

# Голографический принцип и дуальность AdS/CFT: как чёрные дыры изменили представление о пространстве и гравитации

Дата публикации: 17.05.2026

История голографического принципа началась не с попыток построить теорию всего, а с изучения термодинамики чёрных дыр. В начале 1970-х годов стало ясно, что классическая общая теория относительности сталкивается с глубокими противоречиями при описании горизонтов событий и квантовых эффектов. Одним из первых исследователей, понявших фундаментальность этой проблемы, стал Jacob Bekenstein. Он предположил, что чёрные дыры должны обладать энтропией, несмотря на то что в классической теории они описываются всего несколькими параметрами: массой, зарядом и угловым моментом.

Идея Бекенштейна первоначально казалась парадоксальной. Согласно классической общей теории относительности, всё вещество, пересекающее горизонт событий, безвозвратно исчезает для внешнего наблюдателя. Если чёрная дыра не имеет микроскопической структуры, то возникает нарушение второго закона термодинамики: энтропия вещества исчезает. Чтобы сохранить закон возрастания энтропии, Бекенштейн предложил связать энтропию с площадью горизонта событий.

Позднее Stephen Hawking выполнил квантово-полевой анализ чёрных дыр и показал, что они испускают тепловое излучение. Температура Хокинга для невращающейся чёрной дыры обратно пропорциональна её массе. Для объекта массой, равной массе Солнца, температура составляет примерно  $6 \times 10^{-8}$  Кельвина. Это чрезвычайно мало, однако сам факт излучения означал, что чёрные дыры являются термодинамическими объектами.

Результатом объединения идей Бекенштейна и Хокинга стала знаменитая формула энтропии чёрной дыры, согласно которой энтропия пропорциональна площади горизонта событий и обратно пропорциональна произведению гравитационной постоянной и постоянной Планка. Этот результат оказался одним из важнейших достижений теоретической физики XX века. Энтропия чёрной дыры зависит не от объёма, а именно от площади поверхности. Для чёрной дыры солнечной массы энтропия составляет порядка  $10^{77}$  постоянных Больцмана, что колоссально превышает энтропию обычной звезды той же массы. Именно этот факт впервые указал на необычную связь между информацией, геометрией и гравитацией.

В обычной статистической физике число степеней свободы растёт

пропорционально объёму системы. Однако энтропия чёрной дыры зависит только от площади горизонта событий. Из этого следовал радикальный вывод: максимальное количество информации внутри области пространства определяется не её объёмом, а площадью границы. Именно так постепенно возник голографический принцип.

В 1990-х годах идеи Бекенштейна были развиты Gerard 't Hooft и Leonard Susskind. Они предположили, что вся физика внутри некоторого объёма пространства может быть эквивалентно описана теорией, расположенной на его границе меньшей размерности. Аналогия с голограммой оказалась чрезвычайно удачной: двумерная поверхность содержит полную информацию о трёхмерном объекте.

Долгое время голографический принцип оставался скорее философской идеей, чем строгой физической теорией. Ситуация изменилась в 1997 году после работы Juan Maldacena. Малдасена предложил конкретную математическую реализацию голографического принципа, известную как дуальность AdS/CFT.

Согласно этой гипотезе, теория струн или квантовая гравитация в пятимерном пространстве анти-де Ситтера эквивалентна четырёхмерной конформной квантовой теории поля на его границе. Наиболее известный пример дуальности связывает тип IIB теории струн в пространстве  $AdS_5 \times S^5$  с  $N=4$  суперсимметричной теорией Янга — Миллса.

Главная революционность идеи Малдасены состояла в том, что квантовая теория без гравитации оказалась эквивалентной теории с гравитацией в пространстве большей размерности. Пространство-время и гравитация переставали быть фундаментальными объектами и могли возникать как эффективное описание более глубокой квантовой теории.

Особенно важным стало то, что слабосвязанный режим одной теории соответствует сильносвязанному режиму другой. Это позволило использовать гравитационные методы для изучения систем, где обычная квантовая теория поля не работает. В частности, многие сложные задачи квантовой хромодинамики и физики сильно коррелированных электронных систем получили новое описание через голографические модели.

В начале 2000-х годов методы AdS/CFT начали активно применять в физике конденсированного состояния. Одним из наиболее известных примеров стали так называемые странные металлы. В обычной ферми-жидкости сопротивление при низких температурах растёт как  $\rho \sim T^2$  из-за электрон-электронного рассеяния. Однако в купратных высокотемпературных сверхпроводниках наблюдается зависимость  $\rho \sim T$ . Такое поведение долгое время оставалось

необъяснимым.

Голографические модели позволили воспроизводить линейную температурную зависимость сопротивления через динамику чёрных дыр в пространстве AdS. В этих моделях горизонт событий играет роль диссипативной среды для квантовой системы на границе. Похожим образом были исследованы сверхпроводящие фазовые переходы. В ряде голографических моделей критическая температура  $T_c$  возникает как результат нестабильности чёрной дыры относительно образования скалярного конденсата.

Голографический принцип оказал серьёзное влияние и на проблему квантовой гравитации. Одной из главных задач современной физики остаётся объяснение того, как сохраняется информация при испарении чёрной дыры. В классическом описании информация исчезает за горизонтом событий, однако квантовая механика требует унитарности эволюции. Голографический принцип предполагает, что информация не теряется, а кодируется на поверхности горизонта.

В последние годы важную роль начали играть идеи связи геометрии пространства-времени с квантовой запутанностью. Формула Рю — Такаянги связывает энтропию запутанности в граничной теории с площадью минимальной поверхности в пространстве AdS. Это привело к гипотезе, что сама геометрия пространства может возникать из структуры квантовой информации.

Голографические методы также применяются в космологии. Хотя наша Вселенная ближе к пространству де Ситтера с положительной космологической постоянной, чем к пространству AdS, многие исследователи пытаются построить аналогичные дуальности для инфляционной космологии и ранней Вселенной. Эти работы пока остаются незавершёнными, однако они существенно меняют представление о фундаментальной природе пространства и времени.

Сегодня дуальность AdS/CFT рассматривается как один из наиболее глубоких результатов теоретической физики последних десятилетий. Она объединила квантовую теорию поля, гравитацию, теорию струн, термодинамику чёрных дыр и квантовую информацию в единую концептуальную структуру. Идея о том, что трёхмерная Вселенная может быть описана двумерной теорией на границе пространства, продолжает оставаться одной из самых радикальных и одновременно наиболее плодотворных гипотез современной науки.