

## **К ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЛИНЗЫ НА ФОНЕ ВСЕЛЕННОЙ ДЕ СИТТЕРА**

### **Аннотация**

В работе исследовано распространение света через скопление галактик (гравитационные линзы) с учетом фона Вселенной де Ситтера. Найдены “показатели преломления” пространства-времени вблизи ряда массивных скоплений галактик, углы отклонения лучей света и даны соответствующие численные оценки.

**Ключевые слова:** гравитационные линзы, метрика де Ситтера, абберационное уравнение.

**Кілт сөздер:** гравитациялық линза, де Ситтер метрикасы, абберациялық тендеу.

**Key words:** gravitational lens, de Sitter Universe, aberrational equation.

### **1. Введение.**

Гравитационные линзы – это массивные галактики или скопления галактик, действующие как собирающий объект, когда свет преломляется проходя через них.

Гравитационные линзы стали важным инструментом при изучении Вселенной, так как они фокусируют лучи света для телескопов, и позволяют посмотреть в далекое прошлое. Хотя на сегодня известны более 400 таких линз, считается, что при фотографическом обзоре неба (например, в Слоановском цифровом обзоре [1],) их было запечатлено, по крайней мере, раз в 10 больше, но многие из них еще не опознаны.

Основной кандидат на звание самой отдаленной галактики во Вселенной - это MACS0647-JD, находится в 13,3 миллиардов световых лет от нас. Мы видим ее такой, как она была около 420 миллионов лет после Большого Взрыва. Очень важным фактором в ее открытии является то, что она существенно изменилась под воздействием промежуточной галактики MACSJ0647 +7015 (гравитационной линзы) на расстоянии около пяти миллиардов световых лет.

Другим примером является открытие сверхновой звезды PS1-10afx. Она возникла в галактике около девяти миллиардов световых лет назад, что делает ее одной из самых далеких сверхновых звезд типа 1a из когда-либо обнаруженных.

Слоановский цифровой обзор неба (SDSS) осуществляется с помощью 2,5-метрового широкоугольного телескопа. SDSS составил карту более трети звездного неба с точностью, позволяющей изучать большую часть Вселенной.

Впервые вопрос о существовании гравитационных линз был поставлен Эйнштейном [2]. Вместе с тем, мы хотим особенно отметить, что одним из пионеров в изучении гравитационных линз был казахстанский астрофизик – Г.А. Тихов. Ему принадлежит, в частности, вывод формулы описывающей изменение интенсивности светового потока при прохождении через гравитационные линзы [3].

Исследование гравитационных линз, как показывает анализ литературы, можно разделить на три части. Первая – изучает гравитационные линзы в пределах солнечной системы; вторая – гравитационные линзы на масштабах галактик и их скоплений; третья – исследование гравитационных линз на масштабах Вселенной [4].

Целью статьи является исследование скопления галактик как гравитационных линз на фоне Вселенной де Ситтера.

## 2. Вселенная де Ситтера.

Вселенная де Ситтера определяется космологической постоянной  $\Lambda$ , которую можно ассоциировать с космическим вакуумом. С учётом космологической постоянной  $\Lambda$  уравнения Эйнштейна имеют вид:

$$R_{ab} - \frac{R}{2}g_{ab} + \Lambda g_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}, \quad (1)$$

где – метрический тензор,  $R_{ab}$  – тензор Риччи,  $R$  – скалярная кривизна,  $T_{ab}$  – тензор энергии-импульса барионной материи,  $c$  – скорость света,  $G$  – гравитационная постоянная Ньютона.

Сферически – симметричное решение уравнений Эйнштейна с космологическим членом (Вселенная де Ситтера) имеет вид [4]:

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

Здесь введено новое “расстояние”  $R$ , которое выражается через космологический  $\Lambda$  – член следующим образом:

$$\frac{\Lambda}{3} = \frac{1}{R^2} \quad (3)$$

Если  $\Lambda > 0$ , деситтеровская модель может быть пространственно закрытой; если  $\Lambda = 0$ , то модель вырождается в открытое плоское пространство специальной теории относительности; если же  $\Lambda < 0$ , то модель Вселенной будет открытой, но искривленной.

### 3. Пространство – время Керра – де Ситтера.

Наша Вселенная, как показывают многочисленные исследования [5], обладает рядом глобальных внешних физических характеристик. К ним, в частности, относятся расширение Вселенной, ускоренное расширение Вселенной и вращение Вселенной. Эти свойства Вселенной можно объяснить на базе концепции космического вакуума [6].

Во введении уже было отмечено, что космологический член  $\Lambda$  при определенном выборе тензора энергии–импульса небарионной материи описывает космический вакуум. Поэтому в качестве метрики пространства-времени Вселенной выберем метрику Керра – де Ситтера. Эта метрика имеет вид [7]:

$$dt - a \sin^2 \theta \quad (4)$$

где:

$$\Delta_r = (r^2 + a^2) \left( 1 - \frac{\Lambda r^2}{3} \right) - 2Mr \quad (5)$$

Последнее выражение целесообразно записать приближенно как:

$$\Delta_r = r^2 \left( 1 - \frac{2M}{r} + \frac{a^2}{r^2} - \frac{\Lambda r^2}{3} - \frac{a^2 \Lambda}{3} \right) \quad (6)$$

В выражениях (4) – (6), где  $a$  – вращательный момент,  $M$  – масса скопления галактик.

В дальнейшем будем считать, что свет распространяется в плоскости  $\theta = \pi/2$ , а само пространство – время приближенно является сферически – симметричным, так что можно считать  $\varphi = 0$ . При этих условиях метрика Керра – де Ситтера приобретает следующий вид:

$$ds^2 = \left( 1 + \frac{2M}{r} - \frac{a^2}{r^2} + \frac{\Lambda r^2}{3} + \frac{a^2 \Lambda}{3} \right) dr^2 + \left( \frac{a^2}{r^2} - \frac{2\Lambda a^4}{3r^2} - 1 + \frac{2M}{r} - \frac{a^2}{r^2} + \frac{\Lambda r^2}{3} + a^2 \Lambda - \frac{4M\Lambda a^2}{3r} + \frac{2a^4 \Lambda}{3r^2} \right) dt^2 \quad (7)$$

Используя метод, изложенный в работах [8-9], можно показать, что ей соответствует показатель преломления гравитационного поля:

$$n \approx 1 + \frac{2M}{r} - \frac{a^2}{2r^2} + \frac{\Lambda r^2}{3} \quad (8)$$

Отсюда легко вычислить угол отклонения лучей света. Он имеет вид:

$$\theta \approx \frac{4M}{p} - \frac{a^2}{p^2} + \frac{2\Lambda p^2}{3} \quad (9)$$

в котором по-отдельности выписаны слагаемые, обусловленные массой скопления ( $M$ ), ее вращением ( $a$ ) и космологическим  $\Lambda$  – членом.

Для дальнейшего анализа выберем следующие скопления в сверхскоплении Девы [10]:

Таблица 1 – Радиус, масса и вращательный момент скопления галактик

Название	$r \cdot 10^{25}$ см	$m \cdot 10^{49}$ г	$a \cdot 10^{15}$ см
Скопление NGC 7582	9,0	1,2	1.24
Скопление NGC 5033	7,2	1,0	0.96
Скопление NGC 2997	14,4	5,0	5,40
Скопление NGC 1023	17,1	6,0	7,20
Скопление Девы III	6,3	0,8	0.89
Скопление Дракона	12,0	1,5	1.47
Скопление Золотой Рыбы	16,0	5,5	6,60

Опираясь на значения этих параметров и величину космологического члена  $\Lambda = 10^{-56}$  см<sup>2</sup>, оценим их наибольшие вклады в показатель преломления (9).

Таблица 2 – Вклады – показатель преломления скопления галактик

Название	$\left(\frac{2M}{r}\right) \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{a^2}{(2r)^2}\right] \cdot 10^{-22}$	$\left(\frac{\Lambda r^2}{3}\right) \cdot 10^{-5}$
Скопление NGC 7582	1,97	0,95	
Скопление NGC 5033	2,05	0,89	1,73
Скопление NGC 2997	5,14	7,03	6,91
Скопление NGC 1023	5,19	8,86	9,75
Скопление Девы III	1,88	0,99	1,32
Скопление Дракона	1,85	0,75	4,80
Скопление Золотой Рыбы	5,08		8,53

Поэтому углы отклонения лучей света будут соответственно равны:

Таблица 3 – Показатель преломления скопление галактик и угол отклонение лучей света.

Название	$n \cdot 10^{-5}$	$\theta$
Скопление NGC 7582	4,67	9,34''
Скопление NGC 5033	3,78	7,56''
Скопление NGC 2997	12,05	24,10''
Скопление NGC 1023	14,94	29,88''
Скопление Девы III	3,20	6,40''
Скопление Дракона	6,65	13,3''
Скопление Золотой Рыбы	13,61	27,22''

Отсюда видно, что вкладами от вращения галактик можно пренебречь и оставить только слагаемые, которые пропорциональны их массам и космологическому члену.

#### 4. Аберрационное уравнение.

Аберрационное уравнение – это алгебраическое уравнение, которое позволяет рассчитать положения изображений линзируемого объекта. Количество изображений определяется порядком аберрационного уравнения. Его общее обоснование дано в монографии [3], а применение к двухкомпонентным гравитационным линзам – в работах [9].

В нашем случае аберрационное уравнение записывается таким образом:

$$x \left( \frac{4M}{p} - \frac{a^2}{p^2} + \frac{2Ap^2}{3} \right) = p, \quad (10)$$

где  $x$  – расстояние между наблюдателем и гравитационной линзой, – прицельный параметр, описывающей положения изображений линзируемого объекта.

Умножая это уравнение на  $P^2$ , имеем

$$(11)$$

Из предыдущего раздела следует, что слагаемыми, пропорциональными вращательному моменту, можно пренебречь. Поэтому вместо (11) получаем алгебраическое уравнение третьего порядка:

$$\frac{2\Lambda}{3}p^3 - \frac{1}{X}p^2 + 4M = 0 \quad (12)$$

С помощью формулы Кардано находим в этом случае два решения для абберационного параметра:

$$(13)$$

Поставляем сюда необходимые численные величины, а также полагая  $x = 30 \cdot 10^{25}$  см, получаем два действительных решения прицельных параметров:

Следовательно, наблюдатель будет видеть две светящиеся точки, являющиеся изображениями одного линзируемого объекта.

### **5. Заключение.**

В работе показано, что при расчете гравитационных линз на масштабах Вселенной необходим учет космологического фона, описываемого  $\Lambda$  – членом.

Авторы выражает благодарность Министерству Образования и Науки Республики Казахстана за поддержку этой работы, проведенной в рамках бюджетной программы 055, подпрограмма 101 “Грантовые финансирование научных исследований”.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1 <http://www.astronet.ru/db/msg/1202878/index.html>.

2 Эйнштейн А. Уравнение гравитационного поля // Собр. науч. тр.: В 4 т. – М., 1965, Т. 1., с. 448 – 451.

3 Блиох П.В., Минаков А.А., Гравитационные линзы // Киев: Наук думка, 1989, с. 41.

4 Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология, // М., 1974, с. 337 – 377.

5 Chechin L.M., “The Universe Evolution – Global Astrophysical Properties” in “The Universe Evolution – Astrophysical and Nuclear Aspects”, // Nova Science Publishers, 2013.

6 Чечин Л.М., “Космический вакуум и вращение галактик”, // *Астрономический журнал* 2010, Т. 87, №8, с. 784 – 789.

7 Aksay S., Matzner Kerr R.M. – de Sitter Universe, // 20 pages, 9 figures, *Class. Quant. Grav.*28:085012, 2011,, [arXiv:1011.0479](https://arxiv.org/abs/1011.0479) [gr-qc].

8 Иваницкая О. С., “Лоренцев базис и гравитационные эффекты в эйнштейновой теории тяготения”, // Мн., «Наука и техника», 1979, с. 14 – 18.

9 Чечин Л.М., Авхунбаева Г.М., “Двухкомпонентная гравитационная линза”, // *Известие ВУЗов. – Физика* 2013, Т. 56, с. 30 – 35.

10 <http://www.astrogalaxy.ru/151.html>.

## REFERENCES

1 <http://www.astronet.ru/db/msg/1202878/index.html>.

2 Jejnshstejn A. Uravnenie gravitacionnogo polja // *Sobr. nauch. tr.: V 4 t. – M., 1965, T. 1., s. 448 – 451.*

3 Blioh P.V., Minakov A.A., *Gravitacionnye linzy* // Kiev: Nauk dumka, 1989, s. 41.

4 Tolmen R. Otnositel'nost', termodinamika i kosmologija, // М., 1974, s. 337 – 377.

5 Chechin L.M., “The Universe Evolution – Global Astrophysical Properties” in “The Universe Evolution – Astrophysical and Nuclear Aspects”, // Nova Science Publishers, 2013.

6 Chechin L.M., “Kosmicheskij vakuum i vrashhenie galaktik”, // *Astronomicheskij zhurnal* 2010, Т. 87, №8, s. 784 – 789.

7 S. Aksay, R.M. Matzner Kerr – de Sitter Universe, // 20 pages, 9 figures, *Class. Quant. Grav.*28:085012, 2011,, [arXiv:1011.0479](https://arxiv.org/abs/1011.0479) [gr-qc].

8 Ivanickaja O. S., “Lorencev bazis i gravitacionnye jeffekty v jejnshstejnovej teorii tjagotenija”, // Мн., «Наука i tehника», 1979, s. 14 – 18.

9 Chechin L.M., Avhunbaeva G.M., “Dvuhkomponentnaja gravitacionnaja linza”, // *Izvestie VUZov. – Fizika* 2013, Т. 56, s. 30 – 35.

10 <http://www.astrogalaxy.ru/151.html>.

## Резюме

*Д. Қайратқызы, Л.М. Чечин*

### ДЕ СИТТЕР ӘЛЕМІНДЕГІ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ЛИНЗАЛАР ТЕОРИЯСЫ

Бұл жұмыста де Ситтер Әлеміндегі жарықтың галактика шоғырлары (гравитациялық линза ретінде) арқылы өтуін зерттедік. Массивті тәріздес галактика шоғырларындағы кеңістік-уақытындағы сыну көрсеткішін және сәйкесінше ауытқу бұрышын таптық.

**Кілт сөздер:** гравитациялық линза, де Ситтер метрикасы, абберациялық тендеу.

## Summary

*D. Kairatkyzy, L.M. Chechin*

### ON THE THEORY OF GRAVITATIONAL LENS IN DE SITTER UNIVERSE

Our universe, as shown by numerous studies, has a number of global external physical characteristics. These include, in particular, the expansion of the universe, the accelerated expansion of the universe and the rotation of the universe. These properties of the universe can be explained on the basis of the concept of the vacuum of space.

Cosmological constant  $\Lambda$  for a specific choice of the energy-momentum of non-baryonic matter describes the vacuum of space. Therefore, as the metric of space-time universe choose metric Kerr - de Sitter space. After some necessary calculations, built aberration equation, and solve it.

It is shown that the calculation of gravitational lenses on the scale of the universe requires the inclusion of the cosmological background described by  $\Lambda$  – member, and we have investigated the propagation of light through a cluster of galaxies (gravitational lens) the background-de Sitter universe. Found "refractive index" of space-time near a number of massive clusters of galaxies, the angles of deflection of light rays and given appropriate numerical estimates.

**Key words:** gravitational lens, de Sitter Universe, aberrational equation.



*Поступила 24.06.2013 г.*