ цветовым потенциалом. Показано, что рассчитанная структура поля очень похожа на структуру, наблюдаемую в ЭМ случае.

Перед тем, как перейти к кинетическому подходу, в классическом приближении к теории Янга-Миллса с $SU(2)$ цветовой симметрией рассмотрено ультрарелятивистское рассеяние двух простейших цветных конфигураций (заряд-заряд, заряд-диполь, диполь-диполь), движущих-

ся по прямой линии навстречу друг другу. Для неабелевого и абелевого случаев выполнен сравнительный анализ эволюции хромо-магнитной и хромо-электрической напряженности поля. Показано, что в неабелевом случае эффект квантового вращения вектора цветового заряда приводит к максимуму в эволюции напряженности поля в момент встречи цветовых зарядов (glow effect - цветное свечение или цветное эхо). Этот эффект не наблюдался ранее и отсутствует в абелевом случае.

Кинетический PHSD подход обобщен на включение и распространение цветового поля в релятивистских столкновениях тяжелых ионов. Поле точечного цветового заряда, движущегося по траектории $\mathbf{v}(\mathbf{r}(t))$, описывается запаздывающим потенциалом Лиенарда-Вихерта, что влияет на квазичастичный транспорт. Напряженность цветового поля сильно флуктуирует с почти нулевым средним значением, тогда как в ЭМ случае доминирующая B_y компонента, происходящая из регулярного движения спектаторов, ведет себя достаточно гладким образом. Дисперсии хромо-электрической и хромо-магнитной напряженности очень велики, слабо меняясь со временем, и превышая соответствующие значения для ЭМ случая как $\alpha_g/\alpha_{em} \sim 40$. Представлены результаты для временного и пространственного распределений цветовых полей в случае Pb-Pb столкновений при энергии ЛНС.

Из-за флуктуативной природы цветового поля его влияние на глобальные характеристики достаточно слабое в ультрарелятивистских (т.е. выше максимальной энергии RHIC) столкновениях. Показано, что вопреки ожиданию сильный рост средней множественности заряженных частиц и их средней поперечной энергии при центральной быстроте, обнаруженный недавно в ЛНС экспериментах при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV в предельно центральных Pb-Pb столкновениях, полностью объясняется ростом энергии партон-партонного взаимодействия (аналогично объяснению роста v_2 в области энергии RHIC). Поправка на эффект цветового поля оказывается маленькой. Необходим дальнейший анализ, включающий различные наблюдаемые характеристики.

Список публикаций

1. V. Skokov, A. Illarionov and V. Toneev, Estimate of the magnetic field strength in heavy-ion collisions, *International Journal of Modern Physics* **A24**, 5925-5932 (2009). [320]
2. V.D. Toneev and V. Voronyuk, Beam-energy and system-size dependence of the CME, *Письма в ЭЧАЯ*, **8**, 103-111 (2011). [18]
3. V. Voronyuk, V.D Toneev, W. Cassing, E.L. Bratkovskaya, V.P. Konchakovski, and S.A. Voloshin, Electromagnetic field evolution in relativistic heavy-ion collisions, *Phys. Rev.* **C83**, 054911 (2011) (17 pages). [100]
4. V. D. Toneev and V. Voronyuk, Chiral Magnetic Effect and evolution of electromagnetic field, *Acta Phys. Pol. Suppl.* **B5**, 887-896 (2012). [1]
5. V. P. Konchakovski, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, V. D. Toneev, S. A. Voloshin and V. Voronyuk, Azimuthal anisotropies for Au+Au collisions in the parton-hadron transient energy range, *Phys. Rev.* **C85**, 044922 (2012) (15 pages). [30]
6. V. D. Toneev, V. Voronyuk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, V. P. Konchakovski and S. A. Voloshin, Theoretical analysis of a possible observation of the chiral magnetic effect in Au+Au collisions within the RHIC beam energy scan program, *Phys. Rev.* **C85**, 034910 (2012) (6 pages). [16]
7. V.D. Toneev, V.P. Konchakovski, V. Voronyuk, E.L. Bratkovskaya and W. Cassing, Event-by-event background in estimates of the chiral magnetic effect, *Phys. Rev.* **C86**, 064907 (2012), (20 pages).[5]
8. W. Cassing, V.D. Toneev, C.A. Voloshin and V. Voronyuk, Charge-dependent directed flow in asymmetric nuclear collisions, *Phys. Rev.* **C90**, 064903 (2014) (8 pages).[5]
9. V. Toneev, O. Rogachevsky and V. Voronyuk, Evidence for creation of strong electromagnetic fields in relativistic heavy-ion collisions, contribution to the NICA White Paper (*Eur. Phys. J.* **A52** 2015 (in print), 2 pages).
10. Molodtsov and Zinovjev, Quantum liquids resulting from quark systems with four-quark interaction, *Eur. Phys. Journ.* **C75**, 141(2015) (21 pages).
11. Г.М. Зиновьев и С.В. Молодцов, Об экранировании цветового поля инстантонной жидкостью, *Яд. Физ.* **70**, 1172-1181 (2007).[3]
12. W. Cassing, V.V. Goloviznin, S.V. Molodtsov, A.M. Snigirev, V. Voronyuk, V.D. Toneev and G.M. Zinovjev, Non-Abelian color fields from relativistic color charge configuration in the classical limit, *Phys. Rev.* **C88**, 064909 (2013), (20 pages).[1]
13. В. Воронюк, В.В. Головизнин, Г.М. Зиновьев, В. Кассинг, С.В. Молодцов, А.М. Снигирев и В.Д. Тонеев, Классические глюонные поля и коллективная динамика систем цветовых зарядов, *Яд. Физ.* **78**, №3-4, 338-363 (2015).

PS: цитируемость работы указана в квадратных скобках.