

Расчёт уровней энергии бериллиеподобных ионов из первых принципов: сильное взаимодействие корреляционных и квантово-электродинамических эффектов

Одним из ключевых достижений квантовой электродинамики (КЭД), во многом определившим её дальнейшее развитие, было объяснение лэмбовского сдвига, то есть наблюдаемого на эксперименте расщепления $2s$ и $2p_{1/2}$ уровней в атоме водорода. Согласно релятивистской квантовой механике, эти уровни вырождены. Потребовалось привлечь квантовую теорию поля, для того чтобы объяснить результаты эксперимента.

Долгое время объектом проверки и применения методов КЭД для связанных состояний были лёгкие атомные системы, такие как водород, гелий, позитроний или мюоний. Ситуация изменилась в середине 80-х, когда появились экспериментальные возможности для исследования многозарядных ионов (МЗИ). Данные системы примечательны тем, что по сравнению с лёгкими атомами релятивистские и КЭД эффекты в них более выражены. Теоретические методы, пригодные для лёгких систем, не могут быть напрямую применены для изучения МЗИ. Основная причина кроется в том, что в МЗИ взаимодействие электронов с ядром не является малым, и для получения прецизионных результатов данное взаимодействие следует учитывать точно, не прибегая к приближённым методам. Необходимо разрабатывать концептуально новые методы и подходы, которые заново должны быть протестированы и апробированы путём сравнения с экспериментом.

Почти десять лет назад наша группа впервые обратила своё внимание на бериллиеподобные ионы. На первый взгляд, данная система минимальным образом должна отличаться от литиеподобных ионов, содержащих всего на один электрон меньше. Однако оказалось, что в бериллиеподобных МЗИ проявляются качественно новые многочастичные КЭД эффекты. Электромагнитное взаимодействие приводит к сильному перемешиванию близких уровней одинаковой симметрии, и имеет место значительное взаимовлияние корреляционных и КЭД вкладов. Как результат, бериллиеподобные ионы бросают серьёзный вызов атомным расчётам в рамках КЭД для связанных состояний. Все предыдущие подходы, в которых рассмотрение КЭД эффектов было сведено к первому порядку теории возмущений, имеют ограниченную точность. Более того, теоретические предсказания, получаемые в рамках применения стандартной КЭД теории возмущений для одиночного уровня, также оказываются неудовлетворительными. С целью преодолеть данные трудности, в результате многолетней работы нами были развиты не имеющие аналога методы, основанные на использовании КЭД теории возмущений для квазивырожденных уровней. Данные методы мы применили к расчёту уровней энергии в бериллиеподобном ксеноне. Полученные нами теоретические предсказания для энергий возбуждения оказались в прекрасном согласии с данными самых последних измерений. Вместе с тем, для одного отдельного состояния обнаружено некоторое расхождение с результатами предшествующего эксперимента. Мы надеемся, что наша работа инициирует новые исследования МЗИ и послужит стимулом к дальнейшему развитию прецизионных методов расчёта в рамках КЭД для связанных состояний.

Результат опубликован: A. V. Malyshev, D. A. Glazov, Y. S. Kozhedub, I. S. Anisimova, M. Y. Kaygorodov, V. M. Shabaev, and I. I. Tupitsyn. *Ab Initio Calculations of Energy Levels in Be-Like Xenon: Strong Interference between Electron-Correlation and QED Effects* // Phys. Rev. Lett. **126**, 183001 (2021).