

УДК 535.3, 53.082

**КВАНТОВЫЕ ГРАВИМЕТРЫ НА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМАХ****В.А. Виноградов, К.А. Карпов, А.В. Турлапов**

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*  
winogradov@appl.sci-nnov.ru, kkarпов@appl.sci-nnov.ru, turlapov@appl.sci-nnov.ru

*Гравиметры востребованы в нескольких областях науки и техники. Вместе с картой гравитационного поля гравиметр может стать основой беспутниковой навигации. Гравиметры важны для разведки полезных ископаемых, исследований земной коры и изменений климата, создания нового поколения атомных часов, поиска гравитационных волн и квантовых эффектов в гравитации.*

*Ключевые слова: гравиметрия, ультрахолодный газ атомов, интерференция волн Дебройля.*

**QUANTUM GRAVIMETERS BASED ON ULTRACOLD ATOMS****V.A. Vinogradov, K.A. Karpov, A.V. Turlapov**

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod*  
winogradov@appl.sci-nnov.ru, kkarпов@appl.sci-nnov.ru, turlapov@appl.sci-nnov.ru

*Gravimeters find applications in several fields of science and technology. Together with a gravity-field map, a gravimeter may form a basis for a satellite-free navigation. Gravimeters are important in the search for subsoil assets, study of the earth's crust and climate change, creation of a new generation of atomic clocks, as well as in the detection of gravitational waves and quantum effects in gravity.*

*Key words: gravimetry, ultracold gas of atoms, matter-wave interference*

**1. Актуальность измерения ускорения свободного падения  $g$** 

Ускорение свободного падения  $g$  лежит в диапазоне 9,78–9,83 м/с<sup>2</sup> в зависимости от места на поверхности Земли. При подъёме на 3 мм  $g$  падает на  $10^{-9}g$ . Суточные изменения, в том числе связанные с движением Луны, составляют  $10^{-7}g$ . Наименее точные измерения с погрешностью  $\sim 10^{-9}g$  выполнены при помощи баллистического лазерного гравиметра [1] и гравиметра на ультрахолодных атомах [2, 3].

Неоднородность гравитационного поля Земли даёт возможность беспутниковой навигации. Например, в Северном ледовитом океане характерная неоднородность  $g$  на масштабе 1 км составляет  $1-5 \cdot 10^{-6}g$  [4]. В ходе эксперимента в Южно-Китайском море карта гравитационного поля с разрешением  $3-8 \cdot 10^{-6}g$  и 1,85 км бортовой гравиметр с точностью  $2 \cdot 10^{-6}g$  дали навига-

ционную ошибку 5,2 км после 36 часов плавания [5]. Этот результат можно экстраполировать так, что для ориентирования до метров нужна гравиметрия с точностью  $10^{-9}g$ . Учитывая трудности гравиметрии на подвижной платформе, более выгодным может оказаться измерение градиента  $g$  с точностью  $10^{-9} c^{-2}$ .

Гравиметры и градиентометры востребованы для поиска полезных ископаемых [6], подземных пустот и водных резервуаров, предсказания землетрясений. Изменения на уровне  $10^{-7}g$  предшествовали извержениям вулканов [7]. Точность  $10^{-9}g$  позволит наблюдать за подъёмом тектонических плит. Подобная точность также позволяет наблюдать за таянием льдов в ответ на изменения климата.

Стандарты частоты вышли на уровень относительной стабильности  $10^{-18}$  [8, 9]. Относительный сдвиг частоты из-за гравитации вблизи поверхности Земли составляет  $1,1 \cdot 10^{-18}$  на каждый сантиметр подъёма [10]. Таким образом, для достижения точности часов  $10^{-18}$  необходимо знать ускорение свободного падения в точке установки часов с точностью  $3 \cdot 10^{-9}g$ . Дальнейший рост точности часов потребует пропорционального роста точности в измерениях  $g$ .

Гравиметры с точностью выше  $10^{-9}g$  востребованы для поиска гравитационных волн в частотном диапазоне  $<10$  Гц, не доступном для детектора LIGO [7]. В этой области ожидаются гравитационные волны от слияний галактик и нейтронных звёзд [7].

Компактные гравиметры с измерениями в области 10–100 мкм интересны для поиска отклонения от  $1/r^2$  в законе притяжения. Подобные отклонения предсказаны квантовыми моделями гравитации [11], в том числе появившимися с целью разрешить парадокс тёмной энергии и тёмной материи.

Создание квантового гравиметра и градиентометра, основанного на интерференции ультрахолодных атомов, интересно с точки зрения развития методов квантовой физики. Потребуется новые решения в задачах о взаимодействии излучения с атомами для создания зеркал и делительных пластин для волн Дебройля атомов. Также потребуются новые решения в коллективной динамике атомов для подавления систематических ошибок из-за межчастичного взаимодействия и для максимально долгого сохранения когерентности.

## 2. Подходы к измерению $g$

### 2.1. Лазерный баллистический гравиметр

Лазерный баллистический гравиметр позволяет измерять ускорение свободного падения  $g$  с ошибкой  $1,1 \cdot 10^{-9}g$ . Прибор совершенствуется с 1963 го-

да [12] и в данный момент выпускается промышленно. Наиболее популярна модель FG5 [1], выпускаемая с 1992 года и имеющая заявленную производителем погрешность  $2 \cdot 10^{-9}g$ , что соответствует рассогласованию показаний нескольких приборов [1]. Внешний вид баллистического гравиметра показан на рис. 1 (левый). Для измерения  $g$  в вакууме падает зеркало оптического интерферометра, схема которого приведена на рис. 1(правый). В ходе падения подсчитывается ускоряющаяся смена максимумов и минимумов интерференции, что позволяет найти  $g$ . Модель допускает перемещение между пунктами, где работает стационарно. В ИАЭ СО РАН разработан оптический полевой гравиметр ГАБЛ-ПМ [13, 14], имеющий более компактную конструкцию, чем FG5, и в то же время несколько большую погрешность  $5 \cdot 10^{-9}g$ . Лазерные баллистические гравиметры успешно используются на стационарных площадках. На мобильных платформах, насколько известно авторам, указанные гравиметры не применялись.

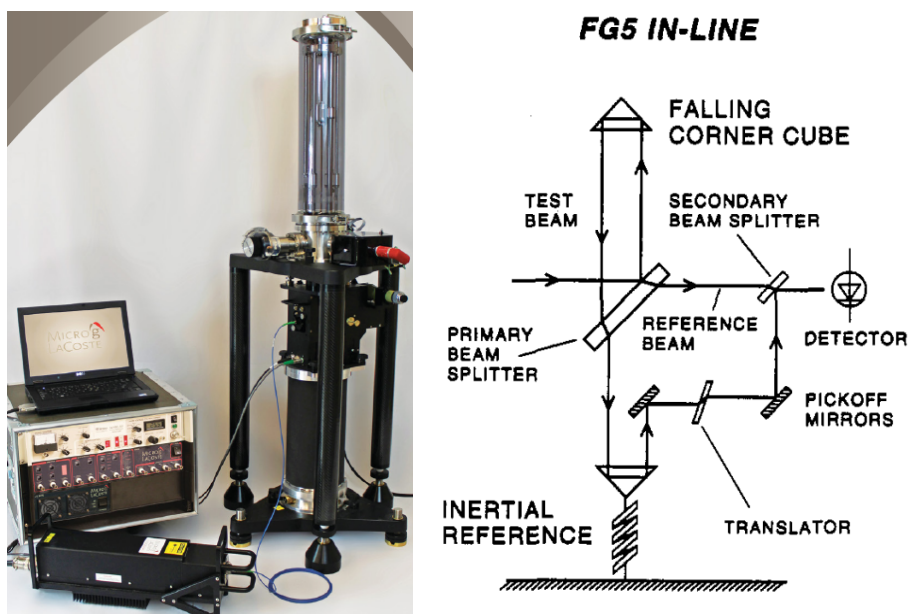


Рис. 1. Внешний вид лазерного баллистического гравиметра FG5 (с сайта [www.microgacoste.com](http://www.microgacoste.com)) (левый). Оптическая схема гравиметра из работы [1] (правый)

## 2.2. Сверхпроводящий гравиметр

Относительное измерение  $g$  наиболее точно выполняется при помощи сверхпроводящего гравиметра [15, 16], показанного на рис. 2. В гравиметре сверхпроводящий шар левитирует в магнитном поле. Мерой  $g$  является величина тока в электромагните, требуемая для левитации шара на определённом

ной высоте. Статистическая ошибка гравиметра составляет  $0,3 \text{ мкГал} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ , а дрейф нуля  $0,5 \text{ мкГал/месяц}$ . Также пара гравиметров допускает измерение градиента  $g$  с чувствительностью  $0,1 \text{ с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ . Таким образом, по точности гравиметр превосходит устройства абсолютного измерения в течение месяца после калибровки. Несмотря на выдающиеся точностные характеристики, сверхпроводящие гравиметры не использовались на мобильных платформах. По-видимому, причина состоит в высокочастотных колебаниях левитирующего шара, которые могут возбуждаться из-за колебаний платформы.

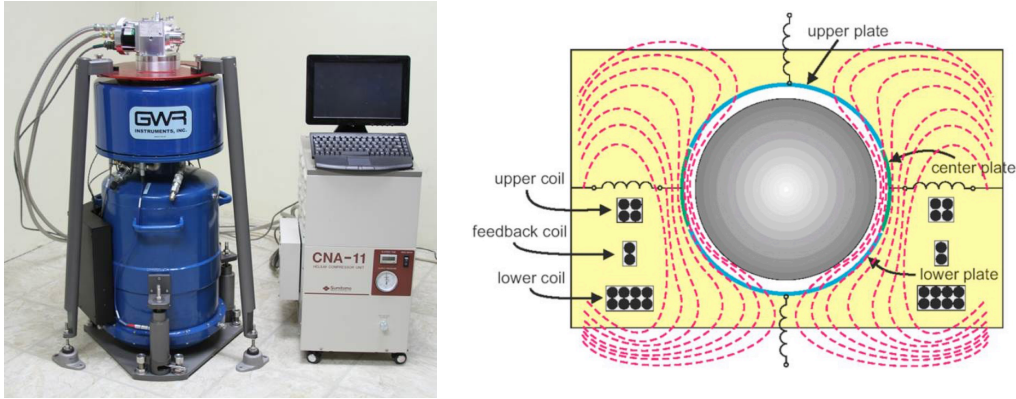


Рис. 2. Внешний вид сверхпроводящего гравиметра iGrav (левый). Схема магнитной части гравиметра. С сайта предприятия «GWR Instruments», производителя iGrav (правый)

### 2.3. Гравиметр на основе ультрахолодного газа атомов

Интерферометр на основе газа ультрахолодных атомов позволил измерить  $g$  с погрешностью  $3 \cdot 10^{-9}g$  [2, 3]. Сличение с лазерным баллистическим гравиметром дало рассогласование  $7 \cdot 10^{-9}g$  [2, 3]. На рис. 3 (левый) показана часть рекордного лабораторного гравиметра [2, 3], в которой происходит приготовление облака атомов при температуре около  $1 \text{ мкК}$ , подброс и падение облака в поле тяготения. На рисунке 3 (правый) показан гравиметр, выпускаемый предприятием «АО Sense» с 2010 года и имеющий погрешность  $10^{-8}g$ , частоту измерения  $12 \text{ Гц}$ . Гравиметр на ультрахолодных атомах применялся для измерений на корабле в море, ошибка измерения составила  $<10^{-6}g$  [17].

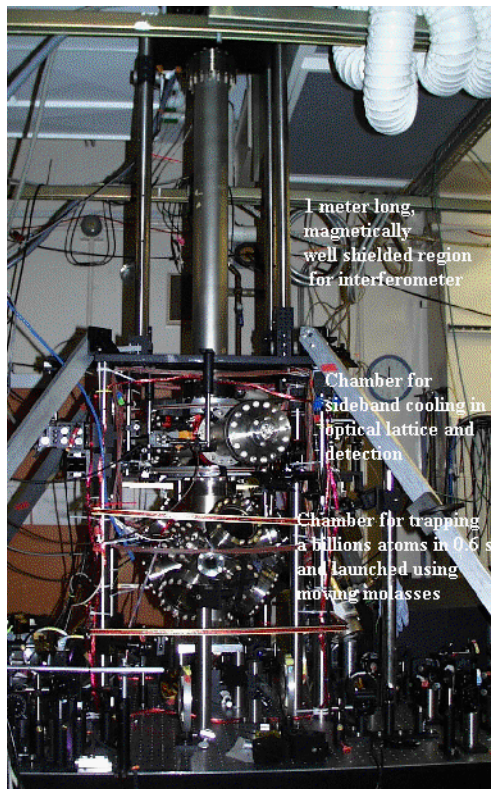


Рис. 3. Наиболее габаритная часть атомного гравиметра — атомный фонтан, то есть часть установки, в которой облако атомов охлаждается до 1 мК, подбрасывается и затем падает в поле тяготения (левый). Атомный гравиметр, выпускаемый предприятием «АО Sense» (правый). Фонтан гравиметра — вертикальный цилиндр справа (с сайта aosense.com)

Принципиальная схема работы гравиметра на ультрахолодных атомах [2, 3] показана на рис. 4 (левый). В начальный момент времени  $t = 0$  атом находится в состоянии  $|1, p\rangle$ , где первое квантовое число обозначает внутреннее состояние атома, а второе — импульс центра масс атома в вертикальном направлении. Возможные внутренние состояния обозначены на рис. 4 (правый). В момент времени  $t = 0$  включается короткий импульс «А» двух встречных световых волн с близкими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , также отмеченными на рис. 4 (правый). Импульс «А» переводит атомы в суперпозицию  $|1, p\rangle$  и  $|2, p + 2\hbar k\rangle$ , где  $k = \omega_1/c$ ,  $c$  — скорость света. Вертикальная компонента импульса атома в этих двух состояниях отличается на 2 импульса фотонной отдачи. Действие такого светового импульса на атом аналогично действию делительной пластины на фотон.

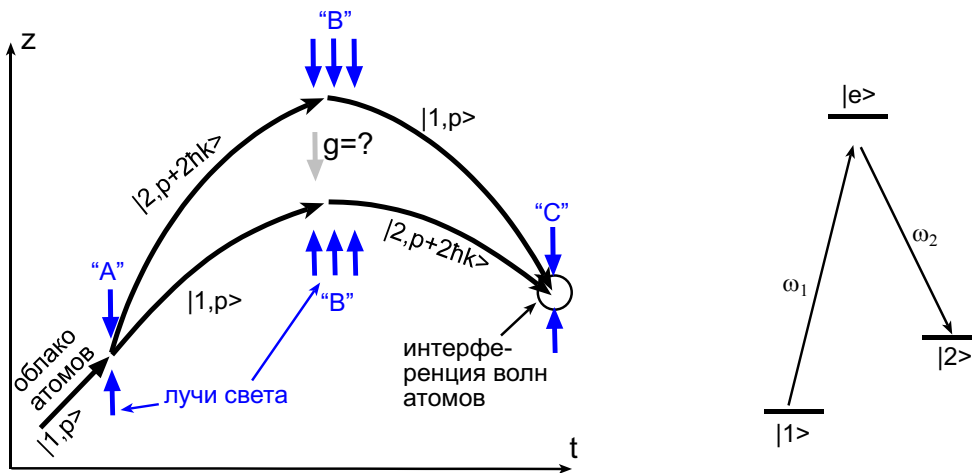


Рис. 4. Принципиальная схема работы гравиметра. Показаны интерферирующие траектории атома, соответствующие им внутренние состояния и состояния центра масс атома (левый). Внутренняя структура атома, используемого в гравиметре (правый). Также показаны частоты световых полей, используемых для воздействия на состояние атома в моменты  $t = 0$  и  $t = T$

При  $t = T$  включается короткий импульс встречных лучей «В», играющий роль зеркала, которое направляет интерферирующие траектории навстречу друг другу, и в результате при  $t = 2T$  наблюдается интерференция, считываемая импульсом «С». За время  $2T$  между верхним и нижним плечом интерферометра накапливается разность фаз

$$\Delta\phi = (2k)gT^2, \quad (1)$$

измерение которой и позволяет найти  $g$ . Максимизация  $T$  необходима для увеличения точности. Всё это время атом находится в свободном движении в поле тяготения, поэтому для максимизации  $T$  облако атомов подбрасывают непосредственно перед моментом времени  $t = 0$ , а временам  $t = 0$  и  $t = 2T$  соответствуют нижние точки траектории. Область вертикального движения атомов получила название «атомный фонтан». Высота фонтана задаёт вертикальные габариты прибора. Например, в рекордном гравиметре [18], развитии гравиметра [2, 3] высота фонтана составляет 1,4 м.

Градиентометр позволяет измерять производную  $g$  по вертикальной координате. Атомный градиентометр [19] представляет собой два гравиметра, работающие в дифференцирующем режиме. Два облака ультрахолодных атомов приготовлены в общей вакуумной камере. Облака находятся друг над другом на высоте 1,4 м. В них одновременно, с использованием одних и

тех же лазерных лучей, измеряется  $g$  и, таким образом, получается  $\partial g/\partial z$  в вертикальном направлении. Чувствительность измерения  $\partial g/\partial z$  составляет  $4 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2} \text{Гц}^{-1/2}$ . Это лучше, чем результат измерения двумя независимыми оптическими гравиметрами ( $250 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2} \text{Гц}^{-1/2}$ ).

### 3. Развитие методики измерения $g$ при помощи ультрахолодных атомов

#### 3.1. Компактизация гравиметра

В рекордном гравиметре [18] высота фонтана составляет 1,4 м. Накопление разности фаз  $\Delta\varphi$  растёт линейно с увеличением высоты фонтана, что видно из формулы (1). Высокая область подброса, которая должна экранироваться от магнитных полей, служит ограничителем на практическое использование. Принципиально более компактный гравиметр можно построить на основе колебаний Блоха в оптической решётке [20], как показано на рис. 5. Размер области измерения всего несколько десятков мкм, однако, пока что инструментальная ошибка в 100 раз выше, чем у рекордных гравиметров на атомных фонтанах [3, 18]. В работе около  $10^5$  атомов стронция охлаждаются до температуры 0,5 мкК и помещаются в вертикальную оптическую решётку (рис. 5) — стоячую оптическую волну, удерживающую атомы в максимумах интенсивности светового поля. В суммарном поле гравитации и оптической решётки возникает эффект осцилляций Зенера–Блоха — атомное облако колеблется вверх-вниз с циклической частотой

$$\omega = \frac{mg\lambda}{2\hbar}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина световой волны решётки. Измерение частоты  $\omega$  позволяет рассчитать  $g$ . Такой гравиметр, однако, принципиально менее точное устройств, чем интерферометр. В интерферометре фаза накапливается пропорционально квадрату времени, здесь — линейно по времени.

Возможность радикальной компактизации атомного интерферометра показана в 2012 году [21]. Этот новый тип гравиметра совмещает возможность квадратичного накопления фазы по закону (1), как в рекордном гравиметре [2, 3], и использование колебаний Зенера–Блоха, как в гравиметре [20]. Гравиметр в целом действует по схеме, представленной на рис. 4. Однако между световыми импульсами «А» и «В», а также между «В» и «С» не допускается свободного движения атомов. На отрезках времени  $t = 0 - T$  и  $t = T - 2T$  включена вертикальная оптическая решётка, подобная той, что показана на

рис. 5. Вместо свободного падения атомы совершают вертикальные колебания Блоха–Зенера с небольшой амплитудой. В то же время между интерферирующими траекториями накапливается разность фаз, как если бы атомы находились в свободном движении в поле тяготения. Хотя принципиально подобный метод опробован в работе [21], авторам не удалось приблизиться к рекордной точности из-за дефектов оптической решётки, вызванных оптическими спеклами (мелкомасштабными неоднородностями светового поля, которые возникают из-за рассеяния света на дефектах оптики и последующей интерференции рассеянных лучей).

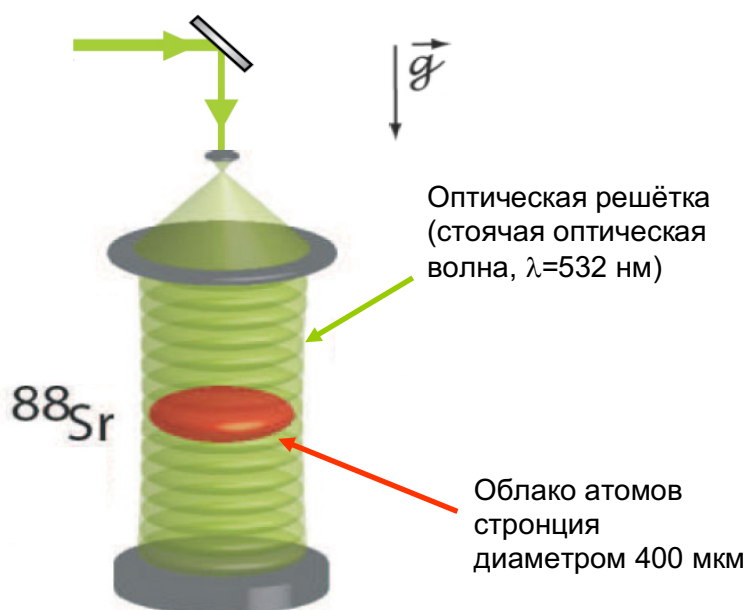


Рис. 5. Принципиальная схема рабочей области гравиметра на атомах в оптической решётке: облако из  $\sim 10^5$  атомов стронция, пленённое стоячей оптической волной (адаптировано из [20])

Метод избавления от спеклов опробован в работе [22] и состоит в создании оптической решётки при помощи небольшого добротного оптического резонатора Фабри–Перо. Такое решение, однако, затрудняет создание двух далеко разнесённых областей интерференции друг над другом с общими «делительными пластинами» и «зеркалами» для волн Дебройля, то есть усложняет создание градиентометра.

Другой способ уменьшения числа спеклов состоит в радикальном уменьшении числа оптических элементов в системе и, таким образом, уменьшении источников для рассеяния света и образования спеклов. При создании



оптической решётки все оптические элементы могут быть заменены единственной фазовой пластиной, которая и будет формировать коллимированный луч, рис. 6 (левый). Пара таких встречных лучей образует оптическую решётку. Одновременно фазовая пластина будет окном вакуумной камеры. Более того, для избавления от небольшого числа оптических спеклов, возникающих на фазовой пластине, в эту пластину можно вживить дифракционную решётку Брегга и использовать 1-й порядок дифракции, в то время как спеклы в большинстве пойдут в недифрагированный луч, рис. 6 (правый). Использование колебаний Зенера–Блоха между импульсами «делительных пластин» и «зеркал» позволяет отказаться от атомного фонтана и построить гравиметр с областью приготовления и движения атомов порядка сантиметра.

### 3.2. Выбор атома

Как в рекордном гравиметре [2, 3, 18], так и в работе с вертикальным захватом [21], открывшей путь к компактизации, использованы атомы щелочных металлов Cs и Rb соответственно. Эти атомы просты в плане лазерного пленения и охлаждения. Также у них есть сверхтонкое расщепление основного состояния, что полезно при приготовлении атома в суперпозиции состояний с разными импульсами. В то же время Cs и Rb обладают двумя недостатками: во-первых, магнитным моментом из-за валентного электрона, что ведёт к систематическим ошибкам из-за внешних магнитных полей, и во-вторых, большой длиной рассеяния, которая приводит к нежелательному среднеполевому сдвигу разности фаз.

Для избежания этих систематических эффектов можно использовать атом из II группы таблицы Менделеева. Во-первых, магнитный момент значительно меньше из-за того, что валентных электронов два. Во-вторых, также значительно меньше длина рассеяния. Однако методика лазерного охлаждения этих атомов значительно сложнее, чем у щелочных металлов.

Литий является ещё одним вариантом атома. Он так же, как Rb и Cs, относится к щелочным металлам, у него неспаренный электрон, поэтому сохраняется чувствительность к магнитным полям. В случае бесфонтанной конфигурации, однако, объём, требующий экранировки от внешних магнитных полей, снижается. В то же время, длина  $s$ -рассеяния лития-6 в нулевом магнитном поле равна 0, что избавляет от среднеполевых сдвигов. Полезным свойством лития является его малая масса. Из формулы (2) видно, что частота колебаний Зенера–Блоха пропорциональна массе. Значит, литий менее часто, чем рубидий или цезий, будет подвергаться декогеренции из-за взаимодействия со спеклами оптической решётки. Основной электронный уровень лития обладает сверхтонкой структурой, полезной для работы

«делительной пластины» и «зеркала».

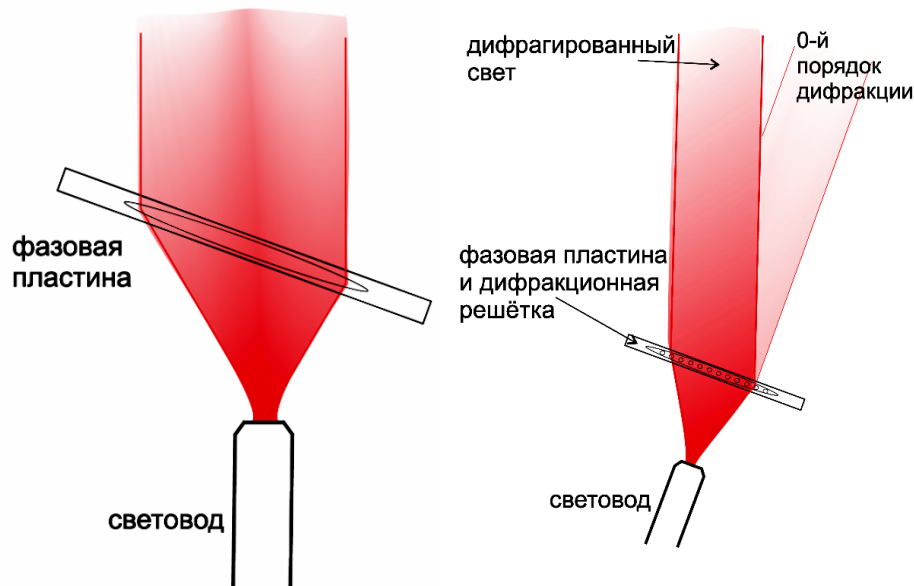


Рис. 6. Схема для минимизации оптических спеклов в системе. Все оптические элементы будут заменены единственной фазовой пластиной, которая и будет формировать коллимированный луч (слева). Пара таких встречных лучей образует оптическую решётку (справа). Совмещение фазовой пластины с дифракционной решёткой. Для создания оптической решётки используется 1-й порядок дифракции, в то время как спеклы от фазовой пластины идут в 0-й порядок дифракции

### 3.3. Делительная пластина и зеркало для волны Дебройля атома

Для волны Дебройля атома и зеркало, и делительная пластина представляют собой почти стоячую оптическую волну, которая медленно движется со скоростью  $c(\omega_1 - \omega_2)/(\omega_1 + \omega_2)$ . Зеркало изменяет состояние центра массы атома на несколько импульсов фотонной отдачи  $\hbar k$ , а делительная пластина помещает центр массы в суперпозицию состояний, опять же отличающихся на несколько  $\hbar k$ . Для увеличения площади и точности интерферометра необходимо сделать передаваемый импульс максимально большим. Существуют различные варианты создания «делительных пластин» и «зеркал». В частности, показана возможность передачи импульса вплоть до  $102 \hbar k$  [23].

Для максимально большого расщепления состояния центра масс атома можно использовать «делительную пластину», основанную на различном действии света на сверхтонкие состояния атома  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$ , как показано на рис. 7. В этой схеме стоячая волна создаёт для состояний  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$  периодические потенциалы, к которым добавлен наклон в разные стороны. Воздействие потенциалов в течение  $1/4$  периода колебаний Блоха–Зенера приведёт

к передаче максимально возможного импульса, причём для состояний  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$  импульсы будут противоположными. Противоположный наклон потенциалов на рис. 7 достигается воздействием градиента интенсивности света, частота которого имеет разную по знаку отстройку от резонансов для соответствующих состояний.

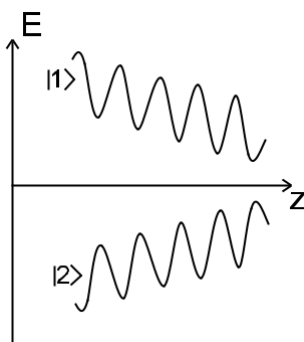


Рис. 7. Селективное воздействие поля «делительной пластины» на основные сверхтонкие состояния атома  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$ . Для состояния  $|1\rangle$  к пространственной периодической модуляции добавлен отрицательный наклон, а для  $|2\rangle$  — положительный

### Заключение

Гравиметрия актуальна для задач навигации, поиска полезных ископаемых, исследования динамики земной коры, совершенствования атомных часов. С точки зрения фундаментальных исследований гравиметры могут применяться для поиска гравитационных волн в недоступных ранее частотных диапазонах и поиска гравитационных эффектов, не описываемых общей теорией относительности. Наиточнейшие гравиметры выполнены на основе падающего зеркала, левитации сверхпроводящего шара и интерференции ультрахолодных атомов. Последний вариант гравиметра применялся на подвижной платформе и, таким образом, может найти применение в задачах навигации и зондирования Земли с подвижного носителя. Актуальна задача совершенствования гравиметров на ультрахолодных атомах, в том числе задача дальнейшей компактизации и адаптации к применению на подвижных платформах.

Авторы благодарят РФФИ за поддержку в рамках реализуемого проекта.

---

**Литература**

1. Niebauer T.M., Sasagawa G.S., Faller J.E., Hilt R., Klopping F. A new generation of absolute gravimeters // *Metrologia*. 1995. Jan. V. 32, № 3. P. 159–180.
2. Peters Achim, Chung Keng Yeow, Chu Steven. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms // *Nature (London)*. 1999, Aug. V. 400. P. 849–852.
3. Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry // *Metrologia*. 2001. V. 38, no. 1. P. 25.
4. Глазко Э. Э., Соколов А. В., Краснов А. А. Результаты морской гравиметрической съёмки в полярных широтах гравиметрами «Чекан-АМ» и «Шельф-Э» // *Навигация и гидрография*. 2015. Т. 41. С. 47–51.
5. Wang H., Wu L., Chai H., Bao L., Location Wang Y. Accuracy of INS/Gravity-Integrated Navigation System on the Basis of Ocean Experiment and Simulation // *Sensors*. 2017, Dec. V. 17. № 12. P. 2961.
6. Nabighian M. N., Ander M. E., Grauch V.J.S., Hansen R.O., LaFehr T.R., Li Y., Pearson W.C., Peirce J.W., Phillips J.D., Ruder M.E. Historical development of the gravity method in exploration // *Geophysics*. 2005. V. 70, № 6. P. 63ND–89ND.
7. Van Camp Michel, de Viron Olivier, Watlet Arnaud, Meurers Bruno, Francis Olivier, Caudron Corentin. Geophysics From Terrestrial Time-Variable Gravity Measurements // *Reviews of Geophysics*. 2017. V. 55, № 4. P. 938–992.
8. Вишнякова Г.А., Головизин А., Калганова Е.С., Сорокин В.Н., Сукачёв Д.Д., Трегубов Д.О., Хабарова К.Ю., Колачевский Н.Н. Ультрахолодные лантаноиды: от оптических часов до квантовых симуляторов // *УФН*. 2016. Т. 186. Вып. 2. С. 176–182.
9. Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н. Сверхточные оптические стандарты частоты на ультрахолодных атомах: состояние и перспективы // *УФН*. 2016. Т. 186. Вып. 2. С. 193–205.
10. McGrew W.F., Zhang X., Fasano R.J., Schäffer A., Beloy K., Nicolodi D., Brown R.C., Hinkley N., Milani G., Schioppo M., Yoon T.H., Ludlow A.D. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level // *Nature*. 2018, Dec. V. 564. P. 87–90.
11. Alexander D. Rider, David C. Moore, Charles P. Blakemore, Maxime Louis, Marie Lu, Giorgio Gratta. Search for Screened Interactions Associated with Dark Energy below the 100  $\mu\text{m}$  Length Scale // *Phys. Rev. Lett.* 2016, Aug. V. 117. P. 101101.
12. Faller J.E. Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances // *Metrologia*. 2002. V. 39, № 5. P. 425.

13. Бунин И.А., Калиш Е.Н., Носов Д.А., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф. Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр // *Автометрия*. 2010. Т. 46. Вып. 5. С. 94–102.
14. Патент РФ на полезную модель 99194. Лазерный баллистический гравиметр. Оpubл. 10.11.2010. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели». №. 31, 2010.
15. Prothero Jr. W.A., Goodkind J.M. A Superconducting Gravimeter // *Review of Scientific Instruments*. 1968. V. 39, № 9. P. 1257–1262.
16. Goodkind J. M. The superconducting gravimeter // *Review of Scientific Instruments*. 1999. V. 70. № 11. P. 4131–4152.
17. Bidel Y., Zahzam N., Blanchard C., Bonnin A., Cadoret M., Bresson A., Rouxel D., Lequentrec-Lalancette M.F. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry // *Nature Communications*. 2018. V. 9. P. 627.
18. Müller Holger, Chiow Sheng-wei, Herrmann Sven, Chu Steven, Chung Keng-Yeow // *Atom-interferometry tests of the isotropy of post-newtonian gravity* // *Phys. Rev. Lett.* 2008, Jan. V. 100. P. 031101.
19. McGuirk J.M., Foster G.T., Fixler J.B., Snadden M.J., Kasevich M.A. Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry // *Phys. Rev. A*. 2002, Feb. V. 65. P. 033608.
20. Poli, Wang F.-Y., Tarallo M.G., Alberti A., Prevedelli M., Tino G.M. Precision measurement of gravity with cold atoms in an optical lattice and comparison with a classical gravimeter // *Phys. Rev. Lett.* 2011, Jan. V. 106. P. 038501.
21. Charrière Renée, Cadoret Malo, Zahzam Nassim, Bidel Yannick, Bresson Alexandre. Local gravity measurement with the combination of atom interferometry and Bloch oscillations // *Phys. Rev. A*. 2012, Jan. V. 85. P. 013639.
22. Xu Victoria, Jaffe Matt, Panda Cristian D., Kristensen Sofus L., Clark Logan W., Müller Holger. Probing gravity by holding atoms for 20 seconds / *arXiv:1907.03054*.
23. Chiow Sheng-wei, Kovachy Tim, Chien Hui-Chun, Kasevich Mark A.  $102\hbar k$  Large Area Atom Interferometers // *Phys. Rev. Lett.* 2011, Sep. V. 107. P. 130403.