

Код МРНТИ 36.16.19

Е.О. Шаленов, *А. Кенесбаева, Э.О. Орынбасарова, К.А. Жанакулова
 Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Аннотация. В настоящей статье выполнен анализ состояния научной проблемы по определению гравитационной постоянной G и приведены результаты эксперимента по определению данной константы. Рассмотрены результаты измерений данной физической константы, полученные исследователями разных стран в разный период времени. Описаны методика и результат определения гравитационной постоянной методом ускорения свободного падения, выполнен расчет точности полученного значения константы. Сделано заключение о необходимости применения новых подходов к определению G с целью повышения точности измерений данной константы, значение которой используется при решении широкого круга научно-технических задач.

Ключевые слова: гравитационная постоянная, крутильные весы, эксперимент Кавендиша, физическая константа, сила притяжения, метод равновесия, резонансный метод.

Гравитациялық тұрақтының мәнін анықтау

Аңдатпа. Бұл мақалада гравитациялық константа G -ді анықтаудың ғылыми мәселесінің күйі талданады және осы тұрақтыны анықтауға арналған эксперимент нәтижелері келтіріледі. Түрлі елдердің зерттеушілерінің әртүрлі уақыт кезеңдері бойынша алған осы физикалық тұрақтының өлшеу нәтижелері қарастырылады. Гравитациялық үдеу әдісі арқылы гравитациялық тұрақтыны анықтаудың әдісі мен нәтижесі сипатталып, тұрақты шаманың алынған мәнінің дәлдігі бағаланады. Гравитациялық константаның мәні кең ауқымды ғылыми-техникалық есептерді шешуде қолданылатындықтан, бұл тұрақтының өлшемдерінің дәлдігін арттыру үшін, G -ді анықтаудың жаңа тәсілдерін қолдану қажеттігі тұжырымдалады.

Түйінді сөздер: гравитациялық тұрақты, бұралу таразысы, Кавендиш тәжірибесі, негізгі физикалық тұрақты, тартылыс күші, тепе-теңдік әдісі, резонанс әдісі.

Determining the gravitation constant value

Abstract. This article analyzes the state of the scientific problem of determining the gravitational constant G , and presents the results of an experiment to determine this constant. The results of measurements of this physical constant obtained by researchers from different countries over different periods of time are considered. The method and result of determining the gravitational constant using the gravitational acceleration method are described, and the accuracy of the obtained value of the constant is calculated. Since the value of the gravitational constant is used in solving a wide range of scientific and technical problems, it is necessary to use new approaches to determining G in order to increase the accuracy of measurements of this constant.

Key words: gravitational constant, torsion balance, Cavendish experiment, fundamental physical constant, force of attraction, equilibrium method, resonance method.

Введение

Гравитационная постоянная G , являясь фундаментальной физической константой, играет важную роль в гравитации, космологии, физике элементарных частиц и астрофизике. Она участвует в уравнении Ньютона и общей теории относительности Эйнштейна, а также используется для определения масс планет и силы взаимодействия объектов микро- и макромира. Но, не смотря на свою фундаментальную роль в науке, данная константа определена с меньшей точностью по сравнению с другими фундаментальными постоянными. К примеру, скорость света и постоянная Планка известны с точностью 8-9 знаков, а гравитационная постоянная только до 6-го знака.

Трудности в точном определении G связаны с ее малым значением в условиях земных экспериментов, а также невозможностью экранировать гравитационную силу. Невзирая на все сложности в определении данной постоянной, ученые не прекращают свои попытки получения более достоверного значения G в течение более двух столетий. За это время точность G увеличилась всего на два порядка, хотя были применены самые новейшие технологии.

В 1798 году английский ученый Генри Кавендиш опубликовал статью «Опыты по определению плотности Земли» в научном журнале «Философские труды Королевского общества». Знаменитый эксперимент Кавендиша (рис. 1), в котором он использовал торсионные весы для исследования гравитационного притяжения между лабораторными массами, заключается в том, что на два маленьких шарика, подвешенные на краях легкого коромысла, влияют два массивных шара, создавая силу притяжения. В результате силы гравитации крутильные весы немного

поворачиваются. Измерив угол поворота коромысла с учетом известных масс всех шаров, расстояний между ними, а также упругих свойств нити, можно вычислить гравитационную постоянную¹.

Это были первые исследования по определению ньютоновской гравитационной константы. Тогда был получено значение G , равное $6,754 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ и его относительная погрешность не превышала одного процента.



**Рис. 1. Крутильные весы Кавендиша.
 Сурет 1. Кавендиштің бұралу таразысы.
 Figure 1. Cavendish torsion scales.**

Появление статьи Кавендиша ознаменовало важный переходный момент в изучении силы тяжести. До этого

¹Некоммерческий научно-популярный проект «Элементы»: информационный сайт, 2005-2024. URL: https://elementy.ru/problems/671/Mekhanika_krutilnykh-vesov (дата обращения: 13.12.2023).

в экспериментах в этой области обычно использовалась Земля как одна из тестовых масс, а после этого начались исследования, проводимые с относительно небольшими испытательными массами.

Со времен выполнения эксперимента Кавендиша были применены разные методы и подходы к измерению гравитационной постоянной, к числу которых относятся методы крутильного и секундного маятника, эксперименты с тяжелыми металлическими шарами, эксперименты с крупными массами в гравитационном поле Земли, а также спутниковые эксперименты. Некоторые из этих методов требуют сложных экспериментальных условий и дают результаты с различной точностью. Приведем наиболее интересные и высокоточные эксперименты, выполненные в последние десятилетия и их результаты.

В работе [1] сообщается о первом точном определении G с использованием атомов, охлажденных лазером, и квантовой интерферометрии для исследования гравитации. Основная идея эксперимента заключается в использовании атомного интерферометра в качестве датчика гравитации и точно известных масс в качестве источника гравитационного поля. Благодаря точному измерению ускорения атомов, создаваемого массой источника, и зная распределение масс, возможно определение значения гравитационной постоянной G по известной формуле:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

где:

F – сила притяжения между двумя телами;

m_1 и m_2 – массы двух тел;

r^2 – расстояние между центрами масс этих тел.

В результате эксперимента получено значение $G = 6,67191(99) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ с относительной погрешностью 150 ppm, что составляет 1,5 комбинированных стандартных отклонения от текущего рекомендованного значения Комитета по данным для науки и технологий (CODATA – Committee on Data for Science and Technology).

Также известны результаты измерения гравитационной постоянной с помощью весов и 13 тонн ртути [2], которые были выполнены ранее исследователями Цюрихского Университета и опубликованы в 2006 г. Отмечено что, с 1994 по 2006 год семь ученых работали над экспериментом Цюрих G . В этом опыте гравитационное поле создавалось двумя большими цилиндрами, каждый из которых был наполнен ртутью весом 6760 кг.

Совместная работа ученых привела к получению значения $G = 6,674\ 252(122) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Относительная стандартная неопределенность измерения составляет 18×10^{-6} . На момент публикации полученных результатов этот эксперимент был лишь одним из двух экспериментов, в которых не были использовали крутильные весы и получено значение с относительной погрешностью менее 100×10^{-6} .

Эксперименты, выполненные китайскими учеными [3] совместно с российским исследователем, являются еще одним вкладом в сложную задачу измерения значения G . В результате выполнения двух независимых определений G в экспериментах с крутильным маятником, с ис-

пользованием метода времени качания и метода обратной связи по угловому ускорению, получены значения $G = 6,674184 \times 10^{-11}$ и $6,674484 \times 10^{-11}$ кубических метров на килограмм в секунду в квадрате с относительными стандартными неопределенностями 11,64 и 11,61 частей на миллион соответственно. Эти значения имеют наименьшие неопределенности, о которых сообщалось до сих пор, и оба согласуются с последним рекомендованным значением в пределах двух стандартных отклонений.

Еще один современный подход к определению G основан на развитии гипотезы Дирака о том, что все большие безразмерные числа, которые можно построить из важных естественных единиц космологии и теории атома, связаны между собой. Хотя Дираку не удалось точно сопоставить все эти числа, он предполагал, что существует способ их объединения. Гипотеза Дирака приводит к константе N , которая объединяет большинство физических параметров. Он представляет собой максимальное количество фотонов с длиной волны, равной окружности Вселенной.

Используя новую космологическую модель, канадские исследователи нашли константу β , которая представляет собой соотношение между скоростью расширения материальной вселенной и скоростью расширения светящейся вселенной (которая на данный момент равна скорости света в вакууме c). С помощью этой константы оказалось возможным точно рассчитать несколько физических параметров, включая универсальную гравитационную постоянную G , постоянную Хаббла H_0 и среднюю температуру T космологического микроволнового фона [4]. Исследователи пришли к выводу, что G , H_0 и T на самом деле не являются постоянными в пространстве и времени.

Новое значение G , полученное канадскими исследователями, равно $6.673229809(86) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$, которое полностью согласуется со значением Тейлора-Паркера-Лангенберга [5], которое составляет $6,6732(31) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$.

Еще один опыт измерения гравитационной постоянной G , основанный на интерферометрии холодных атомов, выполнен в 2018 году итальянскими и нидерландскими учеными [6]. В этом методе свободно падающие образцы атомов рубидия, охлажденные лазером, используются в гравитационном градиентометре для исследования поля, создаваемого близлежащими массами источника (вольфрама). Измерение повторяется в двух различных конфигурациях масс источника и моделируется с помощью численного моделирования. На основе эволюции атомных волновых пакетов и распределения масс источника оценивается дифференциальное ускорение, имеющее G в качестве уникального свободного параметра. Таким образом, в обеих конфигурациях исходных масс атомные интерферометры могут работать в пространственных областях, где общее ускорение медленно меняется, а чувствительность измерения к исходному положению и скорости атомов сильно снижается.

Помимо своей потенциальной чувствительности, этот метод интересен применением квантовой системы для измерения гравитации. В результате эксперимента получено значение $G = 6,667 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. При этом статистическая неопределенность оценивается в $\pm 0,011 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ и систематическая погрешность $\pm 0,003 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Долговременная стабильность прибора и продемонстрированное здесь соот-

ношение сигнал/шум открывают хорошие перспективы для дальнейшего повышения точности измерений.

Казахстанские исследователи в 2017 г. определили гравитационную постоянную при помощи ускорения свободного падения. Была создана конструкция, состоящая из трубы, в которой при помощи вакуумного насоса было создано достаточно сильное разрежение воздуха. Давление воздуха в трубе контролировалось при помощи манометра. Измерялось секундомером время падения шарика внутри трубы, затем вычислялось ускорение силы тяжести для шарика, и с учетом массы Земли и радиуса на широте исследователей, определялась гравитационная постоянная. Полученное значение фундаментальной постоянной G составляет $6,71509 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Погрешность измерений в экспериментах [7] составляет 1.17%-1.35%.

Создана расчетная модель крутильных весов и выполнен предварительный анализ точности параметров системы в работе². При этом предварительно задана требуемая точностью измерения G , и исходя из этого решена обратная задача определения допустимой погрешности измерения угла поворота коромысла, а также основных конструктивных и физико-механических параметров крутильных весов. Сделан вывод о том, что существующие на сегодня проблемы с точностью измерения G связаны ограниченными метрологическими возможностями и методологическими стереотипами. Для получения высокой точности определения G необходимо предварительно рассчитать допустимые погрешности измерения основных параметров системы, которые в последствии обеспечат желаемый высокоточный результат определения данной физической константы.

Необходимо отметить и тот факт, что некоторые теории и исследования предполагают возможное изменение гравитационной постоянной на космологических или квантовых масштабах [8, 9]. Выполняются исследования влияния изменения гравитационной постоянной G на генерацию гравитационных волн. Это исследования дают ценную информацию о поведении изменения гравитационной постоянной G на основе результатов обнаружения гравитационных волн и способствуют более глубокому фундаментальному аспектам гравитации.

Последнее десятилетия благодаря развитию науки технологии, появились новые подходы к определению гравитационной постоянной, однако, точность значения G особо не повысилась из-за того, что полученные новые значения не сходятся между собой. Поэтому, трудно доказать, что они достоверные. И в то же время, необходимость получения более точного значения G , учитывая ее фундаментальную роль в решении многих физических задач, все еще остается актуальной.

В КазНИТУ им. Сатпаева проведен эксперимент по уточнению значения гравитационной постоянной G методом ускорения свободного падения. Методика и результаты приведены ниже.

Методы исследования

Эксперимент выполняется с помощью специальной установки (рис. 2), основными частями которой являют-

ся юстируемая станина 4 с закрепленной на ней трубой 9. В вершине трубы установлена основа 1 с неподвижной осью, электромагнитный стопор 2 (с кнопкой включения стопора) и ролик 3. Ролик 3 закреплен на двух подшипниках относительно оси основы, позволяющих ему свободно вращаться вокруг оси.

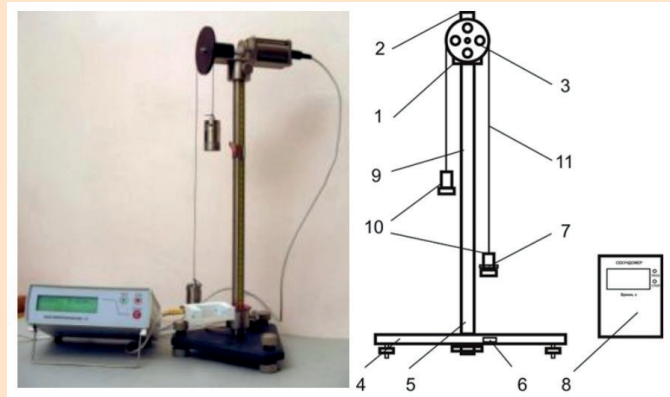


Рис. 2. Машина Атвуда.
Сурет 2. Атвуд машинасы.
Figure 2. Atwood machine.

Через ролик 3 переброшена нить 11 (условно нерастяжимая и невесомая) с подвешенными на ее концах грузами 10 одинаковой массы. Если на правый груз поместить перегрузок 7, на ролике 3 возникнет момент вращения. При включенном стопоре 2 система ролик-грузы будет неподвижна. Нажав кнопку «ПУСК» на секундомере 8, отключается электромагнитный стопор 2 и одновременно запускается отсчет секундомера 8. Грузы 10 придут в движение и, когда груз с перегрузками 7 коснется поверхности станины 4, сработает датчик 6, что приведет к остановке отсчета секундомера 8.

Если на инерциальную систему воздействуют некомпенсированные силы, она приходит в ускоренное движение. На рисунке 3 схематично приведен ход эксперимента с приложенными силами к элементам системы.

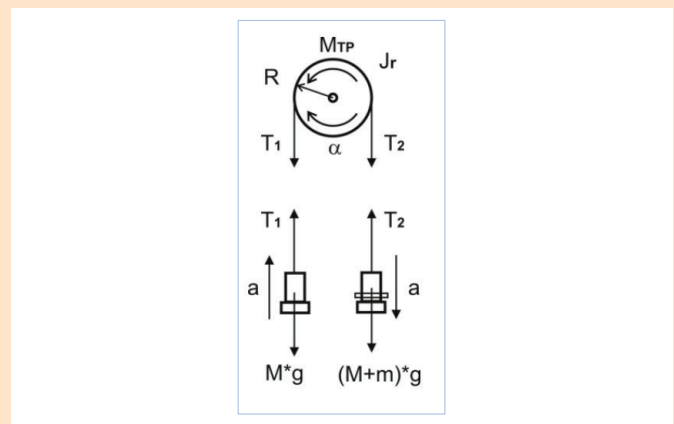


Рис. 3. Движение инерциальной системы.
Сурет 3. Инерциялық жүйенің қозғалысы.
Figure 3. Motion of the inertial system.

²elIBRARY.SPBSTU.RU: науч. электрон. б-ка: сайт. Санкт-Петербург, 2019. URL: <https://elib.spbstu.ru> (дата обращения: 20.11.2017). Режим доступа: открытый.

Здесь J_r и R – момент инерции вращения и радиус ролика соответственно, Mmp – момент трения, возникающий при вращении ролика, α – угловое ускорение ролика, M – масса груза, m – масса перегрузка, T_1 и T_2 – сила натяжения левой и правой нитей соответственно, a – ускорение движения грузов, g – ускорение свободного падения.

Записав уравнения равновесия для каждого из трех элементов, представленных на рисунке 3, мы получим систему из трех уравнений, полностью описывающих движение эксперимента при условии нерастяжимости нити и отсутствии ее проскальзывания в ролике:

$$\begin{cases} M \cdot a = T_1 - M \cdot g \\ (M + m) \cdot a = (M + m) \cdot g - T_2 \\ J_r \cdot \alpha = (T_2 - T_1) \cdot R - M_{TP} \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему уравнений (2), и учитывая, что в нашем случае, $2M \gg m$, мы получим следующую формулу для определения ускорения грузов:

$$a = \frac{g}{2M + \frac{J_r}{R^2}} \cdot m - \frac{M_{TP}}{R \cdot (2M + \frac{J_r}{R^2})} \quad (3)$$

Ускорение грузов системы a линейно зависит от массы перегрузка m , то есть, описывается уравнением прямой линии:

$$a = km + b. \quad (4)$$

Экспериментально получив зависимость времени прохождения груза l_0 некоторого одинакового пути S от общей массы перегрузков и используя уравнение движения материальной точки:

$$a = \frac{2S}{t^2}. \quad (5)$$

Затем необходимо построить график $a = f(m)$.

Построив эту зависимость и определив угловой коэффициент прямой, из (4) находим ускорение свободного падения g :

$$g = \left(2M + \frac{J_r}{R^2}\right) \cdot k, \quad (6)$$

где $M=113.5$ г, $J_r=1.27 \cdot 10^{-4}$ кг·м², $R=33$ мм.

Если считать, что Земля – идеальный геоид с полярным радиусом $R_p = 6356.7523$ км и экваториальным радиусом $R_e = 6378.1370$ км, то радиус на широте находим по формуле:

$$R_{ш} = \cos\varphi(R_e - R_p) + R_p. \quad (7)$$

Алматы находится на высоте 877 метров над уровнем моря. Отсюда следует, что необходимый нам радиус Земли равен:

$$R_3 = R_{ш} + 0.877. \quad (8)$$

Зная массу Земли и радиус на нужной нами широте, по формуле для нахождения ускорения свободного падения

мы вычисляем искомую нами гравитационную постоянную:

$$G = \frac{gR_3^2}{M_3}. \quad (9)$$

Таким образом, эксперимент состоит из нескольких шагов: измерение времени падения перегрузков (их всего 4 с разными массами), вычисление ускорения падения перегрузков по формуле (5), определение ускорения свободного падения из выражения (6) и расчет гравитационной постоянной по формуле (9).

Результаты и обсуждения

Для эксперимента использованы 4 перегрузка с массами: 5 г, 7.5 г, 10 г и 12.5 г. На рисунке 4 приведен график зависимости $a = a(m)$ и ее аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК), для более точного определения углового коэффициента k и постоянной b . Получены значения $k = 28.5425$ и $b = -0.0494$.

По формуле (6) определено ускорение свободного падения и вычислено экспериментальное значение гравитационной постоянной с помощью выражения (9).

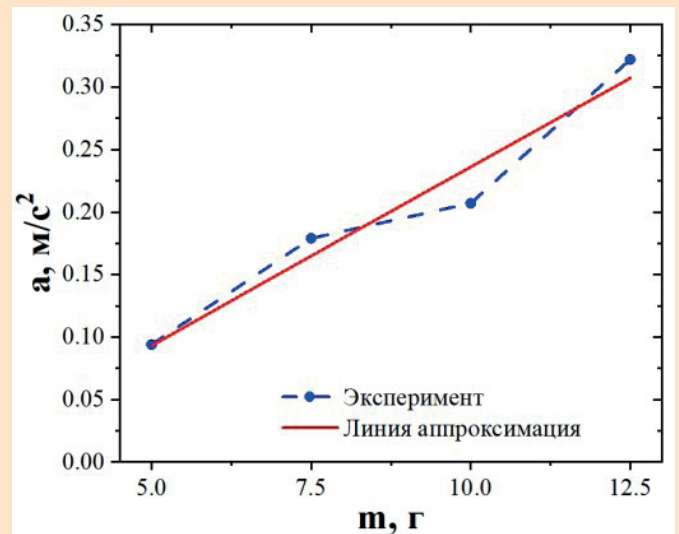


Рис. 4. График зависимости $a = a(m)$.

Сурет 4. $a = a(m)$ тәуелділік графигі.

Figure 4. Graph of $a = a(m)$.

Результаты измерений времени прохождения грузиков и вычислений ускорения a и гравитационной постоянной G приведены в таблице 1.

Вычислена погрешность по формуле: $\Delta_G = \frac{|G_{exp} - G_{tab}|}{2}$, $m^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$. $G_{tab} = 6.6743 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$, согласно последнему утверждению Комитета по данным для науки и техники [10]. Вычислена относительная погрешность в процентах:

$$\delta_G = \frac{|G_{exp} - G_{tab}|}{G_{tab}} \cdot 100\%.$$

В результате эксперимента получено значение гравитационной постоянной $G = 6.670679 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$, с погрешностью/точностью $0.0018105 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$. Полученное значение константы отличается от принятого на сегодняшний день значения G в пределах указанных погрешностей.

Таблица 1

Результаты измерений времени прохождения грузиков и вычислений ускорения a и константы G

Кесте 1

Жүктердің оту уақытын өлшеу нәтижелері және a және G тұрақты үдеуді есептеу нәтижелері

Table 1

Results of measurements of the passage time of weights and calculations of acceleration a and constants G

№	Перегрузок m_p , г	$m_1 = 5$	$m_2 = 7,5$	$m_3 = 10,0$	$m_4 = 12,5$
1	Время, с	3.51	2.58	2.35	1.88
2		3.45	2.53	2.33	1.87
3		3.49	2.53	2.33	1.89
4		3.49	2.54	2.29	1.89
5		3.41	2.48	2.29	1.90
6		3.52	2.46	2.30	1.88
7		3.45	2.48	2.40	1.82
8		3.51	2.49	2.34	1.89
9		3.50	2.46	2.38	1.87
10		3.42	2.58	2.36	1.84
$S = 0.565$ м	среднее	3.475	2.513	2.337	1.873
$a = 2S/t^2$, м/с ²	-	0.094	0.179	0.207	0.322
G_{exp} , м ³ кг ⁻¹ с ⁻²	-	6.670679·10 ⁻¹¹			
Δ_G , м ³ кг ⁻¹ с ⁻²	-	0.0018105·10 ⁻¹¹			
δ_G	-	0.027%			

И это объясняется как влиянием внешних факторов на ход эксперимента, так и ограниченной точностью измерения времени прохождения пути грузиками.

Заключение

Результат, полученный в нашем эксперименте, не позволяет повысить точность значения G , но позволяет сделать выводы для получения более точных результатов в будущих экспериментах. Как показал опыт, в эксперименте с машиной Атвуда, точность измерения времени недостаточно высока и влияния внешних шумов не исключены.

Для достижения более точных результатов, необходимо максимально учитывать влияние внешних источников ошибок, выполнять предварительный расчет точности измерений, исходя из того, с какой точностью планируются

получить значение G . Также рекомендуется применять принципиально различные подходы определения гравитационной постоянной для сравнительного анализа и выявления более точного метода определения данной константы.

Ввиду того, что знание точного значения гравитационной постоянной важно не только для физиков, но и для геодезистов, которые используют G при решении гравиметрических задач, вопрос получения более точного значения данной константы остается актуальным и требующим решения.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR21882366).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. G. Rosi и др. Точное измерение ньютоновской гравитационной постоянной с использованием холодных атомов. // Природа. 2014. Т. 510. №7506. С. 518-521 (на английском языке)
2. E. Holzschuh и др. Измерение гравитационной постоянной Ньютона. // Физический обзор. 2006. Т. 74. №8. С.1-26 (на английском языке)
3. Q. Li и др. Измерения гравитационной постоянной двумя независимыми методами. // Природа. 2018. Т. 560. №7720. С. 582-588 (на английском языке)
4. Mercier C. Расчет Универсальной гравитационной постоянной, постоянной Хаббла и средней температуры реликтового излучения. // Журнал современной физики. 2019. Т. 10. №06. С. 641-662 (на английском языке)
5. V.N. Taylor и др. Определение e/h с использованием макроскопической квантовой фазовой когерентности в сверхпроводниках: значение для квантовой электродинамики и фундаментальных физических констант. // Обзоры современной физики. 1969. Т. 41. №3. С. 375-496 (на английском языке)
6. G. Lamporesi и др. Определение ньютоновской гравитационной постоянной с помощью атомной интерферометрии. // Физический обзор писем. 2008. Т. 100. №5. С. 050801.1-050801.4 (на английском языке)

7. Калманова Д.М., Калкаманов Р.Б. Измерение гравитационный постоянной методом ускорения свободного падения. // *Материалы респуб. научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения-13: сохраняя традиции, создавая будущее»*, 2017. – С. 54-58 (на русском языке)
8. Kordi A.S. Изменение гравитационной постоянной со временем в рамках гипотезы о большом количестве и создании материи. // *Журнал короля Сауда Университета-науки*. 2009. Т. 21. №2. С. 151-154 (на английском языке)
9. Sun B. Ограничение временного изменения гравитационной постоянной путем распространения гравитационных волн. / B. Sun, J. An, Z. Cao. // *Физические письма Б*. 2024. Т. 848. С. 138350 (на английском языке)
10. P.J. Mohr and et al. Рекомендуемые CODATA значения фундаментальных физических констант: 2014. // *Обзоры современной физики*. 2016. Т. 88. №3. С. 035009 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. G. Rosi және басқалар. Суық атомдарды қолдана отырып, ньютонның гравитациялық константасын дәл өлшеу. // *Табиғат*. 2014. Т. 510. №7506. Б. 518-521 (ағылшын тілінде)
2. E. Holzschuh және басқалар. Ньютонның гравитациялық константасын өлшеу. // *Физикалық шолу*. 2006. Т. 74, №8. Б. 1-26 (ағылшын тілінде)
3. Q. Li және басқалар. Гравитациялық тұрақтыны екі тәуелсіз әдіспен өлшеу. // *Табиғат*. 2018. Т. 560. №7720. Б. 582-588 (ағылшын тілінде)
4. C. Mercier. Әмбебап гравитациялық константаны, Хаббл константасын және ОРТАША СМВ температурасын есептеу. // *Заманауи Физика журналы*. 2019. Т. 10. Шығ. 06. Б. 641-662 (ағылшын тілінде)
5. B.N. Taylor және басқалар. Асқын өткізгіштердегі макроскопиялық кванттық фазалық когеренттілікті қолдана отырып, e/h анықтау: кванттық электродинамикаға және негізгі физикалық тұрақтыларға әсері. // *Заманауи физикаға шолулар*. 1969. Т. 41. Шығ. 3. Б. 375-496 (ағылшын тілінде)
6. G. Lamporesi және басқалар. Атом интерферометриясын қолдана отырып, ньютонның гравитациялық константасын анықтау. // *Физикалық шолу хаттары*. 2008. Т. 100. №5. Б. 050801.1-050801.4 (ағылшын тілінде)
7. Калманова Д.М., Калкаманов Р.Б. Ауырлық күшін үдету арқылы гравитациялық тұрақтыны өлшеу. // *Республика материалдары. «Сейфуллин оқулары-13: дәстүрлерді сақтау, болашақты құру» ғылыми-теориялық конференциясы*, 2017. – Б. 54-58 (орыс тілінде)
8. Kordi A.S. Гравитациялық тұрақтының үлкен сан шеңберіндегі уақытқа байланысты өзгеруі және материяның пайда болуы гипотеза жасайды. // *Сауд Король университетінің журналы-ғылым*. 2009. Т. 21. №2. Б. 151-154 (ағылшын тілінде)
9. B. Sun. Гравитациялық толқындардың таралуы арқылы гравитациялық тұрақтының уақыттық өзгеруін шектеңіз. / B. Sun, J. An, Z. Cao. // *Физика Әріптері В*. 2024. Т. 848. Б. 138350 (ағылшын тілінде)
10. P.J. Mohr және басқалар. CODATA негізгі физикалық тұрақтылардың ұсынылған мәндері: 2014. // *Қазіргі физикаға шолулар*. 2016. Т. 88. №3. Б.035009 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. G. Rosi et al. Precision Measurement of the Newtonian Gravitational Constant Using Cold Atoms. // *Nature*. 2014. Vol. 510. №7506. P. 518-521 (in English)
2. E. Holzschuh et al. Measurement of Newton's gravitational constant. // *Physical Review*. 2006. Vol. 74. №8. P. 1-26 (in English)
3. Q. Li et al. Measurements of the gravitational constant using two independent methods. // *Nature*. 2018. Vol. 560. №7720. P. 582-588 (in English)
4. Mercier C. Calculation of the Universal Gravitational Constant, of the Hubble Constant, and of the Average CMB Temperature. // *Journal of Modern Physics*. 2019. Vol.10. №06. P. 641-662 (in English)
5. B.N. Taylor and et al. Determination of e/h , Using Macroscopic Quantum Phase Coherence in Superconductors: Implications for Quantum Electrodynamics and the Fundamental Physical Constants. // *Reviews of Modern Physics*. 1969. Vol. 41. №3. P. 375-496 (in English)
6. G. Lamporesi et al. Determination of the Newtonian Gravitational Constant Using Atom Interferometry. // *Physical review letters*. 2008. Vol. 100. №5. P. 050801.1-050801.4 (in English)
7. Kalmanova, D. M., Kalkamanov, R. B. Measurement of the gravitational constant by the method of acceleration of free fall. // *Materials of the republican scientific and theoretical conference «Seifullin readings-13: preserving traditions, creating the future»*, 2017. – P. 54-58 (in Russian)
8. Kordi A.S. Variation of the gravitational constant with time in the framework of the large number and creation of matter hypotheses. // *Journal of King Saud University-Science*. 2009. Vol. 21. №2. P. 151-154 (in English)
9. Sun B. Constrain the time variation of the gravitational constant via the propagation of gravitational waves. / B. Sun, J. An, Z. Cao. // *Physics Letters B*. 2024. Vol. 848. P. 138350 (in English)
10. P. J. Mohr and et al. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. // *Reviews of Modern Physics*. 2016. Vol. 88. №3. P.035009 (in English)

Сведения об авторах:

Шаленов Е.О., доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Общая физика» института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), e.shalenov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6469-6623>

Кенесбаева А., PhD, старший преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), a.kenesbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0869-5762>

Орынбасарова Э.О., PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), e.orynbassarova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6421-4698>

Жанакулова К.А., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Горно-металлургического института им. О.А. Байконурова Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), 920103402123-d@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0001-6920-5675>

Авторлар туралы мәліметтер:

Шаленов Е.О., Ph.D докторы, Satbayev University Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты, «Жалпы физика» кафедрасы қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Кенесбаева А., PhD, Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан)

Орынбасарова Э.О., PhD, қауымдастырылған профессоры, Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының меңгерушісі (Алматы қ., Қазақстан)

Жанакулова К.А., Satbayev University О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Shalenov E.O., PhD, Associate Professor of the Department of «General Physics» of Institute of Energy and Mechanical Engineering named after A. Burkitbay of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kenesbayeva A., PhD, Senior Lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Orynbassarova E.O., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Zhanakulova K.A., PhD student at the Department of Mine Surveying and Geodesy, of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

+7 499 638-23-29

info@seymartec.ru

<https://seymartec.ru>

УФА | SHERATONPLAZA UFA CONGRESS HOTEL

22-24
ОКТЯБРЯ



I МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
SEYMARTEC
DIGITAL OIL&GAS

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ:
РАЗВЕДКА И ДОБЫЧА,
ПЕРЕРАБОТКА — 2024

