

УДК 539.164

# ГАВИТАЦИОННАЯ ГАММА-РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТОНКИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Ю.Б. Новожилов, А.В. Давыдов, Ю.Н. Исаев, М.М. Коротков,  
В.В. Мигачев

НИИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва  
novozhil@itep.ru, Andrey.Davydov@itep.ru, Yuri.Isaev@itep.ru, korotkov25@bk.ru,  
Vasiliy.migachev@bk.ru

*Описаны принципы гравитационной гамма-резонансной спектроскопии в сравнении с классическими методами. Приведена схема экспериментальной установки ИТЭФ для гравитационной гамма-резонансной спектроскопии долгоживущих изомеров и полученные экспериментальные результаты. Обсуждены ожидаемые результаты для нового гравитационного гамма-резонансного спектрометра долгоживущего изомера  $^{103m}\text{Rh}$ . Рассмотрены перспективы принципиально новой технологии использования гравитационного поля для изучения гамма-резонансов долгоживущих изомеров и использования сверхузких гамма-резонансов для точных гравитационных измерений.*

*Ключевые слова:* гравитационная гамма-резонансная спектроскопия, экспериментальная установка, экспериментальные результаты.

## GRAVITATIONAL GAMMA-RESONANCE SPECTROMETRY OF LONG-LIVED NUCLEAR ISOMERS AND POSSIBILITY OF ITS APPLICATION FOR STUDYING FINE GRAVITATIONAL EFFECTS

*Yu.B. Novozhilov, A.V. Davydov, Yu.N. Isaev, M.M. Korotkov,  
V.V. Migachev*

NRC «Kurchatovskii institute» - ITEP, Moscow  
novozhil@itep.ru, Andrey.Davydov@itep.ru, Yuri.Isaev@itep.ru, korotkov25@bk.ru, Vasiliy.migachev@bk.ru

*The principles of gravitational gamma-resonance spectrometry are described in comparison with classical methods. The scheme of the ITEP experimental setup for gravitational gamma-resonance spectrometry of long-lived isomers and the experimental results are presented. The expected results for the new  $^{103m}\text{Rh}$  long-lived gamma-resonance spectrometer are discussed. The prospects of a fundamentally new technology for using the gravitational field to study gamma resonances of long-lived isomers and the use of ultra-narrow gamma resonances for accurate gravitational measurements are considered.*

*Key words:* gravitational gamma-resonance spectrometry, experimental setup, expected result.

## 1. Классическая Мессбауэрская гамма-резонансная спектроскопия

Эффект резонансного испускания – поглощения ядром гамма кванта известен достаточно давно. Как всякий, достаточно узкий резонансный эффект, его заманчиво использовать для различных точных измерений не только в физике, но и в самых разнообразных прикладных областях от медицины до истории [1]. Характерная точность таких измерений определяется шириной резонансной линии.

Любое ядро, имеющее линию испускания – поглощения гамма-квантов, имеет естественную ширину этой линии, определяемую соотношением неопределенности  $\Delta E \tau = \hbar$ , где  $\Delta E = \Gamma_{\text{естеств}}$ , разброс по энергии резонансно испущенных поглощенных гамма-квантов (ширина гамма-линии),  $\tau$  – среднее время жизни линии,  $\hbar$  – постоянная Планка. Т.е. чем длительнее среднее время жизни уровня, тем уже естественная ширина линии.

В подавляющем большинстве случаев для прикладного использования гамма-резонансной спектроскопии используется недорогой, широко распространенный и хорошо изученный изотоп  $^{57}\text{Fe}$ .

Характерное среднее время жизни линии  $^{57}\text{Fe}$ , пригодной для гамма-резонансной спектроскопии, составляет  $\sim 1,4 \cdot 10^{-7}$  с, чему соответствует ширина линии  $\sim 4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ. Но испустив гамма-квант, ядро получало отдачу, и энергия испущенного гамма выходила за границу резонанса. Тот же процесс происходил и при поглощении гамма-кванта, что еще дальше сдвигало энергию гамма-кванта от резонанса (см. рис 1).

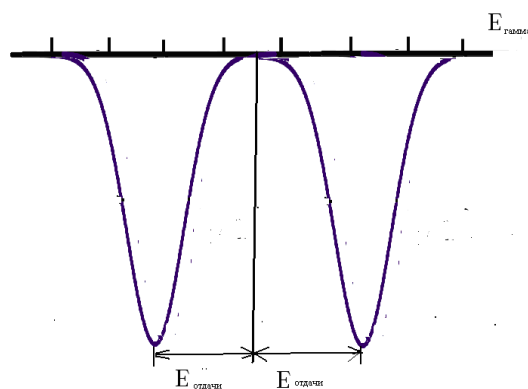


Рис. 1. Расхождение пиков испускания и поглощения гамма-квантов конкретного гамма-перехода (линии) в отсутствие эффекта Мессбауэра на величину энергии отдачи ядра при испускании гамма. Резонанса нет

Открытие Рудольфом Мессбауэром эффекта испускания гамма-кванта кристаллом без отдачи, вернее с передачей импульса отдачи всему кристаллу, позволило использовать гамма-кванты для точных измерений.

таллу в целом, дало новые возможности для гамма-резонансной спектроскопии. Тем самым испущенный гамма-квант испускался с энергией, позволявшей ему поглотиться таким же ядром в резонансной моде (см. рис 2.). Криогенная техника, применяемая для использования эффекта Мессбауера, способствует уменьшению температурного размывания ширины резонансной гамма-линии.

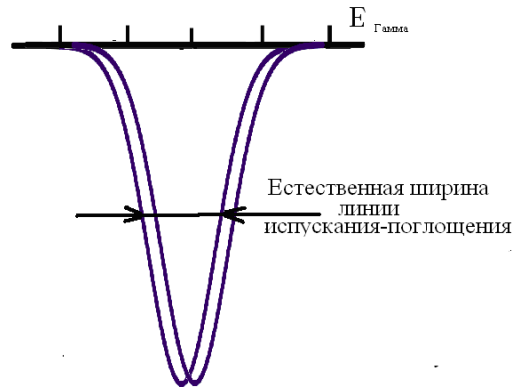


Рис. 2. При испускании ядром гамма-кванта без отдачи (в мессбауерской моде) пики испускания и поглощения перекрываются, что дает возможность реализовать резонансный процесс

Для прорисовки линии резонансного испускания - поглощения необходимо уметь управляемо сдвигать энергию испущенного гамма-кванта относительно ее резонансного значения на поглотителе на величину естественной ширины резонанса. Используемый изотоп  $^{57}\text{Fe}$  имеет гамма линию с энергией  $E_\gamma = 14,4$  кэВ и средним временем жизни  $\tau = 1,4 \cdot 10^{-7}$  с. Т.е. ожидаемая естественная ширина линии  $\Delta E_\gamma = \Gamma_{\text{естеств}} = 4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ. Для прорисовки линии испускания-поглощения по энергии гамма-кванта от резонансного значения до полного расстройства резонанса используется эффект Доплера – движения источника гамма относительно поглотителя:

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma \cdot v/c,$$

где  $E_\gamma$  - энергия гамма-кванта при испускании.

$v$  – скорость поглотителя относительно испускателя,

$c$  – скорость света,

$\Delta E_\gamma$  – сдвиг энергии гамма-кванта на поглотителе относительно его энергии при испускании из-за эффекта Доплера относительного движения источника и поглотителя.

При этом чтобы энергия гамма-кванта была на поглотителе смещена на величину естественной ширины линии  $\Delta E_\gamma = \Gamma_{\text{естеств}} = 4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ, требуются скорости масштаба мм/с - см/с. Такие скорости обеспечивают простые механические устройства. С ними и работают.

## 2. Долгоживущие ядерные изомеры. Заманчивость и трудности их использования в гамма резонансной спектроскопии

Помимо широко используемого изотопа железа  $^{57}\text{Fe}$  существуют ядерные изомеры, которые имеют гамма-линии, пригодные для работы в мессбауерской моде. Некоторые из них имеют среднее время жизни гамма-линий много большее, чем наносекунды, характерное для железа. Ядерный изомер серебра  $^{109\text{m}}\text{Ag}$  имеет линию с энергией  $E_\gamma = 88,03$  кэВ и средним временем жизни  $\tau = 57,7$  с [2]. В этом случае можно ожидать естественную ширину линии  $\Gamma_{\text{естеств}} = \Delta E_\gamma = 1,14 \cdot 10^{-17}$  эВ.

Т.к. любые измерения методом Мессбауерской гамма-резонансной спектроскопии делаются с точностью до ширины резонанса, то очень заманчиво суметь улучшить точность измерений с  $4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ, характерной для железа  $^{57}\text{Fe}$ , до  $1,14 \cdot 10^{-17}$  эВ, характерной для серебра  $^{109\text{m}}\text{Ag}$ . При этом возникает техническая трудность прорисовки линии испускания - поглощения, т.к. скорость движения источника относительно поглотителя для сдвига энергии гамма-кванта относительно его резонансного значения с использованием эффекта Доплера будет составлять  $\sim 10^{-12} - 10^{-13}$  [см/с]. Для экспериментальной техники такие скорости пока не доступны.

## 3. Гравитационная Мессбауерская гамма-резонансная спектроскопия

Как известно из успешных опытов Паунда, Ребке [3, 4], гамма-квант двигаясь в гравитационном поле вертикально вверх или вниз, приобретает или теряет часть своей энергии, т.е. «синел» или «краснел» в зависимости от перепада высот точек испускания и поглощения:

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma g \Delta h / c^2,$$

где  $\Delta E_\gamma$  – сдвиг энергии гамма-кванта при прохождении перепада высот  $\Delta h$  в гравитационном поле Земли с ускорением свободного падения  $g$ ,

$E_\gamma$  – энергия гамма кванта при испускании,

$g$  – ускорение свободного падения,

$\Delta h$  – перепад высот точек испускания и поглощения гамма-кванта,

$c$  – скорость света.

Оценка разности высот в гравитационном поле Земли на уровне моря дала значение перепада высот – микрометры, которых достаточно, чтобы расстроить крайне узкий резонанс испускания-поглощения гамма-квантов долгоживущего изомера серебра, в предположении отсутствия процессов значительно уширяющих линию относительно ее естественной ширины.

Группой гамма-резонансной спектроскопии ИТЭФ под руководством

А.В. Давыдова был сделан гравитационный мессбауерский гамма-резонансный спектрометр, позволивший детально изучить линию испускания-поглощения изомера серебра. Спектрометр был запатентован –

*Альманах современной метрологии, 2020, № 4 (24)*

патент России 2404441 от 12 октября 2009 года [5, 6].

К слову сказать, перепад высот для расстройства резонансного поглощения железа ( $\Delta E_\gamma = \Gamma_{естества} = 4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ) должен составлять порядка 3 км. Опыты Паунда–Ребке проводились на железе, но применялся комбинированный спектрометр. Дополнительно к гравитационному сдвигу там использовался сдвиг доплеровский [3].

#### 4. Работы в ИТЭФ по определению ширины линии долгоживущего изомера $^{109m}\text{Ag}$

В Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва, ИТЭФ) были проведены работы по измерению ширины и формы линии испускания - поглощения резонансных гамма-квантов долгоживущего изомера серебра  $^{109m}\text{Ag}$  с помощью гравитационного мессбауерского гамма-резонансного спектрометра.

##### 4.1. Основные идеи

Идеологически схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

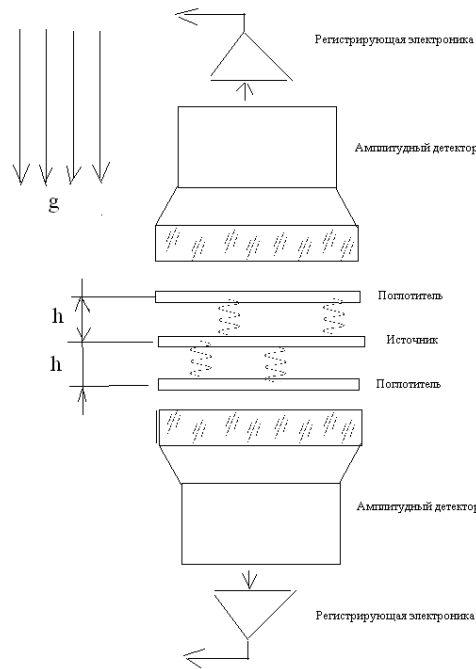
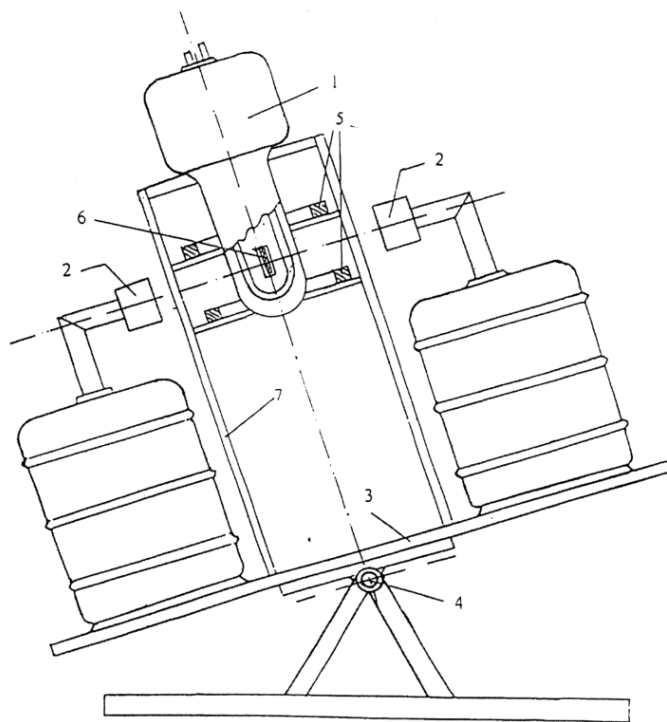


Рис. 3. Принцип работы гравитационного мессбауерского гамма-резонансного спектрометра. На рисунке не показан гелиевый криостат, в котором должны находиться источник гамма-квантов и поглотитель. Наличие двух плеч – направление вверх и вниз не обязательно. Достаточно в любую одну сторону.  $g$  – ускорение свободного падения.  $h$  – перепад высот точек испускания и поглощения

В центре установки располагалась тонкая пластина источника резонансных гамма-квантов. Над и под ней имелись аналогичные пластины поглотителей, над и под которыми стояли амплитудные детекторы гамма-квантов. Расстояние между пластиной-источником и пластинами-поглотителями гамма-квантов и составляло тот самый перепад высот между точками испускания и поглощения, который способен изменить энергию гамма-кванта относительно ее резонансного значения вверх или вниз. При этом наличие двух плеч обязательным не является.

#### 4.2. Краткое описание установки

На рис. 4. схематически изображена реальная экспериментальная установка.



- 1- гелиевый криостат для источника-поглотителя гамма-квантов
- 2- полупроводниковые криогенные (жидкий азот) амплитудные детекторы гамма-квантов
- 3- наклоняемая платформа
- 4- ось наклона платформы
- 5- кольца Гельмгольца для компенсации геомагнитного поля в рабочей зоне
- 6- источник-поглотитель  $^{109m}\text{Ag}$

Рис. 4. Схема реальной установки

Основным элементом спектрометра являлась пластина из серебра толщиной 2 мм, с двух сторон в которую был электроимплантирован кадмий. После цепочки превращений [2] у нас имелась единая деталь – источник-поглотитель, симметричная с двух сторон. Наличие единой детали уменьшало влияние механических посторонних вибраций, которые могли размыть (уширить) резонансный эффект. Гамма-квант, родившийся с одной стороны пластины, пройдя толщину пластины, мог резонансно поглотиться с другой стороны. Пластина монтировалась в гелиевом криостате. С двух сторон размещались амплитудные полупроводниковые гамма-детекторы, которые находились в азотных криостатах и формировали два измерительных плеча. Вся установка размещалась на платформе, угол наклона которой относительно горизонта можно было менять в фиксированных пределах. Тем самым при наклоне платформы точки испускания гамма-кванта и точка его поглощения приобретали нужный перепад высот. Имелась система колец Гельмгольца, которая компенсировала составляющую геомагнитного поля. О его влиянии на процессы еще будет сказано.

### 4.3. Краткое описание методики измерений

Перед началом измерений платформа выставлялась параллельно плоскости горизонта с геодезической точностью. При этом должно было быть максимальное резонансное поглощение гамма-квантов, и счет гамма-счетчиков был минимален.

Сигнал счетчиков направлялся через цепочки усилителей на амплитудный анализатор. Интересующий нас пик от гамма-резонанса  $^{109m}\text{Ag}$  был хорошо заметен. Калибровку анализатора непрерывно по мере измерения проверяли по хорошо известному пику  $^{206}\text{Am}$ , микрограммы которого были размещены рядом с исследуемым серебром и который никакого гамма-резонансного поглощения не испытывал. Сигнал же от америция проходил по тому же регистрирующему электронному каналу, как и сигнал резонансных гамма-квантов. Энергетическое разрешение детекторов не позволяло непосредственно выделить нужные нам гамма-кванты. Пик серебра, в котором были в основном нужные нам гамма-кванты, но и фоновые тоже, по амплитуде сигнала выделялся от нижней до верхней границ ширины пика на амплитудном анализаторе, и регистрировалось число событий в пике за фиксированное время для каждого углового положения. Аналогично регистрировался пик от америция. Искомым счетом считалось отношение числа событий в этих двух пиках в относительных единицах.

Экспериментальная платформа наклонялась на угол до +/- 7 градусов через 0,5 градуса. Время регистрации одной серии отсчета было зафиксировано и составляло ~ 500 с. Симметричные плечи позволяли независимо контролировать и одновременно регистрировать значения величины резо-

нансного поглощения гамма-квантов при сдвиге их по энергии в разные стороны («посинение» и «покраснение»). Коллимирование осуществлялось размером источника гамма-квантов и размером активной зоны гамма-детектора.

Геомагнитное поле расщепляет линию испускания - поглощения гамма-квантов. Если расщепления нет, то интенсивность испускания  $=1$  и такое же поглощение даст полный вклад  $1 \times 1 = 1$ . Если линия расщеплена, например, на две по  $0,5$ , то каждая из расщепленных линий поглощается только своей, и полный вклад составит  $0,5 \times 0,5 = 0,25$  [7]. Этот эффект нами наблюдался, и чтобы минимизировать вклад расщепления, была сделана система компенсации геомагнитного поля в измеряемой зоне. При измерениях точки чередовались – со скомпенсированным полем, и с нескомпенсированными впоследствии обрабатывались отдельно.

Полный сеанс измерений включал многократное прохождение по всем углам, продолжался круглосуточно, на протяжении двух–трех недель. За это время успевала снизиться активность препарата. Снижение активности по падению полного счета в исследуемом амплитудном пике можно зафиксировать. Это снижение очень хорошо согласовывалось со справочными данными, и в дальнейшем при обработке на это делалась поправка.

#### **4.4. Главные результаты**

В результате эксперимента была впервые прорисована линия резонансного поглощения гамма-квантов долгоживущего изомера серебра  $^{109m}\text{Ag}$ . Были подтверждены идеи гравитационной гамма-резонансной мессбауерской спектрометрии, на основе которых был создан первый в мире гравитационный спектрометр. Открыто новое направление возможности исследования других долгоживущих ядерных изомеров.

Удивительным физическим результатом эксперимента является практически отсутствие уширения гамма-линии долгоживущего изомера серебра  $^{109m}\text{Ag}$  относительно его естественного значения. Уширение в  $7_{-2,5}^{+7,3}$  раз.

Данный факт пока не нашел своего теоретического истолкования.

Результаты измерений представлены на рис. 5.



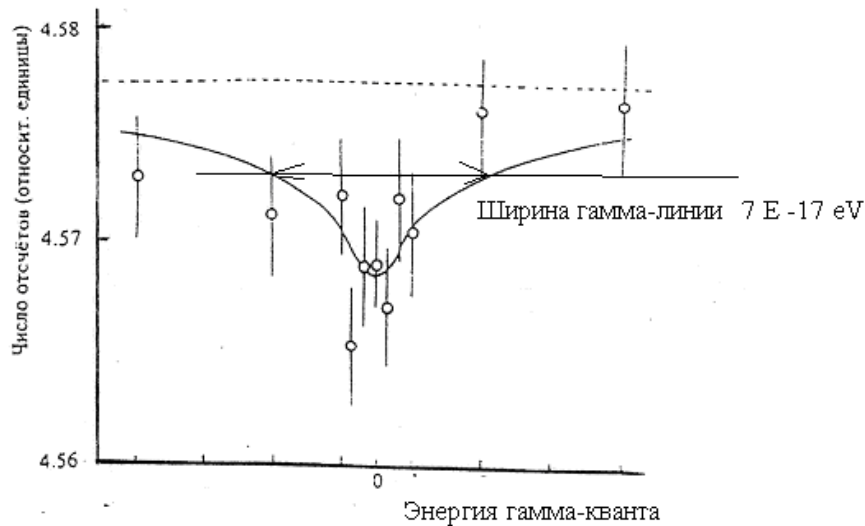


Рис. 5. На рисунке представлен относительный счет прошедших резонансных поглотителей гамма-квантов в зависимости от угла наклона прибора (т.е. от перепада высот точек испускания и поглощения или же энергии гамма-кванта на поглотителе)

## 5. Направление продолжения работ по гравитационной гамма-резонансной спектроскопии

Другим интересным кандидатом на изучение методом гравитационной гамма-резонансной мессбауерской спектроскопии является долгоживущий изотоп родия  $^{103m}\text{Rh}$ . Изотоп родия имеет уровень с энергией  $E_\gamma = 39,75$  кэВ, что делает возможным использование эффекта Мессбауера, и среднее время жизни этого уровня составляет  $\tau = 80,9$  минуты [8]. Это обещает естественную ширину линии  $\Delta E_\gamma = \Gamma_{\text{естеств}} = 1,3 \cdot 10^{-19}$  эВ, что примерно в 85 раз уже, чем у серебра. Свойства родия близки к свойствам серебра, и можно ожидать очень малое уширение линии относительно его естественного значения, как это наблюдалось в серебре. Дебаевская температура родия равна 480 К, что должно давать возможность испускать – поглощать гамма-кванты родием в мессбауерской моде при комнатной температуре.

Группа гравитационной мессбауерской гамма-резонансной спектроскопии в ИТЭФ построила макет родиевого спектрометра [6] на тех же принципах, что и для серебра. В новом спектрометре много точнее осуществлено позиционирование по углу наклона и установлен сделанный в ИТЭФ

коллиматор гамма-квантов с угловой расходимостью  $\sim 0,2$  градуса [9].

Если при комнатной температуре эффект для родия не будет обнаружен, то планируется установить низкотемпературный криостат и повторить измерения при температуре жидкого гелия.

## **6. Возможности применения гравитационной гамма-резонансной спектроскопии в будущем**

Узость резонансной линии долгоживущего изомера серебра  $\Delta E_\gamma = \Gamma_{естеств} = 1,14 \cdot 10^{-17}$  эВ экспериментально доказана. Можно ждать от других долгоживущих изомеров ( $^{103m}\text{Rh}$ ) еще более узких линий или же возможности работать при комнатной температуре без потери точности. Эти и некоторые другие особенности позволяют говорить о новых направлениях использования гравитационной мессбауерской гамма-резонансной спектроскопии как в физике, так и в технических приложениях.

### **6.1. В науке**

Резкое повышение точности всех экспериментов, использующих мессбауерскую гамма-резонансную спектроскопию. От ширины резонанса  $^{57}\text{Fe} \sim 4,7 \cdot 10^{-9}$  эВ сейчас до  $\sim 1,3 \cdot 10^{-19}$  эВ на  $^{103m}\text{Rh}$  в обозримом будущем.

Развитие самой методики с возможным использованием комбинированных установок для долгоживущих изомеров, перепад высот для которых слишком велик, для применения чисто гравитационного сдвига энергии гамма-кванта - при высокой точности работы с узкими гамма-линиями.

Возможно также повторение с более высокой точностью экспериментов Паунда – Ребке.

Возможно будет воспроизвести с более высокой точностью эксперименты по сравнению инертной и гравитационных масс.

Открывается принципиальная возможность проверить анизотропию массы Вселенной.

И много-много еще чего.

### **6.2. Технические применения**

Наличие очень узкого и острого резонанса и возможность смены положения измеряемой точки на резонансной кривой при колебаниях гравитационного потенциала (ускорения свободного падения) приводит к огромному количеству возможных применений в технике.

Зафиксировав какую-то точку на крутом склоне узкой резонансной кривой, можно измерять изменения ускорения свободного падения от любых причин. Малое изменение гравитации приведет к ощутимому изменению потока регистрируемых резонансных гамма-квантов. Оценка

точности дает  $\Delta g/g \sim 10^{-13}$ . Такое изменение ускорения свободного падения полностью выведет систему из резонанса. Современные статические гравиметры имеют характерную точность  $\Delta g/g \sim 10^{-9}$ .

Ускорение свободного падения зависит от широты места за счет центростремительного ускорения от вращения Земли. Перекалибровав шкалу, можно мерить географическое положение, не взаимодействуя с внешними объектами.

Ускорение свободного падения зависит от высоты (расстояния от центра Земли). Мерить высоту с помощью измерения изменения гравитационного потенциала есть метод более непосредственный, чем измерять высоту с помощью измерения изменения атмосферного давления.

Если прибор может мерить изменение ускорения свободного падения с точностью  $\Delta g/g \sim 10^{-13}$ , то нет причин не мерить ему любое ускорение с такой же точностью. При этом отсутствуют подвижные тестовые массы, характерные для приборов автономного инерционного позиционирования сегодня.

Если прибор может мерить любое ускорение, то он сможет мерить и центростремительное ускорение любых вращающихся объектов с той же точностью и без использования внешних не вращающихся маркеров.

Реализация этих и еще многих других применений без сомнения потребует большого объема прикладных исследований и конкретных конструкторских работ. Но подумать об этом стоит.

### 6.3. Размышления о будущем

Чувствительность гравитационного гамма-резонансного спектрометра к изменению гравитационного поля вполне сопоставима с чувствительностью лазерных интерференционных гравитационных обсерваторий типа LIGO, но измеряется при этом непосредственно изменение гравитационного потенциала (ускорения свободного падения), который с обязательностью изменится (качнется) гравитационной волной. Изменение ускорения свободного падения проявится в изменении положения точки на резонансной кривой, т.е. поток прошедших или резонансно поглощенных гамма-квантов будет изменяться без видимых причин. Частотные характеристики регистрации качания (изменения) ускорения свободного падения будут определяться только частотой контроля положения точки на резонансной кривой.

Стоимость гравитационного спектрометра не сопоставима со стоимостью лазерных детекторов, и иметь и эксплуатировать их могут себе позволить даже очень небольшие лаборатории. Обобщив данные не десятка, а тысяч университетских спектрометров, можно очень достоверно установить не только факт волнового искажения гравитации, но и ее направление.

Гравитационная волна - это волна. И можно думать о полях датчиков-

детекторов, аналогичных полям фазированных антенных решеток для электромагнетизма. Да и процессы в глубинах нашей планеты с перемещением значительных масс могут стать доступны для анализа

Все это перспективы. Трудности впереди необозримы. Но они технические и «мечтать не вредно!»

### Литература

1. Материалы международных конференций по использованию эффекта Мессбауера. The International Conference on the Applications of the Mossbauer Effect. ICAME 2015 (Германия. Гамбург). ICAME 2017 (Россия, Санкт-Петербург).
2. Рекомендации МКРЗ. Схемы распадов радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения в 3 книгах. Книга 2. Часть 1. С. 66. - Москва: Энергоатомиздат. 1987.
3. //ru.wikipedia.org/wiki/Эксперимент\_Паунда\_и\_Рибки
4. Паунд Р. В. О весе фотонов // Успехи физических наук. 1960. Т. 72. Вып. 4. С. 673—683.
5. Давыдов А.В. Исследования по физике гамма лучей. - М.: Физматлит. 2013. С. 134 – 136.
6. Давыдов А.В., Исаев Ю.Н. и др. Гравитационный гамма-спектрометр для изучения гамма-резонанса долгоживущего изомера  $^{103m}\text{Rh}$  // АНРИ (Аппаратура и новости радиационных измерений).- 2016. № 4 (87).
7. Давыдов А.В. Исследования по физике гамма лучей.- М.: Физматлит. 2013. Глава 1, 4.
8. Рекомендации МКРЗ. Схемы распадов радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения в 3 книгах. Книга 2. Часть 1. С. 18.- Москва: Энергоатомиздат. 1987.
9. Давыдов А.В., Исаев Ю.Н. и др. // Измерительная техника. № 3. 2014. С. 3.