
ВВЕДЕНИЕ

Черной дырой называют область пространства-времени, в которой гравитационное поле настолько сильно, что не позволяет даже свету покинуть эту область и уйти в бесконечность.

Черная дыра образуется при сжатии тела с массой M до размеров, меньших так называемого гравитационного радиуса — величины $r_g = 2GM/c^2$ (G — постоянная тяготения Ньютона, c — скорость света). Скорость, необходимая для того, чтобы улететь в бесконечность с границы черной дыры (вторая космическая скорость), равна скорости света. Если учесть, что скорость света является предельной для скорости распространения физических сигналов, то нетрудно прийти к выводу о невозможности выхода наружу сигналов и частиц из области, лежащей внутри черной дыры. В рамках классической теории тяготения Эйнштейна этот вывод носит абсолютный характер, поскольку гравитационное взаимодействие является универсальным. В роли гравитационного заряда выступает масса, значение которой пропорционально полной энергии системы. Поэтому все объекты, обладающие энергией, участвуют в гравитационном взаимодействии.

Для описания черных дыр необходимо в полной мере использовать теорию гравитации Эйнштейна — общую теорию относительности (ОТО)*. На первый взгляд сложность этих уравнений, связанная, в частности, с их существенной нелинейностью, не позволяет надеяться на сколь-нибудь полное описание черных дыр и их свойств. Оказалось, однако, что по прошествии короткого времени после своего образования всякая черная дыра становится стационарной и ее гравитационное поле однозначно определяется малым числом параметров: ее массой и угловым моментом, а также значением электрического заряда (при наличии последнего). Физическая причина столь удивительного свойства черных дыр состоит в том, что только конфигурации физических полей (в том числе и гравитационного) весьма специального вида могут быть стационарными в исключительно сильном поле черной дыры.

Поскольку сигналы не могут выйти из черной дыры, а физические тела и излучение могут в нее падать, поверхность черной дыры играет роль своеобразной мембранны, а граница черной дыры в пространстве-времени, называемая *горизонтом событий*, является световой поверхностью. Появление черной дыры означает возникновение нетривиальной причинной структуры

*) Относительно проблемы черных дыр в незайнштейновских теориях гравитации см., например, Уилл (1981).

в пространстве-времени. Все эти особенности черных дыр приводят к тому, что изучение их взаимодействия с физическими полями и веществом, а также между собой потребовало развития новых методов.

Хотя само название "черные дыры" было введено Уилером лишь в 1968 г., вопрос о возможности существования подобных объектов в рамках ньютоновской теории обсуждался Митчелом и Лапласом еще в конце XVIII в. [см. об этом Бэрроу, Силк (1983), Новиков (1985*)]. В рамках ОТО с этой проблемой столкнулись, по сути дела, в год создания теории, после того как Шварцшильд (1916) получил первое точное (сферически-симметричное) решение уравнений Эйнштейна в пустоте. Это решение, помимо сингулярности в центре симметрии (при $r = 0$), обладало еще дополнительной особенностью на поверхности гравитационного радиуса (при $r = r_g$). Потребовалось более трети столетия, прежде чем в результате анализа "неожиданных" особенностей решения Шварцшильда, в котором принимали участие Фламм (1916), Вейль (1917), Эддингтон (1924), Леметр (1933), Эйнштейн, Розен (1935), наступило глубокое понимание структуры пространства-времени в сильном гравитационном поле и было получено полное решение рассматриваемой задачи [Синг (1950), Финкельштейн (1958), Фрондел (1959), Крускал (1960), Жекерес (1960), Новиков (1963*, 1964*а)]. На то, что этот интервал времени оказался таким длительным, по всей видимости, повлияло общее представление о невозможности существования в природе тел, размеры которых сравнимы с их гравитационным радиусом. Подобной точки зрения придерживался, в частности, сам создатель общей теории относительности. Однако в тридцатых годах после работ Ландау, Бааде, Цвики и Оппенгеймера, в которых была показана возможность существования нейтронных звезд, чей размер лишь в несколько раз превосходит размер их гравитационного радиуса, интерес к свойствам сверхжестких гравитационных систем сильно возрос. Картина гравитационного коллапса массивной звезды, приводящего к образованию черной дыры, была впервые описана Оппенгеймером и Снайдером (1939).

Следующий период относится к середине шестидесятых – началу семидесятых годов, когда после работ Синга, Крускала и других, в которых было получено полное решение для задачи Шварцшильда, и работы Керра (1963), обнаружившего решение, описывающее гравитационное поле вращающейся черной дыры, началось интенсивное теоретическое изучение общих свойств черных дыр и их классических взаимодействий. В это время были доказаны ставшие теперь классическими теоремы об "отсутствии волос" у черных дыр (т.е. об отсутствии каких-либо внешних индивидуальных признаков, кроме массы, момента импульса и заряда), о существовании сингулярности внутри них, о возрастании площади поверхности черных дыр. Эти и другие результаты позволили понять качественную картину образования черной дыры, ее возможной дальнейшей эволюции и ее взаимодействия с веществом и классическими физическими полями. Многие из этих результатов были подтверждены в известных монографиях Мизнера, Торна, Уилера (1973) и Хокинга, Эллиса (1973).

В конце шестидесятых годов после открытия пульсаров (нейтронных звезд) перед астрофизиками с особой остротой встал вопрос о возможностях обнаружения черных дыр. Анализ падения (аккреции) вещества на оди-

ночные черные дыры и на черные дыры, входящие в состав двойных систем, позволил предсказать, что аккрецирующие черные дыры могут быть мощными источниками рентгеновского излучения [Новиков, Зельдович (1966), Шкловский (1967*), Бербидж (1972)]. Развитие рентгеновской астрономии и исследования на рентгеновских спутниках, начатые в 70-е годы, позволили обнаружить ряд рентгеновских источников, один из которых, расположенный в созвездии Лебедя (Суг X-1), по-видимому, является черной дырой.

Длительные исследования этого объекта, проводящиеся уже около 15 лет, дают все новые подтверждения сделанному предположению. В настоящее время имеется еще несколько подобных "кандидатов" в черные дыры. Кроме того, есть веские основания считать, что в ядрах активных галактик (а может быть, и во всех ядрах галактик) и в квазарах имеются сверхмассивные черные дыры [см. Бленфорд, Торн (1979), Рис (1982)].

Обсуждение вопросов, связанных с возможными наблюдательными проявлениями черных дыр, привлекло внимание к задачам о движении частиц и физических полей в пространстве-времени стационарных черных дыр.

К настоящему времени эта задача, носящая в основном математический характер и связанная с интегрированием уравнений геодезических и построением разложения по собственным функциям инвариантных волновых операторов в метрике Керра, в значительной части решена. Полученные здесь многочисленные результаты подтверждены в появившейся недавно книге Чандрасекара (1983) "Математическая теория черных дыр".

Не успела затихнуть "сенсация", вызванная возможным обнаружением черной дыры, как новый неожиданный результат, полученный Хокингом (1974, 1975), снова привлек внимание физиков к черным дырам. Оказалось, что неустойчивость вакуума в сильном гравитационном поле черной дыры приводит к тому, что черные дыры являются источником излучения, и если их масса мала, они могли бы успеть распасться за время, меньшее времени жизни Вселенной. Подобные малые черные дыры, получившие название первичных, по-видимому, могли образовываться только на очень ранней стадии эволюции Вселенной [Зельдович, Новиков (1966*, 1967*), Хокинг (1971а)]. Обнаружение первичных черных дыр или доказательство отсутствия их или продуктов их распада позволяет в принципе получить ценную информацию о физических процессах, происходивших во Вселенной в то время.

Открытие Хокинга вызвало большое количество работ, в которых были исследованы особенности квантовых эффектов в черных дырах. Наряду с детальным описанием эффектов, связанных с рождением реальных частиц, вылетающих на бесконечность, в последние годы удалось значительно продвинуться в понимании эффекта поляризации вакуума вблизи черных дыр. Этот эффект важен для построения полного квантового описания "испаряющейся" черной дыры.

Данная книга посвящена систематическому изложению физики черных дыр. Содержание книги построено следующим образом.

Авторы стремились сделать весь материал в начале книги особенно доступным и простым, чтобы наглядно ввести некоторые важнейшие понятия и подчеркнуть основные проблемы. В первую очередь это относится к гл. 2.

В ней излагаются свойства простейшей сферической черной дыры. Здесь мы знакомим читателя и со свойствами пространства-времени внутри черной дыры.

В третьей главе рассмотрено распространение слабых физических полей в окрестности черных дыр. Особое внимание уделяется эволюции слабых гравитационных полей. Этот вопрос важен для проблемы устойчивости черной дыры относительно внешних возмущений, а также для проблемы излучения гравитационных волн телами (и полями), движущимися около черных дыр. Здесь же рассмотрен вопрос о возникновении черной дыры при коллапсе тела с малыми отклонениями от сферичности.

Четвертая глава посвящена знакомству с важнейшими свойствами вращающейся черной дыры, а также черной дыры, обладающей электрическим зарядом.

Пятая глава содержит изложение общей теории нестационарных черных дыр и результатов относительно существования сингулярностей в черных дырах.

В шестой главе приводится доказательство теоремы единственности для стационарных черных дыр.

Седьмая глава посвящена методам анализа электромагнитных полей вблизи стационарной черной дыры, основанным на "3 + 1"-разбиении пространства-времени.

В восьмой главе обсуждаются различные физические эффекты в поле черных дыр: суперрадиация, сдвиг собственной энергии заряженных частиц, взаимное превращение электромагнитных и гравитационных волн, а также движение и деформация черных дыр во внешнем поле и их взаимодействие друг с другом.

Девятая и десятая главы посвящены квантовой физике черных дыр. В девятой главе излагается общее решение задачи о рождении частиц в поле стационарной черной дыры. В десятой главе собраны результаты, касающиеся поляризации вакуума в окрестности черных дыр.

Термодинамическая аналогия в физике черных дыр обсуждается в одиннадцатой главе.

В двенадцатой главе рассмотрены вопросы, связанные со структурой пространства-времени внутри черных дыр.

В тринадцатой главе собран материал, относящийся к первичным черным дырам, теории белых дыр и полузамкнутых миров и возможной роли элементарных черных дыр в квантовой гравитации.

Книга заканчивается приложением, в котором излагаются некоторые сведения из римановой геометрии и общей теории относительности и приводятся важнейшие формулы, используемые в основном тексте.

Знаки в определениях ds^2 , тензора кривизны и тензора Риччи совпадают с выбором знаков в книге Мизнера, Торна, Уилера (1973). Во второй и третьей главах все формулы выписаны с размерными физическими константами c и G . Начиная с четвертой главы, где мы переходим к более сложному материалу и где выписывание размерных констант вело бы к слишком громоздким выражениям, мы везде (за исключением окончательных формул и оговоренных разделов) использовали систему единиц $c = G = \hbar = 1$.