

12. Заключение

12.1. Общие замечания

Выше была изложена теория многоэлектронных эффектов в атомных процессах и довольно подробно обсуждены наиболее существенные результаты, полученные с ее помощью. Основой теории является метод ПСФО, представляющий следующий после ХФ значительный шаг в развитии теории атомов. Эта теория позволила устранить существовавшие расхождения между одночастичной теорией и экспериментом, обнаруженные при изучении процессов фотоионизации атомов в 60-х годах.

На основе ПСФО были разработаны различные обобщения, позволившие углубить понимание роли многоэлектронных корреляций в атомах и применить теорию для рассмотрения практически любых процессов взаимодействия фотонов, электронов, позитронов и других частиц с атомами и ионами. На этой основе были объяснены результаты измерений сечений фотоионизации многих атомов и ионов от He до Tl в основном и возбужденном состояниях, предсказаны различные коллективные эффекты при фотоионизации нейтральных атомов, положительных и отрицательных ионов, такие как гигантские резонансы, максимумы и минимумы в сечениях фотоионизации малоэлектронных оболочек, резкие вариации углового распределения фотоэлектронов. Предсказано возникновение спиновой поляризации фотоэлектронов при ионизации оболочек с отличным от нуля орбитальным моментом, возникновение *атомного* тормозного излучения при рассеянии частиц на атомах. Обнаружены значительные многоэлектронные эффекты в процессах упругого и неупругого рассеяния электронов, позитронов и других частиц, в распадах вакансий и токах увлечения. Исследовано фотопоглощение в двухатомных молекулах. Теория, созданная для изолированных атомов, была использована также для объяснения спектров металлических кластеров. Теория поляризационных явлений была успешно применена для объяснения магнитного дихроизма в фотоэмиссии из ферромагнетиков, кругового дихроизма при фотоэмиссии из твердых тел и из атомов и молекул, адсорбированных поверхностью. В результате проведенных исследований создан универсальный подход, пригодный к описанию процессов не только с участием атомов, но и многоатомных образований и твердых тел.

В приведённом выше описании многие математические детали выводов были опущены с целью упрощения изложения. Они могут быть найдены в цитируемой литературе. Конкретные примеры также относятся к ограниченному набору атомов и

носят иллюстративный характер. Они лишь представляют весьма общие эффекты и явления, описанные в данной работе. Более полную информацию о рассмотренных атомах и процессах с их участием можно получить из оригинальных цитированных статей.

Эффекты, предсказанные с помощью развитой выше теории, были подтверждены многочисленными измерениями, проведенными как в России, так и за ее пределами. Расчеты инициировали появление новых направлений исследований в атомной физике и в смежных областях. Программы исследований по атомной физике на большинстве источников синхротронного излучения (ФРГ, Англии, США, Японии, Дании) были и остаются в значительной мере основаны на результатах теоретических разработок, приведенном в данной книге.

Созданный для проведения описанных выше исследований пакет вычислительных программ АТОМ является уникальным и используется в различных научных центрах России и за ее пределами. Он может применяться и применяется для самых разнообразных расчетов атомных характеристик далеко вне рамок самой физики атома.

Результаты проведенных исследований существенно углубили понимание физики атомов. Они используются в различных областях науки и техники, в частности, в физике плазмы, в астрофизике, в физике поверхностей, в физике кластеров.

Эти исследования развивались в тесном взаимодействии с экспериментаторами, работающими в атомной физике, в попытках объяснить полученные ими результаты, опираясь на развиваемые методы теории многих тел, и стимулировать проведение ими новых экспериментов на основе предсказаний, полученных в наших работах. Изначальная заинтересованность проблемой возникла из обсуждений результатов опытов, выполненных в 1964-65 гг. Н.В.Федоренко с сотрудниками в Физико-Техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН. В дальнейшем обсуждение экспериментальной ситуации в атомной физике и возможностей постановки новых экспериментов с Н.В. Федоренко, В.В. Афросимовым, С.В. Бобашевым, Ю.С. Гордеевым, Г.Н. Огурцовым (ФТИ им. А.Ф.Иоффе), Э.Т. Верховцевой (ФТИНТ АН Украины), Т.М. Зимкиной, А.С. Шулаковым (СПбГУ), В.И. Нефёдовым (ИОНХ РАН) стало регулярной практикой. Результаты, полученные этими исследователями, в ряде случаев публиковавшиеся совместно с авторами данной книги, сыграли важную роль в проведении исследований по теории многоэлектронных эффектов в атомных процессах.

Особые возможности для исследований электронных корреляций в атомных процессах открылись при использовании синхротронного излучения, источники которого функционируют в основном за рубежами России. Многие предсказания, сделанные в рамках работ по теории многоэлектронных эффектов в атомных процессах, были подтверждены в исследованиях видных зарубежных экспериментаторов, с которыми позднее появились и совместные публикации. Результаты, полученные U. Becker, U. Heinzmann, D. Sonntag, W. Mehlhorn, H. Schmoranzer, V. Schmidt (ФРГ), J.-P. Connerade, J. West (Англия), A. Yagishita (Япония), J.A.R. Samson (США), F. Wuilleumier (Франция), G. O'Sullivan, E.T. Kennedy (Ирландия), T. Andersen (Дания), а также обсуждения этих результатов и экспериментальных возможностей непосредственно с этими специалистами значительно способствовали развитию исследований данного цикла.

В проведении работ по созданию теории многоэлектронных эффектов в атомных процессах принимали участие также и сотрудники из разных учреждений СССР (СНГ): Р.В. Ведринским, В.Ф. Демёхиным, В.Л. Сухоруковым, В. Явной и их учениками, В.Г. Яржемским и рядом других. Их участие внесло крупный положительный вклад и способствовало увеличению объема проделанной работы.

Считаем нужным отметить, что всего за время проведения исследований по этой тематике только при Физико-Техническом Институте им. А. Ф. Иоффе защищено, включая авторов, более тридцати кандидатских и десять докторских диссертаций. Мы хотим отметить весьма заметный вклад наших бывших учеников и коллег С.И. Шефтеля, С.Г. Шапиро, А.С. Балтенкова, С.А. Шейнермана, И.С. Ли, М.Ю. Кучиева, В.К. Долматова, А.С. Хейфеца, Н.Б. Авдониной, Г.Ф. Грибакина, А.В. Соловьева, А.В. Короля, В.Г. Купченко, В.А. Килина, В.Л. Яхонтова, С.К. Семёнова, А.Н. Ипатова, Г.Ю. Кашенок. Без их вклада очень многие материалы, положенные в основу данной книги, попросту не могли бы появиться.

Всем выше перечисленным, а также ещё гораздо большему числу не перечисленных, мы глубоко благодарны.

12.2. Итоги

Нам представляется, что имеет смысл завершить книгу подведением конкретных итогов применения развитой в предыдущих главах теории многоэлектронных эффектов в атомных процессах. Для этого перечислим основные результаты,

полученные с помощью этой теории. Начнем с процесса поглощения атомами фотонов и связанных с этим эффектов. В данном направлении было сделано следующее:

- а) показано, что гигантские резонансы, обнаруженные в сечении поглощения фотонов многоэлектронными атомами, имеют полностью многоэлектронную природу. В частности, к ним относятся резонансы в окрестности $4d^{10}$ оболочек ксенона и его соседей по системе элементов Менделеева, таких как йод, цезий, барий и др. Они – аналоги плазмонов в твердых телах, и в их образовании участвуют все десять электронов $4d$ оболочки [1-2];
- б) предсказано, что воздействие многоэлектронной оболочки качественно изменяет сечение фотоионизации малоэлектронной оболочки, приводя к новым резонансам в сплошном спектре поглощения, названным *интерференционными* [3-5]. Эти резонансы есть прямое следствие взаимодействия между электронами, принадлежащими различным оболочкам. Они были впервые обнаружены на опыте в атоме аргона [6], а затем во многих других атомах;
- в) найдены примеры сильного взаимодействия электронов, принадлежащих к двум или даже трем различным оболочкам, которое приводит к качественному изменению соответствующих поперечных сечений с образованием совершенно новых максимумов и минимумов [5,7];
- г) показано, что в атомах с незаполненными оболочками, в частности с полузаполненными, возникают гигантские автоионизационные резонансы [8], обусловленные интерференцией прямого канала фотоионизации и канала через возбуждение дискретного перехода на свободные состояния в незаполненной оболочке;
- д) предсказано, что межэлектронное взаимодействие и обусловленные им корреляционные эффекты проявляются в качественном изменении углового [9] распределения фотоэлектронов;
- е) обнаружена важная роль межэлектронного взаимодействия в поляризации фотоэлектронов [10];
- ж) обнаружено впечатляющее увеличение числа выхода однократных ионов в окрестностях порогов промежуточных многоэлектронных оболочек [11];
- з) предсказано существование квадрупольных гигантских резонансов [12-13];
- и) обнаружена важная роль внутридублетных корреляций, приводящих к образованию спин - дублетного резонанса в сечении фотопоглощения $3d$ электронов Хе, Cs, Ва [14] и углового распределения фотоэлектронов [15];

- к) показано, что межэлектронные корреляции качественно изменяют поведение сечений фотоионизации в пределе высоких частот фотона ω , $\omega \rightarrow \infty$ [16];
- л) показано, что наряду с главной линией, соответствующей удалению электрона из определенной оболочки, в фотоэлектронном спектре существуют “теневые” уровни чисто многочастичной природы. Они проявляются при любой энергии фотона с примерно одинаковой интенсивностью по сравнению с главной линией [17];
- м) предсказано существование особого механизма удаления двух атомных электронов одним фотоном – так называемого квазисвободного механизма, когда энергия и импульс фотона передаются почти целиком обоим электронам (а не иону отдачи), которые покидают атом с примерно равными скоростями в почти противоположном направлении [18];
- н) впервые произведен расчет вероятности одновременной рекомбинации двух электронов с испусканием одного фотона [19-20];
- о) предсказано существование максимумов и минимумов в сечениях фототрыва электронов от отрицательных ионов, обусловленных чисто многоэлектронными эффектами. В частности, разнообразные особенности - автоотрывные резонансы сплошного спектра [21-22] - возникают вследствие сильного взаимодействия сплошных спектров возбуждения электронов, принадлежащих двум наружным оболочкам. Последние обнаружены экспериментально в ионе Si^- кремния [23] и в ионе B^- бора [24];
- п) предсказаны околопороговые резонансы в сечениях фототрыва электронов из внутренних оболочек отрицательных ионов [25-26], которые позже были обнаружены экспериментально для отрицательного иона C^- [27];
- р) показана важная роль сложных многоэлектронных процессов в формировании резонансной и околопороговой структуры в фотоионизации положительных ионов [28-29];
- с) предсказан сложный осцилляторный характер сечения фотоионизации возбужденных электронов в ряде атомов [30];
- т) предсказано, что существуют неожиданно большие недипольные поправки к угловому распределению фотоэлектронов уже при малых энергиях фотонов ω [31], что приводят к созданию “тока увлечения” – в принципе наблюдаемого макроскопического эффекта в фотоионизации газов [32-33];
- у) показано, что сразу за порогом фотоионизации внутренней или промежуточной оболочки имеется большая вероятность захвата медленного фотоэлектрона сильным

полем притяжения, образовавшимся в результате Оже - распада вакансии в ионизируемой оболочке [34];

ф) обнаружено, что вероятность неупругого рассеяния фотоэлектрона внутри ионизируемого атома достаточно высока, что существенно увеличивает заряд иона, образующегося при фотопоглощении [35].

Перечислим основные результаты, полученные при исследовании процессов упругого и неупругого рассеяния электронов, позитронов и других частиц на атомах:

а) проведены расчеты поляризационных потенциалов для атомов благородных газов, что позволило описать данные эксперимента по рассеянию медленных электронов с весьма высокой степенью точности [36-37];

б) предсказано существование минимума Рамзауэра в сечении упругого рассеяния электронов на щелочноземельных атомах при очень низких энергиях столкновения [38];

в) впервые показано, что поляризационный потенциал в щелочноземельных атомах достаточно силен, чтобы привести к образованию стабильных отрицательных ионов с весьма малой энергией связи [39-41];

г) обнаружена большая роль виртуального образования позитрония в формировании поляризационного потенциала в позитрон - атомном рассеянии [42];

д) обнаружен существенный вклад многоэлектронных корреляций в неупругое рассеяние быстрых электронов. В сечении этого процесса проявляются как дипольные, так и недипольные коллективные возбуждения [43];

е) впервые развита квантовомеханическая теория так называемого “взаимодействия после столкновения” - эффекта, состоящего в сильном влиянии внезапного изменения поля, действующего на удаляемый из атома электрон, вследствие Оже - распада образовавшейся вакансии [34,44];

ж) впервые предложен и теоретически исследован механизм генерирования электромагнитного излучения сплошного спектра (“атомное” или “поляризационное излучение”) в столкновении электронов и других частиц (включая ионы) с атомами. Данное излучение возникает за счет деформации электронных оболочек мишени (или налетающего иона) в процессе рассеяния [45-46]. Интенсивность этого излучения целиком определяется взаимодействием между электронами и вызванных этим взаимодействием коллективных эффектов.

Многоэлектронные корреляции проявляются в положении и вероятности распада вакансий. По существу, Оже - эффект есть процесс, уже определяемый

межэлектронным взаимодействием. Однако во многих процессах распада возбужденных состояний роль Оже - эффекта особенно важна. Сказанное иллюстрируется следующими основными результатами:

- а) разработан метод микроскопического расчета энергий вакансий с учетом межэлектронных корреляций [47];
- б) показано, что межэлектронные корреляции могут радикальным образом повлиять на вероятность радиационных и безрадиационных распадов одиночных вакансий. Предсказано, что под влиянием электронных корреляций радиационный распад может быть полностью подавлен, приводя к так называемому “радиационному самозапиранию” вакансий [48];
- в) рассчитана вероятность однофотонного и одноэлектронного распада двухвакантных (двухдырочных) состояний [49], и рассмотрен широкий круг эффектов, связанных с этими процессами [50];
- г) впервые рассмотрен в рамках многочастичной теории многих тел процесс двухэлектронного Оже- и полу- Оже - распада, в котором испускается фотон и электрон одновременно [51];
- д) впервые рассмотрен с помощью теории многих тел Оже - распад сложных электрон - дырочных возбужденных состояний [51];

Методы, развитые для учета многоэлектронных корреляций в атомах, были успешно применены и к другим объектам, таким как простейшие молекулы, кластеры металлов и фуллерены. При этом впервые получены следующие важные результаты:

- а) установлена существенная роль многоэлектронных эффектов при определении структуры металлических кластеров [52-56];
- б) описаны гигантские резонансы в фотопоглощении металлическими кластерами, обусловленные возбуждением коллективных плазменных колебаний электронов [25,57];
- б) продемонстрирована определяющая роль многоэлектронных эффектов, в частности поляризационного потенциала, при образовании отрицательных ионов металлических кластеров, а также в процессах упругого рассеяния электронов на кластерах [40,55-56];
- в) метод ПСФО обобщен для двухатомных молекул, и на примере молекулы N_2 показано, что с его помощью удастся существенно улучшить согласие теории с экспериментом [58];

- г) показано, что ряд эффектов в фотоэмиссии из твердых тел, например, магнитный дихроизм, имеют в своей основе атомные процессы, и поэтому могут быть качественно, а иногда и количественно, описаны на основе применения результатов, полученных для изолированных атомов и молекул [59];
- д) в рамках весьма простой модели описаны дополнительные резонансы в полном и дифференциальном по углу сечениях фотоионизации атомов, заключенных в оболочку фуллерена C_{60} [60-61].

Этими результатами не исчерпываются возможности применения разработанных и описанных в данной книге методов теории многих тел к многоэлектронным системам. Современная компьютерная техника позволяет проводить более совершенные вычисления, что при совершенствовании описанных теоретических методов открывает новые горизонты в исследовании многоэлектронных систем.

Литература к Заключению.

1. Амусья М.Я., Черепков Н.А., Чернышева Л.В., Шефтель С.И. 1969. *ЖЭТФ* **56**, 1897
2. Амусья М.Я., Черепков Н.А., Чернышева Л.В. 1971. *ЖЭТФ* **60**, 160.
3. Amusia M.Ya., Ivanov V.K., Cherepkov N.A., Chernysheva L.V. 1972. *Phys.Lett. A* **40**, 361.
4. Амусья М.Я., Иванов В.К., Черепков Н.А., Чернышева Л.В. 1974. *ЖЭТФ* **66**, 1537.
5. Amusia M.Ya., Cherepkov N.A. 1975. *Case Studies in Atomic Physics* **5**, 47
6. Samson J.A.R., Gardner J.L. 1974. *Phys.Rev. Lett.* **33**, 671.
7. Amusia M.Ya., Cherepkov N.A., Chernysheva L.V. 1972. *Phys.Lett. A* **40**, 15.
8. Амусья М.Я., Долматов В.К., Иванов В.К. 1983. *ЖЭТФ* **85**, 115.
9. Amusia M.Ya., Ivanov V.K. 1976. *Phys.Lett. A* **59**, 194.
10. Cherepkov N.A. 1983. *Adv.At.Mol.Phys.* **19**, 395-447.
11. Amusia M.Ya., Ivanov V.K., Chernysheva L.V. 1973. *Phys. Lett. A* **43**, 243.
12. Cherepkov N.A., Semenov S.K. 2001. *J. Phys. B* **34**, L495.
13. Johnson W.R., Cheng K. T. 2001. *Phys. Rev. A* **63**, 022504.
14. Amusia M.Ya., Chernysheva L.V., Manson S.T., Msezane A.Z., Radoevich V., *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 093002/1-4, 2002.

15. Amusia M.Ya., Baltenkov A.S., Chernysheva L.V., Felfli Z., Manson S.T., and Msezane A.Z., *Phys. Rev. A*, **67**(6), 60702-1-4, 2003.
16. Amusia M.Ya., Avdonina N.B., Drukarev E.G., Manson S.T., Pratt R.H. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 22, 4703-6, 2000.
17. Amusia M.Ya., 1981. *Adv.At.Mol.Phys.* **17**, 1-54.
18. Amusia M.Ya., Gorshkov V.G., Drukarev E.G., Kazachkov M.P. 1975. *J.Phys.B* **8**, 1248-1266.
19. Yakhontov V.L., Amusia M.Ya. 1996. *PhysLett. A* **221**, 328-334;
20. Yakhontov V.L., Amusia M.Ya. 1997. *Phys.Rev. A* **55**, 3, 1952-1961.
21. Amusia M.Ya., Gribakin G.F., Ivanov V.K., Chernysheva L.V. 1990. *J.Phys. B* **23**, 385.
22. Gribakin G.F., Gribakina A.A., Gultsev B.V., Ivanov V.K. 1992. *J.Phys. B: At.Mol.Opt.Phys.* **25**, 1757-1772.
23. Balling P., Kristensen P., Stapelfeldt H., Andersen T., Haugen H.K. 1993. *J.Phys.B: At.Mol.Opt. Phys.* **26**, 3531-3539.
24. Kristensen P., Andersen H.H., Balling P., Steele L.D., and Andersen T. 1995. *Phys. Rev. A* **52** (4), 2847-2851.
25. Ipatov A.N., Ivanov V.K., Agap'ev B.D. 1998. In: "Physics of clusters". Eds. Lakhno V.D. and Chuev G.N. World Scientific Publishing. Singapore 1998. p.224-272
26. Ivanov V.K., Krukovskaya L.P. 1994. *J. Phys. B: At.Mol.Opt.Phys.*, **27**, 4111-4122
27. Gibson N.D., Walter C.W., Zatsarinny O., Gorczyca T.W., Akerman G.D., Bozek J.D., Martins M., McLaughlin B.M., Berrah N. 2003. *Phys. Rev. A* **67** (3), 030703 (R) – 1/4.
28. Amusia M.Ya., Ivanov V.K., Kupchenko V.A. 1985. *J. Phys. B: At.Mol.Opt.Phys.* **18** (19), 3871-3879.
29. Ivanov V. K., West J.B. 1993. *J. Phys. B: At.Mol.Opt.Phys.* **26** (14), 2099-2113.
30. Авдонина Н.Б., Амусья М.Я. 1988. *ЖТФ* **60**, 66-72.
31. Amusia M.Ya., Arifov P.U., Baltenkov A.S., Grinberg A.A., Shapiro S.G. 1974. *Phys Lett A*, **47**, 66.
32. Амусья М.Я., Балтенков А.С., Гринберг А.А., Шапиро С.Г. 1975. *ЖЭТФ* **68**, 28.
33. Amusia M.Ya., Baltenkov A.S., Felfli Z., Msezane A.Z. 1999. *Phys.Rev A*. **59**, R2544-47.
34. Amusia M.Ya., Kuchiev M.Yu., Sheinerman S.A., Sheftel S.I. 1977. *J.Phys.B* **10**, L535-39.

35. Amusia M.Ya., Gribakin G.F., Tsemekhman K.L., Tsemekhman V.L., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **23**, 3, p. 393-402, 1990.
36. Амусья М.Я., Танчич А., Черепков Н.А., Чернышева Л.В., Шапиро С.Г. 1975. *ЖЭТФ* **68**, 6, 2023-31.
37. Amusia M.Ya., Cherepков N.A., Chernysheva L.V., Shapiro S.G. 1976. *J.Phys.B* **9**, 17, L531-534.
38. Грибакин Г.Ф., Иванов В.К., Кучиев М.Ю. 1991. В сборнике "Физика электронных и атомных столкновений" №12. Санкт-Петербург, 1991. С. 77-88.
39. Грибакин Г.Ф., Гульцев Б.В., Иванов В.К., Кучиев М.Ю. 1990. *Изв.ВУЗов, Физика* **33**, 86-96.
40. Ivanov V.K. 1999. *J.Phys.B: At.Mol.Opt. Phys.* **32**, 12, R67-R101.
41. Gribakin G.F., Gultsev B.V., Ivanov V.K., Kuchiev M.Yu. 1990. *J.Phys.B: At.Mol.Opt.Phys.* **23**, 4505-4519.
42. Amusia M.Ya., Cherepков N.A., Chernysheva L.V., Shapiro S.G., *J Phys. B* **9**, L531 (1976).
43. Amusia M.Ya., Sheinerman S.A., Sheftel S.I. 1977b. *J.Phys.B* **47**, 7, 1432-1441.
44. Amusia M.Ya., Kuchiev M.Yu., Sheinerman S.A. 1977c. *In: Coherence and Correlations in Atomic Collisions*, Eds. H. Kleinpoppen, J. B. Williams, Plenum Press, New York - London, 297-313.
45. Амусья М.Я., Тормозное Излучение, Энергоатомиздат, Москва, 1990
46. Amusia M.Ya. 1988. *Physics Reports* **162**, 5, 249-335.
47. Amusia M.Ya., Cherepков N.A., Chernysheva L.V., Shapiro S.G. 1974. *Phys.Lett A* **46**, 6, 387.
48. Amusia M.Ya., Cherepков N.A., Kazachkov M.P. 1972. *Phys.Lett.A* **39**, 2, 93.
49. Amusia M.Ya., Zinoviev A.N., Lee I.S. 1977. *Phys.Lett A* **60**, 4, 300-302.
50. Lee I.S., Wehlitz R., Becker U., Amusia M.Ya. 1993. *J.Phys.B: At.Mol. Opt.Phys.* **26**, 41-46.
51. Amusia M.Ya., Lee I.S. 1992. *Physica Scripta* **41**, 23-27.
52. Иванов В.К., Ипатов А.Н., Харченко В.А., Жижин М.Л. 1993. *Письма в ЖЭТФ* **58**, 649-655.
53. Иванов В.К., Ипатов А.Н., Харченко В.А., Жижин М.Л. 1994. *Письма в ЖЭТФ* **60**, 345-351.
54. Иванов В.К., Ипатов А.Н., Харченко В.А. 1996. *ЖЭТФ* **109**, 3, 902-915; *Известия РАН, сер.физ.* **60**, 9, 43-48.

55. Агапьев Б.Д., Иванов В.К., Ипатов А.Н. 1996. *Известия РАН, сер.физ.* **60**, 9, 7-11.
56. Ipatov A.N., Ivanov V.K., Agap'ev B.D., Ekardt W. 1998. *J.Phys.B: At.Mol.Opt. Phys.* **31**, 925-34.
57. Ivanov V.K., Ipatov A.N. 1996. In: "*Correlations in clusters and related systems*".Ed. J.-P. Connerade, World Scientific, Singapore, 1996, p. 141-167.
58. Semenov S.K., Cherepkov N.A. 1998. *Chem. Phys. Lett.* **291**, 375.
59. Cherepkov N.A. 1994. *Phys.Rev. B* **50**, 13813.
60. Amusia M.Ya., Baltenkov A.S., Becker U., 2000. *Phys. Rev. A* **62**, 012701.
61. Amusia M.Ya. , Baltenkov A.S., Dolmatov V.K., Manson S.T., Msezane A.Z., 2004. *Phys. Rev. A*, **70**, 023201-1-5.