

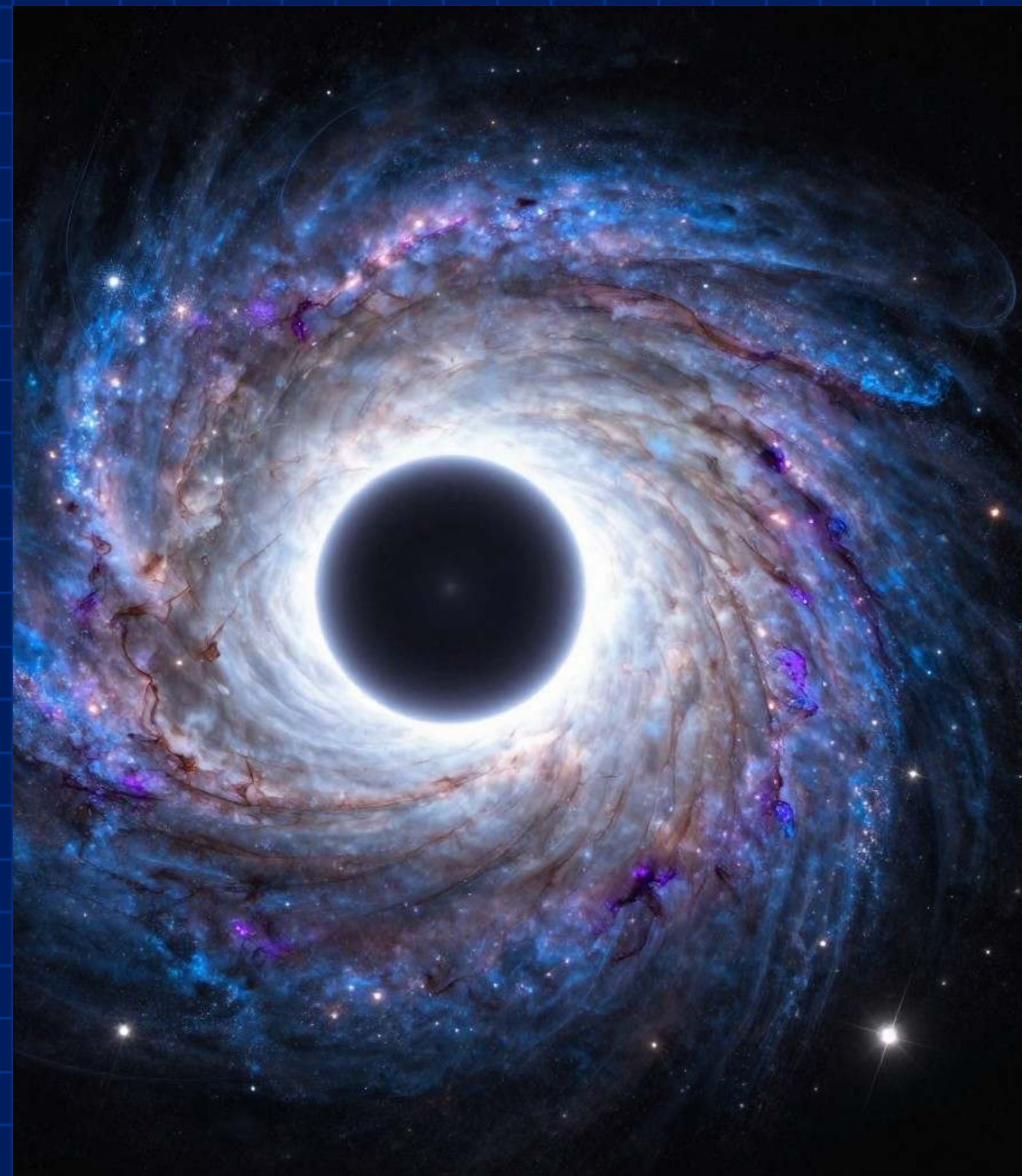
Сверхмассивная чёрная дыра в центре Галактики: ключевые темы и актуальность

Уникальные свойства сверхмассивных чёрных дыр и
значение Sgr A* для астрономии.

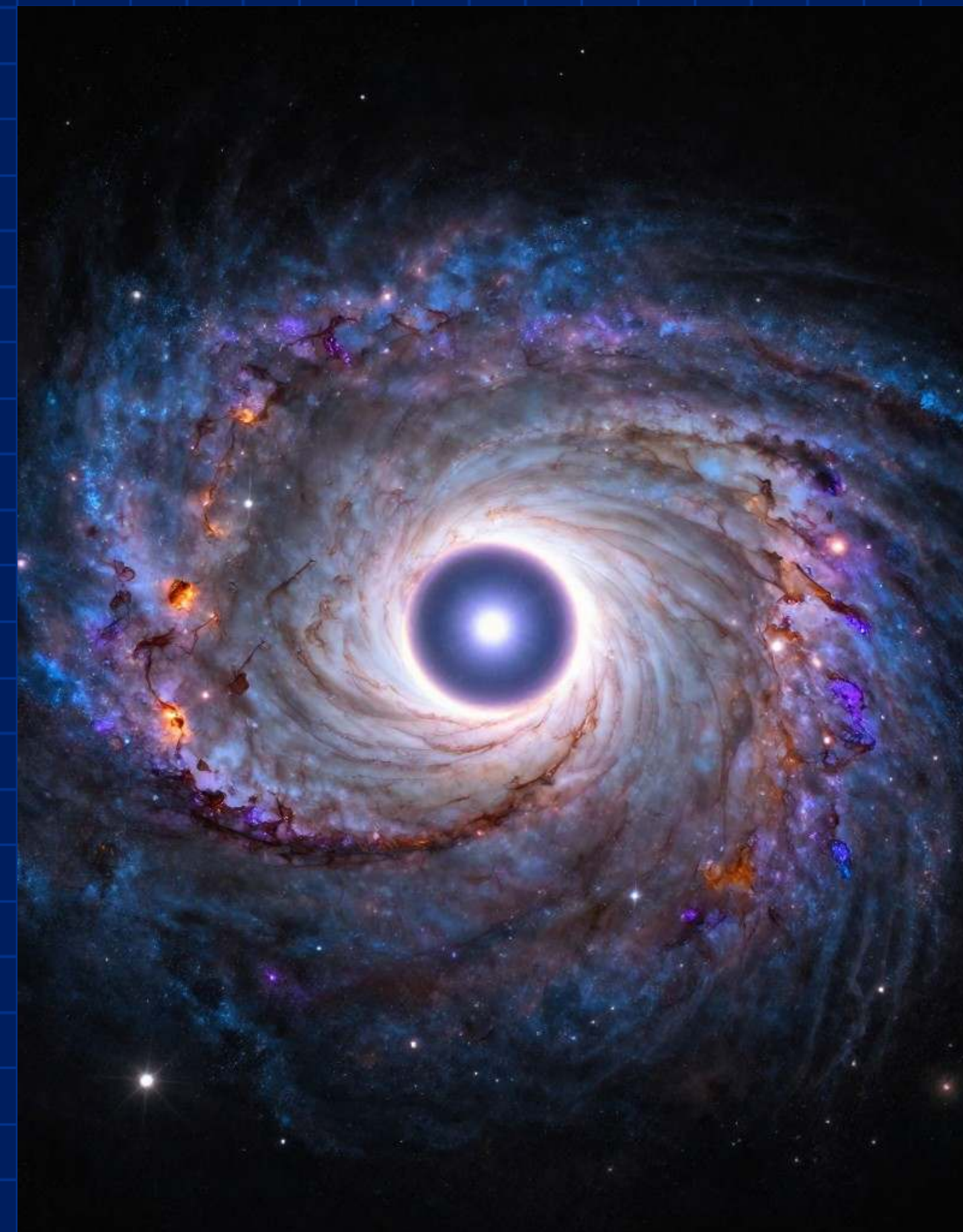
1 ÷ 2

109

8



История становления представлений о сверхмассивных чёрных дырах



От первых теоретических идей XVIII века до открытия мощного радиоисточника Sgr A* в 1974 году — шаги к выявлению сверхмассивной чёрной дыры в центре Млечного Пути.

Что такое сверхмассивные чёрные дыры и какого они масштаба

Сверхмассивная чёрная дыра — это компактный объект с массой от миллиона до миллиардов масс Солнца, сосредоточенный в ядрах большинства крупных галактик.

Они сопровождаются мощной аккрецией вещества, что приводит к активному излучению и формированию активных галактических ядер, играющих важную роль в энергообмене.

Массы СМЧД значительно превосходят массы чёрных дыр звёздного происхождения, создавая экстремальные условия и влияя на структуру галактики.



Sgr A*: радиопортрет центра Галактики

- Sgr A* — это компактный, мощный радиокосмический источник в центре Млечного Пути, находящийся примерно в 8 килопарсеках от Солнечной системы.
- Радиointерферометрия выявляет зону высокой радиационной активности — область взаимодействия газа и излучения, свидетельствующую о массивном объекте.



Масса Sgr A*: оценки по движениям звёзд



Обсерватории VLT и Кеск, 2000–2020

Длительные наблюдения звезд предоставляют точные данные орбит, подтверждающие огромную массу центра.

Анализ скоростей звёзд показывает массу Sgr A* около 4,3 миллионов масс Солнца с высокой точностью.

Современные методы выявления сверхмассивных чёрных дыр

- 1 Изучение орбит звёзд близ центра галактики позволяет оценить массу невидимого объекта и подтвердить наличие чёрной дыры.
- 2 Радиointерферометрия с очень длинной базой обеспечивает высокое пространственное разрешение, дополненное анализом инфракрасных спектров и гравитационного линзирования.



Сравнительная характеристика сверхмассивных чёрных дыр

Объект	Масса (млн масс Солнца)	Активность	Особенности
Sgr A*	4.3	Низкая	Центр Млечного Пути, слабая аккреция
M87*	6500	Высокая	Первое изображение горизонта событий (2019)
NGC 1277	5000	Средняя	Быстро вращающаяся чёрная дыра

Таблица показывает параметры и активность трёх известных СМЧД в разных галактиках.

Sgr A* уступает по массе и активности другим СМЧД, но остаётся ключевым объектом для детального изучения.

Данные Event Horizon Telescope и астрономических обсерваторий

Ключевые доказательства существования Sgr A*

1
Наблюдения орбит звёзд S2 и S38 показывают движение вокруг невидимого массивного центра, не имеющего светимости.

2
Концентрация массы в объёме менее 120 а.е. исключает наличие скоплений обычных объектов в центре.

3
Регистрация радиовсплесков и рентгеновских импульсов указывает на активные процессы вблизи горизонта событий.

4
Отсутствие видимых звёзд подтверждает присутствие объекта с горизонтом событий – сверхмассивной чёрной дыры.

Первое изображение горизонта событий Sgr A*

-1

!2

Достижения Event Horizon Telescope

В 2022 году команда получила первое визуальное изображение тени Sgr A*, что подтвердило теоретические модели черных дыр и их горизонтов событий.

Интерпретация полученного снимка

На снимке видна асимметрия яркости аккреционного диска, что соответствует расчетам и демонстрирует энергообмен вокруг чёрной дыры.





Рассчитанная масса Sgr A* подтверждается наблюдениями орбит близлежащих звёзд и ключевая для понимания динамики галактики.

4,3 МИЛЛИОНА

масс Солнца составляет
масса сверхмассивной чёрной
дыры в центре нашей
Галактики, определяющая её
гравитационное влияние.

Наблюдения ESO VLT и Keck Telescope



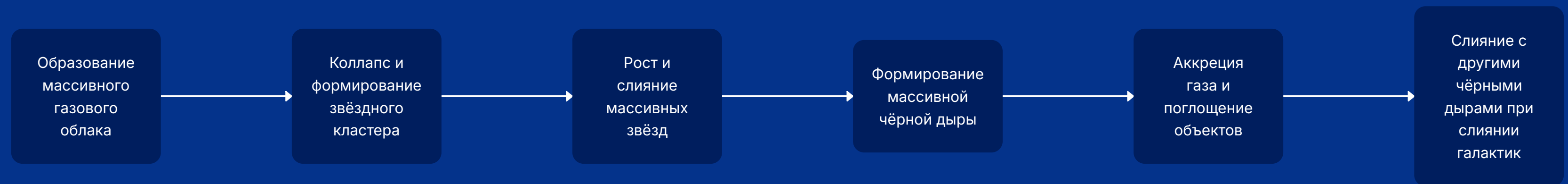
Аккреционный диск и излучение возле Sgr A*

- Вокруг сверхмассивной чёрной дыры образуется аккреционный диск из космического газа и пыли, притягиваемых её мощным гравитационным полем. Материя в диске подвергается интенсивному разогреву и излучает в рентгеновском и радио диапазонах.
- Периодические вспышки накапливающейся энергии связаны с захватом облаков газа, которые оказываются втянутыми в более внутренние области диска, что приводит к резкому увеличению излучения и изменению структуры.



Процесс формирования сверхмассивных чёрных дыр

Источник: Современные астрономические модели формирования СМЧД



Влияние Sgr A* на динамику Галактики

1 Гравитационное поле Sgr A* формирует орбиты звезд и облаков газа в центральной области, обеспечивая устойчивую структуру балджа Галактики и согласованное движение материальных объектов.

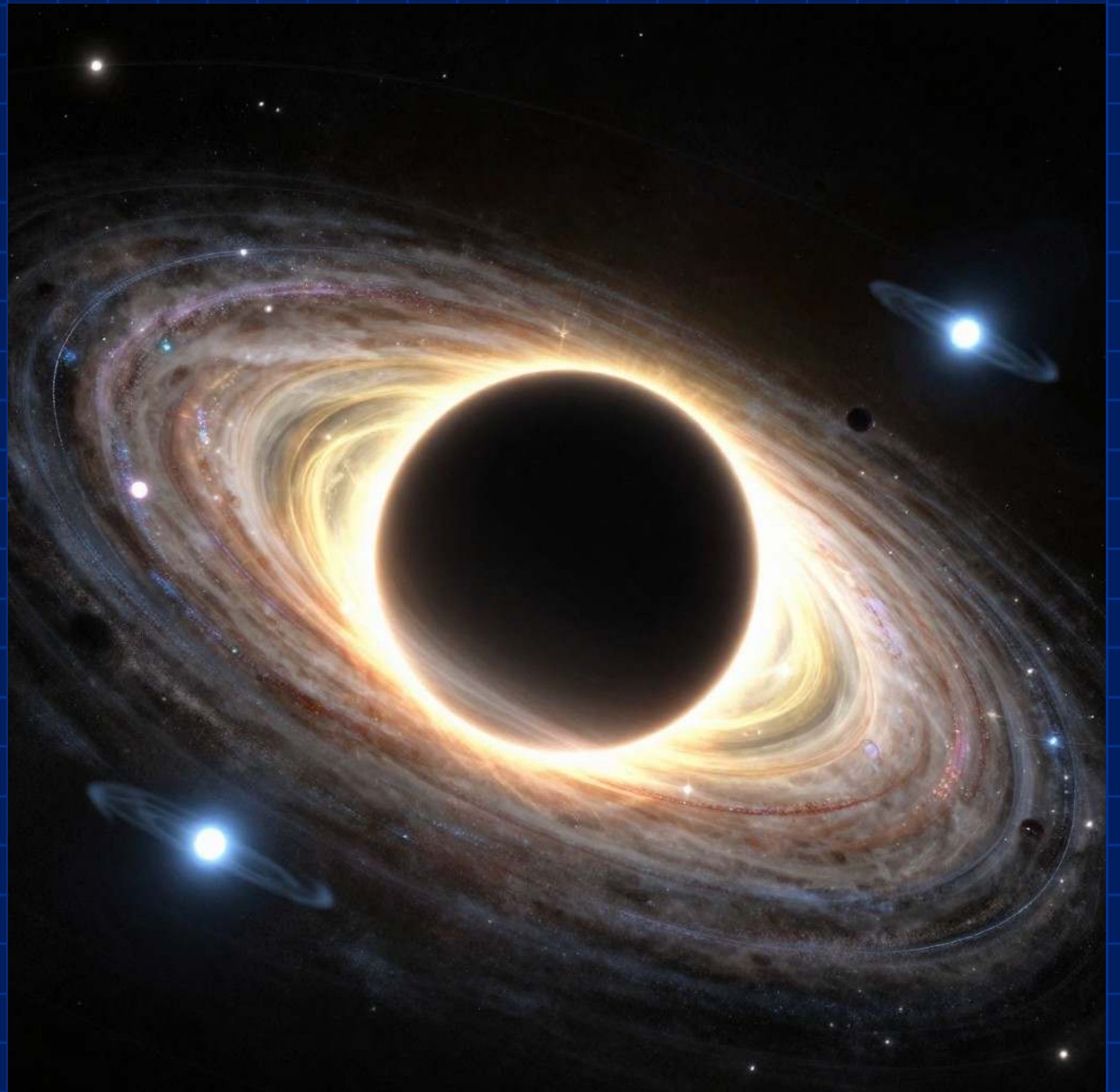
2 Действие чёрной дыры способствует поддержанию структур упорядоченных орбит, что влияет на внутреннюю динамику и помогает стабилизировать ядро Млечного Пути.

3 Вращающаяся масса чёрной дыры может провоцировать образование плотностных волн, запускающих спиральные рукава в периферийных областях галактики.

Гравитационные эффекты Sgr A* на ближайшие объекты

COS 2

- 1 Ближайшие звёзды движутся по вытянутым эллиптическим орбитам под воздействием интенсивной гравитации, испытывая приливные силы, влияющие на физические характеристики и динамическое поведение.
- 2 В моменты сближения с чёрной дырой наблюдаются всплески излучения высокой энергии и выбросы плазменных облаков, связанные с аккреционными процессами и перераспределением материала.



Орбиты звёзд вокруг Sgr A*: эллипсы и экстремальные параметры



Наблюдения VLT и Кеск, последние данные 2023 г.

Движение звезды S2 демонстрирует максимальные скорости и минимальные расстояния, что обеспечивает уникальные условия для исследования гравитационных и релятивистских эффектов.

Данные подтверждают сильное влияние гравитационного красного смещения и эффект смещения перицентра, что согласуется с предсказаниями общей теории относительности.

Sgr A* как тест Общей теории относительности

Изучение орбит звёзд, особенно S2, позволило измерить смещение перицентра, величина которого соответствует 12 угловым минутам за полный орбитальный цикл в 16 лет.

Такие наблюдения служат прямым доказательством релятивистских эффектов и значительно превосходят точность ньютоновских моделей для объяснения движения вблизи сверхмассивного объекта.

Результаты экспериментальной верификации укрепляют научные основы гравитационной теории и стимулируют современные модели взаимодействия материи в экстремальных условиях.

$$x^2 + 4x - 8$$

Влияние сверхмассивных чёрных дыр на эволюцию галактик



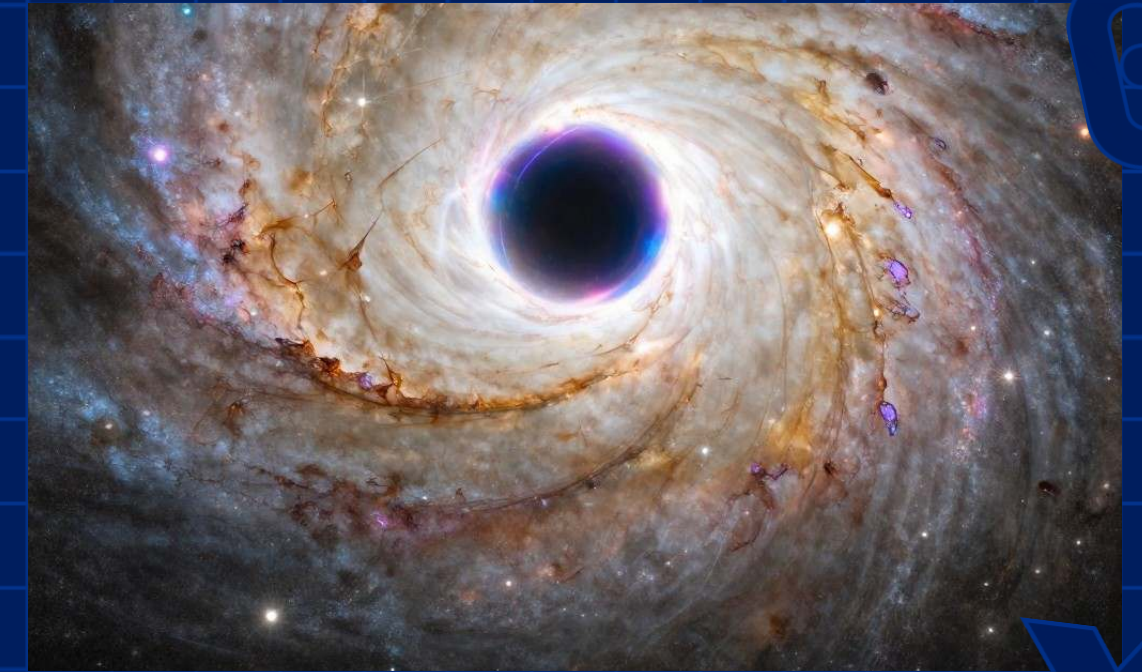
Регуляция звёздообразования в ядрах

Сверхмассивные чёрные дыры оказывают сильное влияние на звёздообразовательные процессы, предотвращая чрезмерную концентрацию газа. Это обусловлено механиками обратной связи, которые ограничивают доступ топлива к ядру галактики.



Обратная связь через аккреционные выбросы

Аккреционные процессы приводят к мощным выбросам энергии и вещества, которые взаимодействуют с межзвёздной средой. Эти джеты и волны способны менять распределение газа и влиять на общую динамику галактики.



Связь массы балджа и сверхмассивной чёрной дыры

Наблюдательные данные подтверждают корреляцию между массой центрального балджа и массой сверхмассивной чёрной дыры, что указывает на совместную эволюцию и взаимозависимость этих структур.

Энергетические выбросы и джеты в окрестностях СМЧД

1



Потоки плазмы с околосветовыми скоростями

Джеты, исходящие от некоторых сверхмассивных чёрных дыр, представляют собой чрезвычайно мощные потоки заряженной плазмы, двигающиеся почти со скоростью света, влияя на окружающее пространство.



Пример: джет M87*

Джет галактики M87 достигает длины около 5000 световых лет и движется со скоростью порядка 0,99 скорости света, демонстрируя колоссальную энергию и влияние на межгалактическую среду.



Регуляция эволюции галактик

Энергетические выбросы формируют ионизационные зоны, перераспределяют газ и оказывают эффект обратной связи, регулируя процессы формирования звёзд и структурное развитие галактических ядер.

2



Современные и перспективные исследования Sgr A*

Сегодня используются инструменты нового поколения, включая телескопы VLT, Keck, ALMA и Event Horizon Telescope, для изучения тонкостей аккреционных процессов и динамики газа.

Высокоточные инфракрасные и радионаблюдения позволяют фиксировать слабые вспышки и исследовать эффект гравитационного линзирования, расширяя знания о фундаментальных физических явлениях.

Перспективы связаны с проектом GRAVITY+, который нацелен на повышение детализации структуры аккреционного диска и уточнение моделей поведения материи в окрестностях пространства.

Значение Sgr A* для астрономии и космологии

Изучение сверхмассивной чёрной дыры Sgr A* не только подтверждает фундаментальные гравитационные теории, но и расширяет понимание эволюции галактик и физики экстремальных условий.



cos

sin

1

tg

ctg