

# Самокалибровка солнечных радиоинтерферометров и ее применение для Сибирского радиогелиографа

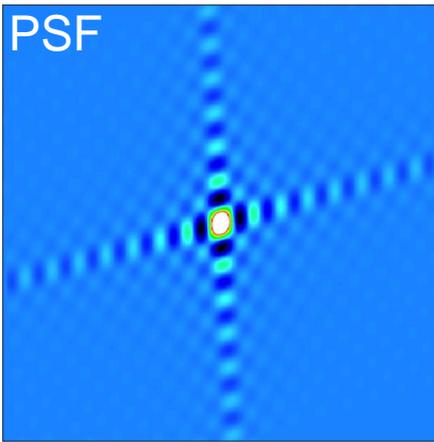
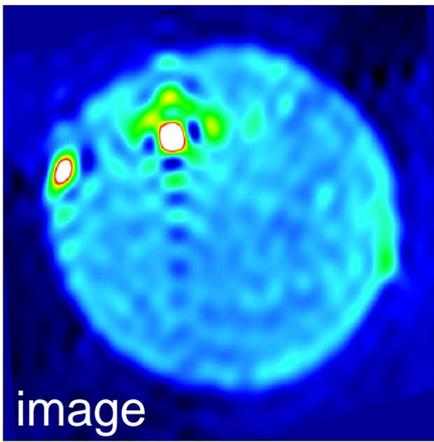
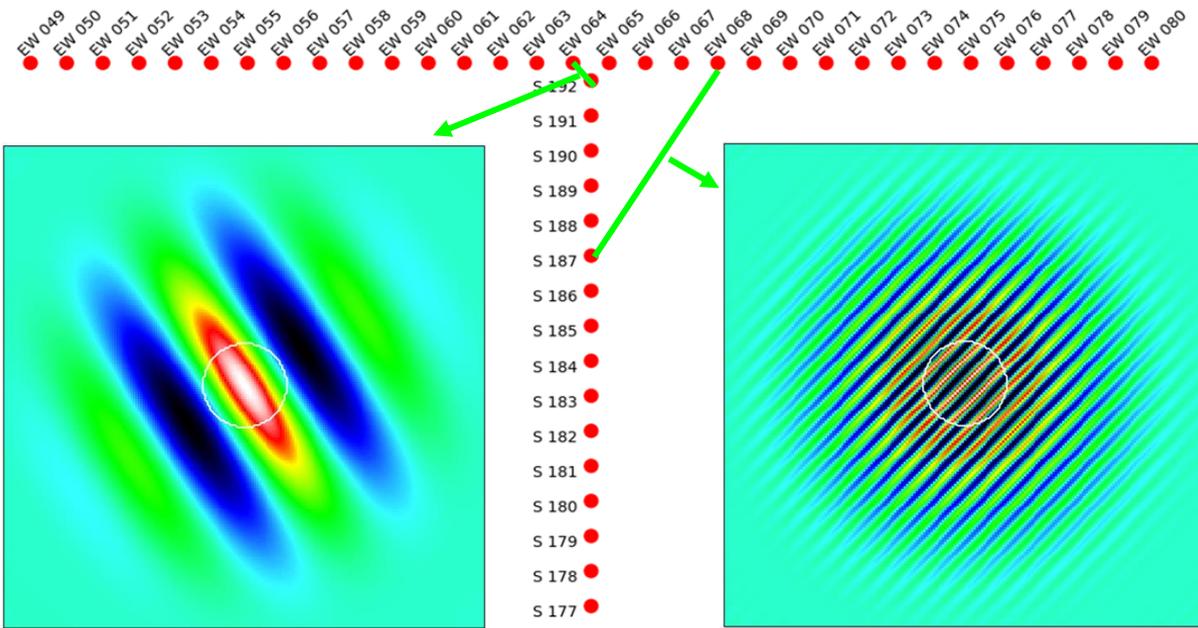
Глоба М.В., Лесовой С.В.  
ИСЗФ СО РАН

XVI Конференция молодых ученых

"Взаимодействие полей и излучения с веществом" Иркутск, 16-21 сентября 2019 г.

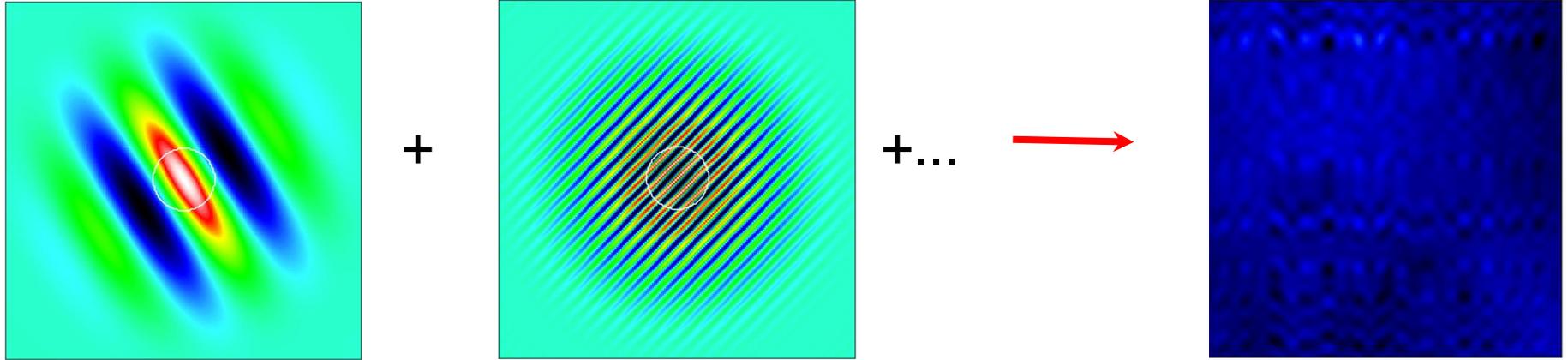
# Синтез радиоизображения

Каждая пара антенн измеряет определенную пространственную гармонику (Фурье-компоненту), или **видность**



$$\tilde{V}_{ij}(t) = g_i(t)g_j^*(t)V_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t)$$

# Синтез радиоизображения



$$\tilde{V}_{ij}(t) = g_i(t)g_j^*(t)V_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t)$$

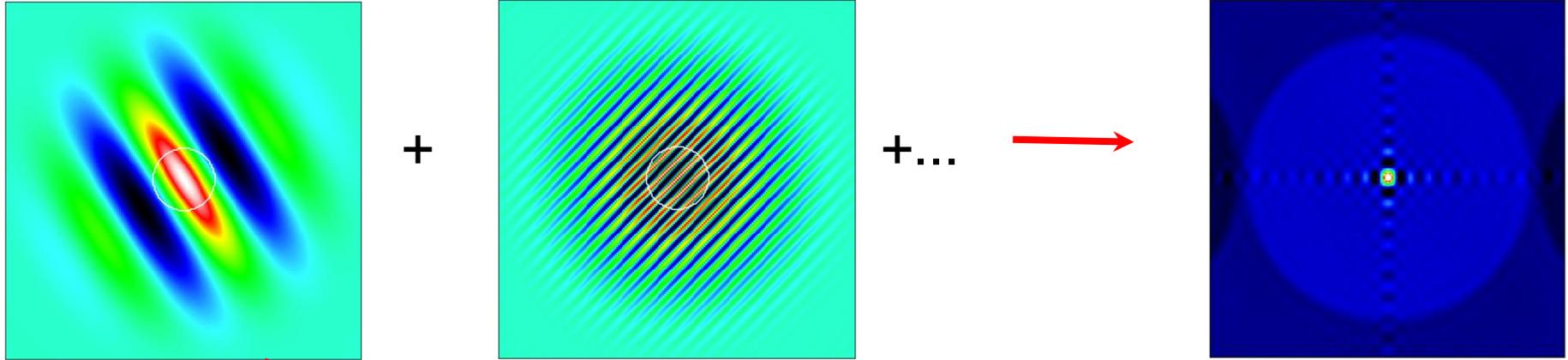
$\tilde{V}_{ij}(t)$  - видность, измеренная антеннами  $i$  и  $j$

$g_i(t)$  - комплексный коэффициент передачи антенны  $i$

$V_{ij}(t)$  - Фурье-компонента пространственного спектра распределения яркости, соответствующая базе  $i - j$

$\epsilon_{ij}(t)$  - аддитивный шум

# Синтез радиоизображения



$$\tilde{V}_{ij}(t) = \cancel{g_i(t)} \cancel{g_j^*(t)} V_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t)$$

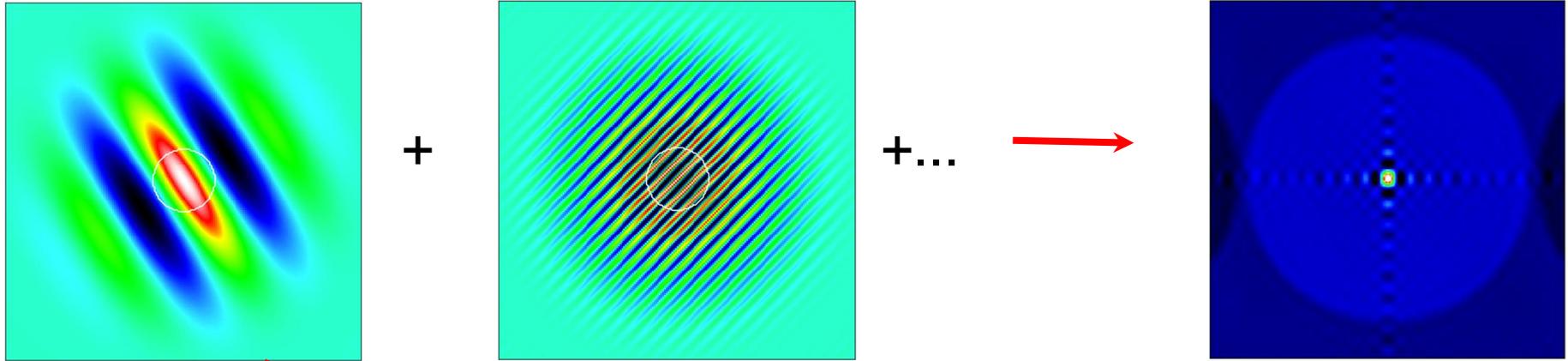
$\tilde{V}_{ij}(t)$  - видность, измеренная антеннами  $i$  и  $j$

$g_i(t)$  - комплексный коэффициент передачи антенны  $i$

$V_{ij}(t)$  - Фурье-компонента пространственного спектра распределения яркости, соответствующая базе  $i - j$

$\epsilon_{ij}(t)$  - аддитивный шум

# Синтез радиоизображения



$$\tilde{V}_{ij}(t) = \cancel{g_i(t)} \cancel{g_j^*(t)} V_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t)$$

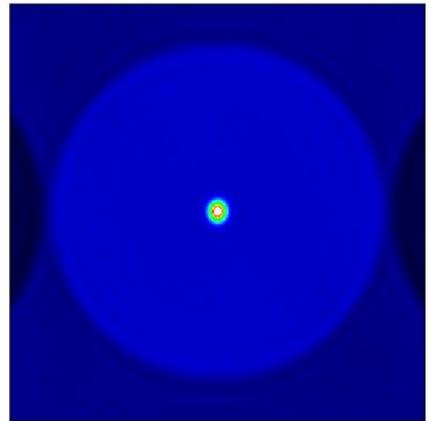
$\tilde{V}_{ij}(t)$  - видность, измеренная антеннами  $i$  и  $j$

$g_i(t)$  - комплексный коэффициент передачи антенны  $i$

$V_{ij}(t)$  - Фурье-компонента пространственного спектра распределения яркости, соответствующая базе  $i - j$

$\epsilon_{ij}(t)$  - аддитивный шум

Чистка  
“CLEAN”



# Способы калибровки коэффициентов передачи антенн

- **Наблюдения точечных источников - калибраторов:**  
Отклик всех пар интерферометра на точечный источник должен быть одинаков
- **Избыточность:**  
Несколько одинаковых баз, измеряющих одну и ту же видность  
Не требуется информация о структуре наблюдаемого объекта

# Самокалибровка (self-calibration)

Самокалибровка производится по наблюдаемому источнику и подразумевает наличие модельного распределения яркости  $\hat{I}$ , из которого вычисляются модельные видности для каждой пары антенн. Комплексные коэффициенты передачи антенн вычисляются путем минимизации функции:

$$S = \sum_k \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} w_{ij}(t_k) \left| \tilde{V}_{ij}(t_k) - g_i(t_k)g_j^*(t_k)\hat{V}_{ij}(t_k) \right|^2 \quad (1)$$

$\tilde{V}_{ij}$  - видность, измеренная парой антенн  $i$  и  $j$

$\hat{V}_{ij}$  - модельная видность для пары антенн  $i$  и  $j$

$g_i$  - комплексный коэффициент передачи  $i$ -й антенны

$w_{ij}$  - весовой коэффициент для видности, измеряемой парой антенн  $i$  и  $j$

[Schwab 1980]

Уточнение модели происходит итеративно. Шаги на одной итерации:

1. Подобрать модель распределения яркости на небе
2. Вычислить модельные видности и, подставив их в выражение (1), найти коэффициенты передачи антенн
3. Скорректировать измеренные видности на коэффициенты передачи и построить изображения, используя какой-либо метод чистки
4. Использовать компоненты модели, получаемой при чистке, в качестве нового модельного распределения яркости.
5. Если результат неудовлетворителен, вернуться к шагу 2.

# Особенности применения самокалибровки для солнечных инструментов

- Невозможность осуществлять накопление сигнала в течение долгого времени - низкое соотношение сигнал/шум на длинных базах при отсутствии активности на Солнце
- Сложность построения точной модели распределения яркости
- Используется в основном для ярких компактных вспышек - достаточный уровень сигнала на всех базах, упрощенный подбор модели

# Сибирский радиогелиограф (СРГ)

48 антенн диаметром 1.8 м

Частотный диапазон: 4-8 ГГц

Избыточная эквидистантная антенная решетка - расстояние между соседними антеннами на одном луче одинаково

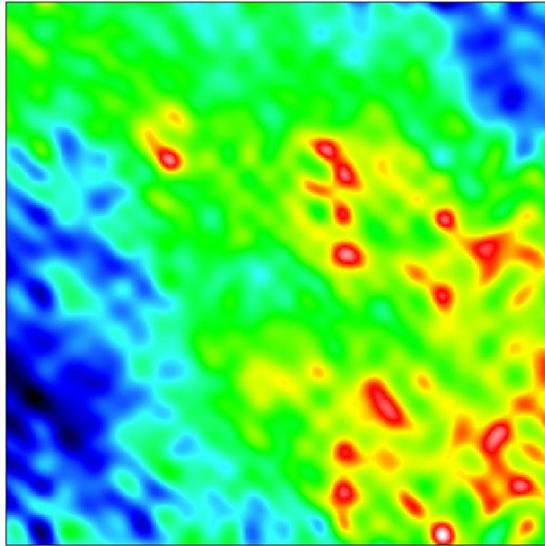
Солнечный инструмент - низкая чувствительность

Экваториальные опорно-поворотные устройства антенн - ограничение угла обзора

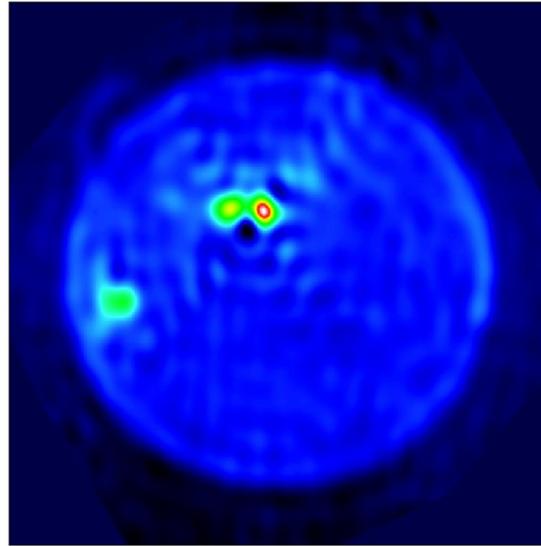


# Калибровка СРГ с использованием избыточности

Без калибровки

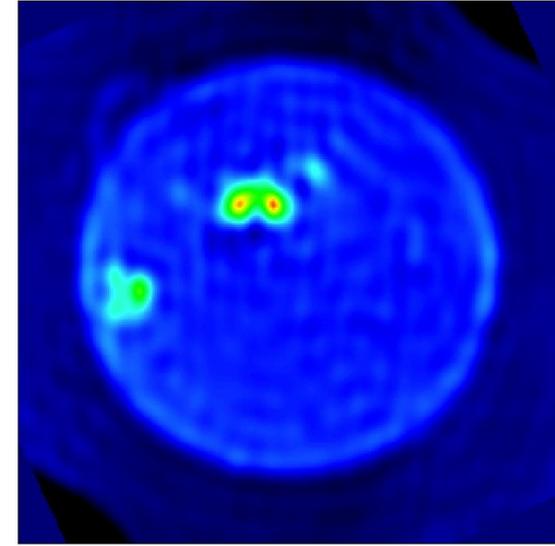


Фазовая калибровка



DR ~90:1

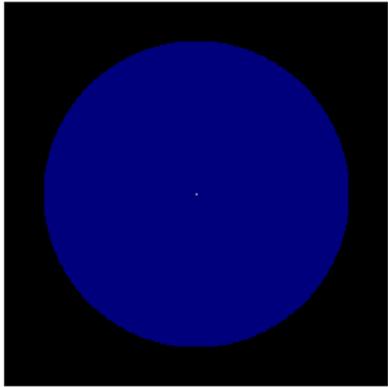
Фазовая калибровка  
+ чистка ("CLEAN")



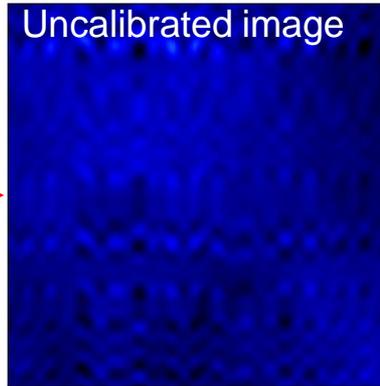
DR ~170:1

# Самокалибровка модельных данных

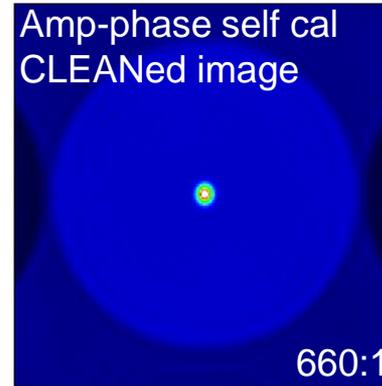
Модельное распределение яркости известно - одна итерация дает приемлемый результат (без видимых артефактов):



Изначальное модельное распределение яркости - диск с ярким точечным источником в центре



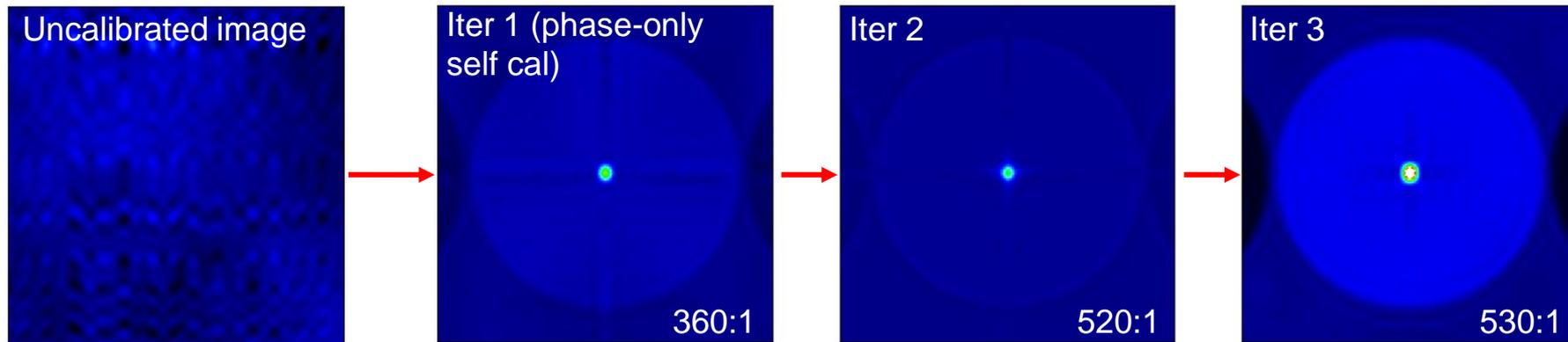
Изображение из видностей, вычисленных из модели, умноженных на случайные коэффициенты передачи



“Чистое” изображение после самокалибровки

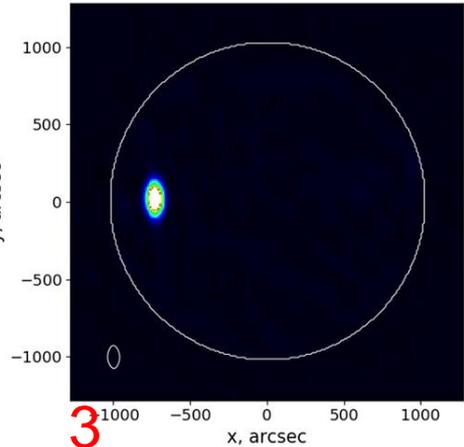
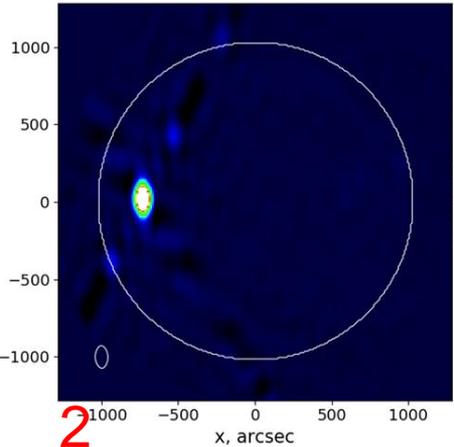
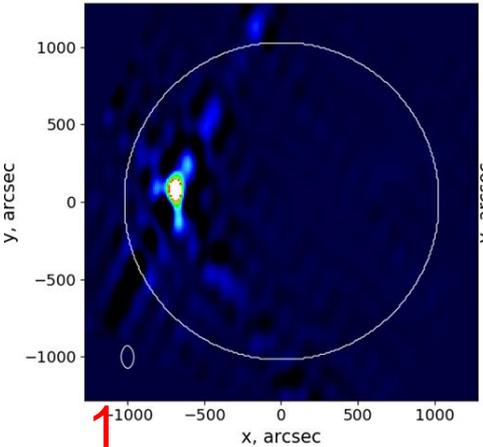
# Самокалибровка модельных данных

Модельное распределение яркости неизвестно - три итерации:



# Самокалибровка реальных данных

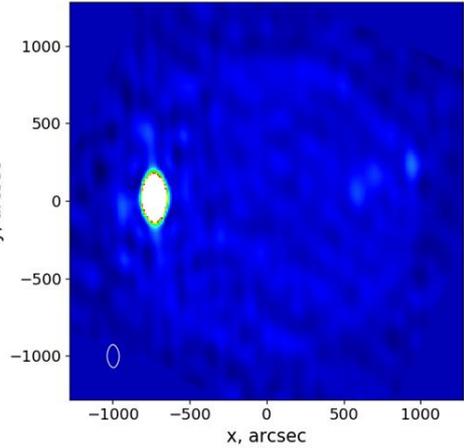
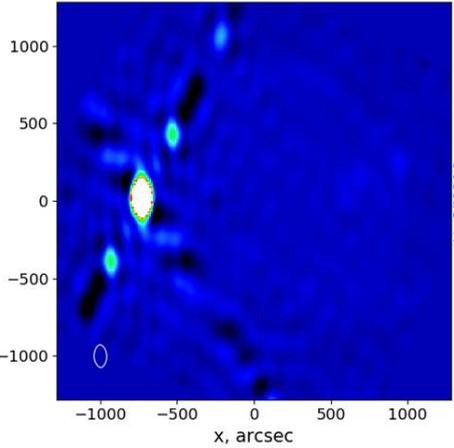
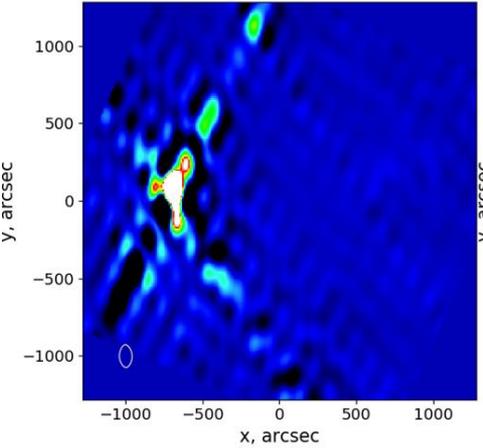
1: Калибровка по избыточности + чистка



2: Фазовая самокалибровка + чистка

3: Амплитудная и фазовая самокалибровка + чистка

Динамический диапазон **1650:1**



# Заключение

- Самокалибровка может существенно повысить динамический диапазон изображений СРГ
- Может применяться только для вспышек
- Требуется ручная доработка модели, а также подбор параметров чистки

Спасибо за внимание!