



Прочти и передай другому!

ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ:

КОКОНЫ НА ДРЕВНЕМ ПОДКЛАДЕ

Продолжим начатый в прошлой «Тени» разговор о чёрных дырах.

Мы не будем заглядывать слишком близко к моменту Большого Взрыва, пропустим стадию инфляции – сверхсветового раздувания пространства – и начнём реконструировать рождение первых (по крайней мере, в нашем рассказе) чёрных дыр с момента, когда инфляция окончилась и началось «простое» расширение Вселенной по хаббловскому закону.

Это примерно 10^{-33} сек. после Большого Взрыва. Плотность Вселенной в это время – порядка $3 \cdot 10^{73}$ кг/м³, температура – порядка $2 \cdot 10^{26}$ К, давление – порядка 10^{85} атм., а сама Вселенная сжата по сравнению с нынешними временами в $\sim 3 \cdot 10^{25}$ раз. Населением той Вселенной были лептоны (нейтрино, электроны и др.), бозоны, кварки и, конечно, фотоны.

Таково начало эпохи образования первичных (послеинфляционных) чёрных дыр. А конец этой эпохи большинство специалистов относит ко времени ~ 1 сек. после Большого Взрыва, когда Вселенная имеет плотность $\sim 2 \cdot 10^8$ кг/м³, давление $\sim 6 \cdot 10^{19}$ атм., температуру $\sim 10^{10}$ К и масштаб (степень сжатия по сравнению с нынешней) – $\sim 3 \cdot 10^8$. Кварки и бозоны не дожили до этого времени, дав при 10^{-6} сек. нейтроны с протонами, из которых построен наш сегодняшний мир (как раз при временах порядка 1 сек. активно шёл процесс синтеза первых лёгких ядер – изотопов водорода, гелия, лития), нейтрино пережили кое-какие превращения, а фотоны остались сами собой, только очень «удлинились» за счёт расширения Вселенной. И, соответственно, «похолодели». Но и при этом соотношение вещества к излучению оставалось мизерным, порядка $5 \cdot 10^{-10}$. Так что «рулили»-то фотоны!

Как же на этой очень далёкой от нас сцене могло происходить рождение чёрных дыр?

Масса-невидимка

Чёрная дыра – это масса M , сжатая внутри радиуса $R = 1,48 \cdot 10^{-27} \cdot M$ (здесь и далее все числа в системе СИ). Но не просто масса, а лишь некоторая её доля, вызывающая силу гравитации. О чём это мы?

В абсолютно одинаковой среде притяжения нет, какова бы ни была плотность среды и масса любого взятого в ней объёма. Всё уравновешено, результирующая сил в каждой точке равна нулю.

Но как только где-то почему-либо возникнет область с плотностью, отличающейся от средней, то есть флуктуация, – тотчас по окружающему пространству понесётся со скоростью света волна гравитационного поля, а с нею – сила притяжения. В тер-

минах Ньютона можно сказать, что эта сила будет пропорциональна массе, возникшей в области флуктуации. А эта масса (назовём её эффективной, $M_{эфф}$, чтобы отличать от полной или абсолютной массы) зависит от объёма флуктуации $V_{фл}$ и от разности плотностей во флуктуации $\rho_{фл}$ и в окружающей среде $\rho_{ср}$:

$$M_{эфф} = V_{фл} \cdot (\rho_{фл} - \rho_{ср})$$

Если плотность во флуктуации сгустилась, то $M_{эфф}$ привычная нам – положительная, и среда притягивается к флуктуации. Если же случилось разрежение, то $M_{эфф}$ будет... отрицательной, и среда будет отталкиваться. (Так что антигравитация есть! Но очень недолгая: Вселенная разрежается, и «антимасса» очень быстро стремится к нулю*.)

Правила игры

Флуктуации в нашей схеме возникают не от того, что энное количество частиц случайно сгустились или разредились в небольшой зоне пространства. Само пространство заставляет их это сделать. И причина – в случайных колебаниях *кривизны пространства*. С ней мы в быту не сталкиваемся, но, наверное, все знают классическую аналогию: резиновый лист, на котором глубокую вмятину продавало тяжёлое Солнце, и туда стремятся планеты, тоже продавливающие резину, но поменьше.

Итак, пусть где-то в равномерной среде образовалась «ямка» объёмом $V_{фл}$. Вещество в «ямке» задержится, а вокруг будет продолжать расширяться и терять высокую плотность. В «ямке» за счёт разности плотностей возникнет $M_{эфф}$ – а с нею и поле тяготения. Чтобы возникшая волна гравитационного поля прошла расстояние порядка радиуса ямки $R_{фл}$ и «донесла» притяжение до внешней области, требуется время $t_{волн} = R_{фл}/c \approx 1,8 \cdot 10^8 \cdot V_{фл}^{1/3}$.

И если в момент, когда волна дойдёт до границ ямки, $M_{эфф}$ окажется не менее, чем $R_{фл}/(1,48 \cdot 10^{-27})$, то выполняются все условия создания дыры: нужная масса заключена в нужном объёме, и поле сформировало во всём объёме нужную кривизну пространства. Эта дыра уже не рассосётся, она может только испа-

* В октябре 2014 опубликована работа Orlando Luongo и Hernando Quevedo о том, что и обычные дыры, если они заряжены или вращаются, имеют вблизи горизонта (в т. ч. и «на нашей стороне» от него) некоторую зону... отталкивания! Небольшую, примерно в четверть радиуса горизонта [см. <http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.90.084032>], но для дыры с массой Солнца это что-то порядка километра от горизонта. Так что у фантастов прибавилось способов в последний драматический миг спасти любимых героев от падения в сингулярность!

рится за счёт своего хокинговского излучения. (Которое и возникает в момент прохождения гравитационного поля через внешнюю границу «ямки», так как именно в этот момент там образуется горизонт, отделяющий от нас решительно и навсегда внутренности новоиспечённой дыры.)

Фактически, эта связанность времени существования и размера флуктуации просто отображает на математическом языке то, что нам не удастся представить наглядно. Мы говорим о «сфере», «существующей на протяжении времени», ибо это — понятия наглядные. Но в концепции Эйнштейна за ними стоит 4-мерное неразделимое на компоненты пространство-время, и флуктуация является не «сферой, существующей...», а просто 4-мерной гиперсферой с гиперобъёмом $0,5 \cdot \pi^2 \cdot R^3 \cdot c \cdot t$. Не спрашивайте только, что это такое... И она не обязана (в привычных нам понятиях) быть одним и тем же «объёмом», «просуществовавшим» такое-то время; она может расти или убывать, да хоть и пульсировать, — главное, чтобы в какой-то точке масса, размер и плотность сошлись, как требуется.

Сцена вокруг горизонта

Что творится под горизонтом, т. е. внутри дыры, мы извне никогда не сможем увидеть, только посчитать теоретически. Как только образовался горизонт, пространство-время на нём скручивается таким образом, что никакие сигналы изнутри не могут выйти. Но и снаружи всё удивительным образом перестраивается по мере того, как гравитационная волна доносит до соответствующих точек пространства информацию о том, что они теперь существуют в окрестностях горизонта.

Там начинает совершенно особо течь время. Где бы вы ни находились, картина была бы качественно такой: всё, что ближе вас к дыре, замедляется, и на горизонте дыры время вообще останавливается. А всё, что дальше — ускоряется.

С точностью до небольшого множителя (менее 1,5), тяготение в одном радиусе и более от горизонта чёрной дыры можно считать ньютоновским. А ближе одного радиуса к горизонту уже начинается сильное изменение пространства-времени, и там нужно применять уравнения теории относительности. Но даже там, при рассмотрении событий *вблизи* какой-то точки, гравитация остаётся близка к ньютоновской. И только непосредственно у горизонта даже на самых малых расстояниях от ньютоновской физики придётся откатиться.

Эта медленная скорость света

Вспомним, что масса новорожденной дыры — это не абсолютная масса вещества, заключённого под горизонтом, а эффективная масса, определяемая объёмом дыры и контрастом (разницей) плотностей внутри дыры и в окружающей Вселенной. Эти две величины, объём и эффективная масса, к тому же взаимосвязаны, т. к. в решении Шварцшильда радиус дыры прямо пропорционален её массе, а от радиуса зависит и объём. Эта взаимосвязь выражается так:

$$M_{\text{эфф}} = \Delta\rho \cdot V = \Delta\rho \cdot (4\pi R^3/3) = \Delta\rho \cdot [4\pi \cdot (2\gamma \cdot M_{\text{эфф}}/c^2)^3/3] \quad (\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}), \text{ откуда:}$$

$$\Delta\rho = 3 \cdot c^2 / (32\pi \cdot \gamma^3 \cdot M_{\text{эфф}}^2).$$

Понятно, что $\Delta\rho$ со временем меняется, значит, меняется и $M_{\text{эфф}}$, а с нею и пропорциональный ей радиус горизонта R . Но перемены эти не мгновенны. Чтобы дыра «узнала», что плотность во Вселенной упала, нужно, чтобы гравитационное поле донесло до дыры эту информацию. И с этим, как будто, всё в

порядке. На горизонте дыры ускорение событий во внешней Вселенной достигает бесконечности, то есть там реально спрессована в один миг вся будущая история Вселенной. Так что о внешнем мире дыра всё «узнаёт» мгновенно.

Но что и как узнаёт внешний мир об изменениях гравитации дыры? Ведь всё (включая и гравитоны??), что исходит из точки горизонта событий, для внешнего наблюдателя бесконечно замедлено. То есть застыло и не движется. Мы только что привели даже формулы, из которых это следует. Так что же, бесконечно длинные гравитоны несут вовне информацию о *нулевой* эффективной массе любой дыры??

Очевидно, нет! Во-первых, уравнения Эйнштейна не квантовые, и никакого удлинения гравитонов они не предусматривают. А во-вторых, все бесконечности в решении Шварцшильда возникают лишь на бумаге, когда пишутся уравнения для идеального случая: масса точечная (или хотя бы сферически симметричная), поле её стационарно (что у нас явно не так: $M_{\text{эфф}} \neq \text{const!}$), квантовых эффектов (того же туннельного просачивания через барьер) нет, и т. д. В реальности, когда и масса и радиус дыры постоянно меняются, а любая притягиваемая частица имеет не нулевые размеры, а является квантом, «размазанным» по пространству, бесконечности просто не смогут возникнуть.

Правда, эти же соображения говорят нам фактически о том, что у нас нет пока математического аппарата для хорошего расчёта образования и эволюции первичных чёрных дыр. Но по традиции принято считать, что «полуколичественные» (с точностью до одного или нескольких порядков) результаты получить с помощью имеющихся теорий всё же можно. Вот и мы скомбинируем вообще-то несочетаемые вещи для достижения этой скромной, но всё же небезынересной цели.

Итак, мы примем, что данные извне (о фоновой плотности Вселенной) «доставляются» на горизонт и «преобразуются» в изменение эффективной массы и соответственно гравитационного радиуса дыры условно-мгновенно; затем R , со скоростью гравитационного поля, т. е. со скоростью света, смещается на нужную величину ΔR за время $\Delta t = \Delta R/c$; и от новой границы горизонта в «наше» пространство со скоростью света идёт фронт гравитационного поля, несущий информацию о новой эффективной массе, т. е. силе притяжения дыры.

(Точно так же стоило бы описывать изменения в хокинговском излучении дыры. Но мы этого делать не будем, а почему, — станет видно под конец истории.) Силы отталкивания, вызванные хокинговским излучением и перепадом давления, которое быстро растёт при приближении к горизонту дыры, и на горизонте вообще-то стремится к бесконечности, учитывать не будем. Качественная их оценка показывает, что эти силы везде, кроме самой близкой к горизонту зоны, на несколько порядков слабее силы гравитации.

Весьма щекотливый вопрос — как учесть космологическое расширение? Вообще-то, если держаться наиболее принятой космологии Фридмана, то оказывается, что за счёт расширения Вселенной в любой точке, куда доходит фронт гравитационной волны, он застаёт вещество (вместе с пространством, конечно) удаляющимся от дыры с примерно постоянной скоростью около половины скорости света. А это во всём «ньютоновском» пространстве вокруг дыры больше второй космической скорости. И даже во внешней половине «релятивистского» ближнего слоя вокруг горизонта хаббловская скорость больше релятивистской космической. Такие частицы гравитация удержать не может. Особенно когда это почти целиком фотоны!

Поэтому мы примем, что к горизонту под действием гравитации дыры будет падать лишь то вещество, которое лежит в ближней половине «релятивистского слоя», т. е. на удалениях от R_r до $1,5 \cdot R_r$, считая от центра дыры.

О траектории падения мы тоже должны принять хоть какое-то допущение, поскольку точно её посчитать затруднительно. Примем, что вещество, замедляемое гравитацией дыры, по инерции хаббловского движения доберётся до $r = 3 \cdot R_r^*$, там «развернётся» и как из точки покоя вернётся... куда? На горизонт ему падать бесконечно долго. Но нам этого и не надо. Достаточно приблизиться к горизонту на минимальную, так наз. планковскую длину $l_p \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ м, потому что это предел, до которого работает релятивистская физика. Время падения в поле Шварцшильда от $3 \cdot R_r$ до l_p равно:

$$t_3 = (R_r/c) \cdot [8,14 - \ln(l_p/R_r)] = (R_r/c) \cdot [88,3 + \ln(R_r)].$$

Рост в трубе

Зададимся вопросом: каково время образования дыры? Выше (в «Правилах игры») основные увязки её массы, размера и времени формирования уже даны. Но там мы не обсудили одну тонкость. Вселенная расширяется, но как ведёт себя вещество, находящееся внутри флуктуации? Возможен подход, исходящий из первенства кривизны пространства-времени (и мне он представляется более правильным). При таком подходе всё вещество, оказавшееся в «мешке», сразу же выключается из расширения Вселенной. Этому веществу остаётся лишь дожидаться, когда за пределами «мешка» достаточно упадёт фоновая плотность, и вот дыра готова.

Но возможен и подход, исходящий из первенства скорости гравитационного поля. При таком подходе в момент «зачатия» (то есть конца инфляции и начала «классической», по ОТО, физики пространства-времени) в нулевой точке формируется фронт волны, начинает со скоростью света расширяться, и выключаются из общего расширения Вселенной только те частицы материи, до которых фронт дошёл.

При первом подходе «замороженным» оказывается вещество с высокой нулевой плотностью сразу во всём объёме «мешка», а при втором в «заморозку» попадают последовательно слои со всё меньшей и меньшей плотностью. Это должно замедлить время образования дыры, т. к. эффективная масса будет набираться дольше.

Оба варианта поддаются решению. В первом случае дыра образуется за время $\Delta t = 7,77 \cdot t_0$, а во втором — за время $\Delta t = 38,4 \cdot t_0$. (Здесь t_0 — момент рождения «мешка»). У самых древних дыр этим моментом можно считать эпоху конца инфляции, $\sim 10^{-33}$ сек., но, как будто, ничто не запрещает флуктуациям образовываться и позже. Однако чем больше t_0 , тем больше и Δt , а флуктуации по определению штуки короткожи-

* Такую оценку дальности точки «разворота» мы принимаем вот из каких манипуляций понятиями. В точке $r = 1,5 \cdot R_r$ хаббловская скорость $c/2$ равна релятивистской второй космической v_2 локально, а для удалённого наблюдателя она будет замедлена и составит лишь $\sim 0,7 \cdot v_2$. В то же время по Ньютону, если на некотором расстоянии X придать телу в направлении от центра притягивающей массы скорость $0,7 \cdot v_2$, оно поднимется до точки $2 \cdot X$ и оттуда начнёт обратное падение. Если мы проходим путь от $1,5 \cdot R_r$ до $2 \cdot R_r$ по «релятивистской зоне», потом путь от $2 \cdot R_r$ до $3 \cdot R_r$, и обратно по «ньютоновской», и далее от $2 \cdot R_r$ до почти R_r по «релятивистской», то в общем соотношение Ньютон:Эйнштейн = 2:1,5. И почему бы удалённому наблюдателю не увидеть всё «по Ньютону»? Тем более, что в поле Шварцшильда всё, что залетело под $3 \cdot R_r$, не имеет устойчивых орбит. То есть без ракетного двигателя точно упадёт в дыру.

вущие. Поэтому за пределами 1-й секунды миротворения первичные дыры, как принято, практически не образуются.)

Во втором варианте дыра образуется массивнее в $38,4/7,77 = 4,9$ раза; во столько же раз больше будет и радиус её горизонта*. Эффективная масса уже при образовании дыры близка к абсолютной массе, особенно в первом варианте, а по мере разрежения Вселенной они всё более сближаются.

Из $\Delta t \approx 7,77 \cdot t_0$ и уравнений связи массы и размера дыры с параметром Δt следует, что в первом варианте $R_r \approx 7,77 \cdot c \cdot t_0 = 2,33 \cdot 10^9 \cdot t_0$, $M_{эфф} \approx 7,77 \cdot c^3 \cdot t_0 / (2 \cdot \gamma) = 1,57 \cdot 10^{36} \cdot t_0$, а $M_{абс} \approx 3,94 \cdot c^3 \cdot t_0 / \gamma = 1,59 \cdot 10^{36} \cdot t_0$. При $t_0 = 10^{-33}$ сек. дыра в момент формирования ($\sim 8,8 \cdot 10^{-33}$ сек. по часам Большого Взрыва) будет иметь эффективную массу порядка 1570 кг, абсолютную порядка 1590 кг и радиус горизонта порядка $2,33 \cdot 10^{-24}$ м.

Младенец растёт

К моменту образования дыры в ближнем слое, который, как мы приняли, может упасть на дыру и «поглотиться» её расширяющимся горизонтом, находится совсем немного вещества (ведь плотность Вселенной уже сильно упала). Это вещество даёт прибавку массы дыры порядка 3%, и ещё около 1,5% массы прибавится за счёт её «хаббловского проявления», т. е. уменьшения фоновой плотности среды. Займут эти процессы всего около $2 \cdot 10^{-31}$ сек.

Скорость хокинговского испарения нашей дыры — менее $5 \cdot 10^9$ кг/сек., так что за это время испарится порядка 10^{-21} кг, ничтожно мало относительно её 1,5-тонной массы.

Что же будет происходить дальше? Граница «линии разворота», за которой находится не захваченное гравитацией вещество ($3 \cdot R_r$ в момент разворота), уползает от дыры вместе с расширяющимся пространством-временем. Развернувшееся вещество «выключено» гравитацией из этого расширения и движется к дыре. Получается, что на этой границе возникает разрыв вещества, чего, конечно, быть не может: природа не терпит пустоты! Под действием собственного давления в это пространство устремится внешнее вещество, и там (примем) всё время будет поддерживаться практически фоновая плотность Вселенной.

Притекающее к границе $3 \cdot R_r$ вещество будет падать к дыре, сначала ускоряясь по Ньютону, затем замедляясь по Шварцшильду. Его плотность при этом будет быстро возрастать, в долях процента от гравитационного радиуса — практически по экспоненциальному закону. В конце концов, всё через те же $\sim 2 \cdot 10^{-31}$ сек. вещество сожмётся до плотности дыры, и тогда горизонт подвинется и захватит его: дыра чуть-чуть вырастет. Но исходная плотность, с которой вещество вошло в слой захвата, убывает так быстро, что вскоре гравитация уже не сможет сжать его до плотности дыры, так как для этого слой потребовалось бы сжать до толщины меньше планковской длины l_p , — а в таких масштабах, как выше уже говорилось, релятивистские законы не работают.

Это достигается примерно при времени $2 \cdot 10^{-24}$ сек. За всё это время масса дыры прирастёт незначительно, на $\sim 8,4 \cdot 10^{32} \cdot t_0$ — менее 1 кг.

* Контраст плотностей дыры и остальной Вселенной в момент образования дыры в первом варианте равен $(1+7,77)^2 = 77$. Во втором варианте формула более громоздкая: $3 \cdot (1+38,4) \cdot [2+38,4 - (2/38,4) \cdot (1+38,4) \cdot \ln(1+38,4)] / 38,4^2 = 2,63$. По контрасту плотностей можно узнать, какая часть абсолютной массы, заключённой в дыре, проявляет себя как эффективная масса. В первом варианте это $1 - 1/77 = 98,7\%$, а во втором — $1 - 1/2,63 = 62\%$.

Начинаем одеваться

После стабилизации радиуса горизонта дыры с точки зрения удалённого наблюдателя должна начаться классическая картина: окружающее вещество, попадающее на границу гравитационного захвата, начинает бесконечно стремиться к горизонту, никогда его не пересекая, и, так сказать, накапливается там в виде замороженной во времени шубы.

Эта многослойная шуба в разрезе отражает всю историю эволюции вещества Вселенной, начиная с того времени, когда горизонт стабилизировался. Правда, это вещество консервируется в существенно «омоложенном» виде за счёт сжатия. На планковском расстоянии от горизонта дыры ($\sim 1,6 \cdot 10^{-35}$ м) плотность оболочки и параметры состояния вещества в ней близки к первоначальным (для 10^{-33} сек.), далее быстро падают – и примерно на границе «ньютоновской зоны» ($2 \cdot R_g$) уже почти сравниваются с фоновыми.

Конечно, при таких темпах накопления оболочки масса её мизерна. К концу своей эпохи дыра, о которой мы говорим, накопила бы в оболочке всего $\sim 3,5 \cdot 10^{-8}$ г. Но давайте поделим эту массу на площадь поверхности горизонта дыры. У нас получится более чем впечатляющая цифра: $\sim 5 \cdot 10^{38}$ кг/м²! Причём половина её обволакивает горизонт в первые же $\sim 10^{-24}$ сек. после начала накопления оболочки.

О пользе хорошей одежды

Давайте порассуждаем об экранирующих свойствах оболочки. Если бы это был свинец при земных температурах и давлениях, мы имели бы стену толщиной $4,2 \cdot 10^{34}$ м. Это величина невообразимая, 4,5 миллиарда миллиардов световых лет! В 300 млн. раз больше возраста Вселенной!

А ведь реликтовая материя при состоянии, характерном для 10^{-33} – 10^{-27} сек., гораздо более непроницаема для излучения, чем свинец. Вспомним, что эпоха, когда фотоны впервые избавились от экранирования остальным веществом первичной каши, лежит во временах, исчисляемых не ничтожными долями секунды, а сотнями тысяч лет от Большого Взрыва.

Эта ерундовая, казалось бы, оболочка на 100% удерживает внутри дыры всё излучение Хокинга: и гамма-кванты, и нейтрино, и любые другие частицы. Никакое квантовое туннелирование не сможет пройти такой сверхпрочный барьер. Но если в мизерном количестве и сможет (в квантовом мире вероятность нулю не равна никогда), то в дело вступит «вязкость» времени вокруг горизонта дыры, и к удалённому наблюдателю придут настолько ослабленные и похолодевшие кванты, что заметить их будет немислимо.

Ничто из известных сил не сможет разрушить эту броню, потому что где-где, а в окрестностях горизонта чёрной дыры гравитация безусловно доминирует. Конечно, дыра может быть поглощена другой дырой, но ведь у той тоже есть своя оболочка. Так что плащ-невидимка не срывается.

Не будь этого плаща, наша дыра дождалась бы, пока Вселенная не станет холоднее её (а это произошло бы около $1,6 \cdot 10^{-20}$ сек. по часам Большого Взрыва), и испарилась бы целиком за $3,4 \cdot 10^{-7}$ сек. А под плащом она будет неизменной жить... вечно. С поправкой лишь на квантовую вероятность. Или на такую же иллюзорную вероятность попадания в область антиматерии, которая могла бы за счёт анниги-

ляции устранить оболочку или хотя бы «проесть» дырку для хокинговского излучения.

И самое важное, **концепция оболочки-экрана снимает все главные ограничения на количество чёрных дыр и восстанавливает их в статусе хороших кандидатов на заметную долю тёмной материи.**

Младшие

Мы посмотрели, что будет происходить с самыми древними и самыми лёгкими первичными чёрными дырами. Дыры, которые будут образовываться при $t_0 > 10^{-33}$ сек., будут более массивными: зависимости $t_{\text{сформирования}} \approx 7,8 \cdot t_0$, $M_{\text{эфф}} \approx 1,57 \cdot 10^{36} \cdot t_0$ кг, $M_{\text{абс}} \approx 1,59 \cdot 10^{36} \cdot t_0$ кг, $R_{\text{г исходный}} \approx 2,33 \cdot 10^9 \cdot t_0$ м, $R_{\text{г финишный}} \approx 2,4 \cdot 10^9 \cdot t_0$ м сохраняются. (Не забудьте только, что всё посчитано с точностью, как говорится, до порядка! Не столько рассчитано, сколько прикинуто.)

Время отлёта окружавшего «мешок» вещества от $1,5 \cdot R_g$ к границе $3 \cdot R_g$, разворота и начала диффузии фонового вещества Вселенной к дыре: $t_{\text{дифф}} \approx 82 \cdot t_0$; время падения от зоны захвата гравитационным фронтом до зоны поглощения горизонтом $t_{\text{пад}} \approx 7,8 \cdot t_0 \cdot [110 + \ln(t_0)]$ сек.;

скорость прироста массы дыры $dM/dt \approx 6,9 \cdot 10^{34} \cdot (t_0/t)^2$ кг/сек., где t – текущее время по часам Большого Взрыва; скорость прироста радиуса горизонта $dR_g/dt \approx 10^8 \cdot (t_0/t)^2$ м/сек.

После $\sim 2 \cdot 10^{42} \cdot t_0^2$ сек. (назовём этот рубеж $t_{\text{фикс}}$) у дыр прекращается рост горизонта и может накапливаться только оболочка вокруг горизонта*:

скорость прироста массы оболочки такая же, как выше: $dM/dt \approx 6,9 \cdot 10^{34} \cdot (t_0/t)^2$ кг/сек.;

масса оболочки, накопленная от $t_{\text{фикс}}$ до некоторого времени t_2 , равна:

$$M(t_2) \approx 6,9 \cdot 10^{34} \cdot t_0^2 \cdot [1/t_{\text{фикс}} - 1/t_2] \text{ кг};$$

при $t_2 \gg t_{\text{фикс}}$ получим полную массу оболочки:

$M_{\text{обол}} \approx 6,9 \cdot 10^{34} \cdot t_0^2 / t_{\text{фикс}} \approx 3,5 \cdot 10^{-8}$ кг (это чуть более 1,5 так наз. планковских масс);

$$\text{Удельная масса оболочки } \mu \approx 4,8 \cdot 10^{-28} / t_0^2 \text{ кг/м}^2.$$

Как видим, оболочки у самых младших первичных чёрных дыр, образующихся при $t_0 \approx 1$ сек. с массой около 800 тыс. солнечных, сильно отличаются от оболочек старших дыр: постоянная масса 35 мкг размазана по колоссальной поверхности 72 триллиона (!) км². Такие оболочки в «свинцовом эквиваленте» были бы намного тоньше и атомов и даже ядер, они всего в 2000 раз превысили бы планковскую длину. Но таким огромным дырам и экранировать-то нечего. Интенсивность хокинговского испарения падает пропорционально квадрату массы дыры, и у них она порядка 10^{-40} Вт – в виде трудно вообразимых «пост-пост-пост-радиоволн» длинами порядка десятков млн. км. А дыры, которые без оболочки могли бы полностью или в заметной доле испариться к нашим дням (это дыры с $M < 10^{12}$ кг и $t_0 < 6 \cdot 10^{-25}$ сек.) имеют оболочки с $\mu > 1,3 \cdot 10^{20}$ кг/м².

Так что невидимость соблюдается во всём диапазоне времён и событий... И они незримо летают, летают...

А пока – с Новым годом, братцы!

* Здесь говорится об эпохе 1-й секунды мира; что будет с дырой в эпоху от начала протозвёздных сгущений до наших дней – это совсем другая история.