**Квантовые электродинамические эффекты в атомных системах**

Ерохин Владимир Анатольевич

Квантовая электродинамика (КЭД), или наука о взаимодействии вещества с квантованным электромагнитным полем, зародилась более семидесяти лет назад. За это время достигнуты значительные успехи в объяснении и предсказании многих физических явлений. Один из классических объектов исследования - атом водорода, простейшая связанная система. Именно для водорода сегодня наиболее точно измерена энергия 2s-1s-перехода с точностью 1,8\*10-14 или 46 кГц. При этом квантовые электродинамические расчеты уровней энергии дают 32 кГц для 1s-состояния и 4 кГц для 2s-состояния.

В ближайшем будущем экспериментальную точность планируется довести до значения, приближающегося к естественной ширине спектральной линии 2s-уровня (1,3 кГц). Это позволит в лабораторных условиях проверить утверждение о зависимости фундаментальных констант от времени, которое следует из большинства расширений Стандартной модели. Уже на нынешнем уровне экспериментальной точности расчеты КЭД-эффектов позволяют получить наиболее точные результаты для некоторых фундаментальных констант: постоянной тонкой структуры, отношения масс электрона и протона, радиуса протона и т. д.

Несмотря на то, что характерный уровень энергий в атомных системах на много порядков меньше, чем на современных ускорителях, достижимая экспериментальная и теоретическая точность делает рассматриваемые системы весьма перспективным объектом для поисков новой физики вне Стандартной модели. Помимо поисков новой физики вне рамок Стандартной модели и уточнения значений фундаментальных констант очень важны исследования, позволяющие проверить предсказания квантовой электродинамики в различных условиях. Необходимость таких работ обусловлена тем, что многие теории, объясняющие другие типы взаимодействий, построены по тому же принципу, что и квантовая электродинамика.

В последнее время объектами пристального внимания теоретиков и экспериментаторов становятся системы, которые еще недавно можно было считать экзотическими: тяжелые ионы с одним или несколькими электронами (многозарядные ионы или, по числу электронов, водородо-, гелий- и литийподобные ионы). Такой интерес к многозарядным ионам объясняется стремительным прогрессом экспериментальной атомной спектроскопии. В последнее время стало возможным настолько точно измерять спектральные характеристики таких систем, что на повестку дня ставится вопрос о проверке КЭД во втором порядке (по постоянной тонкой структуры). Эта задача исключительно важна, поскольку проверка будет производиться в новой области сильного кулоновского поля (как это имеет место для лэмбовского сдвига) и в области наложения сильных электрических и магнитных полей (для сверхтонкого расщепления).

С практической точки зрения кулоновское поле, в котором находится электрон в водородоподобном ионе урана, - это, по-видимому, наиболее сильное электрическое поле, доступное сегодня для прецизионного экспериментального изучения. Представляется естественным, что в поиске границ применимости теории (в данном случае - КЭД) наиболее перспективны именно подобные области с экстремальными характеристиками. Тем самым проблема расчета КЭД-эффектов в спектрах одно-, двух- и трехэлектронных многозарядных ионов приобретает фундаментальный характер.

Наша группа под руководством профессора В. М. Шабаева выполняет исследования по всем направлениям, обозначенным выше. Так, недавно в результате экспериментального и теоретического изучения g-фактора электрона в водородоподобном ионе углерода мы получили новое значение массы электрона, которое примерно в четыре раза улучшает точность общепринятого значения. При этом следует отметить, что такое улучшение точности стало возможным во многом благодаря уточнению значения поправки к g-фактору на однопетлевую собственную энергию и полному релятивистскому расчету поправки на отдачу ядра. Оба расчета выполнила наша группа.

Большое внимание в наших исследованиях мы уделяем расчетам КЭД-эффектов в сильном поле ядра. Этот случай реализуется в тяжелых ионах с одним или несколькими электронами. В таких системах кулоновское взаимодействие с ядром нельзя рассматривать как малое возмущение, поэтому рассмотрение должно производиться во всех порядках по внешнему полю. С помощью последовательных КЭД-расчетов поправок к уровням энергии различных систем нам удалось получить наиболее точные теоретические результаты для энергии 2p1/2-2s-перехода в литийподобных ионах и для энергии основного состояния водородоподобных ионов. Особое внимание мы уделяем сравнению с экспериментальными результатами и проверке КЭД-эффектов во втором порядке по постоянной тонкой структуры.

Наибольшей точности к настоящему моменту удалось достигнуть для литийподобного урана, сравнение экспериментального значения в котором с теоретическим расчетом обеспечило проверку КЭД-эффектов второго порядка на уровне 15%. Проверка КЭД-эффектов на уровне нескольких процентов оказывается возможной также для сверхтонкого расщепления уровней в многозарядных ионах. Мы продемонстрировали, что значительное сокращение ядерных эффектов (которые весьма велики для сверхтонкого расщепления) достигается в специфической разности сверхтонких интервалов для водородо- и литийподобных ионов с одним и тем же ядром.

Особо стоит отметить вычисление поправки на двухпетлевую собственную энергию, которое мы выполнили во всех порядках по Za для основного состояния водородоподобных ионов. В настоящий момент это единственный расчет такого уровня в данной области. Двухпетлевая собственная энергия оказывается первой "нетривиальной" КЭД-поправкой второго порядка по a, вычисленной во всех порядках по Za. Разработанный метод вычислений открывает перспективы для вычисления других подобных поправок, которые весьма существенны для сравнения теории с экспериментом.