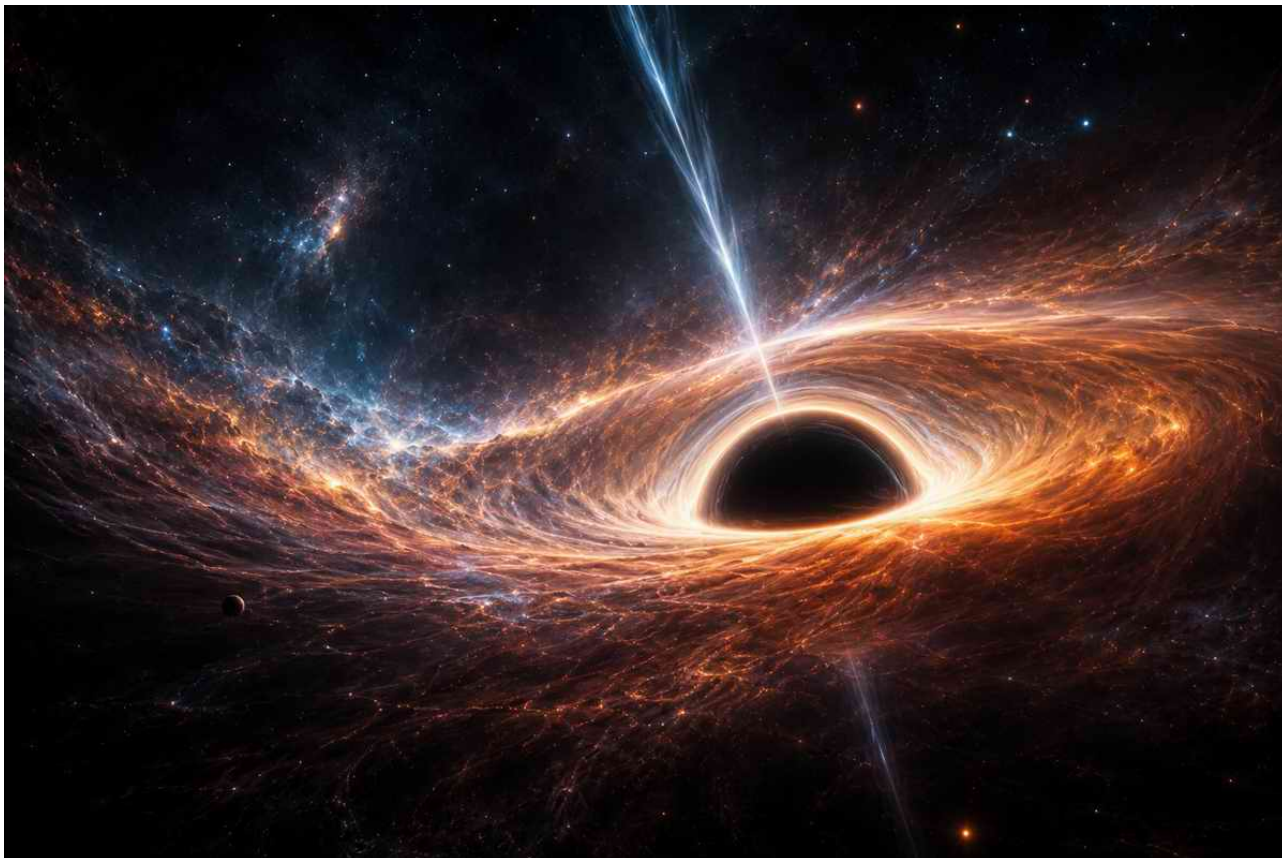


## Как быстро может вращаться черная дыра: предел, который охраняет саму структуру пространства-времени



Дата публикации: 05.07.2026

Черные дыры кажутся воплощением абсолютной простоты. Согласно общей теории относительности, полностью сформировавшаяся черная дыра описывается всего тремя параметрами: массой, электрическим зарядом и угловым моментом, который обычно называют спином. На практике электрический заряд астрофизических черных дыр настолько мал, что им можно пренебречь. В результате почти вся информация о таком объекте сводится к двум величинам — массе и скорости вращения. Но именно спин превращает относительно простую черную дыру в один из самых удивительных объектов во Вселенной.

В 1963 году новозеландский математик Рой Керр нашел точное решение уравнений Эйнштейна для вращающейся черной дыры. Оказалось, что вращение радикально меняет геометрию пространства-времени. Если невращающаяся черная дыра Шварцшильда обладает идеальной сферической симметрией, то черная дыра Керра становится слегка сплюснутой вдоль оси вращения. Еще

важнее другое следствие: сама ткань пространства начинает увлекаться вращением массивного объекта. Этот эффект, известный как эффект Лензе—Тирринга или увлечение инерциальных систем отсчета, заставляет любое тело вблизи черной дыры частично следовать ее вращению. Внутри особой области, называемой эргосферой, оставаться неподвижным относительно далеких звезд уже невозможно — пространство буквально несет все вокруг вместе с собой.

Возникает естественный вопрос: существует ли предел такого вращения? Интуитивно кажется, что если продолжать «подкармливать» черную дыру веществом, несущим угловой момент, ее можно раскручивать бесконечно. Однако теория относительности дает иной ответ.

В 1970-х годах Кип Торн, Яков Житков, Игорь Новиков и другие исследователи показали, что существует фундаментальный предел вращения черной дыры. В геометрических единицах он соответствует параметру спина  $a = M$ , где скорость света и гравитационная постоянная принимаются равными единице. Такое состояние называют экстремальной черной дырой Керра.

Физический смысл этого ограничения чрезвычайно глубок. По мере увеличения спина горизонт событий постепенно уменьшается и приближается к сингулярности. Если же вращение каким-либо образом превысит критическое значение, математическое решение Керра перестает описывать обычную черную дыру. Горизонт событий исчезает вовсе, а центральная сингулярность оказывается открытой для внешнего мира. Возникает так называемая голая сингулярность — объект, существование которого противоречит гипотезе космической цензуры.

Эта гипотеза, предложенная Роджером Пенроузом, утверждает, что природа скрывает сингулярности за горизонтом событий, не позволяя наблюдателю увидеть область, где классическая теория гравитации перестает работать. Если голые сингулярности действительно невозможны, значит сама Вселенная каким-то образом препятствует превышению критического спина.

Интересно, что в реальной астрофизике существует еще более строгий предел. Даже если математически экстремальная черная дыра возможна, процессы аккреции не позволяют достичь идеального значения. Фотоны, испускаемые внутренними областями аккреционного диска, также переносят угловой момент и начинают тормозить дальнейшее раскручивание. В результате максимальный достижимый параметр вращения оказывается немного меньше единицы — около 0,998. Именно это ограничение известно как предел Торна—Житкова—Новикова и считается наиболее реалистичным для астрофизических черных дыр.

Но как измерить скорость вращения объекта, горизонт событий которого невозможно увидеть напрямую?

Главным инструментом становится аккреционный диск. Газ, падающий к черной дыре, не исчезает мгновенно. Сначала он закручивается в быстро вращающийся диск, где из-за гигантского трения разогревается до миллионов градусов и начинает интенсивно излучать в рентгеновском диапазоне.

Особое значение имеет внутренняя граница диска — последняя устойчивая круговая орбита, известная как ISCO. Ее положение напрямую определяется спином черной дыры. У невращающейся черной дыры эта орбита располагается сравнительно далеко от горизонта событий. Если же черная дыра вращается очень быстро, ISCO постепенно смещается внутрь, практически вплотную к самому горизонту. Чем ближе газ способен подойти к черной дыре перед окончательным падением, тем выше его температура и тем сильнее проявляются релятивистские эффекты.

Особенно информативной оказывается K $\alpha$ -линия железа. Вблизи горизонта событий мощная гравитация, огромные скорости вращения и эффект Доплера одновременно искажают ее форму. Вместо узкой спектральной линии астрономы наблюдают широкую асимметричную структуру. Сравнивая ее с компьютерными моделями, можно определить положение внутреннего края диска, угол его наклона и оценить параметр спина.

Именно таким способом космические обсерватории XMM-Newton, Chandra и NuSTAR измерили вращение десятков сверхмассивных черных дыр. Оказалось, что многие активные ядра галактик обладают параметрами спина около 0,9–0,99, то есть находятся удивительно близко к теоретическому пределу. Это означает, что их центральные черные дыры на протяжении миллионов лет эффективно раскручивались за счет устойчивой аккреции вещества.

У черных дыр звездной массы картина значительно разнообразнее. Некоторые вращаются относительно медленно, другие приближаются к экстремальным значениям. Такое разнообразие говорит о том, что скорость вращения определяется как условиями рождения звезды-прародителя, так и последующей историей аккреции.

Раскручивание происходит тогда, когда вещество в аккреционном диске движется в том же направлении, что и сама черная дыра. В этом случае угловой момент постепенно передается горизонту событий. Однако возможен и противоположный сценарий. Если вещество падает по ретроградной орбите, вращаясь навстречу спину черной дыры, она начинает замедляться. Аналогичным образом влияют и столкновения черных дыр. После слияния

итоговый спин определяется массами компонентов, ориентацией их осей вращения и сложной динамикой самого процесса.

В последние годы новую информацию начали приносить детекторы гравитационных волн LIGO, Virgo и KAGRA. Анализируя форму зарегистрированных сигналов, физики могут оценивать спины черных дыр еще до их слияния. Полученные результаты показывают, что многие объекты действительно обладают значительным вращением, однако пока ни один надежно измеренный спин не приблизился к абсолютному теоретическому пределу.

История вращающихся черных дыр оказывается удивительно похожей на многие другие явления природы. При определенных условиях вода перестает быть жидкостью и превращается в пар, лед или сверхкритический флюид. Металл при экстремальном нагреве становится плазмой. Черная дыра также обладает собственным порогом существования. Пока спин остается ниже критического значения, перед нами привычный объект с горизонтом событий. Если же этот предел был бы превышен, сама сущность объекта изменилась бы: исчезла бы граница, отделяющая наблюдаемую Вселенную от области, где перестают работать привычные законы физики.

Именно поэтому предел Торна—Житкова—Новикова представляет интерес далеко не только для астрофизиков. Он может оказаться своеобразным защитным механизмом пространства-времени, предотвращающим появление открытых сингулярностей. Если же когда-нибудь будет обнаружен объект, нарушающий этот предел, это станет одним из самых серьезных вызовов общей теории относительности и, вероятно, потребует создания полноценной квантовой теории гравитации.

Измеряя спины черных дыр, астрономы фактически проверяют теорию Эйнштейна в самых экстремальных условиях, существующих в природе. Каждое новое наблюдение помогает уточнить границу между известной физикой и областью, где она, возможно, перестает работать. И как бы быстро ни вращались эти космические монстры, само существование фундаментального предела напоминает, что Вселенная построена не как бесконечный набор возможностей, а как система строгих физических ограничений. Именно благодаря этим ограничениям космос остается не хаотичным, а познаваемым.