

О. Чулуунбаатар, Ю. В. Попов, И. П. Волобуев

Новые возможности эффекта Комптона

Недавно международная исследовательская группа, в которую в рамках сотрудничества ОИЯИ, МГУ им. М. В. Ломоносова и Университета Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия) входили авторы настоящей заметки, провела на синхротроне Petra III (DESY, Гамбург) с помощью детектора COLTRIMS (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) кинематически полное экспериментальное измерение характеристик комптоновского рассеяния на свободных атомах гелия и дала адекватное теоретическое описание полученных результатов. В эксперименте наблюдалось комптоновское рассеяние фотонов с энергией 2,1 кэВ на атомах гелия вблизи порога ионизации [1], т. е. такие реакции, в которых переданная энергия оказывается близкой к потенциалу однократной ионизации атома гелия $I_p = 24,6$ эВ. В результате было обнаружено заметное отличие наблюдаемого углового распределения излучения, рассеянного связанными электронами, от углового распределения излучения, рассеянного

свободными электронами, которое дается формулой Томсона.

Почти 100 лет назад, в 1922–1923 гг., американский физик Артур Комптон исследовал с помощью рентгеновского спектрографа явление изменения длины волны света при его рассеянии на графите с испусканием электрона. Он обнаружил, что величина смещения рассеянного спектра в область больших длин волн возрастает при увеличении угла рассеяния.

Теоретическое описание комптоновского рассеяния на свободных электронах было дано тогда же, в 1920-х гг., самим Комптоном [2] на основе представления о фотоне как о релятивистской частице. Это описание также было независимо найдено П. Дебаем [3]. Как известно, в то время среди физиков шла знаменитая дискуссия о природе света, и открытие эффекта Комптона стало одним из самых убедительных аргументов в пользу корпускулярной теории. За это откры-

О. Chuluunbaatar, Yu. V. Popov, I. P. Volobuev

New Opportunities of the Compton Effect

An international research group, in which the authors of this article participated within international cooperation of JINR, Moscow State University and Goethe University (Frankfurt am Main, Germany), carried out an experimental measurement of the characteristics of the Compton scattering at free helium atoms using the COLTRIMS (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) detector at the Petra III synchrotron (DESY, Hamburg) and provided a relevant theoretical description of the obtained results. Compton scattering of photons with an energy of 2.1 keV by helium atoms near the ionization threshold, i.e., the reactions in which the transferred energy is close to the potential of single ionization of the helium atom $I_p = 24.6$ eV, was observed in the experiment [1]. As a result, there was found a noticeable difference between the observed angular distribution of radiation scattered by bound electrons and the angular distribution of radiation scattered by free electrons, which is given by the Thomson formula.

Almost 100 years ago, in 1922–1923, the American physicist Arthur Compton studied the phenomenon of a

change in the wavelength of light scattered on graphite with the emission of an electron. He discovered that the value of the shift of the scattered spectrum to the region of large wavelengths increased with the increasing scattering angle. A theoretical description of the Compton scattering at free electrons was provided by Compton himself in the 1920s [2] on the basis of the concept of a photon as a relativistic particle. This description was also independently found by P. Debye [3]. As is known, at that time there was a famous discussion among physicists about the nature of light, and the discovery of the Compton effect became one of the most convincing arguments in favor of the corpuscular theory. For this discovery, Compton won the Nobel Prize in physics in 1927.

Shortly after the development of quantum mechanics and the description in its framework of the structure of atoms, J. DuMond [4] made the assumption based on the results of his experiments that using Compton scattering it was possible to judge the structure of atoms of the scatterer. He related the broadening of the energy spectrum observed

тие Комптон была присуждена Нобелевская премия по физике за 1927 г.

Вскоре после создания квантовой механики и описания в ее рамках строения атомов Ж. Дюмон [4] на основании результатов своих экспериментов сделал предположение, что с помощью комптоновского рассеяния можно судить о строении атомов рассеивателя. Он связал наблюдаемое при фиксированном угле рассеяния уширение энергетического спектра с импульсным распределением связанных электронов в веществе рассеивателя, предположив, что смещенная линия уширяется в результате рассеяния излучения на хаотично движущихся электронах рассеивателя аналогично тому, как происходит доплеровское уширение оптических линий излучения движущихся атомов. Рассмотрев несколько пробных распределений импульсов для различных электронных состояний, Дюмон обнаружил, что структура наблюдаемого спектра излучения, рассеянного на атомах бериллия, хорошо воспроизводится теоретически, если использовать квантово-механическое описание связанных электронов в атомах.

Со времени опытов Комптона эксперименты в этой области были основаны на методе совпадений

для одновременного детектирования испущенного в результате ионизации электрона и рассеянного фотона, который был предложен немецким физиком В. Боте [5] как раз для изучения эффекта Комптона в 1924 г. В 1954 г. Боте получил Нобелевскую премию «...за изобретение метода совпадений и открытия, сделанные впоследствии с его помощью».

Однако применение электрон-фотонного метода совпадений для прецизионных измерений невозможно в силу ряда технических ограничений. Ситуация изменилась после изобретения нового метода регистрации рассеянных частиц, получившего название спектроскопия импульса отдачи ионов холодной мишени (COLTRIMS) [6], и появилась реальная возможность использовать комптоновское рассеяние для определения угловых и энергетических спектров как рассеянных фотонов, так и испущенных в результате ионизации электронов. Метод COLTRIMS позволяет одновременно измерять импульсы электрона и иона отдачи, что дает возможность проводить измерения методом совпадений с высокой точностью. В частности, с использованием этой техники стало возможным собирать ионы и электроны практически с полного телесного угла $\Omega_{\text{full}} = 4\pi$. При этом импульс рассеян-

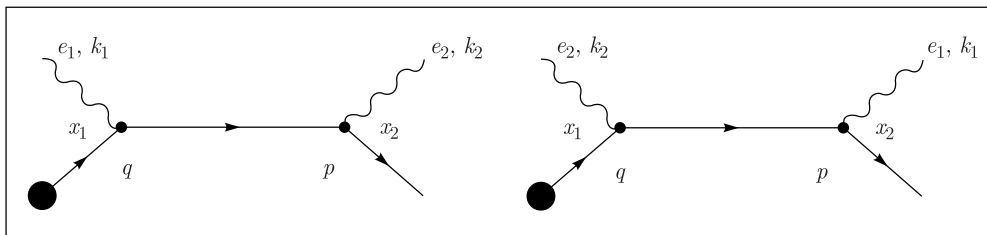


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для комптоновского рассеяния

Fig. 1. Feynman diagrams for the Compton scattering

at a fixed scattering angle with the momentum distribution of bound electrons in the scattering matter, supposing that the shifted line broadened as a result of scattering of radiation at randomly moving electrons of the scatterer, similar to the way the Doppler broadening of optical lines of moving atom radiation occurs. Having examined several test momentum distributions for different electron states, DuMond discovered that the structure of the observed spectrum of radiation scattered at beryllium atoms was well reproduced theoretically if the quantum-mechanical description of bound electrons in atoms was used.

Since Compton's experiments, experiments in this field were based on the coincidence method for simultaneous detection of an electron and a scattered photon emitted by ionization, which was proposed by the German physicist W. Bothe to study the Compton effect in 1924. In 1954, Bothe was awarded the Nobel Prize "for the coincidence method and his discoveries made therewith" [5].

However, the use of the electron-photon coincidence method for precision measurements is impossible due to

a number of technical restrictions. The situation changed after the invention of a new method for detecting scattered particles, which was named COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy (COLTRIMS) [6], and a real opportunity to use the Compton scattering for determining angular and energy spectra of both scattered photons and electrons emitted by ionization appeared. The COLTRIMS method allows one to simultaneously measure the momenta of an electron and a recoil ion, which makes it possible to carry out measurements by the coincidence method with high accuracy. In particular, using this method, it became possible to collect ions and electrons from almost the full solid angle $\Omega_{\text{full}} = 4\pi$. In this case, the momentum of a scattered photon can be found from the law of conservation of momentum, as a result of which there is no need to detect the photon itself.

In quantum electrodynamics, the standard theory of Compton ionization is based on two Feynman diagrams (Fig. 1), however, in the case of photons with an energy of several keV, it makes sense to consider the description of

Рис. 2. Схема ионизации при комптоновском рассеянии при $\omega = 2,1$ кэВ. *a*) Волнистые линии обозначают входящий и рассеянный фотоны, стрелка — вектор импульса испущенного электрона. Штриховая линия — дифференциальное сечение Томсона, т. е. угловое распределение рассеяния фотонов на свободном электроне. Черные точки — экспериментальное угловое распределение фотонов при ионизации атома гелия комптоновским рассеянием, проинтегрированное по всем углам и энергиям испускаемых электронов ниже 25 эВ. Статистическая ошибка меньше размера точки. Черная штрихпунктирная линия — аппроксимация A^2 для всех энергий электронов. Сплошная красная линия — аппроксимация A^2 для энергий электронов ниже 25 эВ. Черные линии увеличены в 1,9 раза. *b*) Распределение импульсов электронов, испущенных при комптоновском рассеянии фотонов с энергией 2,1 кэВ на атоме гелия. Система координат такая же, как в *a*, т. е. плоскость определяется входящим (горизонтальным) и рассеянным фотоном (верхняя полуплоскость). Вектор передачи импульса направлен в переднюю нижнюю полуплоскость. Данные проинтегрированы по компонентам импульса электрона вне плоскости рассеяния. *c*) Распределение импульса иона гелия для тех же условий, что и в *b*

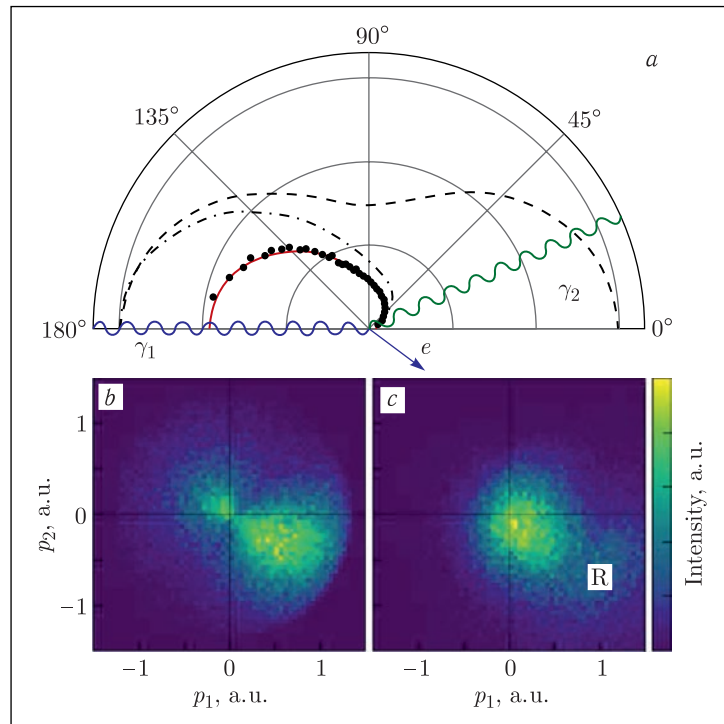


Fig. 2. Scheme of ionization by the Compton scattering at $\omega = 2.1$ keV. *a*) The wavy lines indicate the incoming and scattered photons, and the arrow depicts the momentum vector of the emitted electron. The dashed line shows the Thomson cross section, i.e., the angular distribution of a photon scattering at a free electron. The black dots show the experimental photon angular distribution for ionization of He by the Compton scattering, integrated over all electron emission angles and energies below 25 eV. The statistical error is smaller than the dot size. The black dash-dotted line shows the A^2 approximation for all electron energies, and the solid red line shows the A^2 approximation for electron energies below 25 eV. The black dashed and dash-dotted lines are multiplied by a factor of 1.9. *b*) Momentum distribution of electrons emitted by the Compton scattering of 2.1 keV photons at He. The coordinate frame is the same as in *a*, i.e., the plane is defined by the incoming (horizontal) and scattered photon (upper half plane). The momentum transfer points to the forward lower half plane. The data are integrated over the out-of-plane electron momentum components. *c*) He⁺ ion momentum distribution for the same conditions as in *b*

this process using the non-relativistic Schrödinger equation [7]. As a result, the matrix element corresponding to these diagrams splits into the sum of two terms. Both of these terms are of the second order in electron charge; however, the first term traditionally denoted by A^2 resembles in form the first Born approximation in the case of atom ionization by a charged particle (proton, electron), and the second (integral) term coincides in form with the second Born approximation. At the selected photon energy, the term A^2

makes the major contribution, while the second term is extremely small and plays the role of correction.

This theoretical model turned out to be quite simple, which allowed one to consider a number of test functions of the initial and finite states and compare the results with the experiment, as well as to evaluate the possibility of this new method to carry out precision spectroscopy (angular and energy) of the outermost shells of an atom (molecule). The calculations were performed at the “Govorun” supercomputer of JINR, and the obtained results were in a good

ного фотона может быть найден из закона сохранения импульса, вследствие чего отпадает необходимость детектирования самого фотона.

В квантовой электродинамике стандартная теория комптоновской ионизации основана на двух диаграммах Фейнмана (рис. 1), однако в случае фотонов с энергией в несколько килоэлектронвольт имеет смысл рассматривать описание этого процесса с помощью нерелятивистского уравнения Шредингера [7]. В результате отвечающий этим диаграммам матричный элемент распадается на сумму двух слагаемых. Оба эти слагаемые второго порядка по заряду электрона, но первое слагаемое, традиционно обозначаемое A^2 , напоминает по форме первое борновское приближение в случае ионизации атома заряженной частицей (протоном, электроном), а второе (интегральное) слагаемое совпадает по форме со вторым борновским приближением. При выбранной энергии фотона основной вклад дает член A^2 , а второе слагаемое получается чрезвычайно малым и играет роль поправки.

Эта теоретическая модель оказалась достаточно простой, что позволило рассмотреть целый ряд пробных функций начальных и конечных состояний и сравнить результаты с экспериментом, а также оценить возможность этого нового метода проводить преци-

зионную спектроскопию (угловую и энергетическую) внешних оболочек атома (молекулы). Расчеты проводились на суперкомпьютере «Говорун» ОИЯИ, и полученные результаты в значительной степени совпали с экспериментом (рис. 2). В то же время в экспериментах сделано различие наборов пробных функций, что показало возможность использования комптоновской ионизации наряду с известными спектроскопическими методами, такими как $(e, 2e)$, (p, pe) и др.

Таким образом, экспериментальные и теоретические результаты, опубликованные недавно в журнале «Nature Physics» [1], показали новые возможности комптоновской ионизации атома при передаче энергии, близкой к порогу однократной ионизации, как эффективного метода спектроскопии внешних оболочек атомов и молекул. И это получилось благодаря прецизионным измерениям очень маленьких дифференциальных сечений с привлечением современных технических средств и теоретических расчетов этих сечений на суперкомпьютере «Говорун» ОИЯИ. В результате попытки первопроходцев использовать эффект Комптона, открытый почти 100 лет назад, для целей спектроскопии квантовых объектов с использованием несовершенной тогда техники получили сегодня новый импульс.

Список литературы / References

1. Kircher M. et al. Kinematically Complete Experimental Study of Compton Scattering at Helium Atoms near the Threshold // Nature Phys. 2020. V. 16. P. 756–760.
2. Compton A. H. // Phys. Rev. 1923. V. 21. P. 483.
3. Debye P. // Z. Physik. 1923. V. 24. P. 161.
4. DuMond J. W. M. // Phys. Rev. 1929. V. 33. P. 643.
5. Bothe W. Nobel Lecture. 1954.
6. Ullrich J. et al. // Rep. Prog. Phys. 2003. V. 66. P. 1463.
7. Bergstrom P. M., Jr., Surić T., Pisk K., Pratt R. H. // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. P. 1134.

agreement with the experiment (Fig. 2). At the same time, the experiments distinguished sets of test functions, which showed the possibility of using Compton ionization along with the well-known spectroscopic methods, such as $(e, 2e)$, (p, pe) , etc.

Thus, the experimental and theoretical results recently published in *Nature Physics* [1] showed new opportunities of the Compton ionization of an atom with the energy transfer close to the threshold of single ionization as an effective method of spectroscopy of the outermost shells of atoms and molecules. This became possible due to the precision measurements of very small differential cross sections using modern technical tools and theoretical calculations of these cross sections at the “Govorun” supercomputer of JINR. As a result, pioneers’ attempts to use the Compton effect, which was discovered almost 100 years ago, for spectroscopy of quantum objects using then imperfect technologies have gained a new impetus today.