

Физика звёзд: теория и наблюдения
ГАИШ МГУ, Москва (26-30 июня 2023 г)

Суб-ТГц излучение вспышек на Солнце и карликовых звёздах

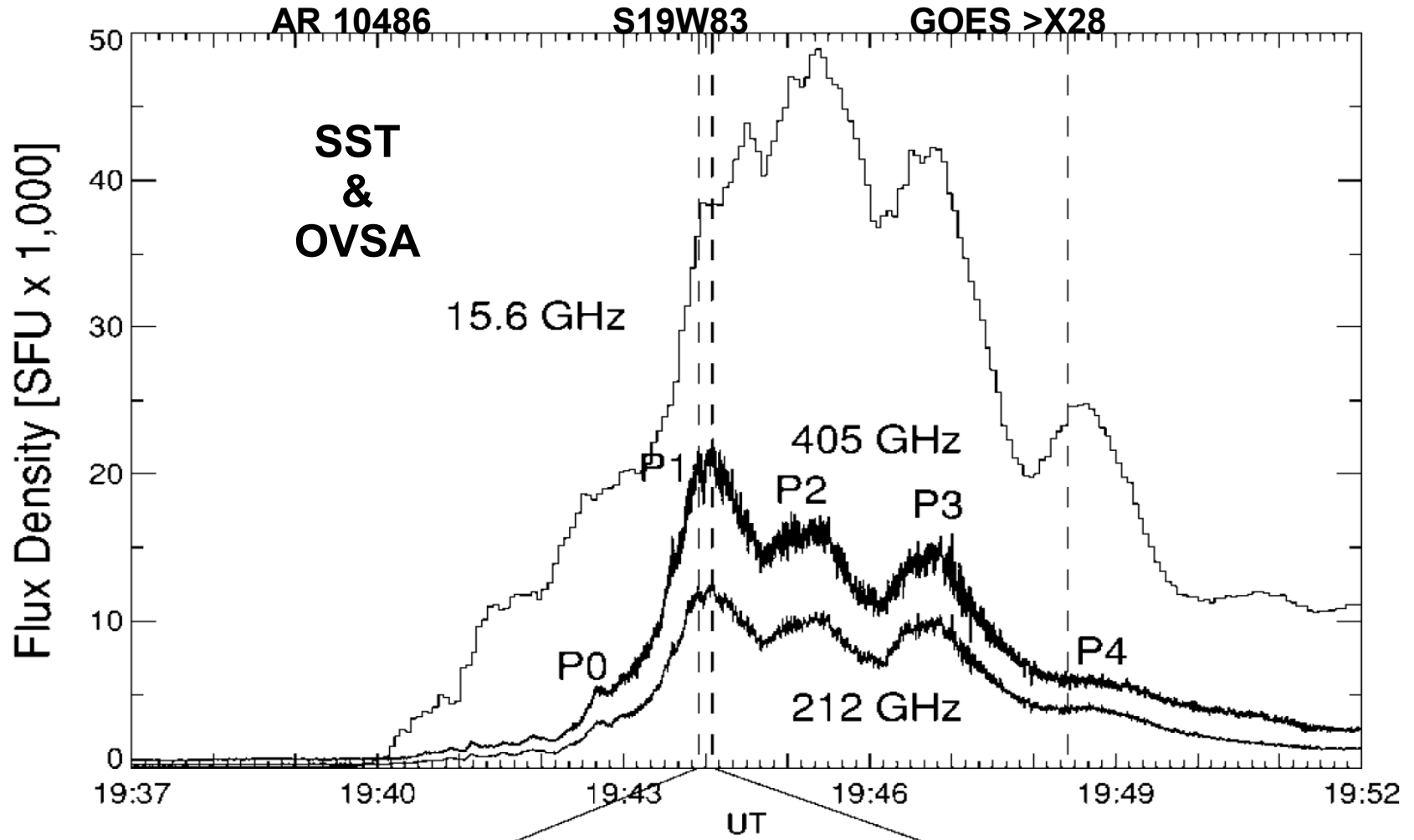
В.Ф. Мельников, ГАО РАН, Санкт-Петербург

Ю.А. Горбачёва, ННГУ, Нижний Новгород

План

- Суб-ТГц излучение вспышек на Солнце
- Вспышки суб-ТГц излучения на карликовых звёздах. Отличие от солнечных
- Механизмы суб-ТГц излучения вспышек
- Что можно узнать о вспышках на карликовых звёздах из их суб-ТГц излучения?

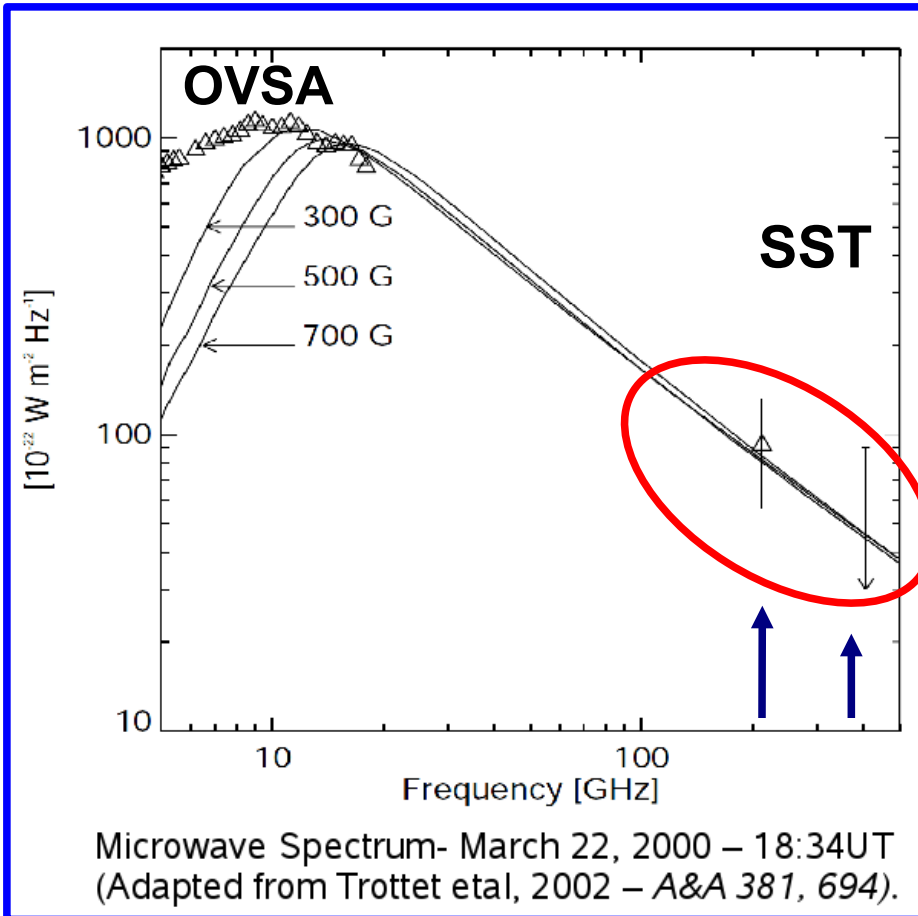
Суб-ТГц излучение вспышек на Солнце



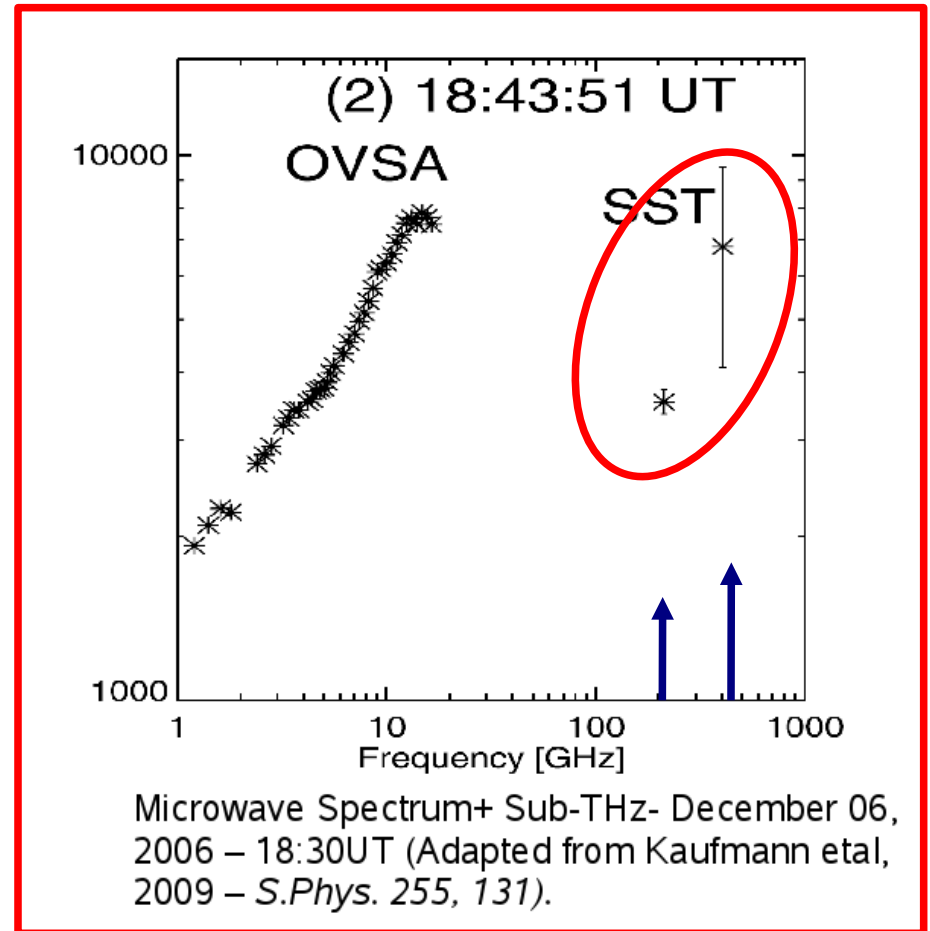
Kaufmann P., et al Ap.J. (2004), v603 L121-L124

Types of Radio Spectra

Microwave only



Microwave & Sub-THz



Рассматриваемые механизмы и модели

- Синхротронное излучение электронов из компактного источника в сильном (≥ 1000 Гс) магнитном поле (Кауфман и др. 2009; Мельников и др. 2011)
- Тепловое тормозное излучение из оптически толстого источника (Silva et al. 2007, Fleishman and Kontar, 2010; Kontar et al, 2018)
- Черенковский механизм излучения электронов, ускоренных в хромосфере (Флейшман и Контарь 2010);
- Плазменный механизм радиоизлучения - генерация плазменных волн быстрыми электронами и последующая конверсия плазменных волн в электромагнитные (Zaitsev et al. 2013).

Наблюдения Суб-ТГц излучения звёздных вспышек на ALMA

По данным, известным на сегодняшний день, на всех звездах, для которых для наблюдений использовали ALMA, обнаружены всплески суб-ТГц излучения (MacGregor et al., 2018, 2020, 2021).

Atacama Large Millimeter Array (ALMA):

Диапазон частот от 84 до 950 ГГц (0.3 мм – 3 мм)

В данных работах использовались частоты, близкие к **233 ГГц**

Информация о временных профилях :

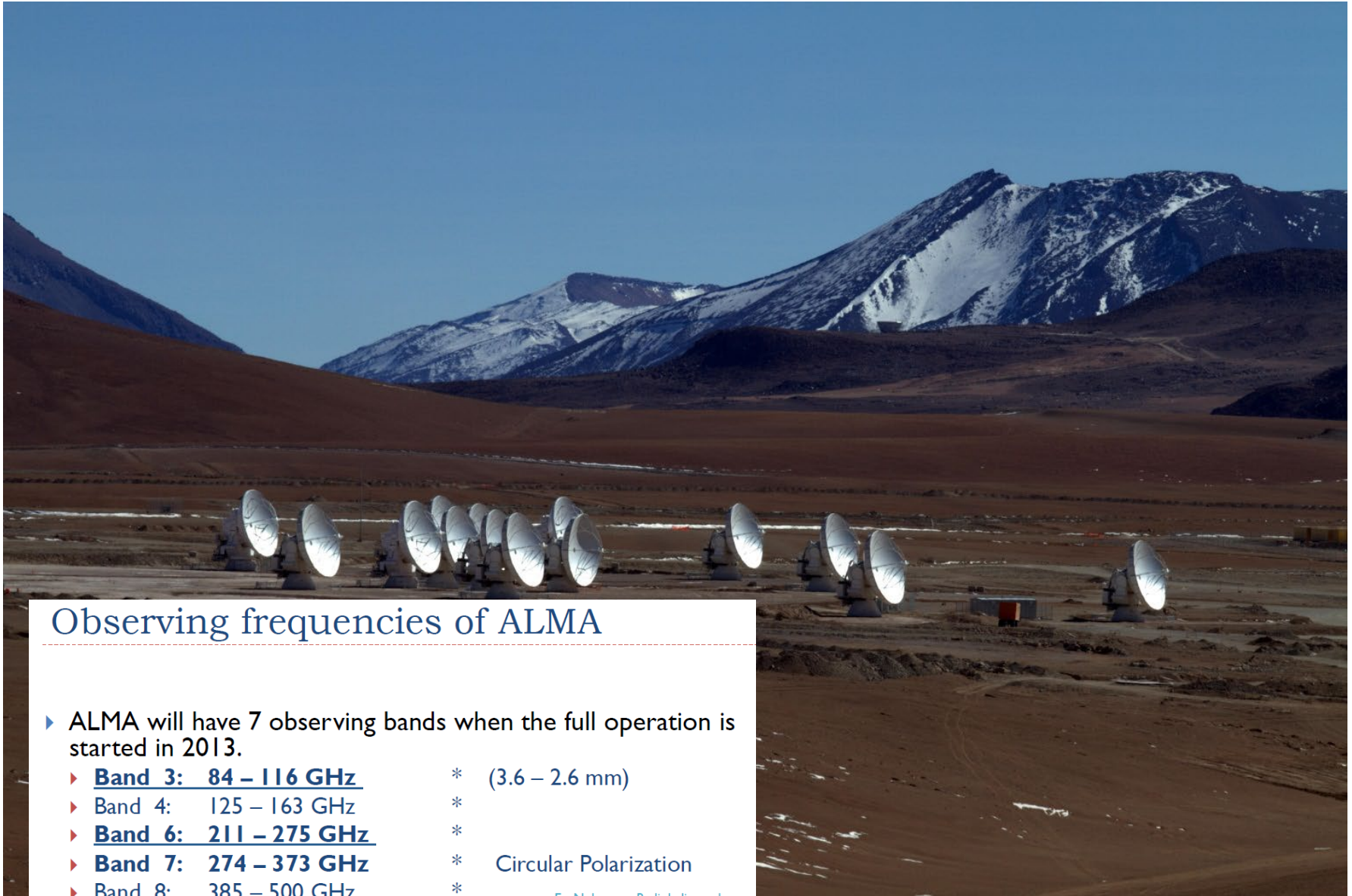
- интенсивности

- наклона спектра ($F_\nu \propto \nu^\alpha$)

- $|Q/I|$,

$I = \langle E_{XX}^2 \rangle + \langle E_{YY}^2 \rangle$ и $Q = \langle E_{XX}^2 \rangle - \langle E_{YY}^2 \rangle$ - первый и второй параметры Стокса

Atacama Large Millimeter Array (ALMA)



Observing frequencies of ALMA

- ▶ ALMA will have 7 observing bands when the full operation is started in 2013.
- ▶ **Band 3: 84 – 116 GHz** * (3.6 – 2.6 mm)
- ▶ Band 4: 125 – 163 GHz *
- ▶ **Band 6: 211 – 275 GHz** *
- ▶ **Band 7: 274 – 373 GHz** * Circular Polarization
- ▶ Band 8: 385 – 500 GHz *
- ▶ **Band 9: 602 – 720 GHz**
- ▶ Band 10: 787 – 950 GHz (0.4 – 0.3 mm)

Ex. Nobeyama Radioheliograph
17 GHz (1.7cm) & 34GHz (8.8mm)

Параметры звёзд

Название Звезды	Проксима Центавра	AU Микроскопа	ε Эридана
Тип	Красный карлик	Красный карлик	Оранжевый карлик
Температура	3 042 <u>К</u>	3730 К	5100 <u>К</u>
Расстояние	4,24 св. г.	32,3 св. г.	10,5 св. г.
Масса	0.123 M _☉	0.59 M _☉	0.85 M _☉
Возраст	4,85 млрд <u>лет</u>	12 млн лет	0.5 млрд <u>лет</u>

$$T_{\odot} = 5\,772\text{ К}$$

$$\text{Возраст}_{\odot} = 4,5\text{ млрд лет}$$

Мощность суб-ТГц излучения от вспышек на этих звёздах на 3-4 порядка больше, чем от суб-ТГц вспышек на Солнце:

Звезда	L_{Star} (св. лет)	Вспышка	F_{Star} (МЯн)	$F_{иск},$ (е.с.п.)	$F_{иск}/1000$ е.с.п.
Проксима Центавра	4,26	P4	100	$7 \cdot 10^5$	702
		P5	106	$7.4 \cdot 10^5$	744
АУ Микроскопа	32,3	A1	15	$6 \cdot 10^6$	6000
ε Эридана	10,5	E1	28	$1.2 \cdot 10^6$	1190
		E2	14	$6 \cdot 10^5$	597
		E3	9	$3.8 \cdot 10^5$	384

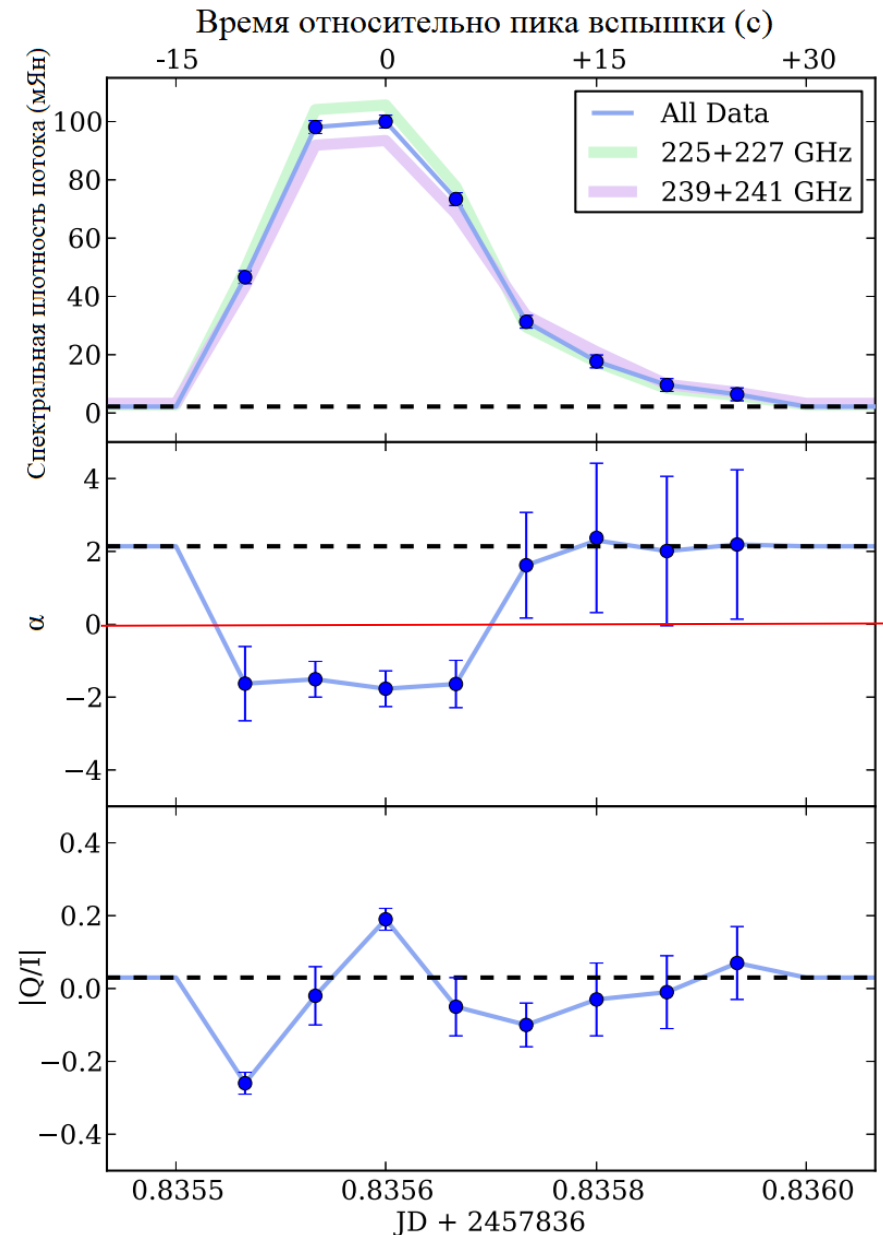
В дополнение к большей на 3-4 порядка мощности излучения по сравнению с солнечными вспышками отметим:

1) Короткую длительность: ~ 30 сек;
Длительность фазы роста и фазы спада сравнимы (~ 15 с)

2) В пике вспышки спектральный индекс
 $\alpha = -1,77 \pm 0,45$.

Это означает, что диапазон частот, на котором велось исследование, 225 ГГц – 241 ГГц, находится на спадающем участке частотного спектра.

3) Обнаружена заметная линейная поляризация.

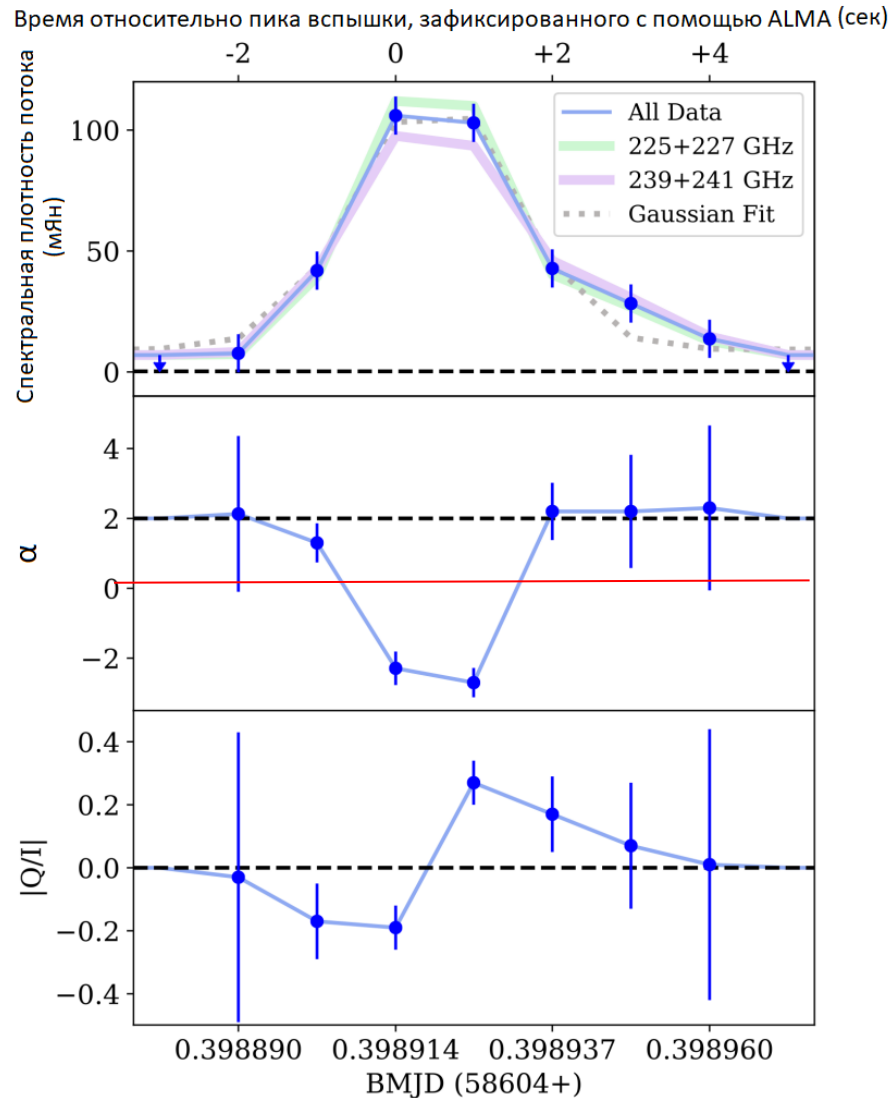


Эта вспышка ещё более короткая, она длится всего 4-5 сек. Причём временной профиль симметричен, рост и спад происходит за одно и то же время ~ 2 с.

4) Мы обратили также внимание на то, что динамика спектрального индекса демонстрирует непрерывный рост его величины на фазе спада всплеска (от $\alpha = -1,8$ до $\alpha = +2.0$), что свидетельствует о постепенном уплощении спектра и последующей смене знака наклона спектра.

Линейная поляризация в ходе всплеска может менять знак.

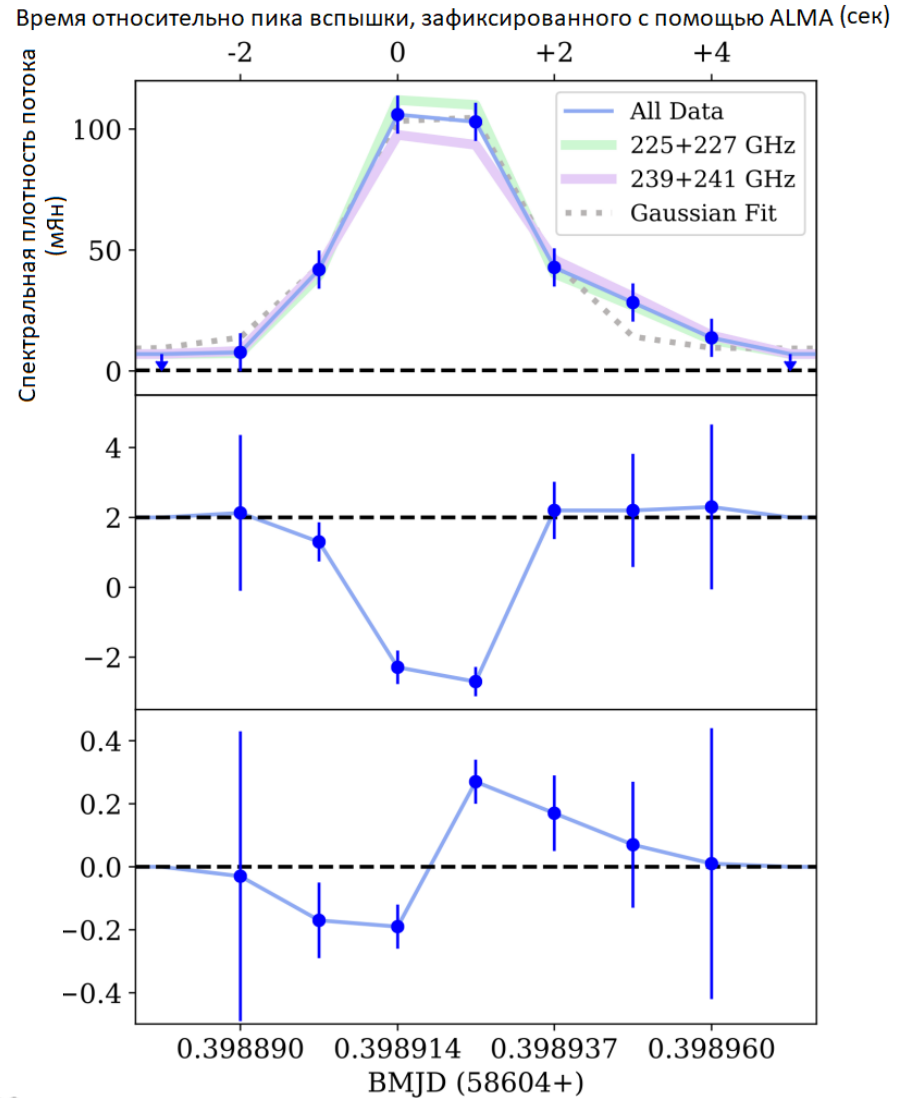
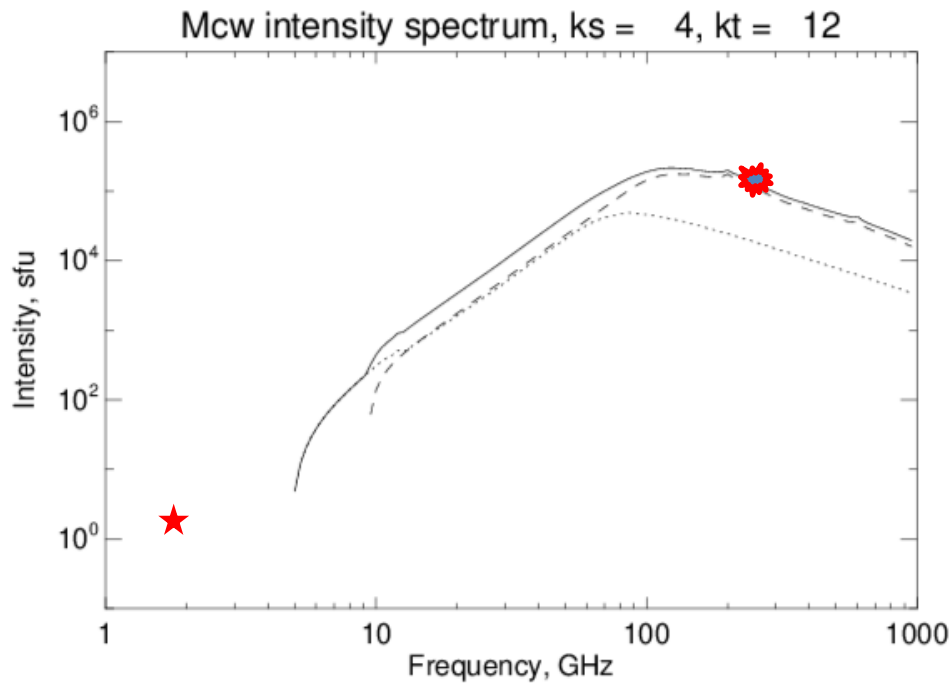
Вначале, на фазе роста, – большая отрицательная линейная поляризация. Затем, на максимальной фазе, рост, переход через 0, и опять переход в положительные значения уже на ранней стадии фазы спада.



Вспышка 1 мая 2019 года на звезде Проксима Центавра

Для этой вспышки были наблюдения на ASKAP на длине волны 33,8 см ($f \approx 1$ ГГц). Причем максимальная плотность потока всего 3 мЯн.

Т.е., спектр спадает на низких частотах.



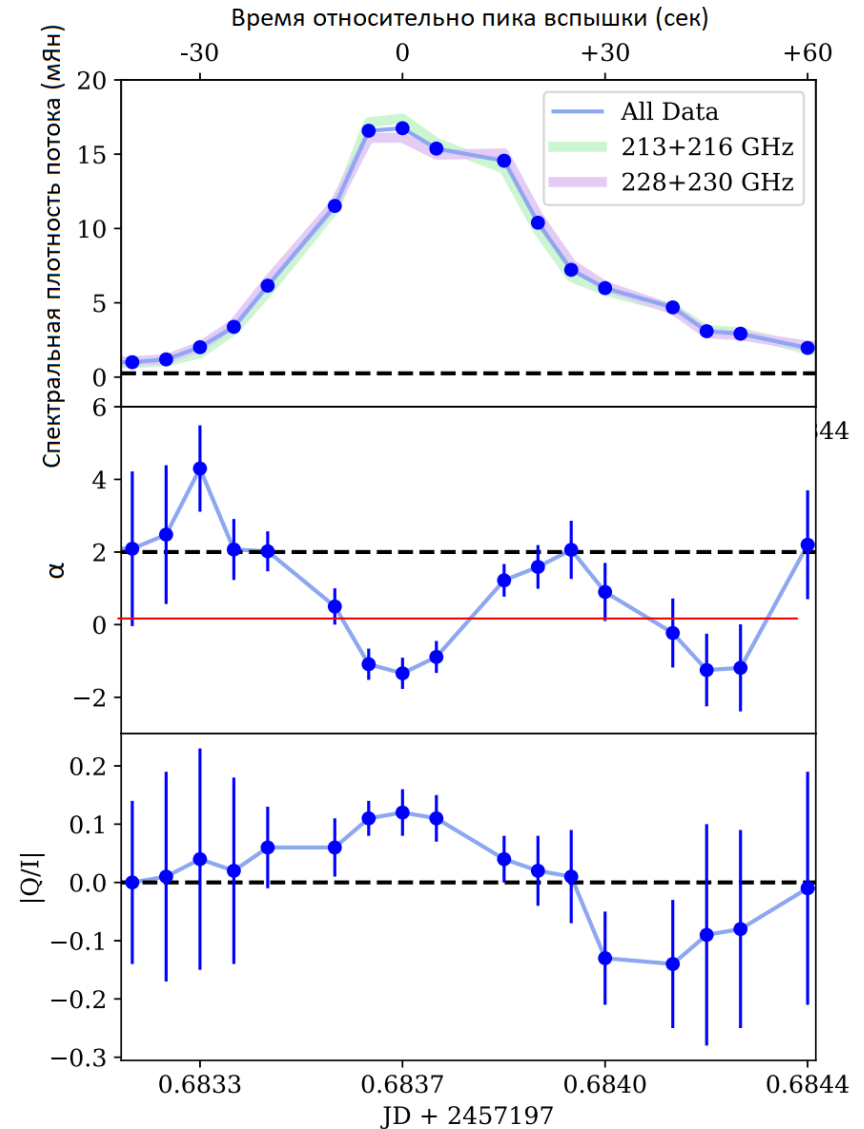
Вспышка 1 мая 2019 года на звезде Проксима Центавра

Эта вспышка примерно в 10 раз мощнее, чем суб-ТГц вспышка звезды Проксима Центавра.

Длительность тоже больше: достигает 6-70 сек.

В целом наклон спектра аналогичен наклону спектра на Проксиме Центавра. Но динамика спектрального индекса более сложная.

В этой вспышке также обнаружена заметная линейная поляризация.



Вспышка 24 июня 2015 года на звезде AU Микроскопа

Дата	Звезда	Вспышка	F_{max} (мЯн)	$t_{1/2}$ (сек)	α в пике вспышки	$ Q/I $ в пике вспышки
24.03.2017	Проксима Центавра	P4	100	16,4	-1,77±0,45	0,19±0,02
01.05.2019		P5	106	2,8	-1,29±0,48	-0,19±0,07
24.06.2015	АУ Микроскопа	A1	16,8	35	-1,3±0,05	0.12±0,04
18.01.2015	ε Эридана	E1	28	7,9	1,81±1,94	0,8±0,12
18.01.2015		E2	14	9	7,29±2,89	-0,48±0,15
17.01.2015		E3	9	6,6	-2,83±2,33	-0,11±0,19

Короткая длительность суб-ТГц всплесков накладывают ограничения на размеры источников

Плотность потока излучения во многом определяется площадью радиоисточника. А о ней сейчас можно сказать очень мало, нет наблюдений.

Но можно сделать оценки, исходя из того, что размер источника определяется его длительностью и предельной скоростью передачи возмущения в магнитоактивной плазмы:

$$D = V_A \Delta t$$

$$\text{При } V_A = 2000 \text{ km, } \Delta t = 15 \text{ s} \rightarrow D = 30 \text{ тыс. км}$$

Возможные механизмы генерации Суб-ТГц всплесков во время звёздных вспышек.

- Тепловой тормозной
- Гиротронный/синхротронный
- Когерентный плазменный
- Когерентный циклотронный

Циклотронный мазерный механизм требует очень больших магнитных полей:

$$B = 60\,000\text{ G} \rightarrow f_b = 200\text{ GHz} !$$

Кроме этого, циклотронное излучение почти 100% поляризовано по кругу.
→ Линейной поляризации нет !

Плазменный мазер требует очень большой плотности плазмы:

$$N_0 = 1e14\text{ cm}^{-3} \rightarrow f_p = 100\text{ GHz} \rightarrow 2f_p = 200\text{ GHz}$$

Для этого необходим прогрев хромосферы на высотах $h = 500$ км до корональных температур, что обеспечивает высокую степень ионизации, требуемую для ленгмюровских частот $\nu_p \approx 100\text{--}200$ ГГц, и уменьшает тормозное поглощение субтерагерцового излучения.

Тепловой тормозной механизм может обеспечить достаточную плотность потока суб-ТГц излучения, если источник достаточно плотный и горячий:
 $n_0 \geq 1e13 \text{ cm}^{-3}$,
 $T \sim 1e7 \text{ K}$.

Однако, этот механизм не в состоянии объяснить отрицательный наклон частотного спектра.

Он также не может объяснить наблюдаемую линейную поляризацию.

Наиболее адекватным представляется

синхротронный/гиротронный механизм

Он способен объяснить почти все наблюдаемые характеристики суб-ТГц всплесков:

- Линейную поляризацию
- Отрицательный наклон спектра (а также положительный наклон при определённых условиях)
- Динамику наклона спектра: рост спектрального индекса до положительных значений на фазе спада всплеска.
- Короткая длительность спада требует высокой плотности плазмы. Но высокая плотность плазмы согласуется с динамикой спектрального индекса
- Короткая длительность всплесков накладывает ограничения на размер источника суб-ТГц всплеска (и вспышки в целом):

Эффект Фарадея и деполяризация

$$\Delta\psi = 4,8 \cdot 10^4 N_e B L \frac{\Delta\nu}{\nu^3}$$

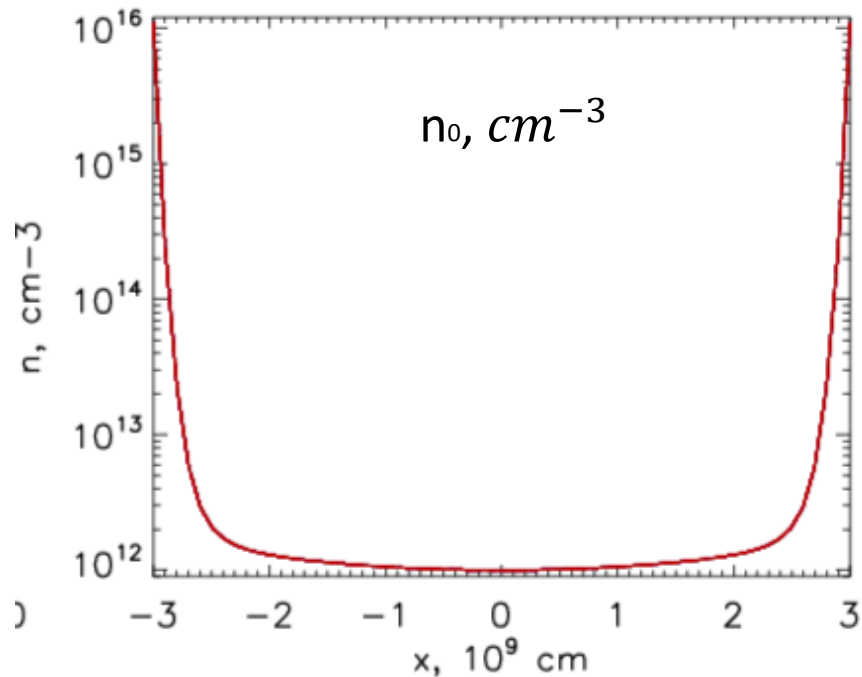
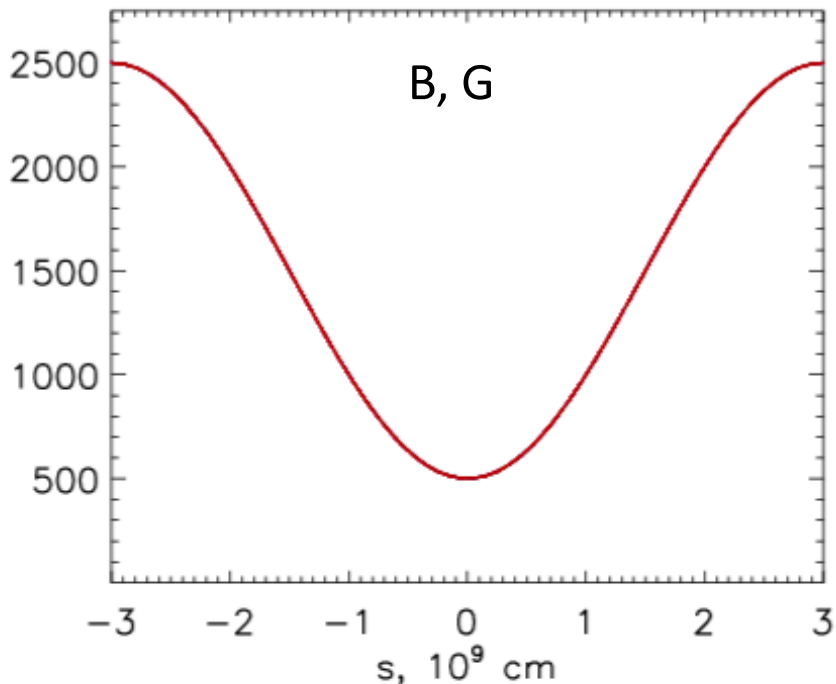
Где:

- $N_e \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ - концентрация электронов
- $B \approx 3 - 30 \text{ Гс}$ – магнитное поле в короне
- $L \approx 10^{10} \text{ см}$ – характерный размер
- $\Delta\nu = 0,015 \text{ ГГц}$ – полоса пропускания ALMA
- $\nu = 233 \text{ ГГц}$ – средняя частота ALMA

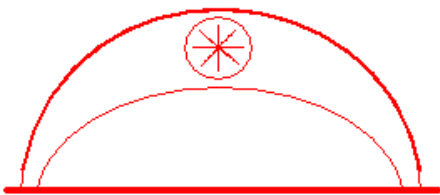
$$\Delta\psi = 0,017 \text{ рад}$$

Малая величина

Физические условия во вспышечной петле



В вершине магнитной петли:

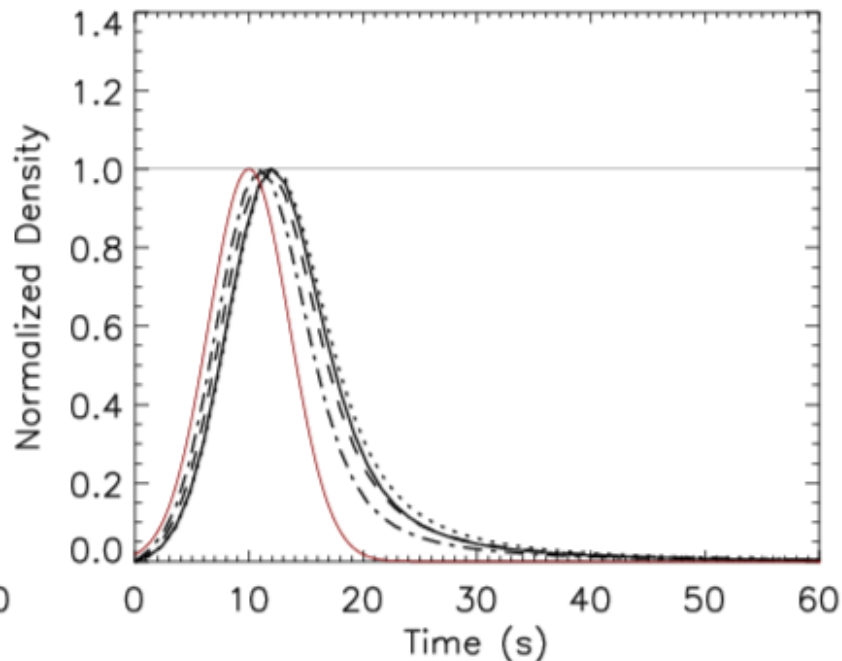


Плотность плазмы: $n_0 = 10^{12} cm^{-3}$

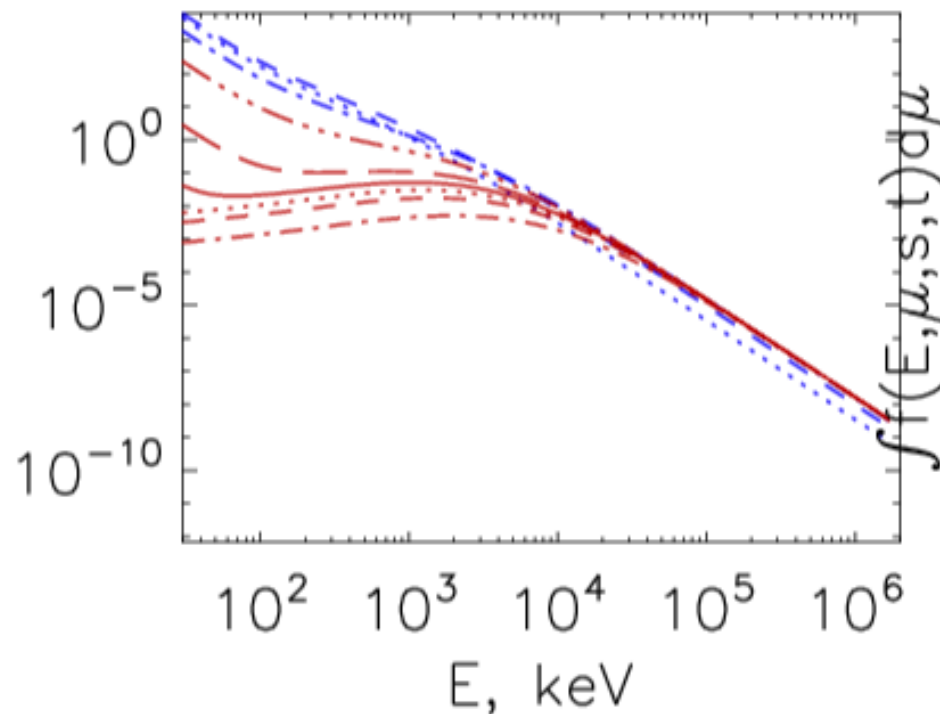
Магнитное поле: $B_{min} = 500$ Гс

Динамика нетепловых электронов в вершине вспышечной петле

Временные профили на
разных энергиях



Энергетический спектр



Плотность плазмы: $n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

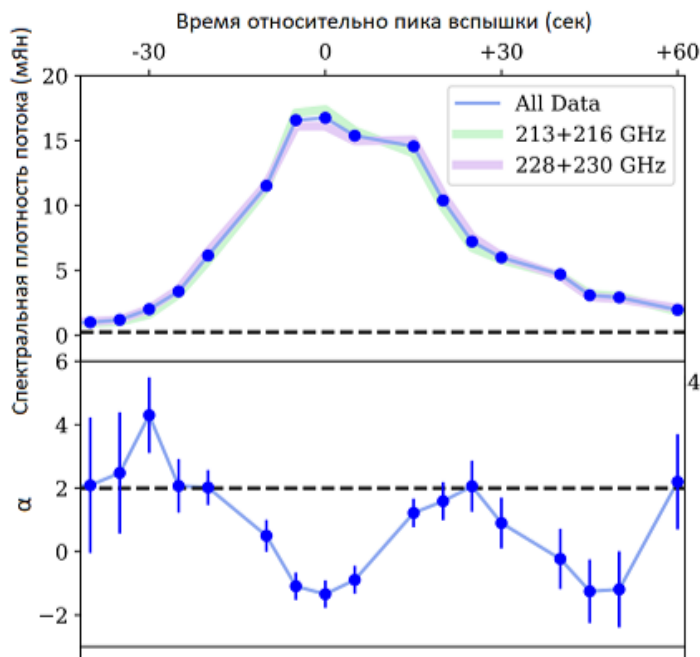
Магнитное поле: $B_{min} = 500 \text{ Гс}$

Показатель эн. спектра электронов при инжекции: $\delta = 4.0$

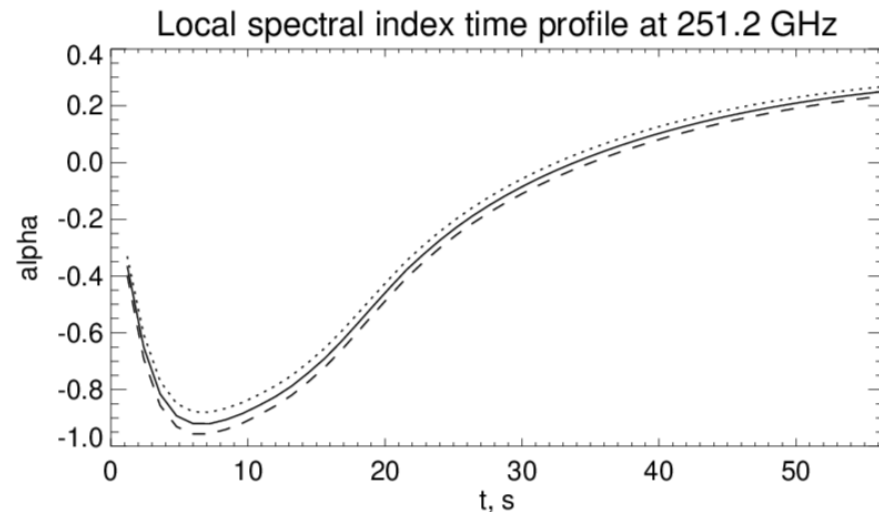
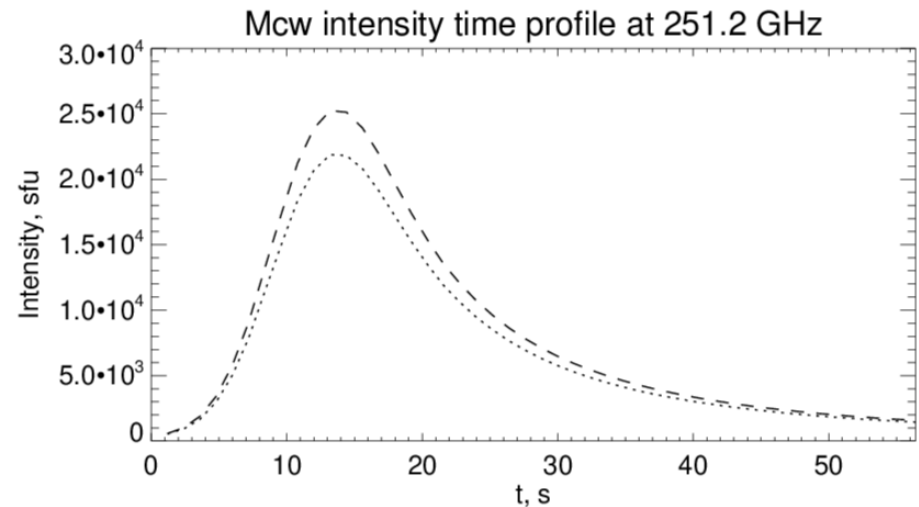
Временные профили интенсивности и спектрального индекса суб-ТГц излучения

Наблюдения

Модель



Вспышка 24 июня 2015 года на
AU Микроскопа



Выводы

- Выявлены общие черты суб-ТГц излучения вспышек на карликовых звёздах: наличие линейной поляризации, короткая (~ 30 с) продолжительность. В большинстве вспышек в пике интенсивности спектральный индекс α меньше нуля. Однако, есть вспышки, в которых α больше нуля.
- Детально изучены каждое из этих свойств. Выявлено, что наклон спектра не сразу становится отрицательным, есть плавный переход от положительного (на фазе роста) к отрицательному и обратно (на фазе спада).
- Предложено объяснение частотного спектра и линейной поляризации наблюдаемого суб-ТГц излучения изученных супервспышек: это гиротронное излучение релятивистских электронов.