УДК 539.17

А.Т.ДЬЯЧЕНКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ОПИСАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Для описания образования вторичных частиц в столкновениях тяжелых ионов средних энергий использована ядерная гидродинамическая модель с учетом неравновесного уравнения состояния. Модель использовалась для описания двойных дифференциальных сечений образования α-частиц и других фрагментов. Гидродинамическая модель с учетом термализации и образования области локального нагрева позволяет описать экспериментальные двойные дифференциальные сечения рождения подпороговых пионов, каонов и антипротонов в ядро-ядерных столкновениях. Это позволяет определять параметры эффективных ядерных сил и, в частности, модуль сжатия ядерной материи.

The nuclear fluid dynamics model with provision for non-equilibrium equation of state to describe the formation of secondary particles as a result of collision of heavy ions at medium energy has been used. The model involved was used to represent the double-differential cross sections of the formations of α-particles and other fragments. The fluid dynamics model with the account of thermalization and formation of the local warm region makes it possible to describe the experimental double-differential cross sections of the subthreshold pion, kaon and antiproton production in nucleus-nucleus collisions. It makes it possible to determine the nuclear force parameters and the value of nuclear matter compression module, in particular.

Исследование динамики столкновения тяжелых ядер представляет большой интерес с точки зрения извлечения информации об уравнении состояния ядерного вещества, что важно как для физики вообще, так и для ядерной физики в частности.

Именно с этой целью во всем мире в течение последних 30 лет интенсивно строятся ускорители тяжелых ионов, рассчитанные на область энергий от нескольких десятков мегаэлектрон-вольт до сотен гигаэлектрон-вольт на нуклон. Эти сложные машины сооружаются и используются целыми странами и даже объединениями стран. Примером является Объединенный институт ядерных исследований в Дубне (Россия), ЦЕРН (Швейцария), Ускорительный центр (RHIC) в Брукхейвене (США) и т.д.

Экспериментальные данные, полученные на ускорителях, требуют теоретической интерпретации. Теория взаимодействия тяжелых ядер достаточно сложна и до конца еще не разработана. Поэтому используются различные модели, применимые в ограниченном диапазоне энергий.

В области низких энергий в несколько мегаэлектрон-вольт на нуклон большой интерес вызывает проблема слияния ядер и получение новых элементов. В области средних энергий от десятков до сотен мегаэлектрон-вольт на нуклон вызывает интерес своеобразный переход в физической картине процесса взаимодействия ядер: «от ядра к нуклонам» с образованием множества мезонов, нуклонов, фрагментов и осколков деления. В области высоких и сверхвысоких энергий (сотни гигаэлектрон-вольт на нуклон) проявляются качественно новые явления, связанные с проявлением свойств кварк-глюонной плазмы.

Наше исследование ограничено областью низких и промежуточных энергий. Мы остановимся на теоретическом описании механизма взаимодействия тяжелых ионов в этой области энергий.

В 1976 г. в США С.Е.Кунин с сотрудниками [5] начали первые численные эксперименты по столкновениям ядерных слоев на основе метода Хартри-Фока с зависимостью от времени (ХФЗВ) с учетом эф-

фективных ядерных сил, так называемых сил Скирма.

Такие исследования послужили хорошей основой для исследования динамики больших амплитуд, проявляющейся в делении и особенно ярко в столкновениях тяжелых ионов.

Одновременно с этим автором были начаты поиски подходящего теоретического метода для исследования динамики больших амплитуд, который смог бы оказаться менее трудоемким и менее дорогим, но мог быть связан непосредственно с уравнением состояния ядерного вещества. В результате исследования такой эффективный метод описания взаимодействия тяжелых ионов в рамках гидродинамического подхода был найден [1].

Важно отметить, что гидродинамическая модель взаимодействия высокоэнергетичных частиц с множественным образованием вторичных частиц была предложена еще Л.Д.Ландау в 1953 г. [2]. Тогда использовалось уравнение состояния ультрарелятивистского идеального газа. Впоследствии в США, Германии и в других странах появились гидродинамические подходы, использующие эффективные ядерные силы [3, 4, 8].

В отличие от традиционных методов, использующих уравнения ядерной гидродинамики для описания столкновений тяжелых ионов с локально-равновесным уравнением состояния [9], нами было предложено использовать неравновесное уравнение состояния, соответствующее деформированной ферми-поверхности.

При низких энергиях длина свободного пробега нуклонов сравнима с размерами системы, также было обнаружено близкое сходство с результатами расчетов по методу ХФЗВ.

В рамках этого подхода удалось объяснить «высокоэнергетические хвосты» испускаемых нуклонов, проявляющиеся в реакциях тяжелых ионов под малыми углами наблюдения, которые были обнаружены в экспериментах в Дубне и за рубежом.

Естественным дальнейшим развитием такого гидродинамического подхода было проведенное в релаксационном приближении объединение «бесстолкновительной» гидродинамики и традиционной локально-равновесной гидродинамики.

Гидродинамическое рассмотрение позволяет упростить расчеты и повысить их точность по сравнению с трудоемкими расчетными моделями (молекулярная динамика, уравнение Больцмана, уравнение Власова – Ландау и т.д.), а также выделить характерные особенности тяжелоионных столкновений. Примером такой особенности является наличие источника быстрых частиц, имеющего скорость, равную половине скорости налетающего ядра.

Уравнение состояния оказывается зависящим от энергии столкновения и учитывает переход с возрастанием энергии от первоначально неравновесного состояния к локально-равновесному. Эффективное взаимодействие выбрано в соответствии с параметризацией Скирма. В процессе расчета мы рассматриваем стадии сжатия, разрежения и разлета по достижении расширяющейся системой критической плотности.

Распространение в системе бесстолкновительной ударной волны предопределяет начальную скорость налетающего ядра V_0: $V = V_0/2$ системы, в которой образуется равномерно сжатая разогретая область – горячее пятно (hot spot), т.е. в нашем подходе hot spot имеет скорость, равную половине скорости налетающего ядра. Это согласуется с экспериментальными данными.

По найденным из решения уравнений полям коллективных скоростей и температур находятся двойные дифференциальные сечения образования частиц.

Таким образом, без введения подгоночных параметров было дано описание экспериментальных двойных дифференциальных сечений образования испускаемых под разными углами нуклонов при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий 10-100 МэВ/нуклон.

Гидродинамическая модель с неравновесным уравнением состояния использовалась для описания двойных дифференциальных сечений образования α-частиц и

других фрагментов [6], полученных в эксперименте CHIC-Коллаборации (Швеция).

Из согласия между расчетными и экспериментальными спектрами фрагментов были определены значения параметров сил Скирма и выбран модуль сжатия.

Гидродинамическая модель с учетом термализации и образования области локального нагрева позволяет описать экспериментальные двойные дифференциальные сечения рождения подпороговых π-мезонов, подпороговых каонов и антипротонов [7] – наиболее ярких проявлений коллективной динамики ядро-ядерных столкновений.

Гидродинамические приближения оказались полезными и при формулировке коллективного механизма усиления подбарьерного слияния тяжелых ионов, что может оказаться существенным для проблемы синтеза сверхтяжелых элементов.

Развитие гидродинамической модели весьма тесно связано с традиционными представлениями о ядре как о капле ядерной жидкости. В современной физической картине гидродинамическая модель дополняется новым содержанием. Сравнивая свои расчеты с экспериментальными данными, мы можем определять параметры эффективных ядерных сил и, в частности, модуль сжатия ядерной материи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дьяченко А.Т.* Полуфеноменологические уравнения ядерной газодинамики в промежуточной области энергий ядро-ядерных столкновений // Изв. АН СССР Сер. физ. Т.51. № 5. С.902-906; Он же. Спектр быстрых частиц в гидродинамической модели столкновений тяжелых ионов // Ядерная физика. 1994. Т.57. С.2006-2012; Он же. Квазиклассическое описание динамики взаимодействия тяжелых ядер: Автореф. дис. … док. физ.-мат. наук / Санкт-Петербургский ун-т. СПб, 2004. 199 с.

2. *Ландау Л.Д.* О множественном образовании частиц при столкновениях быстрых частиц // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1953. Т.17. С.51-68; Полн. собр. трудов Л.Д.Ландау. М., 1969. Т.2. С.153-171.

3. *Мишустин И.Н.* Гидродинамическая модель столкновений релятивистских ядер / И.Н.Мишустин, В.Н.Русских, Л.М.Сатаров // Ядерная физика. 1991. Т.54. С.429-521.

4. *Amsden A.A.* et al. Relativistic nuclear fluid dynamics // Phys. Rev. 1977. V.C15. P.2059-2071.

5. *Bonche P.* One-dimensional nuclear dynamics in the time-dependent Hartree-Fock approximation / P.Bonche, S.Koonin, J.W.Negele // Phys. Rev. 1976. V.C13. P.1226-1258.

6. *D'yachenko A.T.* The spectra of fragments in the fluid dynamics model of heavy ion collisions // Nucl. Phys. 1997. V.A626. P.273-277.

7. *D'yachenko A.T.* Subthreshold K meson and antiproton production in the nucleus-nucleus collisions within the framework of the fluid dynamics approach // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2000. V.26. P.861-869.

8. *Stocker H.* High energy heavy ion collisions- probing the equation of state of highly excited hadron matter / H.Stocker, W.Greiner // Phys. Rep. 1986. V.137. P.277-392.

9. *Wong C.Y.* Dynamics of nuclear fluid III. General consideration on the kinetic theory of quantum fluids / C.Y.Wong, J.W.McDonald // Phys. Rev. 1977. V.16. P.1196-1215.