

Модель околозвездной пылевой оболочки углеродной мириды V CrB по данным фотометрии, спектроскопии ИК-диапазона и спекл-поляриметрии.

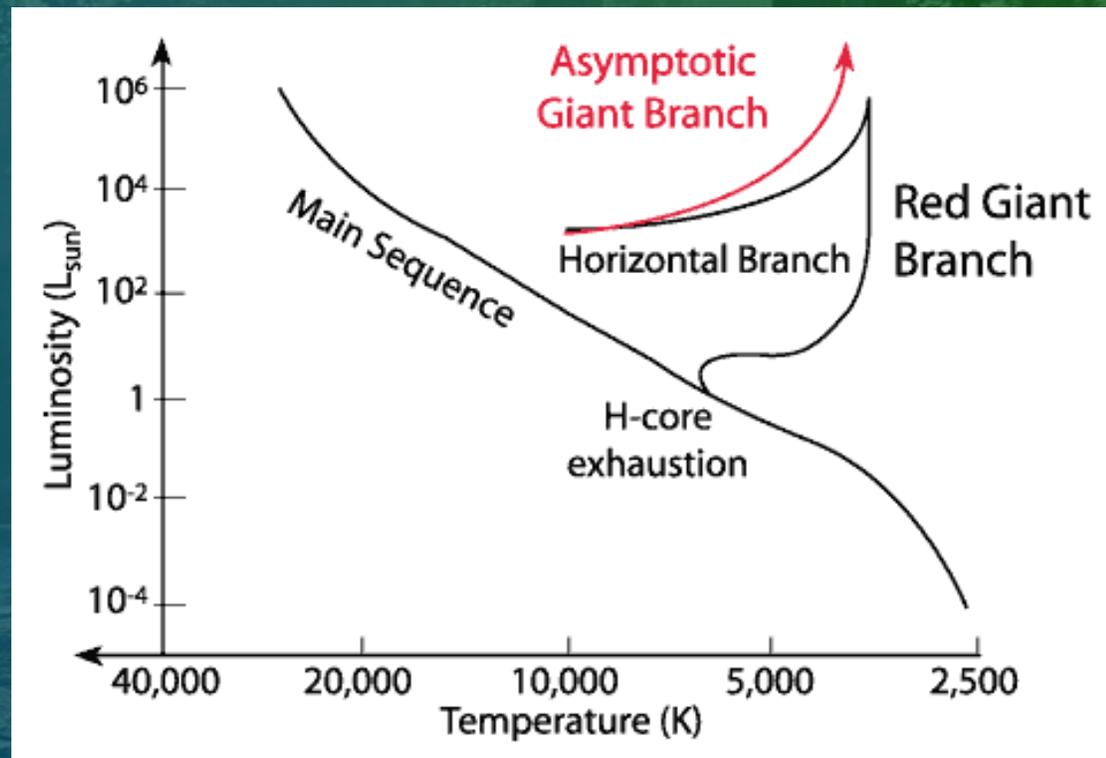
Федотьева А.А., Татарников А.М., Сафонов Б.С., Шенаврин В.И., Комиссарова Г.В.
Государственный астрономический институт им. Штернберга

V CrB

Пульсирующая
долгопериодическая
переменная типа **Миры Кита**

Период изменения блеска
~ **355 дней**

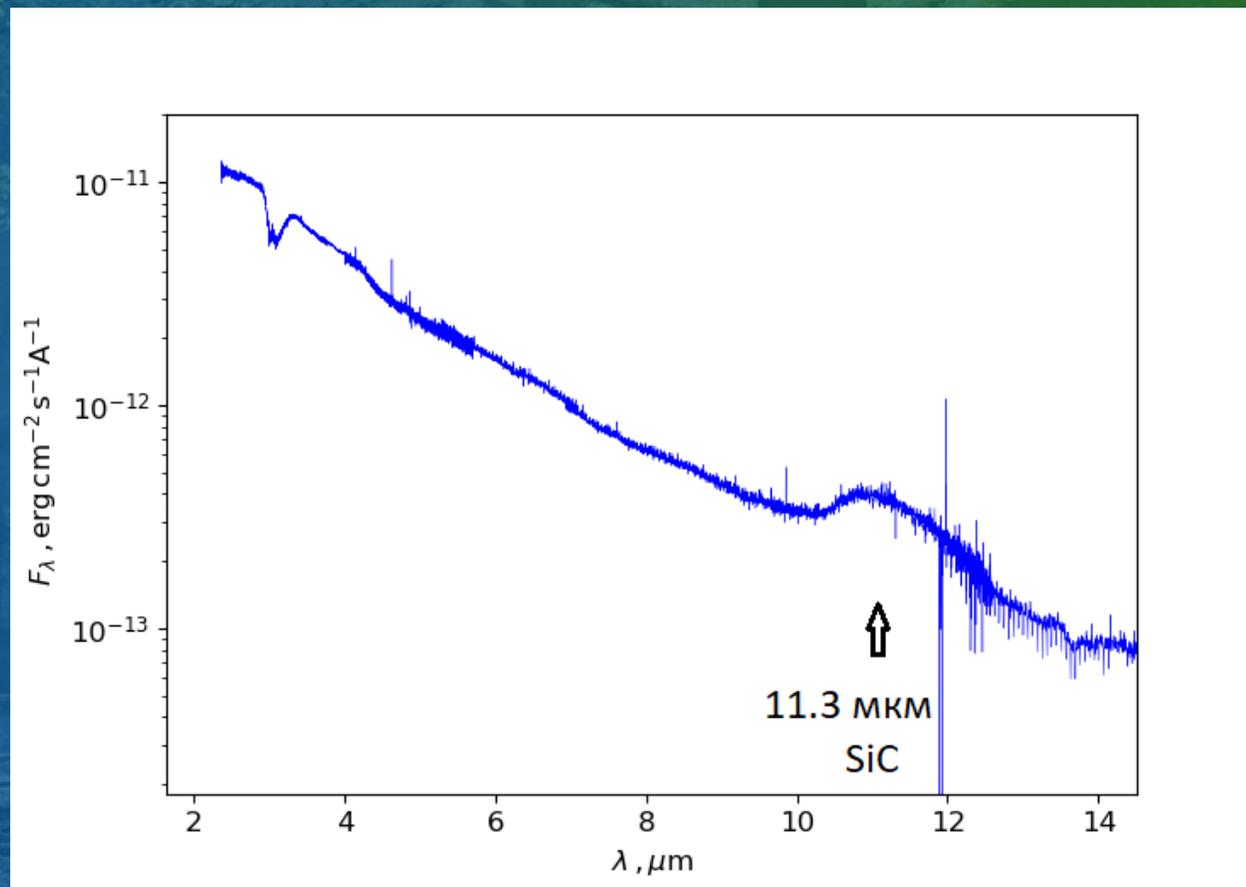
Углеродная звезда:
 $C/O > 1$



Свидетельства наличия
пылевой оболочки:

Избыток излучения в
инфракрасной области.

Присутствие в
спектральном распределении
энергии эмиссионной
особенности на 11.3 мкм,
обусловленной пылинками из
SiC.



Спектр V CrB, полученный космической
обсерваторией ISO в 1997 г.



Цель исследования:

Оценка параметров околозвездной пылевой оболочки V CrB посредством *моделирования* спектрального распределения энергии *системы «звезда + пылевая оболочка»*.



Для моделирования спектрального распределения энергии использовался код

RADMC-3D

(<http://www.ita.uni-heidelberg.de/dullemond/software/radmc-3d/>)

RADMC-3D – программное обеспечение для расчета переноса излучения в произвольных 1D, 2D и 3D геометрических конфигурациях.

Главным образом создано для расчета переноса излучения в запыленной среде.

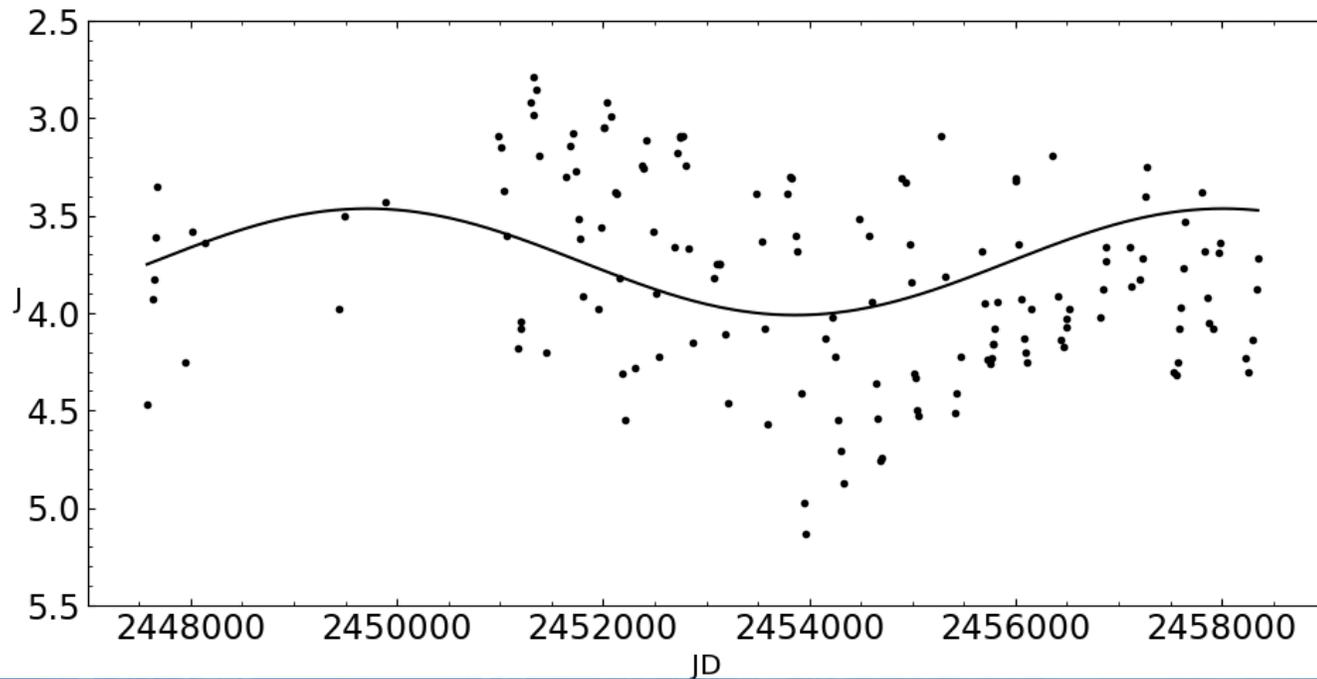


Наблюдательные данные V CrB, по которым строилась модель:

- 1) **Спектры**, полученные *инфракрасной космической обсерваторией ISO* в 1997 г. на разных фазах кривой блеска.
- 2) **BV-фотометрия**, проводившаяся на 60-см телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ в 2001 - 2014 г.г.
Фотометрические данные JHKLM, полученные на 1.25-метровом телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ в 1989 - 2018 г.г.
- 3) **Наблюдения спутника IRAS на 12 мкм, 25 мкм, 60 мкм и 100 мкм.**
- 4) Наблюдения V CrB методом **дифференциальной спекл-поляриметрии** на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ.

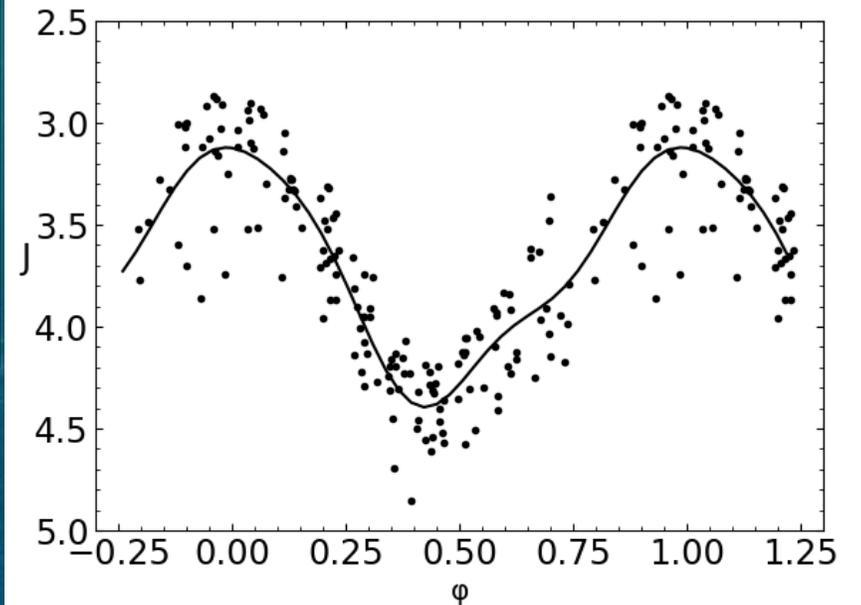


Данные фотометрии V CrV на примере фильтра J



Кривая блеска и периодическое изменение средней величины с периодом ~ 8300 дней.

Фазовая диаграмма
Период 355 дней



Для моделирования необходимо задать спектральное распределение энергии внутреннего источника излучения.

В качестве спектров центрального источника использовались синтетические спектры углеродных звезд из работы

B. Aringer, L. Girardi, W. Nowotny et al (2009).



Синтетические спектры характеризуются следующим набором параметров:

эффективная температура

$\log g$

масса звезды

металличность

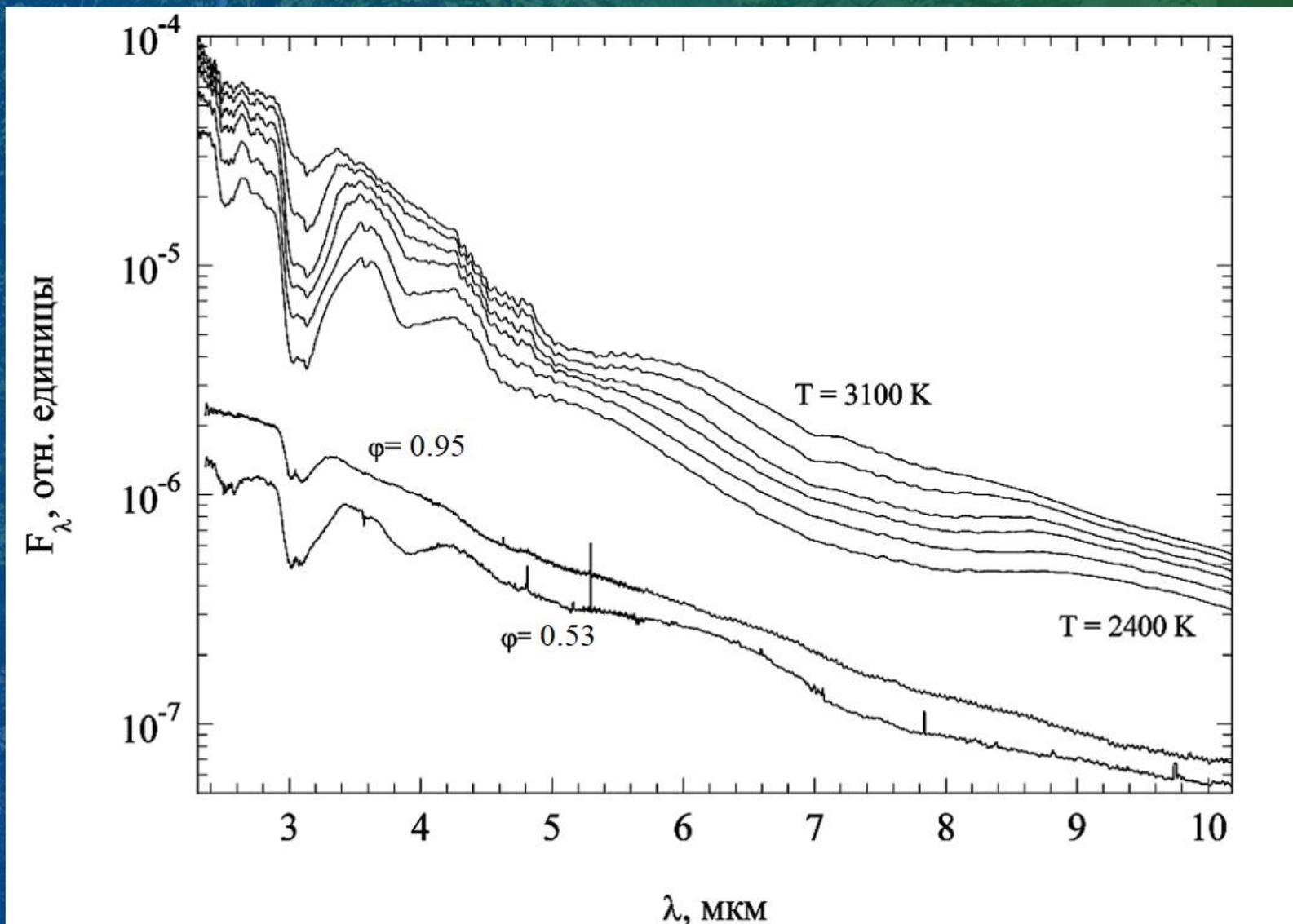
отношение C/O

Последние четыре параметра не оказывают существенного влияния на спектр в ближнем ИК-диапазоне.

Поэтому **выбор спектрального распределения энергии центрального источника определялся только температурой, а светимость задавалась перенормировкой спектра.**



Кривые распределения энергии в спектре V CrB по данным ISO и в синтетических спектрах углеродных звезд

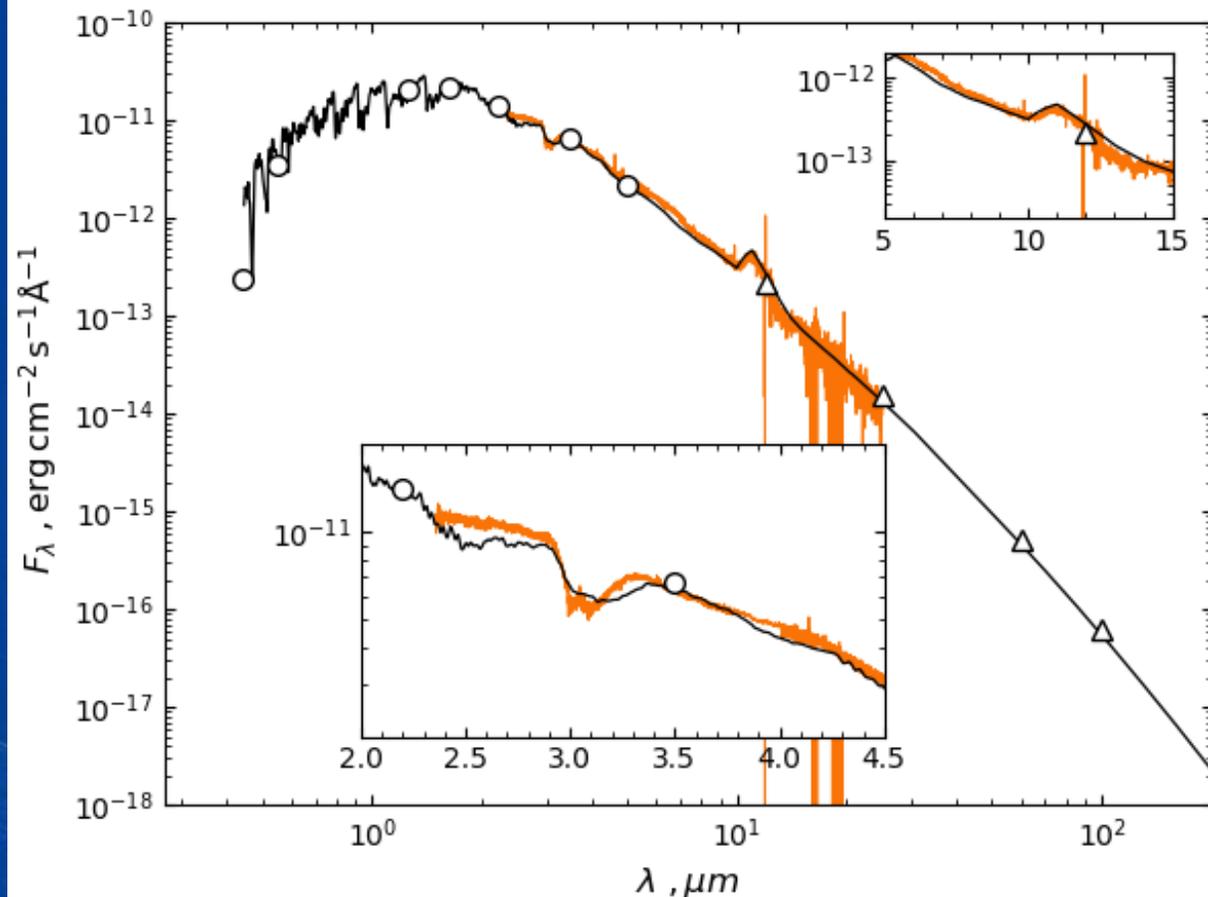


Моделирование пылевой оболочки на фазе максимума:

- Звезда имеет температуру $T_{\text{eff}} = 3000 \text{ K}$.
- Светимость звезды, равная $10800 L_{\odot}$, была оценена по болометрическому потоку (расстояние 824 пк).
- Пылевая оболочка считалась сферически симметричной с распределением плотности
$$n(r) \sim 1/r^2$$
- Считалось, что в оболочке присутствуют сферические пылинки из аморфного углерода и пылинки из карбида кремния.

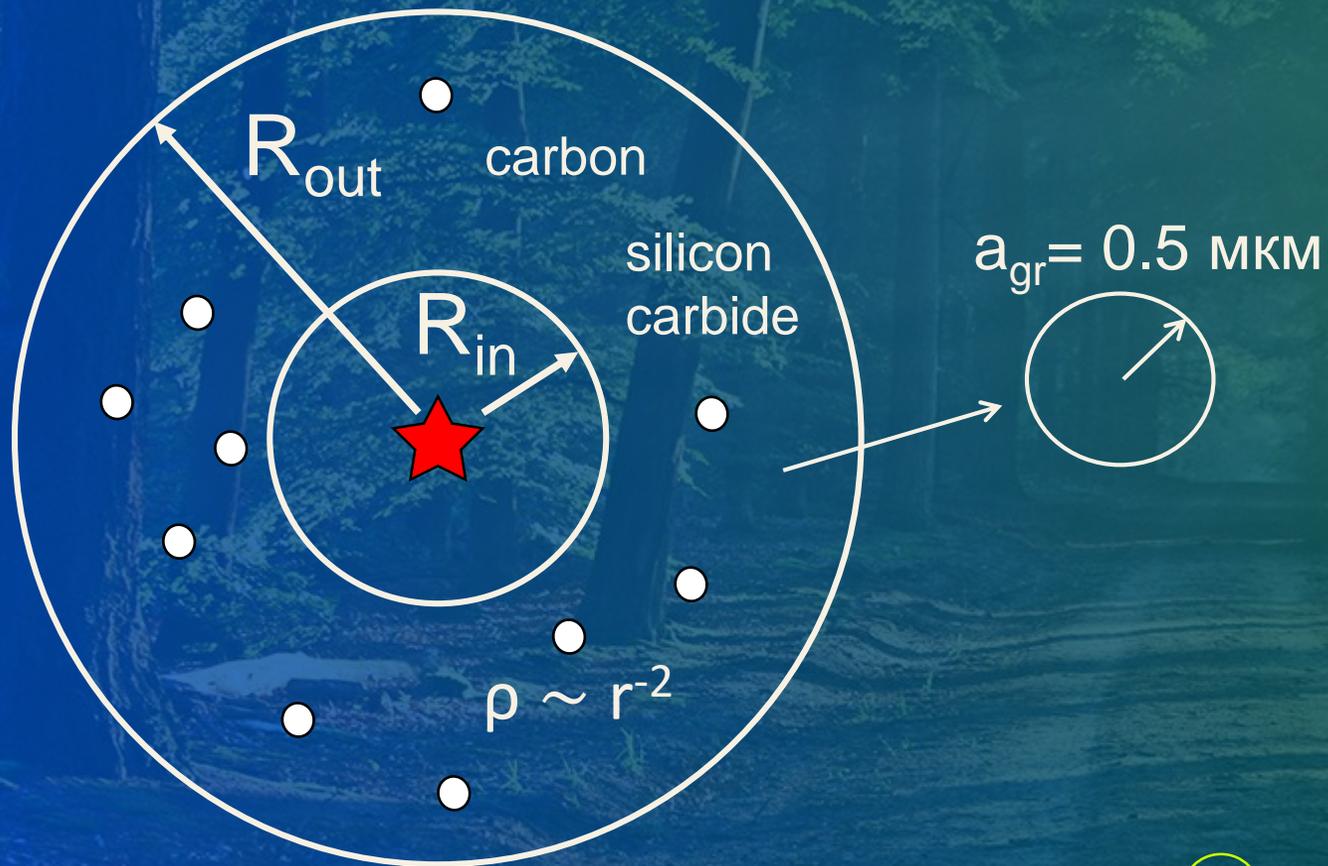


Спектральное распределение энергии V CrV на фазе максимума блеска - модель и наблюдения



Черная кривая – модельный расчет,
оранжевым цветом показан спектр ISO,
кружки – BVJHKLM фотометрия,
треугольники – наблюдения IRAS.

Параметры пылевой оболочки.



$$R_{in} = 8.0 \text{ a.e.}$$

$$R_{out} = 40000 \text{ a.e.}$$

$$\rho_C / \rho_{SiC} = 2$$

Дифференциальная спекл-поляриметрия (ДСП) - это метод исследования распределения поляризованного потока в астрофизических объектах с дифракционным разрешением для данного телескопа.

Наблюдения V CrV этим методом были получены в полосе R_c на 2.5-м телескопе КГО 21 января 2019 г. (на фазе пульсаций $\varphi = 0.2$).

Основные измеряемые величины метода ДСП:

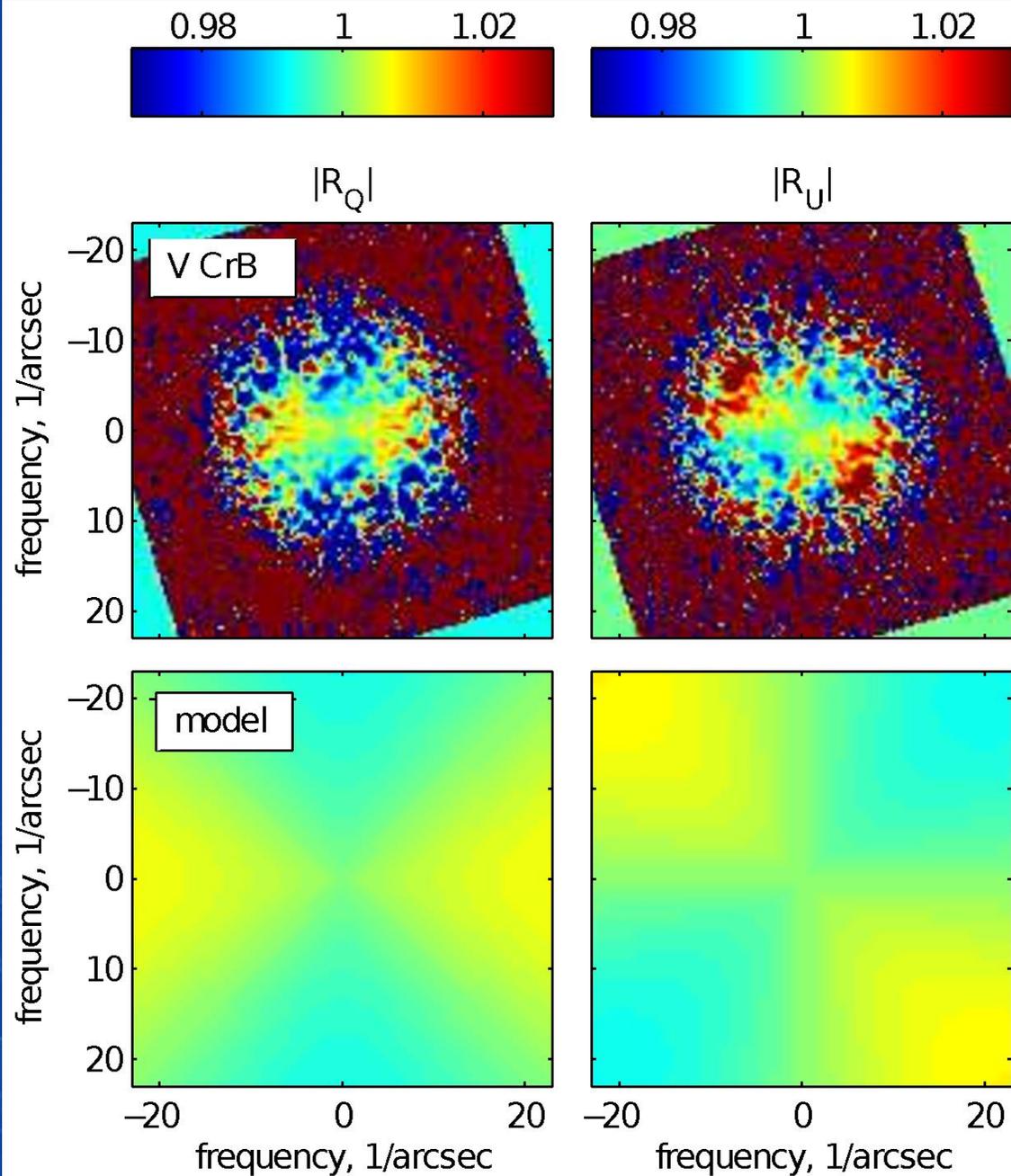
$$\tilde{R}_Q(\mathbf{f}) = \frac{\tilde{I}(\mathbf{f}) + \tilde{Q}(\mathbf{f})}{\tilde{I}(\mathbf{f}) - \tilde{Q}(\mathbf{f})}$$

$$\tilde{R}_U(\mathbf{f}) = \frac{\tilde{I}(\mathbf{f}) + \tilde{U}(\mathbf{f})}{\tilde{I}(\mathbf{f}) - \tilde{U}(\mathbf{f})}$$

\mathbf{f} – вектор пространственной частоты

$\tilde{I}, \tilde{Q}, \tilde{U}$ - преобразования Фурье от распределений параметров Стокса по небесной сфере для данного объекта





Для неполяризованных объектов $R = 1$.
 Если объект обладает разрешенной поляризованной структурой, то эта величина будет отклоняться от единицы.

Для V CrB $\chi_r^2 = 3.4$ в предположении $R = 1$.
 $\Rightarrow R \neq 1$, что говорит о наличии разрешенной поляризованной туманности.

Введем обозначения:

$$\Delta R = R - 1$$

$$\Delta R_T = \Delta R_Q \cos 2\phi + \Delta R_U \sin 2\phi$$

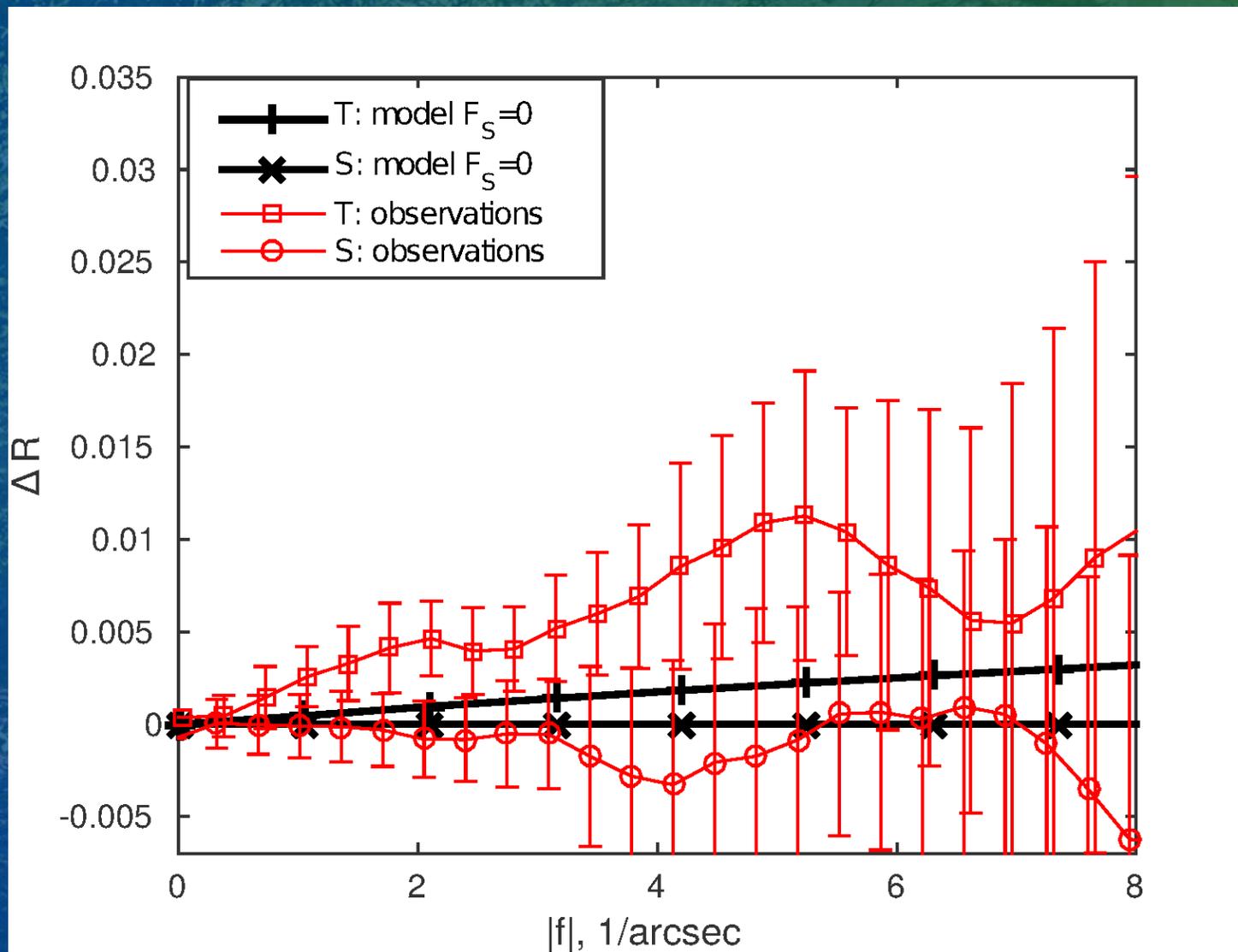
$$\Delta R_S = \Delta R_Q \sin 2\phi - \Delta R_U \cos 2\phi$$

ϕ – полярная координата точки в пространстве частот: $\arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$.

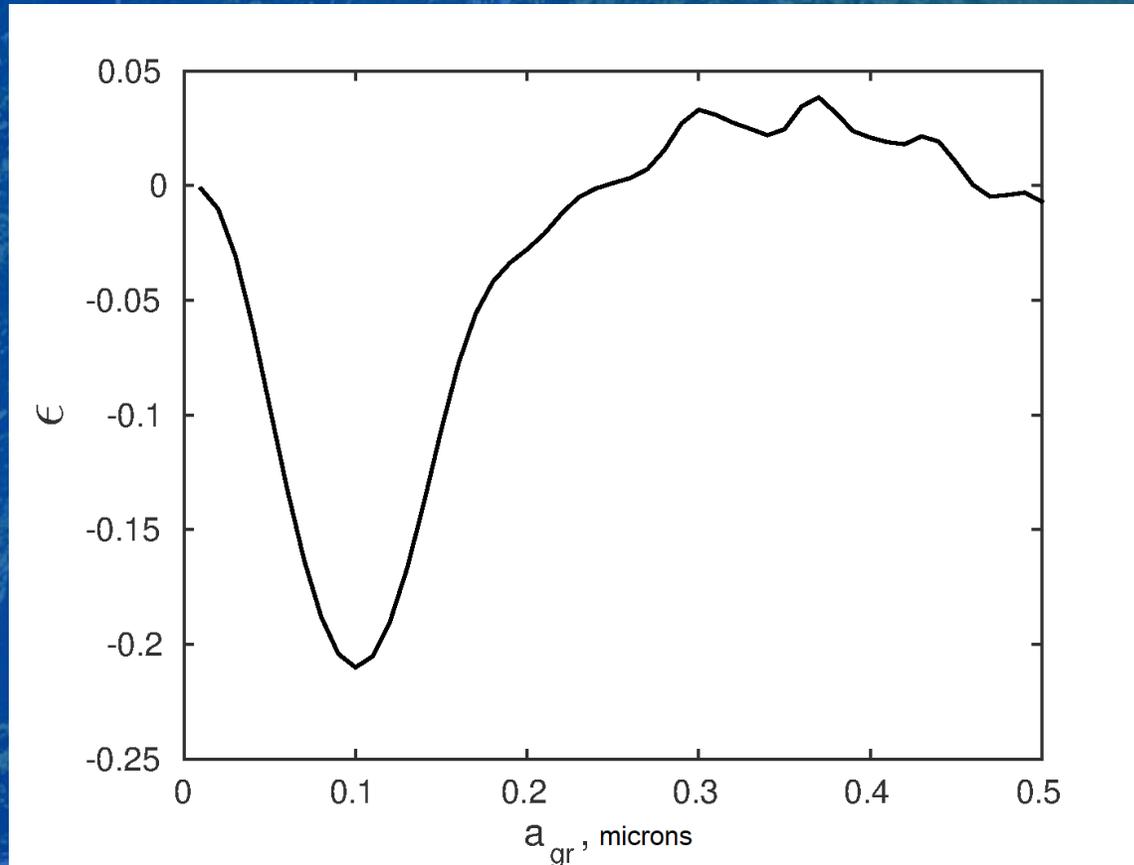
Преимущество параметров ΔR_T и ΔR_S заключается в том, что для центрально-симметричных отражательных туманностей $\Delta R_S = 0$ для всех частот, а ΔR_T всюду положительно и зависит только от модуля частоты $|f|$.



Величины ΔR_T и ΔR_S , усредненные по позиционному углу ϕ



Эффективность генерации поляризованного излучения при рассеянии в зависимости от радиуса пылинок



$\epsilon < 0$: рассеянное излучение преимущественно поляризовано поперек плоскости рассеяния
 $\epsilon > 0$: рассеянное излучение преимущественно поляризовано в плоскости рассеяния



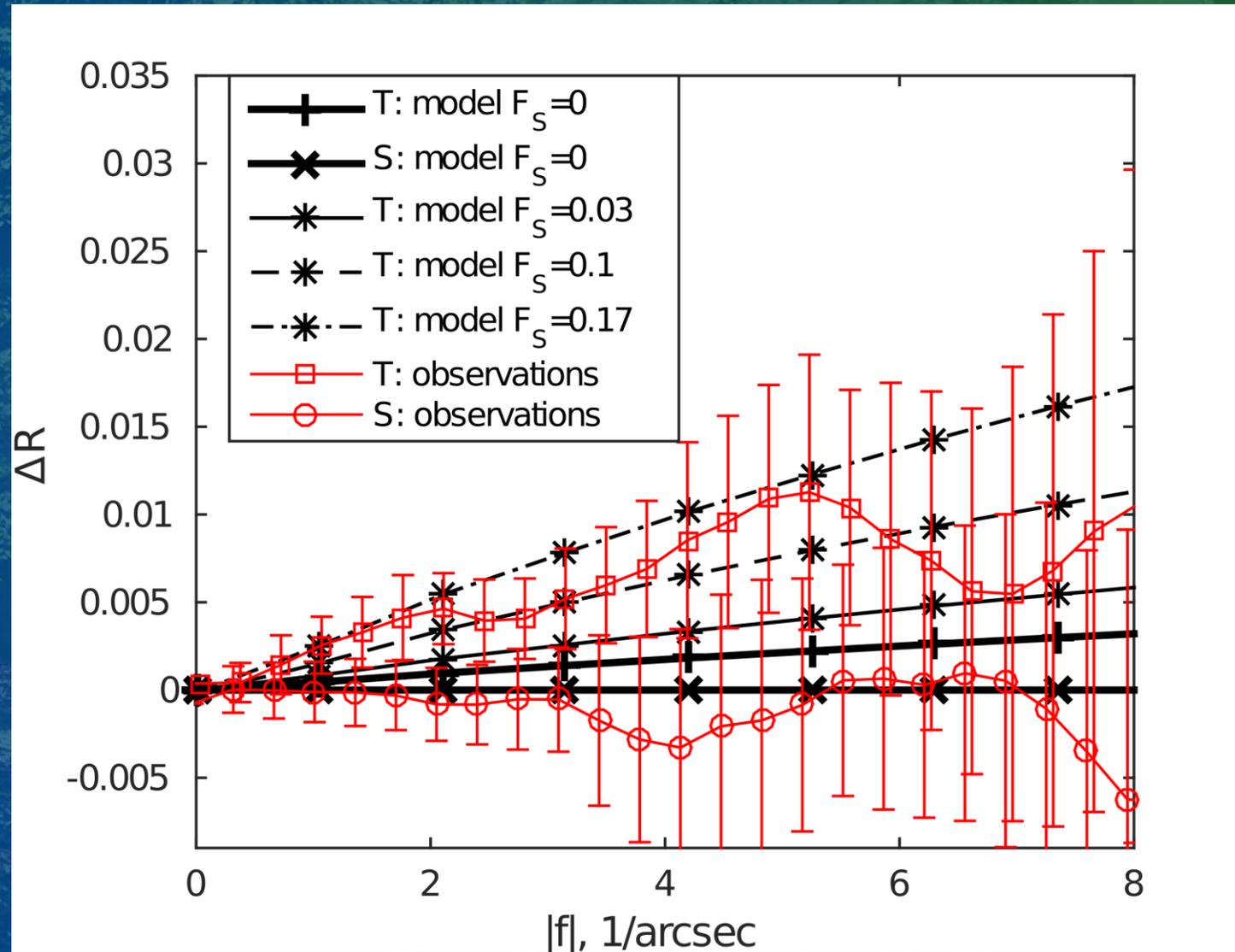
$$\epsilon = 2\pi\sigma_{ext}^{-1} \int_0^\pi S_{12}(\theta) \sin \theta d\theta$$

θ – угол рассеяния

σ_{ext} – сечение экстинкции

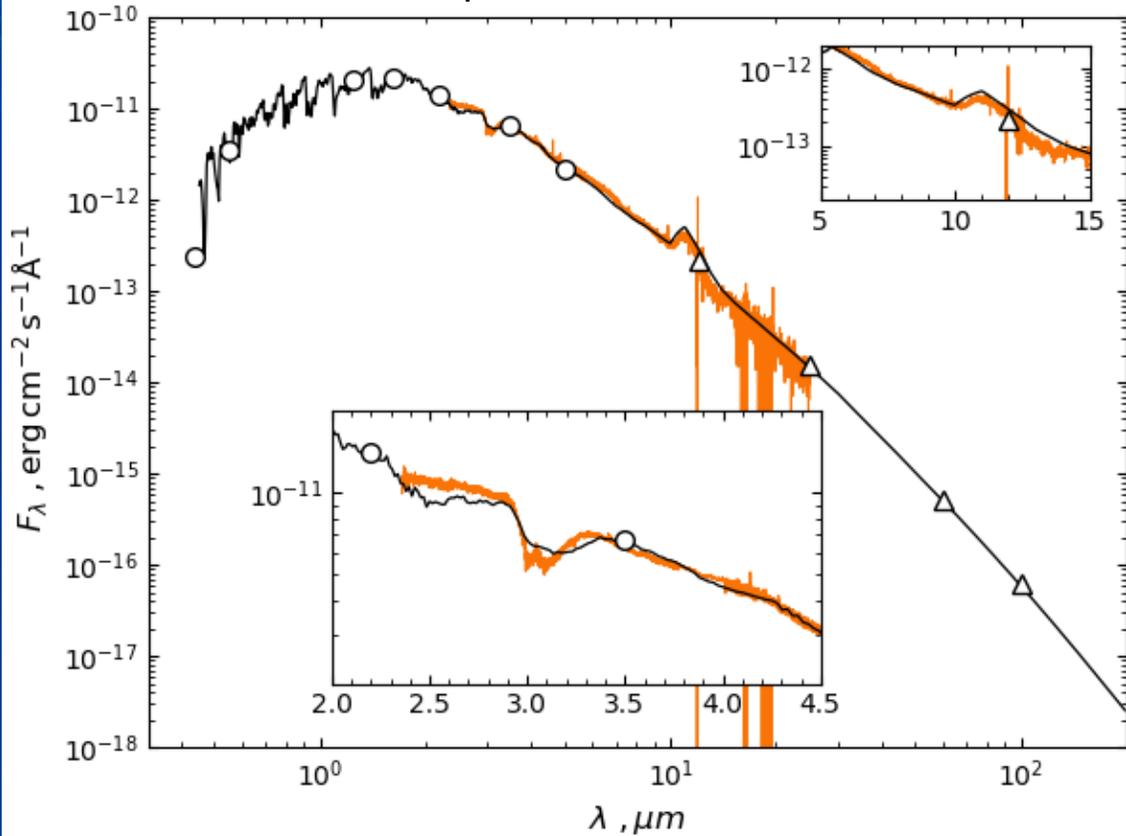
S_{12} – элемент матрицы рассеяния

Величины ΔR_T и ΔR_S , усредненные по позиционному углу ϕ

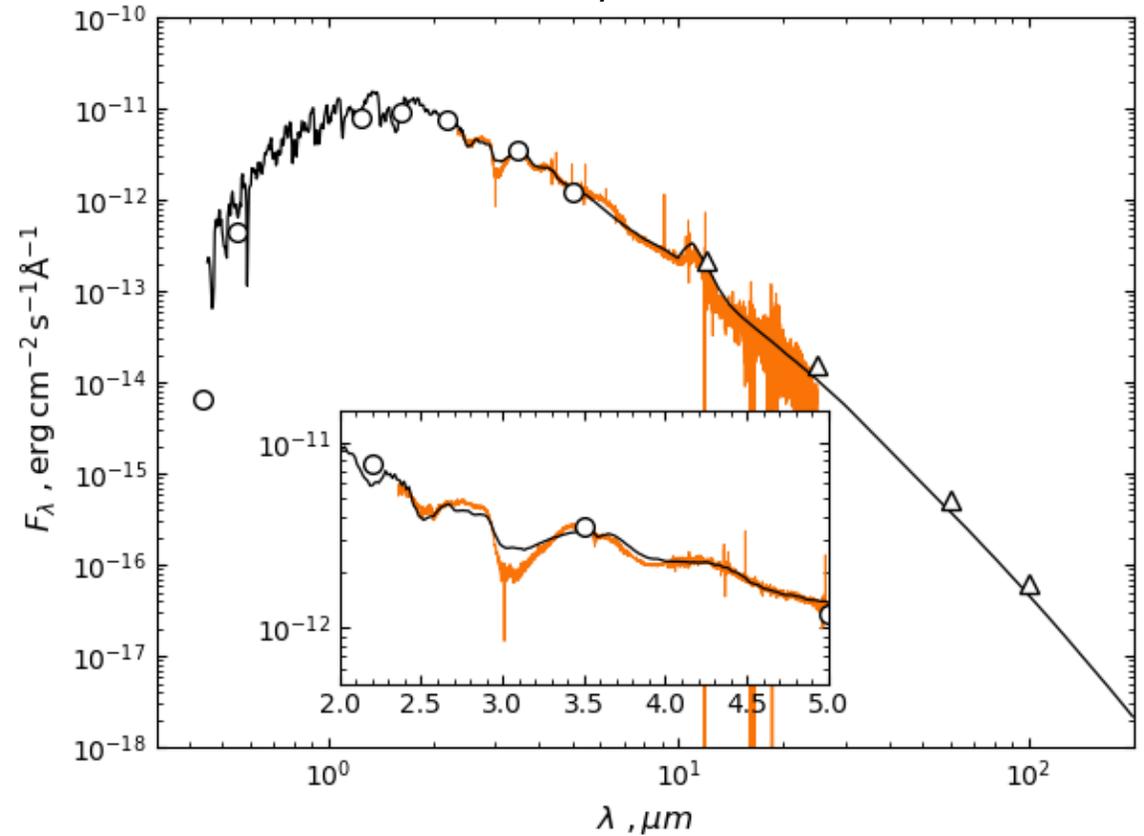


Спектральное распределение энергии V CrB

$\varphi = 0.95$

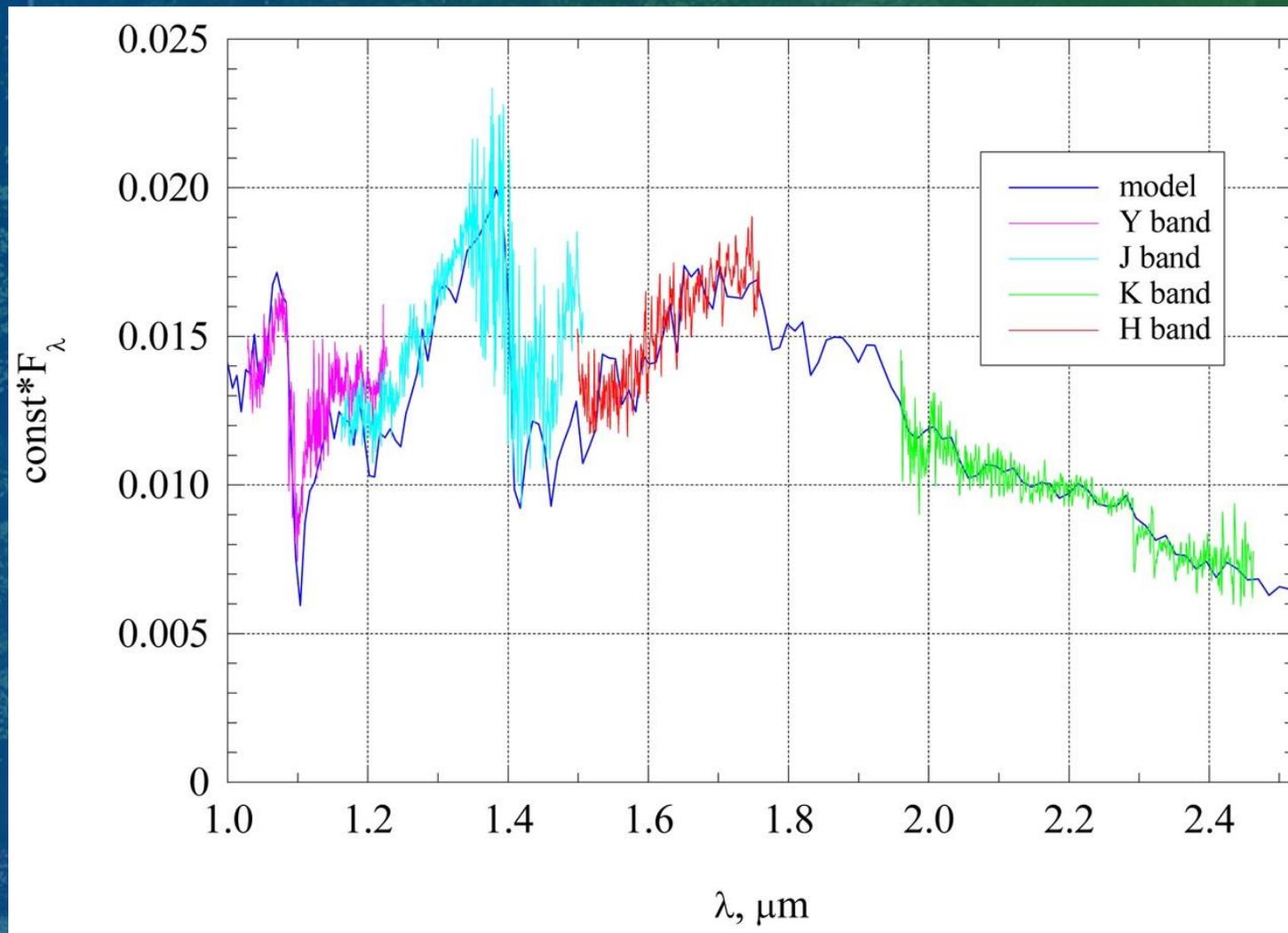


$\varphi = 0.53$



Пылевая оболочка существенно не меняется за время периода пульсаций





Спектр V CrB, полученный 29.01.2019 с ИК-камерой ASTRONIRCAM на 2.5-м телескопе КГО при пульсационной фазе 0.2 в сравнении с модельным спектром для фазы максимума.



Основные результаты исследования:

1) Построена модель околозвездной пылевой оболочки углеродной мириды V CrB, позволяющая хорошо воспроизвести наблюдательные данные.

2) На основе построенной модели можно сделать вывод, что пылевая оболочка существенно не меняется за время периода пульсаций.

3)

Модельные оценки

Полная масса газопылевой оболочки V CrB:

$$4 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$$

Темп потери массы:

$$2 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$$



Спасибо за внимание!

