

# МОДЕЛЬ ОБДИРАНИЯ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

Никита Крамарев  
ГАИШ МГУ, НИЦ КИ

Доклад на конференции  
70-летия В.А. Рубакова,  
19 февраля 2025 года



# СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

01

## Модель обдирания НЗ

Последние стадии эволюции двойных систем НЗ-НЗ и НЗ-ЧД при разных начальных массах компонентов.

02

## Наблюдательные проявления

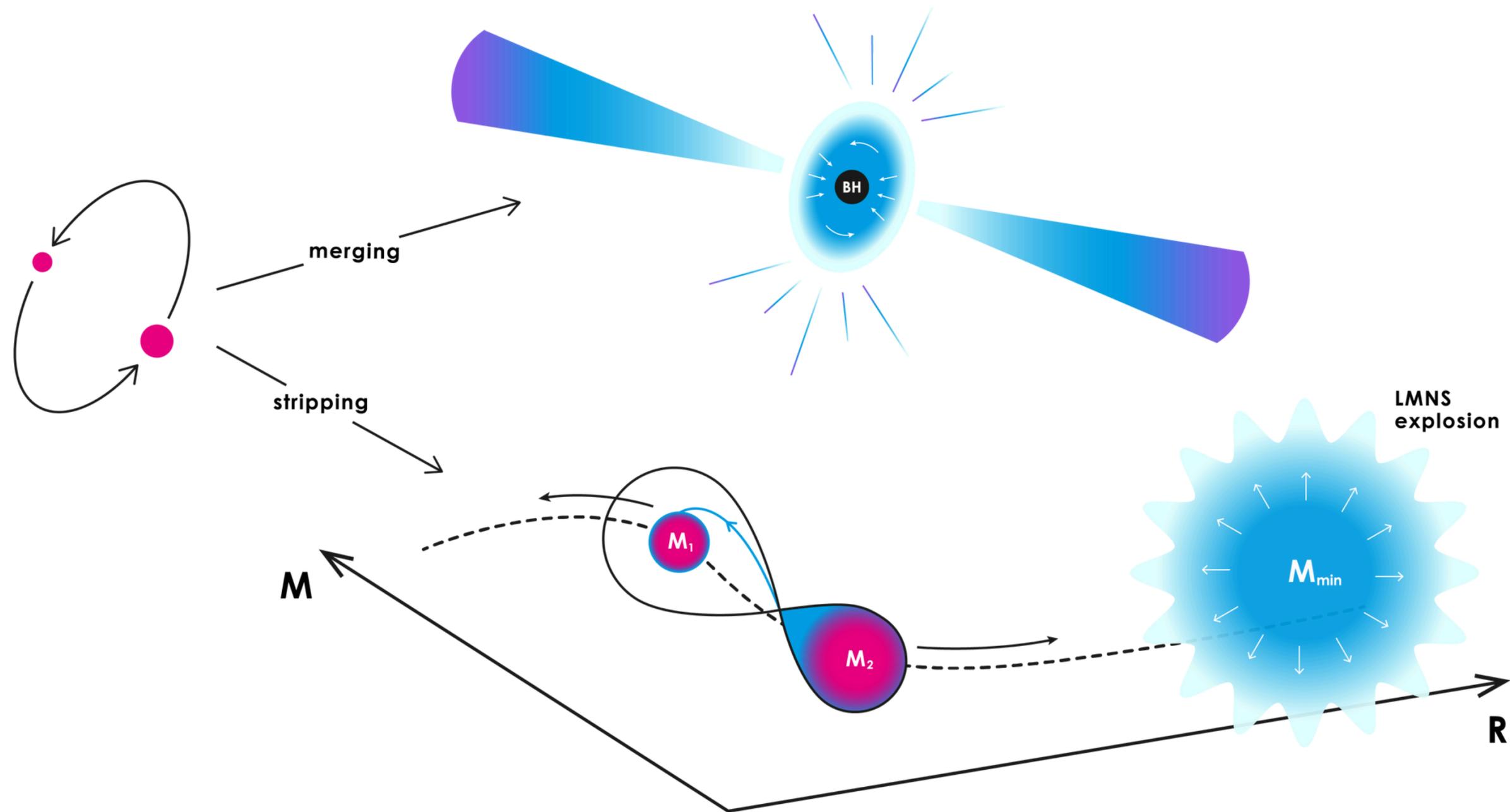
Слабый гамма-всплеск, мощная килоновая и обильный нуклеосинтез при взрыве НЗ минимальной массы.

03

## Событие 17 августа 2017 года

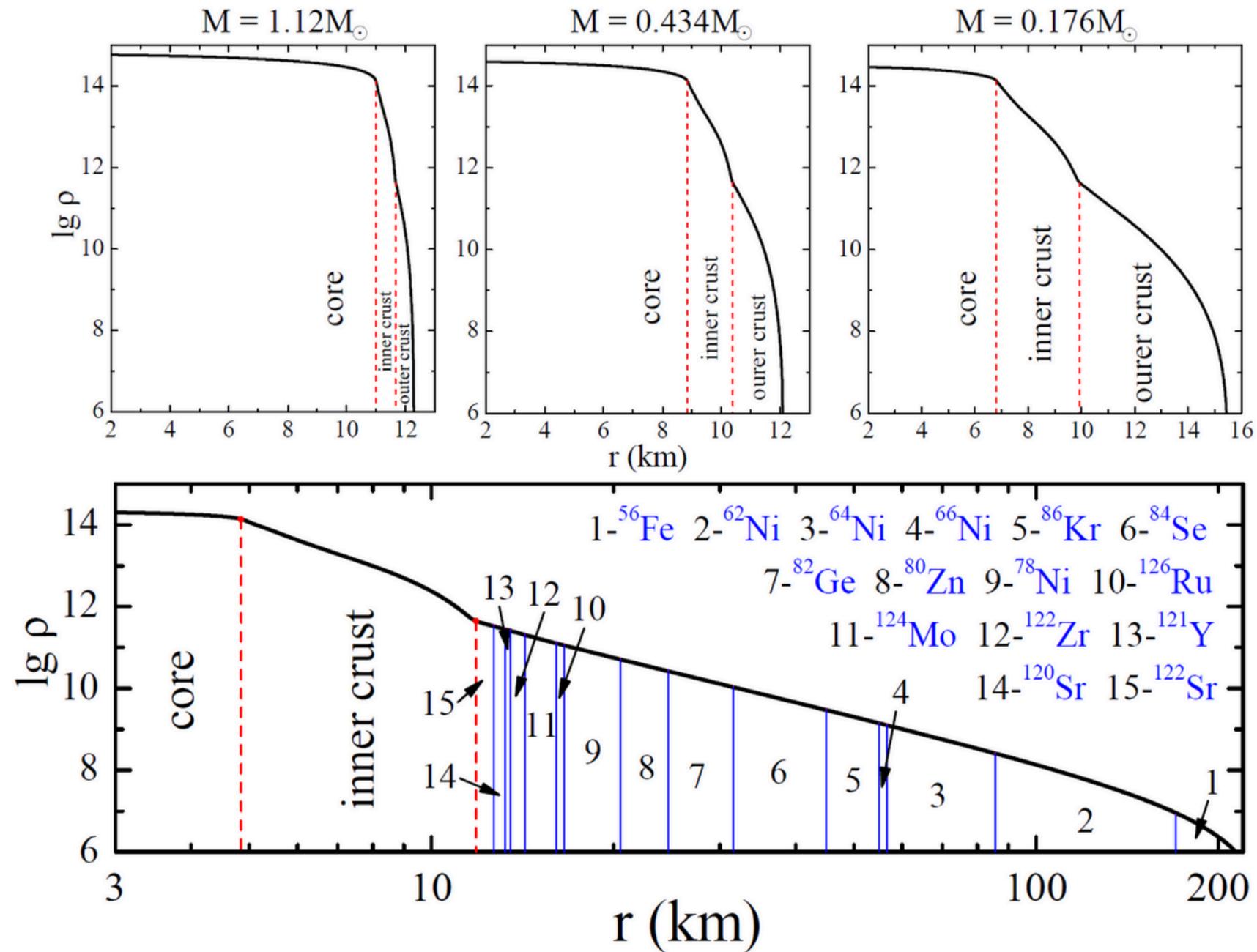
Первая всеканальная регистрация обдирания нейтронной звезды в двойной системе.

# СЛИЯНИЕ И ОБДИРАНИЕ ДВОЙНЫХ НЗ



Blinnikov et al., Sov. Astr. Let. 10, 177-179 (1984)  
Blinnikov et al., Particles 5, 198-209 (2022)

# ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ МАЛОМАССИВНОЙ НЗ В ПРОЦЕССЕ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВОМ



Параметры НЗ  
минимальной массы

$$M_{\text{NS}} \sim 0.1 M_{\text{solar}}$$

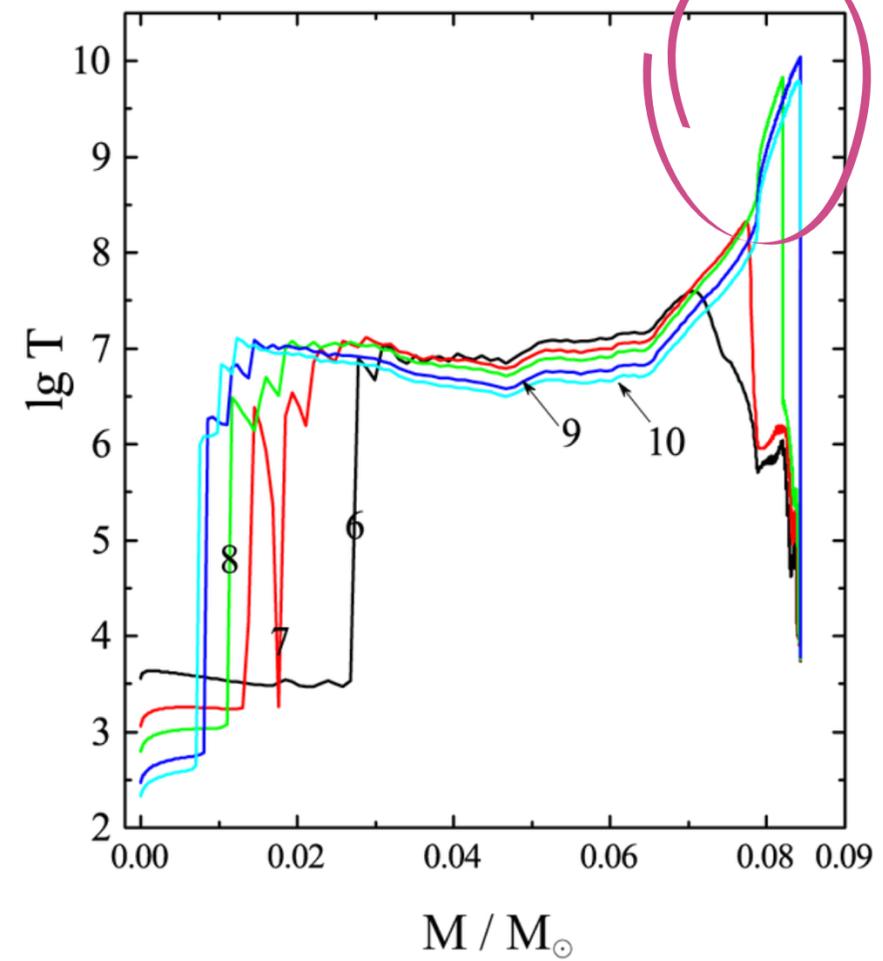
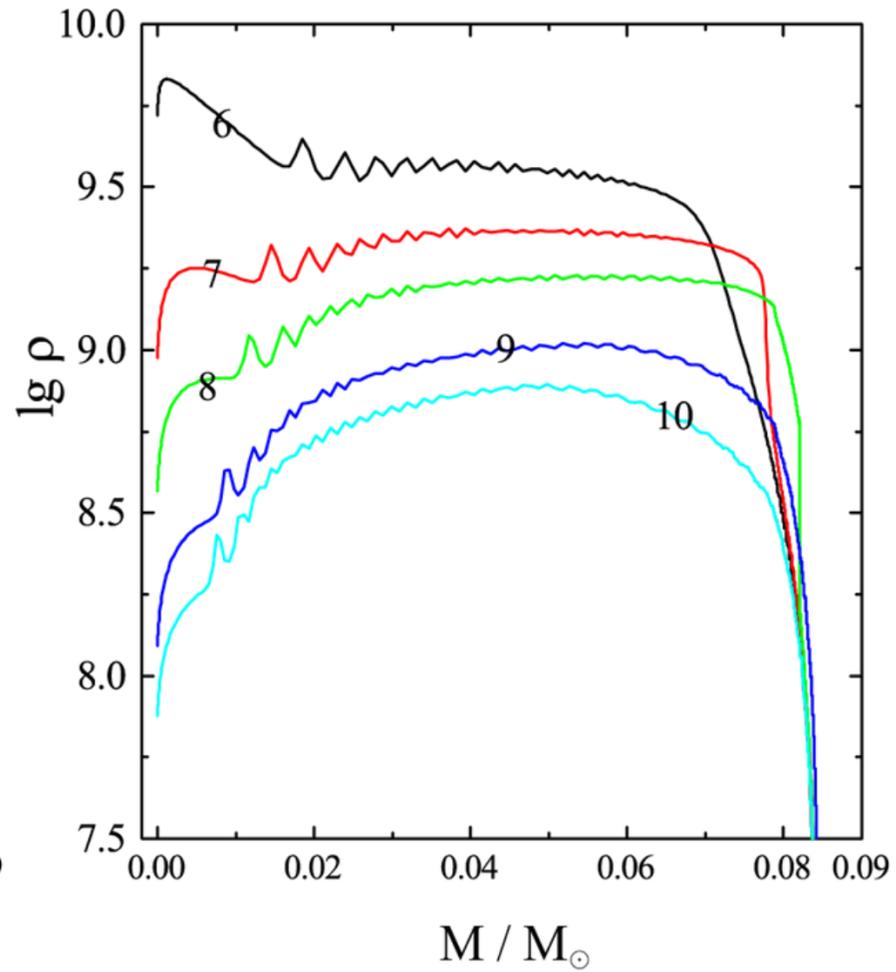
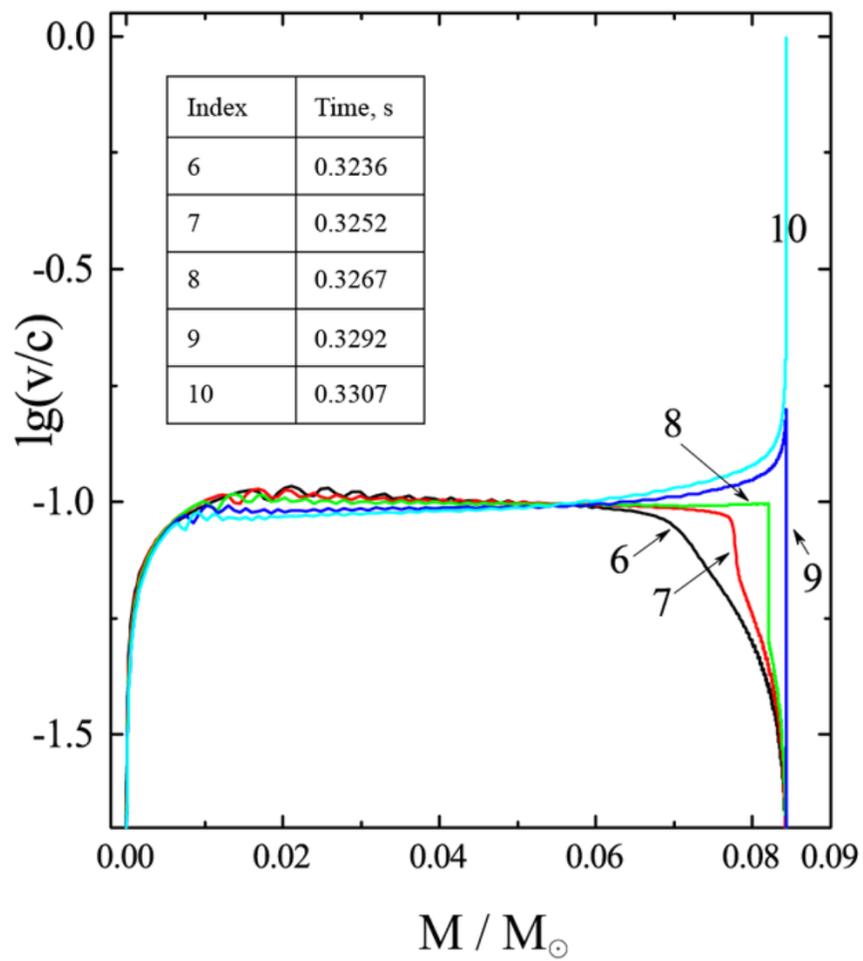
$$R_{\text{NS}} \sim 300 \text{ km}$$

Blinnikov et al., Astr. Rep. 65, 385-391 (2021)  
Yudin et al., Particles 6, 784-800 (2023)

# ЭНЕРГИЯ ВЗРЫВА ИЗ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ ~ 1 FOE

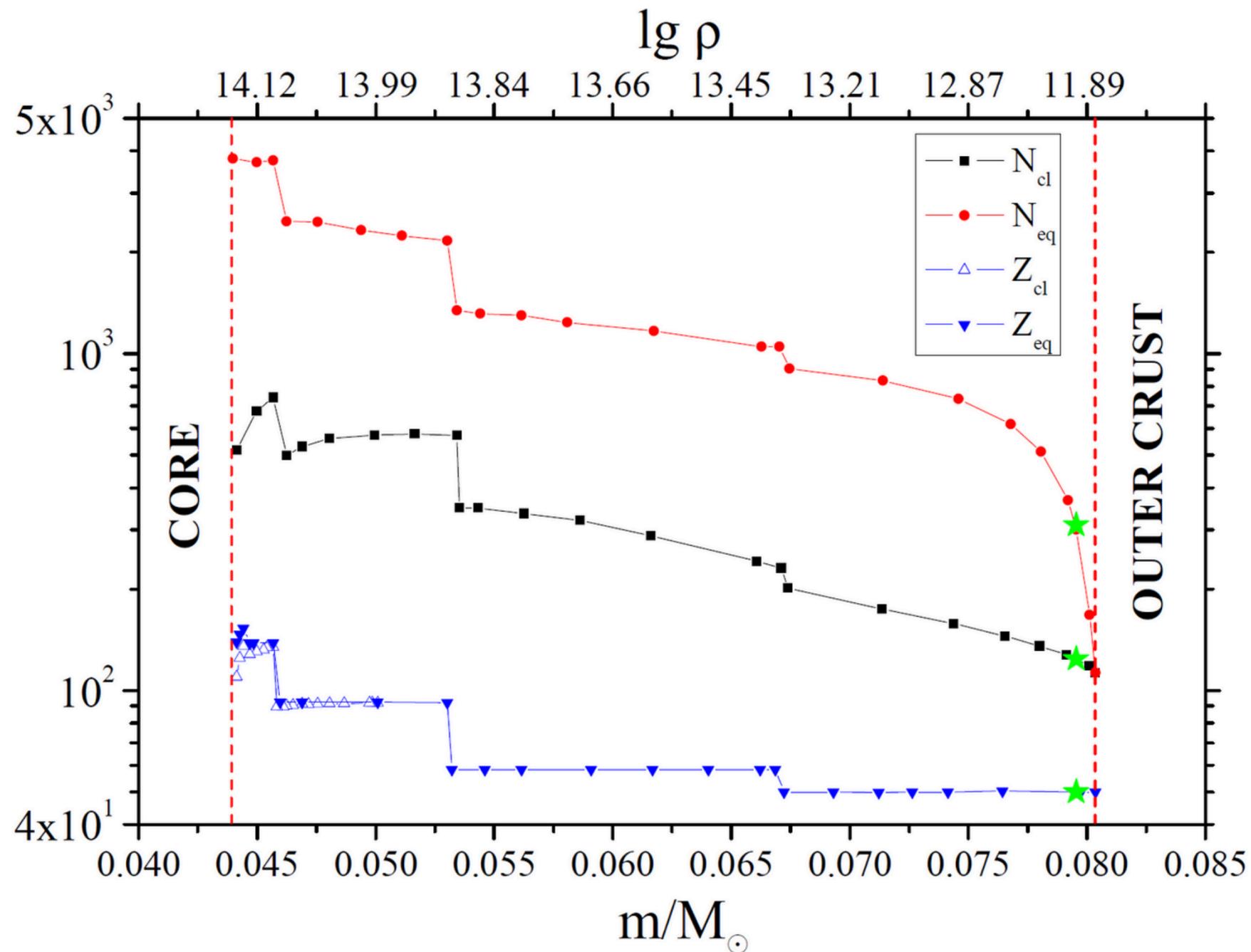
|   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| <i>Blinnikov et al. (1990)</i><br>(см. также <i>Colpi et al. (1993)</i><br>и <i>Symiyoshi et al. (1998)</i> ) | первый расчет взрыва НЗММ | $E_{\text{exp}} = 8.8 * 10^{50} \text{ erg}$<br>$M_{\text{min}} = 0.095 M_{\text{sol}}$ |
| <i>Blinnikov et al. (2021)</i>  | расчет с современным УрС  | $E_{\text{exp}} = 9.1 * 10^{50} \text{ erg}$<br>$M_{\text{min}} = 0.089 M_{\text{sol}}$ |
| <i>Yudin (2022)</i>   | релятивистское описание   | $E_{\text{exp}} = 8.7 * 10^{50} \text{ erg}$<br>$M_{\text{min}} = 0.084 M_{\text{sol}}$ |
| <i>Yip et al. (2023)</i>  | учет ядерных реакций      | $E_{\text{exp}} = 1.4 * 10^{50} \text{ erg}$  |

# ВЗРЫВ ИЗ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ



образование тепловой  
компоненты гамма-всплеска  
с энергией  $\sim 10^{43} - 10^{47}$  эрг

# НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫЕ ЯДРА ВНУТРИ НЗ



При взрыве НЗ минимальной массы также формируются:

сверхтяжелые элементы

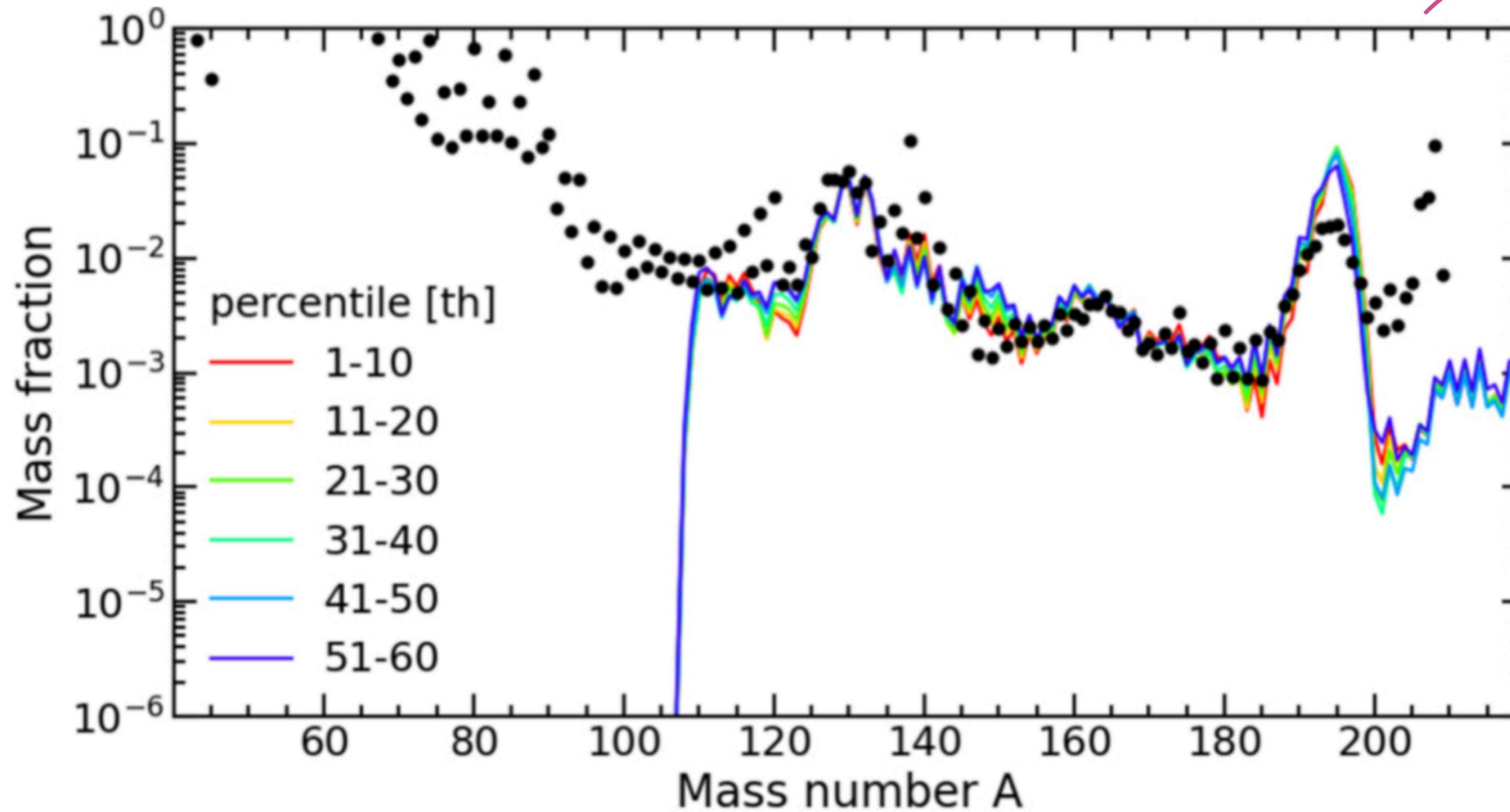
оптический транзиент

нетепловая компонента

гамма-всплеска

нейтринный сигнал

# КОНЕЧНАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

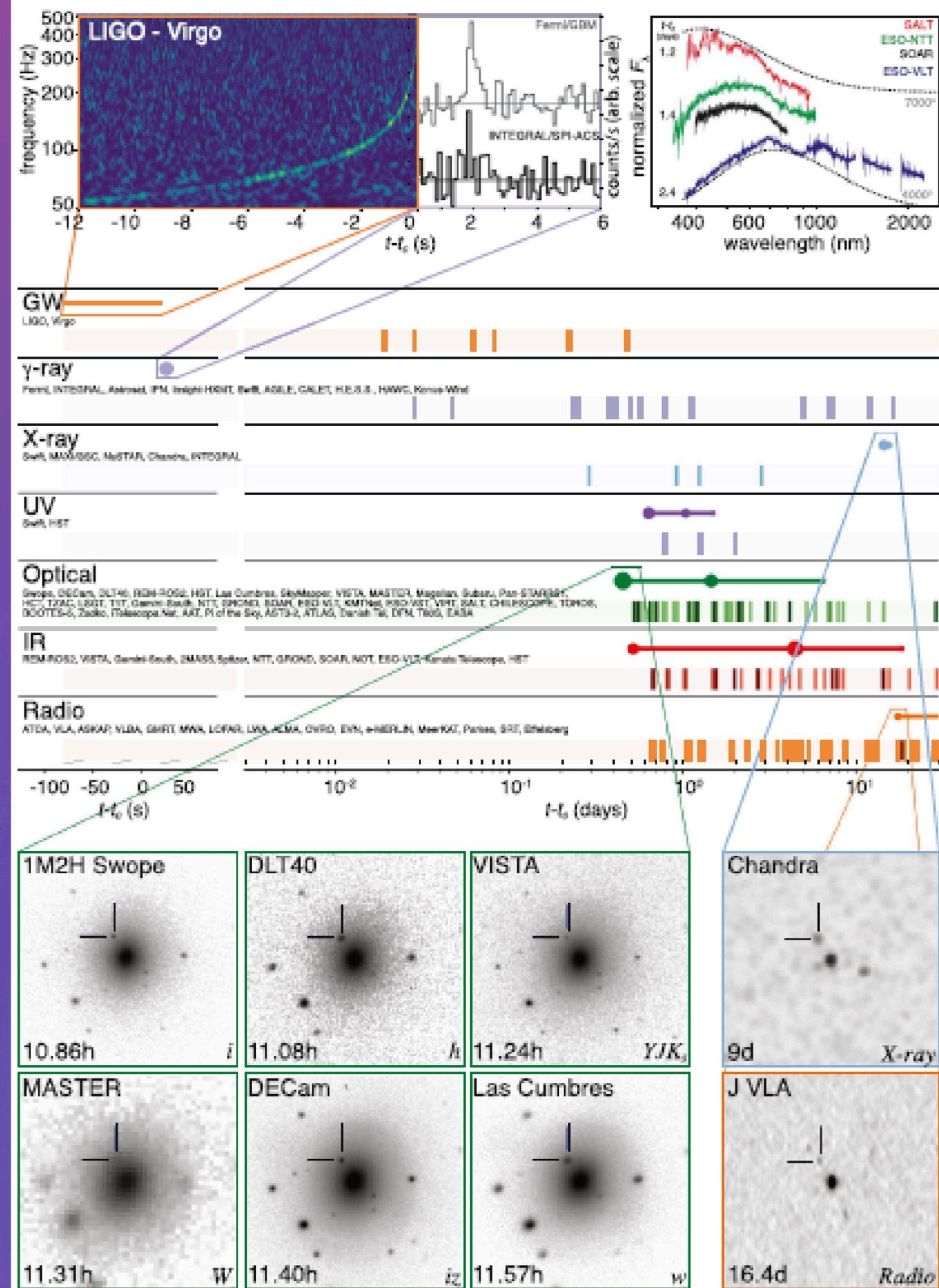


соответствие химическому  
составу Солнечной системы

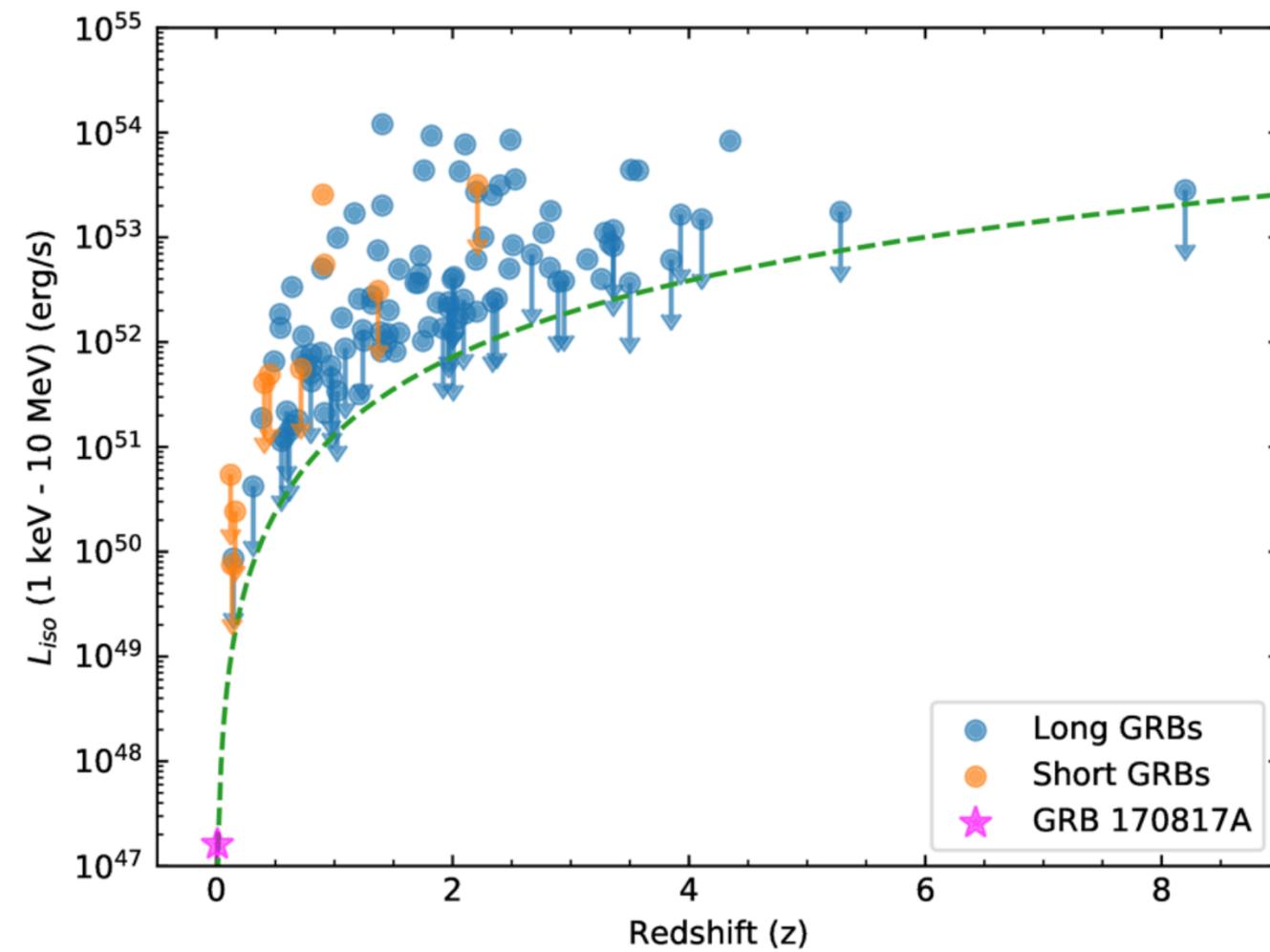
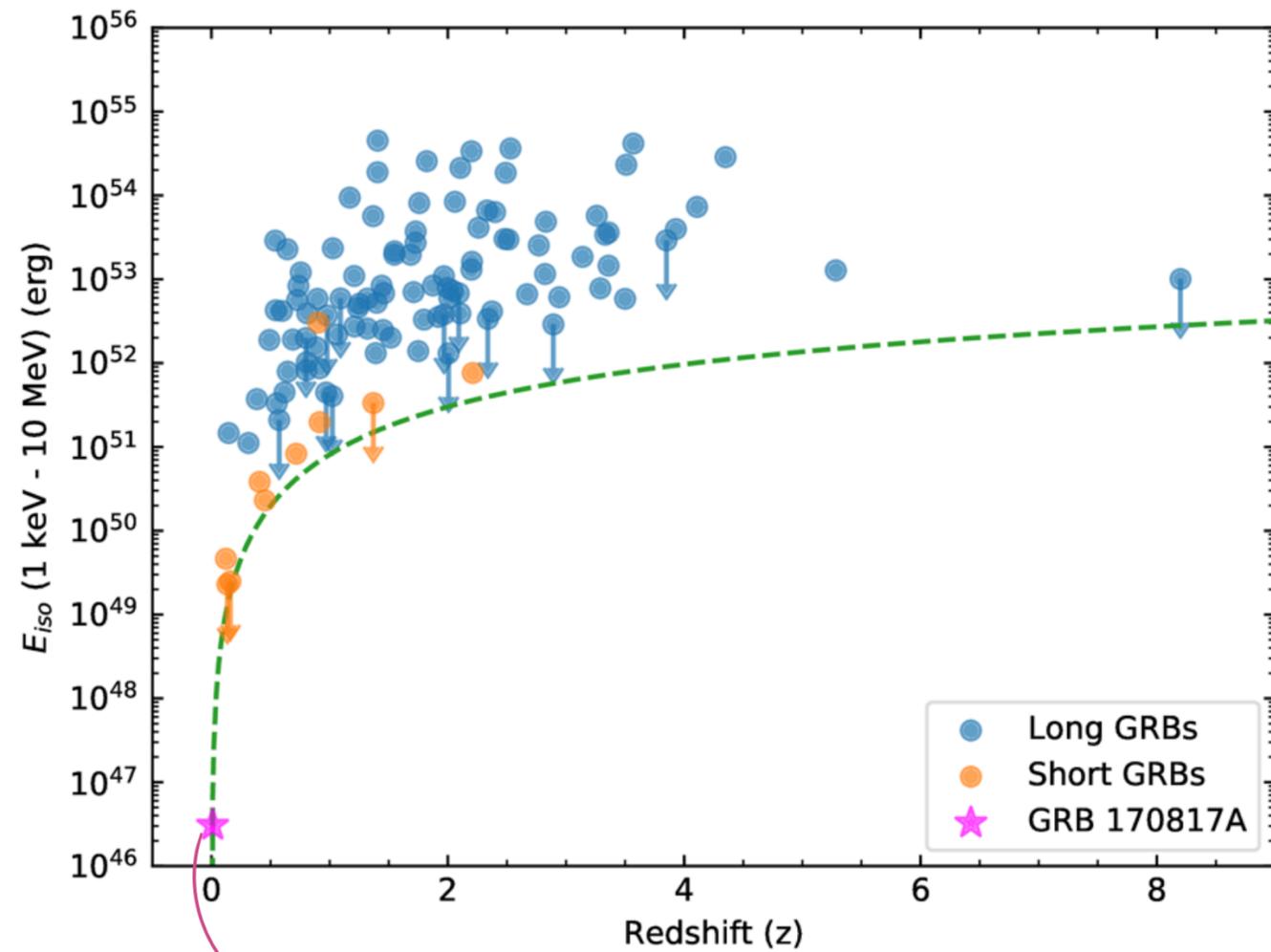
# МОДЕЛЬ ОБДИРАНИЯ И ПЕРВАЯ ВСЕКАНАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СЛИЯНИЯ ИЗ

Событие GW170817 – шестое из зарегистрированных гравитационно-волновыми антеннами LIGO-Virgo и первое, соответствующее слиянию нейтронных звезд, а не черных дыр. Гамма-всплеск GRB170817A наблюдался спустя 1.7 с после потери сигнала на GW-антеннах.

Тем самым впервые была непосредственно подтверждена связь между короткими гамма-всплесками и конечными стадиями эволюции двойных нейтронных звезд.

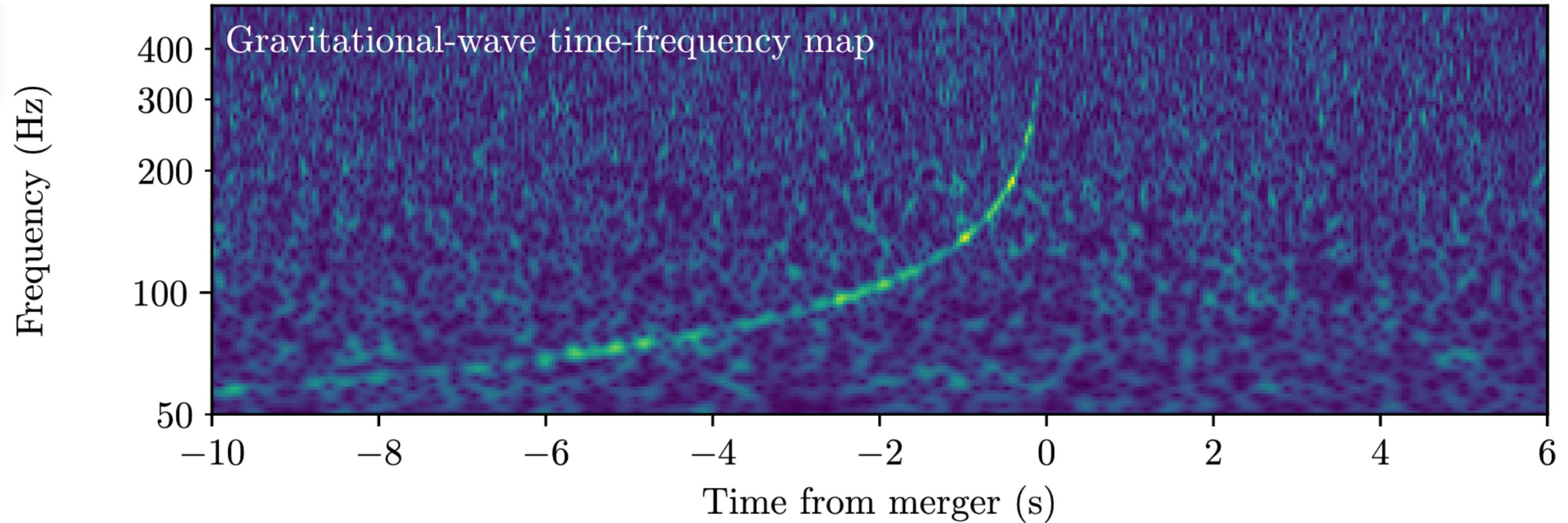


# GRB170817A — АНОМАЛЬНО СЛАБЫЙ ГАММА-ВСПЛЕСК



→ энергия соответствует предсказаниям модели обдирания

## ОБРЫВ СИГНАЛА GW170817 НА ~500 ГЦ



соответствие расстоянию между компонентами ~40 км

# ЗАДЕРЖКА СИГНАЛА GW170817-GRB170817A В 1.7 СЕК

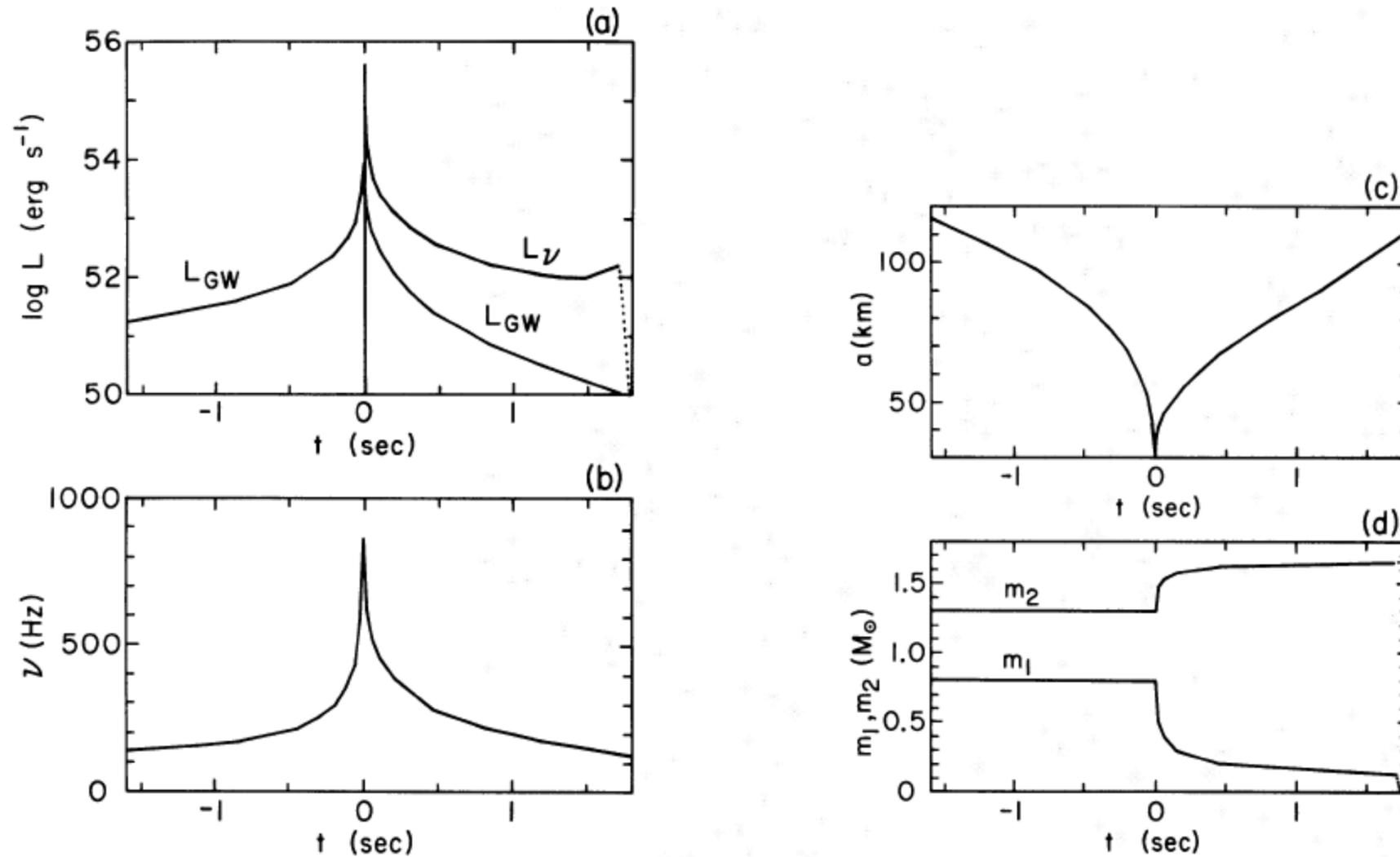
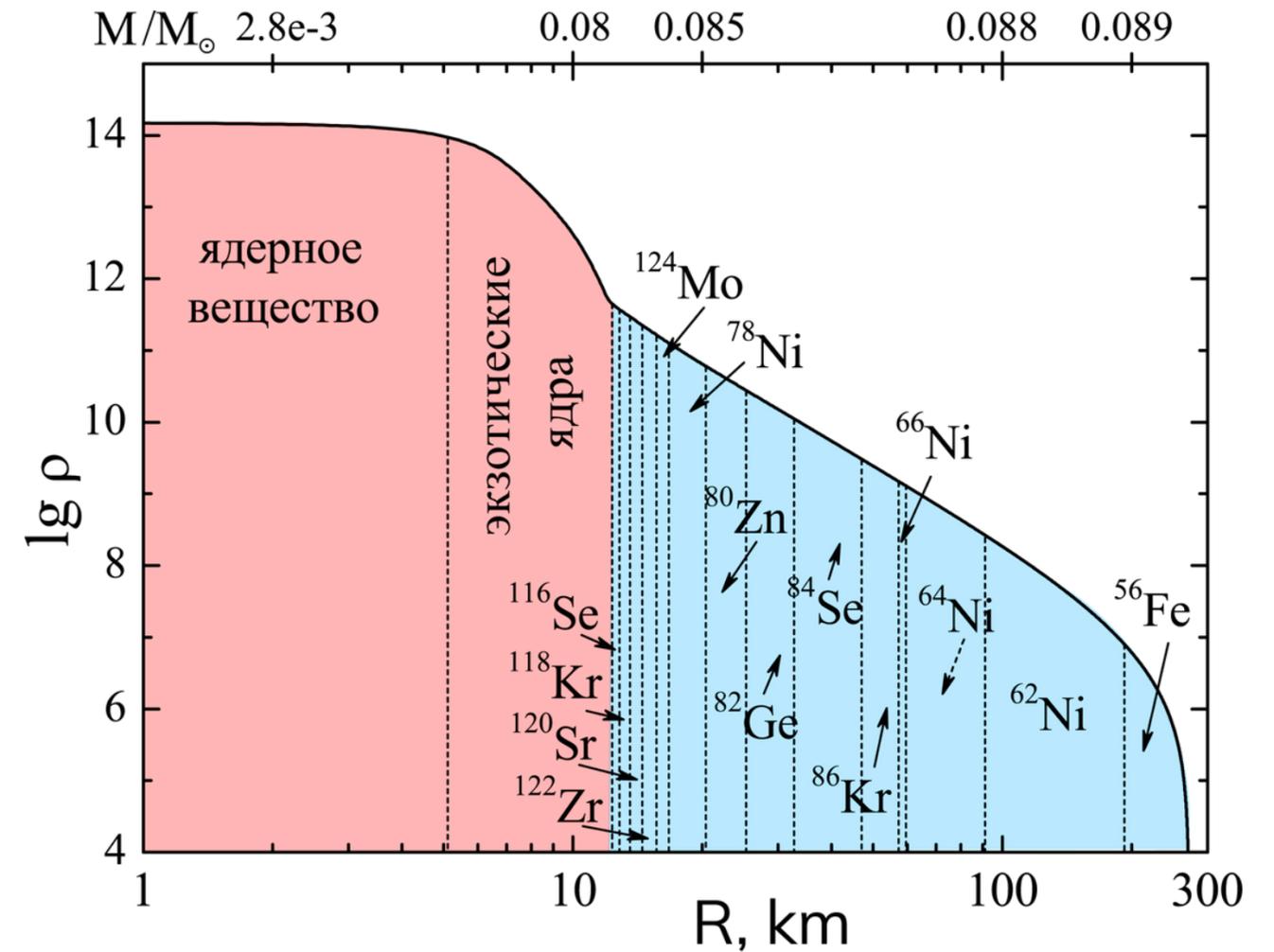
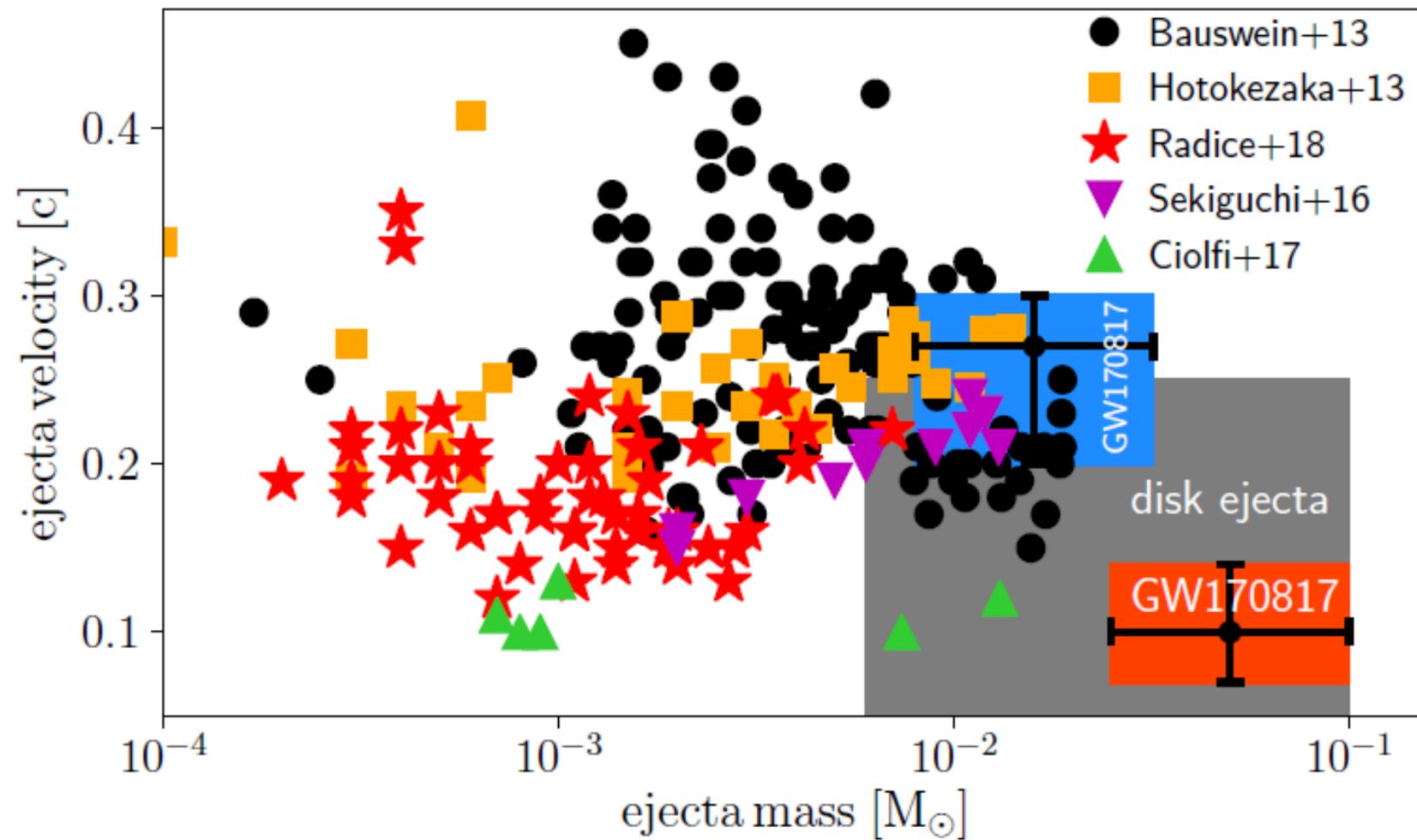


FIG. 7—Time evolution of a system with initial masses 0.8 and 1.3  $M_{\odot}$ . (a) Neutrino and gravitational wave luminosities. (b) Frequency of gravitational wave. (c) Separation of components. (d) Masses of stars.

современные  
аналитические расчеты  
также предсказывают  
время устойчивого  
перетекания вещества  
порядка секунды

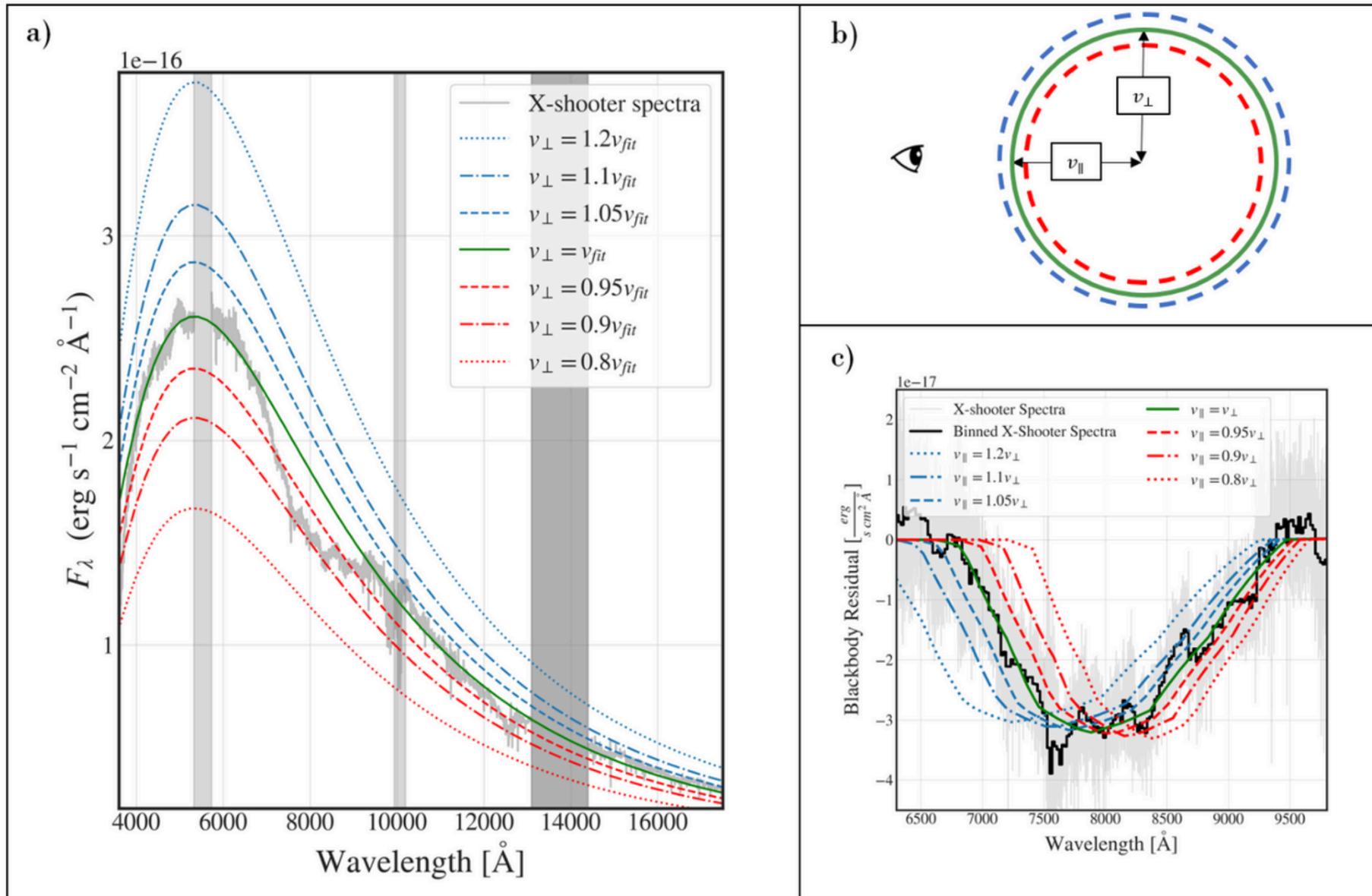
Clark & Eardley, ApJ 215, 311-322 (1977)  
Kramarev & Yudin, MNRAS 525, 3306 (2023)  
Yudin et al., Particles 6, 784-800 (2023)

# БОЛЬШАЯ МАССА ВЫБРОСА КРАСНОЙ КОМПОНЕНТЫ КИЛОНОВОЙ AT2017GFO



Siegel, Eur. Phys. J. A 55, 203 (2019)  
 Blinnikov et al., Astr. Rep. 65, 385-391 (2021)

# СФЕРИЧЕСКАЯ СИММЕТРИЯ ВЫБРОШЕННОГО ВЕЩЕСТВА



$$\Upsilon = \frac{v_\perp - v_\parallel}{v_\perp + v_\parallel}$$

$$\Upsilon = 0.00 \pm 0.02 \quad (1.4 \text{ день})$$

$$\Upsilon = -0.02 \pm 0.02 \quad (2.4 \text{ день})$$

# ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**01**

При близких массах компонентов реализуется сценарий слияния, а при большой асимметрии масс - сценарий обдирания.

**02**

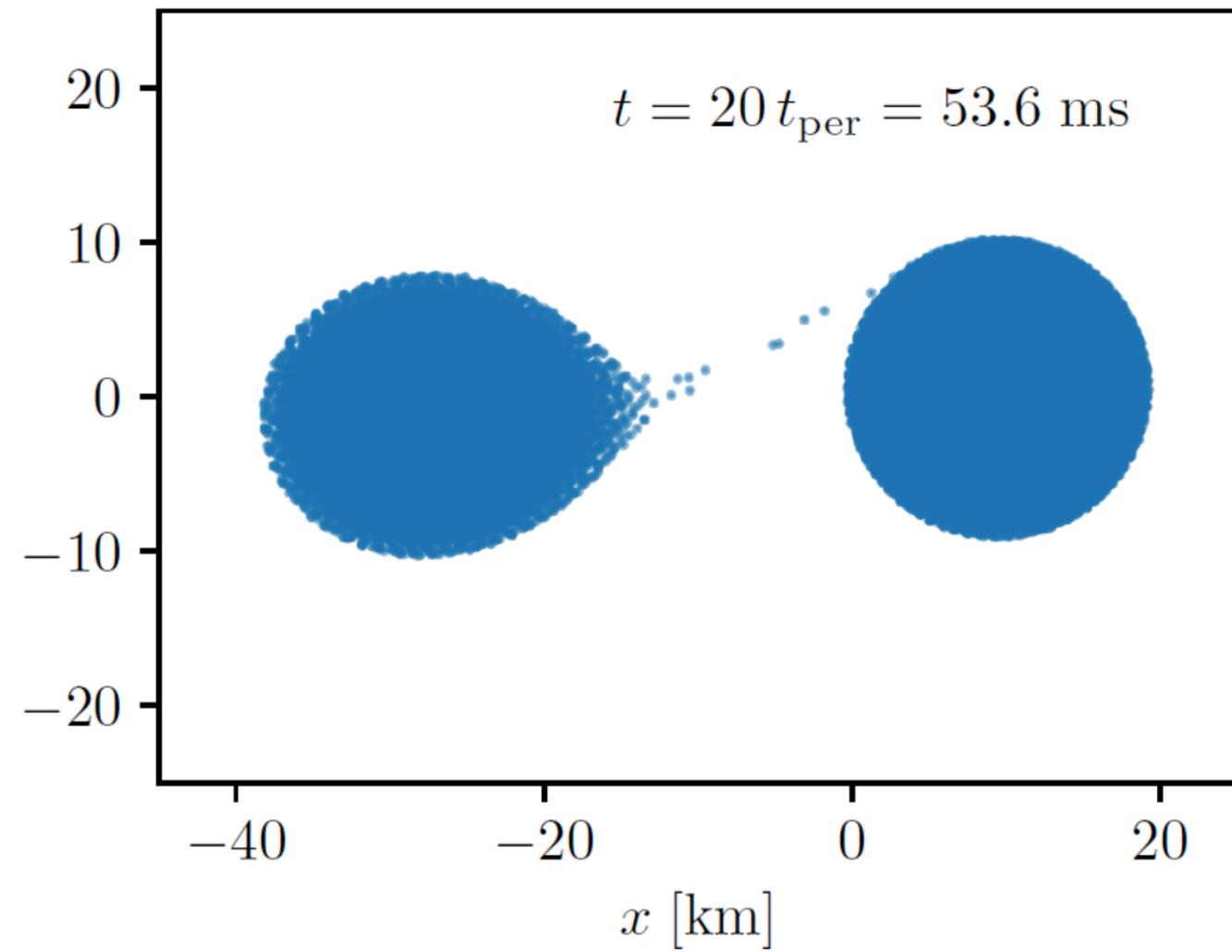
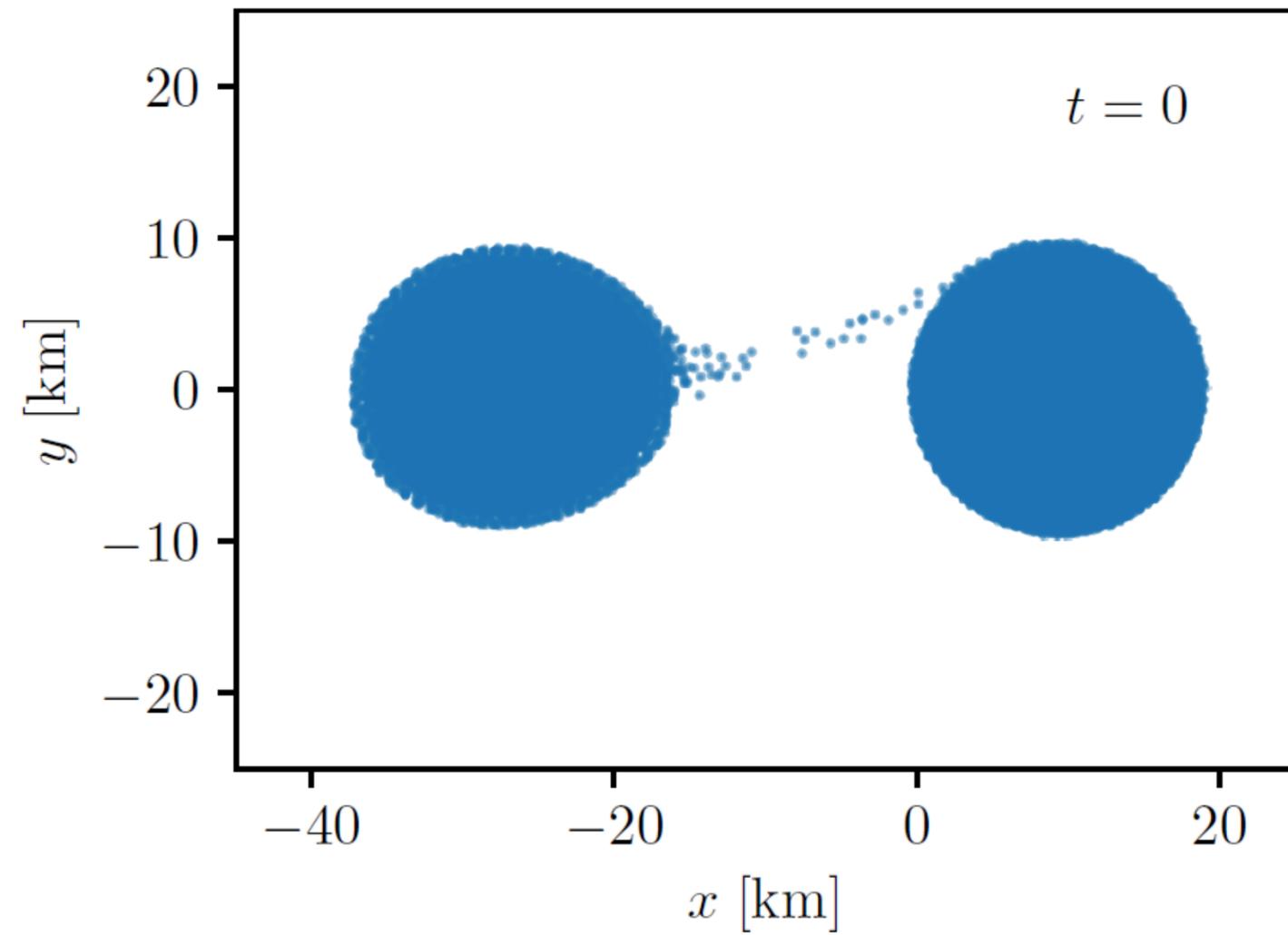
С большой долей вероятности событие GW170817-GRB170817A произошло именно в результате обдирания НЗ.

**03**

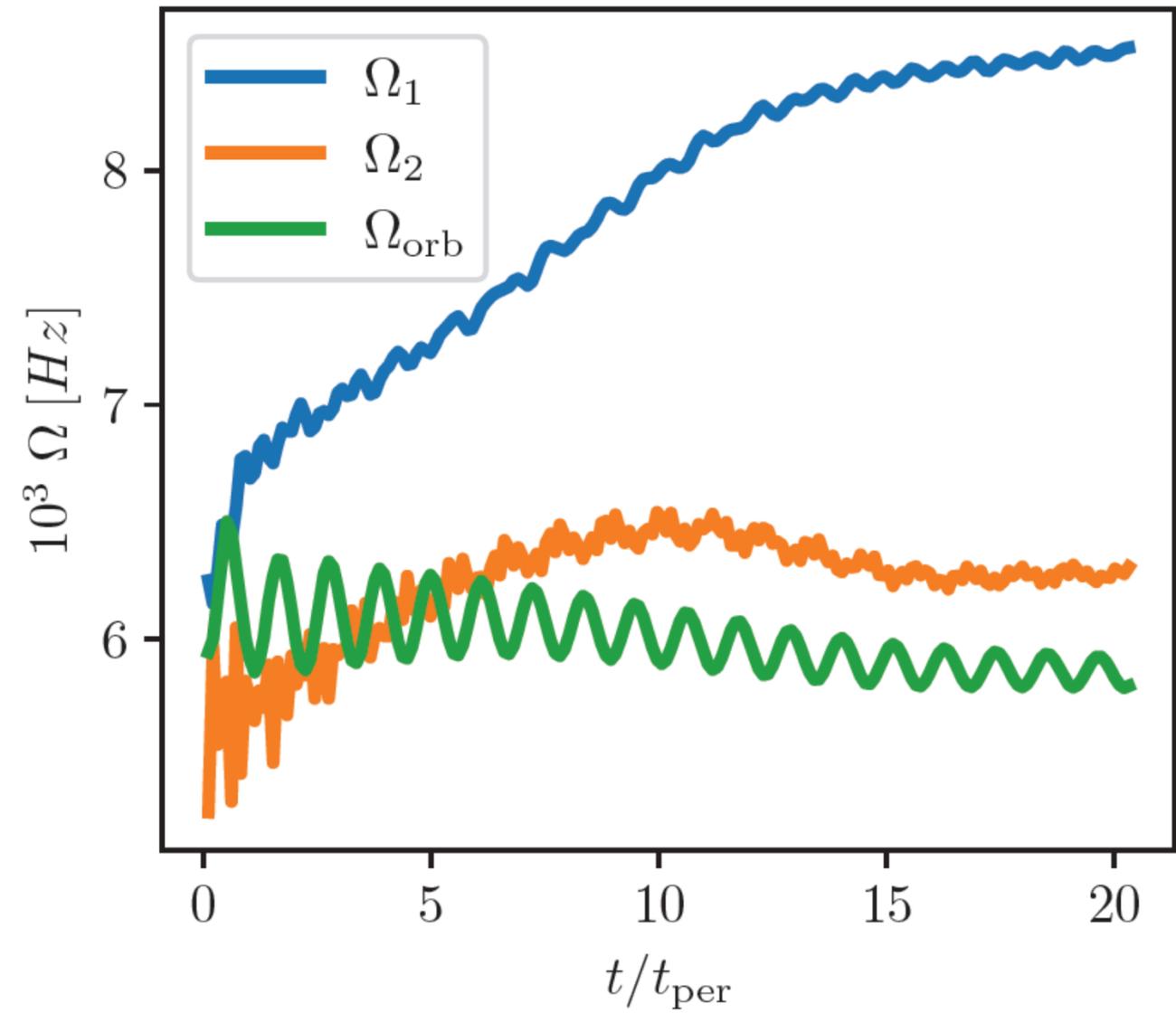
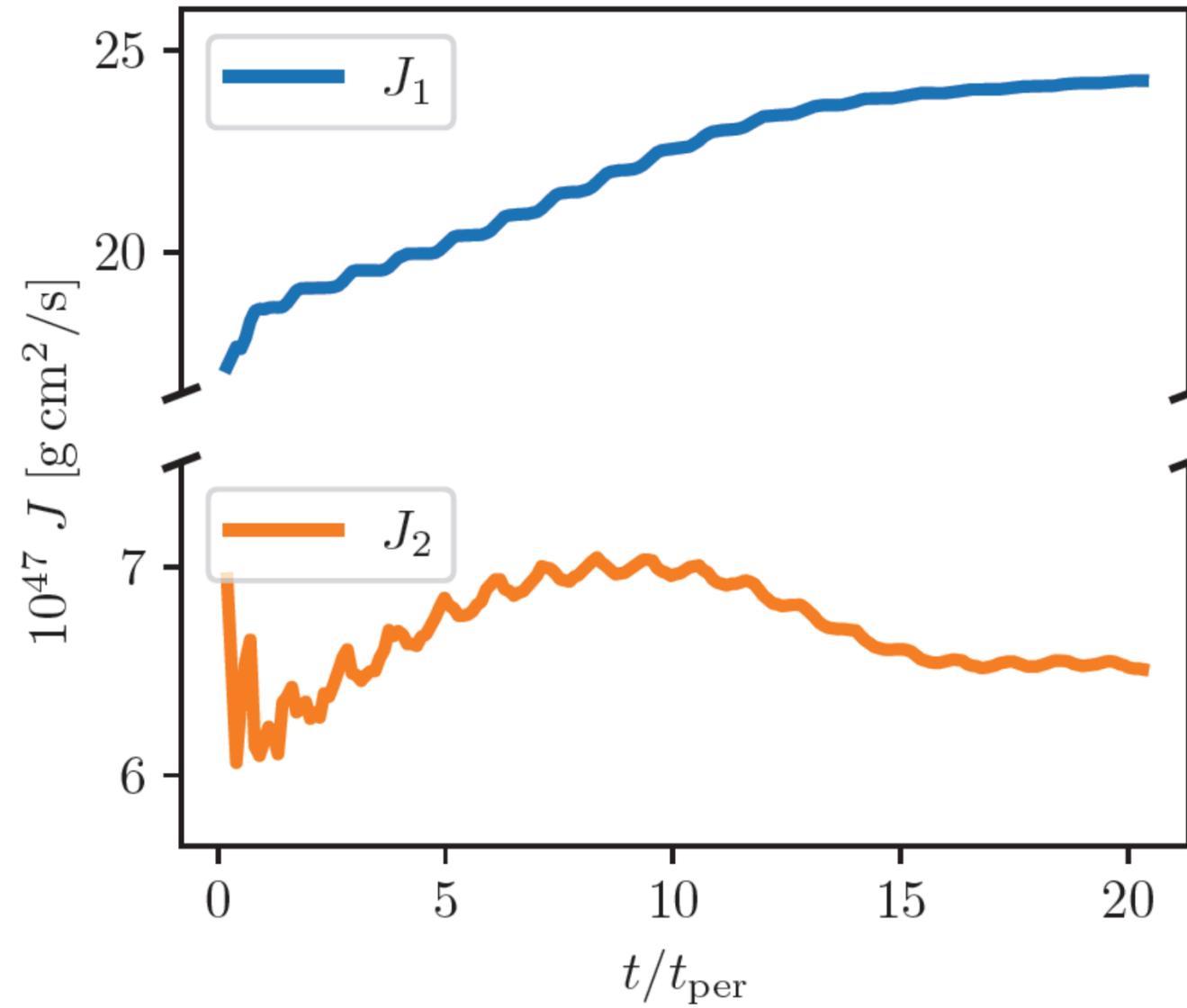
Ожидание новых совместных регистраций гравитационных волн и электромагнитных транзиентов для улучшения теоретических моделей...

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

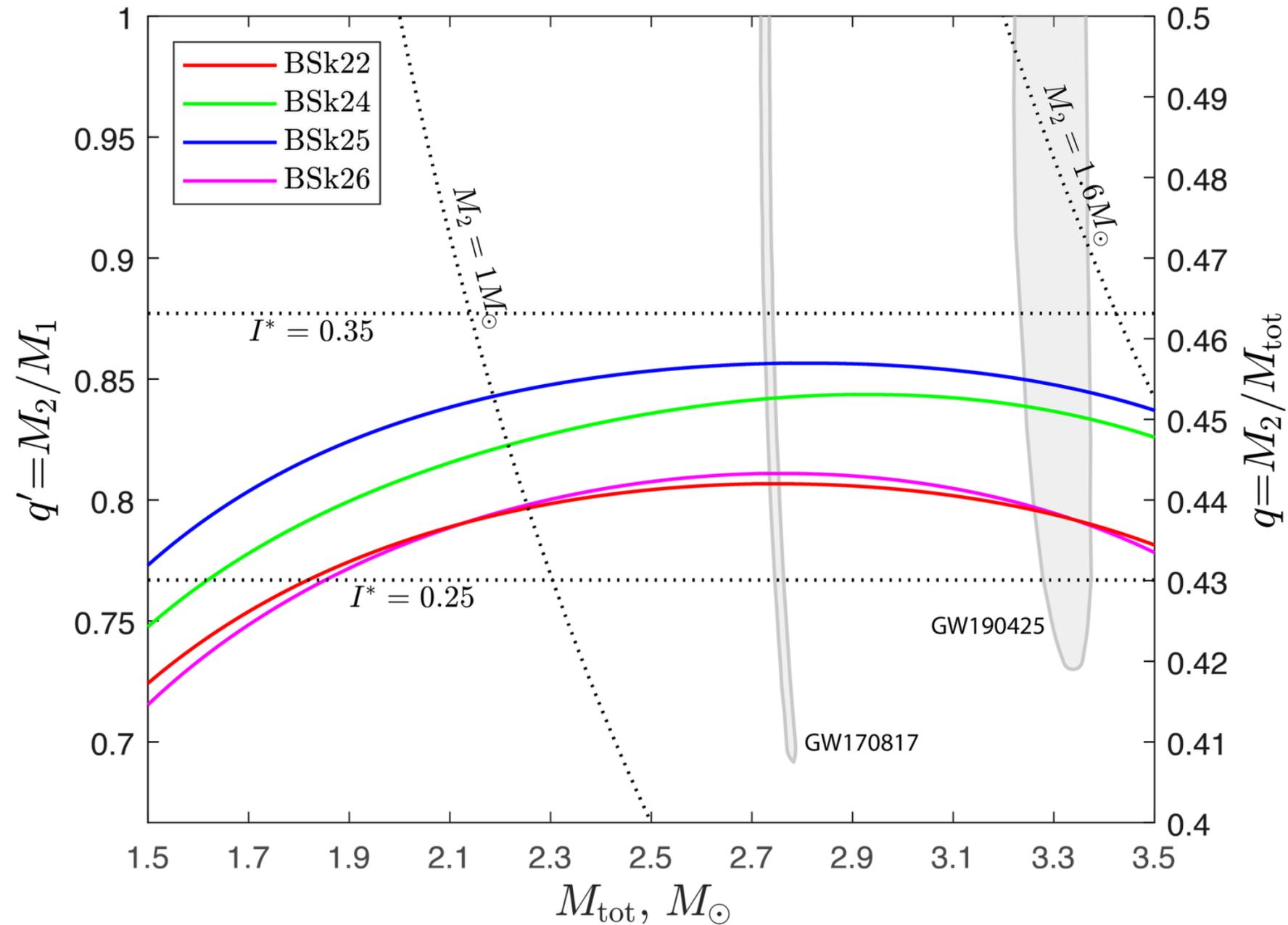
# ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБДИРАНИЯ НЗ



# АККРЕЦИОННАЯ РАСКРУТКА МАССИВНОГО КОМПОНЕНТА



# МАССОВАЯ ГРАНИЦА МЕЖДУ СЦЕНАРИЯМИ ДЛЯ ДВОЙНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

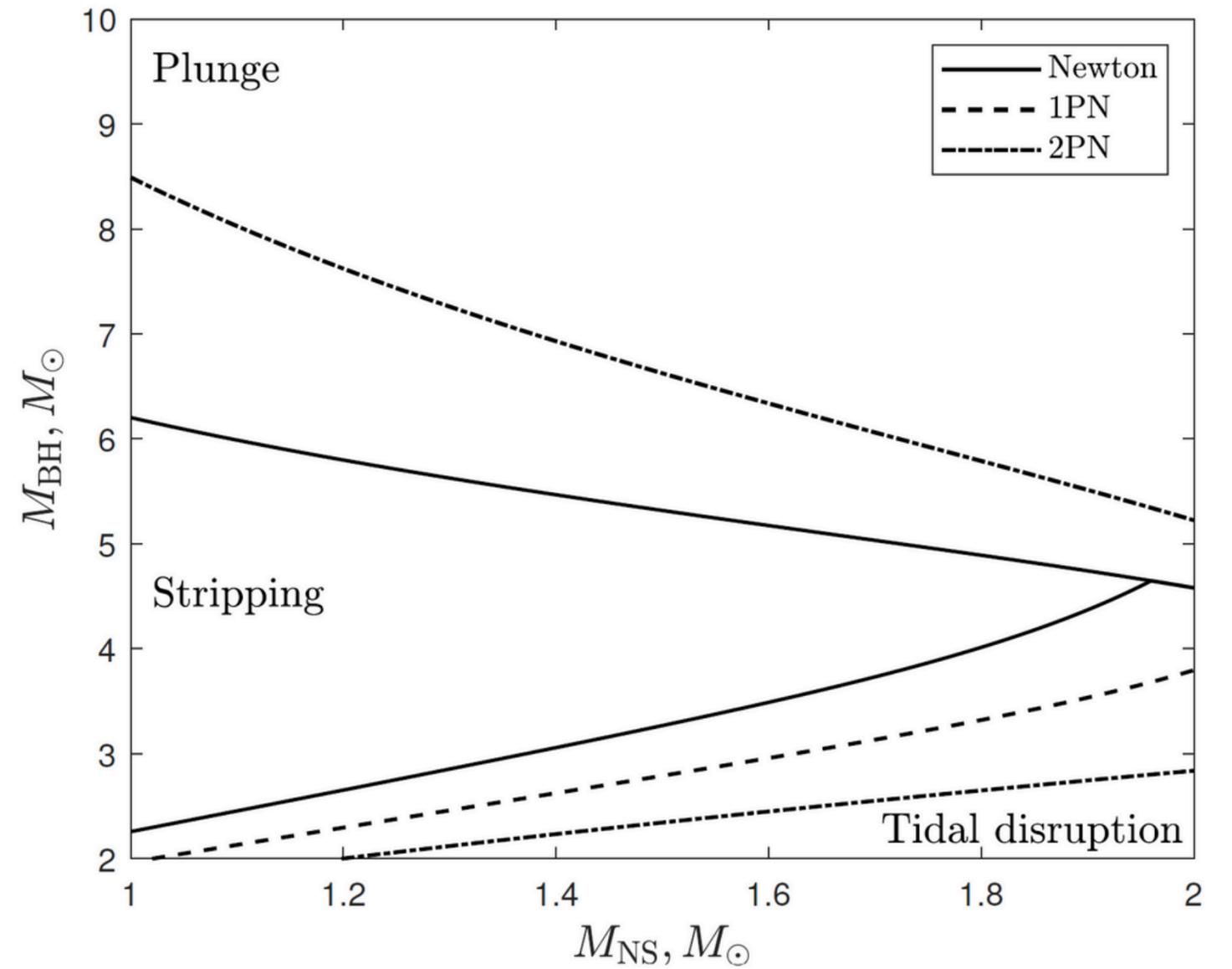
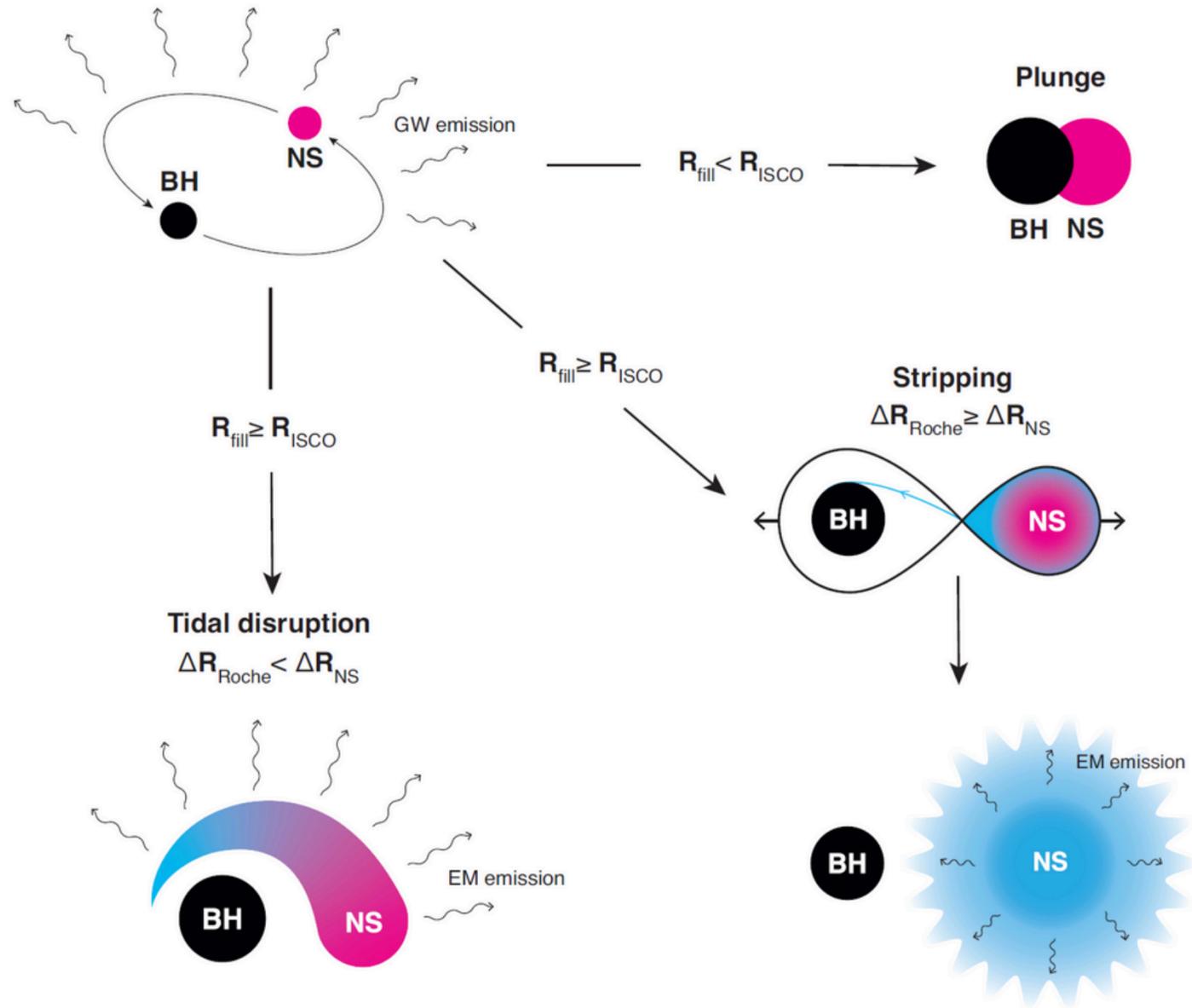


Ньютоновское  
приближение

учет коротации  
маломассивной НЗ

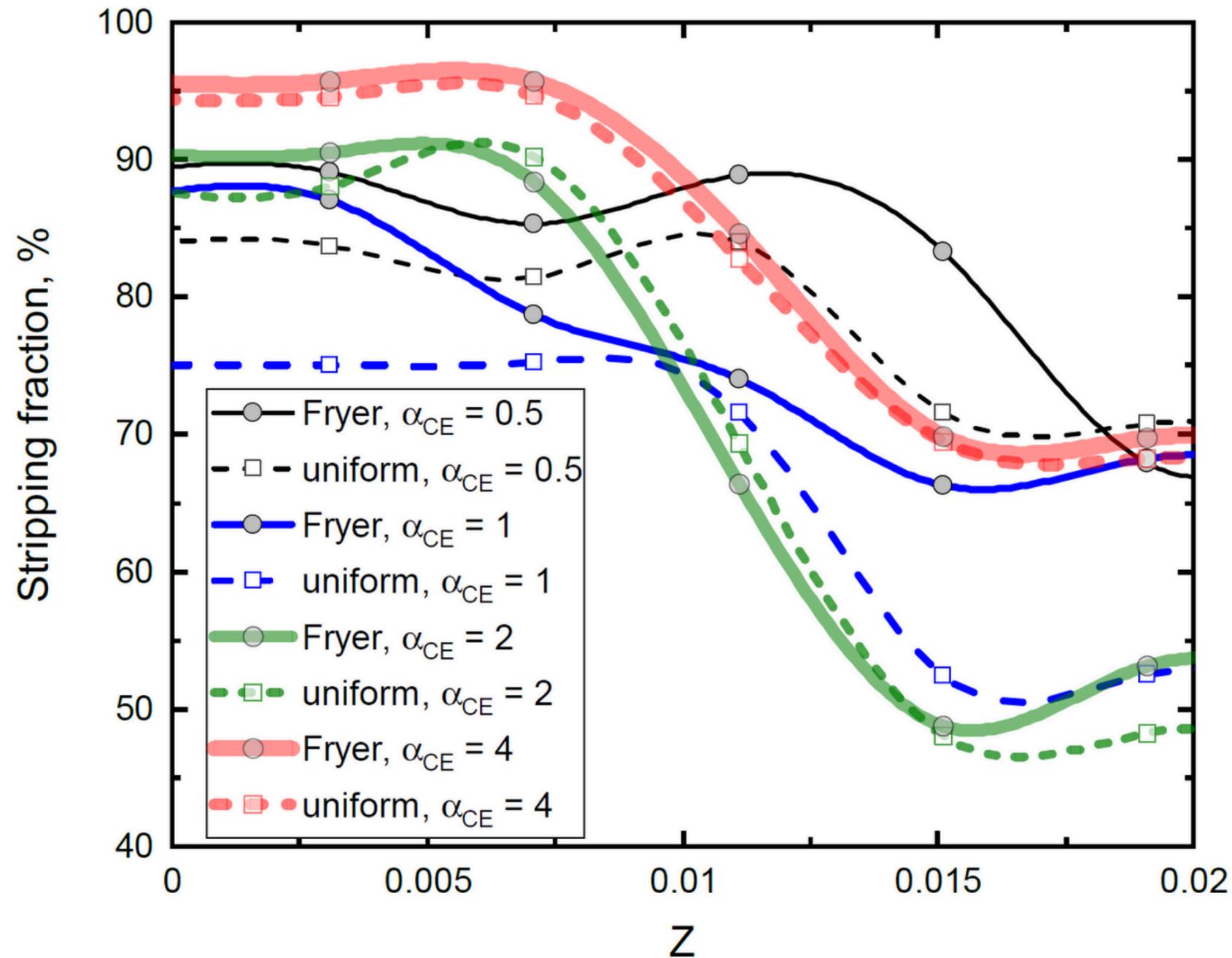
учет аккреционной  
раскрутки массивного  
компонента

# МАССОВАЯ ГРАНИЦА МЕЖДУ СЦЕНАРИЯМИ ДЛЯ СИСТЕМ НЗ-ЧД: УЧЕТ ЭФФЕКТОВ ОТО



Kramarev et al., Astr. Let. 50, 302-316 (2024)

# ПОПУЛЯЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ДОЛИ ЧИСЛА СИСТЕМ, ГДЕ РЕАЛИЗУЕТСЯ МЕХАНИЗМ ОБДИРАНИЯ НЗ



Обдирание НЗ реализуется в 50-90% случаев в зависимости от используемых модельных предположений эволюции тесных двойных систем.

# РОТАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ИМШЕННИКА

