

# Новый эксперимент по проверке сохранения четности в холодных хиральных молекулах с использованием колебательной спектроскопии\*

А.Курноль, М.Мансо, М.Пиренс, Л.Лекордье, Д.Б.А.Тран, Р.Сантагата, Б.Аржанс, А.Гончаров, О.Лопес, М.Абгралл, Ю.Ле Кок, Р.Ле Таргат, Х.Альварес Мартинес, В.К.Ли, Д.Сюй, П.Э.Потти, Р.Дж.Хендрикс, Т.Э.Уолл, Дж.М.Беневска, Б.Э.Зауэр, М.Р.Тарбатт, А.Эми-Кляйн, С.К.Токунага, Б.Дарки

*Представлен краткий обзор наших недавних исследований эффекта несохранения четности в хиральных комплексах тяжелых металлов с использованием интерферометрии Рэмси в среднем ИК диапазоне. Рассмотрен прогресс в решении основных экспериментальных проблем, в том числе в разработке содержащих буферный газ источников медленных холодных многоатомных молекул и в стабилизации частоты квантовых каскадных лазеров, калиброванных по первичным стандартам частоты. Сообщается об исследованиях ахиральных тестовых молекул, из которых были синтезированы перспективные хиральные производные молекулы.*

**Ключевые слова:** несохранение четности, прецизионная ИК лазерная спектроскопия, метрология частот, интерферометрия Рэмси, молекулярные пучки, охлаждение буферным газом, хиральные молекулы, квантовый каскадный лазер.

\* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

**A.Cournol, M.Manceau, M.Pierens, L.Lecordier, O.Lopez, A.Amy-Klein, S.K.Tokunaga, B.Darquié.** Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France; e-mail: benoit.darquie@univ-paris13.fr  
**D.B.A.Tran.** Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France; permanent address: Faculty of Physics, Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, Vietnam  
**R.Santagata.** Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France; current address: ONERA, The French Aerospace Lab., Centre de la Hunière, BP 80100, Palaiseau 91123, France  
**B.Argence.** Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France; current address: Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France  
**А.Гончаров.** Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France; постоянный адрес: Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3  
**M.Abgrall, Y. Le Coq, R. Le Targat, W.K.Lee, D.Xu, P-E.Pottier.** LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France  
**H.Álvarez Martínez.** LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France; current address: ONERA, The French Aerospace Lab., Centre de la Hunière, BP 80100, Palaiseau 91123, France  
**R.J.Hendricks.** Centre for Cold Matter, Blackett Laboratory, Imperial College London, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, United Kingdom; current address: National Physical Laboratory, NPL, Hampton Road, Teddington TW11 0LW, United Kingdom  
**T.E.Wall, J.M.Bieniewska, B.E.Sauer, M.R.Tarbutt.** Centre for Cold Matter, Blackett Laboratory, Imperial College London, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, United Kingdom

Поступила в редакцию 24 октября 2018 г., после доработки – 15 января 2019 г.

## 1. Введение

Многие молекулы являются хиральными и имеют лево- и правосторонние формы, известные как энантиомеры и являющиеся зеркальным отображением друг друга. Поверхность потенциальной энергии хиральной молекулы имеет два разделенных конверсионным барьером минимума, которые соответствуют левому и правому энантиомерам. Отметим, что энантиомеры не являются собственными состояниями симметричного электромагнитного гамильтониана молекулы, что делает возможной нутацию состояния молекулы путем квантового туннелирования через потенциальный барьер. Однако молекула удерживается в состоянии левого или правого энантиомера вследствие взаимодействия с окружающей средой, или декогеренции. Если конверсионный барьер между энантиомерами очень высок, как в случае рассматриваемых нами молекул, левые и правые состояния могут в хорошем приближении рассматриваться как собственные состояния оператора полной энергии.

В дополнение к электромагнитному взаимодействию слабое взаимодействие – одна из трех других фундаментальных сил – также играет роль в молекулярных системах, особенно во взаимодействии между электронами и ядрами. Согласно Стандартной модели, уровни энергии энантиомеров должны немного различаться из-за несохранения четности (НЧ, нарушение право-левой симметрии), присущего слабому взаимодействию [1]. Целью наших исследований является измерение этой разности энергий. Такое измерение обладает высокой чувствительностью к слабому взаимодействию и может помочь при определении границ применимости Стандартной модели [2], а также пролить свет на загадку биологической гомохиральности [3].

После первых доказательств того факта, что нейтральные слабые токи нарушают четность, полученных в атомных экспериментах в Новосибирске [4], исследовате-

ли десятилетиями мечтали измерить разность энергий между хиральными энантиомерами, но ни в одном эксперименте не была достигнута необходимая точность. Для наблюдения эффектов НЧ в хиральных молекулах был предложен ряд методов, включающих использование вращательной, колебательно-вращательной, электронной, мессбауэровской и ЯМР-спектроскопии, а также эксперименты по кристаллизации и растворимости и измерения оптической активности (см. [2, 5–8] и ссылки в этих работах). Однако, насколько нам известно, очень немногие научные группы занимаются сейчас экспериментальной реализацией подобных измерений. Группа Дмитрия Будкера недавно предложила измерение с использованием ЯМР-спектроскопии [9].

Martin Quack и др. из Швейцарской высшей технической школы Цюриха в настоящее время развивают альтернативный подход. Он основан на измерении временной эволюции четности у хиральных молекул после задания определенной четности на начальном этапе [10], что связано с особыми экспериментальными проблемами и требует работы с существенно иными хиральными объектами. Сотрудники этой группы опубликовали принципиальное обоснование своей методики с использованием ахиральной молекулы [11], а также предложили перспективные объекты для эксперимента [12].

Различия в энергиях из-за НЧ, в свою очередь, приводит к различию между частотами в колебательных спектрах лево- и правосторонних энантиомеров, которые мы и хотим измерить с помощью прецизионной спектроскопии среднего ИК диапазона [13]. Наиболее точный эксперимент, проведенный в 2000 г. в Лаборатории физики лазеров одним из соавторов, позволил измерить частоту валентного колебания C–F молекулы CHFClBr вблизи 30 ТГц с помощью спектроскопии насыщенного поглощения [14, 15]. Точность измерения достигала 8 Гц, что является большим достижением, однако это значение все еще в 3000 раз превышает прогнозируемую разность частот (~2 мГц) между левым и правым энантиомерами [16]. Чтобы улучшить точность эксперимента, мы создаем более чувствительный прибор и учимся работать с молекулами, в которых ожидается намного большее различие энергий энантиомеров.

## 2. Молекулы – объекты исследования

Разность энергий за счет НЧ сильно увеличивается с зарядом ядра [17], поэтому мы рассматриваем молекулы с тяжелыми атомами вблизи хирального центра. Поиск лучших хиральных образцов для измерения этой разности проводился в сотрудничестве со специалистами по теоретической и экспериментальной химии, что привело к успешному синтезу твердых металлоорганических соединений оксореция. Эти молекулы имеют колебательные переходы на частоте около 30 ТГц и частотные сдвиги за счет НЧ до ~1 Гц (см. работы [5, 18–21] и ссылки в них), что в 1000 раз больше, чем сдвиги для молекул CHFClBr. В настоящее время имеется несколько других перспективных вариантов. В частности, недавно найдено соединение урана ( $N \equiv \text{UHF}$ ) с рекордным предсказанным сдвигом частоты из-за НЧ ~20 Гц [22]. Хотя синтез и выделение этого соединения до сих пор не проводились, это может стать возможным в будущем.

Для тестирования аппаратуры и методик, необходимых для выполнения точных спектроскопических измере-

ний на сложных хиральных молекулах, нами проведены измерения методом спектроскопии высокого разрешения в среднем ИК диапазоне для их ахирального прекурсора – метилтриоксореция (МТО,  $\text{CH}_3\text{ReO}_3$ ) – как в ячейках с комнатной температурой, так и в холодных сверхзвуковых пучках. [5, 18, 20, 23, 24]. Основываясь на первых результатах, мы разрабатываем и конструируем современный прибор для высокоточной колебательной спектроскопии хиральных молекул.

## 3. Описание установки

На рис.1 дана схема установки для описанного выше нового эксперимента. Медленный холодный молекулярный пучок представляющего интерес соединения рения получается путем синтеза молекул внутри ячейки с буферным газом, охлажденной до нескольких кельвинов, с последующей экстракцией молекул в пучок. Формирование таких пучков молекул обычно твердого вещества является одной из новейших технологий создания молекулярно-пучковых источников. Эти пучки имеют как низкую скорость молекул, так и одни из самых высоких на сегодняшний день токов пучка [25], что делает их очень привлекательными для точных спектроскопических измерений. После формирования пучка молекулы проходят через интерферометр Рэмси, достаточно чувствительный для измерения малых изменений частоты колебаний молекул [26].

В качестве источника излучения необходимой частоты, которая находится в средней ИК области спектра, мы используем квантовые каскадные лазеры (ККЛ). Для достижения требуемой стабильности частоты лазер стабилизируется по частотной гребенке, которая, в свою очередь, привязана к сверхстабильному лазерному сигналу на длине волны 1.5 мкм и, в конечном счете, к первичным стандартам частоты. В качестве таких рассматриваются квантовые часы на базе цезиевого фонтана, реализующие стандарт Международной системы единиц измерения времени [27, 28]. ККЛ допускают широкую и непрерывную перестройку частоты, а доступный им диапазон длин волн генерации охватывает всю среднюю ИК область. Это позволяет изучать значительное число молекул-кандидатов и, таким образом, обеспечивает беспрецедентную гибкость развиваемой методики.

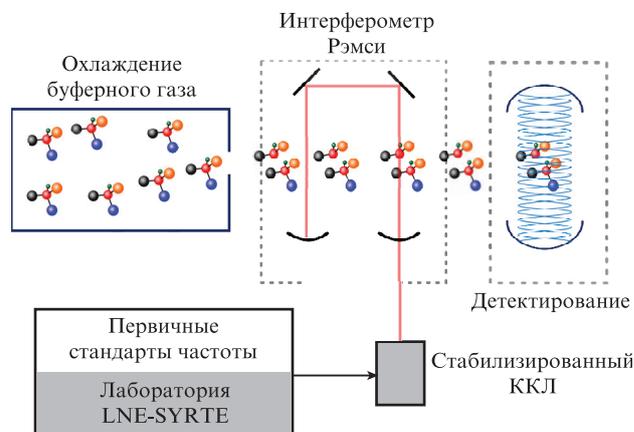


Рис.1. Схема предлагаемого эксперимента по измерению разности частот колебательно-вращательных переходов между энантиомерами холодных хиральных молекул из-за НЧ. ККЛ – квантовый каскадный лазер.

Молекулы должны детектироваться с высокой чувствительностью. В настоящее время мы исследуем детекторы, основанные на схемах, регистрирующих усиленное резонатором излучение в среднем ИК диапазоне или микроволновые поля, излучаемые при вращении молекул. Для измерения сдвига частоты колебаний из-за НЧ сама частота колебаний каждого энантиомера должна быть измерена с помощью нового устройства. Большинство систематических частотных сдвигов будут компенсированы при дифференциальном измерении разности частот двух энантиомеров. Прогнозируемая ошибка измерения не превышает 0.1 Гц [5], что означает улучшение по крайней мере на два порядка по сравнению с данными эксперимента, проведенного для СНFCIBr.

#### 4. Охлаждение буферным газом

Ранее нами были разработаны методы охлаждения сложных и тяжелых молекул соединений рения, представляющих интерес для измерения эффектов НЧ, до нескольких кельвинов за счет столкновений с буферным газом при температуре жидкого гелия 4 К внутри медной ячейки, установленной на холодном столике криокулера. На рис.2 представлены схема эксперимента и спектр погло-

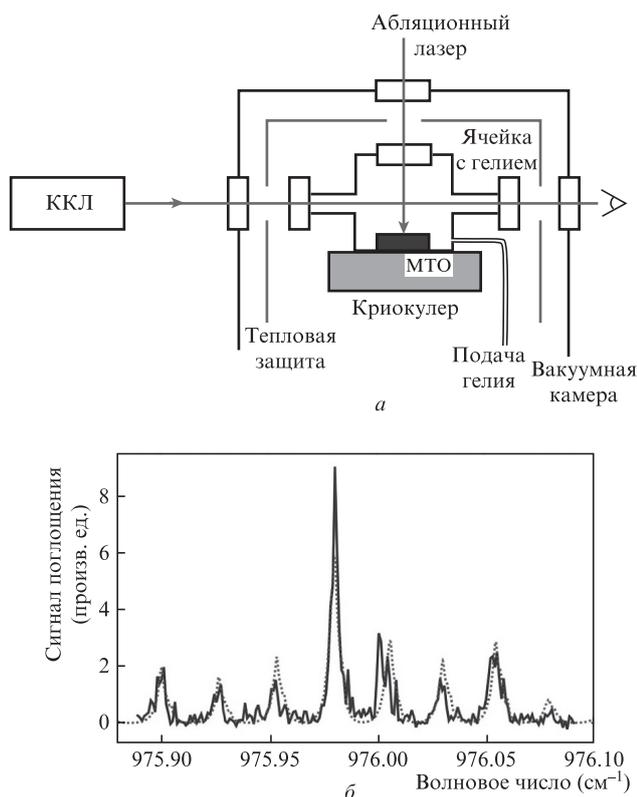


Рис.2. Экспериментальная установка для охлаждения МТО в криогенном буферном газе: медная ячейка, заполненная гелием при давлении  $\sim 10^{-2}$  мбар и охлажденная до 6 К с помощью криокулера, окружена алюминиевыми радиационными экранами при температуре около 40 К и помещена в вакуумную камеру; мишень с МТО подвергается абляции импульсами Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм, свет от автономного ККЛ, излучающего в области  $\sim 976$   $\text{см}^{-1}$ , пропускается через ячейку для записи спектров поглощения (а), а также спектр молекул, охлаждаемых буферным газом, демонстрирующий вращательную структуру Q-ветви полосы антисимметричного валентного колебания Re=O изотополога  $^{187}\text{Re}$ ; пунктирная кривая соответствует данным моделирования при вращательной температуре  $6 \pm 3$  К [29] (б).

щения, полученный при криогенном охлаждении буферным газом МТО [24, 29]. Молекулы с вращательной температурой  $\sim 6$  К получают путем лазерной абляции гранулы МТО внутри ячейки с буферным газом. Данная разработка распространяет технику охлаждения буферным газом на новый класс молекул.

Мы также выяснили, как переводить такие частицы в газовую фазу с помощью лазерной абляции – метода, ранее использовавшегося только для двухатомных молекул. Многие многоатомные молекулы имеют низкое давление паров при легко доступных температурах, поэтому очень важна возможность их испарения путем лазерной абляции. Наши исследования показывают, что соединения рения, представляющие интерес для измерения эффектов НЧ, не разрушаются в процессе абляции и что энергия, содержащаяся в поступательных и вращательных степенях свободы, эффективно уменьшается за счет столкновений с гелием. Это имеет интересные перспективы для получения молекулярных пучков, охлаждаемых буферным газом.

Мы провели также первые точные спектроскопические измерения для молекул, охлажденных буферным газом, в области «отпечатков пальцев» в среднем ИК диапазоне (вблизи 10  $\mu\text{м}$ ), получив спектры поглощения с разрешением вращательной и сверхтонкой структур (см. рис.2). Это позволило оценить ядерное квадрупольное взаимодействие для возбужденного колебательного состояния, что является беспрецедентным для такой сложной молекулы.

Было также продемонстрировано криогенное охлаждение буферным газом другой многоатомной молекулы, 1,3,5-триоксана (( $\text{CH}_2\text{O}$ ) $_3$ , циклический тример формальдегида). Будучи твердым при комнатной температуре, данное вещество обладает достаточной летучестью, что позволяет ввести его в ячейку с буферным газом через трубку, имеющую комнатную температуру. Записанные нами спектры насыщенного поглощения триоксана представляют собой первые результаты субдоплеровской спектроскопии молекул, охлажденных буферным газом в области отпечатков пальцев, и первые субдоплеровские спектры многоатомных молекул, полученные внутри ячейки с буферным газом.

На основе ячейки с буферным газом необходимо создать универсальный источник молекулярного пучка. Наша работа пока была сосредоточена на разработке методов лазерной абляции и капиллярной загрузки молекул. Все измерения проводились внутри камеры. Следующим шагом будет создание молекулярного пучка и оптимизация конфигурации ячейки для получения пучка холодных сложных молекул с малой скоростью частиц и большим током пучка. Учитывая, что конкретная хиральная молекула для измерений еще не определена, разумно разработать универсальную ячейку с различными механизмами загрузки. Капиллярная загрузка хорошо подходит для молекул с высокой летучестью, тогда как вещества с низкой летучестью лучше вводятся с использованием печи или лазерной абляции. На рис.3 показаны различные исследуемые механизмы загрузки.

Для разработки техники создания молекулярного пучка требуется чувствительный метод обнаружения молекул. С этой целью будет использована спектроскопия поглощения в среднем ИК диапазоне, усиленная резонатором. В сочетании со спектроскопией с модуляцией длины волны это позволит записывать слабые сигналы погло-

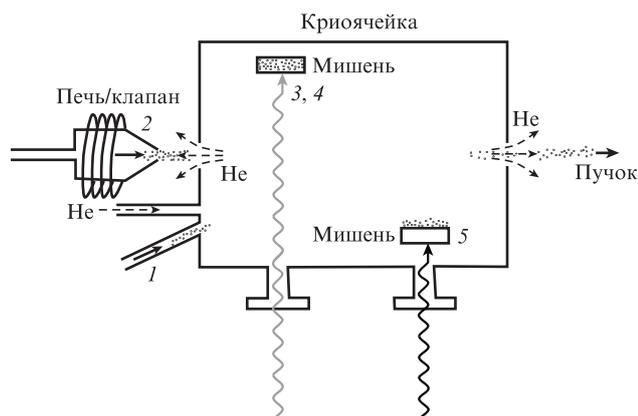


Рис.3. Схема криокамеры с буферным газом, иллюстрирующая различные механизмы загрузки молекул:

1 – капиллярная загрузка; 2 – загрузка из клапана или печи; 3 – лазерная абляция; 4 – десорбция с помощью матрицы; 5 – лазерно-индуцированная акустическая десорбция; группами точек показаны интересующие нас молекулы, штриховыми стрелками – гелий, серой волнистой стрелкой – лазерное излучение для абляции или десорбции твердой мишени, содержащей исследуемые молекулы, черной волнистой стрелкой – излучение для лазерно-индуцированной акустической десорбции твердой мишени, содержащей исследуемые молекулы.

щения с большим отношением сигнал/шум и обеспечит высокую чувствительность для оптимизации тока пучка.

## 5. Стабилизация лазера для прецизионной колебательной спектроскопии

Частота излучения используемого нами ККЛ на длине волны 10 мкм была привязана к вторичному стандарту частоты –  $\text{CO}_2$ -лазеру, стабилизированному по резонансу насыщенного поглощения в  $\text{OsO}_4$  [23, 30]. Превосходные спектральные характеристики излучения ультрастабильного  $\text{CO}_2$ -лазера были перенесены на излучение ККЛ, в результате чего ширина линии этого излучения снизилась до 10 Гц. Это примерно на два порядка меньше ширины самой узкой линии излучения ККЛ в ранее опубликованных работах.

Совсем недавно мы разработали перестраиваемый в широком диапазоне стабилизированный по частоте ККЛ, последовательность привязок которого непосредственно отслеживается до первичных стандартов частоты. Наш метод позволяет привязывать излучение любого лазера среднего ИК диапазона к частотной гребенке, стабилизированной по эталону в ближнем ИК диапазоне – ультраустойчивому лазеру на  $\lambda = 1.55$  мкм, находящемуся в лаборатории LNE-SYRTE (Французский национальный институт метрологии). Этот сигнал проверяется на соответствие атомным стандартам частоты и передается по оптоволоконному кабелю длиной 43 км с коррекцией фазового шума, вызванного распространением сигнала. Стабильность эталона передается источнику излучения среднего ИК диапазона, который благодаря этому имеет относительный уход частоты менее  $2 \times 10^{-15}$  на временном интервале 1 – 100 с. Кроме того, вследствие привязки к первичным стандартам LNE-SYRTE его абсолютная частота определяется с ошибкой менее  $10^{-14}$  (потенциально сравнимой с точностью квантовых часов на цезиевом фонтане  $3 \times 10^{-16}$ ). Данный метод стабилизации был продемонстрирован с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера [31, 32] и ККЛ [27, 28].

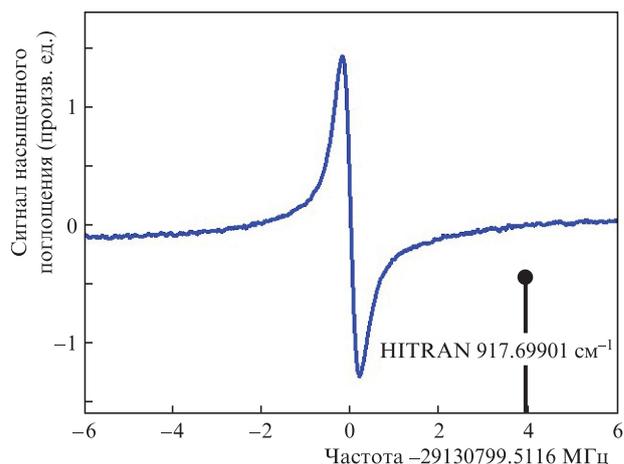


Рис.4. Спектр насыщенного поглощения колебательно-вращательной линии  $P(A,co,0,0^+,33)$  метанола, принадлежащей  $P$ -ветви полосы  $\nu_8$  валентного колебания  $\text{C}-\text{O}$ , записанный в астигматической многопроходной ячейке Херриотта (Aerodyne Research, модель АМАС-36, длина одного прохода 20 см, число проходов 182) с использованием частотной модуляции и детектирования первой гармоникой. Свет от стабилизированного ККЛ разделяется на пучок накачки и пробный пучок с мощностями на входе в ячейку около 1.5 и 0.8 мВт соответственно. Условия эксперимента: давление 1 Па, частота модуляции 20 кГц, амплитуда частотной модуляции 50 кГц, шаг перестройки частоты  $\sim 15$  кГц, усреднение по пяти парам сканов развертки частоты противоположного направления, общее время интегрирования, приходящееся на одну точку, 1 с. Положение линии  $P(A,co,0,0^+,33)$  из базы данных HITRAN [34] показано столбиком.

Развитый метод стабилизации лазерного излучения освобождает нас от необходимости привязывать ККЛ к какому-либо конкретному эталону (к другому лазеру среднего ИК диапазона либо к молекулярному переходу), что ограничивало бы диапазон перестройки. Он также обеспечивает ширину линии  $\sim 0.1$  Гц. Насколько нам известно, это самая узкая и точно заданная линия для ККЛ на сегодняшний день. Установка позволяет перестраивать частоту излучения ККЛ в пределах нескольких сотен мегагерц, сохраняя при этом максимальную стабильность и точность, путем сканирования эталона ближнего ИК диапазона с помощью электрооптического модулятора [33].

Для демонстрации потенциала ККЛ для современных сверхточных спектроскопических измерений, с помощью резонатора Фабри–Перо были записаны спектры насыщенного поглощения  $\text{OsO}_4$  в полосе до 25 кГц, что позволяет определять центральные частоты с точностью в несколько десятков герц [27, 28]. Как показано на рис.4, мы также осуществили спектроскопию насыщенного поглощения нескольких линий метанола в многопроходной ячейке и определили центральные частоты с точностью в несколько килогерц, что на 3–4 порядка лучше результатов предыдущих измерений.

Резонансы многих перспективных хиральных молекул лежат вне узкой области вблизи 10 мкм, поэтому необходимо создавать сверхстабильные ККЛ и в более широком диапазоне длин волн. Сложности при разработке таких ККЛ связаны с необходимостью создания полнофункциональных спектрометров на их основе, стабилизированных по частотной гребенке в среднем ИК диапазоне и в то же время полностью использующих имеющиеся у ККЛ широкие возможности перестройки. Для обеспечения высокой гибкости, спектрометр должен быть

спроектирован таким образом, чтобы ККЛ можно было легко менять, обеспечивая стабилизацию на любой частоте.

## 6. Заключение

Нами описано продвижение при постановке нового эксперимента по измерению проявлений несохранения четности в хиральных молекулах. Обсуждены последние разработки в области получения криогенно охлажденных сложных молекул и стабилизации квантово-каскадных лазеров. В совокупности описанные достижения демонстрируют развитие методов, необходимых для измерения эффектов несохранения четности в хиральных молекулах. Помимо исследования эффектов НЧ, они также открывают новые возможности получения сложных молекул и управления ими с целью использования в различных точных измерениях.

Авторы выражают благодарность П.Асселину, Р.Басту, С.Шардонне, Дж.Крассусу, К.Даусси, Л.Гаю, Э. А.Хиндзу, Т.Р.Уэту, Т.Сауэ, Т.Дж.Сирсу, П.Суларду и Дж.Тэнди за плодотворные обсуждения. Во Франции данная работа была поддержана ANR (гранты № ANR 2010 BLAN 724 3, ANR-12-ASTR-0028-03, ANR-15-CE30-0005-01, ANR-17-ERC2-0036-01 и (через Labex First-TF) ANR 10 LABX 48 01), а также проектами EMPIR 15SIB05 «OFTEN» и 15SIB03 «OC18» (этот проект получил поддержку программы EMPIR, финансируемой государствами-участниками, и исследовательской и инновационной программы Европейского союза Horizon 2020) и Région Île-de-France (DIM Nano-K), CNRS, Université Paris 13 и AS GRAM. В Великобритании работа была поддержана EPSRC в рамках гранта EP/I012044/1. Работа стала возможной благодаря Программе международных обменов, проводимой Королевским обществом и CNRS. Д.Б.А.Тран получил поддержку Министерства образования и профессиональной подготовки Республики Вьетнам (программа 911).

1. Rein D.W. *J. Mol. Evol.*, **4**, 15 (1974).
2. Quack M., Stohner J., Willeke M. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **59**, 741 (2008).
3. MacDermott A.J., Fu T., Hyde G.O., Nakatsuka R., Coleman A.P. *Orig. Life Evol. Biosphere*, **39**, 407 (2009).
4. Barkov L.M., Zolotarev M.S. *Phys. Lett.*, **85B**, 308 (1979).
5. Darquié B., Stoëffler C., Shelkovnikov A., Daussy C., Amy-Klein A., Chardonnet C., Zrig S., Guy L., Crassous J., Soulard P., Asselin P., Huet T.R., Schwerdtfeger P., Bast R., Saue T. *Chirality*, **22**, 870 (2010).
6. Gonzalo I., Bargueno P., de Tudela R.P., Miret-Artés S. *Chem. Phys. Lett.*, **489**, 127 (2010).
7. Medcraft C., Wolf R., Schnell M. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **53**, 11656 (2014).
8. Eibenberger S., Doyle J., Patterson D. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 123002 (2017).
9. Eills J., Blanchard J.W., Bougas L., Kozlov M.G., Pines A., Budker D. *Phys. Rev. A*, **96**, 042119 (2017).
10. Quack M. *Chem. Phys. Lett.*, **132**, 147 (1986).
11. Dietiker P., Miloglyadov E., Quack M., Schneider A., Seyfang G. *J. Chem. Phys.*, **143**, 244305 (2015).
12. Fábri C., Horný L., Quack M. *ChemPhysChem*, **16**, 3584 (2015).
13. Letokhov V.S. *Phys. Lett. A*, **53**, 275 (1975).
14. Daussy C., Marrel T., Amy-Klein A., Nguyen C.T., Bordé C.J., Chardonnet C. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 1554 (1999).
15. Ziskind M., Marrel T., Daussy C., Chardonnet C. *Eur. Phys. J. D*, **20**, 219 (2002).
16. Schwerdtfeger P., Saue T., van Stralen J.N.P., Visscher L. *Phys. Rev. A*, **71**, 012103 (2005).
17. Bouchiat M.A., Bouchiat C. *J. Phys.*, **36**, 493 (1974).
18. Stoëffler C., Darquié B., Shelkovnikov A., Daussy C., Amy-Klein A., Chardonnet C., Guy L., Crassous J., Huet T.R., Soulard P., Asselin P. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 854 (2011).
19. Saleh N., Zrig S., Roisnel T., Guy L., Bast R., Saue T., Darquié B., Crassous J. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 10952 (2013).
20. Tokunaga S.K., Stoëffler C., Auguste F., Shelkovnikov A., Daussy C., Amy-Klein A., Chardonnet C., Darquié B. *Mol. Phys.*, **111**, 2363 (2013).
21. Saleh N., Bast R., Vanthuyne N., Roussel C., Saue T., Darquié B., Crassous J. *Chirality*, **30**, 147 (2018).
22. Wormit M., Olejniczak M., Deppenmeier A.-L., Borschevsky A., Saue T., Schwerdtfeger P. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 17043 (2014).
23. Sow P.L.T., Mejri S., Tokunaga S.K., Lopez O., Goncharov A., Argence B., Chardonnet C., Amy-Klein A., Daussy C., Darquié B. *App. Phys. Lett.*, **104**, 264101 (2014).
24. Asselin P., Berger Y., Huet T.R., Margulès L., Motiyenko R., Hendricks R.J., Tarbutt M.R., Tokunaga S.K., Darquié B. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 4576 (2017).
25. Hutzler N.R., Lu H.I., Doyle J.M. *Chem. Rev.*, **112**, 4803 (2012).
26. Shelkovnikov A., Butcher R.J., Chardonnet C., Amy-Klein A. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 150801 (2008).
27. Argence B., Chanteau B., Lopez O., Nicolodi D., Abgrall M., Chardonnet C., Daussy C., Darquié B., Le Coq Y., Amy-Klein A. *Nature Photon.*, **9**, 456 (2015).
28. Argence B., Chanteau B., Lopez O., Nicolodi D., Abgrall M., Chardonnet C., Daussy C., Darquié B., Le Coq Y., Amy-Klein A. *Proc. SPIE*, **9370**, 937011 (2015).
29. Tokunaga S.K., Hendricks R.J., Tarbutt M.R., Darquié B. *New J. Phys.*, **19**, 053006 (2017).
30. Mejri S., Sow P.L.T., Kozlova O., Ayari C., Tokunaga S.K., Chardonnet C., Briaudeau S., Darquié B., Rohart F., Daussy C. *Metrologia*, **52**, S314 (2015).
31. Chanteau B., Lopez O., Zhang W., Nicolodi D., Argence B., Auguste F., Abgrall M., Chardonnet C., Santarelli G., Darquié B., Le Coq Y., Amy-Klein A. *New J. Phys.*, **15**, 073003 (2013).
32. Lopez O., Chanteau B., Bercy A., Nicolodi D., Zhang W., Argence B., Abgrall M., Haboucha A., Kanj A., Rovera D., Achkar J., Pottie P.-E., Darquié B., Chardonnet C., Le Coq Y., Santarelli G., Amy-Klein A. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **467**, 012002 (2013).
33. Santagata R., Tran D.B.A., Lopez O., Argence B., Tokunaga S.K., Darquié B., Amy-Klein A., Nicolodi D., Abgrall M., Le Coq Y., Le Targat R., Xu D., Lee W.-K., Pottie P.-E. DOI: 10.1109/FCS.2017.8088928 (2017).
34. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., et al. *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transf.*, **203**, 3 (2017).