

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ ВСЕЛЕННОЙ НА ФЛУКТУАЦИИ ПОДВИЖНОСТИ ИОНОВ

А. Н. Морозов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
amor@mх.bmstu.ru

Проведены измерения флуктуаций подвижности ионов в малых объемах электролита, заключенного в тонких каналах диаметром 0,2...0,4 мкм, сделанных в лавсановой пленке толщиной 6 мкм. Приводятся результаты усреднения экспериментальных данных на периодах 1436 минут и показано наличие зависимости флуктуаций подвижности ионов от ориентации экспериментальной установки в пространстве. Сделан вывод об одноосной анизотропии пространства в направлении, близком к направлению на центр Галактики. Полученное значение относительной анизотропии составляет 2...3 · 10⁻⁶ относительных единиц, что в 2...3 раза превышает ожидаемое значение, связанное с искривлением пространства гравитационным полем Галактики.

Пространственная анизотропия Вселенной является следствием искривления пространства-времени, которое в общей теории относительности описывается с помощью метрического тензора второго ранга g_{ik} [1]. В инерциальной системе отсчета при отсутствии гравитационного поля метрический тензор становится галилеевым и имеет компоненты:

$$g_{00}^{(0)} = 1, \quad g_{11}^{(0)} = g_{22}^{(0)} = g_{33}^{(0)} = -1, \quad g_{ik}^{(0)} \Big|_{i \neq k} = 0. \quad (1)$$

Для моделей финслеровой геометрии искривление пространства-времени задается метрическими тензорами более высокого ранга, что позволяет описывать более сложный характер искривления пространства-времени, чем в случае общей теории относительности [2].

При описании центрально-симметричного гравитационного поля пространственно-временная метрика имеет вид метрики Шварцшильда [1, 3]:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2), \quad (2)$$

где r, θ, φ – координаты сферической системы координат, γ – гравитационная постоянная, M – масса создающего гравитационное поле тела, c – скорость света.

Из формулы (1) следует, что при наличии тела, создающего гравитационное поле, наблюдается искривление пространства-времени, приводящее к отличию его метрики от галилеевой. В случае, если гравитационное поле создается не центрально-симметричным телом или системой движущихся тел, то отличие метрики пространства-времени от галилеевой может быть еще более ярко выраженным. Глобальная анизотропия Вселенной может описываться еще более сложной зависимостью метрики от пространственно-временных координат.

Очевидно, что экспериментальное определение искривления пространства-времени и соответствующего ему вида метрики возможно путем регистрации особенностей распространения света во Вселенной. Такой метод может быть реализован, в частности,

при измерениях глобальной анизотропии реликтового излучения [3]. При этом должны наблюдаться области небесной сферы, имеющие повышенную или пониженную температуру реликтового фона.

Но отличие метрики пространства-времени от галилеевой должны наблюдаться не только в глобальном масштабе, но и локально, в каждой точке пространства. В терминах теории относительности это означает отличие метрического тензора g_{ik} от галилеева $g_{ik}^{(0)}$, описываемого выражениями (1). Поэтому задачей экспериментальных исследований может быть измерение локальных значений метрического тензора в лабораторных условиях.

Проведем оценку ожидаемой величины отличия значений метрического тензора g_{ik} от галилеева $g_{ik}^{(0)}$. Будем считать, что это отличие мало, и тогда метрический тензор g_{ik} можно представить в виде

$$g_{ik} = g_{ik}^{(0)} + h_{ik}, \quad (3)$$

где $h_{ik} \ll 1$.

Для оценки величины h_{ik} предположим, что для условий Земли основным источником искривления пространства-времени выступает притяжение центра нашей Галактики, имеющего экваториальные координаты $\alpha = 17^{\text{h}}42^{\text{m}}$ и $\delta = -29^{\circ}$ [4]. Считая в первом приближении, что гравитационное поле Галактики описывается метрикой Шварцшильда (2) и учитывая соотношение между величиной гравитационного потенциала

$$\varphi = -\frac{\gamma M}{r} \quad (4)$$

и скоростью v движения солнечной системы, имеем

$$\frac{\gamma M}{r} = \frac{v^2}{r}. \quad (5)$$

Тогда для направления на центр Галактики величину h , описывающую отличие компоненты $g_{11} = g_{rr}$ метрического тензора от величины $g_{11}^{(0)} = -1$:

$$g_{rr} = -1 + h \quad (6)$$

для модели Шварцшильда (2) можно представить в виде

$$h = \frac{2v^2}{c^2}. \quad (7)$$

Считая скорость движения солнечной системы относительно центра Галактики $v = 220 \text{ км/с}$ [4], имеем оценку величины h :

$$h = 1,08 \cdot 10^{-6}. \quad (8)$$

Измерение анизотропии пространства в лабораторных условиях может быть осуществлено путем организации необратимого процесса, имеющего ось чувствительности, то есть такого процесса, протекание которого имеет определенное направление в пространстве. Например, необратимого процесса, представляющего собой протекание электрического тока в выбранном пространственном направлении. Тогда при изменении направления протекания необратимого процесса по отношению к направлению на центр Галактики должны изменяться его параметры, в частности, статистические характеристики его флуктуаций.

Отметим, что проблема описания необратимых процессов в искривленном пространстве-времени до настоящего момента не имеет однозначного решения. Даже

для случая релятивистской термодинамики, описывающей состояния равновесных систем в рамках специальной теории относительности, на сегодня нет общепринятого закона преобразования температуры и теплоты. Существует несколько вариантов релятивистского описания равновесных термодинамических состояний, удовлетворяющих преобразованиям Лоренца [5].

Экспериментальное измерение анизотропии пространства основывалось на предположении об изменении дисперсии флуктуаций подвижности ионов (токового шума) в электролите в зависимости от направления вектора плотности тока в пространстве. При проведении измерений в качестве детектора использовалась электролитическая ячейка, разделенная на два сосуда с помощью лавсановой пленки толщиной $l = 6 \text{ мкм}$, имеющей отверстия (тонкие каналы) диаметром $0,2...0,4 \text{ мкм}$ [6]. В каждом из сосудов размещалось по графитовому электроду, которые обеспечивали подвод электрического тока к электролиту. Схема детектора показана на рис. 1. Использовались две установки (№ 1 и № 2), имеющие одинаковое устройство.

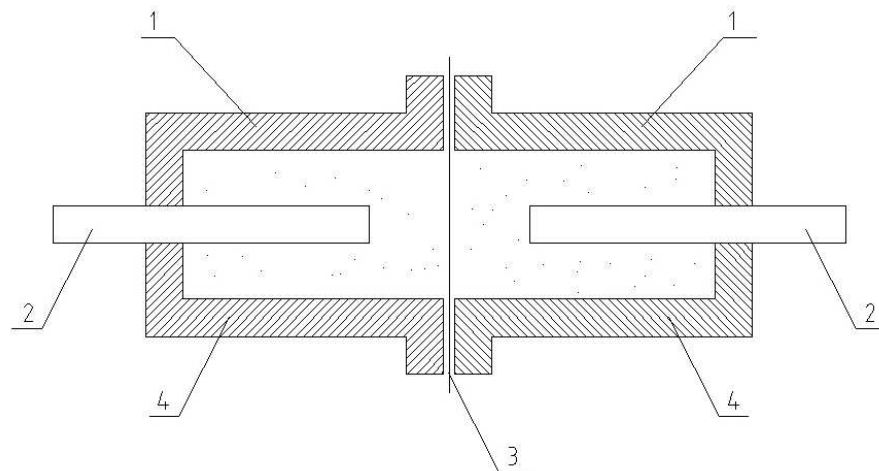


Рис. 1: Электролитическая ячейка. 1 – сосуды с электролитом, 2 – электроды, 3 – тонкая пленка с отверстиями, 4 – электролит

Электролитом являлся слабый раствор серной кислоты. Сопротивление электролитической ячейки определялось величиной отверстий в лавсановой пленке и равнялось примерно $50...100 \text{ кОм}$. При приложении внешнего напряжения величиной $2...5 \text{ В}$ через электролит, находящийся в отверстиях пленки, протекал электрический ток, флуктуации которого вызывались случайными изменениями подвижности ионов в электролите. Возникающие при этом флуктуации напряжения на электролитической ячейке усиливались в 10^5 раз в полосе $5...15 \text{ кГц}$ и с частотой опроса 30 кГц считывались в ПЭВМ. Возведенные в квадрат значения флуктуаций напряжения δU_i усреднялись за период времени, равный одной минуте

$$X = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \delta U_i^2, \tag{9}$$

где $N_0 = 1800000$ – число измерений за одну минуту. Значения X записывались в долговременную память ПЭВМ. Указанная процедура обработки сигнала обеспечивала регистрацию низкочастотных изменений дисперсии флуктуаций напряжения X на электролитической ячейке, что позволяло исследовать влияние внешних процессов на характер флуктуаций подвижности ионов в электролите.

Для подавления возможных мешающих факторов детекторы были размещены в подвальном помещении, термически изолированы и экранированы от электромагнитных наводок. С целью устранения влияния атмосферного давления и испарения электролита сосуды электролитических ячеек герметизировались. Одновременно с записью сигналов с детекторов выполнялась со скважностью в одну минуту регистрация их температуры и наружной атмосферной температуры. Измерения на установках осуществлялись непрерывно с длительностью до двух лет.

Для уменьшения влияния поляризации электродов на электролитическую ячейку подавалось не постоянное напряжение, а переменное синусоидальное напряжение с частотой 1 Гц и амплитудой A_U от 2 до 5 В.

Диаграмма направленности установки обеспечивалась тем, что измерения флуктуаций подвижности ионов осуществлялась при их движении внутри тонкого канала в пленке. Это гарантировало наличие у установки диаграммы направленности, близкой к одноосной

$$\Theta(\varphi) = \cos^2(\varphi), \quad (10)$$

где угол φ отсчитывается от оси установки (оси графитовых электродов), совпадающей с осью тонких каналов в пленке.

Вследствие вращения Земли вокруг своей оси со звездным периодом 1436 минут установка в пассивном режиме осуществляла естественное сканирование различных пространственных направлений с целью выявления пространственной анизотропии Вселенной. Усреднение результатов измерений за период непрерывных измерений, продолжительностью до двух лет, позволяло повысить отношение сигнал/шум.

На рис. 2 приведен график зависимости дисперсии флуктуаций напряжения в эксперименте с 18.10.02 по 17.10.03 на установке № 2. Точки даны с усреднением за 1 час. Всего за год было проведено около 10^{12} измерений значений флуктуаций напряжения на электролитической ячейке. Чувствительность установки достигала 10^{-20} Вм при периоде усреднения несколько месяцев. Точность регистрации относительных флуктуаций напряжения на электролитической ячейке находилась на уровне 10^{-7} относительных единиц.

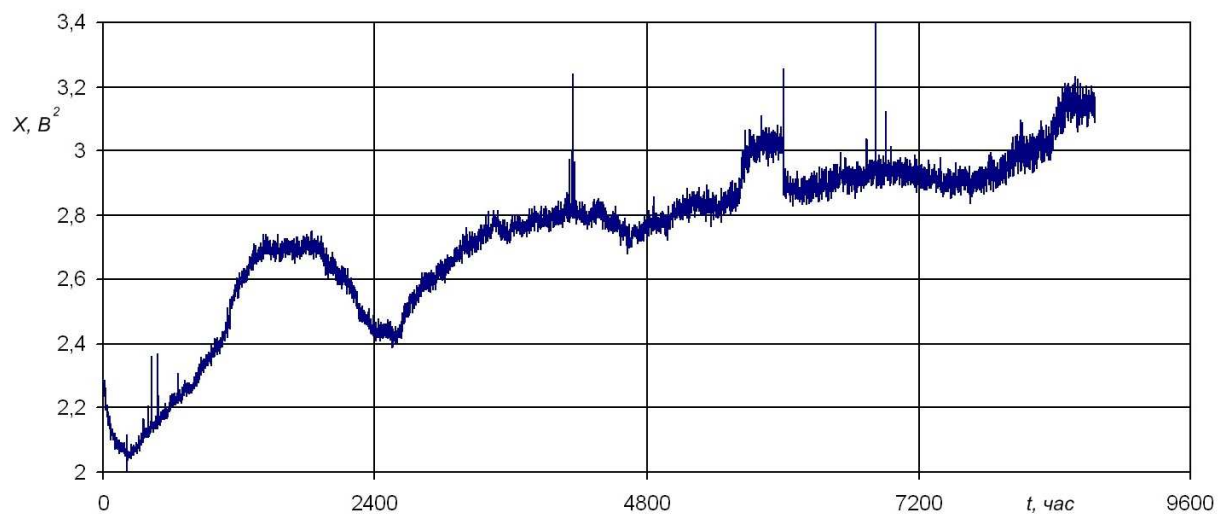


Рис. 2: График дисперсии флуктуаций напряжения в эксперименте с 18.10.02 по 17.10.03

Запись дисперсии флуктуаций подвергалась фильтрации с помощью прямоугольного окна с периодом 721 минуту (0,5 суток) с целью исключения суточного ритма,

связанного с суточными изменениями температуры установки. Вычисления производились по формуле (случай записи через 1 минуту)

$$\tilde{X}_i = \frac{X_i - \langle X \rangle_i}{\langle X \rangle_i}, \quad (11)$$

где

$$\langle X \rangle_i = \frac{1}{721} \sum_{j=i-360}^{j=i+360} X_j. \quad (12)$$

Далее значения \tilde{X}_i усреднялись за 361 минуту для исключения высокочастотного шума

$$\langle \tilde{X} \rangle_i = \frac{1}{361} \sum_{j=i-180}^{j=i+180} \tilde{X}_j. \quad (13)$$

Для более надежного исключения суточного ритма проводилась дополнительная фильтрация с периодом 1440 минут по формуле

$$\langle \tilde{Z} \rangle_i = \langle \tilde{X} \rangle_i - \frac{1}{720} \sum_{j=i-1440}^{j=i+1440} \left(\frac{\cos(\pi \cdot j/720) \sin(\pi \cdot j/1440) \langle \tilde{X} \rangle_j}{\pi \cdot j/1440} \right). \quad (14)$$

После этого значения $\langle \tilde{Z} \rangle_i$ суммировались со скважностью 1436 минуты

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle \tilde{Z} \rangle_{1436(i+k-1)}, \quad (15)$$

где N – число суток.

В результате получалась зависимость средней за N суток дисперсии флуктуаций напряжения от времени, прошедшего с начала первых суток. Это обеспечивало постоянство направления на галактические объекты для всех суток с привязкой к началу отсчета времени (началу записи).

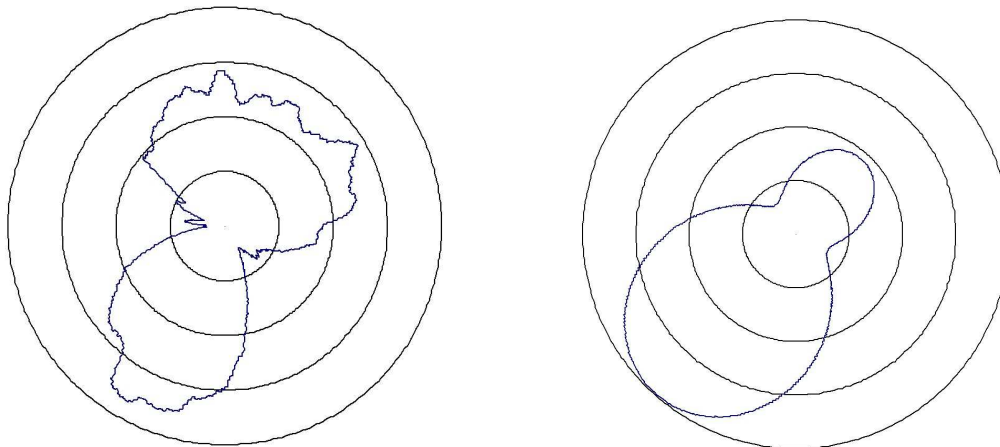


Рис. 3: Диаграммы зарегистрированной в эксперименте с 18.10.02 по 17.10.03 дисперсии флуктуаций напряжения (левая диаграмма) и расчетная диаграмма (правая диаграмма)

На рис. 3 приведены результат усреднения на звездном суточном периоде измерений дисперсии флуктуаций напряжения (левая диаграмма) и сопоставление с расчетной диаграммой (правая диаграмма) в предположении, что пространственная анизотропия имеет одноосный характер с направлением на центр Галактики. График построен по результатам измерений с 18.10.02 по 17.10.03 на установке № 2. Амплитуда переменного напряжения A_U на электролитической ячейке в начале опыта составляла 4,5 В, сопротивление – 115 кОм.

На рис. 4 приведены аналогичные диаграммы, построенные для опытов, проведенных с 09.05.08 по 19.10.08. На левой диаграмме приведен результат усреднения по двум установкам № 1 и № 2. Амплитуда напряжения A_U на обеих электролитических ячейках в начале опыта была 3,0 В, а сопротивление – соответственно 102 кОм (установка № 1) и 34 кОм (установка № 2). В конце опыта сопротивление электролитической ячейки установки № 1 стало равно 113 кОм, а амплитуда напряжения – 3,2 В. Соответствующие параметры установки № 2 стали равны: 24 кОм и 2,5 В. Правая диаграмма иллюстрирует расчетный вид зависимости в предположении, что анизотропия имеет направленность на центр Галактики.

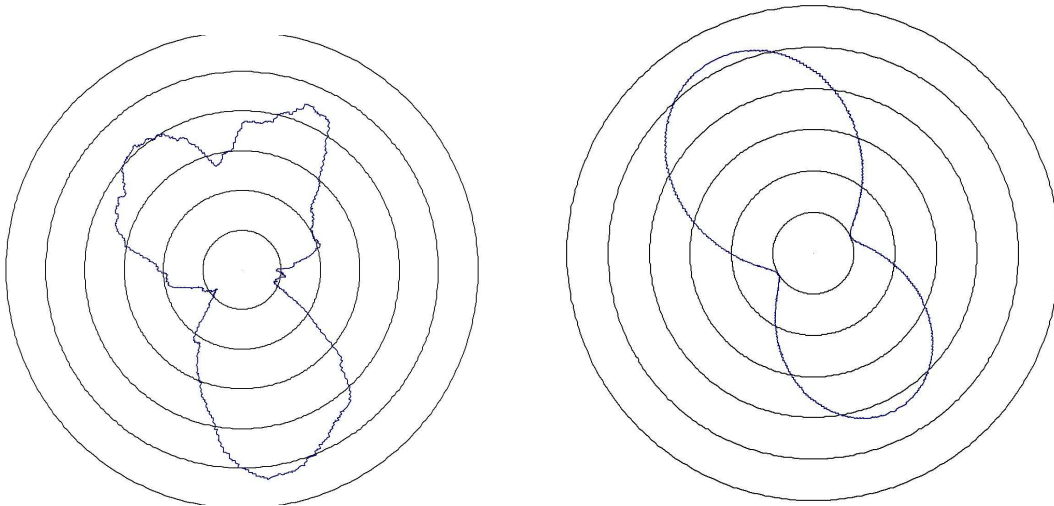


Рис. 4: Диаграммы зарегистрированной в эксперименте с 09.05.08 по 19.10.08 дисперсии флуктуаций напряжения (левая диаграмма) и расчетная диаграмма (правая диаграмма)

Как видно из приведенных диаграмм, наблюдается качественное соответствие полученных экспериментальных кривых расчетным зависимостям. Теоретическое объяснение результатов опытов может быть связано с наличием анизотропии пространства, вызванной гравитационным притяжением центра Галактики. Как было показано выше, оценки, основанные на общей теории относительности, показывают, что притяжение к центру Галактики должно вызывать одноосную деформацию пространства на уровне 10^{-6} относительных единиц.

Проведем оценку измеренного искривления пространства исходя из предположения, что связанные с ним дополнительные флуктуации напряжения на электролитической ячейке (а, следовательно, и подвижности ионов) имеют характер фликкер-шума и описываются выражением:

$$\frac{\delta U^2}{U_0^2} = \frac{\alpha_h}{f N_\mu}, \quad (16)$$

где U_0 – напряжение на электролитической ячейке, α_h – параметр Хоуге, характеризующий интенсивность фликкер-шума, N_μ – число ионов в электролите, находящихся в

отверстиях лавсановой пленки, f – частота.

Измеренную величину параметра α_h можно оценить по формуле [7]

$$\alpha_h = \frac{4\beta l^2 kT \Delta f}{\mu e U_0^2}, \tag{17}$$

где: β – относительное изменение дисперсии флуктуаций напряжения в зависимости от ориентации электролитической ячейки в пространстве, $l = 6$ мкм – толщина лавсановой пленки, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Джс/К – постоянная Больцмана, $T = 300$ К – температура электролита, $\Delta f = 10^4$ Гц – полоса регистрации флуктуаций напряжения на электролитической ячейке, $\mu = 3,26 \cdot 10^{-7}$ м²/В · с – подвижность ионов водорода в электролите, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, а квадрат напряжения на электролитической ячейке в среднем равен

$$U_0^2 = \frac{A_U^2}{2}. \tag{18}$$

Тогда окончательно имеем формулу для расчета параметра α_h :

$$\alpha_h = \frac{8\beta l^2 kT \Delta f}{\mu e A_U^2}. \tag{19}$$

При подстановке в неё указанных выше параметров получим

$$\alpha_h = 0,2 \frac{\beta}{A_U^2}. \tag{20}$$

Проведем оценку параметра α_h на основе результатов проведенных измерений флуктуаций напряжения на электролитической ячейке. В таблице представлены результаты экспериментов, выполненных в период с 2002 по 2008 год.

Таблица

Период времени эксперимента	Номер установки	A_U, B	β	α_h
с 18.10.02 по 17.10.03	№ 2	4,5	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
с 04.03.07 по 10.09.07	№ 1	2,8	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
с 09.05.08 по 19.10.08	№ 1	3,1	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
–/–	№ 2	2,7	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$

Как следует из приведенной таблицы, получившиеся значения параметра α_h превышают в 2...3 раза значение величины h , полученной выше (см. выражение (8)). Такое завышение может быть вызвано неточностью оценки по простой модели Шварцшильда, а также наличием анизотропии пространства не связанной с гравитационным полем Галактики. Для подтверждения (или опровержения) полученных результатов необходимо создание новых экспериментальных установок, толщина пленок в электролитической ячейке которых должна быть не более 1...2 мкм, а приложенное напряжение – не менее 5 В. Это позволит поднять чувствительность установок примерно в 10...20 раз, что, в свою очередь, даст возможность сделать обоснованные выводы о наличии глобальной пространственной анизотропии Вселенной.

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. - М.: Наука, 1973..
2. Space-Time Structure. Collected papers / Ed. D. G. Pavlov. - М.: TETRU, 2006.
3. Точные решения уравнений Эйнштейна / Под ред. Э. Шмутцера. - М.: Энергоиздат, 1982.

4. Физическая энциклопедия. Том 1. - М.: Советская энциклопедия, 1988.
5. Базаров И. П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1991.
6. Коротяев С. М., Морозов А. Н., Сердюк В. О., Сорокин М. О. Проявление макроскопической нелокальности в некоторых естественных диссипативных процессах // Изв. Вузов, Физика. - 2002. - № 5. - С. 3–14.
7. Морозов А.Н. Необратимые процессы и броуновское движение: Физико-технические проблемы. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. - 332 с.