

Термодинамика черных дыр

А.И. Соколовский

Профессор кафедры теоретической физики

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара



100 лет назад А. Эйнштейн разработал общую теорию относительности (ОТО) – теорию тяготения (теорию гравитации)

Это, по мнению многих ученых, самая красивая физическая теория!

Это самая необычная физическая теория: поле тяготения (гравитационное поле) – это не поле в пространстве!

Это теория пространства с массивными объектами в нем!

Общая теория относительности в масштабах Солнечной системы подтверждена с высокой точностью.

I. Эволюция звезд и черные дыры

Под черной дырой понимается объект, для которого **вторая космическая скорость** равняется скорости света. Ни одно тело не сможет удалиться с его поверхности на бесконечность, поскольку скорость любого тела не может превышать скорость света.

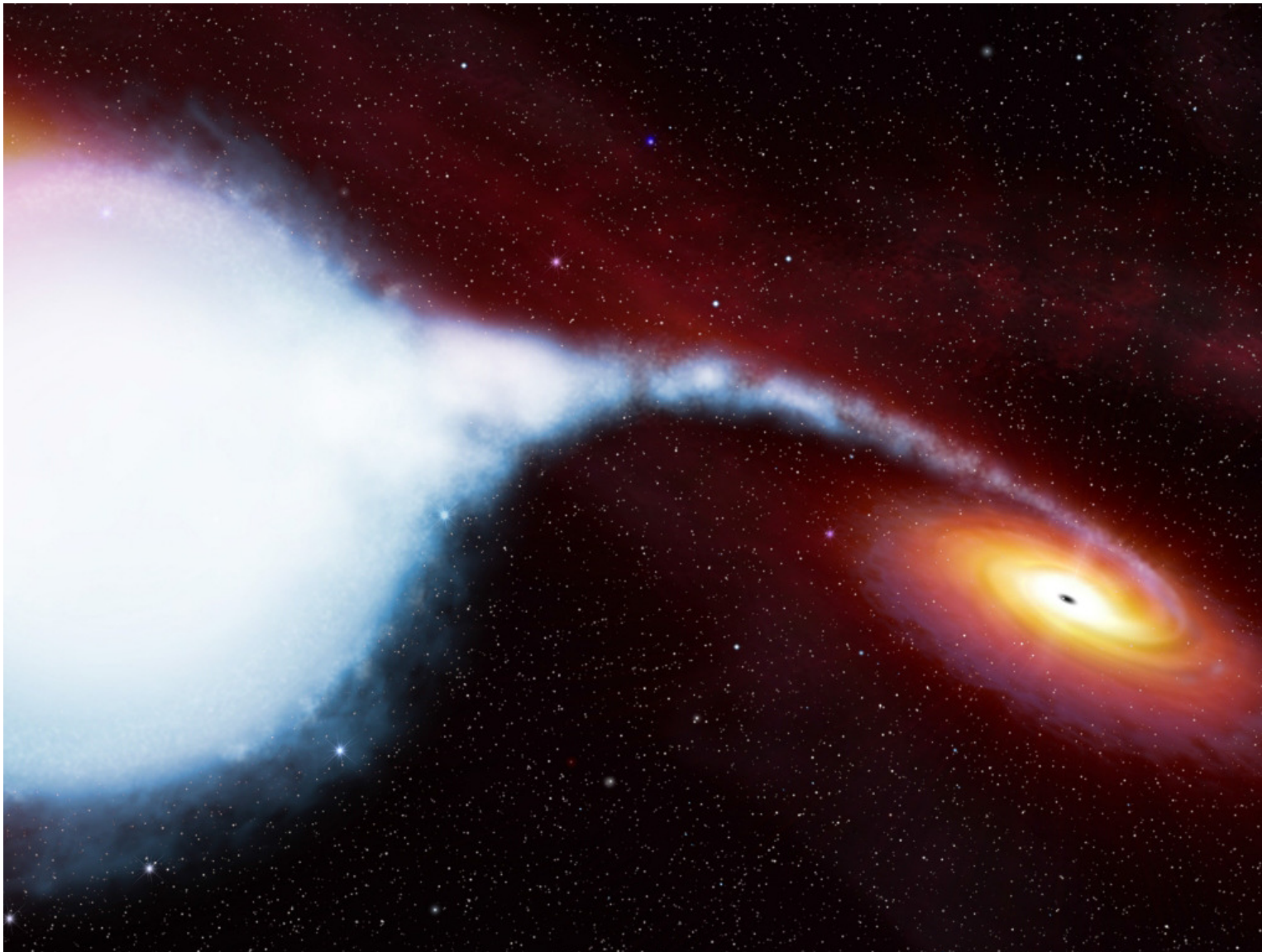
Свет также не может удалиться от такого объекта, поэтому он невидим.

Термин "чёрная дыра" предложен Дж. Уилером (J.A. Wheeler, 1967 г.)

Идея о возможности существования черной звезды высказана:

Дж. Мичеллом (J. Michell, 1784 г.), П.С. Лапласом (P.S. Laplace, 1796 г.)

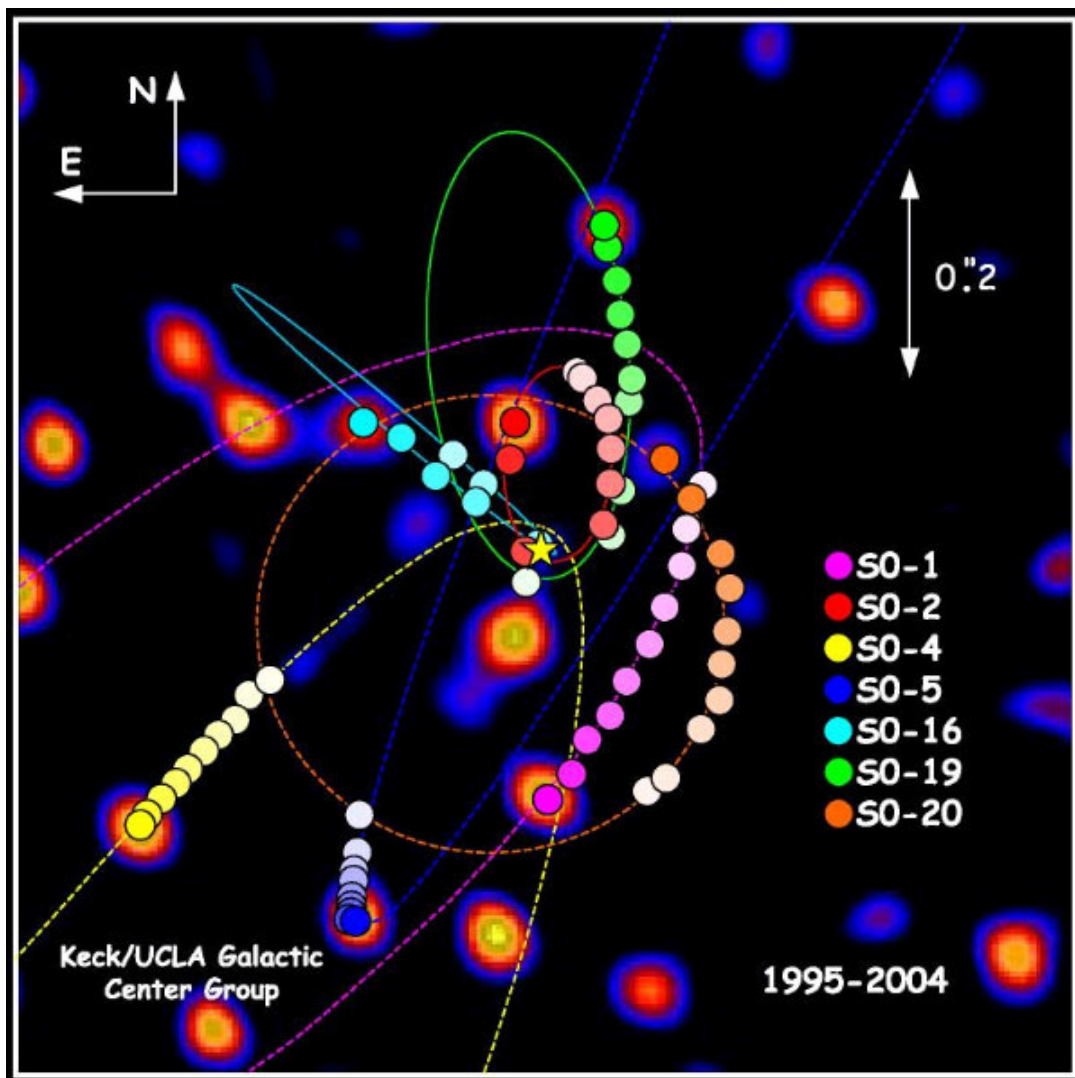
О наличии в некоторой области пространства черной дыры судят по влиянию её поля тяготения.



Двойная система
Лебедь X-1

<http://sci.esa.int/science-e/www/object/>

Голубая звезда, разрушаемая черной дырой, окруженной веществом звезды (аккреционным диском).



Центральная область нашей галактики – Млечного пути

Орбиты звёзд в ядре нашей Галактики. Невидимый объект, вокруг которого движутся звезды является черной дырой массы $3,7 \cdot 10^6 M_{\odot}$ (M_{\odot} – масса Солнца).

Движение звезд изучалось 10 лет.

Самая маленькая чёрная дыра – объект в двойной системе XTE J1650 с массой $3,8 M_{\odot}$ (2008 г.).

Этапы эволюции звезд:

- звезда с идущими в ней термоядерными реакциями;
- звезда после прекращения термоядерных реакций превращается:
 - в белый карлик при $M < 1,4 M_{\odot}$;
 - в нейтронную звезду при $M < 2,5 M_{\odot}$;
 - в черную дыру при $M > 2,5 M_{\odot}$ после коллапса.

$2,5 M_{\odot}$ – предел Оппенгеймера-Волкова (J.R. Oppenheimer, G. Volkoff, 1939 г.)

$1,4 M_{\odot}$ – предел Чандрасекара (S. Chandrasekhar, 1930 г.)

Черные дыры образуются при гравитационном коллапсе обычных звезд.

Коллапс наступает после завершения в звезде термоядерных реакций и состоит в сжатии ее вещества в точку – центр звезды.

Поэтому **черная дыра** для своего описания **требует квантового обобщения ОТО**, которое находится в стадии разработки.

Характерный размер области, для анализа процессов в которой ОТО без квантового обобщения неприменима – **длина Планка**

$$l_p \equiv \sqrt{\hbar G / c^3} = 1,61 \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

Здесь \hbar – постоянная Планка, c – скорость света, G – гравитационная постоянная, определяющая силу гравитационного взаимодействия масс

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

(закон всемирного тяготения).

В рамках ОТО динамика гравитационного коллапса звезды дается решением К. Шварцшильда (K. Schwarzschild, 1915 г.) уравнений ОТО и определяется только ее массой M .

В общем случае черная дыра имеет в рамках ОТО всего три характеристики: массу M , момент импульса I и заряд Q . Никакие дополнительные параметры, описывающие её структуру в рамках ОТО не найдены.

Важной характеристикой черной дыры является ее гравитационный радиус (радиус Шварцшильда, радиус Мичелла-Лапласа) $r_g = 2MG / c^2$.

Сфера такого радиуса называется горизонтом событий. Удаленный наблюдатель не видит происходящего в черной дыре за горизонтом событий.

Объекты (массивные тела, свет), попадающие в гравитационное поле черной дыры, при определенных условиях захватываются дырой и безвозвратно исчезают за горизонтом событий (по часам удаленного наблюдателя – за бесконечное время). Время падения объекта к центру черной дыры по его часам конечно.

II. Термодинамика и процессы во Вселенной. Термодинамика черных дыр

В идеале ОТО должна формулироваться как микроскопическая теория, которая строится на основе механики, с последующим переходом к макроскопическому описанию с помощью методов статистической физики. Исследования в этом направлении продолжаются.

Термодинамика – макроскопическая теория, описывающая состояние системы средними значениями физических величин или их функциями.

Классическая проблема: "Применимость термодинамики к Вселенной в целом".

Открытие формул для энтропии и температуры черной дыры

Дж. Уилер (1970 г., J. Wheeler):

- Теорема о единственности набора параметров M , I , Q (масса, момент импульса, заряд), описывающих состояние черной дыры ("black holes have no hair").
- Энтропия и температура черной дыры равны нулю.

Мотив: формула Больцмана:

$$S = k_B \ln \Delta\Gamma$$

$\Delta\Gamma$ – статистический вес, то есть число микросостояний системы, реализующих данное ее макросостояние

k_B – постоянная Больцмана

Я. Бекенштейн (J. Bekenstein, 1972 г.):

- Черные дыры должны иметь температуру, энтропию.

Мотив: иначе не будет выполняться закон возрастания энтропии в процессах с их участием.

- Энтропия черной дыры

$$S = \alpha A \quad A = 4\pi r_g^2 \text{ – площадь горизонта событий, } \alpha \text{ – постоянная}$$

Мотив: анализ взаимодействий черных дыр с другими объектами и друг с другом показывает, что суммарная площадь горизонтов растет.

- Температура черной дыры

$$T = \beta g \quad g = MG / r_g^2 \text{ – ускорение силы тяжести на горизонте событий}$$

β – постоянная

Мотив: В известных случаях ускорение силы тяжести (surface gravity) постоянно на горизонте событий черной дыры.

- Основное соотношение термодинамики для черной дыры Шварцшильда имеет вид

$$dE = TdS \quad E = Mc^2 \text{ – энергия дыры}$$

и дает

$$\beta = \frac{c^2}{8\pi\alpha G}.$$



Слияние черных дыр

http://www.space.com/imageoftheday/image_of_day_060203.html

С. Хокинг (S. Hawking, 1974 г.):

- Черная дыра не только поглощает, но и излучает фотоны как абсолютно черное тело (излучение Хокинга).
- Температура черной дыры Шварцшильда дается формулой

$$T = \frac{\hbar}{2\pi c k_B} g = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}$$

- Энтропия черной дыры дается формулой

$$S = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A = \frac{4\pi k_B M^2 G}{\hbar c}$$

А. Стромингер, К. Вафа (A. Strominger, C. Vafa; 1995 г.):

- Подтверждение формулы для S в струнной модели черной дыры на основе формулы Больцмана $S = k_B \ln \Delta \Gamma$

В. Унру (W.G. Unruh, 1976 г.):

- Относительность вакуума в неинерциальных системах отсчета (эффект Унру).
- Температура Унру

$$T = \frac{\hbar}{2\pi c k_B} a \quad a \text{ — ускорение}$$

При $a = g$ совпадает с температурой Хокинга.

Испарение черных дыр

Хокинг (1974 г.): Черная дыра излучает как абсолютно черное тело с температурой

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B GM}$$

При температуре $T > T_U$, где $T_U = 2,72K$ – температура реликтового излучения, черная дыра теряет массу и энергию (испаряется).

Это возможно при массе дыры, удовлетворяющей неравенству

$$M \leq M_H \equiv \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B T_U} = 7,53 \cdot 10^{-3} M_{\oplus} \quad M_{\oplus} \text{ – масса Земли}$$

Время испарения черной дыры

$$\tau_{ev} = 5\pi 2^{10} \frac{M_0^3 G^2}{\hbar c^4}$$

Время испарения дыры с массой M_H

$$\tau_{ev,H} = 8,92 \cdot 10^{60} \text{ лет}$$

Время жизни Вселенной

$$\tau_U = 1,38 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

Время испарения дыры с массой Планка $m_P = \sqrt{\hbar c / G} = 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ г}$ составляет

$$\tau_{ev,P} = 8,67 \cdot 10^{-40} \text{ сек}$$

III. Топология пространства и квантовая механика и глобальные перспективы Человечества

– Кинофильм "Межзвездный" ("Interstellar", 2014, США):

- Падение на черную дыру может закончиться благополучно.
- Удаленность других звезд и их планет на многие световые годы не помеха для Человечества.

1 св.год (ly)	– $9,46 \cdot 10^{12}$ км	путь, проходимый светом за год
1 астр. ед. (au)	– $1,50 \cdot 10^8$ км	расстояние между Землей и Солнцем
4, 22 ly	– расстояние до ближайшей звезды Проксима созвездия Центавр	
$2,52 \cdot 10^6$ ly	– расстояние до ближайшей крупной галактики Андромеды	

- Мы не одни во Вселенной.
- Будущее может влиять на прошлое.

– Необходимость обобщения ОТО:

- Квантовое обобщение ОТО
- Проблема темной материи
- Проблема темной энергии

– Черные дыры и Большой адронный коллайдер.

– Есть ли признаки кризиса в физике?

Суть кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т.е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом. "Материя исчезла" – так можно выразить основное и типичное по отношению ко многим частным вопросам затруднение, создавшее этот кризис.

"Материя исчезает" – это значит исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными (непроницаемость, инерция, масса и т.п.) и которые теперь обнаруживаются, как относительные, присущие только некоторым состояниям материи. Ибо *единственное* "свойство" материи, с признанием которого связан философский материализм, есть свойство *быть объективной реальностью*, существовать вне нашего сознания.

Материя есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них.

Электрон так же *неисчерпаем*, как и атом, природа бесконечна...

Книга В.И. Ленина "Материализм и эмпириокритицизм"