

точно большой по сравнению с дисперсией фононов по всей зоне Бриллюэна. По этой причине в плотности оптических фононов возникает квазицель, в которую попадают колебания атомов примеси. В зависимости от параметров квазицели (ёё ширины и глубины) колебания атомов примеси в ней следует рассматривать как квазилокальные или как квазирезонансные. В области квазицели действительная часть диэлектрической проницаемости кристаллов отрицательна — продольно-поперечное расщепление квазилокальных или квазицелевых колебаний атомов примесей оказывается инвертированным, т.е. продольные колебания примесных атомов имеют меньшую частоту, чем поперечные.

Следует также отметить, что ИК-спектры отражения всегда получают от поверхности кристалла и приповерхностный слой, как правило, содержит довольно много дефектов упаковки, таких как ваканции, изменённые межатомные расстояния, и другие дефекты, связанные с загрязнением поверхности кристалла адсорбированными атомами и молекулами. Как видно из рис. 3, колебания вакансий могут попадать в область квазицели в плотности оптических фононов и давать обсуждаемую здесь особенность в спектре отражения.

Список литературы

1. Giugno P et al. *Phys. Rev. B* **54** 16934 (1996)
2. Gasser C et al. *Appl. Phys. Lett.* **72** 972 (1998)
3. Sorokin E, Naumov S, Sorokina I T *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **11** 690 (2005)
4. Sorokina I T et al. *OSA Trends in Optics Photonics* **98** 263 (2005)
5. Genzel L, Martin T P, Perry C H *Phys. Status Solidi B* **62** 83 (1974)
6. Hayes W, Loudon R *Scattering of Light by Crystals* (New York: Wiley, 1978)
7. Kellermann E W *Philos. Tans. R. Soc. London A* **238** 513 (1940)
8. Balkanski M, in *Proc. Intern. Conf. on II-VI Semiconducting Compounds* (Rhode Islands: Flammarion, 1963) p. 1007
9. Szegedi B *Trans. Faraday Soc.* **45** 155 (1949)
10. Водопьянов Л К, Виноградов Е А, Виноградов В С *ФТТ* **16** 849 (1974) [Vodop'yanov L K, Vinogradov E A, Vinogradov V S *Sov. Phys. Solid State* **16** 545 (1974)]
11. Vodopyanov L K, Vinogradov E A *Cryst. Lattice Defects* **5** 125 (1974)
12. Митягин Ю А, Водопьянов Л К, Виноградов Е А *ФТТ* **17** 2054 (1975) [Mityagin Yu A, Vodop'yanov L K, Vinogradov E A *Sov. Phys. Solid State* **17** 1341 (1975)]
13. Виноградов Е А, Митягин Ю А *ФТТ* **20** 3162 (1978) [Vinogradov E A, Mityagin Yu A *Sov. Phys. Solid State* **20** 1825 (1978)]
14. Виноградов Е А, Маврин Б Н, Водопьянов Л К *ЖЭТФ* **126** 866 (2004) [Vinogradov E A, Mavrin B N, Vodop'yanov L K *JETP* **99** 749 (2004)]
15. Vodopyanov L K et al. *Phys. Status Solidi C* **1** 3162 (2004)
16. Виноградов Е А, Маврин Б Н, Новикова Н Н, Яковлев В А *ФТТ* **48** 1826 (2006) [Vinogradov E A, Mavrin B N, Novikova N N, Yakovlev V A *Phys. Solid State* **48** 1940 (2006)]
17. Vinogradov E A et al. *Laser Phys.* **19** (2) 162 (2009)
18. Jahne E *Phys. Status Solidi B* **74** 275 (1976); **75** 221 (1976)
19. Born M, Huang Kun *Dynamical Theory of Crystal Lattices* (Oxford: Clarendon Press, 1954) [Борн М, Хуан Кунь *Динамическая теория кристаллических решеток* (М.: ИЛ, 1958)]
20. Виноградов Е А, Хаммадов И И *Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов* (Ташкент: ФАН, 1989)
21. Белусов М В *ФТТ* **15** 1206 (1973) [Belousov M V *Sov. Phys. Solid State* **15** 813 (1973)]
22. Виноградов В С *ФТТ* **11** 2062 (1969) [Vinogradov V S *Sov. Phys. Solid State* **11** 1666 (1969)]
23. Bilz H, Kress W *Phonon Dispersion Relations in Insulators* (Berlin: Springer-Verlag, 1979)
24. Виноградов Е А, Автореф. дисс... канд. физ.-мат. наук (Долгопрудный: МФТИ, 1973)
25. Peterson D L et al. *Phys. Rev. B* **33** 1160 (1986)

PACS numbers: 05.30.Jp, 33.20.-t, 36.40.-c, 67.25.dw

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903m.0317

Спектроскопия малых гелиевых кластеров и "наноскопическая" сверхтекучесть: He_N-CO , $N = 2-20...$

Б.С. Думеш, А.В. Потапов, Л.А. Сурина

1. Введение

Изучение кластеров привлекает большое внимание исследователей, так как позволяет навести мосты между квантовым микромиром и термодинамическим макромиром. В последние годы значительно продвинулось изучение малых кластеров, состоящих из нескольких атомов или молекул, объединённых ван-дер-ваальсовой связью. Такие кластеры сравнительно легко создаются при расширении сверхзвуковой газовой струи в вакуум. Существенно, что их спектроскопические исследования можно проводить в области сильного расширения струи, где столкновения весьма редки и ширина спектральных линий приближается к доплеровскому пределу. Следовательно, линии разных кластеров легко разрешаются, и можно проследить зависимость различных физических свойств кластеров от их размера или состава.

Активно развиваются спектроскопические исследования малых гелиевых кластеров с внедрённой молекулой хромофором. Непосредственно измеряются спектры, как чисто вращательные, так и колебательно-вращательные, в области какого-либо основного колебания хромофора, и по ним определяются эффективный момент инерции и сдвиг частоты колебания внедрённой молекулы, обусловленный её взаимодействием с окружающим гелием. К настоящему времени изучены системы $\text{He}-X$, где X — молекула OCS [1], CO_2 [2], N_2O [3, 4], CO [5–7], HC_3N [8], а N плавно изменяется от 2 до ≈ 70 . Эти кластеры образуются при конечной температуре гелиевой струи 0,3–0,1 К. Так как энергия связи всех указанных молекул-хромофоров с гелием достаточно мала, образующиеся кластеры являются скорее жидкими, чем твёрдыми, и для всех них наблюдается немонотонная зависимость эффективного момента инерции от числа присоединённых атомов гелия. Это означает, что при числе атомов гелия N , большем некоторого значения, начинается проскальзывание при вращении хромофора с частично присоединёнными к нему атомами гелия относительно остального гелиевого окружения. Такое движение существенно бездиссипативно, поскольку дополнительное уширение спектральных линий отсутствует, а их ширина соответствует тому, что молекула совершает 10^5 оборотов без наблюдаемых признаков диссипации. Это явление сильно напоминает сверхтекучесть, что и обуславливает интерес к данным исследованиям. Обзор ранних экспериментов опубликован в УФН [9].

С другой стороны, в последние годы проведён большой цикл спектральных измерений молекул-хромофоров в гелиевых дроплетах [10, 11] (нанокаплях, содержащих более тысячи атомов гелия при температуре $\approx 0,35$ К). В этих условиях ^4He заведомо находится в сверхтекучем состоянии и полученные результаты дают предельные значения спектроскопических параметров

при росте кластеров. Наиболее яркий результат, отличающий сверхтекущий гелий от других жидкостей, — хорошо разрешённая вращательная структура в спектрах внедрённых молекул. Как правило, измеряемый момент инерции возрастает в несколько раз по отношению к моменту инерции в газовой фазе. Это означает, что при вращении молекула "обрастает" значительной гелиевой "шубой".

Исключение составляют лёгкие молекулы HCN и CO, у которых момент инерции увеличивается всего на 20 %, а эффективный размер "шубы" меньше одного атома гелия. Существенно, что в дроплетах из ^3He с температурой $\approx 0,15$ К линии колебаний внедрённых молекул достаточно широкие и вращательная структура полностью "замыта". В экспериментах с гелиевыми дроплетами из смеси ^3He с ^4He также установлен термодинамический предел наступления сверхтекучести, а именно оценено минимальное число атомов ^4He — $N_{\min} \approx 60$, необходимое для расслоения изотопического раствора [12].

Свойства малых кластеров, естественно, зависят от параметров взаимодействия между гелием и молекулой-хромофором, и чем ближе их энергия связи к химическому потенциалу жидкого гелия (7,5 К), тем меньше возмущение гелиевого окружения, вызываемое молекулой. Уникальной с этой точки зрения является молекула CO с энергией связи с гелием 9 К — уже в бинарном комплексе He–CO молекула CO вращается почти свободно [13, 14]. В настоящее время $\text{He}_N\text{—CO}$ — единственная система, в которой наблюдаются два типа вращения молекулы: почти свободное и вместе с окружающим гелием. Наличие двух типов вращения, помимо того, что оно само по себе представляет интерес, позволяет получить дополнительную информацию о свойствах кластеров.

Исследование кластеров He–CO важно и для решения проблемы водородной сверхтекучести. В 1972 г. В.Л. Гинзбург и А.А. Собянин показали, что жидкий параводород мог бы перейти в сверхтекущее состояние при $T \approx 6$ К, если бы не замерзал при $T \approx 13,6$ К [15]. После этого начались поиски метастабильных состояний жидкого параводорода с достаточно низкими температурами замерзания. В малых кластерах температура замерзания сильно понижается, и эксперименты показали, что образованные в сверхзвуковой газовой струе водородные кластеры с числом молекул водорода $N < 50$ являются скорее жидкими, чем твёрдыми [16]. В кластерах ($\text{paraH}_2\text{}_N$) — CO в области $N = 7\text{--}17$ обнаружено бездиссипативное проскальзывание при вращении CO [17], что свидетельствует о единой природе наблюдавшихся в них и малых гелиевых системах явлений.

В данном сообщении будут рассмотрены спектральные исследования малых кластеров $\text{He}_N\text{—CO}$. Поскольку для получения таких кластеров необходимы достаточно низкие температуры, заселённым оказывается только самый нижний вращательный уровень молекулы с вращательным моментом $J = 0$, и в основном наблюдаются только переходы с него: $J = 1\text{--}0$. Частота одного из переходов находится вблизи частоты свободного вращения CO (115 ГГц), а другой переход в малых кластерах лежит в диапазоне сантиметровых длин волн. Два аналогичных перехода наблюдаются вблизи основного колебания молекулы CO (в области 2100 cm^{-1}). Именно они и были первыми исследованы в этих кластерах [5, 6].

К сожалению, из положений этих двух измеренных переходов невозможно независимо определить две вращательные константы и частоту основного колебания CO в кластере. Поэтому очень интересные результаты этих работ носят скорее качественный характер, а для получения количественных характеристик необходимы прямые измерения частот вращательных переходов.

2. Методы исследования

Как уже говорилось, гелиевые кластеры образуются в холодной сверхзвуковой газовой струе. Для её получения смесь из газообразного гелия с небольшой примесью молекул хромофора (0,01 %) через сверхзвуковое сопло с характерным диаметром отверстия 0,5 – 1 мм направляют в вакуумную камеру, где она адиабатически расширяется. При достаточно мощной откачке камеры, обеспечивающей давление остаточного газа порядка 10^{-3} торр, эффективность охлаждения определяется в основном начальными давлением и температурой. При стартовом давлении 50 атм и комнатной температуре сопла конечная температура гелиевой струи достигает 0,3 К, а при охлаждении сопла парами жидкого азота — 0,1 К [5]. Для сочетания нужных потоков газа в струе с разумными скоростями откачки вакуумной камеры обеспечивают работу сопла в режиме коротких импульсов. С этой целью перед входом в сопло устанавливается электромагнитный клапан, который открывается для пропускания потока газа на время порядка 1 мс. Масляный бустерный насос со скоростью откачки 1000 л s^{-1} создает нужный вакуум в камере при частоте повторения импульсов порядка 1 Гц.

Спектральные исследования гелиевых кластеров и бинарных комплексов проводятся в инфракрасном (ИК) (группа А.Р.В. Мак-Келлара, Оттава), сантиметровом (группа В. Ягера, Эдмонтон) и миллиметровом (российско-германская группа Троицк – Кельн) диапазонах длин волн. Так как ширины спектральных линий в сверхзвуковой струе близки к доплеровскому пределу, все измерения проводятся на спектрометрах с когерентными источниками излучения и высоким спектральным разрешением.

Более сложная проблема — достижение необходимой для таких экспериментов чувствительности регистрации слабых линий. Для получения необходимых температур содержание хромофора в гелии должно быть мало, а концентрация образовавшихся кластеров составляет менее 0,1 % от его количества. Чувствительность обычных однопроходных спектрометров слишком мала для обнаружения столь слабых сигналов, и необходимо применять схемы с многократным прохождением излучения через сверхзвуковую струю. В ИК-диапазоне используется спектрометр на основе диодных лазеров с торOIDальной системой зеркал, обеспечивающей более ста проходов лазерного луча через струю [18]. В миллиметровом и сантиметровом диапазонах вследствие большой длины волн излучения такие многопроходные схемы нереальны и единственный способ достижения требуемой чувствительности — пропускание струи через заполненный излучением высокодобротный открытый резонатор. Разработаны высокочувствительные импульсные фурье-спектрометры сантиметрового диапазона, которые хорошо сочетаются с открытыми резонаторами. К этому типу принадлежит установка группы Ягера [19].

К сожалению, в миллиметровом диапазоне эти спектрометры неэффективны, так как отсутствуют достаточно мощные источники излучения с большой перестройкой частоты. Нашей группой разработан внутрирезонаторный спектрометр [20], основанный на отечественном широкодиапазонном генераторе миллиметрового диапазона — оротроне [21]. В разработанном нами спектрометре имеется собственный задающий частоту излучения открытый резонатор, через который можно пропустить исследуемый газ. В результате может быть получено около ста эффективных проходов излучения через струю, что обеспечивает достаточно высокую чувствительность спектрометра.

Благодаря высокому спектральному разрешению относящиеся к разным кластерам спектральные линии не перекрываются и анализируются по отдельности. Кроме того, весьма существенно, что оптимальная температура образования кластеров монотонно уменьшается с их ростом. Поэтому интенсивности спектральных линий при уменьшении температуры (посредством увеличения стартового давления газа и/или охлаждения сопла) проходят через максимум. По положению этого максимума можно соотнести спектральную линию с кластером определённого состава.

Большую помощь в идентификации сложных спектров оказывает методика двойного резонанса. Если в связанной двумя переходами трёхуровневой системе насытить один из них, то меняются населённости уровней и соответственно интенсивность поглощения излучения на другом. Следовательно, настроив спектрометр на второй переход, можно зафиксировать поглощение излучения от дополнительного источника на первом переходе по изменению сигнала спектрометра. Помимо выделения пар переходов, относящихся к трёхуровневым системам, методика двойного резонанса позволяет эффективно расширять изучаемый спектральный диапазон и регистрировать переходы с уровней, тепловая заселённость которых слишком мала для прямого наблюдения. Установка для наблюдения двойного резонанса на основе оротронного спектрометра описана в [22].

3. Экспериментальные результаты

Частоты чисто вращательных переходов $J = 1 - 0$ в кластерах ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$ приведены на рис. 1. Все высокочастотные линии измерены на оротронном спектрометре, а низкочастотные в кластерах с $N \leq 7$ — на импульсном фурье-спектрометре. Соответствующая линия в ${}^4\text{He}_8 - \text{CO}$, лежащая выше диапазона фурье-спектрометра, зарегистрирована на оротронном спектрометре с помощью техники двойного резонанса. Низкочастотные переходы соответствуют вращению молекулы вместе с гелием, и их частота обратно пропорциональна моменту инерции CO с присоединённой гелиевой шубой. Момент инерции возрастает с присоединением к молекуле до трёх атомов гелия, а затем начинает уменьшаться. То есть в ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$ проскальзывание при вращении молекулы начинается в кластере, содержащем четыре атома гелия. В дальнейшем частота переходов плавно увеличивается и при $N \geq 6$ превышает своё значение в ${}^4\text{He} - \text{CO}$. Это означает, что в кластерах с $N \geq 6$ эффективный размер шубы меньше одного атома гелия.

Частота высокочастотных переходов сначала увеличивается с ростом кластера, проходит через максимум

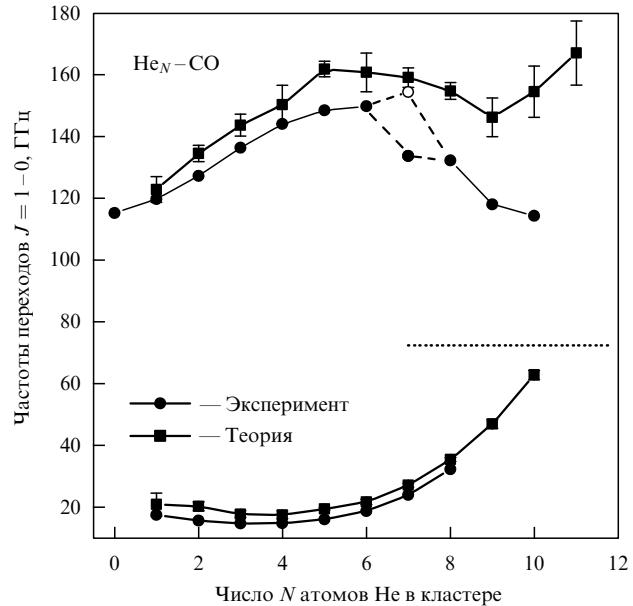


Рис. 1. Измеренные (●) и вычисленные (■) [23] частоты переходов $J = 1 - 0$ в кластерах ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$. Частота верхней компоненты в ${}^4\text{He}_7 - \text{CO}$ (○) определена из ИК-данных [5] с учётом полученного в [7] сдвига частоты колебания CO. Пунктирная линия показывает величину $2B$ в гелиевых дроплетах [24].

при $N = 6, 7$, а затем уменьшается. В кластере с $N = 7$ в ИК-спектре наблюдается расщепление линии перехода на две компоненты. Нам удалось зарегистрировать только одну линию, но близость её к предсказанному на основе ИК-данных положению нижней компоненты позволяет утверждать, что расщепление существует и в основном колебательном состоянии ${}^4\text{He}_7 - \text{CO}$.

Для описания наблюдавшихся вращений молекулы CO в гелиевых кластерах можно предложить следующую качественную модель. Так как потенциал взаимодействия не зависит от азимутального угла, гелиевый кластер обладает в основном цилиндрической симметрией. При низкочастотных вращениях ось вращения CO параллельна оси цилиндра, а при высокочастотных — перпендикулярна ей. Так как атомы гелия притягиваются преимущественно к кислородному концу молекулы [13], вблизи него возникает деформация гелиевого окружения, которая сопутствует низкочастотному вращению CO и даёт вклад в измеряемый момент инерции. При увеличении числа атомов гелия кластер становится прочнее и деформация уменьшается. При этом частота перехода возрастает до тех пор, пока не заполнится первая координационная сфера, что и наблюдается в ИК-диапазоне [5].

При высокочастотном вращении роль гелиевого окружения сводится к увеличению анизотропии потенциала взаимодействия с CO, что и приводит к возрастанию частоты перехода. Это явление можно описать в рамках теории возмущений, развитой для ${}^4\text{He} - \text{CO}$ в [13] при реалистических значениях констант. Однако в кластерах с заполненной координационной сферой различие между двумя вращениями исчезает и их частоты должны быть близки. Поэтому при приближении числа атомов гелия в кластере к $N \approx 13, 14$ частота высокочастотного перехода понижается.

На рисунке 1 приведены также результаты расчётов возбуждений в системе ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$, полученные методом

диффузионного Монте-Карло [23]. Результаты расчёта неплохо описывают поведение низкочастотной ветви, хотя рассчитанные значения несколько завышены. Хуже обстоит дело с высокочастотной ветвью. В то время как экспериментальные частоты в кластерах с $N = 8 - 10$ монотонно уменьшаются, теория предсказывает скорее их возрастание в этой области. Принципиальный вопрос здесь: остаются ли частоты переходов в больших кластерах достаточно высокими, как предсказывают результаты расчёта, или обе ветви вращения сливаются? Экспериментальным указанием на возможность второго сценария может служить наблюдаемое в ИК-диапазоне удвоение линии перехода $J = 1 - 0$ в ${}^4\text{He}_{15} - \text{CO}$ [5].

Из сравнения микроволновых и ИК-спектральных данных можно определить сдвиг частоты основного колебания CO в гелиевых кластерах, который приведён на рис. 2 вместе с результатами расчёта на основе разных потенциалов взаимодействия ${}^4\text{He} - \text{CO}$ [23]. Зависимость сдвига частоты от числа атомов гелия почти линейна, в отличие от таковой в гелиевых кластерах на основе CO_2 , N_2O и OCS [1–4]. В последних системах наблюдается изменение знака сдвига частоты при $N = 5$, что связывается с заполнением гелием жёсткого кольца, расположенного по экватору этих молекул, и размещением остальных атомов гелия на периферии молекул-хромофоров. Монотонность сдвига частоты колебания в кластерах на основе CO свидетельствует о диффузном характере строения кластера, при котором нет существенных различий в расположении разных атомов. Экспериментальные результаты хорошо описываются теорией качественно, однако для получения количественного соответствия необходимо уточнение потенциала взаимодействия ${}^4\text{He} - \text{CO}$.

На рисунке 2 приведён также сдвиг частоты основного колебания CO в гелиевых дроплетах, полученный в работе [24]. Этот сдвиг оказался весьма малым, и он

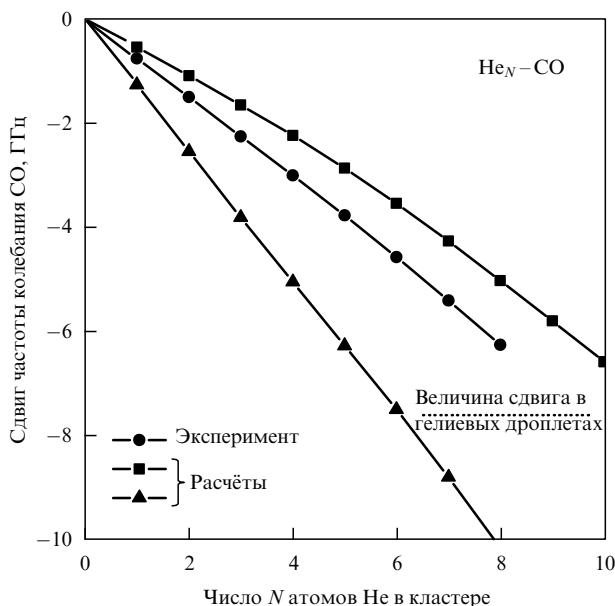


Рис. 2. Экспериментально определённый сдвиг частоты колебания CO (●) в кластерах $\text{He}_N - \text{CO}$. Результаты теоретических расчётов сдвига (■, ▲) взяты из работы [23]. Пунктирная линия показывает величину сдвига в гелиевых дроплетах [24].

примерно соответствует значению, полученному с помощью экстраполяции наших данных на случай ${}^4\text{He}_{10} - \text{CO}$. Так как нет оснований для изменения характера зависимости сдвига частоты от числа атомов гелия до тех пор, пока не заполнится первая координационная сфера, то в этих кластерах сдвиг оказывается большим (по абсолютной величине), чем в дроплетах. Поэтому следует либо ожидать изменения знака зависимости сдвига частоты от числа атомов гелия в больших кластерах, либо считать, что процедура его определения, использованная в работе [24], не совсем корректна.

На рисунке 3 представлены зависимости эффективной вращательной константы B (величины обратной моменту инерции молекулы с гелиевой шубой) от числа атомов гелия в кластере для всех исследованных на сегодня систем ${}^4\text{He}_N - X$, где $X = \text{OCS}$ [1], CO_2 [2], N_2O [3], CO, HC_3N [8]. Данные для ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$ при $N \leq 8$ получены из частот низкочастотных вращательных переходов [7], а при $N > 8$ — экстраполяцией [5] в предположении линейности полученного в [7] сдвига частоты колебания CO. Во всех системах при числе атомов гелия, превышающем некоторое значение, наблюдается возрастание вращательной константы (уменьшение момента инерции), но начинается это явление тем раньше, чем меньше энергия связи гелия с молекулой. "Рекордсменом" является система ${}^4\text{He}_N - \text{CO}$, в которой уменьшение момента инерции начинается при $N = 4$, а эффективный размер шубы, начиная

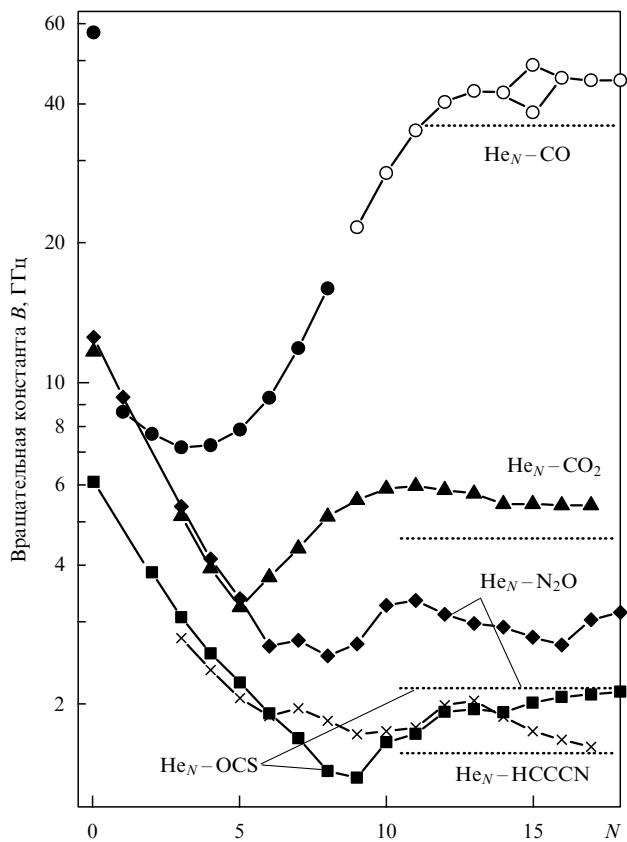


Рис. 3. Зависимость эффективной вращательной константы B различных молекул-хромофоров от числа N атомов гелия в кластере. Пунктирные линии показывают предельную величину B , определённую в гелиевых дроплетах.

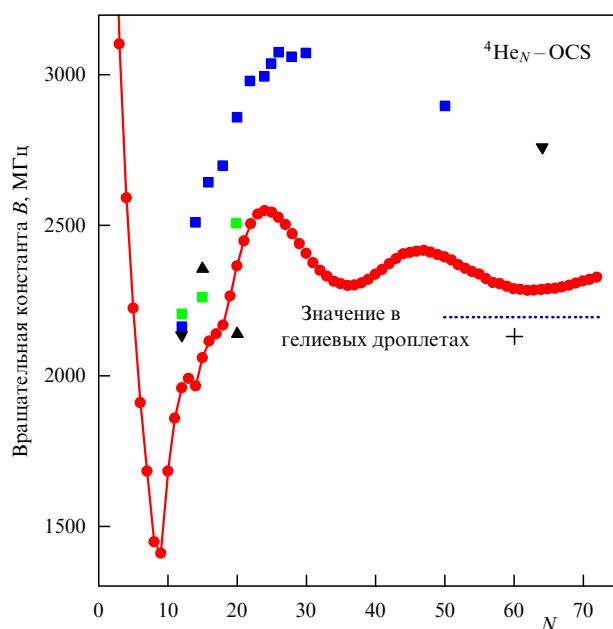


Рис. 4. Зависимость вращательной константы B молекулы OCS от N для кластеров ${}^4\text{He}_N-\text{OCS}$ [1].

с $N = 6$, становится меньше одного атома гелия. В то же время можно предположить, что на другие молекулы "намерзает" несколько атомов гелия и это сравнительно жесткое образование вращается в остальном гелиевом кластере.

Уменьшение момента инерции с ростом кластера напоминает эффект Андроникашили [25], связанный с неувлечением сверхтекучего гелия движущимися в нём телами. Существенно также, что при дальнейшем росте кластеров частота вращения молекул-хромофоров плавно стремится к пределу, характерному для сверхтекучего гелия в дроплетах, что демонстрируется на рис. 4 на примере системы He_N-OCS с $N = 2-70$ [1]. Возникает естественный вопрос о связи явлений, наблюдаемых в малых гелиевых кластерах, со сверхтекучестью. По свойствам гелий в кластере скорее напоминает квантовую жидкость, в которой отсутствуют приводящие к релаксации одночастичные возбуждения. В противном случае наблюдалось бы дополнительное уширение спектральных линий. В то же время порядка десяти атомов явно недостаточно для образования квазинепрерывного спектра элементарных возбуждений бозевского типа и отсутствие релаксации, вероятнее всего, связано с дискретным спектром возбуждений малого кластера. Поэтому о наблюдаемых в малых кластерах явлениях можно говорить в терминах "наноскопической сверхтекучести", существенно отличающейся от классической. Аналогичные замечания относятся и к водородной сверхтекучести, наблюдавшейся в кластерах (*para* H_2) $_N-\text{CO}$ при $N = 7-17$ [17]. Тем не менее в ряде работ [26, 27] свойства малых гелиевых кластеров трактуются в терминах доли нормального и сверхтекучего гелиевых компонентов, что, на наш взгляд, не совсем оправдано.

4. Заключение

Когда-то Я.Б. Зельдович сформулировал вопрос: "Сколько нужно атомов гелия, чтобы возникла капля?"

Похоже, однозначный ответ отсутствует, и различия, характеризующие физические свойства капли, начинают проявляться при разном числе атомов. Так, по оценкам для образования квазинепрерывного спектра элементарных возбуждений необходимо порядка 100 атомов, а для проскальзывания при вращении молекулы-хромофора достаточно четырех.

Возникает ещё один вопрос: не могут ли аналогичные бездиссипативные проскальзывания при вращении молекулы-хромофора существовать и в фермionных кластерах, пока они настолько малы, что отсутствуют препятствующие сверхтекучести возбуждения типа частица-дырка? Нам представляется, что ответить на этот вопрос поможет исследование вращательных спектров в кластерах ${}^3\text{He}_N-\text{CO}$. Мы планируем приступить к их изучению в ближайшее время.

Авторы выражают благодарность РГФФИ (гранты 06-02-16035, 08-02-91966) и ННИО (гранты 436 RUS 113/946/0-1, SU 579/1-1) за поддержку этой работы. А.В.П. благодарит Фонд содействия отечественной науке за поддержку грантом в номинации "Кандидаты наук РАН".

Список литературы

- McKellar A R W, Xu Y, Jäger W *J. Phys. Chem. A* **111** 7329 (2007)
- McKellar A R W *J. Chem. Phys.* **128** 044308 (2008)
- Xu Y, Blinov N, Jäger W, Roy P-N *J. Chem. Phys.* **124** 081101 (2006)
- McKellar A R W *J. Chem. Phys.* **127** 044315 (2007)
- Tang J, McKellar A R W *J. Chem. Phys.* **119** 754 (2003)
- McKellar A R W *J. Chem. Phys.* **125** 164328 (2006)
- Surin L A et al. *Phys. Rev. Lett.* **101** 233401 (2008)
- Topic W et al. *J. Chem. Phys.* **125** 144310 (2006)
- Думеш Б С, Сурин Л А *УФН* **176** 1137 (2006) [Dumesh B S, Surin L A *Phys. Usp.* **49** 1113 (2006)]
- Toennies J P, Vilesov A F *Angew. Chem. Int. Ed.* **43** 2622 (2004)
- Макаров Г Н *УФН* **174** 225 (2004) [Makarov G N *Phys. Usp.* **47** 217 (2204)]
- Grebenev S, Toennies J P, Vilesov A F *Science* **279** 2083 (1998)
- Chuaqui C E, Le Roy R J, McKellar A R W *J. Chem. Phys.* **101** 39 (1994)
- Surin L A et al. *J. Chem. Phys.* **112** 4064 (2000); "Errata" *J. Chem. Phys.* **112** 9190 (2000)
- Гинзбург В Л, Собянин А А *Письма в ЖЭТФ* **15** 343 (1972) [Ginzburg V L, Sobyanin A A *JETP Lett.* **15** 242 (1972)]
- Tejeda G et al. *Phys. Rev. Lett.* **92** 223401 (2004)
- Moroni S et al. *J. Chem. Phys.* **122** 094314 (2005)
- Brookes M D et al. *Spectrochim. Acta A* **60** 3235 (2004)
- Xu Y, Jäger W *J. Chem. Phys.* **106** 7968 (1997)
- Surin L A et al. *Rev. Sci. Instrum.* **72** 2535 (2001)
- Русин Ф С, Богомолов Г Д *Письма в ЖЭТФ* **4** 236 (1966) [Rusin F S, Bogomolov G D *JETP Lett.* **4** 160 (1966)]
- Surin L A et al. *J. Mol. Spectrosc.* **222** 93 (2003)
- Škrbić T, Moroni S, Baron S *J. Phys. Chem. A* **111** 7640 (2007)
- von Haeften K et al. *Phys. Rev. B* **73** 054502 (2006)
- Андроникашили Э Л *ЖЭТФ* **16** 780 (1946); **18** 424 (1948)
- Paesani F, Kwon Y, Whaley K B *Phys. Rev. Lett.* **94** 153401 (2005)
- Paesani F et al. *J. Chem. Phys.* **122** 181106 (2005)