

Глава 1. Краткий обзор результатов до 2010 года

Предложения описывать столкновения между адронами и атомными ядрами при высоких энергиях с использованием релятивистской гидродинамики были сформулированы более полувека назад [1]. Они нашли своё подтверждение в 1970-х – середине 1990-х годов в экспериментах по столкновению тяжёлых ионов (А-А) с фиксированной мишенью при энергиях пучка от нескольких сотен МэВ до 200 ГэВ на нуклон. Результаты интерпретировались как эффект образования плотной материи, которая коллективно расширялась в направлениях перпендикулярных направлению пучка («поперечный поток») [2]. Открытие поперечного эллиптического потока (анизотропного излучения относительно направления пучка) [3,4] привело к разработке теоретических гидродинамических моделей, решающих уравнения релятивистской идеальной динамики жидкости, расширяющейся в одном поперечном, а позднее и в продольном направлении [5].

Предсказания таких моделей для импульсных распределений адронов при столкновениях тяжёлых ионов качественно воспроизводили экспериментально наблюдаемые признаки мягкого взаимодействия частиц (т.е. взаимодействия при малых поперечных импульсах) [6]. Но некоторые важные аспекты количественно описать не удалось. Например, гидродинамические расчёты сильно превышали наблюдаемый эллиптический поток, примерно на 50% [7] при энергиях SPS CERN для больших поперечных импульсов [8,9].

В 2000 году начал работу коллайдер Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) с тяжёлыми ионами с энергией в системе

центра масс в десять раз больше, чем раньше. Он был построен для множественного рождения кварк-глюонной плазмы (КГП) – нового типа плотной материи, в которой адроны переходят в кварки и глюоны с цветными степенями свободы в состояние деконфайнмента, что было предсказано современной теорией сильного взаимодействия – квантовой хромодинамикой (КХД). Термин КГП был впервые введён Е.В.Шуряком в работе [E.V.Shuryak, *Phys.Rep.A*, v.61,N2(1980)73].

Данные RHIC впервые совпали количественно с предсказаниями гидродинамики для идеальной жидкости [6]. Это вызвало изменение парадигмы поля: вместо газоподобного поведения материи, основанного на идеях асимптотической свободы и цветового дебаевского экранирования в КГП, научное сообщество было вынуждено принять представление о том, что КГП является сильно связанной материей с характеристиками идеальной жидкости с малой вязкостью [10, 11].

Позже стало ясно, что некоторые из первоначальных успехов идеальной динамики жидкости были искусственными из-за использования неадекватного уравнения состояния для файерболла (fireball) [12], а также некорректного рассмотрения химического состава во время его поздней адронной стадии расширения [13]. Ключевой подход заключался в том [14,15,16], что гидродинамическое описание должно быть ограничено плотной кварк-глюонной плазмой, тогда как поздняя адронная стадия (после рекомбинации цветных кварков и глюонов в цветонейтральные адроны) слишком диссипативна для жидкостно-динамического подхода [17] и должна быть описана на макроскопическом уровне.

Гибридные подходы, которые сочетают динамику идеальной жидкости КГП с макроскопическим адронным каскадом, работали лучше, чем чисто гидродинамический подход [14, 15, 16]. И объясняли, почему динамика идеальной жидкости была количественно успешной только в центральных столкновениях между большими ядрами ($A \approx 200$) при средних быстротах, но не для небольших ядерных систем и не для более периферических столкновений, а также при меньших энергиях столкновения [18].

Это наблюдение сосредоточило внимание научного сообщества на важности диссипативных эффектов, которые до сих пор игнорировались. С улучшением экспериментальной точности становилось все более очевидным, что даже при самых центральных столкновениях для самых тяжёлых ядер данные требовали некоторой степени вязкости КГП [16,19,20].

Однако основной успех подхода идеальной жидкости состоял в том, что вязкость должна быть небольшой. Это вызвало вопрос «Как точно нужно измерить вязкость?». Теоретические работы по сильно связанным квантовым полям (например, из теории суперструн), установили нижний предел около $1/4\pi$ для сдвиговой вязкости η/s [21].

Важную роль играет тот факт, что начальные условия в столкновениях тяжёлых ионов флуктуируют от события к событию [22-25] подобно тому, как при Большом Взрыве начальные флуктуации плотности, запечатлённые на космическом микроволновом фоне [26], проявляются в сегодняшнем распределении звёзд и галактик [27]. Так вязкая гидродинамика преобразует начальные флуктуации плотности

энергии «маленьких взрывов», создаваемых в столкновениях тяжёлых ионов, которые переходят в распределение компонент анизотропного гармонического потока [24,28, 29,30,31].

Малая сдвиговая вязкость КГП позволяет отслеживать начальные флуктуации на конечной стадии замораживания материи КГП с помощью анизотропии потока частиц. Они не полностью стираются диссипацией и могут быть использованы для определения вязкости КГП.

Хотя мы наблюдаем результаты одного варианта Большого Взрыва (того, который создал нашу Вселенную), столкновения тяжёлых ионов на коллайдере создают миллиарды маленьких взрывов, каждый из которых даёт различное распределение начальных флуктуаций и соответствующий гидродинамический отклик на них. Из этого чрезвычайно богатого набора данных устанавливаются с высокой точностью как транспортные коэффициенты КГП, так и исходный спектр флуктуаций КГП.

В 2010 году начал работать Большой Адронный Коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) и первые результаты по столкновению тяжёлых ионов появились в этого 2010 года.

За прошедшие годы мы видим драматический прогресс и значительный успех в измерениях и теоретических описаниях физики столкновений релятивистских ядер. Экспериментально подтверждено образование хромодинамической материи QGP со свойствами, существенно отличающимися от обычной ядерной материи. В настоящее время усилия физиков направлены на изучение свойств КГП [34].

К середине 2017 года на LHC получены экспериментальные данные при следующих параметрах энергии столкновения пучков и значений их светимости, приведённых в табл. 1.

pp collisions
Min. bias trigger: V0 and SPD
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$: $\sim 4 \times 10^8$ events collected in 2010, $L_{\text{int}} \sim 6 \text{ nb}^{-1}$
$\sqrt{s} = 2.76 \text{ TeV}$: $\sim 50 \times 10^6$ events collected in 2011, $L_{\text{int}} \sim 0.9 \text{ nb}^{-1}$
$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$: $\sim 10^8$ events collected in 2012, $L_{\text{int}} \sim 1.8 \text{ nb}^{-1}$
$\sqrt{s} = 5 \text{ TeV}$: $\sim 10^8$ events collected in 2015, $L_{\text{int}} \sim 2 \text{ nb}^{-1}$
$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$: $\sim 190 \times 10^6$ events collected in 2016, $L_{\text{int}} \sim 3 \text{ nb}^{-1}$
Min. bias + muon trigger (forward)
p-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$
Min. bias trigger: V0
$\sim 600 \times 10^6$ events collected in 2016, $L_{\text{int}} \sim 292 \mu\text{b}^{-1}$
$E_p = 4 \text{ TeV}$, $E_{\text{Pb}} = (208) \times 1.58 \text{ TeV}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$
$y_{\text{cms}} = 0.465$ (in proton direction)
Min. bias + muon trigger (forward)
Forward: $L_{\text{int}} \sim 5 \text{ nb}^{-1}$ (p-Pb), $L_{\text{int}} \sim 5.8 \text{ nb}^{-1}$ (Pb-p) collected in 2013
Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$
Min. bias + central trigger: V0
$\sim 16 \times 10^6$ central (0-10%) events in 2011, $L_{\text{int}} \sim 21 \mu\text{b}^{-1}$
$\sim 18 \times 10^6$ semi-central (10-50%) events in 2011, $L_{\text{int}} \sim 6 \mu\text{b}^{-1}$
Min. bias + muon trigger (forward, $L_{\text{int}} \sim 70 \mu\text{b}^{-1}$)
$\sim 5 \times 10^6$ peripheral (50-80%) in 2010, $L_{\text{int}} \sim 2 \mu\text{b}^{-1}$
Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$
Min. bias: V0
$\sim 150 \times 10^6$ events in 2015
Min. bias + muon trigger (forward, $L_{\text{int}} \sim 225 \mu\text{b}^{-1}$)

Таблица 1. Параметры пучков на LHC для pp-, pPb- и PbPb-столкновений.

В приложении 2 данного пособия дан перевод статьи В.В.Ясак и В.Мюллер «Взрыв горячей ядерной материи» 2012

года, в которой обсуждаются проблемы физики тяжёлых ионов на достаточно глубоком уровне.

Некоторые лекции и видео можно посмотреть на вэб-сайте <http://nuclphys.sinp.msu.ru/conf/cern/hi.htm>

Литература

1. Fermi E. Prog. Theor., Phys. 5:570 (1950); L.D.Landau, Izv. Akad. Nauk.Ser. Fiz. 17:51 (1953); S.Z.Belenkij, L.D.Landau Nuovo Cim. Suppl. 3S10:15 (1956) [Usp. Fiz. Nauk 56:309 (1955)]
2. S. Nagamiya et al., Phys. Rev. C 24:971 (1981)
3. H.A. Gustafsson et al., Phys. Rev. Lett. 52:1590 (1984)
4. H.Appelshausen et al. (NA49 Collab.), Phys. Rev. Lett. 80:4136 (1998)
5. B.R.Schlei et al., Lett. B 376:212 (1996);
J.Sollfrank, P. Huovinen, M.Kataja, P.V.Ruuskanen, M.Prakash, R.Venugopalan, Phys. Rev. C55:392 (1997);
D.Teaney, E.V.Shuryak, Phys. Rev. Lett. 83:4951 (1999);
E.V.Shuryak, Prog. Part. Nucl., Phys. 53, 273 (2004);
P.F.Kolb., J.Sollfrank, U.Heinz, Phys. Lett. B 459:667 (1999)
6. P.F.Kolb, U. Heinz, In Quark-Gluon Plasma 3, eds. R.C. Hwa, X-N. Wang, p.634. Singapore: World Sci. (2004)
7. P.F.Kolb, P.Huovinen, U.Heinz, H.Heiselberg, Phys. Lett. B 500:232 (2001)
8. S.Soff, S.A.Bass, M.Bleicher, H.Stocker, W.Greiner, arXiv:nucl-th/9903061 (1999)
9. M.Bleicher, H.Stocker, Phys. Lett. B 526:309 (2002)
10. U.Heinz, P.F. Kolb, Nucl., Phys. A 702:269 (2002)

11. M. Gyulassy In Structure and Dynamics of Elementary Matter, ed. Greiner W. et al., NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 166, p. 159. Dordrecht: Kluwer Academic (2004)
12. P. Huovinen, Nucl., Phys. A 761:296 (2005)
13. T.Hirano, K.Tsuda, Phys. Rev. C 66:054905 (2002); P.F.Kolb, R.Rapp, Phys. Rev. C 67:044903 (2003); P.Huovinen, Eur., Phys. J. A 37:121 (2008)
14. S.A.Bass, A.Dumitru, Phys. Rev. C 61:064909 (2000);
15. D.Teaney, J.Lauret, E.V.Shuryak, arXiv:nucl-th/0110037 (2001)
16. T.Hirano, U.Heinz, D.Kharzeev, R.Lacey, Y.Nara, Phys. Lett. B 636:299 (2006)
17. H.Song, S.A.Bass, U.Heinz, Phys. Rev. C 83:024912 (2011)
18. U. J.Heinz, Phys. G 31: S717 (2005)
19. R.A.Lacey, A.Taranenko, PoS CFRNC2006:021 (2006)
20. P.Romatschke, U.Romatschke, Phys. Rev. Lett. 99:172301 (2007); M.Luzum, P., Romatschke, Phys. Rev. C 78:034915 (2008)
21. G.Policastro, D.T.Son, A.O.Starinets, Phys. Rev. Lett. 87:081601 (2001); P.Kovtun, D.T.Son, A.O.Starinets, Phys. Rev. Lett. 94:111601 (2005)
22. M.Miller, R.Snellings, arXiv:nucl-ex/0312008 (2003)
23. O.Socolowski, F.Grassi, Y.Hama, T.Kodama, Phys. Rev. Lett. 93:182301 (2004); R.Andrade, F.Grassi, Y.Hama, T.Kodama, O.Socolowski, ibid. 97:202302 (2006)
24. P. J.Sorensen, Phys. G 37:094011 (2010)
25. B.Alver , G.Roland, Phys. Rev. C 81:054905 (2010)
26. E.Komatsu, et al. (WMAP Collab.), J.Astrophys. Suppl. 192:18 (2011)
27. V.Springel, C.S.Frenk, White SDM. Nature 440:1137 (2006)
28. A.P.Mishra, R.K.Mohapatra, P.S.Saumia, A.M.Srivastava, Phys. Rev. C 77:064902 (2008); ibid. 81:034903 (2010)

29. A.Mocsy, P.Sorensen Nucl., Phys. A 855:241 (2011)
30. G-Y. Qin, H.Petersen, S.A.Bass, B.Muller, Phys. Rev. C 82:064903 (2010)
31. Z.Qiu, U.Heinz, Phys. Rev. C 84:024911 (2011)
32. C.Loizides, Nucl., Phys. A 956 (2016) p. 200, arXiv:1602.09138
33. U. Heinz and R.Snellings, arXiv:1301.2826
34. J.Schukraft, Nucl., Phys. A 967 (2017) 1, arXiv:1705.02646