

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

К истории развития теории туннельной ионизации атомов и ионов

В.С. Попов

PACS numbers: 32.90.+a, 42.65.+k

В майском номере *УФН* за 1998 г. был опубликован обзор Н.Б. Делоне и В.П. Крайнова [1]. Считаю себя вправе, и даже обязанным, высказать ряд замечаний по поводу этого обзора.

1. Основные формулы из разделов 4.1 и 4.2 обзора [1], относящиеся к энергетическим и угловым распределениям фотоэлектронов при туннельной ионизации, были получены в [2, 3] задолго до появления работ [4, 5]. При этом в [2, 3] задача об ионизации атомного уровня лазерным излучением решена для произвольных значений параметра Келдыша γ , а не только в адиабатической области $\gamma \ll 1$ (низкая частота, большая напряженность поля), которая рассматривается в [1, 4, 5]. Например, импульсный спектр электронов в случае излучения с линейной поляризацией имеет вид ¹:

$$w(\mathbf{p}) = w(0) \exp \left\{ -\frac{1}{\omega} [c_1(\gamma)p_{\parallel}^2 + c_2(\gamma)p_{\perp}^2] \right\},$$

$$\hbar = m = e = 1, \quad (1)$$

где $c_1 = \operatorname{arsinh} \gamma - \gamma(1 + \gamma^2)^{-1/2}$, $c_2 = \operatorname{arsinh} \gamma$, $\gamma = \omega\sqrt{2E_i}/F$ и $\mathbf{p} = (p_{\parallel}, p_{\perp})$ — импульс электрона после выхода из-под барьера. При $\gamma \ll 1$ имеем $c_1 = 1/3\gamma^3 + \dots$, $c_2 = \gamma - 1/6\gamma^3 + \dots$, и (1) непосредственно дает

$$w(\mathbf{p}) = w(0) \exp \left\{ -\left[\frac{\omega^2(2E_i)^{3/2}}{3F^3} p_{\parallel}^2 + \frac{(2E_i)^{1/2}}{F} p_{\perp}^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

что полностью совпадает с уравнением (10) в [1]. Из этой формулы вытекают и следующие за ней формулы (12)–(17), определяющие ширину энергетического и углового распределений фотоэлектронов, и т.п.

Аналогичным образом, результаты раздела 4.2 для случая циркулярной поляризации низкочастотного излу-

чения легко могут быть получены из более общих формул ² работ [2, 3], справедливых для всех значений γ .

2. При обсуждении кулоновской поправки (раздел 5.1 в [1], основанный на работе [8]) авторы ограничиваются случаем постоянного поля, для которого эта поправка давно известна [9]. Заметим, однако, что в работе [10] кулоновская поправка вычислена не только при $\gamma \ll 1$, но и в существенно более широкой области значений параметра γ . При этом использованный в [1, 8] метод расчета по существу не отличается от метода, предложенного ранее в [10] (учет кулоновского взаимодействия по квазиклассической теории возмущений).

Вызывает удивление отсутствие в [1] соответствующих ссылок, тем более, что статьи [2, 3, 10] хорошо известны авторам обзора [1] и в свое время подробно обсуждались с Н.Б. Делоне.

3. В [1] допущена ошибка при обсуждении формулы (6), полученной в работе [3]. Эта формула относится не к состояниям атома водорода (для последнего, как известно, при наличии внешнего электрического поля F орбитальный момент l не сохраняется), а к lm -уровню произвольного атома без "случайного" кулоновского вырождения. Поэтому для применения соответствующей формулы к произвольному атому не требуется ее обобщение с помощью метода квантового дефекта (вопреки тому, что утверждается в [1, 11]). Далее в [1, 11] используется выражение для асимптотического коэффициента атомной волновой функции на бесконечности, предложенное Д. Хартри еще в 1927 г. (уравнение (7.6) в [12], см. также [13, 14]). После замены факториалов по формуле Стирлинга отсюда следуют формулы (7)–(9) обзора [1], которые авторы обзора называют "формулами АДК".

Разумеется, трудно возражать против того или иного названия, однако следует все же заметить, что оригинальный вклад авторов "АДК-теории" (Аммосов, Делоне, Крайнов) сводится к применению формулы Стирлинга к коэффициентам (не зависящим от F), содержащимся в [3, 12]. Так, в случае поля циркулярной поляризации вероятность ионизации s -уровня нейтрального атома равна

$$w(F) = Nk^2 \epsilon^{1-2n^*} \exp \left[-\frac{2}{3\epsilon} \left(1 - \frac{1}{15} \gamma^2 \right) \right], \quad \gamma \ll 1, \quad (3)$$

¹ См. формулу (53) в [3]. Обозначения те же, что и в обзоре [1].

В.С. Попов. Институт теоретической и экспериментальной физики, 117218 Москва, ул. Б. Черемушкинская 25, Российская Федерация
Тел. (095) 129-96-14

Статья поступила 28 апреля 1999 г.

² Подробности вычислений (выполненных независимыми методами) изложены в работах [6] и [7], соответственно.

где $\kappa = \sqrt{2E_i}$, E_i — потенциал ионизации, $\epsilon = F/\kappa^3$ — приведенное электрическое поле, $n^* = 1/\kappa$ — эффективное главное квантовое число [12–14] и N — безразмерный численный коэффициент. "Формула АДК" получается отсюда при замене

$$N = \left[\frac{2^{2n^*-1}}{\Gamma(n^* + 1)} \right]^2 \rightarrow N_{\text{АДК}} = \frac{1}{8\pi n^*} \left(\frac{4\epsilon}{n^*} \right)^{2n^*} \quad (4)$$

(функциональная зависимость w от F остается той же, что и в [2, 3]), причем n^* обычно порядка единицы³). Использование приближения Стирлинга (4) в этой области не имеет достаточных оснований и лишь систематически завышает абсолютные значения вероятности ионизации. В частности, для атома водорода (основное состояние, $n^* = \kappa = 1$) предлагается заменить коэффициент $N = 4$ в известной формуле [9] $w(F) = NF^{-1} \exp(-2/3F)$, асимптотически точной в пределе слабых полей ($F \ll 1$), на $N_{\text{АДК}} = 2e^2/\pi \approx 4,70$, что вряд ли можно считать хорошим приближением (ошибка 18%; в случае атома гелия погрешность приближения (4) достигает 25%).

"Успехи физических наук" — обзорный журнал мирового уровня. Это налагает на авторов определенную ответственность за достоверность и объективность публикуемых материалов. Библиография обзора должна быть достаточно полной и уж, во всяком случае, не должна искажать историю вопроса, тем более в пользу самих авторов. К сожалению, обзор Делоне и Крайнова этим очевидным требованиям не удовлетворяет.

Достоин быть отмеченным также и своеобразный прием, использованный указанными авторами при

цитировании работ [2, 3, 10]: если где и встречаются ссылки на эти работы, то они связаны не с их основным содержанием, а с тем или иным второстепенным вопросом, причем читатель, как правило, отсылается за подробностями к работам Делоне и Крайнова. Примеры такого рода нетрудно найти в [1, 5, 8, 15], в монографии [16] и в других работах этих авторов.

Я хотел бы надеяться, что высказанные замечания будут полезны для читателей *УФН*.

Список литературы

1. Делоне Н Б, Крайнов В П *УФН* **168** 531 (1998)
2. Никишов А И, Ритус В И *ЖЭТФ* **50** 255 (1966)
3. Переломов А М, Попов В С, Терентьев М В *ЖЭТФ* **50** 1393 (1966)
4. Corkum P В, Burnett N Н, Brunel F *Phys. Rev. Lett.* **62** 1259 (1989)
5. Delone N В, Krainov V P *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 1207 (1991)
6. Никишов А И *Труды ФИАН* **111** 152 (1979)
7. Попов В С, Кузнецов В П, Переломов А М *ЖЭТФ* **53** 331 (1967)
8. Krainov V P *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 425 (1997)
9. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Квантовая механика* (М.: Физматгиз, 1963) с. 328
10. Переломов А М, Попов В С *ЖЭТФ* **52** 514 (1967)
11. Аммосов М В, Делоне Н Б, Крайнов В П *ЖЭТФ* **91** 2008 (1986)
12. Hartree D R *Phys. Camb. Philos. Soc.* **24** 89 (1927)
13. Bates D R, Damgaard A *Philos. Trans. R. Soc. London* **242** 101 (1949)
14. Hartree D R *The Calculation of Atomic Structures* (New York: Wiley, 1957) (Русский перевод: Хартри Д) *Расчеты атомных структур* (М.: ИЛ, 1960)]
15. Krainov V P, Xiong W, Chin S L *Laser Phys.* **2** 467 (1992)
16. Delone N В, Krainov V P *Multiphoton Processes in Atoms* (Berlin: Springer, 1994)

³ Так, для s-электронов в нейтральных атомах значения n^* лежат в пределах от 0,744 для He до 1,87 для Cs, а для однозарядных положительных ионов $n^* = 2/\kappa$ меняется от 0,848 (Li^+) до 2,22 (Sr^+).

On the history and development of the theory of tunnel ionization of atoms and ions

V.S. Popov

*Institute of Theoretical and Experimental Physics
ul. B. Cheryomushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 129-96 14*

PACS numbers: **32.90. + a**, **42.65. + k**

Bibliography — 16 references

Received 28 April 1999

P.S. Комментарий к статье В.С. Попова "К истории развития теории туннельной ионизации атомов и ионов"

Мы благодарим В.С. Попова за его письмо. Мы согласны с частью замечаний относительно приоритетных вопросов. Однако мы полагаем, что физическая сущность вопроса изложена нами в обзоре полностью.

Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов