

Двухфотонная аннигиляция позитронов и связанных ионных и атомных электронов: расчёт из первых принципов квантовой электродинамики

С момента открытия позитронов в 1932 году, исследования взаимодействий этих частиц с атомами, молекулами и твёрдыми телами представляют интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Одним из важнейших актов взаимодействия является процесс аннигиляции с электронами вещества. Изучение этого процесса привело к развитию позитрон-эмиссионной томографии, методов исследования дефектов в металлах и полупроводниках а также многих других приложений. Особый интерес представляет аннигиляция с электронами внутренних оболочек тяжёлых систем. Такие процессы предоставляют уникальную возможность для исследований поведения антиматерии в присутствии сильного электрического поля, создаваемого ядром, и на несколько порядков превосходящего поля современных лазерных установок. Следует также отметить, что в ближайшее время ожидается новый виток экспериментальных исследований взаимодействий позитронов с различными ионными и атомными мишенями, связанный с появлением позитронных установок нового поколения в Ливерморской национальной лаборатории (Калифорния, США) и научно-исследовательском центре ELI-NP (Бухарест, Румыния).

Аннигиляция позитронов и связанных электронов может протекать с испусканием одного, двух и более фотонов. В большинстве случаев двухфотонная аннигиляция доминирует над другими каналами. Этот процесс, однако, ещё не был подробно описан в рамках строгого квантов электродинамического (КЭД) подхода, должным образом, учитывающего взаимодействие позитронов и электронов с ядром. До настоящего времени описание двухфотонной аннигиляции производилось с помощью одного из двух приближенных методов. В случае ультра-медленных позитронов использовались приближённые формулы китайского физика Ч. Ли. Аннигиляция ультра-быстрых позитронов описывалась в рамках импульсного приближения, основанного на формулах, выведенных Дираком и Таммом. Оба метода оказываются неприменимыми для описания аннигиляции с электронами внутренних оболочек, связанных сильным электрическим полем тяжёлого ядра. Так, например, экспериментальные данные для аннигиляции позитронов, обладающих энергией 300 кэВ (чуть менее 80 % от скорости света), и электронов наиболее глубокой оболочки атома серебра отличались от теоретических предсказаний почти на два порядка величины.

В нашей работе впервые был представлен полностью релятивистский формализм, позволяющий проводить строгое квантовоэлектродинамическое описание процесса двухфотонной аннигиляции позитронов и связанных электронов. Результаты, полученные в рамках развитого формализма прекрасно согласуются с экспериментальными данными и, тем самым, разрешают давние разногласия между теорией и экспериментом, существовавшие более 40 лет. Строгий КЭД-формализм может быть использован для исследования двухфотонной аннигиляции в системах, недоступных ранее для теоретического описания, что, в свою очередь, может привести к улучшению методов позитрон-эмиссионной томографии.

Результат опубликован: V. A. Zaytsev, A. V. Volotka, D. Yu, S. Fritzsche, X. Ma, H. Hu, V. M. Shabaev, Ab initio QED Treatment of the Two-Photon Annihilation of Positrons with Bound Electrons, Phys. Rev. Lett.; 2019 doi: 10.1103/PhysRevLett.123.093401