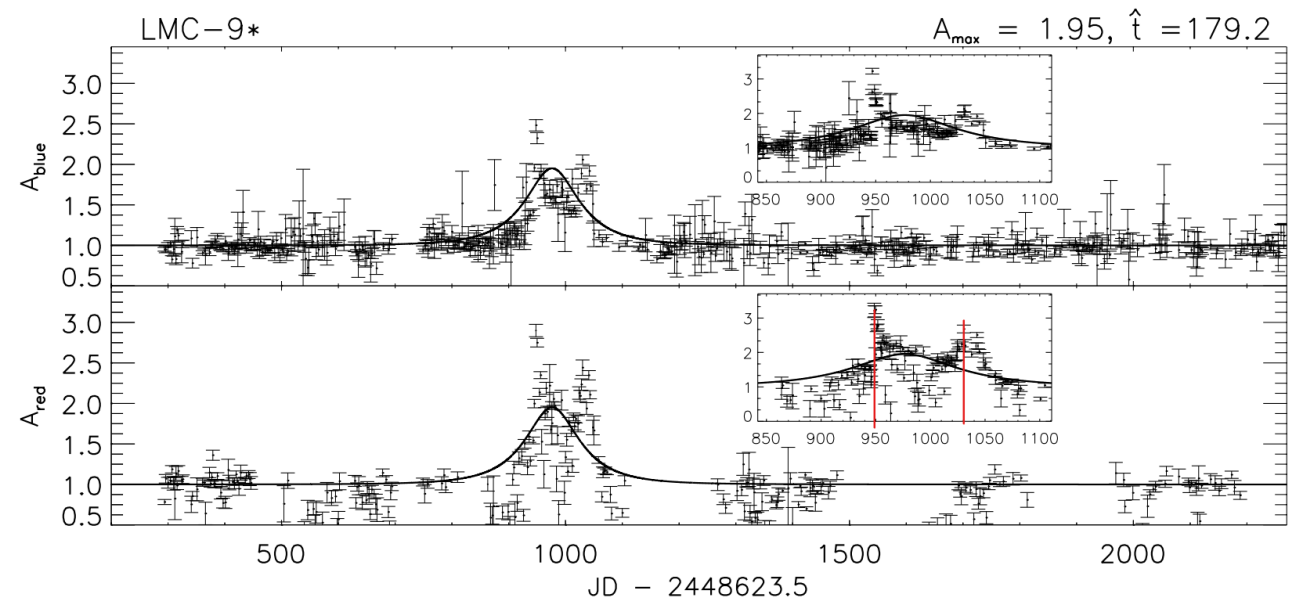




СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР ПО ДАННЫМ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ

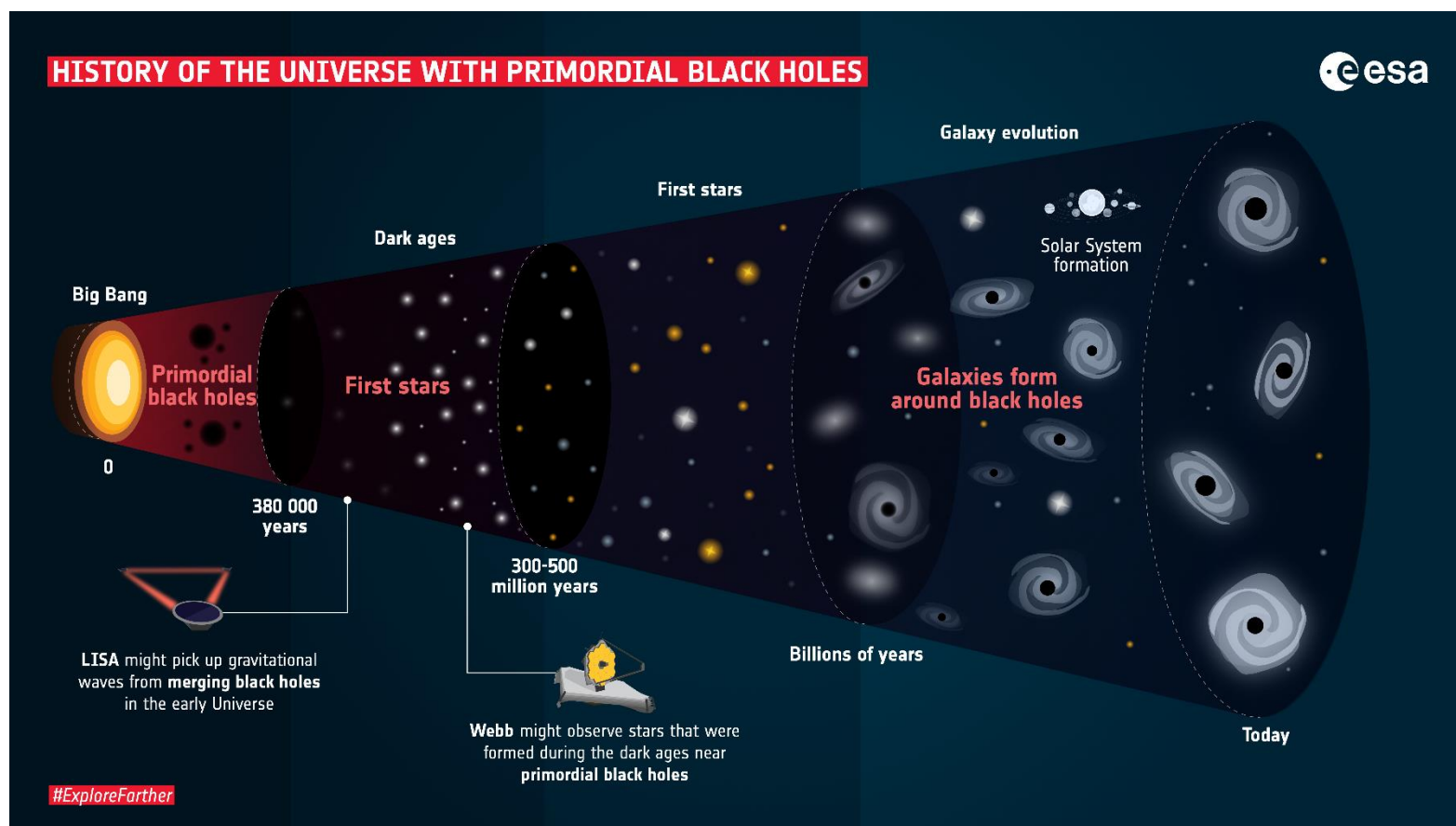
Мучкинова Б.Ю.

Научный руководитель: Шлепкина Е.С.

Научный консультант : Белоцкий К.М

20.05.2025

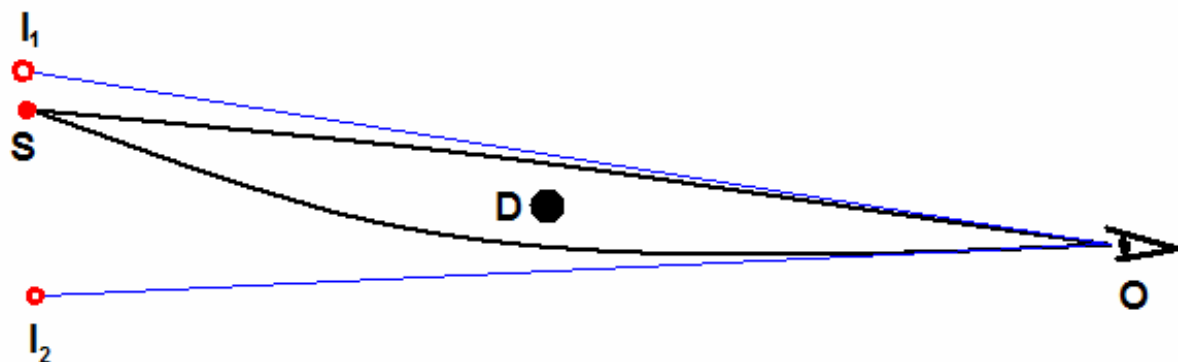
Первичные черные дыры



ПЧД могут объяснить:

1. природу скрытой массы;
2. происхождение ранних квазаров, $Z = 10$;
3. данные LIGO/Virgo/KAGRO.

Гравитационное микролинзирование



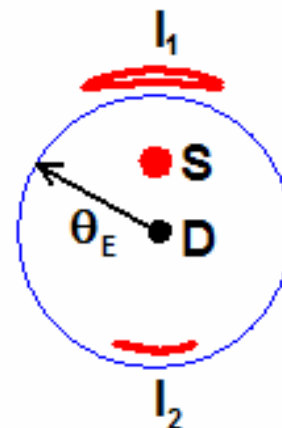
$$\theta_E^2 = \frac{4GM_D}{c^2} \frac{l_{SD}}{l_{DO}l_{SO}} = 2r_{gD} \left(\frac{1}{l_{DO}} - \frac{1}{l_{SO}} \right)$$

угол Хвольсона-Эйнштейна

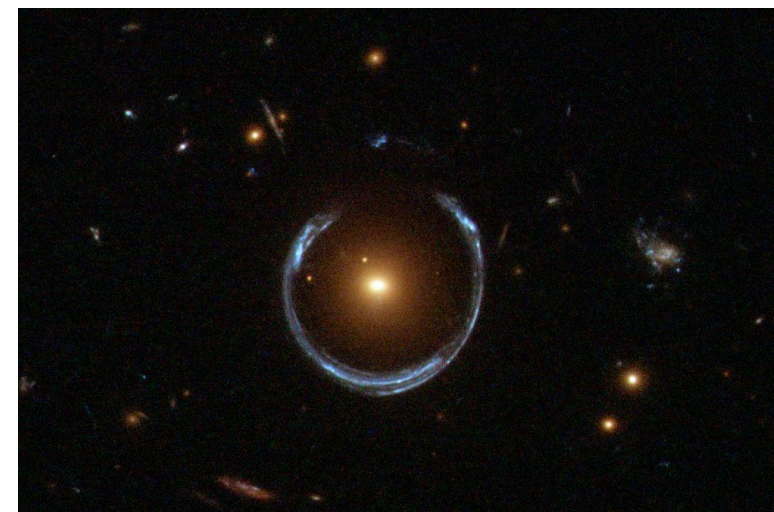
$$\mu = \frac{\theta_I d\theta_I}{\theta_S d\theta_S} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\theta}{\theta_S} + \frac{\theta_S}{\Delta\theta} \right)$$

усиление интенсивности

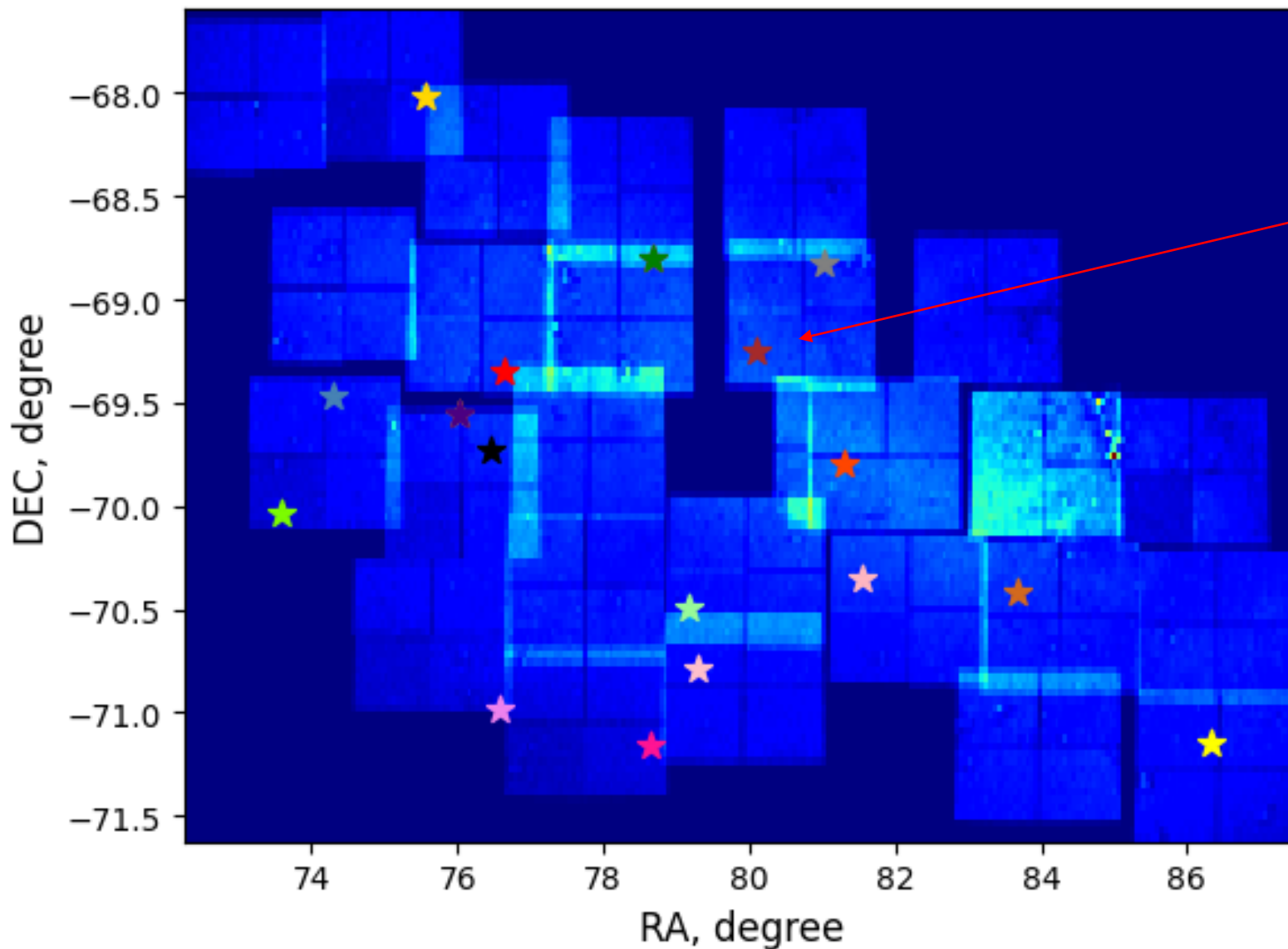
$$\Delta\theta = \sqrt{\theta_S^2 + 4\theta_E^2}$$



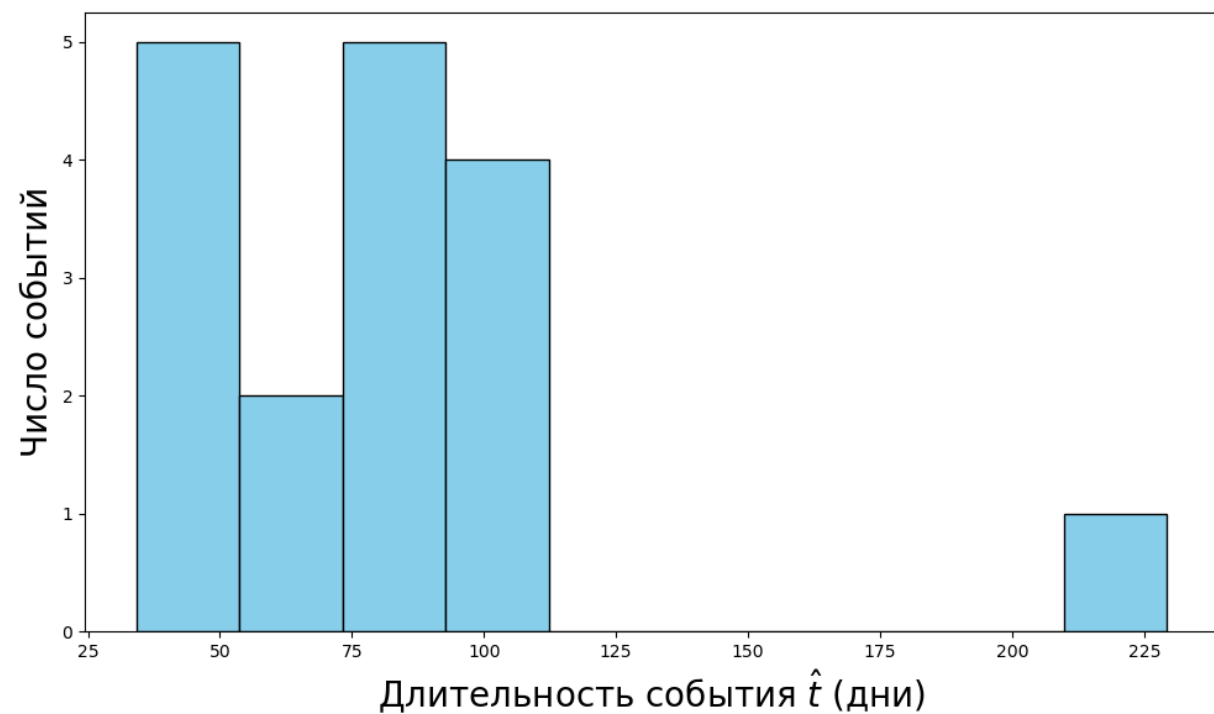
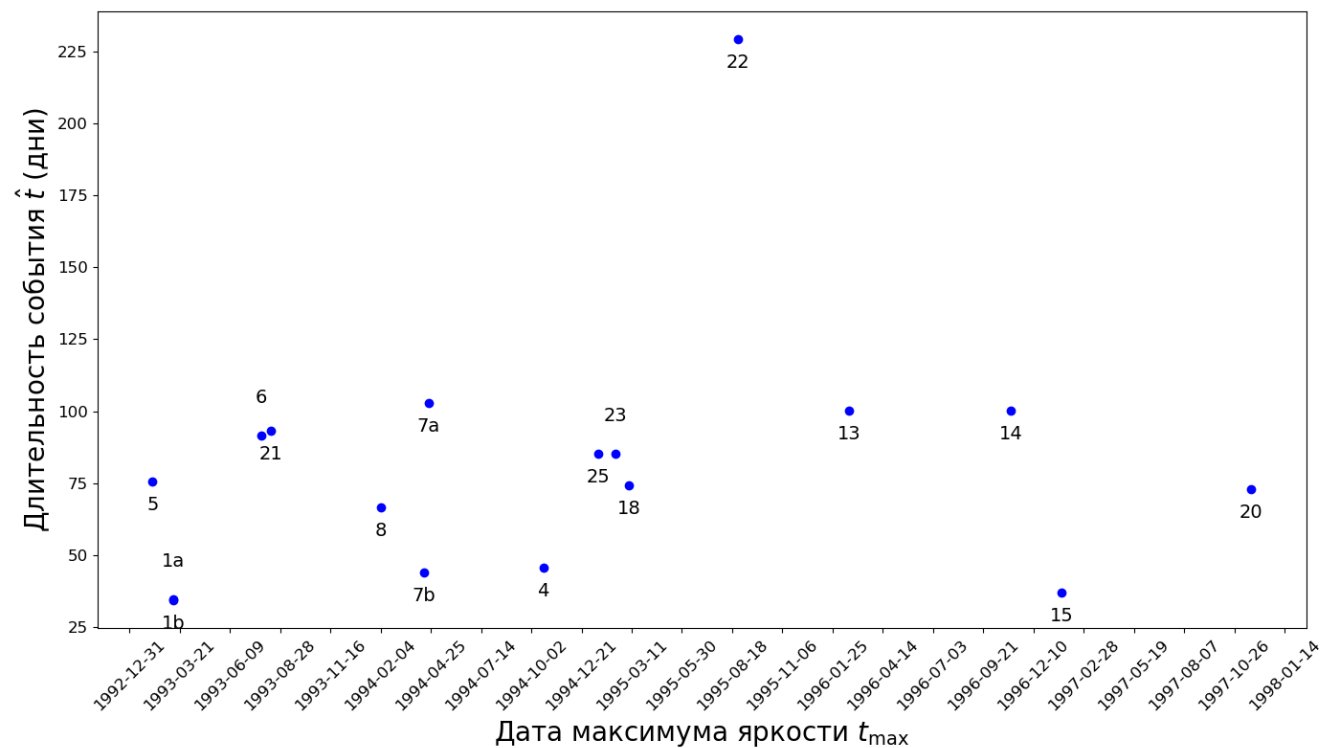
круг
Хвольсона-
Эйнштейна
(конус)



Данные МАСНО



Данные МАСНО



Массовое распределение ПЧД

1. Дельта-функция (одионочная масса):

$$f(m) = \delta(m - M_{\odot})$$

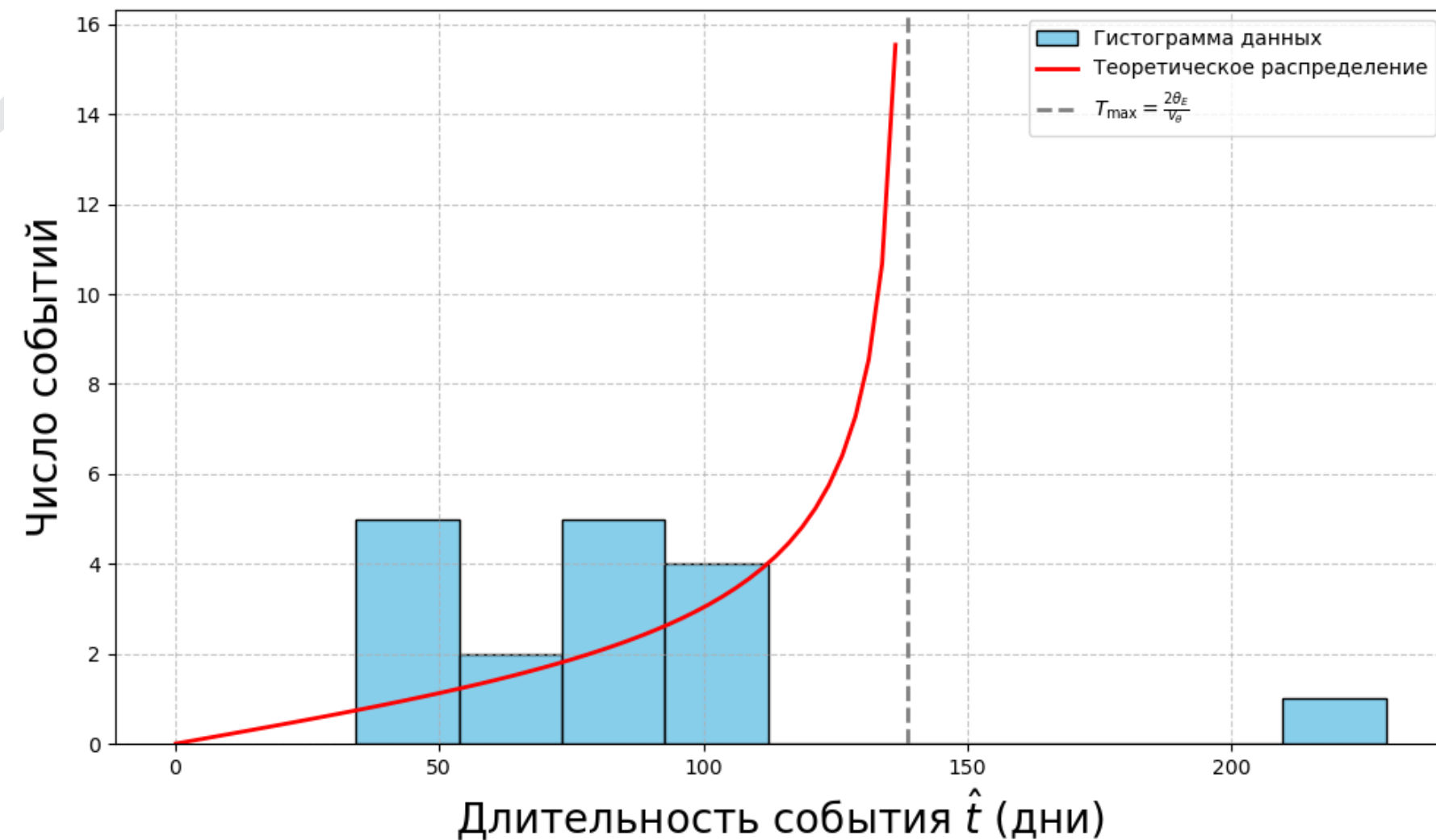
2. Степенное распределение:

$$f(m) \propto m^{-2}$$

3. Логнормальное распределение:

$$f(m) \sim \text{LogN}(\mu, \sigma)$$

Дельта-функция



$$\frac{dw}{dT} = \frac{1}{\theta_E} \cdot \frac{v_\theta^2 T}{4\sqrt{\theta_E^2 - \left(\frac{v_\theta T}{2}\right)^2}}$$

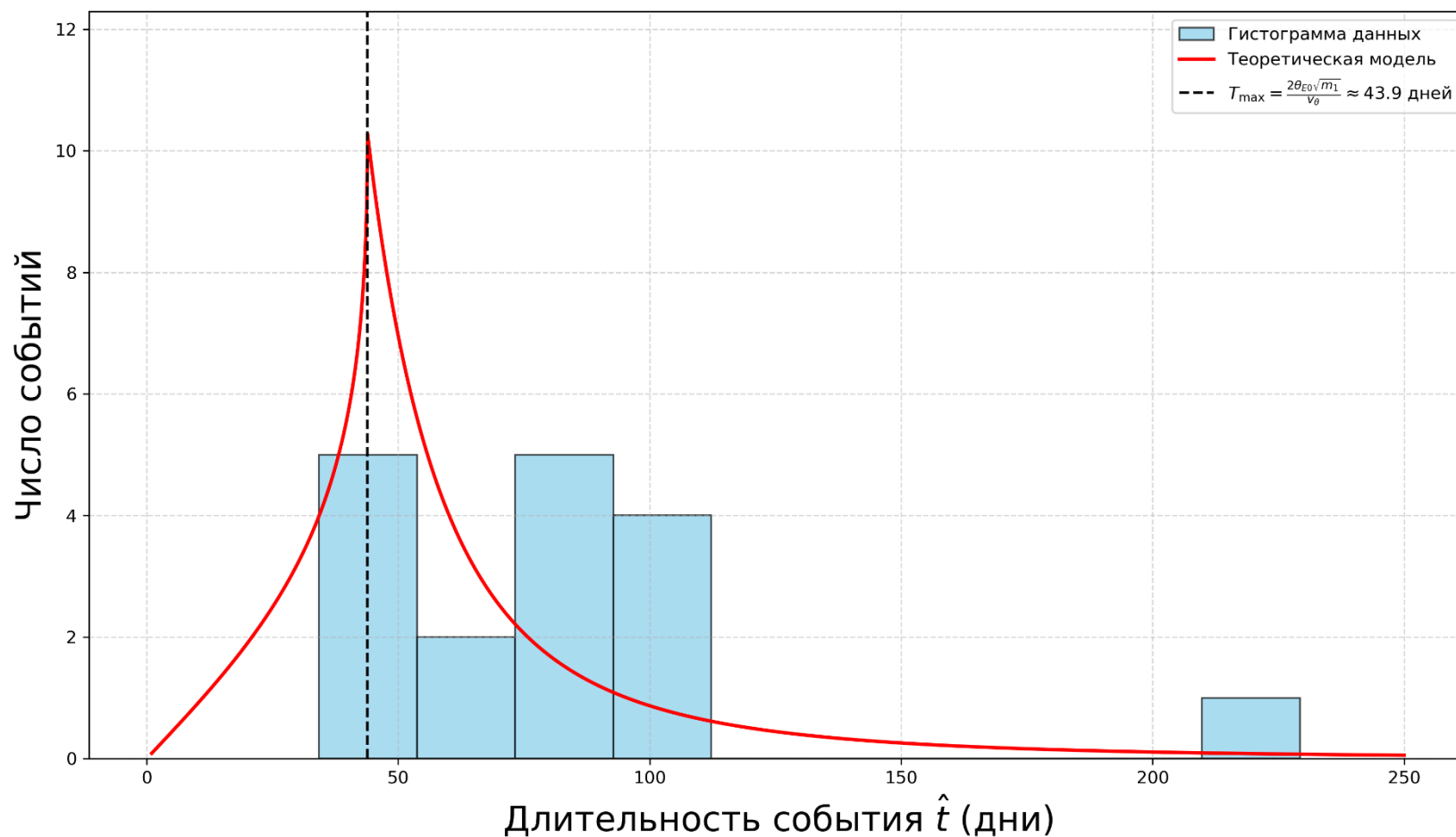
$$\chi^2 = 228$$

Степенное распределение по массам

$$\frac{dw}{dT} = \int_{m_1}^{m_2} \frac{v_\theta^2 T}{4 \theta_E(m) \sqrt{\theta_E^2(m) - (v_\theta T)^2}} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_2 - m_1} \cdot m^{-2} dm$$

$$m_1 = 0.1 M_\odot$$

$$m_2 = 100 M_\odot$$



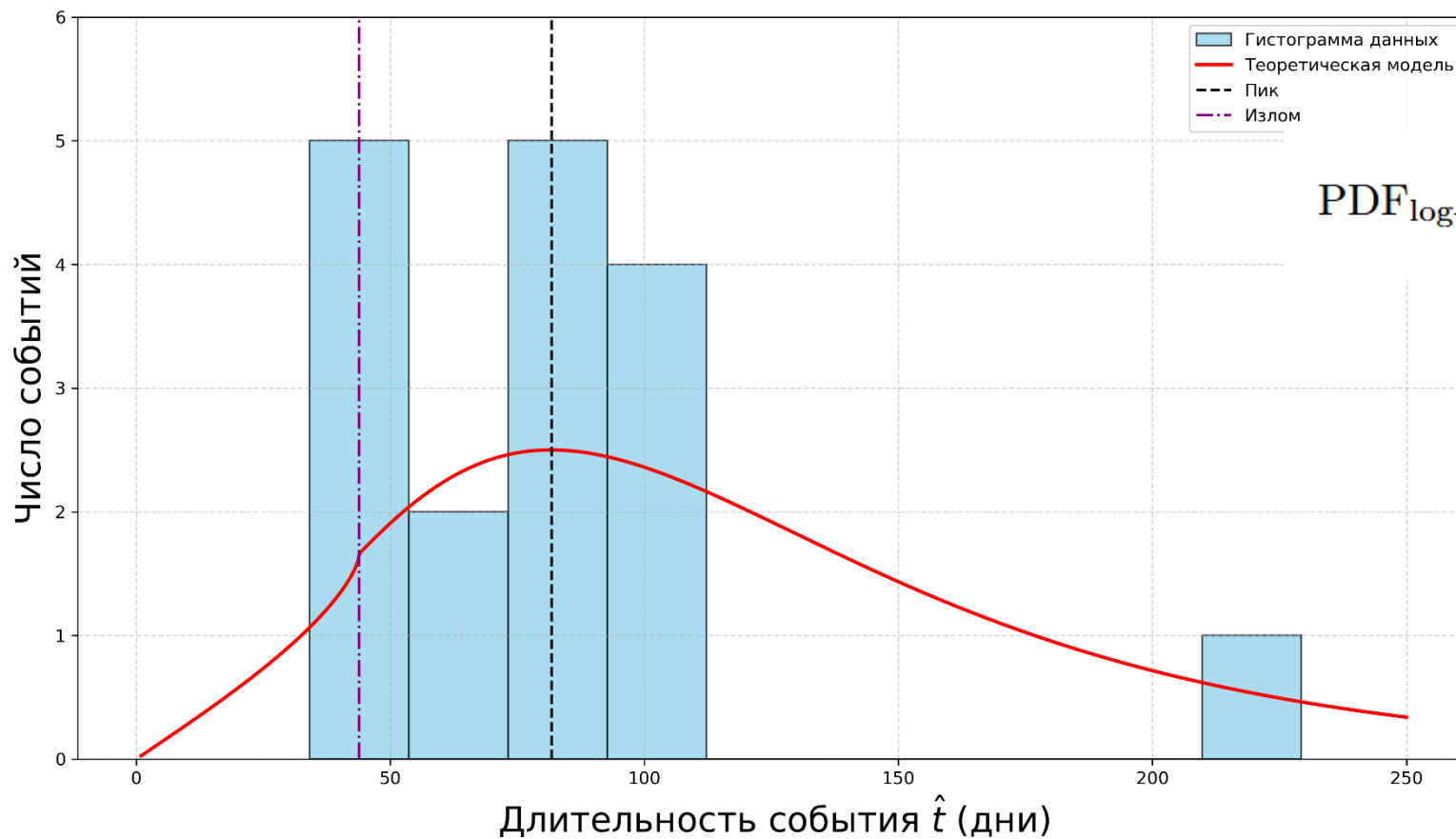
$$\theta_E = \theta_{E0} \sqrt{\mu}, \quad A = \frac{m_1 m_2}{m_2 - m_1},$$

$$\mu_{\min}(T) = \max\left(\frac{(v_\theta T/2)^2}{\theta_{E0}^2}, m_1\right)$$

$$\chi^2 = 34$$

Логнормальное распределение

$$\frac{dw}{dT} = \int_{\mu_{\min}(T)}^{m_2} \frac{v_{\theta}^2 T}{4\theta_E \sqrt{\theta_E^2 - \left(\frac{v_{\theta} T}{2}\right)^2}} \cdot \text{PDF}_{\log\text{-normal}}(\mu) d\mu$$



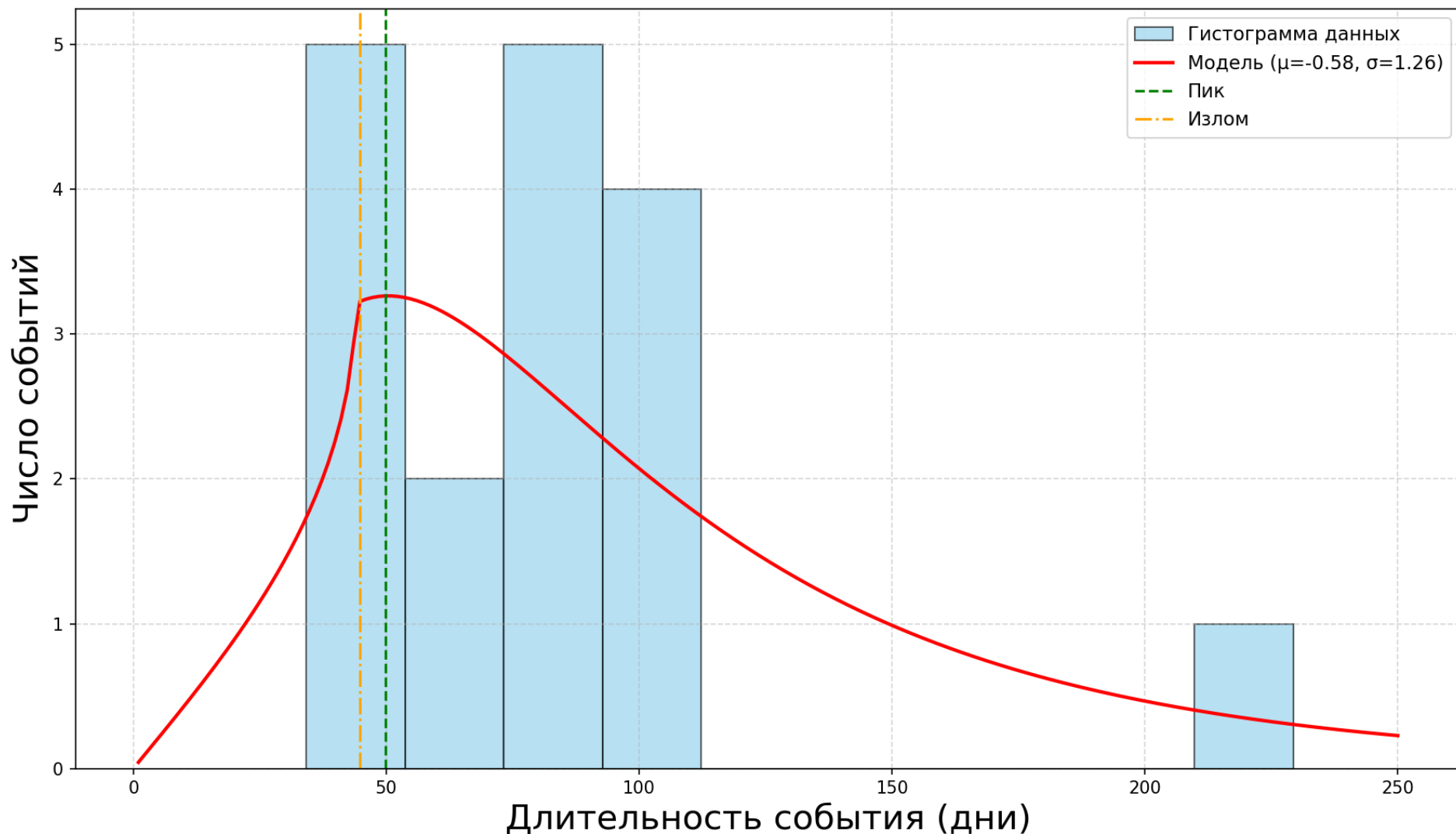
$$\text{PDF}_{\log\text{-normal}}(\mu) = \frac{A}{\mu\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln \mu - \mu_{\log})^2}{2\sigma_{\log}^2}\right)$$

$$\theta_E = \theta_{E0}\sqrt{\mu}, \quad A = \frac{m_1 m_2}{m_2 - m_1},$$

$$\mu_{\min}(T) = \max\left(\frac{(v_{\theta} T/2)^2}{\theta_{E0}^2}, m_1\right)$$

$$\chi^2 = 11$$

Оптимизация параметров



В результате оптимизации были получены значения параметров:

$$\mu_{\log} = -0.58$$

$$\sigma_{\log} = 1.26$$

$$\chi^2_{\min} = 7.2$$

Заключение

Проведено сравнение трех моделей распределения масс ПЧД:

1. Дельта-функция (все ПЧД одинаковой массы) ($\chi^2 = 228$);
2. Степенное распределение ($f(m) \propto m^{-2}$) ($\chi^2 = 34$);
3. Логнормальное распределение ($\chi^2 = 7.2$).

Наилучшее согласие с наблюдательными данными достигнуто для логнормального распределения с параметрами:

$$\mu_{\log} = -0.58, \quad \sigma_{\log} = 1.26$$

В будущем планируется расширить исследование, применив предложенную методику к другим крупным обзорам, таким как OGLE и GAIA, что позволит увеличить статистику и, возможно, уточнить параметры распределения масс ПЧД.



Back-Up



События микролинзирования

Событие	RA	DEC	Момент максимума яркости $t_{\max}$	Длительность $\hat{t}$ (дни)
1a	78.6833	-68.8003	10.03.1993 14:24	34.4
1b	78.6833	-68.8000	10.03.1993 19:12	34.2
4	79.3083	-70.7828	21.10.1994 9:36	45.4
5	79.1708	-70.4883	05.02.1993 9:36	75.6
6	81.5542	-70.3539	28.07.1993 14:24	91.6
7a	76.0125	-69.5550	21.04.1994 0:00	102.9
7b	76.0167	-69.5550	13.04.1994 21:36	43.9
8	81.2875	-69.7981	04.02.1994 7:12	66.4
9	80.0833	-69.2531	04.09.1994 9:36	100.1
13	81.0125	-68.8200	20.02.1996 12:00	36.8
14	83.6833	-70.4186	03.11.1996 19:12	74.2
15	76.4417	-69.7308	23.01.1997 21:36	72.7
18	86.3375	-71.1531	06.03.1995 7:12	93.2
20	73.5792	-70.0375	22.11.1997 4:48	229.3
21	74.3083	-69.4633	13.08.1993 16:48	85.2
22	78.6333	-71.1533	27.08.1995 4:48	85.2
23	76.5708	-70.9797	13.02.1995 19:12	100.1
25	75.5667	-68.0144	16.01.1995 19:12	34.4