

# Ограничение функции светимости быстрых радиовсплесков по данным CHIME и исследование популяции слабых всплесков

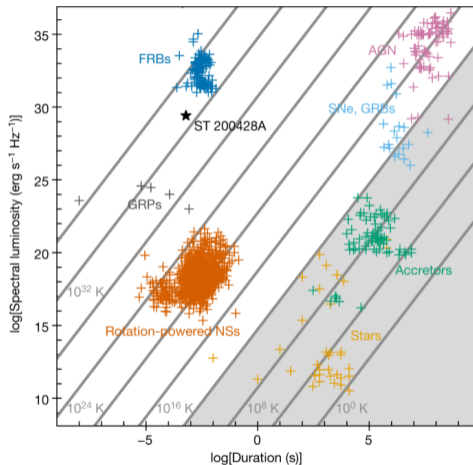
Лебедев Владислав Владимирович  
группа 215

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра физики частиц и космологии  
Научный руководитель: Рубцов Григорий Игоревич

Москва, 2026

# Быстрые радиовсплески

- Быстрый радиовсплеск - короткий радиоимпульс длительностью порядка миллисекунд.
- На диаграмме показана связь длительности и спектральной светимости для разных классов радиоисточников.
- Обычные внегалактические FRB занимают область очень больших светимостей и коротких длительностей.
- Событие ST 200428A, связанное с галактическим FRB 200428, находится существенно ниже обычных внегалактических FRB; в используемой шкале это соответствует примерно  $L \sim 10^{37}$  эрг/с.



Bochenek et al., Nature 587, 59–62 (2020).

# Задача работы

## Главный вопрос

Можно ли описать яркие внегалактические быстрые радиовсплески из каталога CHIME/FRB и слабый галактический всплеск FRB 200428 в рамках одной непрерывной функции светимости?

- Сначала ограничивается яркая часть функции по большому набору событий CHIME/FRB.
- Затем проверяется, какие слабые галактические события такая функция допускает.
- Оцениваются вероятности регистрации событий разных светимостей в Млечном Пути.

## Наблюдательные данные

- каталог CHIME/FRB;
- после отбора:  $N_{\text{obs}} = 2672$  однократных всплеска;
- длительность по датам каталога:

$$T_{\text{cat}} = 1837.29 \text{ дней} = 5.03 \text{ года.}$$

## Модель

- задаётся функция светимости;
- в `frbpoppy` генерируется набор источников;
- применяется модель регистрации CHIME;
- зарегистрированные модельные события сравниваются с каталогом.

# Что называется функцией светимости

Светимость  $L$  в работе - изотропно-эквивалентная радиосветимость всплеска в единицах эрг/с.

Использовалось распределение по логарифму светимости:

$$\psi(L) = \frac{dN}{d \log_{10} L}.$$

Это удобно, потому что светимости быстрых радиовсплесков занимают много порядков величины.

## Связь с распределением по $L$

Если  $\varphi(L) = dN/dL$ , то

$$\psi(L) = L \ln 10 \cdot \varphi(L).$$

Поэтому показатель в  $\psi(L)$  на единицу больше, чем показатель в  $\varphi(L)$ .

# Варианты функций

Светимость можно описывать разными функциями:

- Степенная функция:  $\psi(L) \propto L^p$
- Функция Шехтера:  $\varphi(L) = dN/dL \propto L^\alpha \exp(-L/L^*)$ ;  $L^*$  задаёт светимость, выше которой функция резко подавляется экспонентой
- Составная функция:

$$\psi(L) = C \begin{cases} L^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right), & L_{\text{br}} \leq L \leq L_{\text{max}} \\ L_{\text{br}}^\alpha \exp\left(-\frac{L_{\text{br}}}{L^*}\right) \left(\frac{L}{L_{\text{br}}}\right)^\beta, & L_{\text{min}} \leq L < L_{\text{br}} \end{cases}$$

$L_{\text{br}}$  – точка излома.

# Как выбиралась модель

- Для каждой модели строился зарегистрированный набор событий.
- Затем он сравнивался с реальным каталогом CHIME.
- Учитывались одномерные распределения и двумерное распределение в плоскости  $S/N$ - $DM$ .
- Использовались несколько критериев различия распределений.

## Итог для яркой части

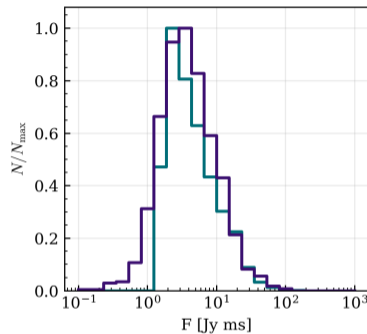
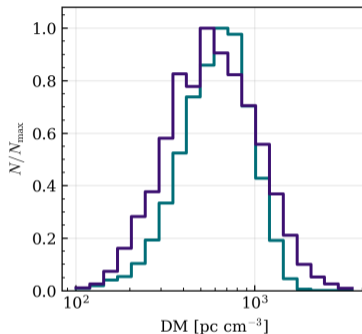
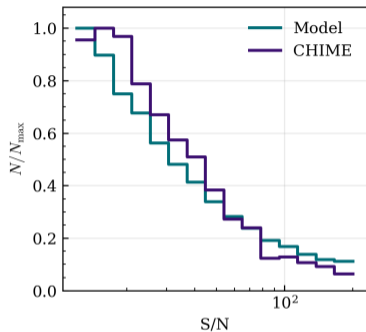
Функция Шехтера с

$$-0.3 \lesssim \alpha \lesssim -0.1,$$

$$L^* \sim 10^{45} \text{ эрг/с}$$

хорошо описывает яркие всплески в диапазоне светимости  $10^{40} - 10^{46}$  эрг/с, согласуясь с каталогом CHIME/FRB. В качестве наилучшей модели выбрано  $\alpha = -0.2$ .

# Сравнение с каталогом CHIME



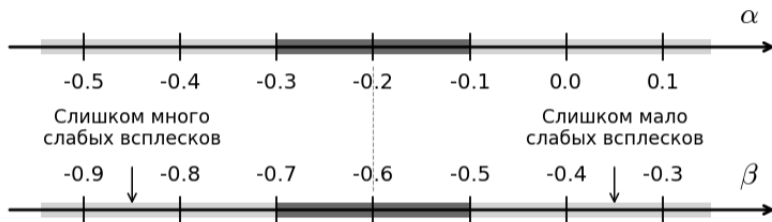
- Сравнились зарегистрированные яркие модельные события.
- Использовались наблюдаемые величины: отношение сигнал/шум, мера дисперсии и флюенс.
- Форма распределений модели воспроизводит основные свойства каталога CHIME, несмотря на упрощённость модели.

## Продление функции светимости вниз

SHIME ограничивает в основном яркие внегалактические события, а FRB 200428 имеет галактическое происхождение и радиосветимость порядка  $10^{37}$  эрг/с. Поэтому он лежит ниже основной космологической области, но не в самом нижнем хвосте модели.

- Слишком крутое продолжение вниз даст чрезмерное число слабых галактических событий.
- Слишком пологое продолжение не позволит согласовать модель с галактической областью светимостей.
- Необходима точка излома, где функция меняет форму.

# Ограничение слабой части



- Слишком отрицательные  $\beta$  дают чрезмерную частоту слабых галактических событий.
- Слишком близкие к нулю  $\beta$  дают недостаточную частоту таких событий.
- Допустимый диапазон: примерно  $-0.7 \lesssim \beta \lesssim -0.5$ ; центральная модель:  $\beta = -0.6$ .

# Итоговая модель функции светимости

$$\psi(L) = C \begin{cases} L^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right), & L_{\text{br}} \leq L \leq 10^{46} \text{ эрг/с} \\ L_{\text{br}}^\alpha \exp\left(-\frac{L_{\text{br}}}{L^*}\right) \left(\frac{L}{L_{\text{br}}}\right)^\beta, & 10^{35} \text{ эрг/с} \leq L < L_{\text{br}} \end{cases}$$

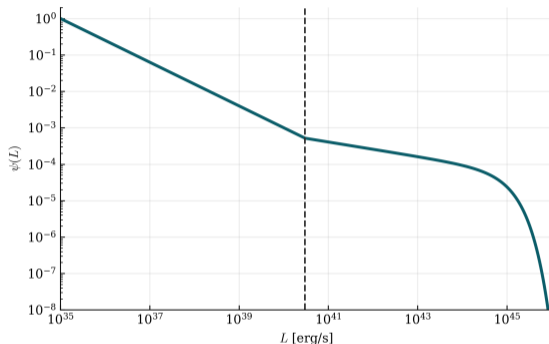
## Параметры в $\psi(L)$

- $L_{\text{br}} = 3 \cdot 10^{40}$  эрг/с;
- $L^* = 10^{45}$  эрг/с;
- $\alpha = -0.2$ ;
- $\beta = -0.6$ .

## Связь с $dN/dL$

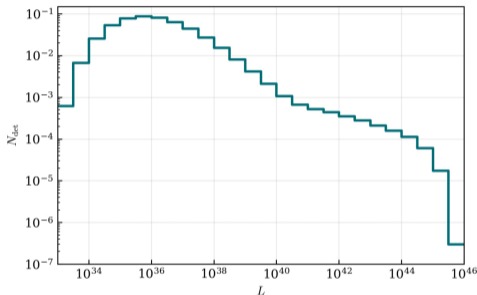
Так как  $\psi(L) = L \ln 10 \varphi(L)$ , показатель яркого участка в  $\varphi(L) = dN/dL$  равен примерно  $-1.2$ , а слабого  $-1.6$ .

# Форма итоговой функции



- Пунктирная линия показывает светимость точки излома  $L_{br}$ .
- На больших светимостях появляется экспоненциальное подавление слишком ярких всплесков.
- Ниже  $L_{br}$  функция переходит в степенной закон с показателем  $\beta = -0.6$ .

# Распределение зарегистрированных галактических событий



- График показывает ожидаемое число галактических событий, зарегистрированных за 10 лет в логарифмических интервалах светимости.
- Максимум распределения приходится на область  $10^{35} - 10^{36}$  эрг/с.
- Основной вклад в ожидаемые регистрации даёт диапазон  $10^{35} - 10^{38}$  эрг/с; при больших светимостях число зарегистрированных событий быстро уменьшается.

# События типа FRB 200428

Для диапазона светимостей

$$10^{36} \leq L \leq 10^{38} \text{ эрг/с}$$

при  $\beta = -0.6$  получено:

## Регистрация

Внутренняя частота:  $R = 6.25 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Вероятность за 10 лет:  $P_{10} = 0.196$ .

Вероятность увидеть хотя бы один галактический всплеск из этого диапазона составляет  $\approx 20\%$ .

# Вероятности регистрации в Млечном Пути

Число редких независимых регистраций за фиксированное время описывается пуассоновским распределением: события считаются независимыми, а средний темп регистрации постоянным на интервале  $T$ .

$$\lambda(T) = R_{\text{det}} T, \quad P(N \geq 1) = 1 - e^{-\lambda}.$$

Диапазон $L$ , эрг/с	$P(N \geq 1)$ за 10 лет	Среднее ожидание
$10^{35} - 10^{36}$	0.152	60.5 лет
$10^{36} - 10^{38}$	0.196	46.0 лет
$10^{38} - 10^{40}$	0.029	334 года
$10^{35} - 10^{40}$	0.338	24.2 года
$10^{40} - 10^{42}$	0.0027	$3.69 \cdot 10^3$ лет
$10^{42} - 10^{46}$	0.0012	$8.36 \cdot 10^3$ лет

Для отдельных диапазонов максимум получается в  $10^{36} - 10^{38}$  эрг/с, а весь интервал  $10^{35} - 10^{40}$  эрг/с даёт среднее ожидание около 24 лет.

# Согласие с литературой и новое

## Согласуется с известным

- яркая часть лучше описывается функцией с подавлением на больших светимостях;
- характерная светимость порядка  $10^{45}$  эрг/с лежит в области, обсуждаемой в работах о функции светимости FRB;
- FRB 200428 имеет радиосветимость порядка  $10^{37}$  эрг/с, что согласуется с предсказаниями модели.

## Получено в работе

- построена непрерывная функция светимости от  $10^{35}$  до  $10^{46}$  эрг/с;
- ограничены диапазоны сильного показателя:  $-0.3 \lesssim \alpha \lesssim -0.1$  и слабого показателя:  $-0.7 \lesssim \beta \lesssim -0.5$ ;
- рассчитаны вероятности регистрации галактических всплесков для разных диапазонов светимости;
- показана совместимость модели с тем, что среди галактических быстрых радиовсплесков слабые наиболее вероятны для регистрации.

# Выводы

- 1 Данные CHIME/FRB и FRB 200428 можно согласованно описать одной составной функцией светимости.
- 2 Предпочтительная модель:

$$\alpha = -0.2, \quad \beta = -0.6, \quad L_{\text{br}} = 3 \cdot 10^{40} \text{ эрг/с}, \quad L^* = 10^{45} \text{ эрг/с}.$$

- 3 Физическая частота слабых галактических всплесков может быть заметной, но регистрация зависит от светимости.
- 4 Для диапазона FRB 200428,  $10^{36} - 10^{38}$  эрг/с, вероятность регистрации за 10 лет составляет около 20%.
- 5 Наибольший ожидаемый вклад в регистрации по выбранным диапазонам дают галактические всплески  $10^{36} - 10^{38}$  эрг/с.

Спасибо за внимание

# Нормировка частоты

После моделирования определяется эффективность регистрации:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{det}}}{N_{\text{src}}}.$$

Если за время  $T_{\text{cat}}$  зарегистрировано  $N_{\text{obs}}$  событий, то внутренняя частота оценивается как

$$R = \frac{N_{\text{obs}}}{\varepsilon T_{\text{cat}}}.$$

В работе использовано:

$$T_{\text{cat}} = 5.03 \text{ года.}$$

Поэтому частота  $R = 6.25 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$  для диапазона  $10^{36} - 10^{38} \text{ эрг/с}$  уже учитывает пятилетнюю длительность каталога CHIME.

# Почему не сравнивались светимости CHIME напрямую

- Каталог CHIME напрямую содержит наблюдаемые величины:  $S/N$ ,  $DM$ , флюенс.
- Для светимости нужно знать расстояние до источника.
- Для большинства однократных FRB точное расстояние неизвестно: нет надежной локализации и красного смещения.
- Оценивать расстояние только по  $DM$  можно, но это добавляет модель межгалактической среды и большие неопределенности.
- Поэтому корректнее сравнивать модель и каталог в пространстве наблюдаемых величин, а светимости анализировать внутри модели.

# Как понятно, что события внегалактические

- Основной наблюдательный признак - мера дисперсии  $DM$ .
- Для многих событий CHIME полная  $DM$  существенно превышает ожидаемый вклад электронов Млечного Пути вдоль того же направления.
- Избыточная  $DM$  указывает, что значительная часть пути сигнала проходит вне нашей Галактики.
- Это позволяет классифицировать события как внегалактические статистически.
- Но избыточная  $DM$  не дает точного расстояния до каждого источника, поэтому прямые светимости CHIME не использовались как наблюдательная гистограмма.

# Почему исключены повторяющиеся источники

- Повторяющиеся источники и однократные события имеют разные наблюдательные смещения.
- Для повторяющихся источников важны число повторов, время наблюдения области неба и критерий объединения всплесков в один источник.
- Если смешать их с однократными событиями, распределения по  $S/N$ ,  $DM$  и флюенсу будут зависеть не только от функции светимости, но и от статистики повторов.
- Поэтому в основной набор оставлены однократные всплески: это делает сравнение с моделью более однородным.

# Функция Шехтера

Для яркой части использовалась функция Шехтера:

$$\varphi(L) \propto L^{\alpha'} \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right).$$

- Степенной множитель задает наклон распределения.
- Экспонента подавляет слишком яркие события.
- Характерная светимость  $L^*$  задает масштаб, после которого начинается резкий спад.

В записи по логарифму светимости:

$$\psi(L) = \frac{dN}{d \log_{10} L} \propto L^{\alpha'+1} \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right).$$

# Почему показатели отличаются на единицу

Если распределение записано как  $\varphi(L) = dN/dL$ , то число событий в интервале  $dL$  равно

$$dN = \varphi(L)dL.$$

Если перейти к логарифмическому интервалу, то

$$d \log_{10} L = \frac{dL}{L \ln 10}, \quad dL = L \ln 10 d \log_{10} L.$$

Поэтому

$$\psi(L) = \frac{dN}{d \log_{10} L} = L \ln 10 \varphi(L).$$

Следовательно, если  $\varphi(L) \propto L^{-1.2}$ , то  $\psi(L) \propto L^{-0.2}$ .

# Бинирование распределений

- Бины задавались одинаковыми для каталога и модели.
- Для величин с большим динамическим диапазоном использовались логарифмические интервалы:  $S/N$ ,  $DM$ , флюенс.
- Число интервалов выбиралось как компромисс: достаточно много, чтобы видеть форму распределения, но не настолько много, чтобы большинство бинов было пустым.
- Для двумерной проверки использовалась та же идея в плоскости  $\log(S/N)$ - $\log(DM)$ .

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_j n_j}$$

Здесь  $n_i$  - число событий в бине, а  $p_i$  - нормированная доля событий.

# Критерий Колмогорова-Смирнова

Для набора событий строится накопленная функция распределения:

$$F(x) = P(X \leq x).$$

Расстояние Колмогорова-Смирнова:

$$D_{KS} = \max_x |F_{\text{obs}}(x) - F_{\text{mod}}(x)|.$$

- Оно показывает максимальное расхождение между накопленными распределениями.
- Не зависит напрямую от выбора бинов.
- Хорошо видит общий сдвиг или различие формы распределения.
- Поэтому получило большой вес в одномерном сравнении.

# Расстояние Йенсена-Шеннона

Для двух нормированных гистограмм  $p_i$  и  $q_i$  вводится среднее распределение:

$$m_i = \frac{p_i + q_i}{2}.$$

В вычислениях использовалось расстояние Йенсена-Шеннона:

$$D_{JS} = \frac{1}{2} \sum_i p_i \log_2 \frac{p_i}{m_i} + \frac{1}{2} \sum_i q_i \log_2 \frac{q_i}{m_i}.$$

- Оно сравнивает форму двух гистограмм.
- Это расстояние симметрично.
- Ранжирование моделей не меняется при фиксированном основании логарифма.

# Полная вариация

Для нормированных гистограмм:

$$D_{\text{TV}} = \frac{1}{2} \sum_i |p_i - q_i|.$$

- Это простая мера того, какая доля распределения находится в разных бинах.
- Если две гистограммы совпадают,  $D_{\text{TV}} = 0$ .
- Если распределения не пересекаются,  $D_{\text{TV}} = 1$ .
- В работе это дополнительная проверка формы гистограмм.

# Расстояние Вассерштейна

Расстояние Вассерштейна можно понимать как средний сдвиг, нужный для превращения одного распределения в другое:

$$D_W = \langle |Q_{\text{obs}}(u) - Q_{\text{mod}}(u)| \rangle_u,$$

где  $Q(u)$  - квантильная функция.

Для сравнения разных физических величин использовалась нормировка:

$$D'_W = \frac{D_W}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}.$$

Если величина сравнивалась в логарифмическом масштабе, нормировка выполнялась в том же логарифмическом пространстве.

# Пуассоновское отклонение для двумерных бинов

Для двумерной гистограммы  $S/N$ -DM ожидание в бине:

$$\mu_{ij} = N_{\text{obs}} r_{ij}^{\text{mod}}.$$

Пуассоновское отклонение:

$$D_P = \frac{2}{N_{\text{obs}}} \sum_{ij} \left[ \mu_{ij} - h_{ij}^{\text{obs}} + h_{ij}^{\text{obs}} \ln \frac{h_{ij}^{\text{obs}}}{\mu_{ij}} \right].$$

Если  $h_{ij}^{\text{obs}} = 0$ , логарифмическое слагаемое считается равным нулю, потому что  $\lim_{h \rightarrow 0} h \ln(h/\mu) = 0$ .

# Итоговый статистический балл

Для одномерных распределений:

$$S_{1D} = 0.35D_{KS} + 0.25D_{JS} + 0.15D_{TV} + 0.20D'_W + 0.05D_{med}.$$

Для двумерного распределения  $S/N$ - $DM$ :

$$S_{2D} = 0.60D_P + 0.20D_{JS} + 0.10D_{TV} + 0.10D_{cen}.$$

Общий критерий:

$$S_{obs} = \frac{1.5S_{2D} + 0.8S_{1D}(S/N) + 0.8S_{1D}(DM) + 0.35S_{1D}(F)}{1.5 + 0.8 + 0.8 + 0.35}.$$

# Как выбирались веса

- Веса задавались до финального выбора модели как техническая схема ранжирования.
- Главный принцип: больший вес получает критерий, который проверяет более информативную структуру данных.
- Поэтому двумерная картина  $S/N-DM$  весит больше одномерных распределений.
- В одномерной части наибольший вес у Колмогорова-Смирнова, потому что он устойчиво проверяет накопленную форму распределения.
- Флюенс имеет меньший вес, так как используется как дополнительная, а не основная проверка.

# Почему не использовался только один тест

- Один тест обычно чувствителен только к одному типу отличий.
- Критерий Колмогорова-Смирнова хорошо видит накопленное расхождение, но не всегда удобен для двумерных гистограмм.
- Йенсен-Шеннон и полная вариация работают с формой бинированных распределений.
- Вассерштейн хорошо видит систематический сдвиг.
- Пуассоновское отклонение естественно для счетов событий в двумерных бинах.

# Главные ограничения работы

- `frbpoppy` задает популяцию через выбранные аналитические распределения: расстояния, светимости, меры дисперсии, ширины импульсов, спектральные индексы.
- Это сильное упрощение реальной популяции: не моделируются подробно физика источника, среда вокруг него и возможные корреляции между параметрами. Геометрия распределения источников в локальном масштабе так же является упрощённой.
- Модель регистрации CHIME в `frbpoppy` использует параметры обзора и луча телескопа, но не воспроизводит всю реальную цепочку поиска сигналов и отбора кандидатов.
- Поэтому сравнение с CHIME является сравнением с приближенной моделью наблюдений, а не с полной внутренней моделью эксперимента.
- Локальная галактическая часть опирается прежде всего на единственное событие FRB 200428.

# Что в работе можно считать новым

- Построена единая непрерывная функция светимости, связывающая яркие внегалактические события CHIME и слабый галактический FRB 200428.
- Получен допустимый диапазон наклона слабой части:  $-0.7 \lesssim \beta \lesssim -0.5$ .
- Для итоговой модели рассчитаны вероятности регистрации галактических всплесков в разных диапазонах светимости.
- Показано, какой диапазон галактических светимостей дает наибольший ожидаемый вклад в регистрацию.