

Безопасность будущих коллайдеров с энергией 100 ТэВ в контексте образования стабильных микроскопических чёрных дыр

Антон Соколов

научный руководитель: доктор физ.-мат. наук М.С.Пширков

Московский Государственный Университет

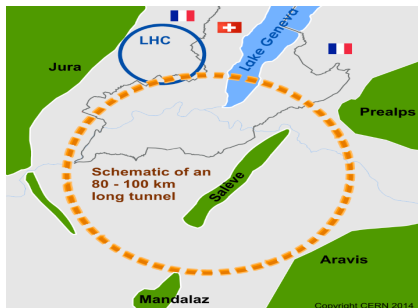
им. М. В. Ломоносова

Физический факультет

2 июня 2017

Планы

- HL-LHC (The High-Luminosity LHC) к 2025 году
Увеличение светимости в 10 раз
- FCC (The Future Circular Collider) к 2035 году. Повышение энергии столкновений до 100 ТэВ



Вопрос безопасности

LHC Safety Assessment Group

- Обзор: магнитные монополи, вакуумные пузыри, микроскопические чёрные дыры (J. Ellis, G. Giudice, M.L. Mangano, I. Tkachev, U. Wiedemann, 'Review of the Safety of LHC Collisions'; arXiv:0806.3414)
- Steven B. Giddings and Michelangelo L. Mangano, 'Astrophysical implications of hypothetical stable TeV-scale black holes' (arXiv:0806.3381)
- Идеи: космические лучи, плотные объекты

Микроскопические чёрные дыры

- Масса чёрной дыры

$$2M/M_{Pl}^2 = R_{Sch} \gtrsim 1/M \Rightarrow M_{min} \gtrsim M_{Pl}$$

- $M_{Pl} \simeq 10^{19}$ ГэВ, но в теориях с дополнительными измерениями можно достичь $M_D \sim 1$ ТэВ

- PDG:

$$M_D > 3.8 \text{ ТэВ}, \quad CL = 95\% \quad (pp \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-)$$

- Испарение: нет сохраняющихся квантовых чисел, запрещающих распад,

$$t_D \sim 1/M_D \sim 10^{-27} \text{ с}$$

Микроскопические чёрные дыры

- Излучение Хокинга (гипотетический процесс, не подходит для уверенного обоснования безопасности)
- Швингеровский механизм разрядки: независимо от излучения Хокинга \Rightarrow будем рассматривать нейтральные и заряженные ЧД

- Энтропия $S \gg 1$

$$S = \frac{R_{D-2} \Omega_{D-2}}{4G_D} = \left[\frac{2M}{(D-2)M_D} \right]^{(D-2)/(D-3)} \left[\frac{(2\pi)^{(2D-7)}}{\Omega_{D-2}} \right]^{1/(D-3)}$$

$$D = 6, \quad M = 5M_D : \quad S \simeq 24 \quad (1)$$

Дополнительные измерения

$$S = \frac{1}{8\pi G_D} \int d^D x \sqrt{-g} \cdot \frac{1}{2} R, \quad (2)$$

$$ds^2 = e^{2A(y)} dx^\mu dx_\mu + g_{mn}(y) dy^m dy^n. \quad (3)$$

Будем рассматривать теории с $D = 5 - 11$. Эксперимент:
 $R_D < 30 \mu\text{м}$ (PDG).

$$M_D \sim 10 \text{ТэВ} \Rightarrow R_5 \sim 10^7 \text{км} \quad (4)$$

Случай $D = 5$ возможен только при $\Delta A \gtrsim 16$.

Времена аккреции

Phases	Subatomic	Macroscopic		
		$a \lesssim R_B \lesssim R_D$	$R_D \lesssim R_B \lesssim R_C$	$R_B > R_C$
$D = 5,$ $\Delta A \sim f(M_5)$	$t \gtrsim 2.3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_5^3 \text{ s}$	$t \lesssim 3.6 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\lambda_6} m_5^3 \text{ s}$	$t > 3 \cdot 10^5 \text{ yr}$	$t \sim 3 \cdot 10^5 \text{ yr}$
$D = 6$	$t \gtrsim 4.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_6^4 \text{ s}$	$t = 5.5 \cdot 10^4 \frac{1}{\lambda_6} m_6^2 \text{ yr}$	$t = 2.4 \cdot 10^5 \frac{1}{\lambda_6} m_6^2 \text{ yr}$	$t = 9.7 \cdot 10^4 \frac{1}{\lambda_4} m_6^2 \text{ yr}$
$D = 7$	$t \gtrsim 3.0 \cdot 10^{11} \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_7^5 \text{ s}$	$t = 8.6 \cdot 10^8 \frac{1}{\lambda_7} m_7^{5/3} \text{ yr}$	$t = 9.1 \cdot 10^9 \frac{1}{\lambda_7} m_7^{5/3} \text{ yr}$	$t = 1.3 \cdot 10^{10} \frac{1}{\lambda_4} m_7^{5/3} \text{ yr}$
$D = 8$	$t \gtrsim 5.4 \cdot 10^6 \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_8^{-3/2} \text{ yr} + t'$	$t = 1.2 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1}{\lambda_4} \text{ yr} \quad (a < R_B < 2a)$		
$D = 9$	$t \gtrsim 2.0 \cdot 10^4 \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_9^{-7/5} \text{ yr} + t'$			
$D = 10$	$t \gtrsim 2.2 \cdot 10^2 \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_{10}^{-4/3} \text{ yr} + t'$			
$D = 11$	$t \gtrsim 4.8 \cdot \frac{T_4^2}{\chi} m_{11}^{-9/7} \text{ yr} + t'$			

$f(M_5) = 19 - 1.5 \ln m_5$, $t' = 3.1 \cdot 10^{11} \cdot \frac{T_4^2}{\chi} \text{ yr}$, $m_D = M_D/M_0$, $M_0 = 1 \text{ TeV}$, $T_4 = T_{\text{Deb}}/400 \text{ K}$, $a = 1 \text{ \AA}$,

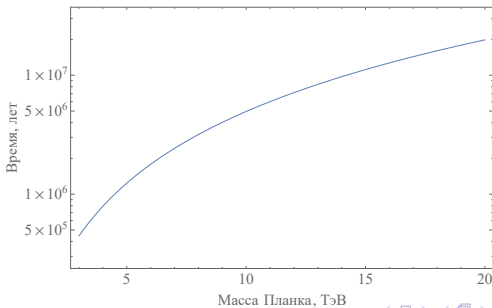
$\chi \simeq 1$, $4 \leq \lambda_4 < 18$, $3 < \lambda_D < 6.6$, ΔA - warp factor

Время аккреции для $D = 6$

В теориях с $D = 5$ малые (меньше времени жизни СС) времена аккреции достигаются лишь при:

$$19 - 1.5 \ln \frac{M_5}{M_0} < \Delta A < 24 - 1.5 \ln \frac{M_5}{M_0}. \quad (5)$$

Случай $D = 6$:



Сечение

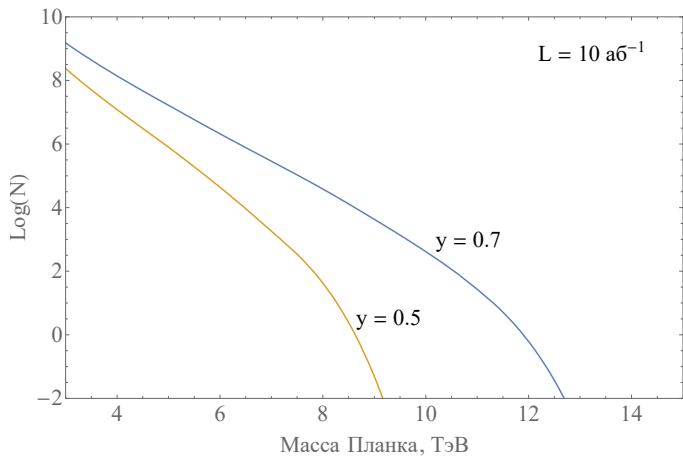
По теореме факторизации:

$$\sigma_{BH}(M > M_{min}) = \sum_{ij} \int_{\tau_{min}}^1 d\tau \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} f_i(x) f_j(\tau/x) \sigma'(\sqrt{s'}), \quad (6)$$

где $f_i(x)$ – партонные функции распределения (CT14qed, масштаб ~ 10 ТэВ), $\tau_{min} = \frac{M_{min}^2}{y^2 s}$, $M_{min} = 5M_D$, $\tau = x_1 x_2$, $s' = s \cdot \tau$, $y \sim 0.5 - 0.7$ – параметр неупругости.

$$\sigma'(\sqrt{s'}) = \pi R^2(\sqrt{\tau s})/4, \quad R(\sqrt{\tau s}) = \frac{1}{M_6} \cdot \left(\frac{3\sqrt{\tau s}}{4M_6} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Число чёрных дыр



Расчёт фактора подавления

Большинство образовавшихся ЧД будут иметь огромные скорости и благополучно покинут Землю. Рассчитаем долю оставшихся ЧД.

Используем партонные функции TMDPDF из библиотеки `tmdl-lib-1.0.7` для учёта поперечной составляющей импульса.

$$\sigma_{ВН}(M, p, k) = \frac{1}{2\pi} \sum_{ij} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_{R(p,k,\alpha)} dk_1 dk_2 dx_1 dx_2 \cdot g_i(x_1, k_1) g_j(x_2, k_2) \sigma(x_1, x_2), \quad (8)$$

$$R(p, k, \alpha) = \left\{ \frac{M}{\sqrt{s}} \leq x_1, x_2 \leq 1, \frac{\sqrt{s}}{2} |x_1 - x_2| \leq p, \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + 2k_1 k_2 \cos \alpha} \leq k \right\}. \quad (9)$$

Расчёт фактора подавления

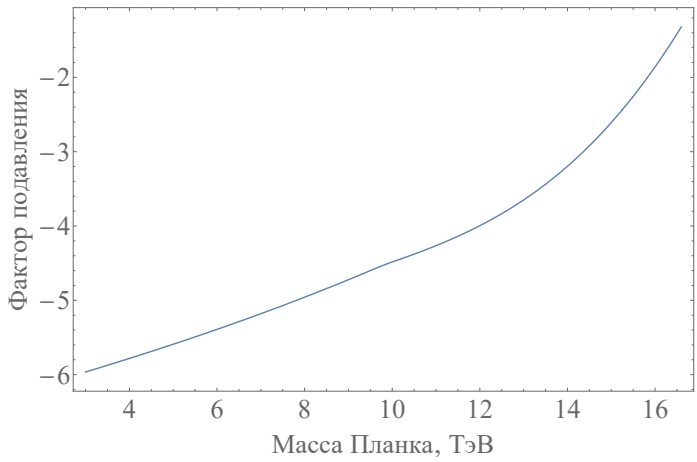
$$v_{max} = 11.2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l}{d} \left(\frac{M_0}{M_6} \right)^{8/3} \left(\frac{M_0}{M} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

$$v < v_{max} \Rightarrow p^2 + k^2 < 11.2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{M_0}{M_6} \right)^{8/3} \left(\frac{M_0}{M} \right)^{1/3} kM \cos \phi. \quad (11)$$

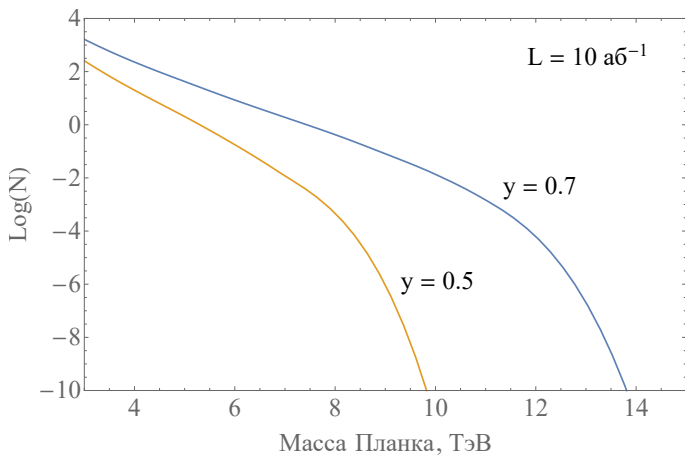
Тогда фактор подавления определяется выражением:

$$s(M_6) = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}(M_6)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi \int_{D(M_6, \phi)} \left| \frac{d^3\sigma_{BH}(M_6)}{dpdkdM} \right| dpdkdM. \quad (12)$$

Фактор подавления



Число оставшихся чёрных дыр



Захват чёрных дыр плотными объектами

Колоночная плотность, необходимая для захвата:

$$\delta_{min} = 0.27 \cdot \left(\frac{M_6}{M_0}\right)^3 \left(\frac{\gamma_i M}{M_6}\right)^{1/3} M_0^3, \quad \gamma_i M = \chi E / A. \quad (13)$$

Условие захвата:

$$\delta > \delta_{min} \Rightarrow \chi E < \left(\frac{\delta}{0.27 M_0^3}\right)^3 \left(\frac{M_0}{M_6}\right)^9 \cdot M_6 \cdot \frac{A}{y}. \quad (14)$$

НЗ запросто сможет остановить для любых допустимых χE :

$\delta \sim \rho \cdot d \sim 10^{20} \text{ г/см}^2$. Для белого карлика необходим учёт условия (15): $\delta_{WD} = 3.8 \cdot 10^{16} \text{ г/см}^2$.

Микро чёрные дыры во Вселенной

- Столкновения КЛ с поверхностью звезды
- НЗ, магнитное поле замедляет КЛ: $E_{max} \sim 10^{17}$ эВ
- Столкновения КЛ с барионами за период $z = 0 - 1$.
- Столкновения КЛ с двойными системами (FCE = $3 \cdot 10^7$ лет), хб.5, систематика
- Столкновения КЛ с газом в галактике, /4.6
- Столкновения КЛ с CMZ, но там нет старых пульсаров.

Расчёт потока чёрных дыр

$$\phi_{BH} = b \int_{E_{min}}^{E_{max}} A(E) J(E) dE \sum_{ij} \int_{\tau_{min}}^1 d\tau \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} f_i(x) f_j(\tau/x) \sigma'(\sqrt{s'}), \quad (15)$$

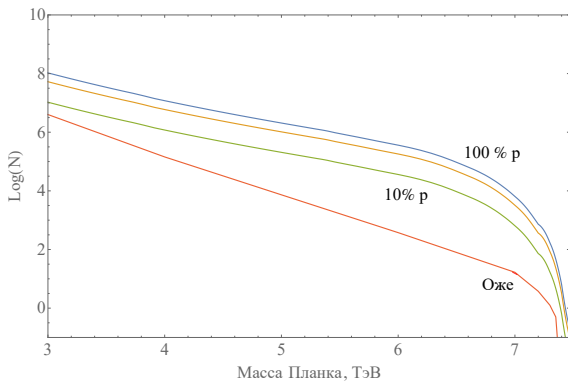
где

$$\tau_{min} = \frac{25 M_6^2 A}{2 m_p y^2 E},$$

$y = \max[0.5, 5 M_6 / 100 \text{ТэВ}]$, b – параметр, зависящий от способа образования ЧД

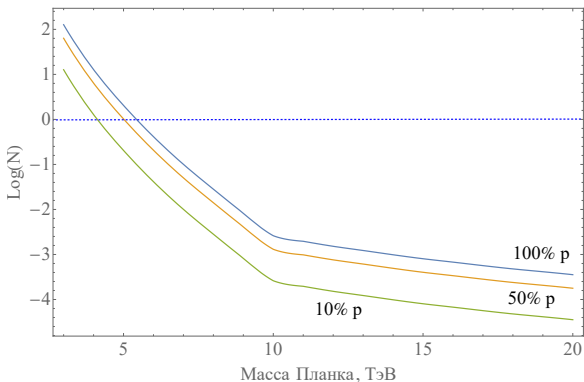
Количество чёрных дыр, застрявших в БК

Возьмём БК с радиусом 5600 км и временем жизни 1 млрд лет: $M_6 > 7.31\text{ТэВ}$

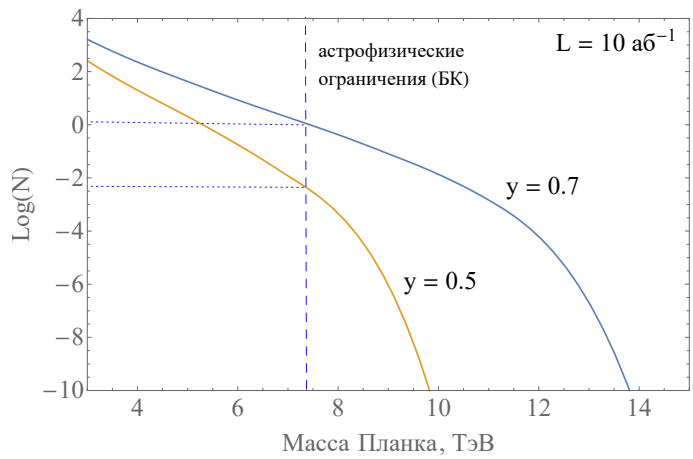


Количество чёрных дыр, застрявших в НЗ

Возьмём НЗ с радиусом 10 км и временем жизни 10 млрд лет:
 $M_6 > 5.43 \text{ ТэВ}$ (100% р до предела ГЗК)



Число оставшихся чёрных дыр



Заключение

Образование ЧД, которые могли бы аккретировать Землю за время, меньшее жизни Солнечной системы, невозможно во всех теориях, кроме теорий с 5 и 6 пространственными измерениями, в которых подобное требует очень жёсткого подбора параметров (нет излучения Хокинга, но есть Швингеровская разрядка, $M_D = 7 - 10$ ТэВ, ограничения на ΔA). Для улучшения оценок необходимо:

- Изучить состав космических лучей, найти старые пульсары в CMZ
- Искать ограничения на M_6
- Исследовать нейтрино высоких энергий
- Исследовать излучение Хокинга
- ... (например, ограничения из ранней Вселенной)

Спасибо за внимание!

Аккреция

Общее уравнение аккреции:

$$\frac{dM}{dt} = \pi r_c^2 F = \pi r_c^2 \rho v, \quad (16)$$

для свободной частицы $r_c \approx R/v$. Три фазы:

- $r_c < r_N = 1$ фм, незначительна:
 $R_{EM}(M \sim M_D, D = 6) \sim 10^{-12}$ см
- $r_N < r_c < a \sim 1$ Å, $r_c \equiv R_{EM}$
- $r_c > a$, $r_c \equiv R_B$, аккреция Бонди

При $D=4$: очень медленная аккреция \Rightarrow важны переходы при
 $r_c = R_D \div R_C$.

Поглотит ли?

На НЗ нет фазы субатомной аккреции, $t_{micro} = 6 \cdot 10^{-3}$ с.

Для макроскопической аккреции: $t \propto c_s/\rho$, поэтому

$$t_{WD} = 5 \cdot 10^{-5} t_{Earth}, \quad t_{NS} = 1.8 \cdot 10^{-10} t_{Earth}.$$

Тогда

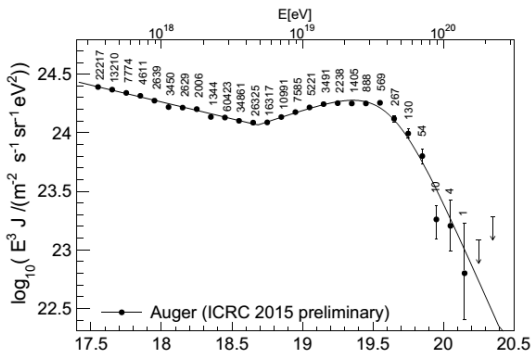
$$t_{NS} \simeq 4 \cdot 10^{-3} \text{ лет} \simeq 1.5 \text{ дня}, \quad (17)$$

$$t_{WD} = 10^2 \cdot (M_6/M_0)^2 \text{ лет} < 4 \cdot 10^4 \text{ лет} \quad (18)$$

Нейтронная звезда и белый карлик будут поглощены при попадании очень быстро!

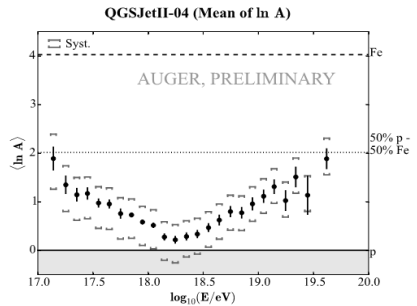
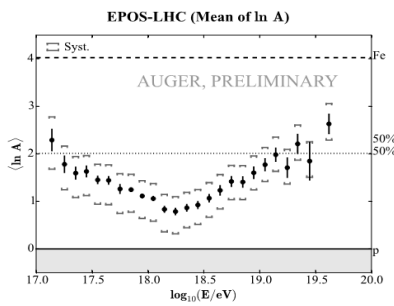
Спектр КЛ

$$J(E) = J_0 \left(\frac{E}{E_{Ankle}} \right)^{-\gamma_2} \left[1 + \left(\frac{E_{Ankle}}{E_s} \right)^{\Delta\gamma} \right] \left[1 + \left(\frac{E}{E_s} \right)^{\Delta\gamma} \right]^{-1} \quad (19)$$



Состав

Нужно учесть состав КЛ $A(E)$



Ограничение из нейтрино

