



Сектор
теоретической
астрофизики

Физико-технический
институт
им. А.Ф. Иоффе



Излучение чёрных дыр и способы его наблюдения

Лысый Ю.А., Кислицын П.А., Иванчик А.В.

*pavel.kislitsyn@gmail.com
github.com/fePavel/black_holes

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 06-02-2025



Излучение Хокинга

Квази-чернотельное

greybody factors

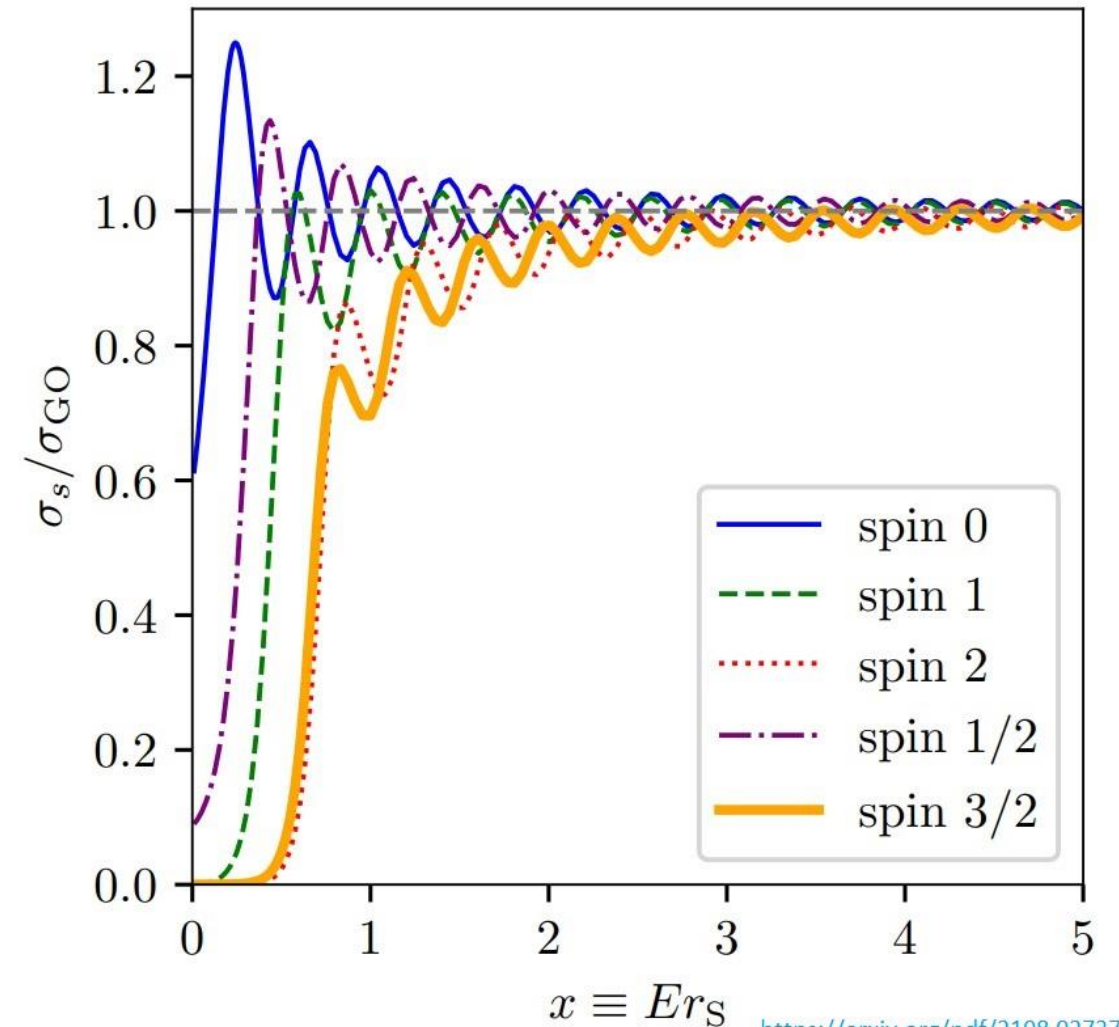
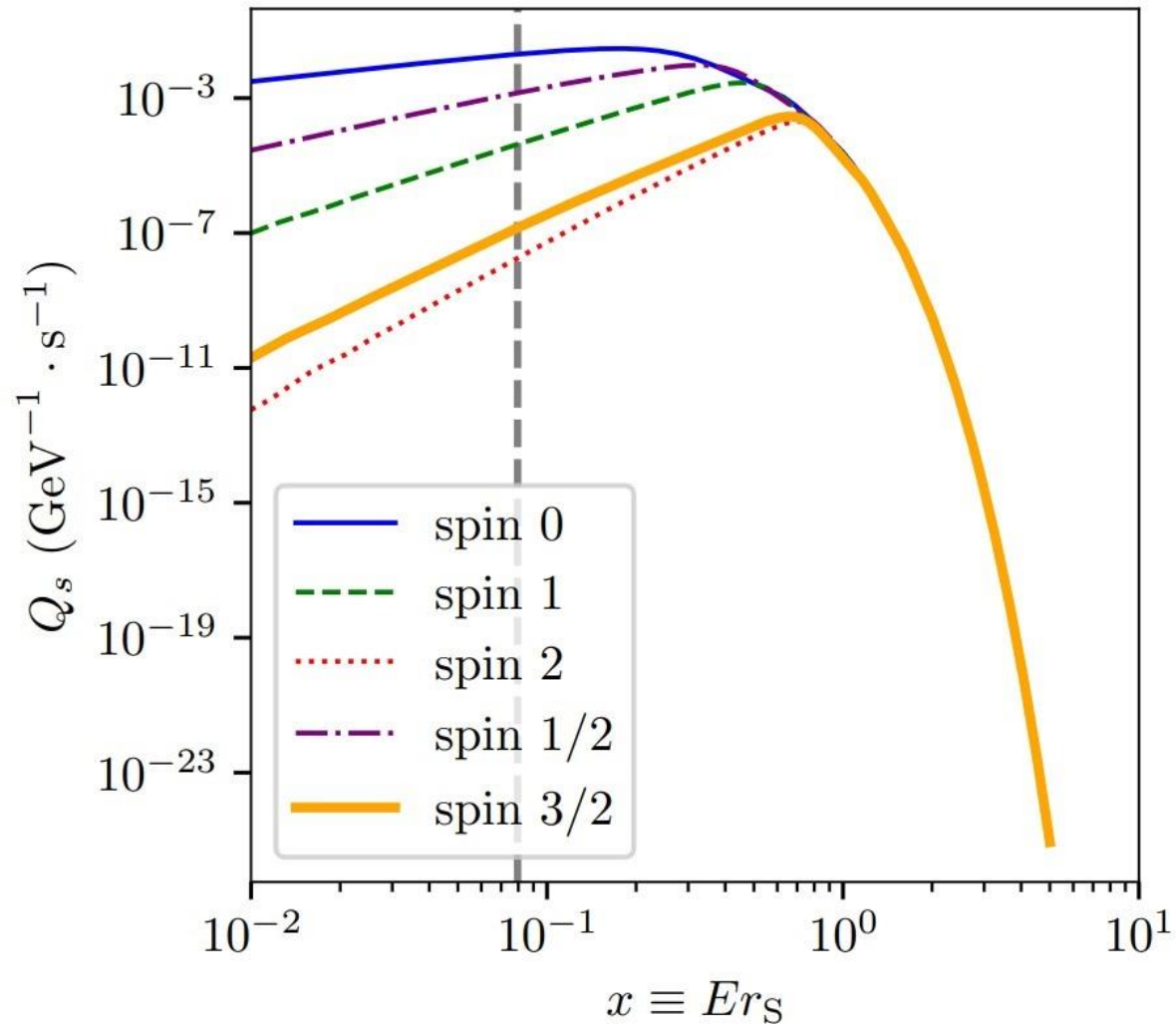
$$\frac{d^2 N_i}{dt dE} = \frac{\Gamma(E, m_i, s_i)}{e^{\frac{E}{kT}} \pm 1}$$

Temperature

Температура

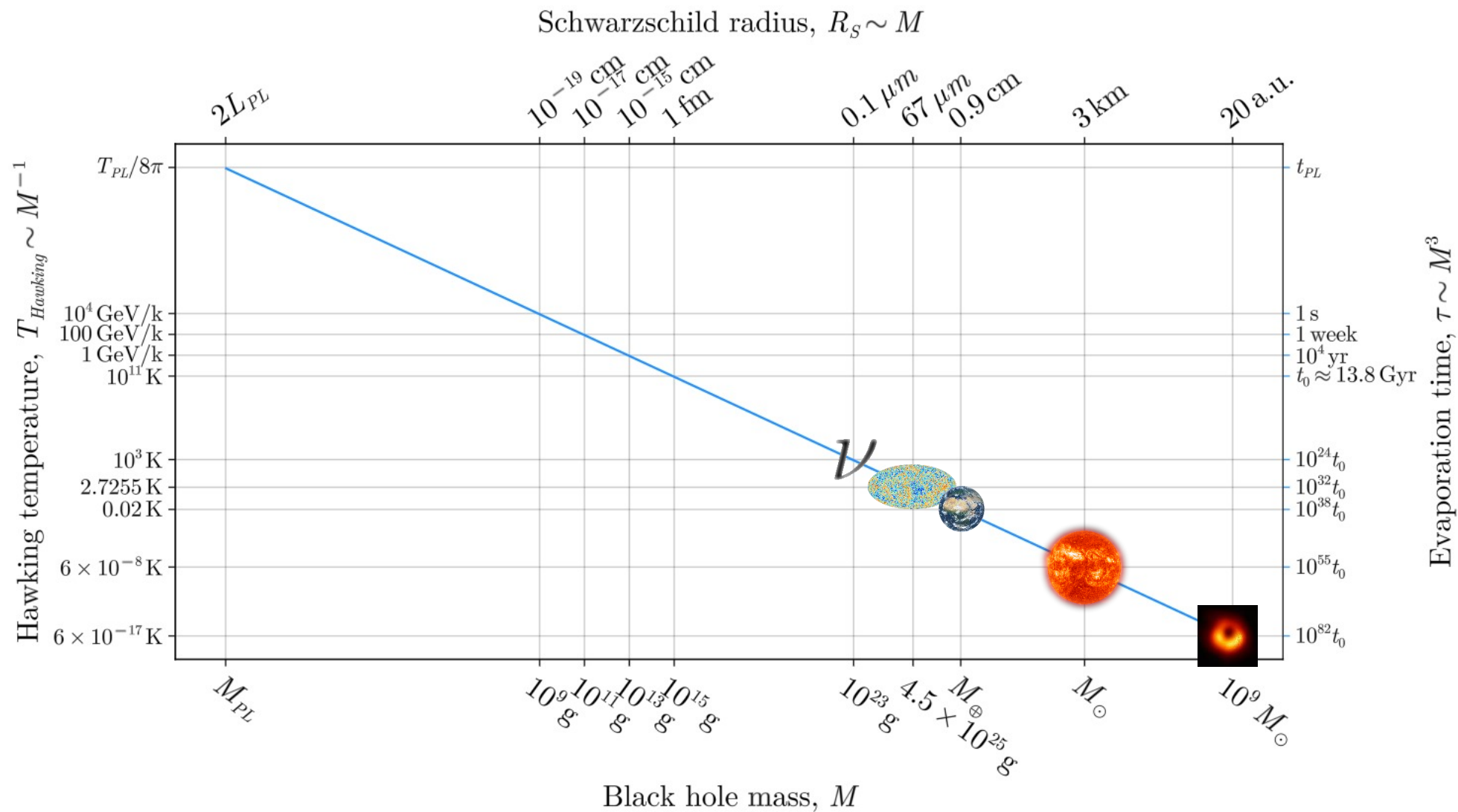
$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M_{\text{BH}}} \approx 6.2 \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{M_{\text{BH}}} \text{ K}$$

Grey-body factors



<https://arxiv.org/pdf/2108.02737>

Излучение Хокинга



Излучение Хокинга

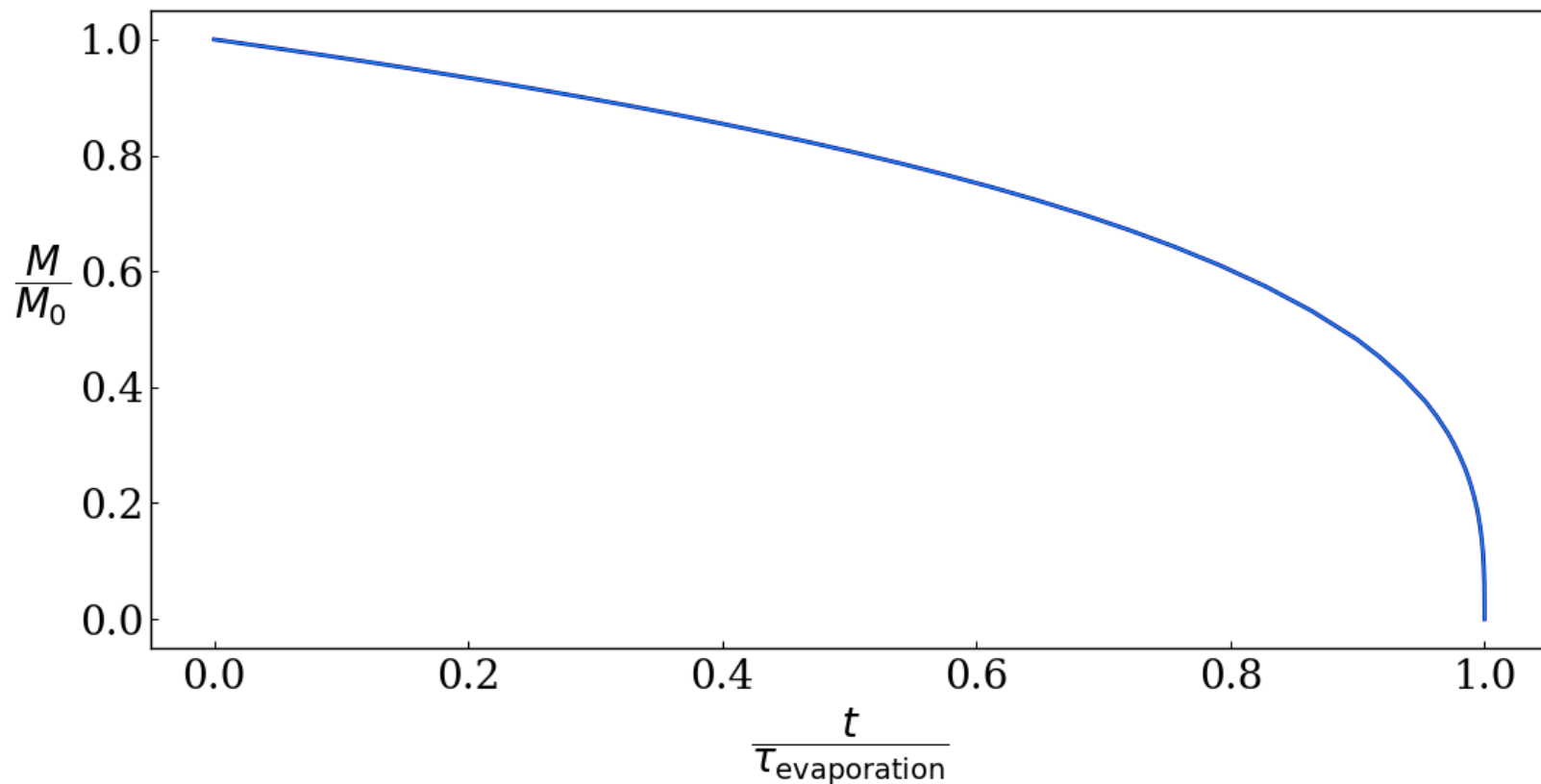
Масса	Радиус Шварцшильда	Температура	Время испарения ¹
$10^9 M_{\odot}$	20 а.е.	6×10^{-17} К	$\sim 10^{82} t_0$
$4 \times 10^6 M_{\odot}$	0.08 а.е	1×10^{-14} К	$\sim 10^{75} t_0$
M_{\odot}	3 км	6×10^{-8} К	$\sim 10^{55} t_0$
$M_{\oplus} \approx 6 \times 10^{27}$ г	0.9 см	0.02 К	$\sim 10^{38} t_0$
4.5×10^{25} г †	67 мкр	2.7255 К (T_{CMB}^0)	$\sim 10^{32} t_0$
10^{23} г	0.1 мкм	1×10^3 К	$\sim 10^{24} t_0$
2×10^{16} г ††	20 фм	5×10^9 К	$\sim 10^4 t_0$
10^{15} г	1 фм	1×10^{11} К	$\sim t_0$
10^{13} г	1×10^{-15} см	1 GeV/k	$\sim 10^4$ лет
10^{11} г	1×10^{-17} см	100 GeV/k	~ 1 нед
10^9 г	1×10^{-19} см	10^4 GeV/k	~ 1 сек
$*M_{\text{Pl}} \sim 10^{-5}$ г	$*2l_{\text{Pl}} \sim 10^{-33}$ см	$*T_{\text{Pl}}/8\pi \sim 10^{19}$ GeV/k	$**[t_{\text{Pl}} \div \infty]$

Испарение черных дыр

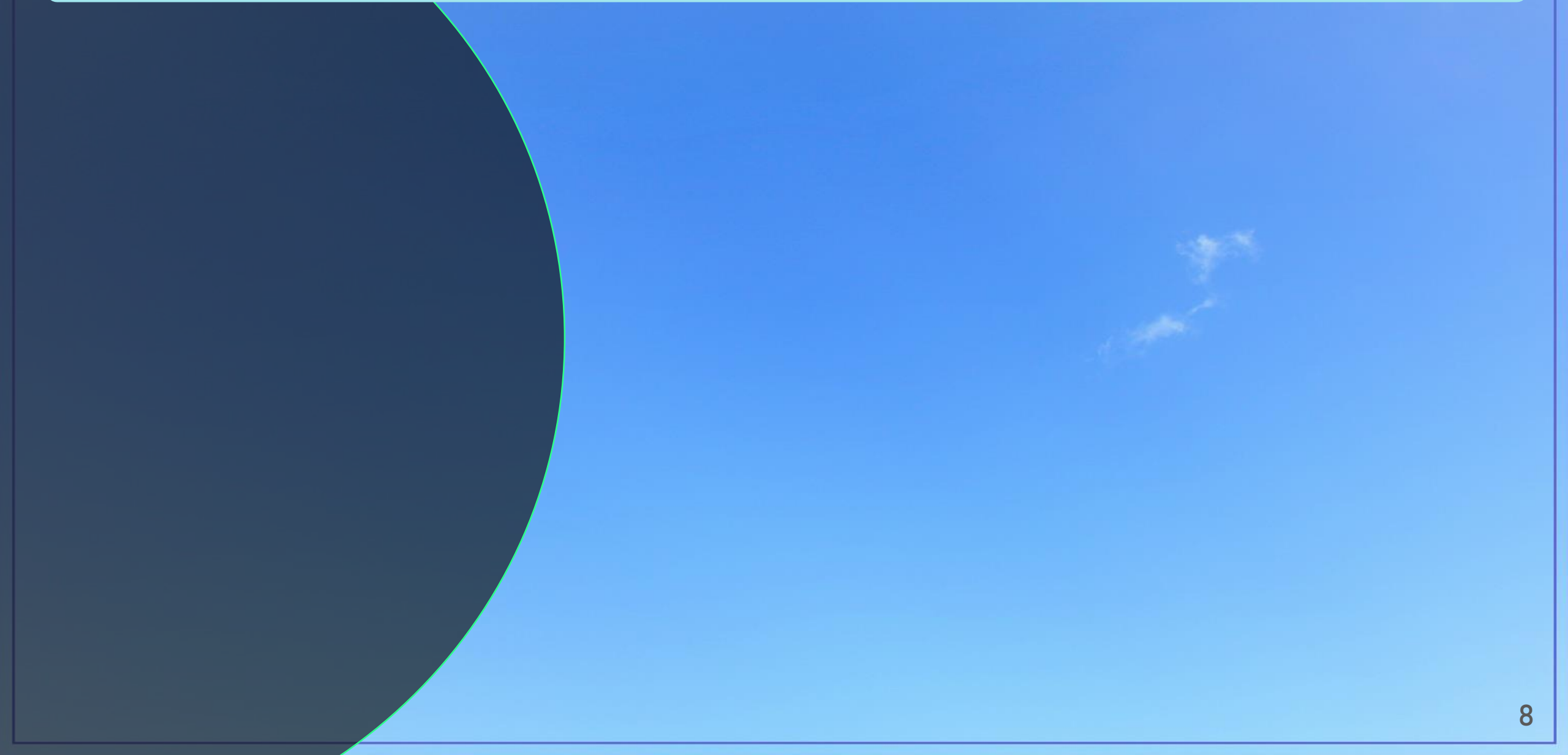
$$\frac{dM}{dt} = -\frac{1}{M^\alpha}, \quad \alpha \neq -1$$



$$\frac{M}{M_0} \left(\frac{t}{\tau} \right) - \text{не зависит от } M_0$$



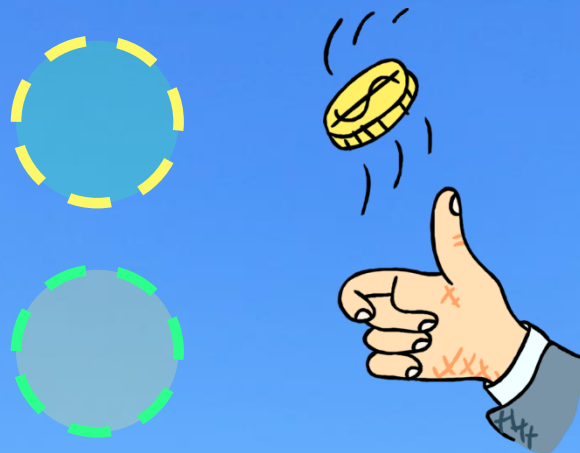
Популярное объяснение излучения Хокинга



Популярное объяснение излучения Хокинга



Популярное объяснение излучения Хокинга



Популярное объяснение излучения Хокинга



Поглощение частицы черной дырой

Излучение Хокинга – квантовый эффект!



Поглощение частицы черной дырой



Поглощение частицы черной дырой



Поглощение частицы черной дырой



Поглощение частицы черной дырой



Поглощение частицы черной дырой

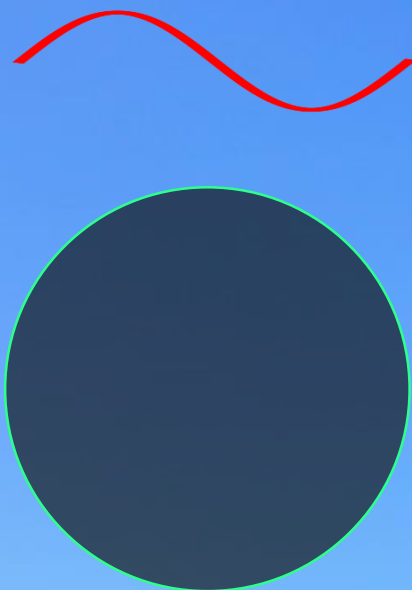


Излучение Хокинга

Длина волны
Комптона

$$\lambda_c \sim R_G$$

Радиус
Шварцшильда



\Rightarrow



Эквивалентное условие

$$\lambda_c \sim R_G$$

\Leftrightarrow

$$kT \sim mc^2$$

Какие частицы рождаются?



$M \approx 10^{23} \text{ g}$



$M = M_{\text{sun}}$

Какие частицы рождаются?

Только фотоны



$M \approx 10^{23} \text{ g}$



$M = M_{\text{sun}}$

Какие частицы рождаются?

Только фотоны

Начинают рождаться нейтрино

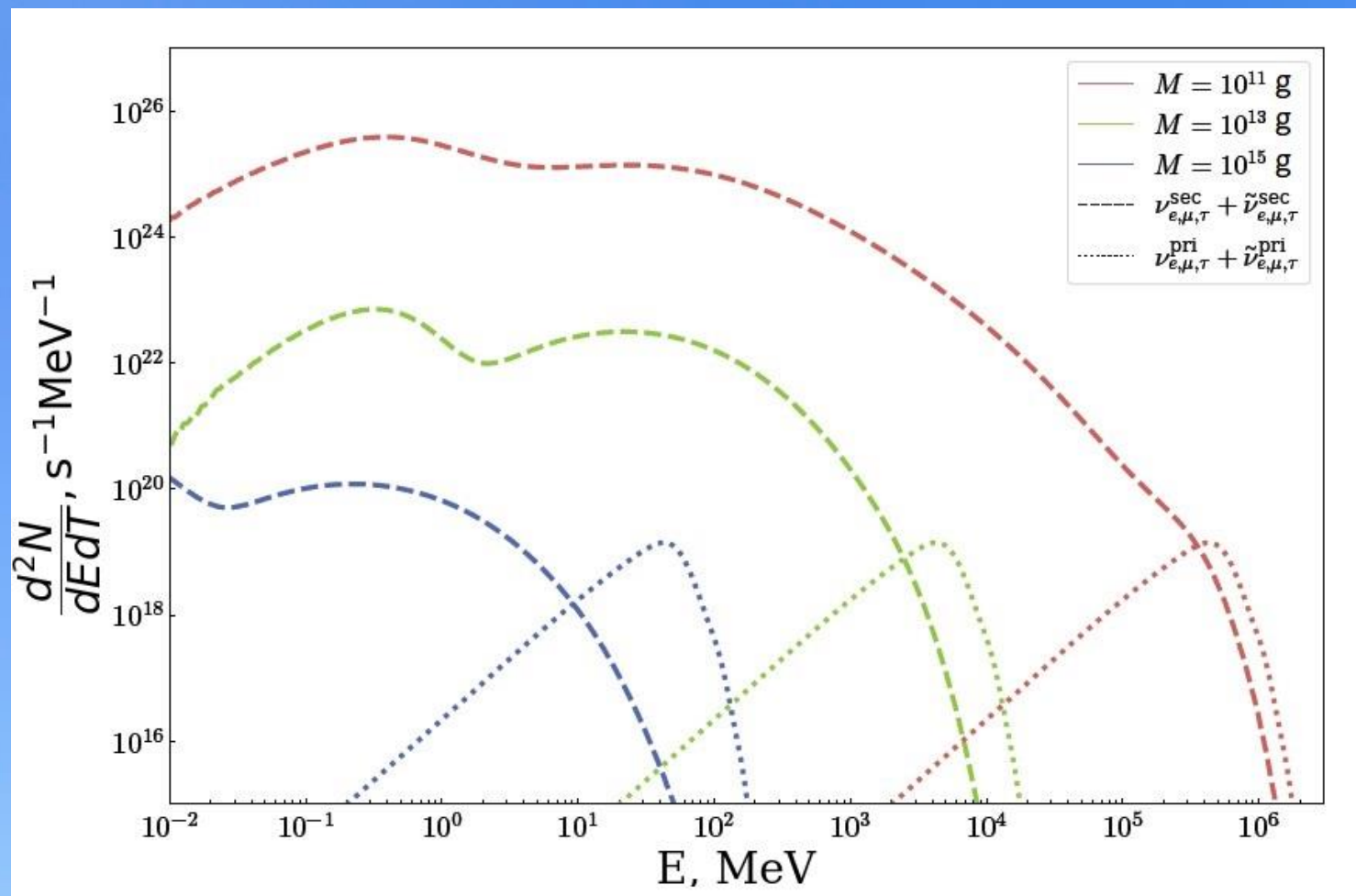


$$M \approx 10^{23} \text{ g}$$



$$M = M_{\text{sun}}$$

Вторичное излучение



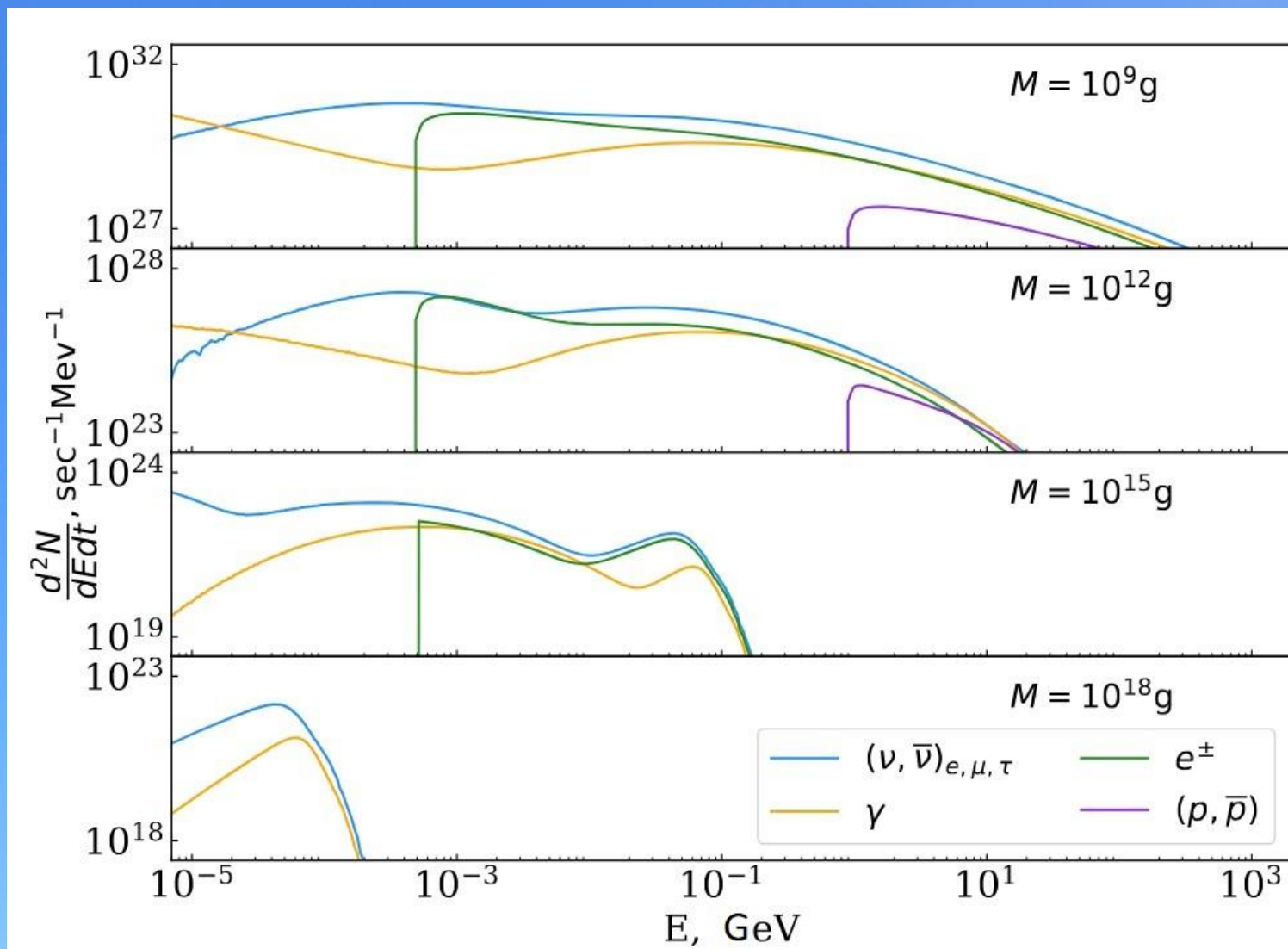
credit: Yu. Lysy

$$\frac{d^2 N_i^{\text{pri}}}{dt dE} + \frac{d^2 N_j^{\text{sec}}}{dt dE}$$

↑
адронизация
+
распад тяжелых
лептонов и
калибровочных
бозонов

Спектры излучения различных частиц

Нейтрино
всегда
больше



Поток нейтрино с учетом расширения Вселенной

Концентрация
первичных
черных дыр

Излучение
Хокинга
(первичное + вторичное)

$$\frac{d\Phi}{dE_\nu}(E_\nu) = \frac{c}{4\pi} n_{\text{PBH}0} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt (1+z) \frac{d^2 N}{dt dE_\nu}(t, E_\nu(1+z))$$

Учет всего
времени
испарения
черной дыры

Эволюция
сигнала

Код Blackhawk¹ позволяет рассчитывать спектры

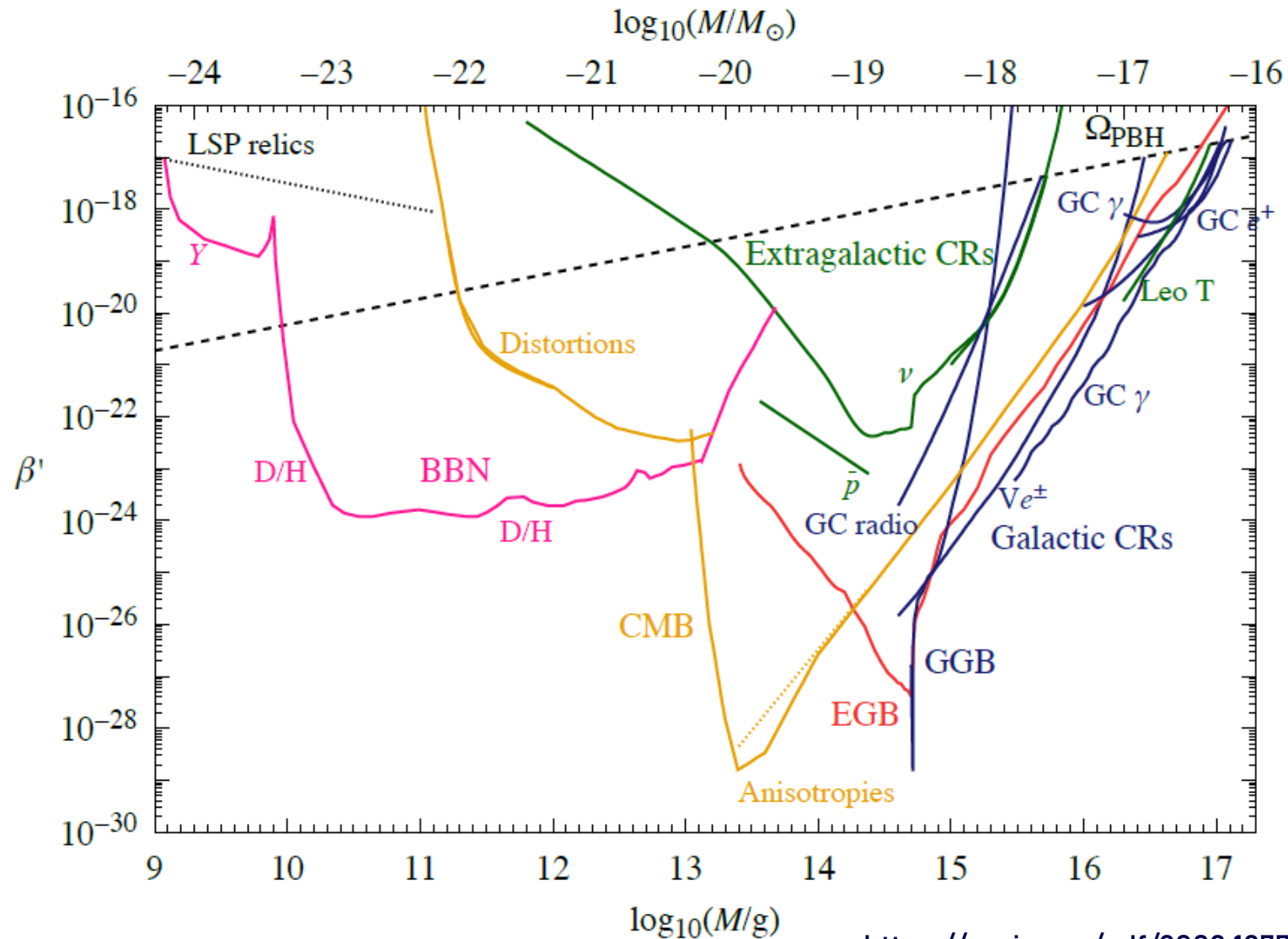
[illegible]

Различные спектры масс

Первичное и вторичное излучения

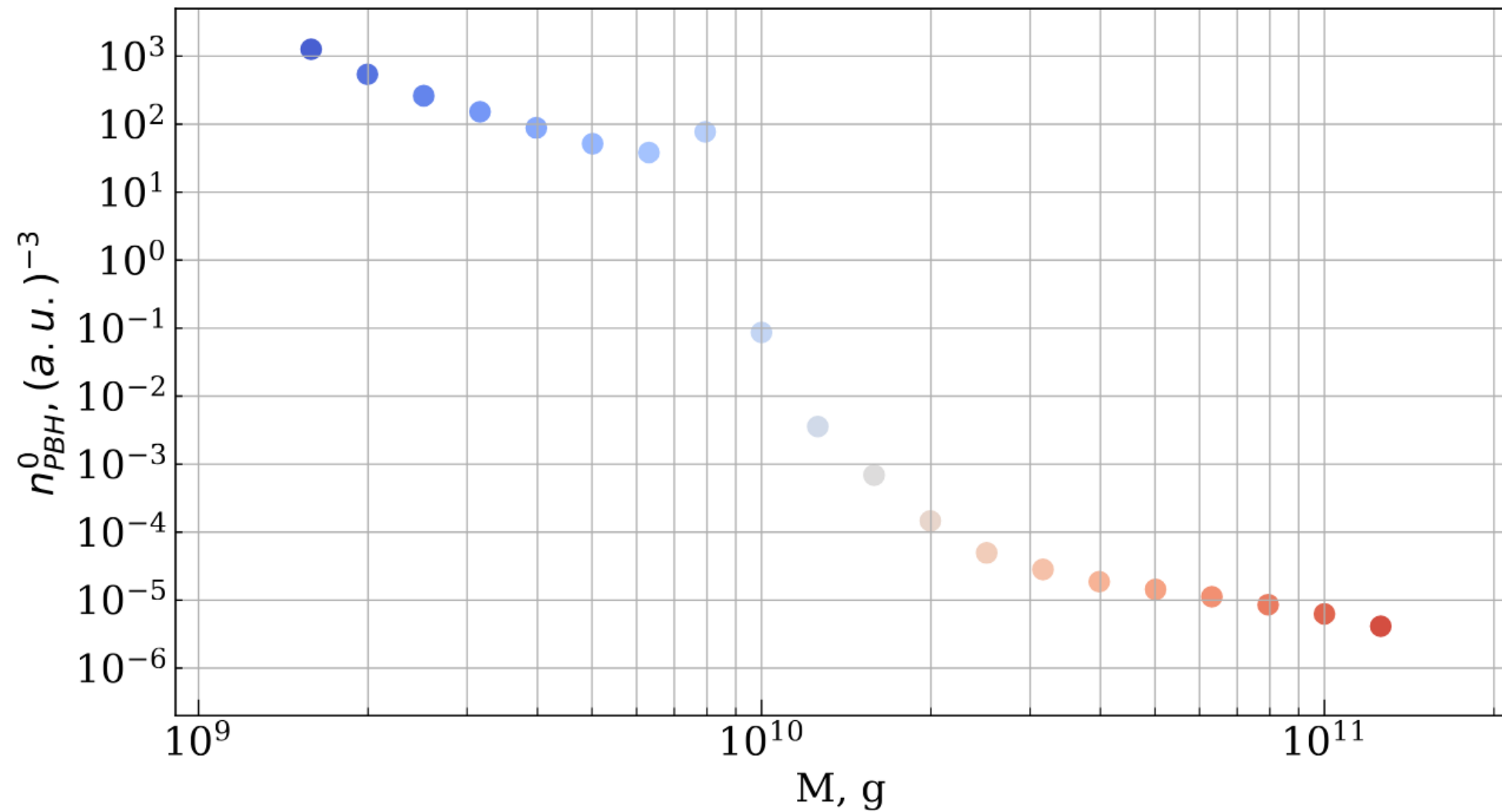
Эволюция и суммирование спектра

$n_{\text{PBH}0}$ constraints

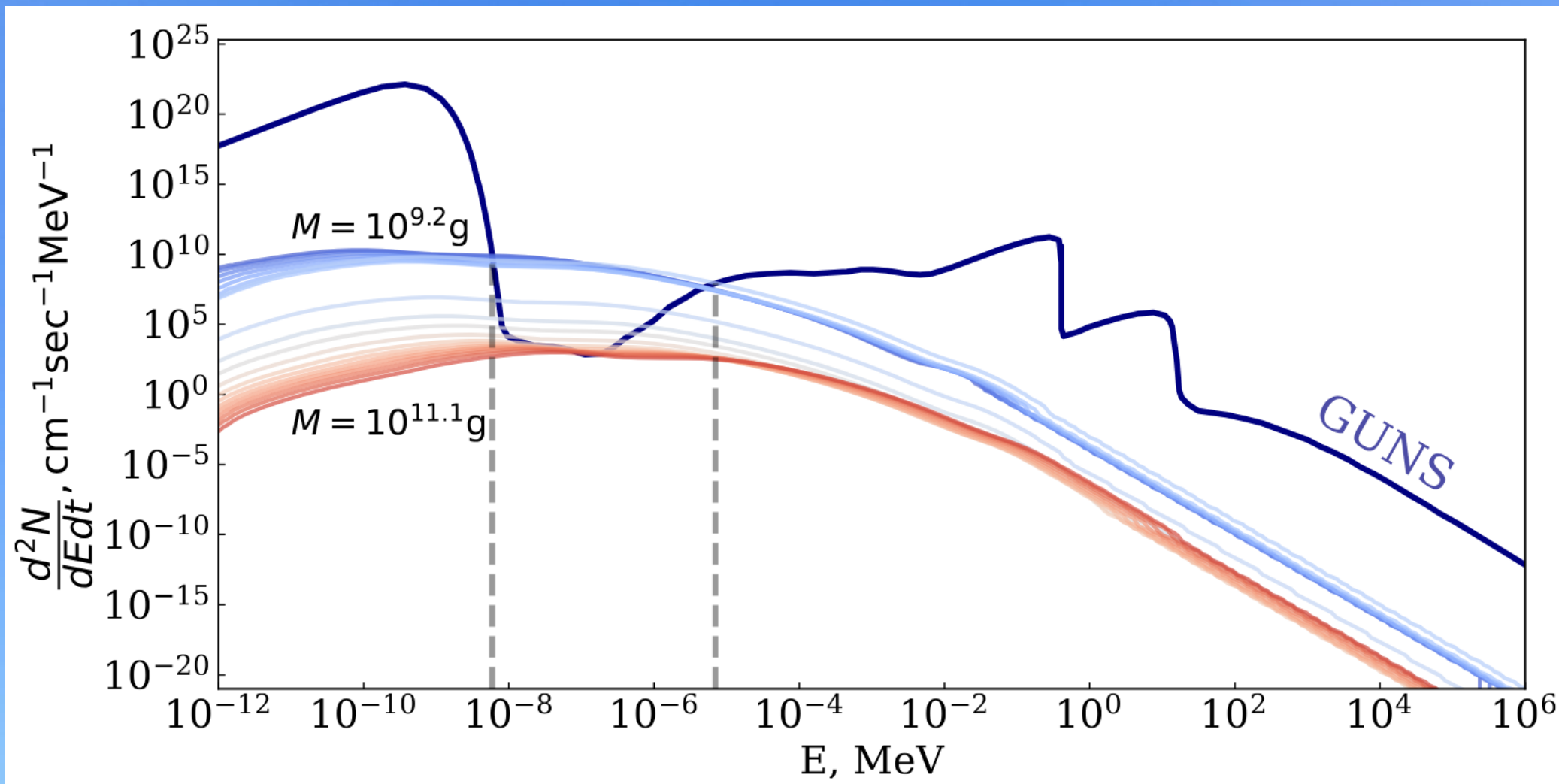


<https://arxiv.org/pdf/2002.12778>

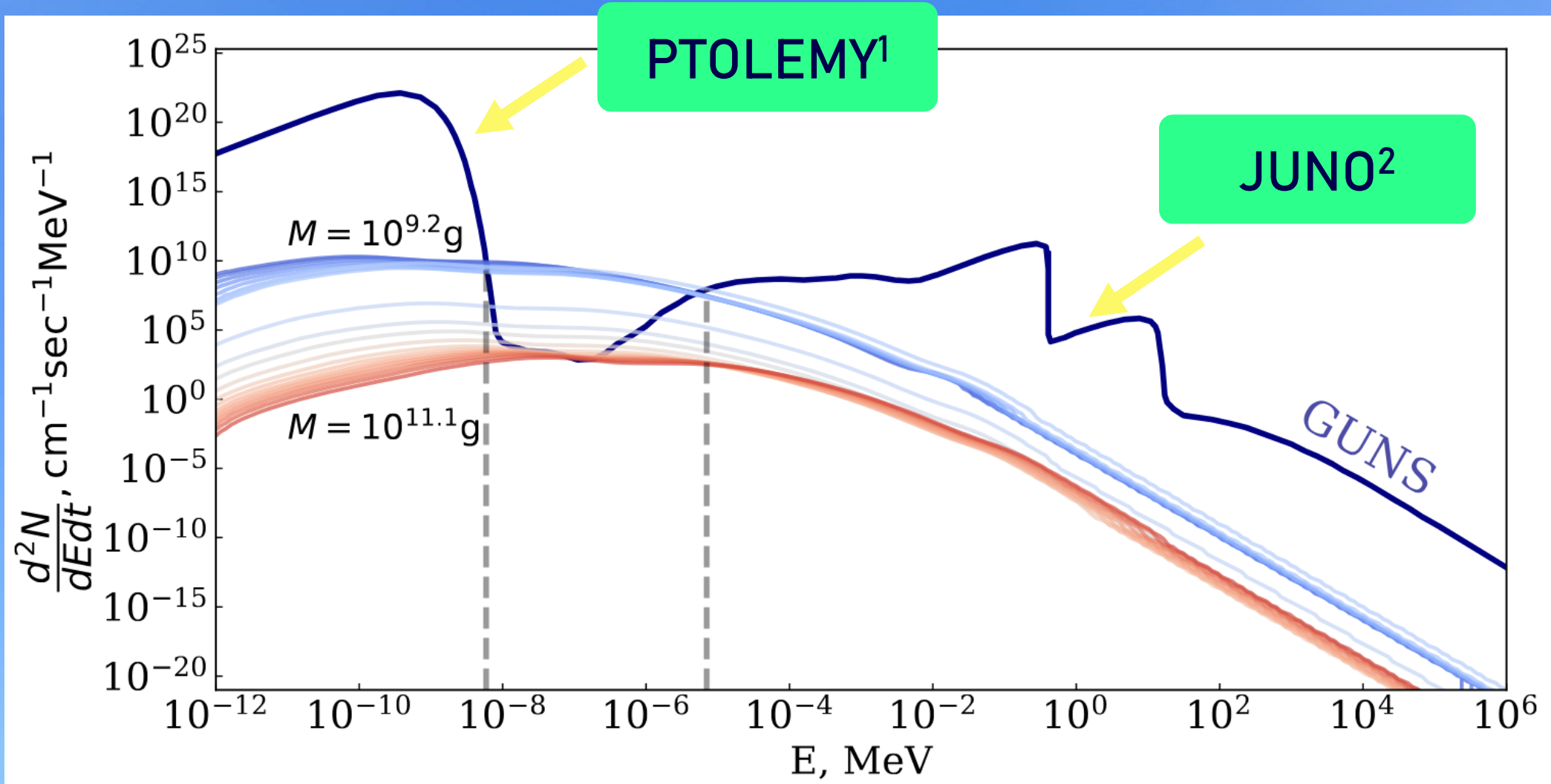
$n_{\text{PBH}0}$ constraints



Полный поток нейтрино



Будущие эксперименты



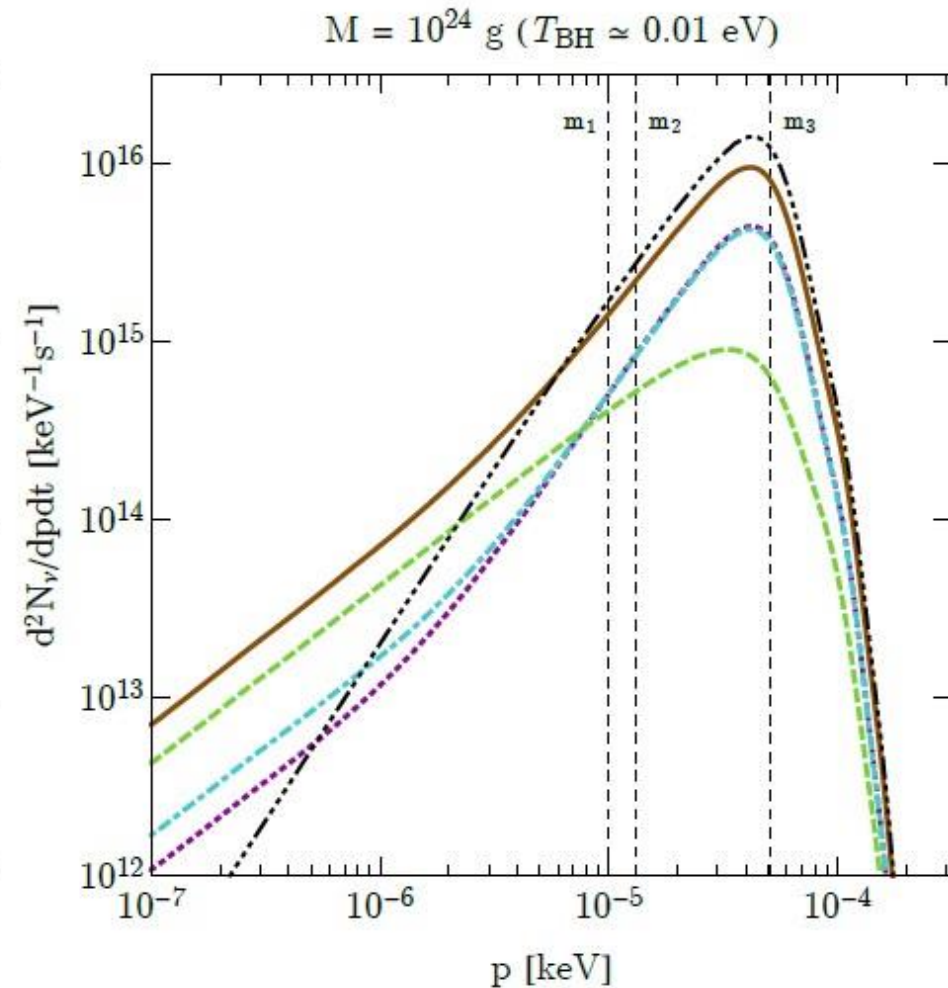
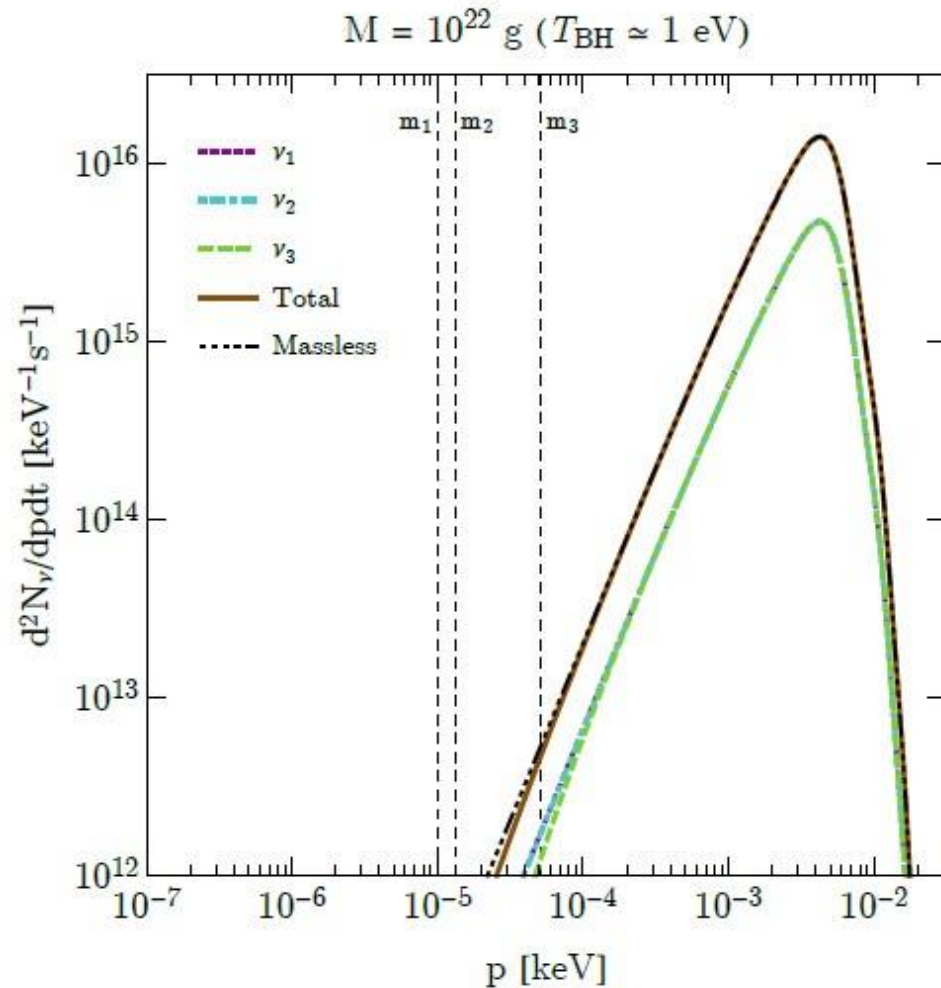
¹ -<https://arxiv.org/abs/1902.05508>

² -<https://arxiv.org/abs/1507.05613>

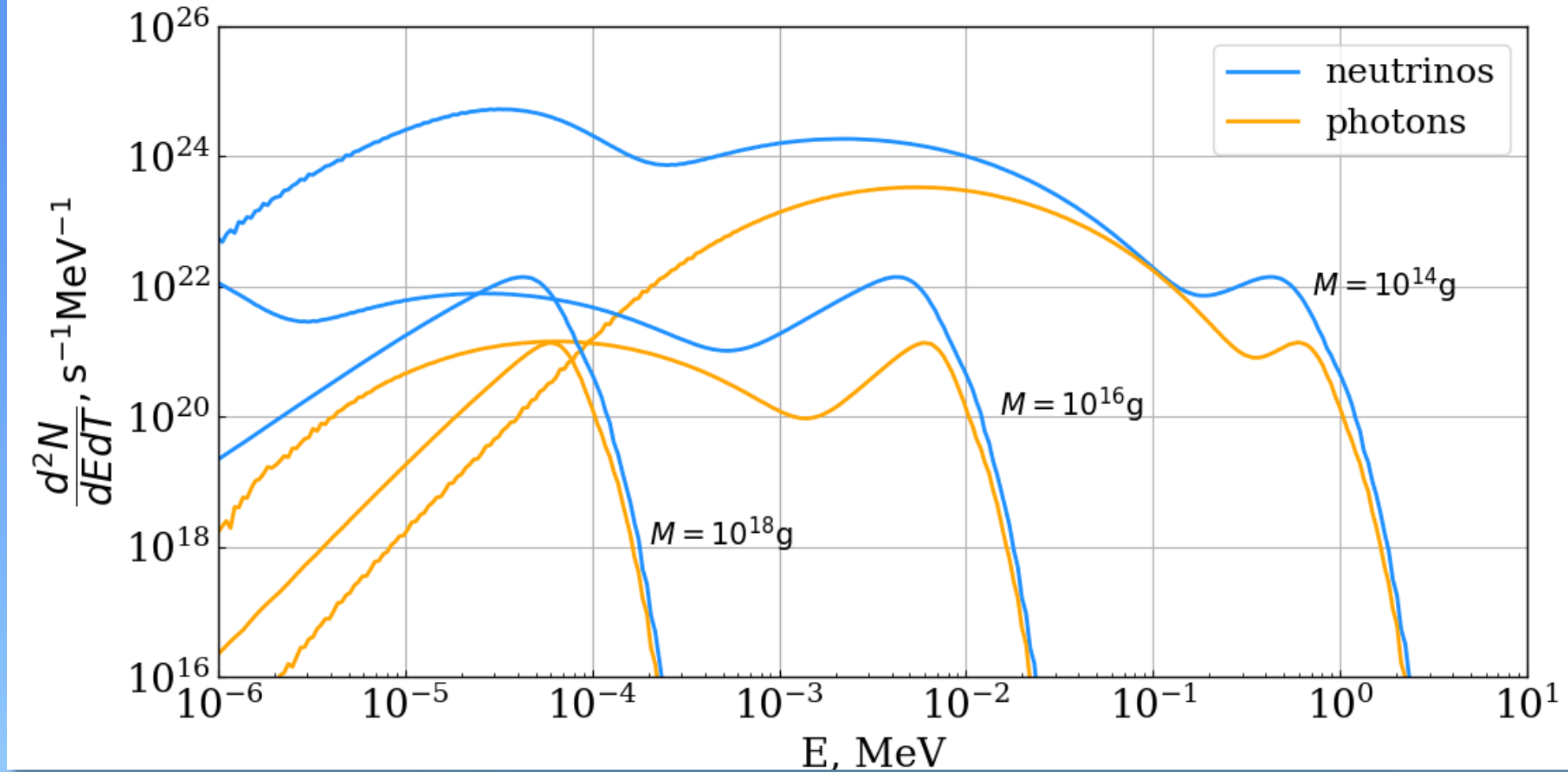
Спасибо за внимание!

`*pavel.kislitsyn@gmail.com`
`github.com/fePavel/black_holes`

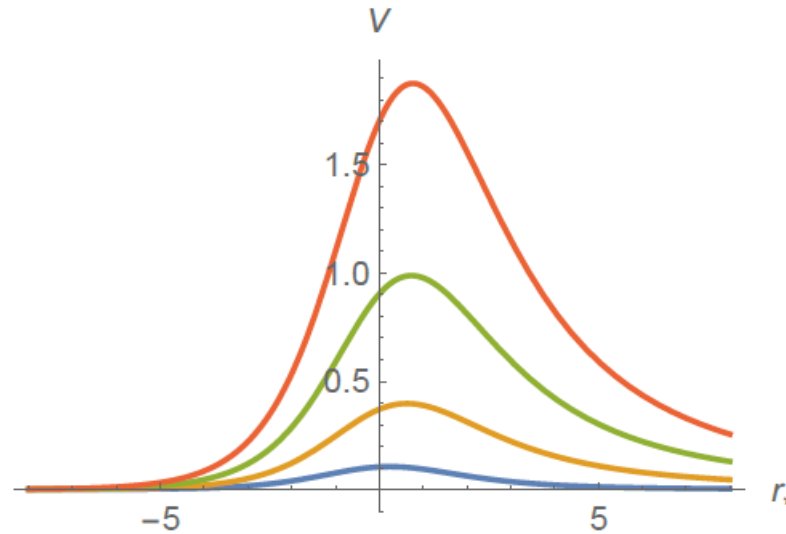
Нерелятивистские нейтрино



Neutrino and photon instantaneous spectra



Potential for escaping



$$r^* = r + \ln(r-1)$$

Figure 10. Plots of V as a function of r_* , for $\ell = \{0, 1, 2, 3\}$.

with

$$V(r) = \frac{r-1}{r^3} \left(m^2 r^2 + \ell(\ell+1) + \frac{1}{r} \right). \quad (4.11)$$

Components of the background

