

УДК 548.1:533.9

ЯДЕРНЫЙ ГАММА-РЕЗОНАНС В ИССЛЕДОВАНИИ ГРАВИТАЦИИ И РЕЛЯТИВИСТСКОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЕССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

В.Г. Кириченко¹, О.В. Коваленко¹, В.Н. Леонов¹, Т.А. Коваленко¹, Ю.И. Гофман²

¹Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Институт высоких технологий
61108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31

E-mail: kirichenko@pht.univer.kharkov.ua

²Иерусалимский политехнический институт - Махон Лев, Кафедра прикладной физики
п.я. 16031, Иерусалим 91160, Израиль

E-mail: gofman@jct.ac.il

Поступила в редакцию 29 апреля 2011 г.

Рассмотрены основные принципы наблюдения эффектов, описываемых теорией относительности и гравитации в земных условиях. Изложены причины необходимости проведения повторных экспериментов на более высоком уровне точности (выше 1%), с целью валидации и верификации измеряемых эффектов. Предложен метод детектирования ядерных γ -резонансных спектров вращающихся объектов. Проведено сравнение экспериментальных результатов, полученных разными авторами, обсуждены и проиллюстрированы возможные причины наблюдаемых отличий в данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мессбауэровская спектроскопия, гравитационное красное смещение, релятивистское равноускоренное движение.

THE NUCLEAR GAMMA-RESONANCE IN RESEARCH OF GRAVITATION AND RELATIVISTIC UNIFORMLY ACCELERATED MOTION. DETECTING OF MÖSSBAUER SPECTRA OF ROTATING OBJECTS

V.G. Kirichenko¹, O.V. Kovalenko¹, V.N. Leonov¹, T.A. Kovalenko¹, Yu. I. Gofman²

Kharkov National Karazin University, High Technology Institute
31 Kurchatov St., Kharkov, 61108, Ukraine

²Jerusalem College of Technology, Department of Applied Physics
P.O. B. 16031, Jerusalem 91160, Israel

Main principles of the effects observation described by the theory of a relativity and gravitation in terrestrial conditions are considered. The reasons of need for carrying out of repeated experiments at higher level of accuracy (above 1 %), on validation and verification purpose of measurable effects are stated. The method of detecting nuclear γ -resonant spectra of rotating objects is offered. A comparison of experimental results obtained by different authors was carried out; the possible reasons for the observed differences in data were discussed and illustrated.

KEY WORDS: Mössbauer spectroscopy, gravitational redshift, relativistic uniformly accelerated motion.

ЯДЕРНИЙ ГАММА-РЕЗОНАНС У ДОСЛІДЖЕННІ ГРАВІТАЦІЇ ТА РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО РІВНОПРИСКОРЕНОГО РУХУ. ДЕТЕКТУВАННЯ МЕССБАУЕРІВСЬКИХ СПЕКТРІВ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В.Г. Кіріченко¹, О.В. Коваленко¹, В.Н. Леонов¹, Т.А. Коваленко¹, Ю.І. Гофман²

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Інститут високих технологій
61108, м. Харків, пр. Курчатова, 31

²Єрусалимський політехнічний інститут - Махон Лев, Кафедра прикладної фізики
п. с. 16031, Єрусалим 91160, Ізраїль

Розглянуто основні принципи спостереження ефектів, описуваних теорією відносності і гравітації у земних умовах. Викладено причини необхідності проведення повторних експериментів на більш високому рівні точності (вище 1%), з метою валидації та верифікації вимірюваних ефектів. Запропоновано метод детектування ядерних γ -резонансних спектрів обертових об'єктів. Проведене порівняння експериментальних результатів, отриманих різними авторами, обговорені та проілюстровані можливі причини спостережуваних відмінностей у даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мессбауєрівська спектроскопія, гравітаційне червоне зміщення, релятивістський рівноприскорений рух.

Применение ядерного гамма - резонанса (эффекта Мессбауэра) для экспериментальной верификации теории относительности и теории гравитации началось сразу после открытия Р. Мессбауэром явления безотдаточного поглощения и рассеяния, ядерных гамма - квантов с сохранением естественной ширины линии $\Gamma = \hbar/\tau$ (τ - время жизни мессбауэровского ядерного уровня) [1]. Благодаря открытию эффекта Мессбауэра стало доступным измерение энергии электромагнитного излучения с уникальной точностью. С этой точки зрения определяющим параметром, характеризующим разрешающую способность метода, является отношение $(\Delta E/E)$ - ширины линии $\Gamma = \Delta E$ к энергии гамма - квантов E . Для изотопов Fe^{57} и Zn^{67} значение $(\Delta E/E)$ равно $3,1 \cdot 10^{-13}$ и $5,2 \cdot 10^{-16}$, соответственно. Электромагнитное излучение с подобной стабильностью частоты до сих пор не получено при использовании других методов. Наличие гамма излучения с узкой линией испускания и поглощения позволило провести уникальные эксперименты, например, проверку наличия гравитационного

красного смещения, осуществленную Паундом и Ребкой [2]. В этом эксперименте достигнута точность измерения положения резонансной линии в пределах $5 \cdot 10^{-16}$ от энергии гамма - квантов. Результаты эксперимента подтвердили предсказание, основанное на принципе эквивалентности, с точностью около 1%.

Проведенные в этих направлениях эксперименты позволили проверить с различной степенью валидации ряд положений теории специальной и общей теории относительности, такие как: релятивистский сдвиг частоты, замедление времени, нерелятивистские эффекты ускорения, релятивистское уширение мессбауэровских линий, обнаружение эфирного ветра, гравитационное красное смещение, принцип Маха и возможную анизотропию инерции, теорию Вейля и т.п.

С помощью эффекта Мессбауэра осуществлен земной эксперимент по исследованию влияния гравитации на сдвиг частоты γ - излучения. «Принцип эквивалентности» Эйнштейна утверждает, что не существует локального эксперимента, с помощью которого можно было бы различить эффекты, обусловленные гравитационным полем и равномерным ускорением лабораторной системы относительно инерциальной системы. Заметим, что, если в области с однородным гравитационным полем с величиной ускорения свободного падения g наблюдать за источником излучения фотонов из точки на расстоянии h ниже источника, то наблюдатель обнаружит свойства, аналогичные свойствам ускоренной системы, двигающихся вверх с ускорением g . В последнем, случае в результате изменения скорости, возникающего за время переноса излучения, эффективная скорость наблюдателя изменится на величину $\Delta v = gh/c$. Таким образом, можно предположить, что если источнику, расположенному на высоте h над наблюдателем придать направленную вверх скорость, равную gh/c , то влияние гравитации исчезнет. Экспериментально удобнее создать условия, при которых наблюдатель, находящийся в точке ниже источника, мог бы изучать те же самые свойства, которые он изучает на таком же расстоянии над источником. Изменение эффективной скорости наблюдателя приводит к смещению резонансной линии поглощения мессбауэровского γ - излучения, проходящего через резонансный поглотитель, расположенный в точке наблюдения.

В цикле работ, представленных в сборниках [1-3] проведено тщательное экспериментальное исследование с использованием эффекта Мессбауэра влияния гравитации на энергию фотонов. Практической задачей являлось обнаружение возможно меньшего незначительного изменения эффективной частоты источника относительно поглотителя. В качестве источника использовались ядра Co^{57} введенные в матрицу металлического железа, поглотителем являлась мозаика из фольги металлического железа. Результаты эксперимента подтвердили предсказание, основанное на принципе эквивалентности, с точностью около 1%. Следует отметить, что на величину g влияет вращение Земли, приводящее к уменьшению чисто гравитационного ускорения приблизительно на 0,3%. Согласие такого порядка объединяет эффекты гравитационного и центростремительного ускорения. Эти эффекты впервые наблюдались во вращающихся системах [4,5]. Величина смещения энергии γ - квантов в эффективном гравитационном поле вращающейся системы согласуется с величиной смещения, вызываемого земным гравитационным полем. Незначительная модификация опыта по измерению гравитационного смещения γ - квантов, одним из параметров которого является ускорение свободного падения, дает принципиальную основу для измерения и контроля ускорений движущихся в пространстве объектов. В работе [6] проведен анализ интерпретации опытов Паунда и Ребки, как проверки одного из уравнений теории тяготения – уравнения центрального поля Шварцшильда и отмечено, что в опытах с использованием эффекта Мессбауэра для получения информации о пространственной кривизне необходимо проведение более точных опытов, которые должны включать измерение геометрических элементов длин и углов.

Исследования в области экспериментального достижения максимальных значений ускорения достигли нового уровня. Физики из Sandia National Laboratories ускорили маленький снаряд от нуля до скорости 122 тысячи 300 километров в час за доли секунды. Для опыта использовалась Z-машина (Z Machine), создающая сверхсильный импульс магнитного поля, который ускоряет в специальном канале снаряд - пластинку из алюминия размером 30 миллиметров на 15 миллиметров и толщиной 0,85 миллиметра. Скорость снаряда составила примерно 34 км/с, а ускорение при старте достигало 10^{10} g. Давление в месте удара - $15 \cdot 10^6$ атм [7].

Для проверки существования возле массивного вращающегося тела согласно общей теории относительности Эйнштейна, искривления пространства - времени вокруг себя. Создание спутника «без сноса» стояло на повестке дня с 1960 – х гг. Эта задача была решена с помощью спутника Gravity Probe B, который включает систему четырёх гироскопов и телескоп [8]. Последний нужен для определения начальной ориентации спутника и был направлен на HR8703 – двойную звезду в созвездии Пегаса. Данные Gravity Probe B позволили сделать выводы о правильности общей теории относительности, предсказывающей искривление пространства массивным вращающимся телом - нашей планетой. Подтверждены предсказанные Эйнштейном эффекты. Один - так называемая геодезическая прецессия, которая возникает из-за искривления пространства Землей. Её величина совпала с теоретически предсказанной с точностью до 1%. Другой эффект - прецессия за счёт увлечения инерциальной системы координат Земли, как бы захватывающей за собой пространство при вращении. Этот эффект в 170 раз меньше, чем геодезическая прецессия. Таким образом, совершенствование гироскопических устройств на основе иных физических принципов является актуальной задачей. Ранее нами было создано гироскопическое устройство на основе эффекта Мессбауэра, которое позволило повысить

точность измерения [9-12].

Следует отметить эксперимент по регистрации гравитационных квантовых состояний нейтронов, находящихся в земном гравитационном поле. Переход между ними требовал строго фиксированной энергии, пропорциональной разнице между частотами. Использовали реакторные нейтроны, замедленные до скорости около 5 м/с. Новый метод измерения получил название «гравитационная резонансная спектроскопия» [13]. В дальнейшем планируется проверить на субатомном масштабе равенство гравитационной и инертной масс.

В последнее время на основе нового подхода к анализу релятивистских явлений, основанному на симметрии пространства-времени и без постулата о постоянстве скорости света [14, 15] построена теория максимального ускорения [16]. На основе обобщенного принципа относительности получены преобразования лоренцевского типа. При этом предсказывается замедление времени в ускоренных системах, так что Clock Hypothesis неверна. Также получено выражение для доплеровского сдвига из-за ускорения источника. Оценена также величина максимального ускорения (это описывается ниже).

Таким образом, в последнее время получены многие разнообразные и подчас неожиданные теории и экспериментальные факты, подтверждающие настоятельную необходимость проведения повторных экспериментов на более высоком уровне точности (выше 1%), с целью валидации и верификации измеримых эффектов гравитации в земных условиях.

Целью данной работы являлось совершенствование методики определения малых энергетических сдвигов при наблюдении эффекта Мессбауэра в инерциальных и неинерциальных системах, связанных с движущимися и вращающимися объектами и разработка метода детектирования ядерных γ -резонансных спектров вращающихся объектов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве источника мессбауэровских гамма - квантов наиболее часто используются радиоактивные изотопы ряда элементов (например, Fe^{57} , рисунок 1), содержащие ядра в возбужденном состоянии, на которых наблюдается эффект Мессбауэра, что зависит от массы ядра, энергии гамма - квантов, прочности связей атомов в кристаллической решетке и т.п. Анализатором (поглотителем или рассеивателем) испущенного гамма-излучения являются «дочерние», стабильные изотопы, содержащие ядра данного элемента в основном состоянии. Прошедшее (рассеянное) гамма - излучение регистрируется с помощью сцинтилляционного, газового или полупроводникового детектора и спектрометрического тракта, включающего предусилитель, усилитель, дискриминатор и многоканальный анализатор импульсов. Для получения кривой резонансного поглощения (рассеяния) мессбауэровских гамма - квантов наиболее часто используется метод создания доплеровского смещения энергии гамма - квантов. Это достигается приведением в относительное движение источника и поглотителя (рассеивателя) с дальнейшей регистрацией мессбауэровских гамма - квантов в зависимости от значения относительной скорости движения. Именно этот принцип лежит в основе экспериментального получения мессбауэровских спектров поглощения (рассеяния). Это является базой успешного применения эффекта Мессбауэра для измерения и контроля относительных амплитуд движения, скоростей и ускорений, движущихся в пространстве тел, параметров вибраций, ультразвуковых колебаний.

Типичный вид резонансной линии мессбауэровского поглощения обычно записывается как:

$$n(v) = \int_0^{\infty} \omega(\varepsilon) \left(1 + \exp \left\{ -nf' \sigma(\varepsilon) \right\} \right) d\varepsilon, \quad (1)$$

где

$$\omega(\varepsilon) = f \cdot \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left[\varepsilon - \varepsilon_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \right) \right]^2 + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2} \quad (2)$$

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 \cdot \frac{\Gamma_{\gamma}}{\Gamma} \cdot \frac{\left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2}{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2}. \quad (3)$$

Здесь: $n(v)$ - относительное число γ - квантов, прошедших через поглотитель для величины скорости v ; σ_0 - сечение поглощения γ - квантов в максимуме поглощения при $\varepsilon = \varepsilon_0$; $\sigma(\varepsilon)$ - поперечное сечение поглощения γ - квантов, обладающих энергией ε ; Γ_{γ} - парциальная радиационная ширина возбужденного уровня ядра; Γ - полная ширина этого уровня, связанная со средним временем жизни ядра в возбужденном состоянии τ соотношением неопределенности $\Gamma \tau = \hbar$, где $\hbar$ - постоянная Планка; f' и f - вероятность эффекта Мессбауэра для поглотителя и источника, соответственно. Ширина кривой поглощения, измеренная на половине максимального поглощения, определяется суммой ширин линий источника и поглотителя, стремясь в пределе к величине 2Γ . Естественные ширины линий Γ для Fe^{57} и Sn^{119} равны 0,097 мм/сек и 0,311 мм/сек,

соответственно.

Если относительная скорость перемещения v источника относительно поглотителя значительно меньше скорости света c , что имеет место практически всегда, то для лабораторной системы координат частота ν испускаемых или поглощаемых γ - квантов будет определяться выражением:

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \alpha - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (4)$$

Здесь ν_0 - частота γ - квантов для неподвижных друг относительно друга источника и поглотителя, α - угол между направлением регистрации γ - кванта и вектором скорости относительного перемещения источника или поглотителя.

На рис.2 представлена простейшая схема измерения. Вращающееся тело изображено в виде диска, в принципе этим телом может быть шар. При необходимости радиоактивные ядра могут быть внедрены в материал вращающегося тела (ротора), тогда ротор становится источником резонансных гамма - квантов, а место диска на рис.2 занимает неподвижный поглотитель, пересекающий ось пучка γ - квантов, испускаемых периферийной частью ротора-источника.

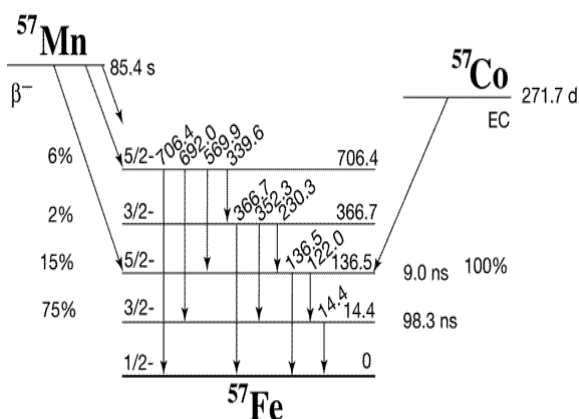


Рис.1. Схема ядерных уровней мессбауэровского перехода $^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$

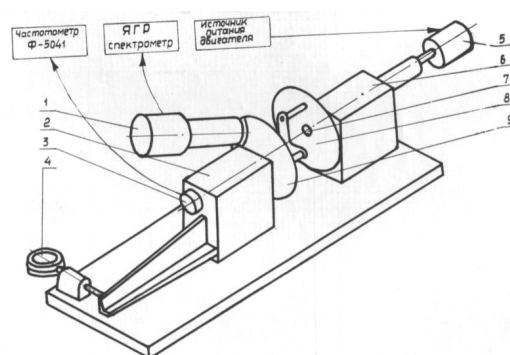


Рис.2. Схема экспериментального устройства: 1 - детектор; 2 - привод поглотителя; 3 - счетчик числа оборотов; 4 - измеритель угла поворота; 5 - привод источника

В качестве объектов экспериментального исследования использовались деформированные фольги и порошки чистого карбонильного железа, поликристаллического железа, обогащенного изотопом Fe^{57} до 85%, фольги аустенитной стали 08X18H10T, закрепляемые в специальные держатели на вращающихся дисках с различной ориентацией в пространстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность применения ядерного гамма - резонанса в контрольной измерительной технике для измерения смещений, скоростей и ускорений, гравитационных полей и т.п. основана на высокой чувствительности метода к доплеровскому сдвигу частоты мессбауэровского излучения. Выражение (4) служит принципиальной основой всевозможных схем регистрации относительной скорости движения двух объектов, в частности, определения малых углов смещений оси вращения быстро вращающихся тел.

Для регистрации угловых смещений оси вращения необходимо выбрать рабочий участок на середине склона кривой поглощения (рис.3).

Тогда увеличение числа счетов будет соответствовать углам $\alpha > \pi/2$ а уменьшение - углам $\alpha < \pi/2$. Величина $\delta_0 = D_0$ может быть установлена выбором изомерного сдвига поглотителя относительно источника, или первоначальным заданием угла $\alpha \neq \pi/2$. Если плоскость диска ориентирована перпендикулярно оси пучка γ - квантов, то лабораторный угол α составляет значение $\pi/2$, и смещение частоты излучения обусловлено только третьим членом выражения (1), описывающим поперечный эффект Доплера.

На рис.4 приведена зависимость измеренного угла наклона вращающегося ротора от числа оборотов ротора для низкооборотной области скоростей вращения. На рис.5 приведена зависимость крутизны квазилинейного участка резонансной кривой от частоты вращения ротора. Видно, что в нашем конкретном случае максимальная крутизна достигается при частоте вращения 20 c^{-1} . Использование таких низкооборотных систем и роторов обусловлено также несовершенством изготовления поглощающей части роторов, что приводит к появлению линейного по скорости доплеровского члена.

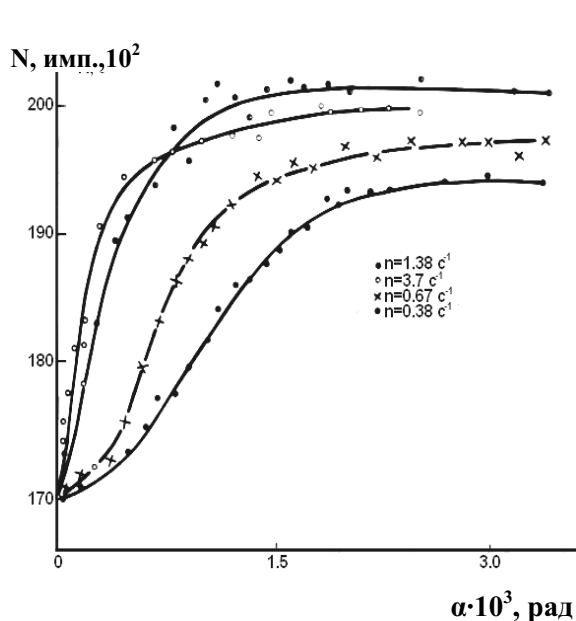


Рис.3. Зависимости резонансного пропускания от угла поворота ротора для разных скоростей вращения

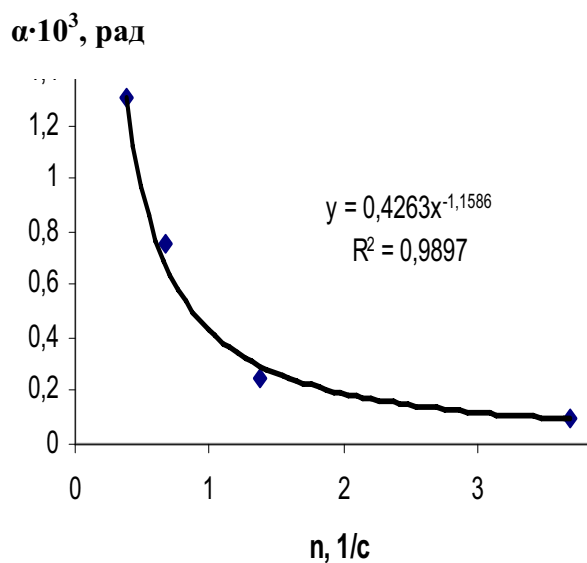


Рис.4. Зависимость зарегистрированного в эксперимента угла поворота плоскости ротора от числа оборотов

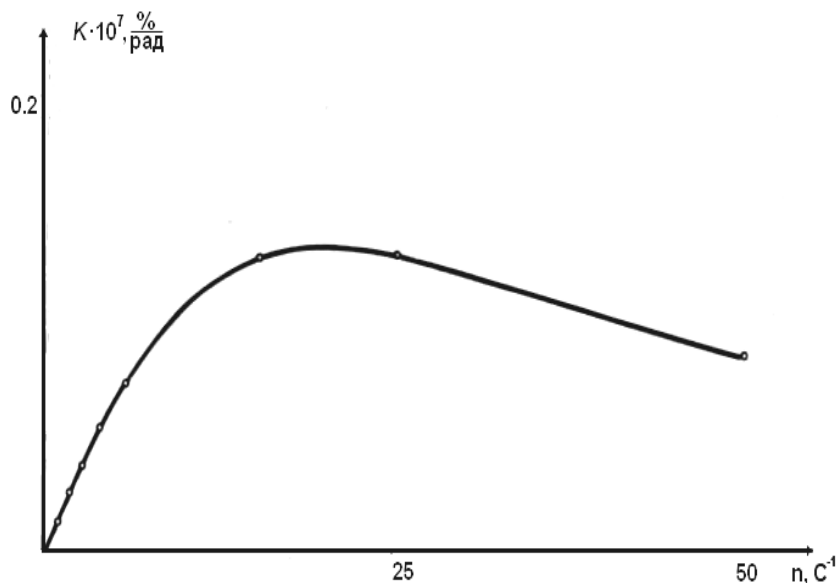


Рис.5. Зависимость крутизны резонансной кривой от числа оборотов ротора

При использовании источника и поглотителя, характеризующихся одиночными линиями испускания и поглощения, и того, что пучок γ - квантов считается достаточно тонким в месте пересечения пучка с плоскостью ротора, вращающегося с частотой ω . Для определения сдвига вращающегося поглотителя в нормальном положении относительно оси пучка гамма - квантов была получена зависимость положения линии поглощения от угла наклона плоскости вращающегося диска для различных частот вращения диска (рис.6).

Величины вкладов от квадратичного эффекта Доплера при значениях в случае ядер Fe^{57} для нашего конкретного случая малы и приблизительно равны $0,00005$ мм/сек (рис.7). Таким образом, сдвиг линии поглощения для частоты вращения $0,1$ Гц равен $5 \cdot 10^{-5}$ мм/с. Эта величина характеризует точность измерения сдвига резонансной линии. В опытах Паунда и Ребки для линии Fe^{57} при обнаружении красного гравитационного смещения энергии γ - квантов в поле тяжести Земли, были измерены смещения резонансной линии порядка 1% от естественной ширины линии, что составляет $0,001$ мм/с. Это соответствует $0,008$ угловой секунды для стандартных параметров вращения роторов.

Но, как указывалось выше, на пути реализации принципиальной возможности измерения малых угловых смещений оси вращения с помощью мессбауэровской техники появляются препятствия в первую очередь из-за биений, возникающих в результате несовершенства механической обработки самого ротора и подшипников, а

также неортогональности оси вращения плоскости ротора, неравномерности распределения резонансных ядер по объему ротора. Эти же трудности возникают при измерении поперечного эффекта Доплера.

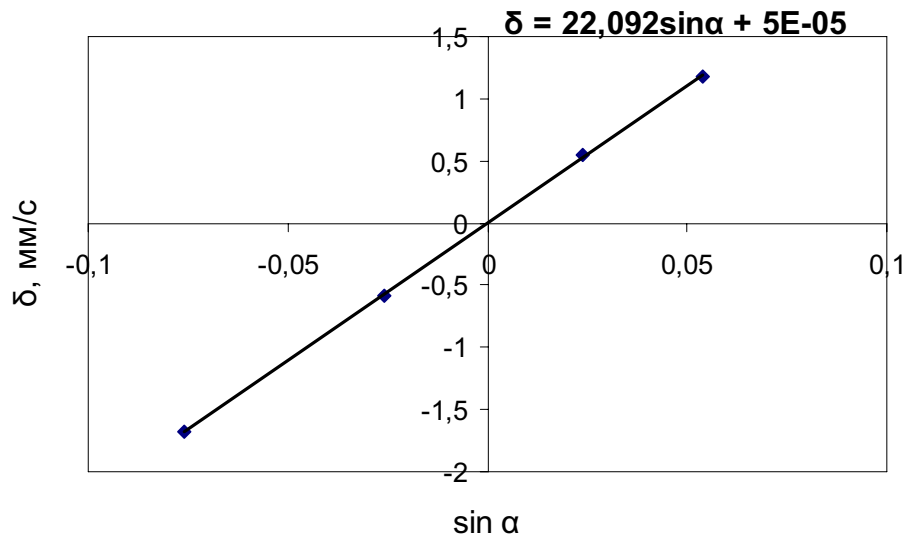


Рис.6. Зависимость сдвига резонансной кривой от угла поворота ротора

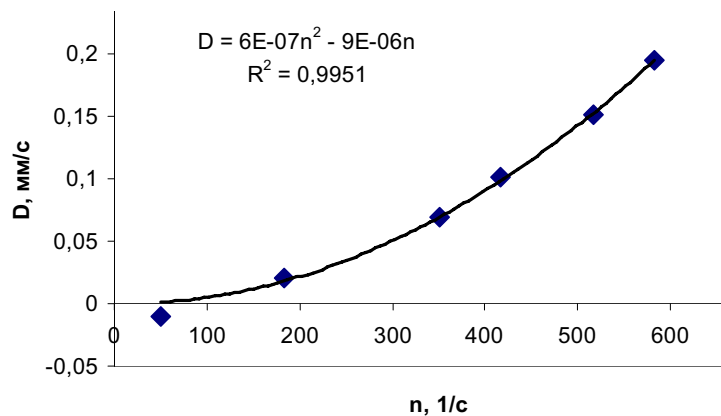


Рис.7. Зависимость сдвига резонансной линии поглощения от частоты вращения

В этом случае выражение (1) следует переписать в виде:

$$v = v_0 \left(1 + \frac{\bar{V}(t)}{c} \cos \gamma(t) - \frac{1}{2} \frac{V(t)^2}{c^2} \right). \quad (5)$$

Здесь $\bar{V}(t) = \bar{v} + v'$ - истинная скорость участка ротора, находящегося под пучком γ - квантов, где v' - скорость за счет паразитных отклонений, γ - угол между $\bar{V}$ и направлением регистрации γ - квантов, причем $\gamma \neq \beta$. При этом если выражение (4) не зависит от времени t при заданном угле β , то в выражении (5) необходимо брать мгновенные значения $\bar{V}(t)$ и $\gamma(t)$, причем аналитический вид этих величин заранее известен.

Таким образом, использование потенциальных возможностей эффекта Мессбауэра для регистрации малых угловых смещений тесно связано с привязкой этого метода к системам, имеющим достаточно низкий уровень паразитных механических вибраций. С другой стороны, поскольку избавиться от этих вибраций невозможно, необходим поиск путей, позволяющий эффективно исключить их влияние на показания прибора. Кроме измерения линейных скоростей и смещений с помощью ядерного гамма - резонанса возможно проведение измерения и контроля угловых скоростей вращения и ускорений. В работе [11] приведена оценка минимальной измеряемой величины угловой $\omega_{\min} = 0,077$ град/сек, основанная на использовании методики измерения угловой скорости по величине косинусной составляющей линейной скорости вращения. Учитывая прогресс в экспериментальной технике ЯГР - спектроскопии, станет возможным измерение $\omega_{\min} = 0,002$ град/сек.

Предельно высокая точность измерения частоты электромагнитного излучения с помощью эффекта Мессбауэра позволяет произвести проверку одного из следствий общей теории относительности – “поперечного эффекта Доплера” [5]. Основная идея опыта заключается в следующем: мессбауэровский источник помещается в центре системы, вращающейся с угловой скоростью ω , а поглотитель помещается на радиусе R , детектор резонансных γ -квантов устанавливается за поглотителем. Измеряется пропускание γ -излучения в зависимости от скорости поглотителя. Частотный сдвиг вращающейся системы может быть описан как поперечный эффект Доплера для ускоряющихся систем, известный также как “парадокс часов”. Улучшенная техника измерений и увеличение скорости позволило экспериментально измерить эффект Доплера второго порядка, согласующийся с точностью 1,1% с предсказаниями общей теории относительности, и является наиболее точным измерением поперечного эффекта Доплера [5]. Построенная по данным из этой работы зависимость сдвига резонансной линии поглощения от частоты вращения представлена на рис.7.

Приведенные на рис.7 данные свидетельствуют, что есть линейный вклад в наблюдаемую зависимость сдвига от частоты вращения.

При анализе опыта в системе источника скорость $v = \beta c / \beta \gg 1$ источника и поглотителя всегда направлена перпендикулярно линии, соединяющей их, существует поперечный эффект Доплера, дающий в первом приближении изменение энергии:

$$\frac{E_A - E_S}{E_S} = (1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \cong -\frac{1}{2}\beta^2 = -\frac{R^2 \omega^2}{2c^2}, \quad (6)$$

где E_A и E_S - характерные энергии поглотителя и источника. Однако в системе координат, отнесенной к ускоряющемуся поглотителю, задачу можно рассматривать с помощью принципа эквивалентности общей теории относительности. Центробежная сила, действующая на поглотитель, интерпретируется тогда, как гравитационная сила с потенциалом:

$$\Phi = -\frac{1}{2}R_A^2 \omega^2. \quad (7)$$

Отсюда, наблюдатель связанный с поглотителем будет приходить к выводу, что его часы замедляются гравитационным потенциалом. Частота ν_A , измеренная им, в первом приближении выражается, как:

$$\nu_A = \nu_S \left(1 + 2 \frac{\Phi}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cong \nu_S \left(1 + 2 \frac{\Phi}{c^2}\right). \quad (8)$$

Как и ранее относительный сдвиг энергии:

$$\Delta E/E = -\frac{R^2 \omega^2}{2c^2}. \quad (9)$$

Отсюда видно, что поперечный эффект Доплера и замедление времени, создаваемое гравитацией, представляют два различных вида записи одного и того же факта, а именно, часы экспериментатора, движущегося с ускорением, замедляются по сравнению с часами покоящегося экспериментатора. Подобный опыт был ранее сделан в [18].

Наблюдалась увеличение пропускания γ -лучей через поглотитель при увеличении скорости поглотителя. Подобная схема опыта применима для измерения угловой скорости вращения роторов в широких диапазонах с достаточно высокой точностью и может служить основой разработки прибора предназначенного для эффективного и высокоточного измерения угловой скорости.

Существует другой подход к анализу результатов приведенных экспериментов. В [18] вводится константа b таким образом, что:

$$\Delta E/E = -b \frac{R^2 \omega^2}{2c^2}. \quad (10)$$

Для данных [5] $b = 1,0065 \pm 0,011$. Это значение находится в полном согласии с ожидаемым расширением времени и более ранними данными [18].

При анализе данных Кюндига [5] (рис.7), учтем, что по последним данным для изотопа Fe^{57} значение энергии мессбауэровского перехода $E = 14,412497(3)$ кэВ, значение скорости света $299792458 \pm 1,2$ м/с. Соотношение для перевода единиц $1 \text{ мм/с} = 4,80766 \cdot 10^{-8} \text{ эВ} = k$, значение $2c^2 = 179751,0357 \cdot 10^{18} \text{ мм}^2/\text{с}^2$. Если $\Delta E/E = Dk/E = D \cdot 3,33(3) \cdot 10^{-12} = -b\Phi$, то используя данные [12], приведенные на рис.7, получим следующую

линейную зависимость с наклоном $b = 1,0031$ (рис.8).

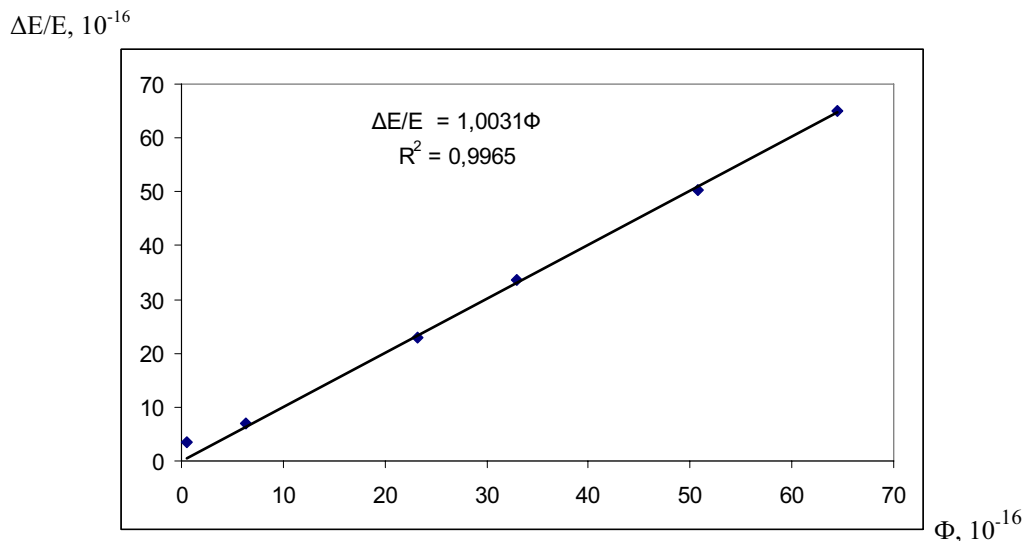


Рис.8. Зависимость относительного сдвига энергии от параметра Φ (9)

Однако, из приведенной на рис.7 зависимости видно, что $D = 6 \cdot 10^{-7} \text{ н}^2 - 9 \cdot 10^{-6} \text{ н}$ с достоверностью $R^2 = 0,9951$.

В эксперименте [12], система поглотителя движется с ускорением $a = R\omega^2$ к источнику. Преобразования времени подобны обычным преобразованиям Лоренца, если заменить v/c на a/a_m между инерциальной системой K' и ускоренной движущейся совместно системой $\tilde{K}$ будут определяться продольным сдвигом доплеровского типа, а именно, коэффициентом $(1 - a/a_m)$ из-за ускорения $\tilde{K}$ относительно K' . Тогда как в [16]:

$$\left(1 - \frac{R\omega^2}{a_m}\right) \sqrt{1 - \frac{R^2\omega^2}{c^2}} \approx \left(1 - \frac{R\omega^2}{a_m}\right) \left(1 - \frac{R^2\omega^2}{2c^2}\right) \approx 1 - \frac{R\omega^2}{a_m} - \frac{R^2\omega^2}{2c^2} = 1 - \left(1 + \frac{2c^2}{Ra_m}\right) \frac{R^2\omega^2}{2c^2}. \quad (11)$$

Кроме того, в [18] повторно вычислили результаты для трех различных скоростей вращения, для чего авторы эксперимента предоставили все необходимые данные. После их исправлений среднее $b = 1,192 \pm 0,03$, что не соответствует значению 1,0065. Они повторили подобный эксперимент и также наблюдали отклонение от обычной формулы для расширения времени. Из этого следует, что: $b = 1 + \frac{2c^2}{Ra_m}$.

Можно заметить, что расчетное значение b в рамках данной модели не зависит от скорости вращения. Это коррелирует с данными [5]. В работе [16] также приводится оценка максимального ускорения:

$$b = 1 + \frac{2c^2}{Ra_m} = 1,192 \pm 0,03; \quad a_m = \frac{2c^2}{R(0,192 \pm 0,03)} = (112 \pm 7)c^2 m^{-1} = (1,006 \pm 0,063)10^{19} ms^{-2}. \quad (12)$$

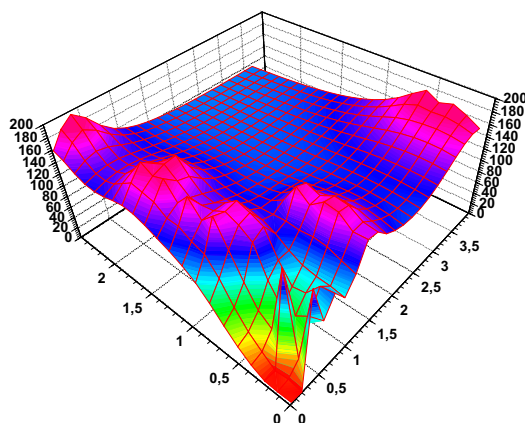
Возможности определения максимального ускорения подробно обсуждается в работе [16]. Ситуация осложняется значительным различием полученных в разнообразных по методикам экспериментах данных. По данным рис.7 наклон линейной зависимости сдвига, равен 1,0031 в диапазоне Φ до $2 \cdot 10^{18}$.

На рис.9 представлена 3D-диаграмма, построенная по данным рис.3 в координатах $N-n-a$, которая демонстрирует резкую немонотонность полученных характеристик при измерении оси вращения ротора вращения при низких частотах вращения, как и в опытах Кюндига [5] (рис.8).

И хотя появились новые работы по подтверждению положений общей теории относительности [19, 20] необходимо однозначное подтверждение результатов разрабатываемых моделей и проведенных экспериментов на более высоком уровне точности.

Такое различие собственно экспериментальных данных, возможно, связано со следующими обстоятельствами:

- В экспериментах использовался поглотитель с шестилинейчатым спектром, что осложняло процесс измерений
- Время регистрации ограничивалось 2% от общего периода вращения
- Эксперименты проводились только в геометрии поглощения гамма - квантов.

$N, \text{имп. } 10^2$ $N, \text{имп. } 10^2$ $\alpha \cdot 10^3, \text{ рад}$ $n, \text{ с}^{-1}$ Рис.9. 3D-диаграмма, построенная по данным рис.3 в координатах N - n - α

Таким образом, кроме проблем валидации предлагаемых моделей существует нереализованная экспериментальная возможность проведения измерений с более высокой точностью.

ВЫВОДЫ

Эффект Мессбауэра (ядерный гамма - резонанс) обладает широкими потенциальными возможностями применения для измерения гравитационных эффектов, малых значений линейных скоростей, смещений объектов и поверхности объектов, угловых отклонений оси вращения, угловых скоростей вращающихся тел, параметров ультразвуковых колебаний в твердых телах. Минимально измеримые значения линейных скоростей в случае использования изотопа Fe^{57} составляет около $5 \cdot 10^{-5}$ мм/с, для изотопов Ta^{181} этот предел понижается на два - три порядка. По угловым скоростям точность определения достигает 0,001 град/с и менее. Представляется целесообразным проведение дополнительных исследований для повышения уровня достоверной верификации новых теоретических положений, связанных с развитием теории относительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effekt Messbaujera Sbornik statej / Pod red. Ju. Kagana. – M: IIL, 1962. – S.415-440.
2. Effekt Messbaujera Sbornik perevodov statej /Pod red. Burgova VM., Skljarevskogo V.V. – M.:Atomizdat, 1969. – 439s.
3. Messbaujerovskaja spektroskopija. Neobychnye primenenija metoda / Pod red. U. Gonzera. – M.: Mir, 1983. – 244 s.
4. H.J. Hay, J.P. Schiffer, T.E. Cranshaw, P.A. Egelstaff The determination of red shift in accelerated system by ^{57}Fe Mossbauer Effect // Phys.Rev.Lett. – 1960. – Vol.4, №4.- P.165.
5. W. Kündig Measurement of the Transverse Doppler effect in an Accelerated System // Phys.Rev.-1963.-Vol.129, №6. - P.2371-2375.
6. Ja.A. Smorodinskij Effekt Messbaujera i teorija odnositel'nosti // UFN.-1963.-T. LXXIX.-V.4.-S.590-598.
7. Z accelerator pushes aluminum plates faster than Earth moves through space SANDIA LAB NEWS. May 27, 2005.
8. Tracking Einstein Gravity Probe B approaches its final stage. Selected Newspaper. www.stanfordalumni.org/news/magazine/2009/julaug/farm/news/gravity.html
9. A.S. SSSR, №782501. Sposob izmerenija uglovoj skorosti / Kirichenko V.G., Chekin V.V. - Zajavka №2683000. prioritet. 4.11.78. Zaregistrirrov. 25.07.80. – 6s.
10. Izmerenie malyh uglovyh smewenij s pomow'ju jeffekta Messbaujera / [Chekin V.V., Kirichenko V.G., Rogov V.S., Harchenko A.V.] // Dep. CNII "Rumb" 25.02.80. "Parus-330". Referat opubl. BSI "Sudostroenie" 1980.- V.4.-12s.
11. V.G. Kirichenko, V.V. Chekin Vlijanie poperechnogo dvizhenija na parametry messbaujerovskoj linii // Zavodskaja laboratorija. -1980.-T.46, №7. - S.608-610.
12. V.G. Kirichenko, V.V. Chekin Ob intensivnosti linij messbaujerovskih spektrov ferromagnetikov pri radiochastotnom peremagnichivanii // Izvestija VUZov. Fizika. – 1980, №6; Dep. VINITI. Reg.№1778-80Dep.-10s.
13. Vlijanie nizkochastotnyh vibracij na parametry odinochnoj messbaujerovskoj linii / [Igrushin V.V., Kirichenko V.G., Chekin V.V.] // Dep.VINITI. 21.06.82. Reg. №3160-82Dep. - 9s.
14. Y. Friedman, Y. Gofman Why Does the Geometric Product Simplify the Equations of Physics // Int. J. Theoretical Physics. - 2002. - Vol.41, № 10. - P.1841-1855.
15. Y. Friedman, Y. Gofman Relativistic Linear Space-Time Transformations Based on Symmetry // Foundations of Physics. – 2002. - Vol. 32. - Iss. 11. - P.1717-1736.
16. Y. Friedman and Y. Gofman A new relativistic kinematics of accelerated systems // Phys. Scr. - 2010. – Vol.82. – P. 015004 (6pp).
17. T. Jenke, P. Geltenbort, H. Lemmel, H. Abele Realization of a gravity-resonance-spectroscopy technique // Nature Physics. - 2011. - Vol.7. - P.468–472. – (doi:10.1038/nphys1970).
18. A.L. Kholmetskii, T. Yarman, O.V. Missevitch Measurement of accelerated systems // Phys. Scr. - 2008. - P.77 035302.
19. A. Peters, K.Y. Chung, S. Chu Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms // Nature. – 1999. – Vol.400. – P. 849-852. - (doi:10.1038/23655).
20. H. Müller, A. Peters, S. Chu A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves // Nature. -2010. – Vol.463. – P.926-929. – (doi:10.1038/nature08776).