

# НЕПЕРТУРБАТИВНАЯ ТЕОРИЯ КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЫ

Н.О. Агасян, М.С. Лукашов и Ю.А. Симонов – Лаб. 190 ИТЭФ

З.В. Хайдуков – Лаб. 910 ИТЭФ

Число соавторов из других научно-исследовательских организаций  
– 0

# НЕПЕРТУРБАТИВНАЯ ТЕОРИЯ КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЫ

Н.О. Агасян, З.В. Хайдуков, М.С. Лукашов и Ю.А. Симонов

*(ed03) 24 февраля 2021 г., г.Москва*

Существующие и планируемые опыты по ядро-ядерным и адрон-ядерным соударениям, а также астрономические наблюдения нейтронных звезд ставят важные вопросы о свойствах плотной адронной материи при высоких температурах и произвольной плотности. С теоретической стороны эти вопросы первоначально исследовали в рамках теории возмущений (ТВ) кварк-глюонной плазмы (КГП) и ряда полуфеноменологических моделей. В качестве проверки предлагаемых теорий используются решеточные расчеты и данные опытов, в том числе астрономические данные. Странным образом в предложенных теоретических моделях практически отсутствовали ссылки на свойства конфайнмента в КГП.

Предлагаемые ниже работы основаны на теории цветоэлектрического (ЦЭК) и цветомагнитного (ЦМК) конфайнмента, разработанного в ИТЭФ группой Ю.А. Симонова и подтвержденного многочисленными решеточными расчетами и сравнением с опытом. В частности эти данные показывают в соответствии с теорией что ЦЭК, связывающий кварки и глюоны в адроны, плавно исчезает вблизи критической температуры  $T_c$  заменяясь ЦМК, и этот последний обеспечивает главную часть непертурбативной динамики в КГП, создавая ЦМК массу кварков и глюонов.

Остальная часть, исчезающая при  $T$  больше 500 МэВ, обеспечивается линией Полякова за счет ЦЭК коррелятора.

Эти важные вклады объясняют поведение давления и других термодинамических потенциалов при  $T$  выше  $T_c$  и разрешает так называемую проблему Линде о неконтролируемых расходимостях в теории возмущений КХД в КГП. Этот анализ был выполнен в работе [1] опубликованной в 2017 г. и представленной в списке (см. ниже) на премию ИТЭФ. Было показано, что учет ЦМК позволяет разрешить проблему Линде и сформулировать конечную непертурбативную теорию КГП. Характерно, что после выхода этой работы практически не появлялись работы по ТВ в КГП – поняли, что ТВ здесь не работает и нужно учитывать ЦМК. Это было сделано во всем цикле последующих работ [2, 3, 4, 5, 6, 7] в результате чего построена непертурбативная теория КГП при любой температуре и барионной плотности.

В работе [2] впервые показано как выражаются линия Полякова и термодинамические потенциалы через ЦЭК и натяжение струны в ЦМК, которые явно вычислены. В результате полученные потенциалы хорошо согласуются с данными решеточных вычислений – пока для нулевой барионной плотности. В работе [3] этот подход был далее развит с введением магнитной массы, вычисляемой через ЦМК натяжение струны. Очень важной проверкой всей теории было исследование чисто глюонной плазмы, выполненное в работе [4]. Здесь впервые в рамках нашей теории была впервые определена вся физика глюонной материи от нулевой до бесконечной температуры и показано, как газ глоболов проходит через (слабый) фазовый переход 1-го рода при  $T = 230$  МэВ и превращается в глюонную плазму.

Эта кривая (Рис.6 из работы [4]) показана ниже на Рис. 1.

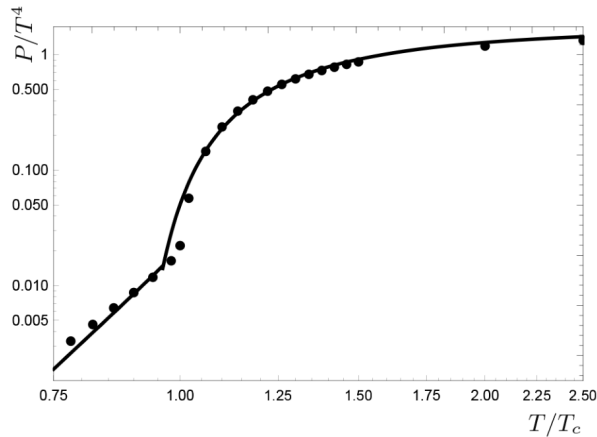


Рис. 1:

Тут мы подходим к наиболее драматическому моменту в истории КГП – вопросу о критической точке и термодинамике при конечной барионной плотности. Многочисленные теоретические и экспериментальные группы возлагали большие надежды на критическую точку фазовой диаграммы как возможность исследования новых и неожиданных явлений, например, образования новой неизвестной ранее фазы, с особыми свойствами и т.п. При нулевой барионной плотности в расчетах с помощью нашей теории такой точки не оказалось, что подтвердилось многочисленными решеточными расчетами, и надежда есть на критическую точку при ненулевой барионной плотности и эта проблема может быть решена в рамках нашей теории и эти работы выполняются.

В этой области нами выполнены несколько работ, наиболее важные результаты представлены в [5] и [6]. В работе [5] КГП была исследована с помощью скорости звука и было показано отсутствие особенностей, которые можно ярко увидеть с помощью превышения максимальной скорости звука, но для исследованных плотностей такого превышения не возникло. Наиболее важной в этой

области является работа [6], где все уравнения состояния были вычислены при ненулевой барионной плотности менее 500 МэВ и показано, что критическая точка отсутствует. Заметим, что здесь нет других серьезных подходов и решеточные данные приходится экстраполировать, однако результирующие кривые хорошо согласуются с решеточными данными.

Последняя работа [7] содержит вспомогательные вычисления весьма важные для формулировки общей непертурбативной термодинамики КХД, которую предстоит завершить. В работе [7] исследовалось влияние изотопической плотности на вакуумные свойства КГП среды и были найдены важные этой зависимости для вакуумных конденсатов.

Таким образом, созданная в ИТЭФ теория позволяет хорошо описывать всю термодинамику КГП, как для чисто глюонной плазмы, так и для кварк-глюонной с ненулевой барионной плотностью. При этом теория не содержит произвольных подгоночных параметров, а использует только фундаментальные величины, такие как параметры конфайнмента, ЦЭК и ЦМК, хорошо определенные в численных расчетах в нашей теории, а также подтвержденные на решетках и проверенные в экспериментах.

Как пример мы показываем на Рис. 2 (Рис. 5 из работы [6]) как ведет себя давление как функция температуры для четырех разных барионных плотностей, где видно что кривые хорошо согласуются с решеточными расчетами и не показывают особенностей.

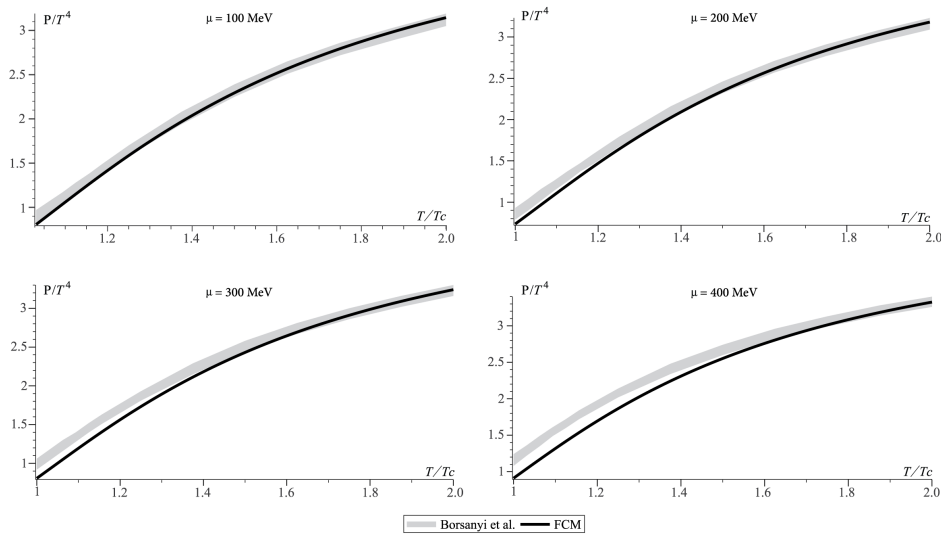


Рис. 2:

Наша теория не имеет конкурентов и основана на хорошо проверенных свойствах вакуума КХД. Дальнейшее развитие и применение к экспериментам в настоящее время планируется, в частности проведена большая работа по поведе-

нию КГП в магнитном поле и первые результаты по скорости звука показывают возможное изменение состояния КГП при больших магнитных полях, а также при больших барионных плотностях.

Хочется отметить хорошее внимание и поддержку нашей группы в ИТЭФ, а также полезное общение с группами решеточных вычислений из ИТЭФ и Италии (например, из Университета гор. Пиза).

## Список литературы

- [1] Yu.A. Simonov, Magnetic Confinement and the Linde Problem, *Phys. Rev. D* 96, 096002 (2017), – [arXiv:1605.07060]
- [2] M.S. Lukashov and Yu.A. Simonov, Colormagnetic Confinement in the Quark-Gluon Thermodynamics, *JETP Lett.* 105, 691 (2017), – [arXiv:1703.06666]
- [3] N.O. Agasian, M.S. Lukashov and Yu.A. Simonov, Dynamical Role of Polyakov Line, *Mod. Phys. Lett. A* 31, 1650222 (2016), – [arXiv:1610.01472]
- [4] N.O. Agasian, M.S. Lukashov and Yu.A. Simonov, Nonperturbative SU(3) thermodynamics and the Phase Transition, *Eur. Phys. J. A* 53, 138 (2017), – [arXiv:1701.07959]
- [5] Z.V. Khaidukov, M.S. Lukashov and Yu.A. Simonov, The speed of sound in QGP and SU(3) Yang-Mills theory, *Phys. Rev. D* 98, 074031 (2018), – [arXiv:1806.09407]
- [6] Z.V. Khaidukov and Yu.A. Simonov, Thermodynamics of QGP at finite baryon density, *Phys. Rev. D* 100, 076009 (2019), – [arXiv:1906.08677]
- [7] N.O. Agasian, Quark and Gluon Condensates at Finite Isospin Density, *JETP Lett.* 111, 201 (2020)