

## О черной дыре и информационном парадоксе

(25.08.2013. Обновлено 29.08.2013)

Свойства черных дыр и их горизонта событий до сих пор активно обсуждается научным сообществом. Новый импульс, в частности, недавно получила проблема так называемого “информационного парадокса”, казалось бы исчерпанная еще несколько лет назад. Согласно появившимся сообщениям [Камнев, 2013], в ЦЕРНе недавно была даже созвана конференция, специально посвященная этому вопросу. С указанным парадоксом тесно связаны гипотезы о структуре горизонта черной дыры и дуализм описания падающего в ЧД тела в двух различных системах отсчета – удаленной и жестко связанной с падающим телом.

В данной публикации излагаются аргументы, согласно которым ни вышеупомянутого дуализма, ни информационного парадокса в действительности не существует.

### 1. Дуализм описания падения массивной частицы в ЧД

Как известно, в системе отсчета удаленного от ЧД наблюдателя падающая на ЧД частица “замедляет” свое падение и в конечном счете как бы “застывает” на горизонте событий, никогда не пересекая его. В то же время, при переходе в систему координат Крускала, охватывающую все пространство-время (а не только область вне ЧД) падающая частица беспрепятственно продолжает свое движение внутрь ЧД и, в конечном счете, достигает центральной сингулярности. Возникает “наивный” вопрос: как совместить оба описания?

Для разрешения этой ситуации Сасскинд [Susskind, 2008] выдвинул концепцию “комплементарности” ЧД, подобную общему принципу дополнительности Бора. В данном случае речь идет о том, что верны (имеют место) сразу обе картины (ср. рис. 1а и 1б). Дело в том, что различие между ними физически не могло бы быть установлено никаким общим “супернаблюдателем” из-за наличия горизонта.

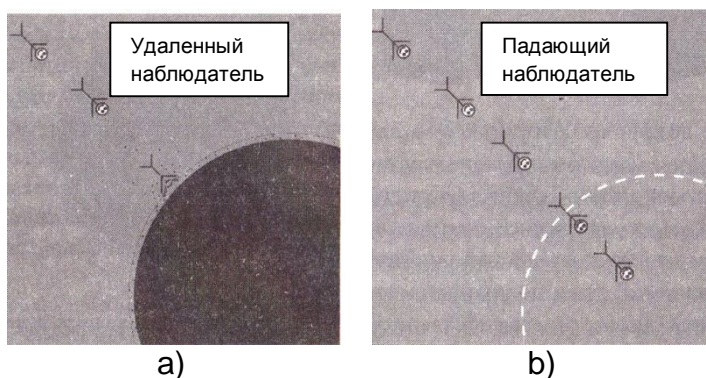


Рисунок 1 [Susskind, 2008].

Однако при всей элегантности такого решения я полагаю, что оно просто излишне. Оказывается, на самом деле падение частицы под горизонт физически невозможно!

Мое собственное исследование [Шульман, 2009], основанное на известных результатах ОТО, выявило интригующую картину того, что происходит при

образовании черной дыры при сжатии материального шара конечных размеров (т.е. не точечным). В качестве критерия близости к состоянию коллапса было принято отношение  $\rho/\rho_0$ , где  $\rho$  – фактическая плотность шара,  $\rho_0$  – критическая плотность, при которой наступает гравитационный коллапс.

Вдали от режима коллапса давление внутри материального шара *строго положительно* и плавно спадает от центра к периферии шара. Однако при дальнейшем сжатии такого объекта, перед самым коллапсом (но еще до его наступления, при  $\rho/\rho_0 \sim 0.7025$ ) возникает принципиально новая ситуация: распределение давления внутри объекта полностью изменяется. В самом центре шара давление изменяет знак и становится *отрицательным*, а затем скачкообразно меняет знак на положительный, причем разрыв давления при таком скачке оказывается бесконечным с обеих сторон). По мере дальнейшего приближения к состоянию коллапса (приближения  $\rho/\rho_0$  к 1) этот биполярный разрыв *вытесняется* от центра ЧД к ее периферии; в пределе (при наступившем коллапсе) этот разрыв давления оказывается как раз на горизонте ЧД и должен стать *непреодолимым барьером* для любого тела, обладающего конечной кинетической энергией и пытающейся попасть внутрь 3-мерной сферы (*под поверхность*).

## 2. Редукция размерности

Этот факт побудил меня предложить радикальную концепцию для описания ЧД в нашей Вселенной. Она предполагает, что в результате гравитационного коллапса на границе ЧД происходит *изменение топологии* пространства – само физическое пространство исчезает, как таковое, внутри ЧД, и черная дыра сводится к *граница между внешней и внутренней областями, т.е. приобретает размерность 2 вместо 3* (т.е. происходит редукция размерности<sup>1</sup>).

Такой вывод в действительности оказывается далеко не столь неожиданным, как можно было бы думать. С 70-х годов прошлого века в теории ЧД принята так называемая “мембранная парадигма”. В соответствии с ней для *внешнего* наблюдателя горизонт событий ЧД выглядит как *двумерная физическая мембрана из вязкой жидкости* с определенными механическими, электрическими и термодинамическими свойствами (см., например, [Новиков и Фролов, 1986]). При этом основные свойства мембраны определяются ее поверхностным гравитационным и электрическим зарядами. Действительно, *механическая* форма мембраны (горизонта событий ЧД) достигает динамического равновесия в результате взаимодействия между поверхностным давлением, гравитацией и центробежными силами. *Электродинамические* свойства ЧД проявляются в полном сходстве между мембраной и электропроводящей сферой, а форма силовых линий электрического поля, создаваемого заряженной частицей вблизи горизонта невращающейся черной дыры совпадает с формой силовых линий этой проводящей поверхности. С *термодинамической* точки зрения площадь мембраны ведет себя подобно энтропии обычного тела, т.е. не уменьшается или растет, но не убывает (теорема Хокинга). Сама мембрана может также быть охарактеризована эффективной температурой, которая пропорциональна поверхностному гравитационному заряду. Наконец, был сформулирован знаменитый *голографический принцип*, согласно которому, как это не звучало парадоксально, вся информация о 3-мерной черной дыре как бы “записана” на ее 2-мерном горизонте событий – как выразился ‘т Хоофт, происходит “редукция

<sup>1</sup> В близком понимании этот термин первым использовал ‘т Хоофт [Hoof, 1993].

размерности”. В 1977 году Малдасена установил изоморфизм этих двух математических миров [Maldacena, 1998].

Заметим, что ранее уже предлагались сходные модели ЧД, не содержащие “внутренней” области и сингулярности в ней [Mazur and Mottola, 2002], [Mathur, 2013]. Граница между внешней Вселенной и ЧД там полагается достаточно тонкой (порядка планковской длины), но конечной.

Я думаю, что представление о двумерности граничной мембраны является не приближенным, а *абсолютно точным*. Вся масса черной дыры оказывается сосредоточенной в этой двумерной области вполне однородным образом, поскольку различий, зависящих от удаленности относительно центра, не будет. Если редукция размерности действительно имеет место, то всякая необходимость в гипотезе комплементарности отпадает, а голографический принцип для ЧД вырождается в тривиальное утверждение.

### 3. Описание “информационного парадокса”

Как известно, в 1975 году С.Хокинг теоретически открыл [Hawking, 1975] существование излучения ЧД с характеристической температурой и *тепловым* спектром. В основе механизма, предложенного Хокингом, лежит утверждение о генерации вблизи горизонта ЧД виртуальных пар частица-античастица, одна из которых может туннелировать под горизонт, тогда как другая становится реальной и излучается во внешнее пространство. Считается, что это излучение приводит к парадоксальной ситуации; так, автор публикации [Anderson, 1996] пишет (перевод мой – МХШ):

Возьмем квантовую систему в чистом состоянии и бросим ее в черную дыру. Подождем некоторое время, пока дыра не испарится и восстановит свою прежнюю массу. Мы начали с чистого состояния поглощаемой системы и исходной массы  $M$  черной дыры, а закончили тепловым состоянием излучения Хокинга и черной дырой с той же массой  $M$ . Таким образом, мы пришли к процессу, который, по всей видимости, преобразует чистое состояние в *тепловое*. Но весь фокус в том, что тепловое состояние является СМЕШАННЫМ (и описывается в квантовой механике уже матрицей плотности, а не волновой функцией). При преобразовании чистого состояния в смешанное должна теряться информация. Так, в нашем примере мы имеем исходное состояние, которое задается набором собственных значений и коэффициентов, т.е. рядом чисел. Однако оно затем преобразуется в выходное состояние, которое характеризуется лишь одним числом – температурой, т.е. объем выходной информации будет меньше входного. Вся остальная информация окажется потерянной...

На техническом жаргоне черная дыра осуществляет неунитарное преобразование состояния системы. Можно напомнить, что неунитарная эволюция запрещена в квантовой теории, поскольку она нарушает сохранение вероятности; то есть, после неунитарной эволюции сумма вероятностей всех возможных результатов эксперимента может оказаться больше или меньше 1.

Между тем, далее я привожу некоторые аргументы, которые, с моей точки зрения, опровергают существование информационного парадокса.

#### 4. Возражение против механизма излучения Хокинга

Механизм излучения Хокинга предполагает туннелирование одной из пары виртуальных частиц под горизонт событий. Однако, как было отмечено в разделе 1, на “входе” ЧД существует барьер давления (т.е. потенциальный барьер) *бесконечной* высоты, сквозь который никакая частица туннелировать не может. У меня нет оснований сомневаться в существовании теплового излучения ЧД с температурой Хокинга, однако можно предположить совсем другой механизм его возникновения: в гравитационном поле ЧД ее эффективная температура излучения (связанная с напряженностью поля) определяется поверхностным гравитационным зарядом и совпадает с температурой Унру для *произвольного* источника тяготения, а на горизонте непрерывно переходит в температуру Хокинга (см. [Шульман, 2010]). Энтропия ЧД, излучение и температура Хокинга не зависят от возможности проникновения частиц во внутреннюю область ЧД.

#### 5. Когда у ЧД “появляются волосы”

Если даже допустить, что частица или тело может попасть во внутреннюю область ЧД, то и это не приводит к информационному парадоксу. Действительно, очень часто ссылка на теорему “об отсутствии волос” у черной дыры делается без учета обстоятельств, при которых эта теорема выведена. Вот что говорится в книге [Новиков и Фролов, 1986]:

Подытожив результаты многочисленных работ, посвященных возможным конечным состояниям черных дыр, Уилер сформулировал утверждение, состоящее в том, что уединенная черная дыра при переходе в стационарное состояние избавляется в процессе излучения от всех тех характеристик, от которых можно избавиться путем излучения. ...

Уединенная стационарная черная дыра не может быть источником какого-либо *массивного* поля, поскольку для таких полей возможны все моды излучения ... и, согласно гипотезе Уилера, все они должны излучаться при переходе черной дыры в стационарное состояние...

Если в свете указанной цитаты рассмотреть процесс бросания квантовой системы в уединенную ЧД, то становится ясно, что при этом *возмущается стационарность* последней, и она ответит “переходным” излучением, восстанавливая свою стационарность. Ясно также, что это переходное излучение вовсе не обязано иметь отношение к стационарному тепловому излучению Хокинга.

#### 6. Падающая квантовая система *измеряется* внешним полем ЧД

Я убежден, что неунитарная эволюция вовсе не противоречит квантовой механике. Фактически речь идет о том, дает ли квантовая теория только обратимое описание реальности, или это не так.

Начнем с классической механики. Очень часто приходится встречать противопоставление необратимости статистической механики якобы обратимым законам Ньютона, т.е. утверждение о наличии противоречия. Однако, как я думаю, законы Ньютона *не являются необратимыми*. Дело в том, что второй закон обычно приводят в виде

$$F = m\ddot{q}$$

где  $F$  - внешняя сила,  $m$  - масса,  $\ddot{q}$  - ускорение. В таком представлении разумеется, не учитываются никакие силы сопротивления и, соответственно, необратимые потери энергии при движении. Однако, в более общем случае, в данное уравнение следует включать, например, силы трения, тогда получим соотношение вида

$$F = m\ddot{q} + D\dot{q} + \dots$$

которое заведомо уже не будет обратимым. Сила трения – это *реакция* других частей Вселенной на движение рассматриваемой частицы, и при этом происходит именно необратимое *перераспределение* энергии, так что в гамильтониане частицы обязательно появляется член, описывающий необратимые потери.

Более того, квантовые системы в общем случае могут характеризоваться наличием когерентности, а ее утрата – процессом *декогеренции*. Декогеренция происходит, в частности, при взаимодействии частицы с полем, которое “измеряет” состояние частицы [**Zurek, 2002**]:

Присутствие частицы приводит к возбуждению поля и ее рассеянию. Результирующая “рябь” создает своего рода “запись” ее положения, формы, ориентации и т.п., и, что наиболее важно, приводит к ее мгновенной локализации... [Уравнение эволюции для матрицы плотности частицы естественным образом] разделяется на три слагаемых, каждое из которых отвечает за различный аспект эффективного поведения в классическом случае. Первое слагаемое – уравнение фон Неймана (которое может быть выведено из уравнения Шрёдингера) – порождает классическую *обратимую* эволюцию ожидаемого значения наблюдаемой. Второе слагаемое приводит к диссипации..., вызванной взаимодействием со скалярным полем; это взаимодействие уменьшает средний импульс и ведет к потере энергии. Последнее слагаемое также имеет классический аналог: оно ответственно за флуктуации, или случайные “толчки”, приводящие к броуновскому движению.

Именно влияние *последнего* слагаемого со временем разрушает квантовую когерентность, *удаляя недиагональные члены* матрицы плотности. Таким образом, неправильно думать о системе в *чистом* состоянии, попадающей в *уединенную* ЧД. На самом деле происходит *измерение* падающей системы *полем* ЧД и переход этой системы в *смешанное* (декогерированное) состояние заведомо до попадания в ЧД, при этом не требуется никаких гипотез о структуре горизонта событий ЧД, как это делается, например в [**Almheiri et al., 2013**], где предполагается, что падающий наблюдатель “сгорает” на горизонте.

## 7. Может ли удаленный наблюдатель видеть рост ЧД

Я не встречал в литературе обсуждения еще одного сопутствующего вопроса. Учитывая замедление до *бесконечности* распространения информации от горизонта черной дыры до удаленного наблюдателя, последний, казалось бы, в состоянии видеть ЧД *только в первое мгновение* после ее рождения. Это означало бы, что мы *вечно* обречены наблюдать только новорожденные ЧД.

Однако растущие ЧД поглощают большие массы материи, которые, с точки зрения удаленного наблюдателя, стекаются к горизонту событий. С течением времени масса накопившейся там материи становится такой, что и в ближайшей окрестности ЧД плотность материи достигает критической величины, и эта ближайшая окрестность также коллапсирует, т.е. видимый радиус ЧД для удаленного наблюдателя все-таки возрастает.

**Благодарность:** Я благодарю Ю.А. Лебедева за полезные рекомендации.

**Ссылки:**

- [Almheiri et al., 2013]** Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski, and James Sully. Black Holes: Complementarity or Firewalls? arXiv:1207.3123v4 [hep-th] 13 Apr 2013
- [Anderson, 1996]** Warren G. Anderson. The Black Hole Information Loss Problem. [http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info\\_loss.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html)
- [Hawking, 1975]** S.W. Hawking. Particle creation by black holes. Comm. Math. Phys. 43 (1975) 199.
- [Hooft, 1993]** G. 't Hooft. Dimensional reduction in quantum gravity. arXiv:gr-qc/9310026v2 20 Mar 2009
- [Maldacena, 1998]** Juan Maldacena. The Large N Limit of Superconformal field theories and supergravity, arXiv:hep-th/9711200v3 22 Jan 1998.
- [Mathur, 2013]** Samir D. Mathur. What happens at the horizon? arXiv:1308.2785v1 [hep-th] 13 Aug 2013
- [Mazur and Mottola, 2002]** Pawel O. Mazur and Emil Mottola. Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes. ArXiv:gr-qc/0109035v5 27 Feb 2002
- [Susskind, 2008]** Leonard Susskind. The black hole war. My battle with Stephen Hawking to make the world safe for quantum mechanics. Back bay books, Little, Brown and Company, 2008. Русский перевод: Леонард Сасскинд. Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. Изд-во "Питер", 2013.
- [Zurek, 2002]** Zurek H. Woitech. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. Los Alamos Science, Number 27, 2002. Русский перевод: В. Зурек. Декогеренция и переход от квантового мира к классическому [http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_translation/Zurek.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Zurek.pdf)
- [Камнев, 2013]** Валерий Камнев. По дороге в черную дыру. [http://polit.ru/article/2013/05/18/ps\\_black-holes/](http://polit.ru/article/2013/05/18/ps_black-holes/)
- [Новиков и Фролов, 1986]** И.Д. Новиков, В.П. Фролов. Физика черных дыр. М., Наука, 1986.
- [Шульман, 2009]** М.Х. Шульман. Коллапс обычный и необычный. [http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_time/Collapse.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Collapse.pdf)
- [Шульман, 2010]** М.Х. Шульман. Энтропия источника поля тяготения. [http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_time/Force\\_and\\_entropy\\_rus.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Force_and_entropy_rus.pdf)