

Квантовые системы нескольких частиц - математические и вычислительные методы и приложения

Квантовые системы нескольких частиц - это модели двух, трех и четырех элементарных частиц, описываемые уравнениями квантовой механики. Проводя параллели с классической механикой, где задача двух тел (например движения Земли и Луны) или трех тел (например Земли, Луны и малого искусственного спутника) хорошо изучена, в квантовой механике данная область исследований сформировалась сравнительно недавно: задача двух тел была решена в тридцатых годах, а основные методы, необходимые для описания процессов в задаче трех тел, были разработаны в семидесятых годах 20 века.

В классической механике, задача двух тел заключается в определении траектории движения одной частицы в поле другой и считается точно решаемой, в том смысле, что решение может быть записано в виде явных аналитических выражений. В случае гравитационного поля, получаемые решения - это эллипсы, гиперболы и параболы. Более сложной и не решаемой в общем случае аналитически является задача трех тел. Приближенное решение уравнений движения задачи трех тел производится численными методами. Тем не менее, точные частные решения классической ограниченной (когда два тела массивны, а третье имеет пренебрежимо малую массу) задачи трех тел существуют и сводятся к траекториям, в которых третье тело находится в так называемых точках либрации. Эти точки возникают в двух типах конфигураций, в одной из которых три тела располагаются на одной прямой (коллинеарная конфигурация), а в другой тела находятся в вершинах равностороннего треугольника (эквилатеральная конфигурация). Первый тип решений был найден Л. Эйлером, а второй Ж. Лагранжем. Эквилатеральные конфигурации используются на практике путем запуска в точки либрации систем Земля-Луна и Солнце-Юпитер искусственных спутников для изучения космоса. Спутники в точках либрации данных систем находятся в устойчивом равновесии и могут находиться там практически бесконечно долго.

В квантовой механике, состояния двух и более элементарных частиц описываются уравнением Шредингера. При этом, если задача движения двух частиц, является относительно простой и, в большинстве своем, решенной, то задача трех и более тел представляет значительные аналитические и вычислительные трудности. Даже на первый взгляд, для описания кинематики двух частиц в общем случае необходимо шесть координат, тогда как для описания трех тел необходимо уже девять. Разложение по парциальным волнам и понижение размерности задачи приводит к граничной задаче для уравнения Шредингера. Данная задача решается для случая определения связанных состояний относительно просто. Для случая же рассеяния, поставить граничную задачу для уравнения Шредингера затруднительно, ввиду неопределенности в выборе граничных условий для волновой функции. Формулировка граничной задачи для трех тел, поддающаяся решению была получена в работах Л.Д. Фаддеева и С.П. Меркурьева в 60-70 годы, а затем обобщена на случай произвольного числа частиц в работах С.П. Меркурьева и С.Л. Яковлева. Идея введения компонент Фаддеева волновой функции позволила сформировать новые уравнения, уравнения Фаддеева, которые могут быть сравнительно просто решены и параметры рассеяния могут быть получены. Математически строгий подход данных работ породил большое количество прикладных исследований (в основном в области теоретической ядерной физики), в которых были разработаны и реализованы высоко эффективные и точные численные методы решения задачи рассеяния для систем трех и четырех нуклонов, позволившие производить анализ качества тех или иных нуклон-нуклонных взаимодействий путем сравнения найденных теоретических значений как энергий связи так и сечений рассеяния с экспериментальными данными. Среди прочих значительный интерес представляют различные резонансные явления в

ядерных, атомных, молекулярных и нано-структурных процессах, которые во многих случаях можно рассматривать, как задачи нескольких тел. Такие квантовые задачи занимают особое место и удобны для исследований, так как относительно умеренное число степеней свободы делает возможным их учет без дополнительных плохо контролируемых аппроксимаций. Однако даже для таких относительно простых систем сложность расчетов оказывается очень велика, что требует разработки новых, эффективных теоретических подходов, особенно для изучения резонансных состояний и процессов рассеяния.

Сотрудники кафедры вычислительной физики, работающие в данном научном направлении: С.Л. Яковлев, Е.А. Яревский, В.А. Руднев, П.А. Белов, В.А. Градусов

Литература и публикации:

1. С.П. Меркурьев, Л.Д. Фаддеев.
Квантовая теория рассеяния для систем нескольких частиц. Москва, Наука, 1985.
2. S.P. Merkuriev, C. Gignoux, and A. Laverne.
Three-body scattering in configuration space. Ann. Phys. **99** (1976) 30.
3. Меркурьев С.П., Яковлев С.Л.
Дифференциальная формулировка задачи рассеяния для системы N тел.
Доклады АН СССР, 1982, т. 262, №. 3, с. 591-594.
4. Меркурьев С.П., Яковлев С.Л.
Квантовая теория рассеяния для N тел в конфигурационном пространстве.
Теор. мат. физ. 1983, т. 56, No. 1, с. 60-73.
5. Квицинский А.А., Куперин Ю.А., Меркурьев С.П., Мотовилов А.К., Яковлев С.Л.
Квантовая задача N тел в конфигурационном пространстве.
Элем. частицы и атомное ядро (ЭЧАЯ), 1986, т. 17, No. 2, с. 267-317.
6. С.П. Меркурьев, А.К. Мотовилов, С.Л. Яковлев. *Задача нескольких тел в модели граничных условий и обобщенные потенциалы.* ТМФ. **94** (1993) 475.
7. И. Н. Филихин, С. Л. Яковлев, *Микроскопический расчет низкоэнергетического дейтрон-дейтронного рассеяния на основе метода кластерной редукции.* Ядерная физика, **63** (2000) 216.
8. M.V. Volkov, N. Elander, E. Yarevsky, S.L. Yakovlev.
Solving the Coulomb scattering problem using the complex scaling method.
EuroPhysics Letters **85** (2009) 30001.
9. С.Л. Яковлев.
Квантовая проблема N тел: матричные структуры и уравнения.
Теор. Мат. физ. Т. 181, № 1, 2014, с. 218-240.
10. M.V. Volkov, E.A. Yarevsky and S.L. Yakovlev.
Potential splitting approach to the three-body Coulomb scattering problem.
Euro Physics Letters **110** (2015) 30006.