

# Первичные чёрные дыры

готовится by Часников Н.А. Т10-40. v0.8

May 5, 2010

## Contents

<b>1</b>	<b>Механизм образования</b>	<b>1</b>
1.1	Некие треды	1
1.2	Ранняя пылевидная стадия	2
1.3	Фазовый переход 1-го рода	2
1.4	В настоящий момент времени	2
<b>2</b>	<b>Эффект Унру</b>	<b>2</b>
2.1	Эффект Унру	2
2.2	Излучение Хоккинга	2
<b>3</b>	<b>Испарение чёрных дыр</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Следствия</b>	<b>3</b>
4.1	Влияние ПЧД на нуклеосинтез	3
4.2	Вклад ПЧД в общую плотность	4
<b>5</b>	<b>Литература</b>	<b>4</b>

## 1 Механизм образования

### 1.1 Некие треды

Традиционно считается, что чёрные дыры образуются за счёт гравитационного сжатия звёзд. Однако, они могут и возникать за счёт флуктуации первичной плотности - переуплотнённые области прекращают расширяться и вновь сжимаются. Предложено еще несколько механизмов образования ПЧД, но это — простейший. Карр и Хоккинг рассчитали, что образовываться такие чёрные дыры могут с массой  $10^{-5}g$ .<sup>1</sup> и выше. Также, Хоккинг сделал предположение о том, что чёрная дыра испускает частицы как АЧТ с температурой  $T_{bh} = \frac{hc^3}{8\pi G M k_B} \sim 10^{-7} \frac{M_\odot}{M}$ . Во Вселенной с уравнением состояния  $p = \gamma\rho$ , где  $0 \leq \gamma \leq 1$  вероятность, что образуется чёрная дыра из флуктуаций определяется выражением  $W_{pbh} \propto \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2(\delta^2)}\right)$ , где  $\delta$ - дисперсия флуктуации плотности, распределённой по нормальному закону.

Карр также рассчитал, что при доле областей, достаточно плотных чтобы сколлапсировать, равной  $\beta(M) = \rho(M) \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\rho(M)^2}\right)$ , относительная плотность ПЧД во Вселенной будет определяться выражением  $\Omega_{pbh} = \beta\Omega_R(1+z) \sim 10^6 \sqrt{\beta\left(\frac{t}{s}\right)} = 10^{18} \sqrt{\beta\left(\frac{M}{10^{15}g}\right)}$ , где  $\Omega_R \sim 10^{-4}$ — относительная плотность микроволнового фона.

Также возможны и следующие механизмы образования:

- Формирования ПЧД на пылевидноподобной стадии
- Формирование ПЧД за счёт фазовых переходов 1 и 2 рода
- Формирование догалактических ПЧД, которые впоследствии стали ядрами галактик.

Теперь более подробно некоторые части вышеописанного.

---

<sup>1</sup> в работах Чисольма даются оценки на минимальную массу ПЧД:  $\frac{M_{BH}}{m_{pl}} \geq \frac{4}{27} \sqrt{\frac{g_*}{5\pi}}$

## 1.2 Ранняя пылевидная стадия

После закалки частиц массы  $m$ , отношение плотности этих частиц ( $\sim mc^2 \nu n_r$ ) к плотности релятивистских частиц ( $\sim kT n_r$ ) растёт как  $\frac{mc^2}{kT}$ . К моменту времени  $t_0 \sim \left(\frac{m_{pl}}{\nu m}\right)^2 t_{pl}$ , когда температура вселенной падает до величины  $T_0 = \frac{\nu mc^2}{k}$  наступает стадия доминантности частиц массы  $m$ . На этой стадии уравнение состояния близко к  $p = 0$ . На пылевидной стадии вероятность образования черной дыры определяется степенным законом, в то время как на RD - экспоненциальным. Поэтому, вероятно ПЧД образовывались на ранних пылевидных стадиях.

## 1.3 Фазовый переход 1-го рода

Например - рассмотрим области пространства с истинным вакуумом, которые расположены в точках  $(\vec{r}_1, t_1)$  и  $(\vec{r}_2, t_2)$ , а также  $\|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\| \ll \text{«горизонта»}$ . Скорость роста таких “пузырей” становится практически равной скорости света, стенки этих “пузырей” налетают друг на друга и проникают друг в друга на расстояния порядка их ширины, отражаются и отлетают. Пространство между ними заполняется полем ложного вакуума, преобразуя кинетическую энергию стенок вновь в энергию ложного вакуума, вызывая их замедление. Вобщем, картина получается такова что в пузыре истинного вакуума есть “пузырь” ложного вакуума, и если плотность энергии ложного вакуума достаточна — то образуется чёрная дыра.

Логично предположить, что свойства пространства таковы, что при достижении плотности энергии некоего значения, тем или иным способом — получается чёрная дыра, как очень тяжёлый шарик, положенный на лист бумаги - если шарик будет достаточно тяжёлым, он пробьёт лист.

Получается достаточно широкий диапазон масс. Разные модели позволяют рассчитывать ограничения на массы как  $\min$  так и  $\max$  (в модели образования ПЧД при фазовых переходах рассматриваются, например ограничение сверху  $M_{max}$ , получаемое из размеров “пузырей”).

## 1.4 В настоящий момент времени

- $M < 10^{13}$  г. — такие ЧД испарились к текущему моменту, и внесли свой вклад во Вселенную, которую мы видим
- $10^{13} < M < 10^{15}$  — такие ЧД испаряются сейчас
- $M > 10^{15}$  — эти могут уже в свою очередь повлиять на флуктуации плотности таким образом, что к текущему моменту вокруг этих ЧД образовались галактики.

# 2 Эффект Унру

## 2.1 Эффект Унру

Эффект Унру (излучение Унру) — предсказываемый квантовой теорией поля эффект наблюдения теплового излучения в ускоряющейся системе отсчёта при отсутствии этого излучения в инерциальной системе отсчёта. Другими словами, ускоряющийся наблюдатель увидит фон излучения вокруг себя, даже если неподвижный наблюдатель не видит ничего. Основное квантовое состояние в неподвижной системе кажется состоянием с ненулевой температурой в ускоряющейся системе отсчёта. Вакуум — это самое простое, самое низшее по энергии из возможных состояний. Энергетические уровни квантованного поля зависят от Гамильтониана, который, в общем случае зависит от координат, импульсов и времени. Поэтому гамильтониан, а значит и понятие вакуума, зависит от системы отсчёта. В пространстве Минковского из-за его высокой симметрии для всех инерциальных систем отсчёта вакуум — одно и то же состояние. Но это не так уже для неинерциальных систем в пространстве Минковского, а тем более для практически произвольно искривлённых пространств общей теории относительности. В квантовой теории поля физический вакуум наполнен постоянно рождающимися и исчезающими флуктуациями различных полей (можно сказать и «виртуальными частицами»).

## 2.2 Излучение Хоккинга

Хоккинг показал, что за счёт квантовых эффектов вблизи её поверхности, чёрная дыра может терять энергию покоя, тем самым испаряясь. В поле внешних сил динамика этих флуктуаций меняется, и если силы достаточно велики, прямо из вакуума могут рождаться пары частица-античастица. Такие процессы происходят и вблизи (но всё же снаружи) горизонта событий чёрной дыры. При этом возможен случай, когда полная энергия античастицы оказывается отрицательной, а полная энергия частицы — положительной. Падая в чёрную дыру,

античастица уменьшает её полную энергию покоя, а значит и массу, в то время как частица оказывается способной улететь в бесконечность. Для удалённого наблюдателя это выглядит как излучение чёрной дыры. Незаряженная, невращающаяся Шварцшильдская ЧД излучает частицы спина  $s$  и энергией в диапазоне  $(Q, Q + dQ)$

$$d\dot{N} = \frac{\Gamma_s dQ}{2\pi\hbar} \left[ \exp\left(\frac{8\pi G Q M}{\hbar c^3}\right) - (-1)^{2s} \right]^{-1}$$

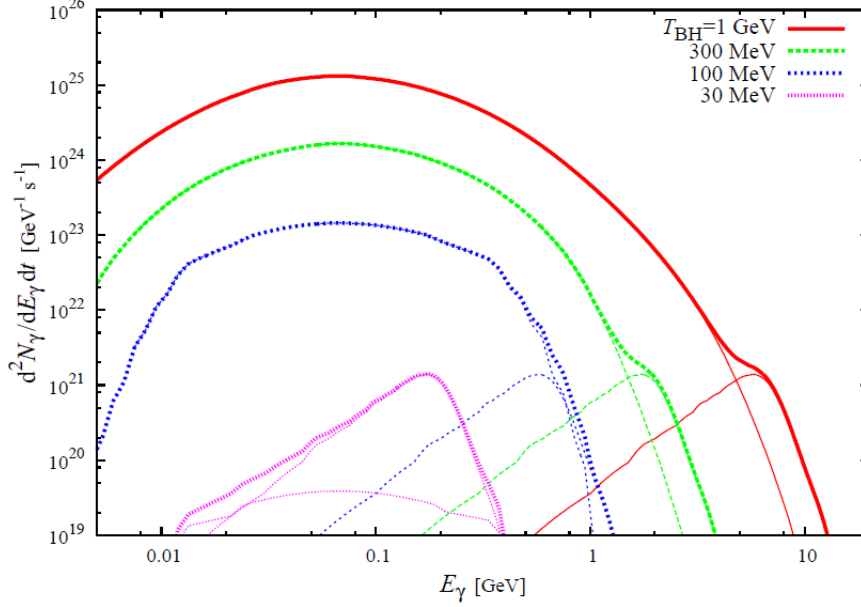


Figure 1: Спектр фотонов от типичной чёрной дыры

### 3 Испарение чёрных дыр

Расчёты показывают, что ЧД теряет массу по закону

$$\dot{M} = -5.34 \cdot 10^{25} \cdot \frac{f(M)}{M^2} \frac{g}{sec}$$

Откуда можно легко рассчитать, что ЧД, образовавшаяся с массой  $M$ , живёт примерно

$$\tau(M) \sim \frac{\hbar c^4}{G^2 M^3}$$

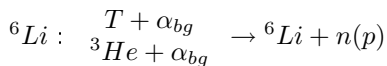
При уменьшении массы ЧД она “светит” сильнее, а гравитация остаётся порядочной, поэтому испущенные частицы могут догонять своих более ранних товарищей. Так что возникли гипотезы образования фотосферы вокруг ЧД, развиваемые в основном Хеклером.

### 4 Следствия

#### 4.1 Влияние ПЧД на нуклеосинтез

Рассмотрим следствия, которые получаются, если предположить существование ПЧД. Испарение черных дыр с массой  $10^9 < M < 10^{13}$  г. может влиять на образование  $n\bar{n}$ , приводить к уничтожению дейтерия и расщеплению  ${}^3\text{He}$ . Испускание адронов увеличивает вымороженное соотношение  $n/p$ .

Испущенный нуклон  $p(n) + \alpha_{bg} \rightarrow \begin{cases} T + \dots \\ {}^3\text{He} + \dots \end{cases}$ , а в свою очередь тритий и  ${}^3\text{He}$  рассеивается на  $\alpha_{bg}$ , образуя

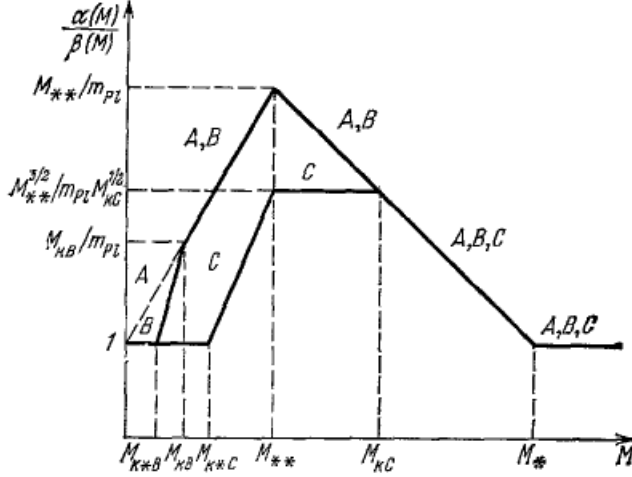


Возможен и другой процесс:  $\gamma + \alpha_{bg} \rightarrow \begin{cases} T + p \\ {}^3\text{He} + n \end{cases}$

## 4.2 Вклад ПЧД в общую плотность

Момент образования ПЧД на ранне-пылевидной стадии определяется её массой:  $t_{form} \sim \left(\frac{M}{m_{pl}}\right) t_{pl}$ . Если ПЧД испарится на стадии  $r = \varepsilon/3$  (за  $t_{evap} = t_{form} \cdot \left(\frac{t_{form}}{m_{pl}}\right)^2$ ) или до конца РД-стадии  $t_{RD}$ , то вклад в космологическую плотность растёт как  $\sqrt{t}$ , отсюда связь между долей вещества  $\beta(M)$ , вошедшего в ПЧД массы  $M$  в момент их образования, и вкладом  $\alpha(M)$  таких ПЧД в общую плотность Вселенной в момент их испарения, если  $M < 10^{15} \text{ г}$  или в современную космологическую плотность, если  $M > 10^{15}$ , имеет следующий вид:

$$\frac{\alpha(M)}{\beta(M)} = \sqrt{\min(t_{evap}, t_{RD})}$$



Связь  $\alpha(M)$  и  $\beta(M)$  (в логарифмическом масштабе).

Линия A — без учета ранних пылевидных стадий; линии B и C — с учетом таких стадий, B — соответствует стадии с  $t_K < 10^{-25} \text{ с}$ , C — соответствует стадии с  $t_K > 10^{-25} \text{ с}$ .  $M_* \sim 10^{15} M_\odot$  — масса, заключенная под горизонтом в момент окончания РД-стадии  $t_*$ ;  $M_{**} \sim 10^{13} \text{ г}$ , равная массе, заключенной внутри космологического горизонта на момент  $t \sim 10^{-25} \text{ с}$ , масса ПЧД, испаряющейся к моменту  $t_*$ ;  $M_{KB}$  и  $M_{KC}$  — массы, заключенные под горизонтом в момент окончания ранней пылевидной стадии, соответственно в случаях B и C;  $M_{KB}$  и  $M_{KC}$  — массы ПЧД, испаряющихся за время  $t_K$  соответственно в случаях B и C

## 5 Литература

- [1] Carr B J and Hawking S W 1974 Mon. Not. R. Astron. Soc. 168 399
- [2] Jane MacGibbon, Phys. Rev. D., V44 #2
- [3] James R. Chisholm, Phys. Rev. D 74, 043512 (2006)
- [4] M. Y. Khlopov, in Recent Advances on the Physics of compact objects and Gravitational Waves.
- [5] B. J. Carr, in Inflating Horizons in Particle Astrophysics and Cosmology
- [6] K. Kohri and J. Yokoyama, Phys. Rev. D61, 023501 (2000), arXiv:astro-ph/9908160.
- [7] M. Kawasaki, K. Kohri, and T. Moroi, Phys. Rev. D71, 083502 (2005), arXiv:astro-ph/0408426.
- [8] M. Y. Khlopov and A. G. Polnarev, Phys. Lett. B97, 383 (1980).