№ 4 (370)
2026

Российская Академия Наук

НАУКА
1727

ISSN 0044-3948

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

астрономия
геофизика
космонавтика



Поиск вселенских гигантов с помощью пульсаров

Гравитационные линзы – миражи в космосе

Как искать кротовые норы?

ВЛАДИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ ШЕВЧЕНКО (18.06.1940–12.04.2026)

ОЛЬГА САЖИНА «ЗВОН КЛЮЧЕЙ ОТ ЗАВТРА»

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№ 4 (370)
2026

астрономия
геофизика
космонавтика

ISSN 0044-3948

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва



Лауреат Беляевской премии
2023 г.

Оформление обложки –
ФГБУ «Издательство «Наука»

В НОМЕРЕ:

Колонка редактора 3

ИЗМАЙЛОВ Г.Н. Река времени и «мягкий возврат» 5

ШИМАНОВСКАЯ Е.В. Гравитационные линзы – миражи в космосе 13

ПЕТРОВ А.Н., САЖИНА О.С. Общая теория относительности и расширенные теории гравитации 31

ПОРАЙКО Н.К. Поиск вселенских гигантов с помощью пульсаров 48

САЖИНА О.С., МОИСЕЕВ Ю.А. Как искать кротовые норы? 56

Космическое образование

ЦВЕТКОВ А.С. Собственные движения звезд 68

Любительская астрономия

МОРОЗОВА Т.И. Облака и связанные с ними явления 78

IN MEMORIAM

Владислав Владимирович Шевченко (18.06.1940 – 12.04.2026) 101

История науки

ШЕВЧЕНКО В.В., БЕЛАЙЧУК О.А. Слово о затмении Игоревом 102

Литературный космос

САЖИНА О.С. Звон ключей от завтра 110

© Российская академия наук, 2026
© Редколлегия журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2026
© ФГБУ «Издательство «Наука», 2026

Гравитация

РЕКА ВРЕМЕНИ И «МЯГКИЙ ВОЗВРАТ»





ИЗМАЙЛОВ Георгий Николаевич,
доктор физико-математических наук
ИРЭ РАН им. И.А. Котельникова

DOI: 10.7868/S0044394826040018

Поступила в редакцию: 05.04.2026
Принята к публикации: 02.06.2026

В статье после анализа существующих сценариев «путешествий во времени» обсуждается возможность возврата в окрестность начальной точки путешествия – «мягкий возврат». Этот эффект проявляется в разных формах, но во всех случаях речь идет не о нарушении стрелы времени, а о восстановлении структуры при естественной эволюции вперед. Обсуждается возможное происхождение времени.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в общей теории относительности (ОТО) Альберта Эйнштейна одна и та же локальная геометрия может быть реализована разными способами. В том числе математически допускается существование времениподобной кривой, которая возвращается в свою исходную точку (W.J. van Stockum, 1937; Kurt Gödel, 1949; Р. Уолд, Общая теория относительности, пер. на рус. яз. под ред. Бухбиндера И.Л., Червона С.В., 2008). Другими словами, имеет место модель «путешествия в прошлое»: через некоторое время, отсчитываемое по часам частицы, эта частица возвращается в ту же точку не только пространства, но и времени, из которой стартовала. Такая траектория называется «замкнутая времениподобная кривая».

В таких моделях время локально всегда течет вперед, хотя глобально траектория частицы может вернуться в прошлое. Это свойство нелинейности геометрии пространства-времени, при котором локальное направление времени не нару-

шается и у частицы – или путешественника во времени – растет энтропия.

Нобелевский лауреат Кип Торн сформулировал свое отношение к определению феномена времени следующим образом: *«Время – это не река, текущая в одну сторону. Это ландшафт, по которому можно, в принципе, ходить взад и вперед – если пространство-время изогнуто нужным образом»* (К. Торн, Чёрные дыры и искривлённое пространство-время: наследие Эйнштейна, 2024).

Таким образом, геометрия может «создавать» машины времени даже без гравитации. Говоря точнее, математически возможно изменить глобальную структуру пространства-времени, придав ей другую топологию, и тем самым сделать возможным существование машины времени. Например, привычное нам трехмерное пространство – евклидово, т.е. плоское. Или, если говорить о четырехмерном пространстве-времени, оно является пространством Минковского. Согласно современным наблюдательным данным, наша Вселенная с большой точностью является плоской, но, с другой стороны, имеющиеся неопределенности в оценках ее глобальных параметров все-таки оставляют место для геометрически более нетривиального пространства-времени. Пространство-время Минковского глобально гиперболично, т.е., если пользоваться двумерной аналогией, представляет собой поверхность седла. И нарушение такой глобальной гиперболичности – это необходимое условие для возможного существования машины времени.

РЕПЕРТУАР СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЗАМКНУТЫХ ВРЕМЕНИПОДОБНЫХ КРИВЫХ

Рассмотрим хорошо известный набор сценариев (мысленных экспериментов) осуществления замкнутых времениподобных кривых и их особенности, приводящие к вопросам их принципиальной осуществимости и возникающим парадоксам.

Сценарий 1. Кротовая нора как машина времени (Моррис, 1988; Бронников, 1970-е, и др.).

Создается устойчивая проходимая кротовая нора – топологический «тунель» между двумя областями пространства, физически удаленными друг от друга.

Область по одну сторону от горловины кротовой норы ускоряется до релятивистских скоростей (или помещается в сильное гравитационное поле).

Из-за релятивистского замедления времени между двумя областями возникает разность времен.

Если теперь пройти через кротовую нору в одном направлении, то произойдет попадание в будущее, в другом – в прошлое.

Таким образом, при достаточно большой разности времен путь через кротовую нору с дальнейшим возвращением уже по «обыкновенному» внешнему пространству образует замкнутую времениподобную кривую.

Для реализации такой модели, скорее всего, требуется экзотическое вещество (с существенно отрицательным давлением), для того чтобы удержать горловину кротовой норы открытой. Это требование приобретает вполне реалистичные черты в свете интерпретации недавних наблюдений по оценке параметра темной энергии (DESI, 2025). Так, согласно космологическим обзорам, темная энергия при красных смещениях больше 0.3 существовала в фантомном состоянии, что и означает наличие «разлитого по Вселенной» необходимого экзотического вещества.

Сценарий 2. Бесконечно длинный вращающийся цилиндр (Tipler, 1974).

Рассмотрим массивный цилиндр, обладающий бесконечной длиной

и бесконечно большой плотностью. Раскрутим этот цилиндр до околосветовых скоростей. Тогда пространство-время вокруг этого цилиндра закручивается настолько, что вблизи его поверхности будут образовываться замкнутые времениподобные кривые.

Очевидно, что такой сценарий, в отличие от предыдущего, является физически нереализуемым, поскольку требует наличия бесконечной длины и бесконечно большой плотности физического объекта.

Сценарий 3. Космические струны (Gott, 1991).

Рассматривают две космические струны (топологические дефекты ранней Вселенной), движущиеся мимо друг друга со скоростью, близкой к световой, которые создают коническую геометрию. В такой геометрии возможны замкнутые времениподобные кривые в области между этими струнами. Модель использует объекты – космические струны, которые пока с уверенностью не обнаружены, поэтому такой сценарий требует экзотической динамики.

Сценарий 4. Анти-де Ситтер (AdS/CFT) с периодическим временем (Banados, Teitelboim, Zanelli, 1992; Horowitz, Myers, 1999).

В таком сценарии замкнутые космические струны, удовлетворяющие условиям компактификации времени (т.е. замыкания параметра «время» в кольцо), являются устойчивыми объектами (наряду со множеством нестабильных решений этой модели). Такие струны допускают возврат во времени, однако для их существования требуется наличие особой отрицательной энергии. Эта энергия подобна энергии флуктуаций электромагнитных взаимодействий в эффекте Казимира. Другой вариант в этой же модели – это рассмотрение отрицательной космологической постоянной в поле около черной дыры, что, однако, противоречит представлениям Стандартной космологической модели, согласно которой если темная энергия описывается космологической постоянной, то она положительна, чтобы обеспечивать глобальные силы отталкивания и наблюдаемое расширение Вселенной.

Сценарий 5. Квантовые замкнутые времениподобные кривые в квантовой теории вычислений (Deutsch, 1991; Brun, 2012).

Для анализа физики замкнутых времениподобных кривых используют методы квантовой теории вычислений. В этой области даже на макроскопическом уровне доминирует квантовая механика. На замкнутых времениподобных кривых и вблизи них происходит несколько новых и отличительных (но не парадоксальных) квантово-механических эффектов, включая нарушение принципа соответствия и унитарности. Принцип соответствия в квантовой механике – это введенный Нильсом Бором в 1923 г. принцип соответствия квантовой механики и классической механики в предельном случае, т.е. когда квантовые эффекты становятся очень малы. Принцип унитарности – это один из фундаментальных постулатов квантовой механики, согласно которому полная вероятность обнаружить квантовую систему во всех возможных состояниях всегда равна единице. Из принципа унитарности, в частности, следует сохранение информации.

В таком сценарии появляется возможность «клонировать» квантовые системы и измерять состояние квантовой системы. В модели Дойча парадоксы исключаются за счет «квантовой смеси», что означает, что входное состояние должно быть согласовано с выходным через уравнение неподвижной точки.

Анализ всех перечисленных сценариев выявляет также ряд проблем.

Во-первых, все реалистические сценарии требуют нарушения слабого энергетического условия, т.е. существования экзотического вещества с отрицательной плотностью энергии. Такое вещество лабораторно существует лишь в микроскопических количествах (эффект Казимира), что недостаточно, например, для образования проходимой макроскопической кротовой норы. Однако, как уже было сказано, недавние наблюдательные указания на фантомную природу глобальной темной энергии, в принципе, дают возможность получать устойчивые проходимые кротовые норы любого размера.

Во-вторых, появляются разные классы «защиты» от существования замкнутых времениподобных кривых, например «хронологическая защита» (Hawking, 1973, 1992). При приближении к образованию замкнутых времениподобных кривых энергия квантового поля (например, вакуумных флуктуаций) стремится к бесконечности, что разрушает горловину кротовой норы. По выражению С. Хокинга, *«Законы физики предотвращают появление замкнутых времениподобных кривых»*. Как следствие, чтобы создать машину времени, нужно либо нарушить энергетические условия, т.е. ввести экзотическое вещество, либо иметь некомпактную или особенную топологию. Таким образом, при «хронологической защите» ограничения на появление замкнутых времениподобных кривых накладывают топология и энергетические условия.

В-третьих, имеется проблема нестабильности. Даже если замкнутые времениподобные кривые формально существуют, они нестабильны к малейшим возмущениям (например, к пролету одного фотона).

В-четвертых, И.Д. Новиковым указана проблема логических парадоксов (Novikov, 1992, 1998). Хотя принцип самосогласованности Новикова устраняет логические противоречия путешествий во времени, в его модели остается вопрос: почему мы не наблюдаем путешественников из будущего?

Ю.И. Кулаков отметил особенность одинаковости темпа времени для маятников, реализуемых разными физическими процессами (Кулаков, 1973): механического – период колебания определяется ускорением свободного падения и длиной маятника; электромагнитного – период определяется диэлектрической и магнитной постоянными, а также электрическим зарядом и геометрическими габаритами; атомного (лазер) – период зависит от величины постоянной тонкой структуры α, геометрических габаритов; ядерного – период зависит от постоянной полураспада λ, константы сильного взаимодействия α_s; астрономического – период определяется гравитационным взаимодействием с константой G, соблюдается изотропия пространства, выполняется принцип эквивалентности.

Отмеченная особенность связана с указанными мировыми константами. Их постоянство делает темп времени постоянным, согласованность различных типов часов является эмпирическим основанием физики как науки. Эта особенность указывает на единство пространства-времени, поскольку разные секторы физики «чувствуют» время одинаково. Постоянство констант исключает возможность естественной эволюции назад во времени. Зато открывается возможность, к примеру, создания квантового компьютера со стабильными и воспроизводимыми вычислениями.

МЯГКИЙ ВОЗВРАТ

После обзора сценариев реализации замкнутых времениподобных кривых мы имеем дилемму: вернуться в ту же точку пространства-времени, пройдя строгую замкнутую времениподобную кривую,

или «вернуться в окрестность начального состояния», используя определение «ландшафта, по которому можно, в принципе, ходить назад и вперед»? В последнем случае мы выполняем своего рода «почти-возврат», реализуем квазипериодичность, почти восстанавливаем исходное состояние. В этом случае мы обращаем внимание не на геометрию, а на динамику и энтропию – это и есть концепция мягкого возврата.

Как создать ландшафт, позволяющий вернуть реку времени в окрестность начальной точки (или состояния)? В отличие от строгих замкнутых времениподобных кривых, предполагающих геометрическое возвращение точно в ту же точку пространства-времени, концепция «мягкого возврата» рассматривает возможность возвращения системы в окрестность ее начального состояния за счет внутренней динамики, без нарушения глобальной причинности. Такой подход избегает парадоксов, связанных с нарушением причинности, и вместо этого опирается на обратимость фундаментальных законов или устойчивость динамических аттракторов.

В 1890 г. выдающийся французский ученый Анри Пуанкаре сформулировал и доказал знаменитую теорему о возвращении (Poincaré, 1890; Каток, Хасселблат, 1999), утверждающую, что любая изолированная гамильтонова система с конечным фазовым объемом почти всегда возвращается сколь угодно близко к своему начальному состоянию через достаточно большое, но конечное время $T_{\text{возвр}}$. Напомним, что гамильтоновыми системами описываются и простой математический маятник, и задача трех тел, и движение заряженной частицы в электромагнитном поле. Они часто являются хорошим приближением реальных процессов в природе и описываются хорошо известным математическим аппаратом.

Для макроскопической системы это время $T_{\text{возвр}}$ астрономически велико – так, оценка времени возврата для одного моля одноатомного идеального газа составляет $T_{\text{возвр}} \sim 10^{-10} \cdot \exp(10^{25})$ с, что значительно превышает возраст Вселенной ($\sim 10^{17}$ с).

Этот результат Пуанкаре вызвал дискуссию с немецким математиком Эрнстом Цермело, который в 1896 г. указал на кажущееся противоречие между теоремой Пуанкаре и вторым началом термодинамики (Zermelo, 1896). Пуанкаре и австрийский физик-теоретик Людвиг Больцман ответили, что второе начало термодинамики – это статистический закон, согласно которому энтропия растет только в среднем. Однако флуктуации, ведущие к уменьшению энтропии и возврату к низкоэнтропийным состояниям, вполне возможны – просто они крайне маловероятны на наблюдаемых временных масштабах.

В квантовой механике аналогичный результат известен как квантовый возврат (Bocchieri, 1957; Hahn, 1950; Fine, 2010) и наблюдается экспериментально, например в экспериментах по спиновому эхо. Спиновое эхо – это физическое явление, суть которого в том, что через некоторое время после воздействия на систему спинов (магнитных моментов ядер или электронов) возникает сигнал – спиновое эхо, который как бы «отражает» предыдущее воздействие. Также квантовый возврат лежит в основе некоторых протоколов квантовой криптографии.

Однако для большинства реальных – негамильтоновых – систем теорема Пуанкаре неприменима. В этом случае в таких системах действует иной механизм восстановления: притяжение к устойчивым аттракторам. Так, согласно теории динамических систем, даже при сильном возмущении система со временем релаксирует к своему естественному аттрактору – будь то точка, предельный цикл или странный аттрактор. Этот процесс не требует «возврата» в прошлое,

но обеспечивает восстановление устойчивого состояния при сохранении внешних условий. Аттрактор представляет собой своего рода фрактальное множество, т.е. вечно движущаяся система никогда точно не приходит в одно из своих предыдущих состояний. Существование такого фрактального аттрактора позволяет системе осуществить макроскопический «возврат».

Примером служит глобальная океаническая система. Исследования в GEOMAR (Кильский университет) показали, что при прекращении антропогенного воздействия (выбросов CO_2, перелова морепродуктов, загрязнения) океанические экосистемы способны к частичному восстановлению. Модели биогеохимической эволюции указывают, что полное восстановление термогалинной циркуляции и глубинных экосистем может занять от 10 000 до 1–2 млн лет, в зависимости от масштаба нарушения. Это не «возврат по Пуанкаре», а релаксация к климатическому аттрактору под действием физико-химических законов.

Сопоставим такое время с галактическим годом (примерно 225 млн земных лет), который является удобной единицей измерения для совместного отображения космических и геологических периодов времени и позволяет говорить о времени повторения углового положения относительно галактического центра.

Галактический год, также известный как космический год, – это продолжительность времени, необходимая для того, чтобы Солнце совершило один оборот вокруг центра нашей Галактики. Солнечная система движется со средней скоростью 230 км/с (828 000 км/ч) в пределах своей траектории вокруг галактического центра. Среднее расстояние от Солнца до центра Галактики: $R_{\odot} \approx 8$ килопарсек (≈26 000 св. лет). Длина орбиты $\approx 2\pi \times 8000$ парсек $\approx 160\,000$ св. лет (согласно данным Gaia, VLBI, моделям динамики Галактики).

С известными оговорками – приближение круговой орбиты, отсутствие четкого положения звезд, газовых облаков и спиральных рукавов из-за эволюции – Солнечная система не возвращается точно в одно и то же гравитационное окружение даже спустя один галактический период. Таким образом, точного «возврата» в исходное состояние не происходит ни по координатам в абсолютном смысле, ни по локальной среде.

Таким образом, при таком сопоставлении можно заключить, что восстановление геологически осуществимо. Это восстановление к состоянию, близкому к современному, происходит не потому, что траектория замкнулась, а потому что система релаксировала к аттрактору. В этом случае хаос не эквивалентен случайности. Это сложная, но детерминированная динамика. Коротко говоря, выключение возмущения приводит к возврату состояния системы к аттрактору.

Таким образом, фрактальные – или странные – аттракторы представляют собой яркий пример «ландшафта мягкого возврата»: нет точного цикла, но есть устойчивая динамика в окрестности аттрактора. Хаос ускоряет установление эргодичности, иначе говоря, способствует «возврату» в статистическом смысле: в хаотических системах траектория быстро «заполняет» доступный фазовый объем. Это ускоряет достижение термодинамического равновесия или квазиравновесного состояния.

С термодинамической точки зрения, в хаотической системе микроскопический возврат невозможен на практике (из-за экспоненциального разбегания траекторий). Однако макроскопические переменные (тем-

пература, давление, средняя энергия) осциллируют около равновесного значения, что обеспечивает наблюдаемость «мягкого возврата».

Суть в том, что, рассматривая детерминированную динамику сложной системы (исключая случайность в уравнениях), мы не связываем хаос со случайностью. В хаотических системах траектория быстро «заполняет» доступный объем данных динамических переменных, описывающий состояние системы. Это ускоряет достижение термодинамического равновесия или квазиравновесного состояния. Следовательно, система быстрее возвращается к макроскопически похожему состоянию.

И таких примеров много.

Так, в экономике равновесное состояние достигается, когда спрос уравновешен предложением, химическое равновесие в смеси достигается, когда скорости прямых и обратных реакций равны.

Таким образом, хаотическая динамика приводит к однородному состоянию, т.е. «возврату» к равновесному состоянию. И в итоге хаос разрушает точный возврат, но создает статистический возврат.

Интересным кажется вопрос о возможности мягкого возврата в системе клеточного автомата (идея Ст. Улама и Дж. фон Неймана). Наиболее известным клеточным автоматом является «Игра жизни» (Conway's Game of Life). Эта математическая модель используется для описания эволюции дискретных сложных конечных систем в теории вычислений, математике, физике, биологии.

Могут ли клеточные автоматы проявлять свойства хаотической системы, которая будет удовлетворять «мягкому возврату»? В контексте клеточного автомата – это возвращение в окрестность типичного состояния по макро-

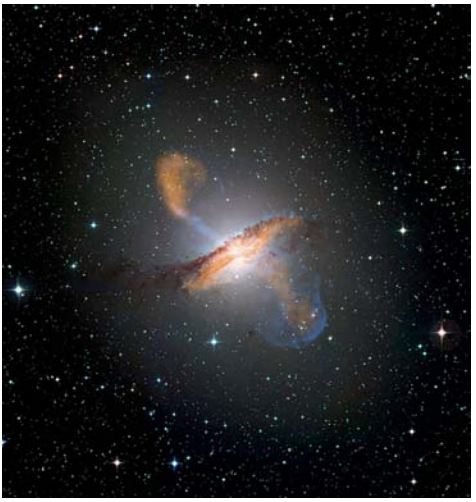


Рис. 1. Радиогалактика Центавра A NGC 5128. Изображение построено по объединению рентгеновских данных (синий) обсерватории «Чандра» НАСА с микроволновыми (оранжевый) и видимыми изображениями, что позволяет увидеть джеты и радиоизлучающие лепестки, исходящие из центральной сверхмассивной черной дыры. Источник изображения: SO/ WFI; MPIfR/ESO/APEX/Weiss A. et al.; NASA/ CXC/CfA/Kraft R. et al.

скопическим переменным: плотность «живых» клеток, корреляционная длина, энтропия блоков. Клеточные автоматы широко используются как модели сложных физических систем: решетчатый газ Больцмана (гидродинамика), модели фазовых переходов, модели климата и экосистем. Для квантовых вычислений используют квантовые клеточные автоматы.

В этих моделях «мягкий возврат» проявляется как релаксация к равновесию или стационарному состоянию – даже если микроскопическая динамика хаотична. Часто наблюдается множественность устойчивых состояний: при малых возмущениях система возвращается к исходному аттрактору, а при больших – переходит

к другому. В итоге мы имеем точный аналог «мягкого возврата».

КАК ПОЯВЛЯЕТСЯ САМО ВРЕМЯ?

Остается вопрос, откуда берется время как дополнение к пространству. Где начало «реки времени»? Если время проявляется как коллективный эффект на микроуровне – подобно температуре и (или) давлению, из-за отсутствия детерминированного понимания микромира, в котором есть корреляции квантовых флуктуаций, то «реку времени» можно связать с энтропией, что объясняет однонаправленность из прошлого в будущее. Энергия Вселенной огромна, а вследствие соотношения неопределенностей Гейзенберга между интервалами энергии и соответствующим временем $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ ($\hbar$ – постоянная Планка) точность определения начала времени крайне велика. Следовательно, можно утверждать о начале времени в момент Большого взрыва. То есть время – это эмерджентный, т.е. внезапно возникающий, эффект, происходящий при разделении Вселенной на наблюдателя (часы) и остальную систему.

С другой стороны, на макроуровне время описывается ОТО. Если, как предлагают некоторые исследователи, рассматривать черные дыры (ЧД) как вывернутое наизнанку пространство-время после Большого взрыва, то можно исследовать поведение времени около вращающейся ЧД. Так, движение во времени вокруг вращающейся ЧД неизбежно порождает движение в пространстве по азимуту.

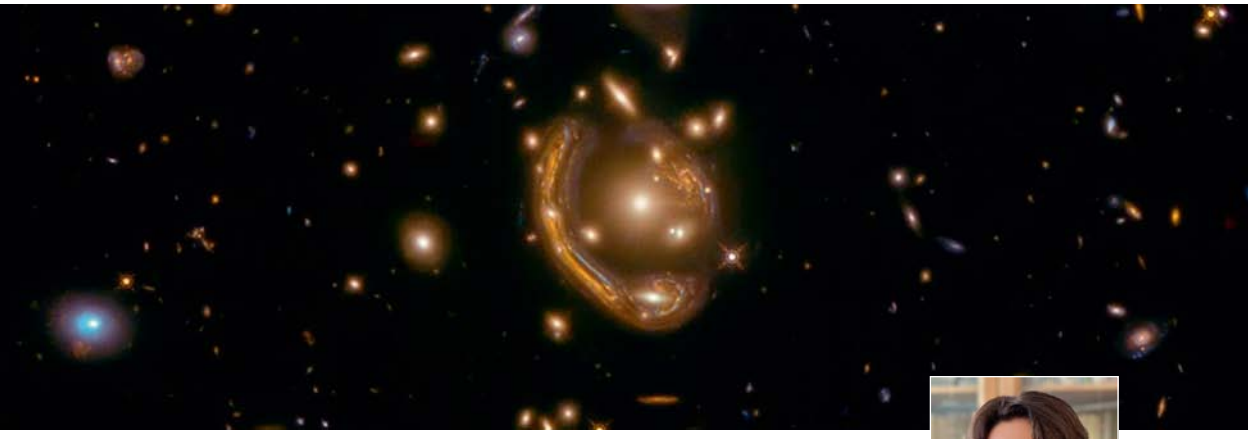
Движение наблюдателя, движущегося к центру вращающейся ЧД, приводит к эффектам увлечения инерциальной системы отсчета (неподвижной относительно гироскопов наблюдателя) во вращательное движение. Такой эффект был проверен в случае слабого гравитационного поля Земли теории Лензе–Тирринга. Движение спутника в эксперименте подтвердило ее вывод. При определенных условиях угловая скорость пространства становится равной угловой скорости самой ЧД. Это значит, что на горизонте событий ткань пространства вращается со скоростью света и локальное время наблюдателя полностью подчинено этому вращению. Наблюдения за сверхмассивными черными дырами и их окружением в будущем поможет уточнить особенности связей пространства и времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, «мягкий возврат» – это универсальная идея, проявляющаяся в разных формах, в различных динамических системах. И во всех случаях речь идет не о нарушении направления стрелы времени, а о восстановлении структуры при естественной эволюции вперед.

Реализация замкнутых времениподобных кривых не только может привести к неразрешимым пространственно-временным парадоксам, но и требует для своей реализации сложной топологии пространства и наличия экзотического вещества с отрицательным давлением. Однако оказывается, что идея вернуться не буквально в исходное состояние, но в его окрестность меняет проблему кардинальным образом – такой «почти-возврат» не только не содержит парадоксов, но и, как оказывается, широчайше действует в природе. Машина времени — устройство, имеющее ограниченный объем и конечное число частиц, восстанавливающая исходное состояние после последовательности действий при неизменной эволюции Вселенной.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ – МИРАЖИ В КОСМОСЕ





ШИМАНОВСКАЯ Елена Владимировна,
кандидат физико-математических наук
ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова

DOI: 10.7868/S0044394826040002X

Поступила в редакцию: 23.05.2026
Принята к публикации: 23.06.2026

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ СВЕТА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Гравитационное поле массивного небесного тела может изменять направление распространения электромагнитного излучения подобно тому, как обычная линза изменяет направление светового луча. Еще Исаак Ньютон в своей книге «Оптика» (1704) писал об отклонении луча света массивными объектами, находящимися на его пути: *«Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучи; и не будет ли при прочих равных условиях это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?»* Правда, он пытался объяснить таким образом явление дифракции света.

Почти сто лет спустя, в 1801 г., немецкий математик и астроном Иоганн Зольднер, исследуя влияние массивных тел на корпускулы (частицы) света в рамках ньютоновской физики, получил формулу для угла $\hat{\alpha}$ отклонения луча света вблизи тела массой M:

$$\hat{\alpha} = \frac{2GM}{c^2 r},$$

где G – гравитационная постоянная, c – скорость света, r – минимальное расстояние между лучом света и гравитирующим телом.

Тогда у края Солнца свет далекой звезды должен отклоняться от первоначальной траектории на $\hat{\alpha} = 0.84$ угловых секунды. Альберт Эйнштейн в 1911 г., когда работа над общей теорией относительности (ОТО) еще

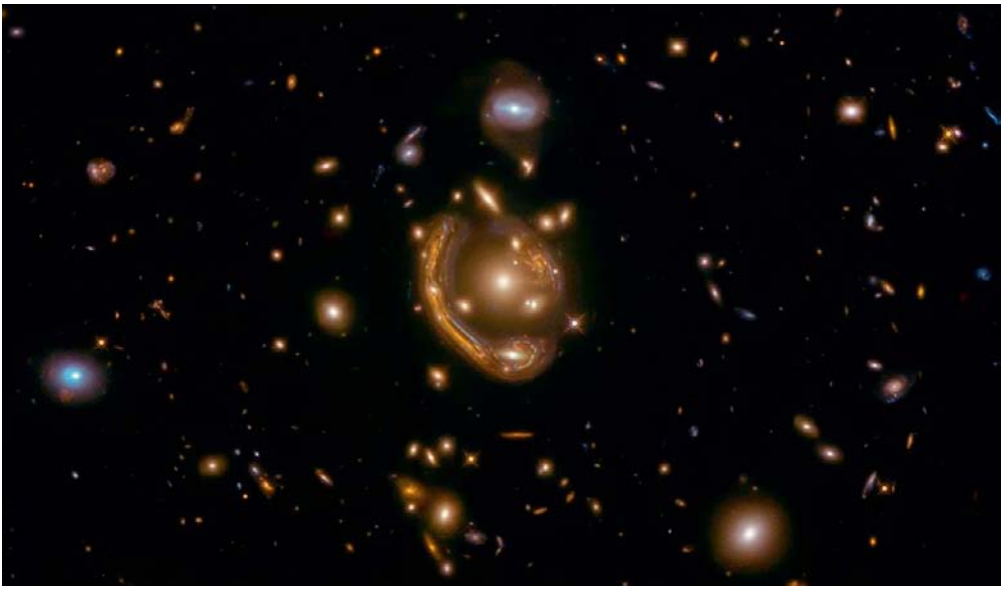


Рис 1. Снимок объекта «Расплавленное кольцо» в созвездии Печь. Изображение далекой галактики, расположенной на расстоянии более 9 млрд световых лет от нас, искажено в результате гравитационного линзирования на скоплении галактик, находящемся практически на луче зрения. Источник: фото, полученное космическим телескопом «Хаббл». https://science.nasa.gov/asset/hubble/molten-ring-galaxy/

не была закончена, получил аналогичный результат.

Однако уже в 1915 г. Эйнштейн понял, что угол отклонения луча света должен быть в два раза больше, поскольку, согласно ОТО, луч света изгибается не только из-за ньютоновского притяжения, но и вследствие искривления пространства-времени в сильном гравитационном поле.

Впервые этот угол отклонения был измерен британскими астрономами А. Эддингтоном, Ф.У. Дайсоном и Э. Кроммелином во время солнечного затмения 1919 г. по смещению положений нескольких звезд вследствие отклонения лучей света в гравитационном поле Солнца (рис. 2). Это стало первым экспериментальным подтверждением ОТО.

Впоследствии задача отклонения луча света далекой звезды при прохождении вблизи другой массивной звезды рассматривалась в работах российского физика Ореста Хвольсона в 1924 г. и Альберта Эйнштейна в 1936 г. Оба автора пришли к выводу о возможности возникновения второго изображения фоновой звезды, находящегося на столь малом расстоянии от первого, что разрешить эти изображения с помощью наземного телескопа

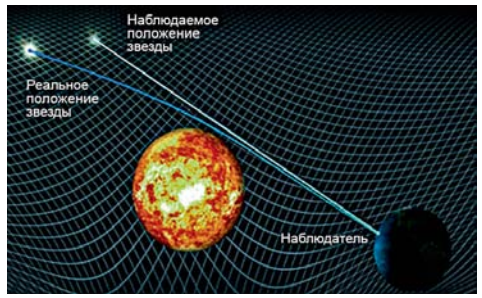


Рис 2. Схема отклонения луча света далекой звезды в гравитационном поле Солнца. Источник: http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=6d2cb86d-3184-4700-b56e-009d97905e89&print=1