

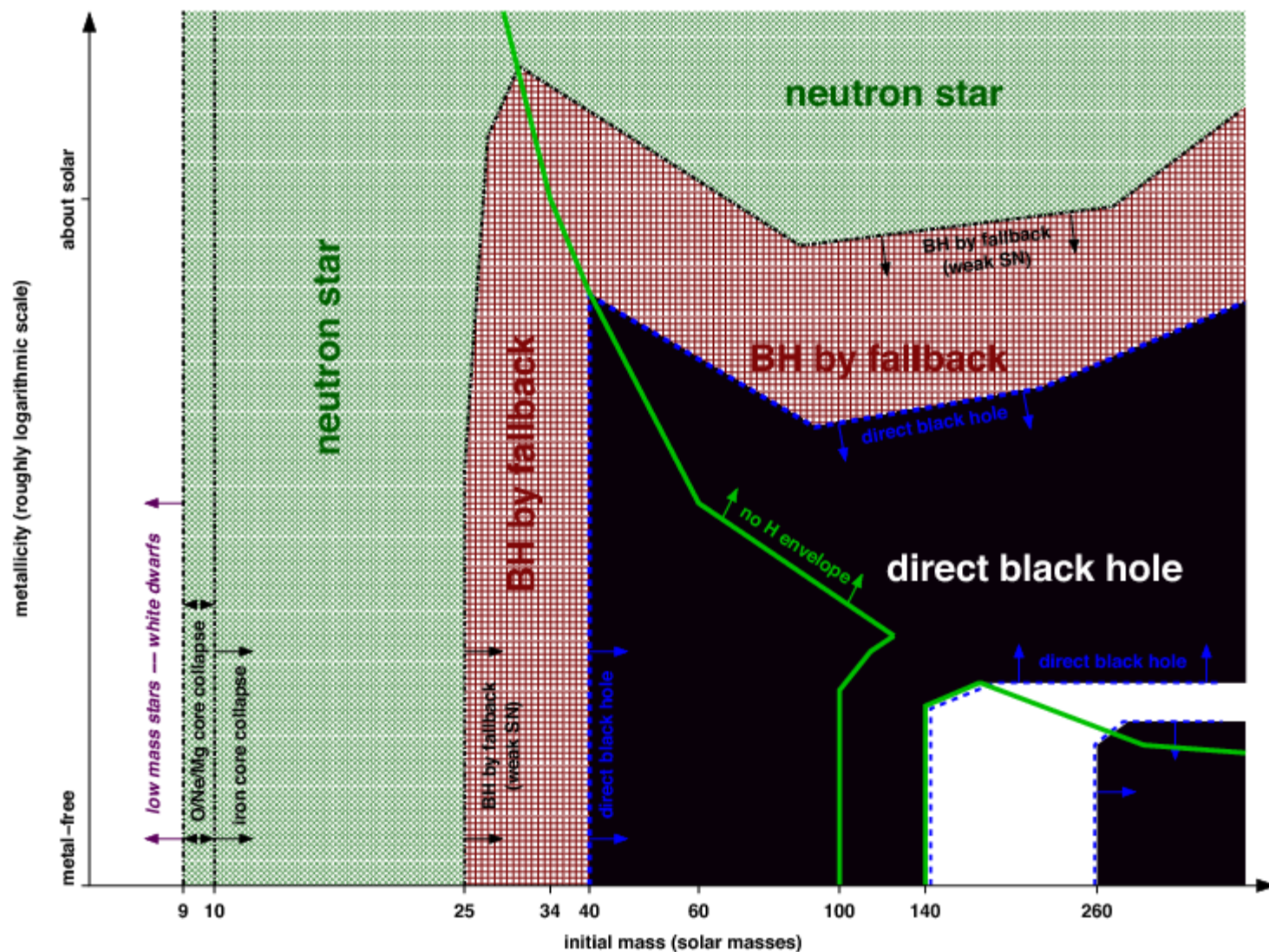
Поиск изолированных аккрецирующих черных дыр в центре Галактики в инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне

П.Б. Иванов, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, М.С. Пширков

- Черные дыры в Галактике.
- Изолированные чёрные дыры -- как искать?
- Наблюдательные проявления аккреции в суб-мм и дальнем-ИК диапазонах
- Ограничения из будущих наблюдений -- JWST и Миллиметрон.

Чёрные дыры

- Являются конечной стадией звёздной эволюции.
- Уже более 20 кандидатов наблюдается в рентгене.
- $\sim 10^8$ в Галактике.

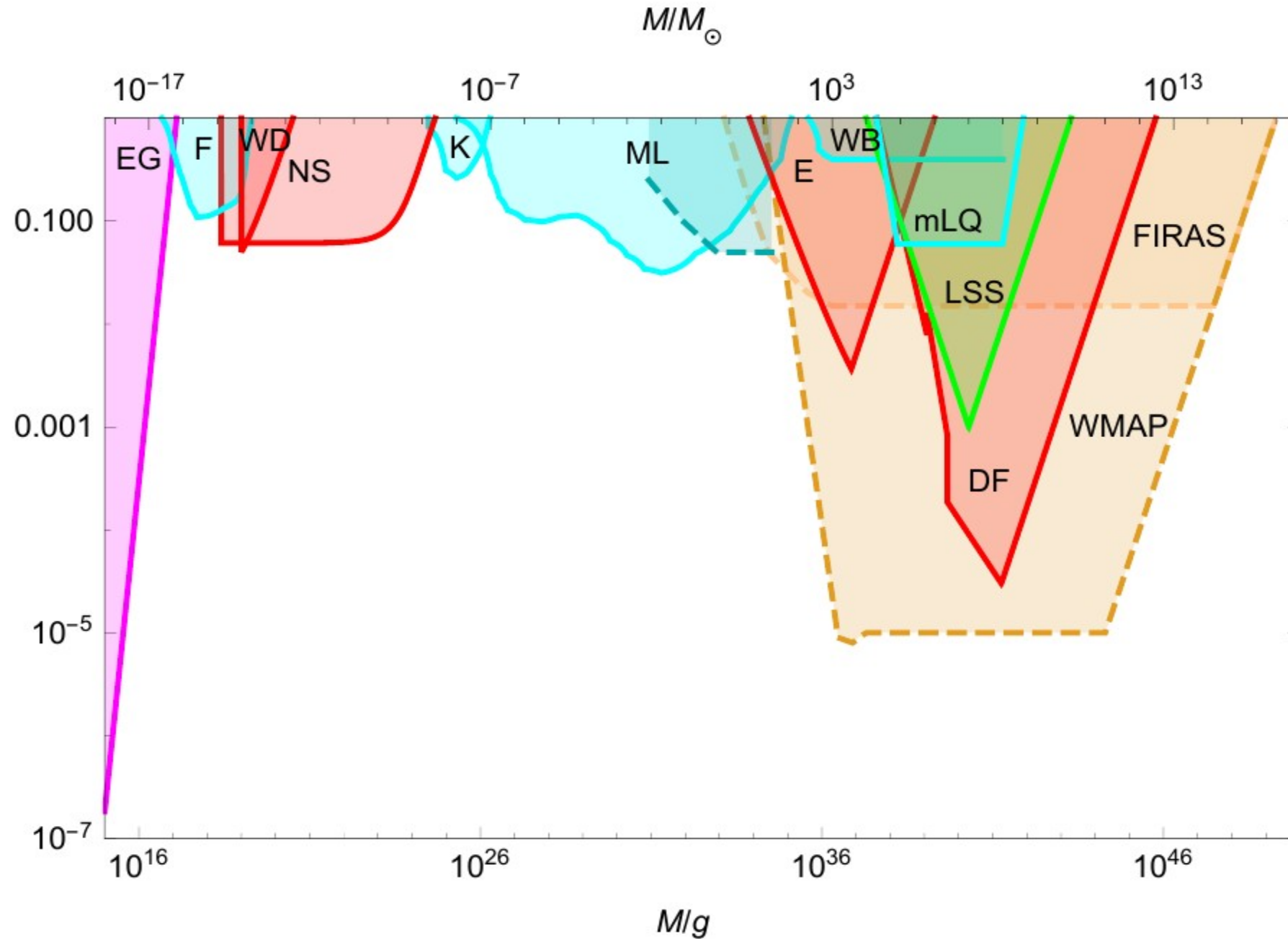


Heger et al, 2003

Чёрные дыры: альтернатива (1/2)

- Первичные черные дыры образуются на самых ранних стадиях эволюции Вселенной
- Могут выполнять роль тёмной материи
- Если характерная масса порядка десятков солнечных, то достаточно $\Omega \sim 10^{-3}$, чтобы объяснить события LIGO
- Число в Галактике $\sim 10^{11} (M/10 M_{\odot}) \Omega$. В основном сосредоточены в протяжённом гало.

Чёрные дыры: альтернатива (2/2)



Чёрные дыры: наблюдательные проявления

- Чёрные дыры в составе двойных систем -- сравнительно просто искать и изучать из-за аккреции с звезды-компаньона.
- Изолированные чёрные дыры -- гораздо менее интенсивная аккреция из межзвёздной среды.
- Ожидается очень слабый эффект в различных диапазонах -- нужно определить оптимальную стратегию поиска.

Сферическая аккреция (1/3).

$$\dot{M} = 4\pi\lambda \frac{G^2 M^2 \rho}{(v^2 + c_s^2)^{3/2}}$$

- Аккреция Бонди-Хойла-Литтлтона
- M, v -- масса и скорость аккрецирующего объекта
- c_s -- скорость звука в среде
- ρ -- плотность среды
- λ -- эффективность аккреции, $\lambda \leq 1$

Сферическая аккреция (2/3).

- Впервые идея выдвинута Шварцманом в 1971.
- Дальнейшее развитие в работах (Shapiro, 1973), (Visnovatyi-Kogan&Ruzmaikin, 1976). Всё более детальный учет магнитного поля и его влияния на образующийся спектр.
- В дальнейшем используем результаты численных симуляции (Ipser&Price, 1982) в качестве опорных.
- Дальнейшее развитие -- учёт влияния нетепловых электронов (Beskin&Karpov2005)

Сферическая аккреция (3/3).

- Было необходимо исследовать большую область пространства параметров.
- Нашей целью было построение максимально простой аналитической модели, которая максимально точно воспроизводила бы результаты численной модели (IP1982) в интересующей нас области.

- Исходные посылки:

- радиальная скорость пропорциональна кеплеровской

$$v_r = -\beta_V \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- энергия магнитного поля пропорциональна гравитационной

$$\frac{B^2}{8\pi} = \beta_B \frac{GMm_p n}{R}$$

- температура электронов пропорциональна температуре протонов

$$T_e = \epsilon T_{pr}, T_{pr} = \frac{m_p c^2 R_g}{k_B R}$$

$$T_e = \epsilon 10^{12} \frac{1}{r} K \quad r = R/R_g$$

- Концентрация естественным образом связана с темпом аккреции:

$$\dot{M} = -4\pi n v_r R^2$$

$$n = n_* \dot{m} m^{-1} \beta_V^{-1} r^{-3/2}, \quad n_* \approx 2.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3},$$

$$B = B_* (\beta_B \beta_V^{-1} \dot{m} m^{-1})^{1/2} r^{-5/4}, \quad B_* \approx 2.1 \cdot 10^4 \text{ G},$$

$$m = \frac{M}{10M_\odot}, \quad \dot{m} = \frac{\dot{M}}{10^{-8} \dot{M}_E}$$

$$\dot{M}_E \approx 1.4m \cdot 10^{19} \text{ g s}^{-1}$$

- Синхротронная светимость рассчитывается из этих параметров:

$$L_\nu = 8\pi^2 \int_{R_{min}}^{\infty} dR' R'^2 e^{-\tau(R')} j_\nu(R'), \quad \tau(R) = \int_R^{\infty} dR' \frac{j_\nu}{B_\nu},$$

$$B_\nu = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2}$$

$$j_\nu = \frac{3^{1/2} e^3 n B}{8\pi m_e c^2} \Phi(x) = j_* \beta_B^{1/2} (\beta_V^{-1} \dot{m} m^{-1})^{1/2} \Phi(x), \quad x = \nu/\nu_c, \quad j_* = 4.9 \cdot 10^{-9} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\nu_c = \frac{3eB(k_B T)^2}{4\pi m_e^3 c^5} = \nu_* \epsilon^2 (\beta_B \beta_V^{-1} \dot{m} m^{-1})^{1/2} r^{-13/4}, \quad \nu_* = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ Hz},$$

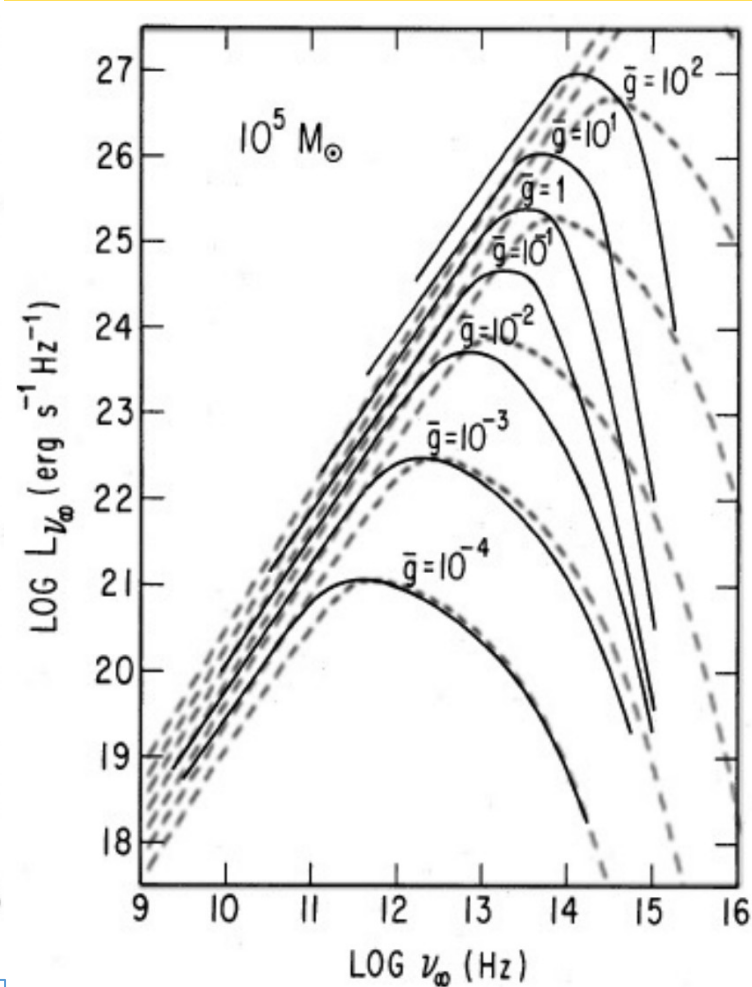
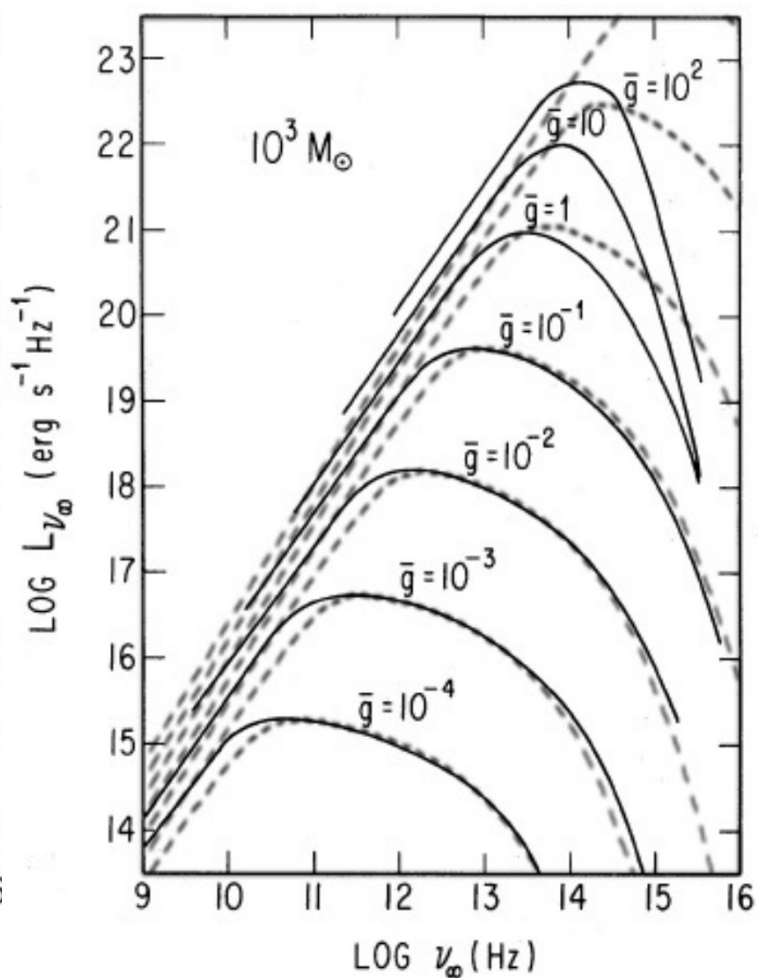
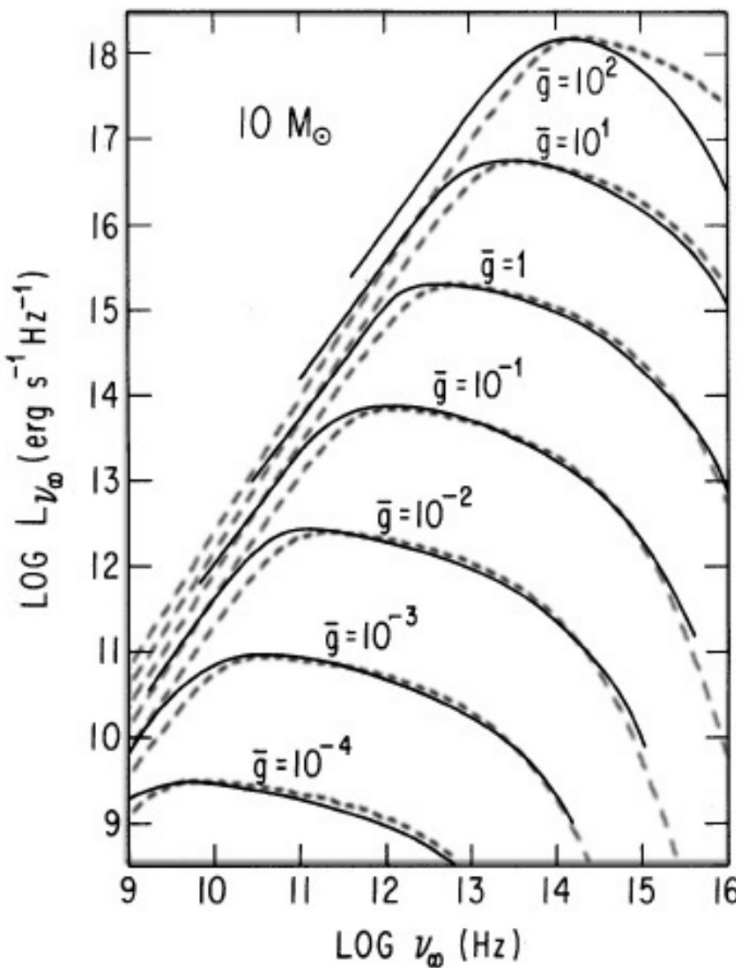
$$\Phi(x) = \int_0^{\infty} dz z^2 e^{-z} F(x/z^2), \quad F(x) = x \int_x^{\infty} dz K_{5/3}(z)$$

- Оптическая толща:

$$\tau = \tau^* (\beta_B^{-1} \beta_V^{-1} \dot{m} m)^{1/2} \tilde{\nu}^{-2} \int_r^\infty dr r^{-7/4} \Phi(x), \tau_* = 7.7 \cdot 10^{-9}, \tilde{\nu} = \nu / \nu_c(r = 1).$$

- Можно сравнить с IP1982
- Они использовали параметр аккреции $\bar{g} = \frac{1}{16} \beta_V^{-1} \dot{m} m^{-1}$
- Для сравнения фиксируем $m=1$ ($10 M_\odot$), $\bar{g}=10^{-4}$ и подгоняем, используя единственный свободный параметр $\varepsilon = T_e / T_{pr}$
- Проверка: сравнивая результаты для получившегося значения $\varepsilon=0.2$ для других параметров аккреции m и g

Светимость (5/6)



- Граница применимости:

$$\frac{\bar{g}M}{10^3 M_{\odot}} < 1$$

$$\dot{m} < 1600 \beta_V$$

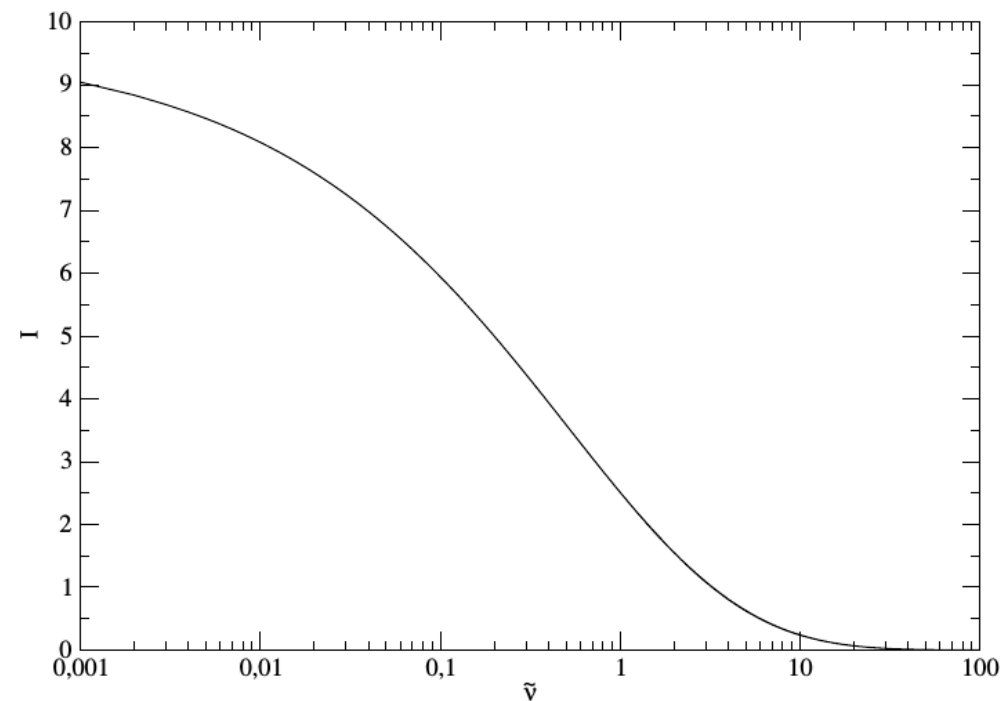
- Для оценки болометрической светимости можно использовать дальнейшее упрощение, пренебрегая оптической толщиной по поглощению, что справедливо для достаточно высоких частот задачи.

$$L_\nu = \frac{4}{13} L_0 \tilde{\nu}^{-1/13} I(\tilde{\nu}), \quad I(\tilde{\nu}) = \int_{(\frac{3}{2})^{13/4} \tilde{\nu}}^{\infty} dx x^{-12/13} \Phi(x),$$

$$L_0 = L_* \beta_B^{1/2} (\beta_V \dot{m} m)^{3/2}.$$

$$L_{tot} = \int d\nu L_\nu$$

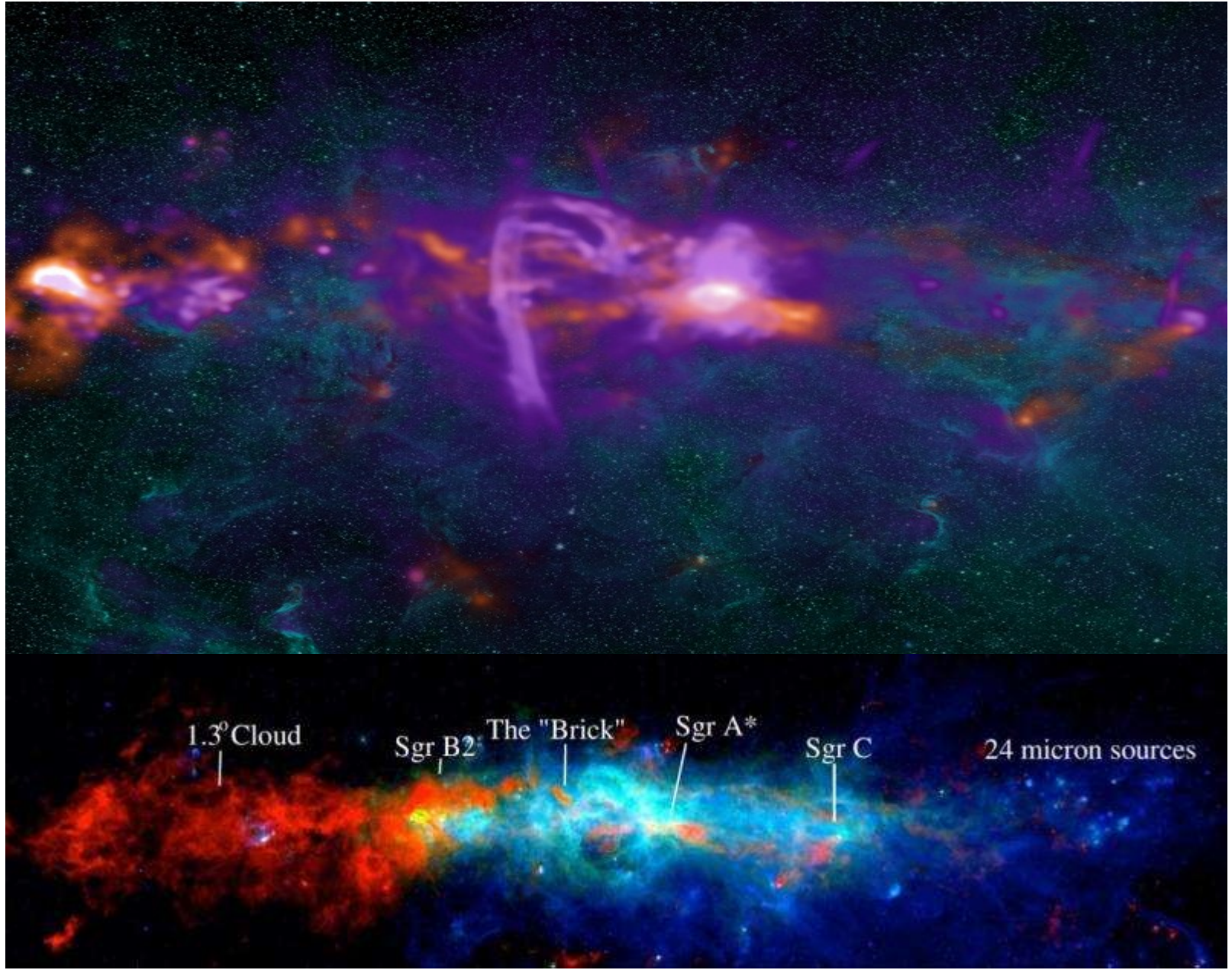
$$L_{tot} = 9.5 \cdot 10^{28} \epsilon^2 \beta_B \beta_V \dot{m}^2 m \text{ erg s}^{-1} = 3.8 \cdot 10^{27} \epsilon_{0.2}^2 \beta_B \beta_V \dot{m}^2 m \text{ erg s}^{-1}$$



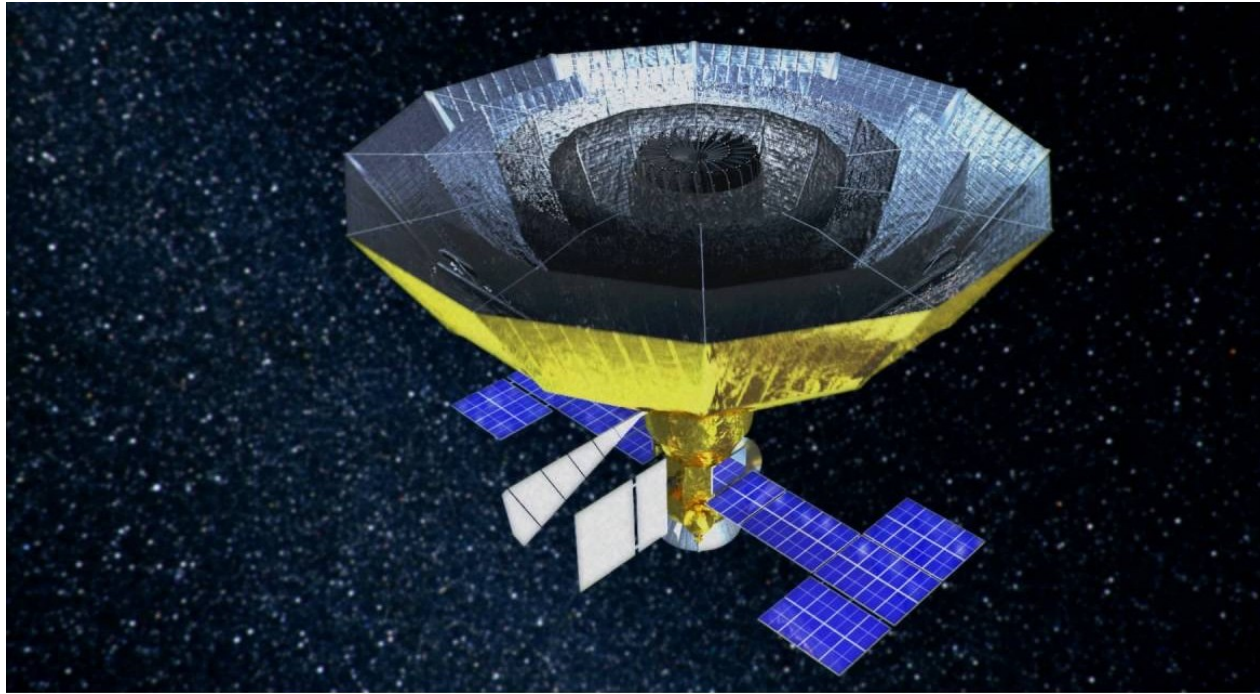
Регион поиска

- Выбор области для поиска
- Необходимые характеристики:
 - большой объём
 - высокая концентрация вещества
 - (желательно) низкая скорость движения ЧД
 - небольшие угловые размеры из-за малого поля зрения телескопов
- Выбор однозначен -- Центральная молекулярная зона (Central Molecular Zone, CMZ)
- $V \sim 3 \times 10^6$ пк³, $\langle n \rangle \sim 10^2$ см⁻³, O (кв. град), $d = 8.5$ кпк (Ferriere et al, 2007)
- $\sigma = 225$ км/с, $T = 100$ К $\implies c_s = 0$ (Valenti et al, 2018)

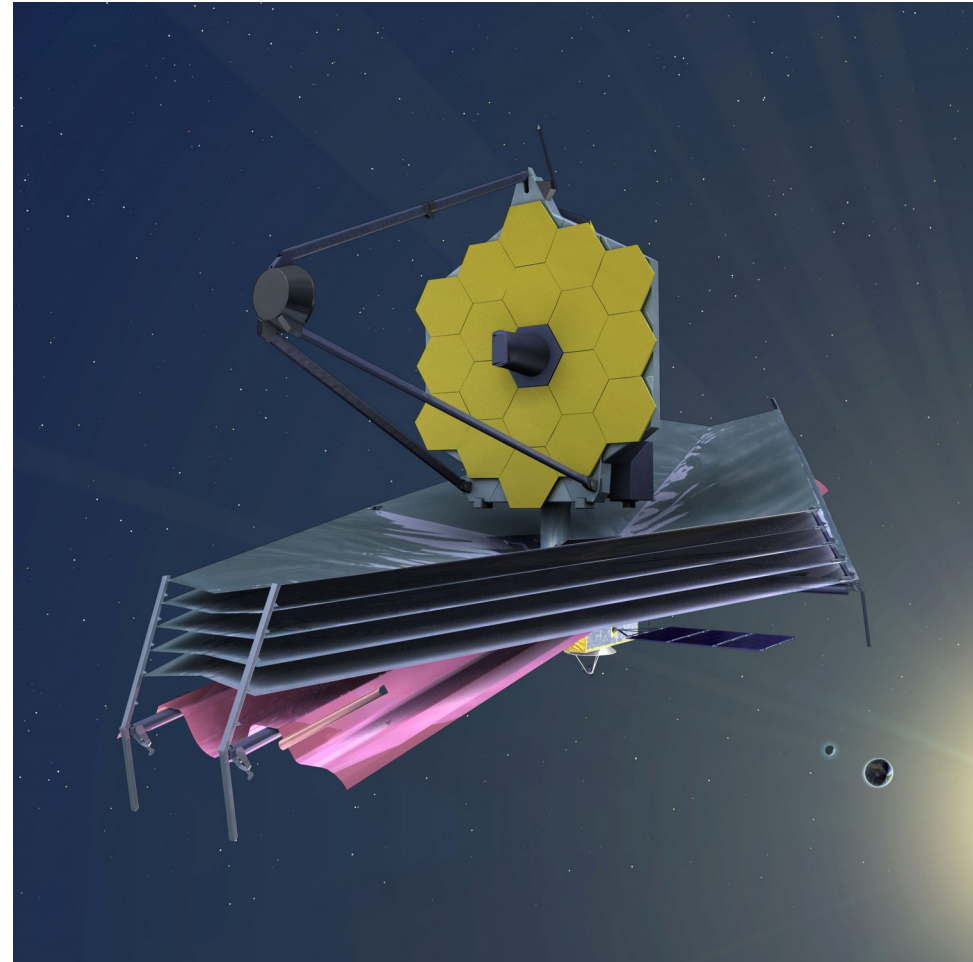
Сферическая аккреция.



Инструменты



Миллиметрон, 1-10 ТГц
FoV~36 кв.мин.



JWST, 100 ТГц
FoV~9.7(NIRcam)/2.3(MIRI) кв.мин

Спектры аккрецирующих ЧД (1/3)

“путаница”
от фоновых
источников

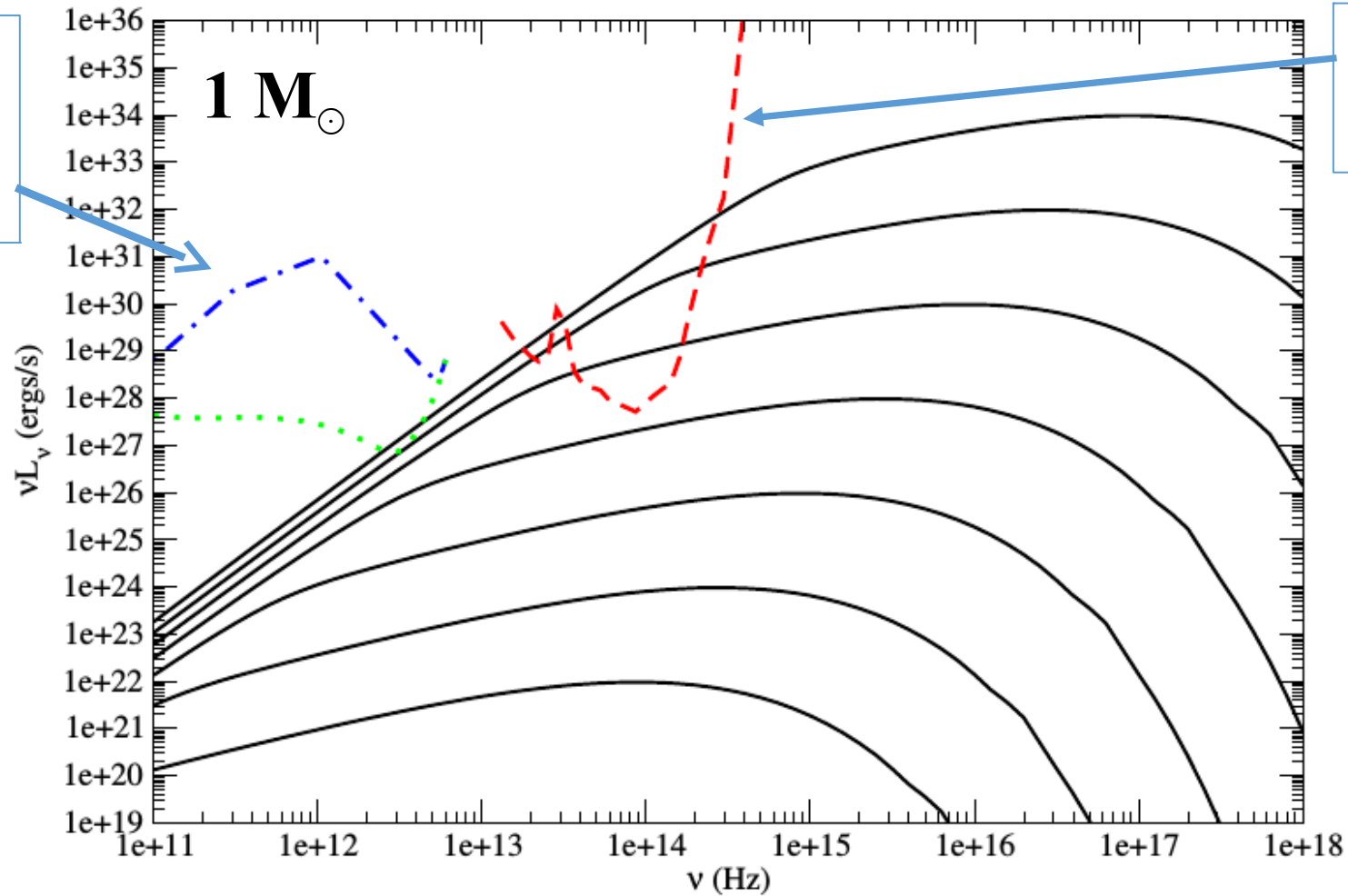
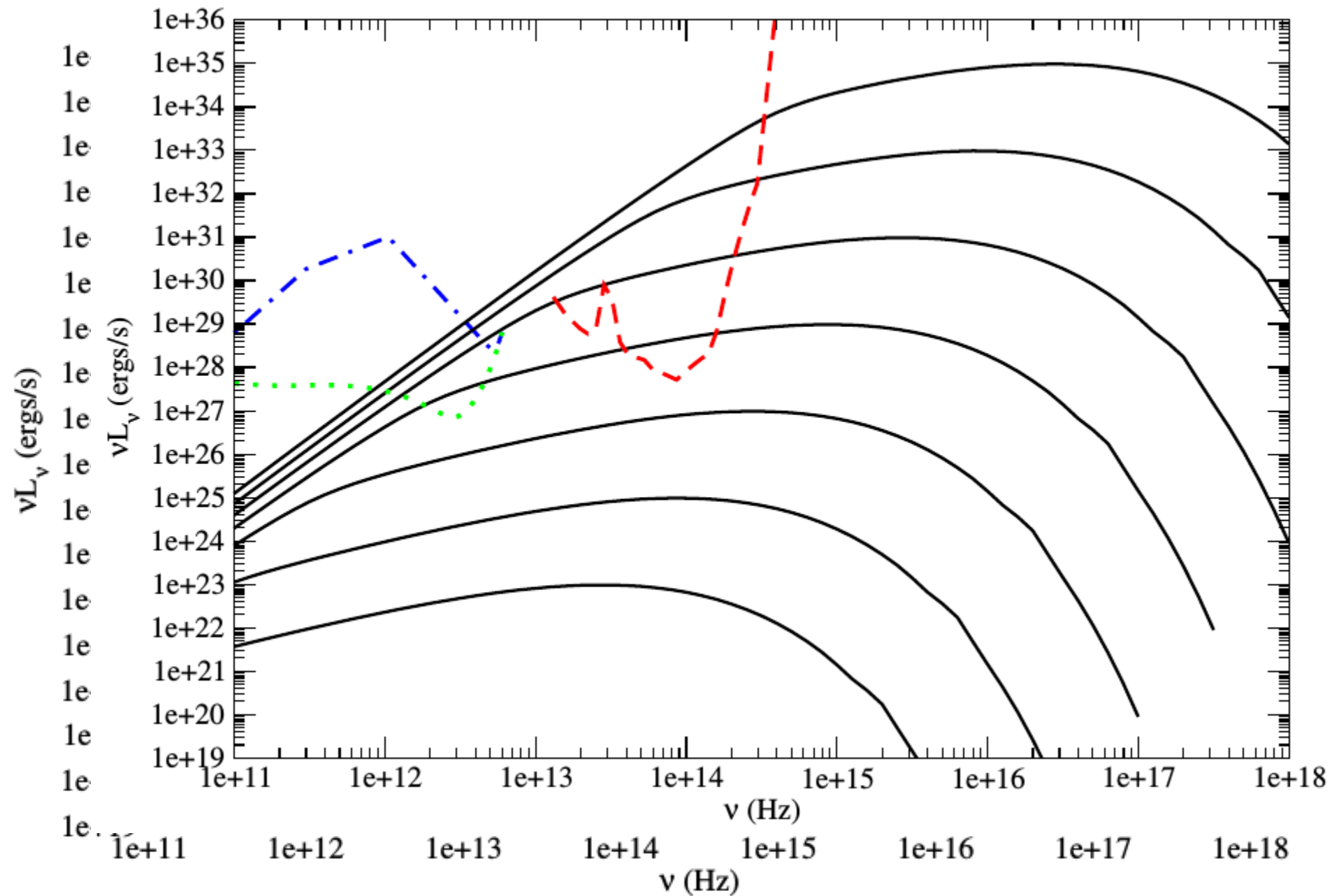
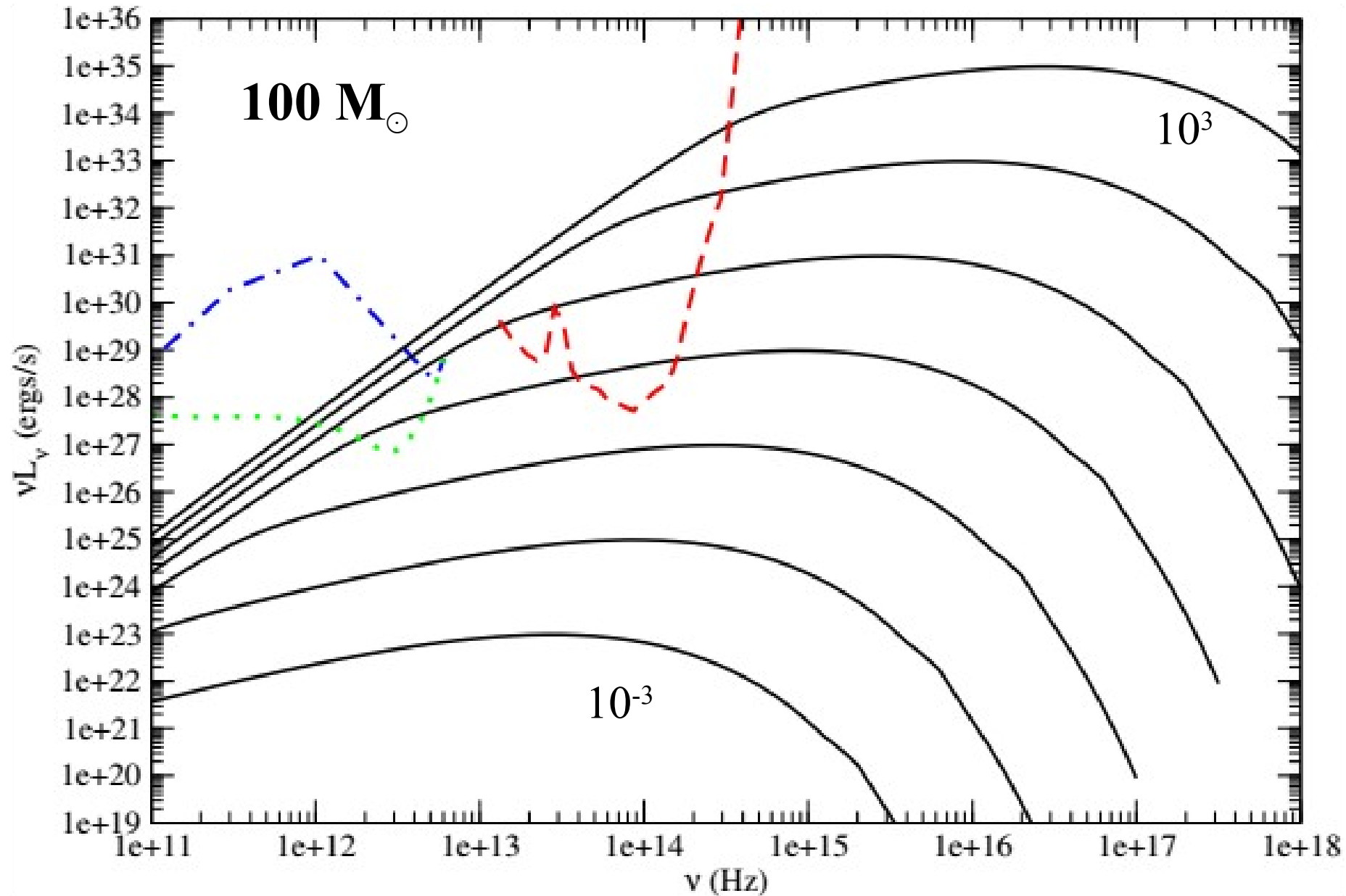


Figure 5. Spectra of an IBH with $M = 1 M_{\odot}$ together with sensitivity curves of MM and JWST. The luminosity curves shown as solid curves, the dashed, dotted and dot dashed curves correspond to JWST sensitivity limit, MM sensitivity limit with the confusion effect being neglected and that of MM with the confusion effect being taken into account, respectively. The solid curves with larger values correspond to larger \dot{m} , every next curve has \dot{m} being multiplied by 10 and we show \dot{m} is the range $10^{-2}10^4$, for a description of particular curves.

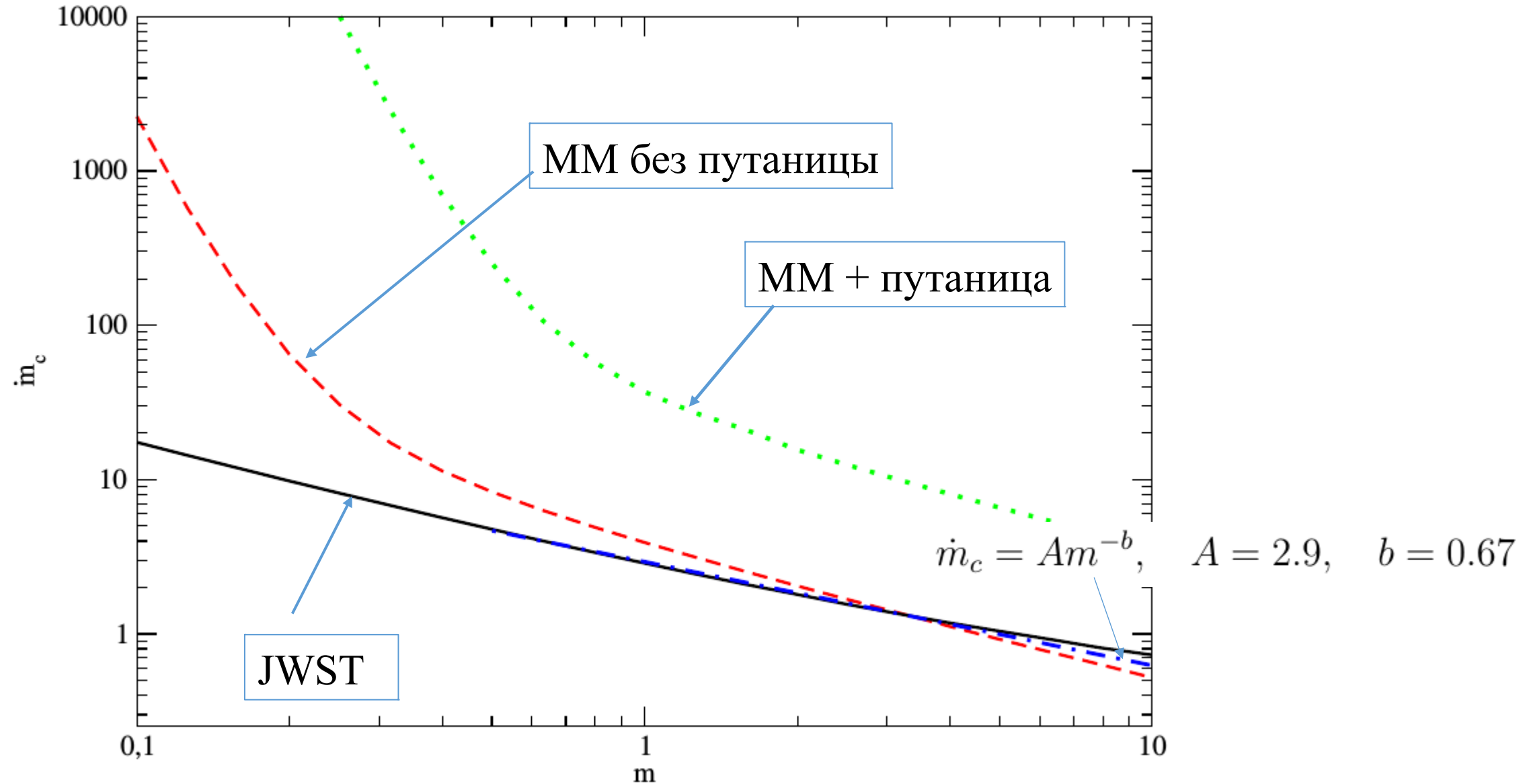
Спектры аккрецирующих ЧД (2/3)



Спектры аккрецирующих ЧД (3/3)



Критический темп аккреции



Эффективность аккреции

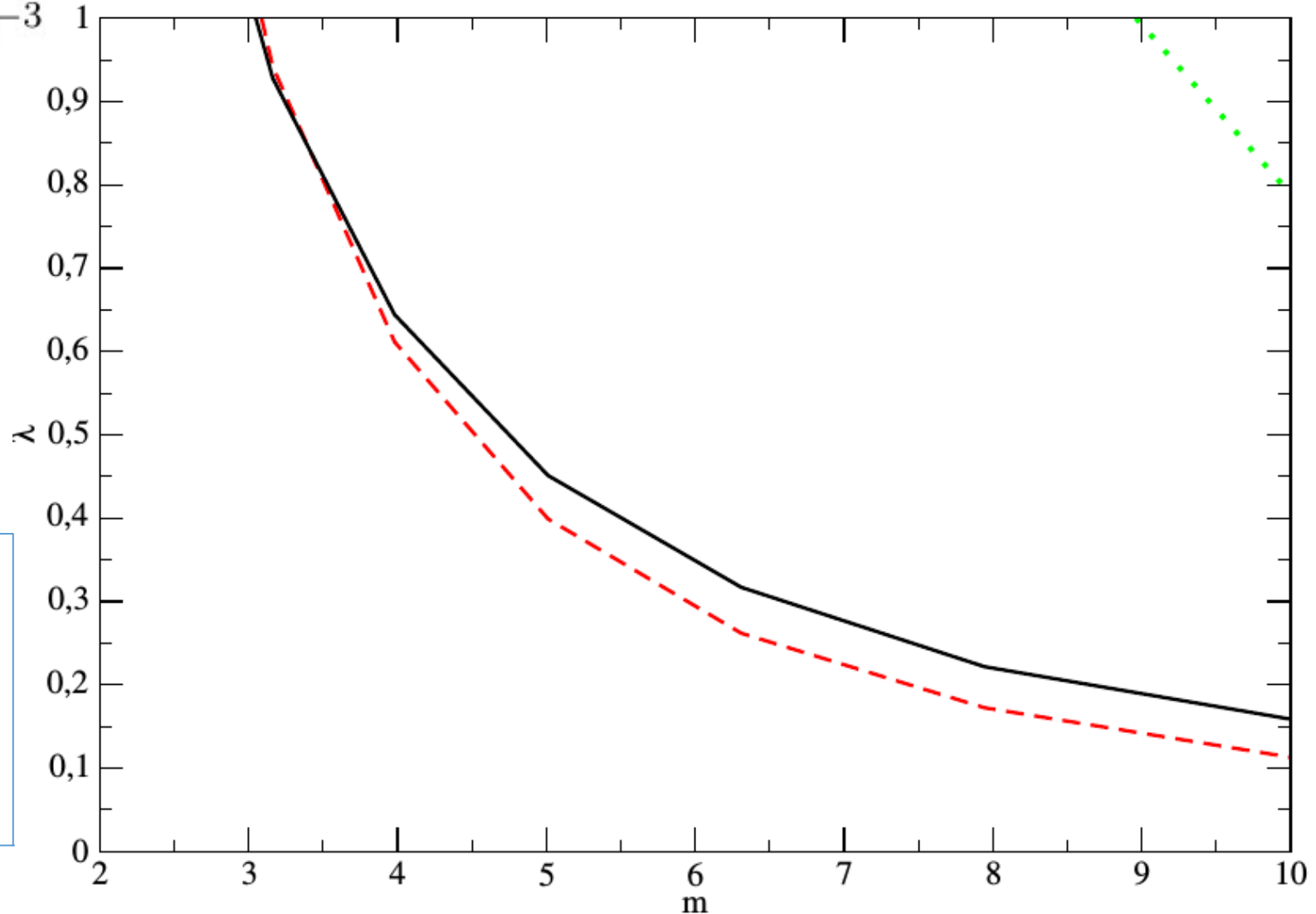
$$\rho = 3.34 \cdot 10^{-22} \text{ g cm}^{-3}$$

$$\dot{m} = 0.46 \lambda m \tilde{v}^{-3}$$

$$\sigma = 225 \text{ km s}^{-1}$$

$$\tilde{v} = v/\sigma$$

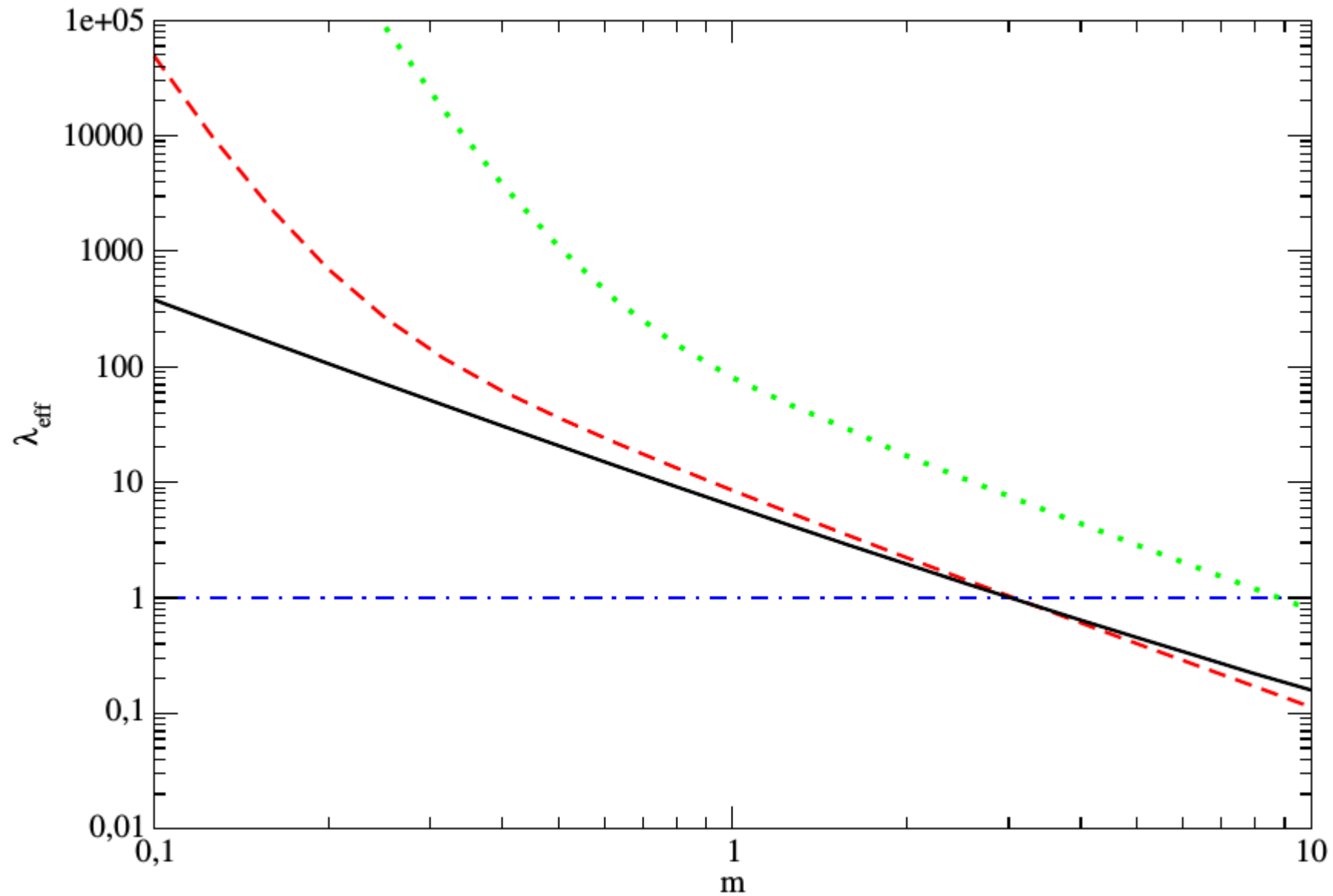
Условие $\dot{m}(\lambda, m) > \dot{m}_c$
задаёт форму
критической
кривой $\lambda_c(m)$



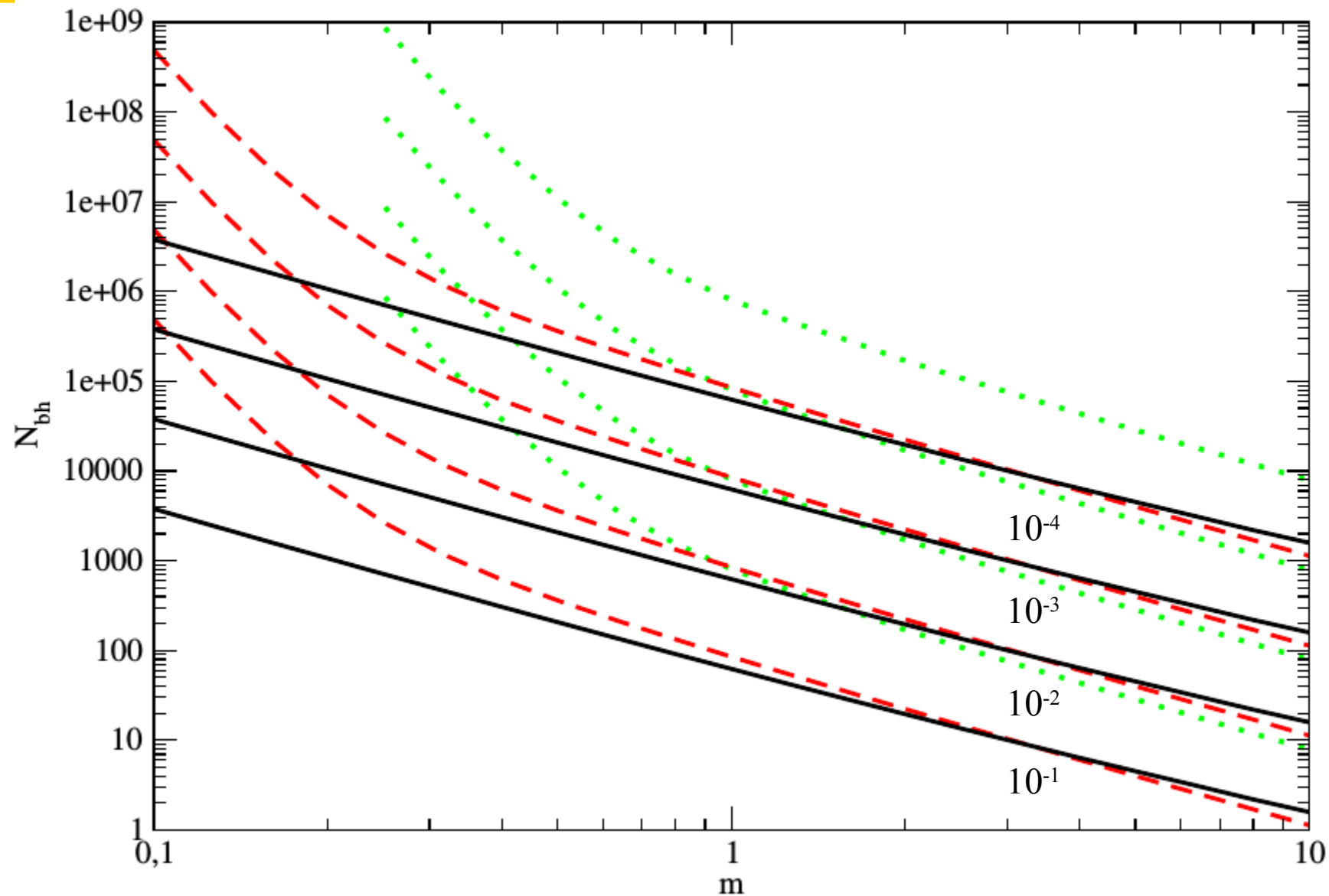
Зависимость от эффективности аккреции (1/3)

- Если аккреция эффективна ($\lambda \sim 1$), то можно наблюдать ЧД с массой более 30 солнечных даже при концентрации 10^{-6} пк $^{-3}$ (одна ЧД на всю ЦМЗ).
- λ может быть значительно меньше, тогда детектирование возможно лишь при гораздо больших концентрациях, $N_{bh} \gg 1$
- Для максвелловского распределения: $N(\tilde{v}) = \tilde{v}^3 N_{bh}$
- Критическая кривая: $N(\tilde{v}) = 1$, $\tilde{v} \sim N_{bh}^{-1/3}$
- $\dot{m} = 0.46 \lambda_{eff} \dot{m}_0$, $\lambda_{eff} = N_{bh} \lambda$.
- Из определения критической кривой можно найти λ_{eff} и N_{bh} (при фиксированном λ).

Зависимость от эффективности аккреции (2/3)



Зависимость от эффективности аккреции (3/3)



Минимальное количество ЧД в ЦМЗ (N_{bh}) необходимое для детектирования при различных значениях λ

Ограничения на распространённость ЧД

- Аппроксимация критических кривых JWST

$$\dot{m}_c = Am^{-b}, \quad A = 2.9, \quad b = 0.67$$

$$N_{bh} \approx 6.3 \cdot 10^3 \lambda_{-3}^{-1} m^{-1.67}, \quad n_{bh} \approx 2.3 \cdot 10^{-3} \lambda_{-3}^{-1} m^{-1.67} \text{ pc}^{-3}, \quad \rho_{bh} \approx 2.3 \cdot 10^{-2} \lambda_{-3}^{-1} m^{-0.67} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$$

- f -- доля ПЧД в тёмной материи.
- $\rho_{DM}^{core} \approx 4 \cdot 10^{-2} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ $\rho_{DM}^{cusp} \approx 1.9 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
- Модели звёздной эволюции предсказывают среднюю концентрацию ЧД (10 солнечных масс) $\sim 0.1 \text{ пк}^{-3}$
- Мы параметризуем как $n_{IBH} = f^{SE} 10^{-1} \text{ pc}^{-3}$

$$f^{core} \approx 5.8 \cdot 10^{-1} \lambda_{-3}^{-1} m^{-0.67}, \quad f^{cusp} \approx 1.2 \cdot 10^{-2} \lambda_{-3}^{-1} m^{-0.67}, \quad f^{SE} \approx 2.3 \cdot 10^{-2} \lambda_{-3}^{-1} m^{-1.67}$$

Заключение

- Наблюдения в диапазоне 10^{12} - 10^{14} Гц оптимальны для поиска изолированных чёрных дыр.
- Лучше всего искать в центральной области Галактики.
- Чувствительности Миллиметра и JWST будет достаточно, чтобы обнаружить ЧД массой $>30 M_{\odot}$, движущиеся с характерной скоростью близкой к дисперсии скоростей ($\sigma > 200$ км/с) при условии эффективной сферической аккреции $\lambda \sim 1$
- При меньшей эффективности аккреции наблюдения прежде всего на JWST смогут поставить сильные ограничения на распространённость ЧД. Например, для $M = 10 M_{\odot}$ и $\lambda \sim 10^{-2}$ они будут на уровне $f_{\text{cusp}} < 10^{-3}$.