УДК 539.22

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-86-95

СИСТЕМЫ ДВУХАТОМНЫХ ПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ В ОДНОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ОПТИЧЕСКИХ И МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК

Доловова О. А.¹, Горбунов М. Е.^{1,2}

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, Российская Федерация*

² *ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ»
123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, стр. 1, Российская
Федерация*

Аннотация

Целью настоящей статьи является обзор современных теоретических и экспериментальных исследований в работах различных авторов в области физики дипольных бозонных и фермионных квантовых ультрахолодных газов.

Процедура и методы. Кратко сопоставлены и проанализированы процедуры и методы исследования двумерного и трёхмерного взаимодействия диполей.

Результаты. Рассмотрено рассеяние полярных молекул в зависимости от параметров их взаимодействия: энергии диполей, их взаимного расположения, влияние внешних полей, параметров короткодействующего взаимодействия.

Теоретическая и/или практическая значимость. Продемонстрирована актуальность разработки теоретического описания планарных систем двухатомных полярных молекул.

Ключевые слова: ультрахолодные полярные газы, оптические ловушки

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00189 А).

SYSTEMS OF DIATOMIC POLAR MOLECULES IN ONE-DIMENSIONAL GEOMETRY OF OPTICAL AND MAGNETO-OPTICAL TRAPS

O. Dolovova¹, M. Gorbunov^{1,2}

¹ *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences
3 Pyzhevsky pereulok, Moscow 119017, Russian Federation*

² *Hydrometcenter of Russia
13 build. 1 Bolshoy Predtechensky pereulok, Moscow 123376, Russian Federation*

Abstract

Aim. The paper reviews modern theoretical and experimental studies by various authors in the field of the physics of dipole bosonic and fermionic quantum ultracold gases.

Methodology. The procedures and methods for studying the two-dimensional and three-dimensional interaction of dipoles are briefly compared and analyzed.

Results. We analyze the scattering of polar molecules depending on the parameters of their interaction: the energies of the dipoles, their mutual arrangement, the influence of external fields, and the parameters of the short-range interaction.

Research implications. The urgency of developing a theoretical description of planar systems of diatomic polar molecules is demonstrated.

Keywords: ultracold polar gases, optical traps

Acknowledgments. This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 20-05-00189 A).

Введение

Основы для исследований захвата и охлаждения атомов и молекул в оптических и магнитных полях были заложены в ряде работ, отмеченных Нобелевскими премиями 1997 г. (Стивен Чу, Клод Коэн-Таннуджи и Уильям Филлипс «За создание методов охлаждения и удержания атомов с помощью лазерного света»), 2012 г. (Серж Арош и Дэвид Уайнленд «За создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими») и 2018 г. (Артур Эшкин «За изобретение оптического пинцета и его применение в биологических системах»). Охлажденные дипольные газы в настоящее время являются важным объектом теоретических [5–11] и экспериментальных [5; 12–15] исследований. В ходе этих исследований были предсказаны, а затем обнаружены экспериментально такие эффекты, как анизотропная сверхтекучесть [16], экзотические самостабилизирующиеся квантовые капли [17; 18] и состояния со свойствами сверхтекучего твёрдого тела [19; 20]. К настоящему времени существуют технологии охлаждения атомов до сверхнизких температур с помощью доплеровского (до мК) и «сизифова» охлаждения (до нК). Атомы удерживаются в оптических ловушках (в узлах стоячей волны лазерного излучения) и в магнито-оптических ловушках, где дополнительно используется неоднородное магнитное поле. Технология охлаждения нейтральных атомов позволила достигнуть состояний Бозе-Эйнштейновской конденсации и двумерного вырожденного ферми-газа. Минимальная температура, достигнутая при помощи лазерного охлаждения и выпаривания в магнитной ловушке, составляет 350 пК [21].

Перспективы использования систем двухатомных полярных молекул

Использование дипольного взаимодействия открывает ряд интересных возможностей [18; 19]. Его анизотропные свойства приводят к проявлениям квантового хаоса в ультрахолодном дипольном рассеянии [20–22]. В экспериментах величиной дипольного момента можно управлять с помощью внешних полей [18; 23; 24]. Охлажденные дипольные газы являются удобным объектом для исследований. В газах можно достичь низкого содержания примесей, охлаждать их до температур порядка нК, контролировать плотность и количество частиц.

Существуют конфигурации оптических ловушек, уменьшающие количество пространственных степеней свободы до двух или одной. Это позволяет решить проблему неустойчивости трёхмерных дипольных газов из-за притяжения «голова к хвосту».

В системах с дипольным взаимодействием, помещённых в ловушки, понижающие число степеней свободы, возможно получение новых квантовых фаз [25; 26]. Примерами являются Бозе-Эйнштейновский конденсат (БЭК) атомов ^{52}Cr [27] и самостабилизирующиеся квантовые капли в холодном дипольном Бозе-газе ^{164}Dy в одномерной оптической решётке [13], считавшиеся неустойчивыми из-за притягивающего взаимодействия. Достигнут значительный прогресс в получении холодных газов полярных молекул [28; 29] и магнитных атомов [13; 14]. Это делает оптические и магнитооптические ловушки с планарной геометрией наиболее перспективным кандидатом для стабилизации и удержания дипольных газов.

Взаимодействие между магнитными дипольными моментами атомов слабее, чем между электрическими дипольными моментами полярных молекул. Это позволяет в большинстве случаев ограничиться рассмотрением электрических дипольных моментов.

Малые размеры ячеек оптических ловушек и низкие температуры приводят к тому, что описание дипольных газов возможно лишь с привлечением квантовой динамики. Для описания двухчастичного рассеяния идентичных полярных молекул необходим учёт бозонной или фермионной статистики. Аналитические оценки для описания столкновений холодных атомов, использующие потенциалы нулевого радиуса, неприменимы для описания дипольного взаимодействия [7]. Задача разработки квантовых теоретических моделей дипольных газов остаётся актуальной. Поскольку большинство модельных уравнений не имеют аналитических решений, необходимо развитие численных методов [28; 29].

В настоящее время активно развиваются квантовые вычисления, и особую актуальность приобретает создание масштабируемого квантового компьютера. Одним из возможных решений является использование в качестве кубитов ультрахолодных атомов и полярных молекул, удерживаемых в планарных оптических решётках [30–32].

Для использования нецентральной дипольной дипольного взаимодействия в одномерных/двумерных геометриях угол наклона диполей по отношению оси или плоскости их движения регулируется внешним полем. При увеличении углов наклона для рассеяния диполей [33; 34] в сечениях рассеяния появляются резонансы, что в реальных условиях соответствует потерям частиц из оптических ловушек. Для создания малочастичной системы с временем жизни, достаточным для организации квантовых вычислений, необходимы теоретические оценки по определению условий стабильности динамических дипольных систем.

Дальнейшее диполь-дипольное взаимодействие позволяет добиться большей масштабируемости по сравнению с взаимодействием нейтральных атомов [31; 32; 35]. Практическая реализуемость таких кубитов рассматривается в [35].

Проведение экспериментов требует дальнейшего анализа влияния короткодействующего взаимодействия на дипольное рассеяние в плоскости [28; 33]. С

экспериментальной точки зрения контроль короткодействующей части взаимодействия диполей возможен с помощью внешних полей и резонансов Фешбаха [36; 7]. Имеется ряд принципиальных отличий свойств дипольного рассеяния в плоскости от свойств трёхмерного рассеяния, например, расходимость s – волны в низкоэнергетическом пределе и существование слабосвязанного состояния для любого притягивающего потенциала [37].

Зависимости резонансов сечения рассеяния от радиуса короткодействующего взаимодействия для трёхмерного случая [38], неприменимы в двумерном случае [33; 34]. *Оценка влияния короткодействующего взаимодействия на процессы дипольного рассеяния в плоскости при различных ориентациях дипольных моментов является нерешённой, а потому актуальной задачей теоретической физики.*

В ряде работ рассматривалось рассеяние *сонаправленных* диполей [7; 33; 38–41], однако в [42] проведён анализ рассеяния *произвольно направленных* диполей в плоскости. Экспериментальное исследование рассеяния в случае произвольной ориентации возможно с использованием столкновения дипольных Бозе-Эйнштейновских конденсатов, полученных с помощью различно направленных внешних электрических полей [43] или столкновения медленных полярных молекул, приготовленных в «криофуге» [44]. В [42] обнаружена сильная угловая зависимость дифференциальных сечений в резонансных и нерезонансных точках при рассеянии ферми- и бозе- дипольных газов в плоскости.

Заключение

Сопоставлены и проанализированы процедуры и методы исследования двумерного и трёхмерного взаимодействия диполей. Разработка теоретического описания планарных систем двухатомных полярных молекул важна, в частности, для прикладной задачи создания кубитов на их основе.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bohn J. L., Rey A. M., Ye J. Cold molecules: Progress in quantum engineering of chemistry and quantum matter // Science. 2017. Vol. 357. No. 6355. P. 1002–1010. DOI: 10.1126/science.aam6299.
2. Cold polar molecules in two-dimensional traps: Tailoring interactions with external fields for novel quantum phases / Micheli A., Pupillo G. Büchler H. P., Zoller P. // Physical Review A. 2007. Vol. 76. Iss. 4. P. 043604. DOI: 10.1103/PhysRevA.76.043604.
3. Baranov M. A. Theoretical progress in many-body physics with ultracold dipolar gases // Physics Reports. 2008. Vol. 464. Iss. 3. P. 71–111. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.04.007.
4. Bloch I., Dalibard J., Zwerger W. Many-body physics with ultracold gases // Reviews of Modern Physics. 2008. Vol. 80. Iss. 3. P. 885–964. DOI: 10.1103/RevModPhys.80.885
5. Micheli A., Brennen G. K., Zoller P. A toolbox for lattice-spin models with polar molecules // Nature Physics. 2006. Vol. 2. Iss. 5. P. 341–347. DOI: 10.1038/nphys287.
6. Condensed matter theory of dipolar quantum gases / Baranov M. A., Dalmonte M., Pupillo G., Zoller P. // Chemical Reviews. 2012. Vol. 112. No. 9. P. 5012–5061. DOI: 10.1021/cr2003568.

7. The physics of dipolar bosonic quantum gases / Lahaye T., Menotti C., Santos L., Lewenstein M., Pfau T. // *Reports on Progress in Physics*. 2009. Vol. 72. No. 12. P. 126401. DOI: 10.1088/0034-4885/72/12/126401.
8. Controlling the quantum stereodynamics of ultracold bimolecular reactions / De Miranda M. H. G., Chotia A., Neyenhuis B., Wang D., Quémener G., Ospelkaus S., Bohn J. L., Ye J., Jin D. S. // *Nature Physics*. 2011. Vol. 7. Iss. 6. P. 502–507. DOI: 10.1038/nphys1939.
9. Collisions of ultracold $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$ molecules with controlled chemical reactivities / Ye X., Guo M., González-Martínez M. L., Quémener G., Wang D. // *Science advances*. 2018. Vol. 4. No. 1. P. eaq0083. DOI: 10.1126/sciadv.aaq0083.
10. Górecki W., Rzażewski K. Electric dipoles vs. magnetic dipoles – For two molecules in a harmonic trap // *EPL (Europhysics Letters)*. 2017. Vol. 118. No. 6. P. 66002. DOI: 10.1209/0295-5075/118/66002.
11. Reaching Fermi degeneracy via universal dipolar scattering / Aikawa K., Frisch A., Mark M., Baier S., Grimm R., Ferlaino F. // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112. Iss. 1. P. 010404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.010404.
12. Anisotropic superfluid behavior of a dipolar Bose–Einstein condensate / Wenzel M., Böttcher F., Schmidt J.-N., Eisenmann M., Langen T., Pfau T., Ferrier-Barbut I. // *Physical Review Letters*. 2018. Vol. 121. Iss. 3. P. 030401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.030401.
13. Observation of Quantum Droplets in a Strongly Dipolar Bose Gas / Ferrier-Barbut I., Kadau H., Schmitt M., Wenzel M., Pfau T. // *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 116. Iss. 21. P. 215301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.215301.
14. Self-bound droplets of a dilute magnetic quantum liquid / Schmitt M., Wenzel M., Böttcher F., Ferrier-Barbut I., Pfau T. // *Nature*. 2016. Vol. 539. No. 7628. P. 259–262. DOI: 10.1038/nature20126.
15. Long-lived and transient supersolid behaviors in dipolar quantum gases / Chomaz L., Petter D., Ilzhöfer P., Natale G., Trautmann A., Politi C., Durastante G., et al. // *Physical Review X*. 2019. Vol. 9. Iss. 2. P. 021012. DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021012.
16. Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties / Tanzi L., Lucioni E., Famà F., Catani J., Fioretti A., Gabbanini C., Bisset R. N., Santos L., Modugno G. // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 122. Iss. 13. P. 130405. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.130405.
17. Spin gradient demagnetization cooling of ultracold atoms / Medley P., Weld D. M., Miyake H., Pritchard D. E., Ketterle W. // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106. Iss. 19. P. 195301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.195301.
18. Strongly correlated 2D quantum phases with cold polar molecules: controlling the shape of the interaction potential / Büchler H. P., Demler E., Lukin M., Micheli A., Prokof'ev N., Pupillo G., Zoller P. // *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 98. Iss. 6. P. 060404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.060404.
19. New frontiers for quantum gases of polar molecules / Moses S. A., Covey J. P., Miecnikowski M. T., Jin D. S., Ye J. // *Nature Physics*. 2017. Vol. 13. Iss. 1. P. 13–20. DOI: 10.1038/nphys3985.
20. Quantum chaos in ultracold collisions of gas-phase erbium atoms / Frisch A., Mark M., Aikawa K., Ferlaino F., Bohn J. L., Makrides C., Petrov A., Kotochigova S. // *Nature*. 2014. Vol. 507. No. 7493. P. 475–479. DOI: 10.1038/nature13137.
21. Emergence of chaotic scattering in ultracold Er and Dy / Maier T., Kadau H., Schmitt M., Wenzel M., Ferrier-B. I., Pfau T., Frisch A., Baier S., et al. // *Physical Review X*. 2015. Vol. 5. Iss. 4. P. 041029. DOI: 10.1103/PhysRevX.5.041029.
22. Yang B. C., Pérez-Ríos J., Robicheaux F. Classical fractals and quantum chaos in ultracold dipolar collisions // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 118. Iss. 15. P. 154101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.154101.

23. Giovanazzi S., Görlitz A., Pfau T. Tuning the dipolar interaction in quantum gases // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 89. Iss. 13. P. 130401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.130401.
24. Tuning the dipole-dipole interaction in a quantum gas with a rotating magnetic field / Tang Y., Kao W., Li K.-Yu., Lev B. L. // *Physical Review Letters*. 2018. Vol. 120. Iss. 23. P. 230401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.230401.
25. Interlayer superfluidity in bilayer systems of fermionic polar molecules / Pikovski A., Klawunn M., Shlyapnikov G. V., Santos L. // *Physical Review Letters*. 2010. Vol. 105. Iss. 21. P. 215302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.215302.
26. Clustered Wigner-crystal phases of cold polar molecules in arrays of one-dimensional tubes / Knap M., Berg E., Ganahl M., Demler E. // *Physical Review B*. 2012. Vol. 86. Iss. 6. P. 064501. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.064501.
27. Observation of dipole-dipole interaction in a degenerate quantum gas / Stuhler J., Griesmaier A., Koch T., Fattori M., Pfau T., Giovanazzi S., Pedri P., Santos L. // *Physical Review Letters*. 2005. Vol. 95. Iss. 15. P. 150406. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.150406.
28. Dipolar collisions of ultracold ground-state bosonic molecules / Guo M., Ye X., He J., González-Martínez M. L., Vexiau R., Quémener G., Wang D. // *Physical Review X*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. P. 041044. DOI: 10.1103/PhysRevX.8.041044.
29. Creation of an Ultracold Gas of Ground-State Dipolar $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$ Molecules / Guo M., Zhu B., Lu B., Ye X., Wang F., Vexiau R., Bouloufa-Maafa N., et al. // *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 116. Iss. 20. P. 205303. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.205303.
30. Quantum logic gates in optical lattices / Brennen G. K., Caves C. M., Jessen P. S., Deutsch I. H. // *Physical Review Letters*. 1999. Vol. 82. Iss. 5. P. 1060. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.1060.
31. DeMille D. Quantum computation with trapped polar molecules // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 88. Iss. 6. P. 067901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.067901.
32. Ni K.-K., Rosenband T., Grimes D. D. Dipolar exchange quantum logic gate with polar molecules // *Chemical science*. 2018. Vol. 9. Iss. 33. P. 6830–6838. DOI: 10.1039/C8SC02355G.
33. Ticknor C. Two-dimensional dipolar scattering with a tilt // *Physical Review A*. 2011. Vol. 84. Iss. 3. P. 032702. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.032702.
34. Koval E. A., Koval O. A., Melezhik V. S. Anisotropic quantum scattering in two dimensions // *Physical Review A*. 2014. Vol. 89. Iss. 5. P. 052710. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.052710.
35. Hudson E. R., Campbell W. C. Dipolar quantum logic for freely rotating trapped molecular ions // *Physical Review A*. 2018. Vol. 98. Iss. 4. P. 040302(R). DOI: 10.1103/PhysRevA.98.040302.
36. Stabilization of a purely dipolar quantum gas against collapse / Koch T., Lahaye T., Metz J., Frohlich B., Griesmaier A., Pfau T. // *Nature physics*. 2008. Vol. 4. Iss. 3. P. 218–222. DOI: 10.1038/nphys887.
37. Simon B. The bound state of weakly coupled Schrodinger operators in one and two dimensions // *Annals of Physics*. 1976. Vol. 97. Iss. 2. P. 279–288. DOI: 10.1016/0003-4916(76)90038-5.
38. Roudnev V., Cavagnero M. Resonance phenomena in ultracold dipole-dipole scattering // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2009. Vol. 42. No. 4. P. 044017. DOI: 10.1088/0953-4075/42/4/044017.
39. Dipolar Bose-Einstein condensates with dipole-dependent scattering length / Ronen S., Bortolotti D. C., Blume D., Bohn J. L. // *Physical Review A*. 2006. Vol. 74. Iss. 3. P. 033611. DOI: 10.1103/PhysRevA.74.033611.
40. Kanjilal K., Blume D. Coupled-channel pseudopotential description of the Feshbach resonance in two dimensions // *Physical Review A*. 2006. Vol. 73. Iss. 6. P. 060701(R). DOI: 10.1103/PhysRevA.73.060701.

41. Resonant control of polar molecules in individual sites of an optical lattice / Hanna T. M., Tiesinga E., Mitchell W. F., Julienne P. S. // *Physical Review A*. 2012. Vol. 85. Iss. 2. P. 022703. DOI: 10.1103/PhysRevA.85.022703.
42. Koval E. A., Koval O. A. Aspects of arbitrarily oriented dipoles scattering in a plane: Short-range interaction influence // *Physical Review A*. 2020. Vol. 102. Iss. 4. P. 042815. DOI: 10.1103/PhysRevA.102.042815.
43. Anisotropic collisions of dipolar Bose-Einstein condensates in the universal regime / Burdick N. Q., Sykes A. G., Tang Y., Lev B. L. // *New Journal of Physics*. 2016. Vol. 18. No. 11. P. 113004. DOI: 10.1088/1367-2630/18/11/113004.
44. A cryofuge for cold-collision experiments with slow polar molecules / Wu X., Gantner T., Koller M., Zeppenfeld M., Chervakov S., Rempe G. // *Science*. 2017. Vol. 358. Iss. 6363. P. 645–648. DOI: 10.1126/science.aan3029.

REFERENCES

1. Bohn J. L., Rey A. M., Ye J. Cold molecules: Progress in quantum engineering of chemistry and quantum matter. In: *Science*, 2017, vol. 357, no. 6355, pp. 1002–1010. DOI: 10.1126/science.aam6299.
2. Micheli A., Pupillo G., Büchler H. P., Zoller P. Cold polar molecules in two-dimensional traps: Tailoring interactions with external fields for novel quantum phases. In: *Physical Review A*, 2007, vol. 76, iss. 4, pp. 043604. DOI: 10.1103/PhysRevA.76.043604.
3. Baranov M. A. Theoretical progress in many-body physics with ultracold dipolar gases. In: *Physics Reports*, 2008, vol. 464, iss. 3, pp. 71–111. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.04.007.
4. Bloch I., Dalibard J., Zwerger W. Many-body physics with ultracold gases. In: *Reviews of Modern Physics*, 2008, vol. 80, iss. 3, pp. 885–964. DOI: 10.1103/RevModPhys.80.885
5. Micheli A., Brennen G. K., Zoller P. A toolbox for lattice-spin models with polar molecules. In: *Nature Physics*, 2006, vol. 2, iss. 5, pp. 341–347. DOI: 10.1038/nphys287.
6. Baranov M. A., Dalmonte M., Pupillo G., Zoller P. Condensed matter theory of dipolar quantum gases. In: *Chemical Reviews*, 2012, vol. 112, no. 9, pp. 5012–5061. DOI: 10.1021/cr2003568.
7. Lahaye T., Menotti C., Santos L., Lewenstein M., Pfau T. The physics of dipolar bosonic quantum gases. In: *Reports on Progress in Physics*, 2009, vol. 72, no. 12, pp. 126401. DOI: 10.1088/0034-4885/72/12/126401.
8. De Miranda M. H. G., Chotia A., Neyenhuis B., Wang D., Quémener G., Ospelkaus S., Bohn J. L., Ye J., Jin D. S. Controlling the quantum stereodynamics of ultracold bimolecular reactions. In: *Nature Physics*, 2011, vol. 7, iss. 6, pp. 502–507. DOI: 10.1038/nphys1939.
9. Ye X., Guo M., González-Martínez M. L., Quémener G., Wang D. Collisions of ultracold $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$ molecules with controlled chemical reactivities. In: *Science advances*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. eaaq0083. DOI: 10.1126/sciadv.aaq0083.
10. Górecki W., Rzążewski K. Electric dipoles vs. magnetic dipoles – For two molecules in a harmonic trap. In: *EPL (Europhysics Letters)*, 2017, vol. 118, no. 6, pp. 66002. DOI: 10.1209/0295-5075/118/66002.
11. Aikawa K., Frisch A., Mark M., Baier S., Grimm R., Ferlaino F. Reaching Fermi degeneracy via universal dipolar scattering. In: *Physical Review Letters*, 2014, vol. 112, iss. 1, pp. 010404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.010404.
12. Wenzel M., Böttcher F., Schmidt J.-N., Eisenmann M., Langen T., Pfau T., Ferrier-Barbut I. Anisotropic superfluid behavior of a dipolar Bose–Einstein condensate. In: *Physical Review Letters*, 2018, vol. 121, iss. 3, pp. 030401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.030401.

13. Ferrier-Barbut I., Kadau H., Schmitt M., Wenzel M., Pfau T. Observation of Quantum Droplets in a Strongly Dipolar Bose Gas. In: *Physical Review Letters*, 2016, vol. 116, iss. 21, pp. 215301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.215301.
14. Schmitt M., Wenzel M., Böttcher F., Ferrier-Barbut I., Pfau T. Self-bound droplets of a dilute magnetic quantum liquid. In: *Nature*, 2016, vol. 539, no. 7628, pp. 259–262. DOI: 10.1038/nature20126.
15. Chomaz L., Petter D., Ilzhöfer P., Natale G., Trautmann A., Politi C., Durastante G., et al. Long-lived and transient supersolid behaviors in dipolar quantum gases. In: *Physical Review X*, 2019, vol. 9, iss. 2, pp. 021012. DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021012.
16. Tanzi L., Lucioni E., Famà F., Catani J., Fioretti A., Gabbanini C., Bisset R. N., Santos L., Modugno G. Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties. In: *Physical Review Letters*, 2019, vol. 122, iss. 13, pp. 130405. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.130405.
17. Medley P., Weld D. M., Miyake H., Pritchard D. E., Ketterle W. Spin gradient demagnetization cooling of ultracold atoms. In: *Physical Review Letters*, 2011, vol. 106, iss. 19, pp. 195301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.195301.
18. Büchler H. P., Demler E., Lukin M., Micheli A., Prokof'ev N., Pupillo G., Zoller P. Strongly correlated 2D quantum phases with cold polar molecules: controlling the shape of the interaction potential. In: *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, iss. 6, pp. 060404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.060404.
19. Moses S. A., Covey J. P., Miecnikowski M. T., Jin D. S., Ye J. New frontiers for quantum gases of polar molecules. In: *Nature Physics*, 2017, vol. 13, iss. 1, pp. 13–20. DOI: 10.1038/nphys3985.
20. Frisch A., Mark M., Aikawa K., Ferlaino F., Bohn J. L., Makrides C., Petrov A., Kotochigova S. In: *Quantum chaos in ultracold collisions of gas-phase erbium atoms Nature*, 2014, vol. 507, no. 7493, pp. 475–479. DOI: 10.1038/nature13137.
21. Maier T., Kadau H., Schmitt M., Wenzel M., Ferrier-B. I., Pfau T., Frisch A., Baier S., et al. Emergence of chaotic scattering in ultracold Er and Dy. In: *Physical Review X*, 2015, vol. 5, iss. 4, pp. 041029. DOI: 10.1103/PhysRevX.5.041029.
22. Yang B. C., Pérez-Ríos J., Robicheaux F. Classical fractals and quantum chaos in ultracold dipolar collisions. In: *Physical Review Letters*, 2017, vol. 118, iss. 15, pp. 154101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.154101.
23. Giovanazzi S., Görlitz A., Pfau T. Tuning the dipolar interaction in quantum gases. In: *Physical Review Letters*, 2002, vol. 89, iss. 13, pp. 130401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.130401.
24. Tang Y., Kao W., Li K.-Yu., Lev B. L. Tuning the dipole-dipole interaction in a quantum gas with a rotating magnetic field. In: *Physical Review Letters*, 2018, vol. 120, iss. 23, pp. 230401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.230401.
25. Pikovski A., Klawunn M., Shlyapnikov G. V., Santos L. Interlayer superfluidity in bilayer systems of fermionic polar molecules. In: *Physical Review Letters*, 2010, vol. 105, iss. 21, pp. 215302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.215302.
26. Knap M., Berg E., Ganahl M., Demler E. Clustered Wigner-crystal phases of cold polar molecules in arrays of one-dimensional tubes. In: *Physical Review B*, 2012, vol. 86, iss. 6, pp. 064501. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.064501.
27. Stuhler J., Griesmaier A., Koch T., Fattori M., Pfau T., Giovanazzi S., Pedri P., Santos L. Observation of dipole-dipole interaction in a degenerate quantum gas. In: *Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, iss. 15, pp. 150406. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.150406.

28. Guo M., Ye X., He J., González-Martínez M. L., Vexiau R., Quémener G., Wang D. Dipolar collisions of ultracold ground-state bosonic molecules. In: *Physical Review X*, 2018, vol. 8, iss. 4, pp. 041044. DOI: 10.1103/PhysRevX.8.041044.
29. Guo M., Zhu B., Lu B., Ye X., Wang F., Vexiau R., Bouloufa-Maafa N., et al. Creation of an Ultracold Gas of Ground-State Dipolar $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$ Molecules. In: *Physical Review Letters*, 2016, vol. 116, iss. 20, pp. 205303. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.205303.
30. Brennen G. K., Caves C. M., Jessen P. S., Deutsch I. H. Quantum logic gates in optical lattices. In: *Physical Review Letters*, 1999, vol. 82, iss. 5, pp. 1060. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.1060.
31. DeMille D. Quantum computation with trapped polar molecules. In: *Physical Review Letters*, 2002, vol. 88, iss. 6, pp. 067901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.067901.
32. Ni K.-K., Rosenband T., Grimes D. D. Dipolar exchange quantum logic gate with polar molecules. In: *Chemical science*, 2018, vol. 9, iss. 33, pp. 6830–6838. DOI: 10.1039/C8SC02355G.
33. Ticknor C. Two-dimensional dipolar scattering with a tilt. In: *Physical Review A*, 2011, vol. 84, iss. 3, pp. 032702. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.032702.
34. Koval E. A., Koval O. A., Melezhik V. S. Anisotropic quantum scattering in two dimensions. In: *Physical Review A*, 2014, vol. 89, iss. 5, pp. 052710. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.052710.
35. Hudson E. R., Campbell W. C. Dipolar quantum logic for freely rotating trapped molecular ions. In: *Physical Review A*, 2018, vol. 98, iss. 4, pp. 040302(R). DOI: 10.1103/PhysRevA.98.040302.
36. Koch T., Lahaye T., Metz J., Frohlich B., Griesmaier A., Pfau T. Stabilization of a purely dipolar quantum gas against collapse. In: *Nature physics*, 2008, vol. 4, iss. 3, pp. 218–222. DOI: 10.1038/nphys887.
37. Simon B. The bound state of weakly coupled Schrodinger operators in one and two dimensions. In: *Annals of Physics*, 1976, vol. 97, iss. 2, pp. 279–288. DOI: 10.1016/0003-4916(76)90038-5.
38. Roudnev V., Cavagnero M. Resonance phenomena in ultracold dipole-dipole scattering. In: *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2009, vol. 42, no. 4, p. 044017. DOI: 10.1088/0953-4075/42/4/044017.
39. Ronen S., Bortolotti D. C., Blume D., Bohn J. L. Dipolar Bose-Einstein condensates with dipole-dependent scattering length. In: *Physical Review A*, 2006, vol. 74, iss. 3, pp. 033611. DOI: 10.1103/PhysRevA.74.033611.
40. Kanjilal K., Blume D. Coupled-channel pseudopotential description of the Feshbach resonance in two dimensions. In: *Physical Review A*, 2006, vol. 73, iss. 6, pp. 060701(R). DOI: 10.1103/PhysRevA.73.060701.
41. Hanna T. M., Tiesinga E., Mitchell W. F., Julienne P. S. Resonant control of polar molecules in individual sites of an optical lattice. In: *Physical Review A*, 2012, vol. 85, iss. 2, pp. 022703. DOI: 10.1103/PhysRevA.85.022703.
42. Koval E. A., Koval O. A. Aspects of arbitrarily oriented dipoles scattering in a plane: Short-range interaction influence. In: *Physical Review A*, 2020, vol. 102, iss. 4, pp. 042815. DOI: 10.1103/PhysRevA.102.042815.
43. Burdick N. Q., Sykes A. G., Tang Y., Lev B. L. Anisotropic collisions of dipolar Bose-Einstein condensates in the universal regime. In: *New Journal of Physics*, 2016, vol. 18, no. 11, pp. 113004. DOI: 10.1088/1367-2630/18/11/113004.
44. Wu X., Gantner T., Koller M., Zeppenfeld M., Chervenkov S., Rempe G. A cryofuge for cold-collision experiments with slow polar molecules. In: *Science*, 2017, vol. 358, iss. 6363, pp. 645–648. DOI: 10.1126/science.aan3029.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доловова Оксана Александровна – младший научный сотрудник лаборатории турбулентности и распространения волн Института физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук;
e-mail: kov.oksana20@gmail.com;

Горбунов Михаил Евгеньевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией турбулентности и распространения Института физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; ведущий научный сотрудник Гидрометцентра России;
e-mail: gorbunov@ifaran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana A. Dolovova – Junior Researcher, Laboratory of Turbulence and Wave Propagation, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences;
e-mail: kov.oksana20@gmail.com;

Michael E. Gorbunov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of Turbulence and Wave Propagation, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences; Leading Researcher, Hydrometcenter of Russia;
e-mail: gorbunov@ifaran.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Доловова О. А., Горбунов М. Е. Системы двухатомных полярных молекул в одномерной геометрии оптических и магнито-оптических ловушках // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2021. №4. С. 86–95.
DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-86-95

FOR CITATION

Dolovova O. A., Gorbunov M. E. Systems of diatomic polar molecules in one-dimensional geometry of optical and magneto-optical traps. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2021. no. 4, pp. 86–95.
DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-86-95