

# CSST与尘埃天体物理学

李爱根

(CSST课堂第19期)

2022-05-24

# 目录

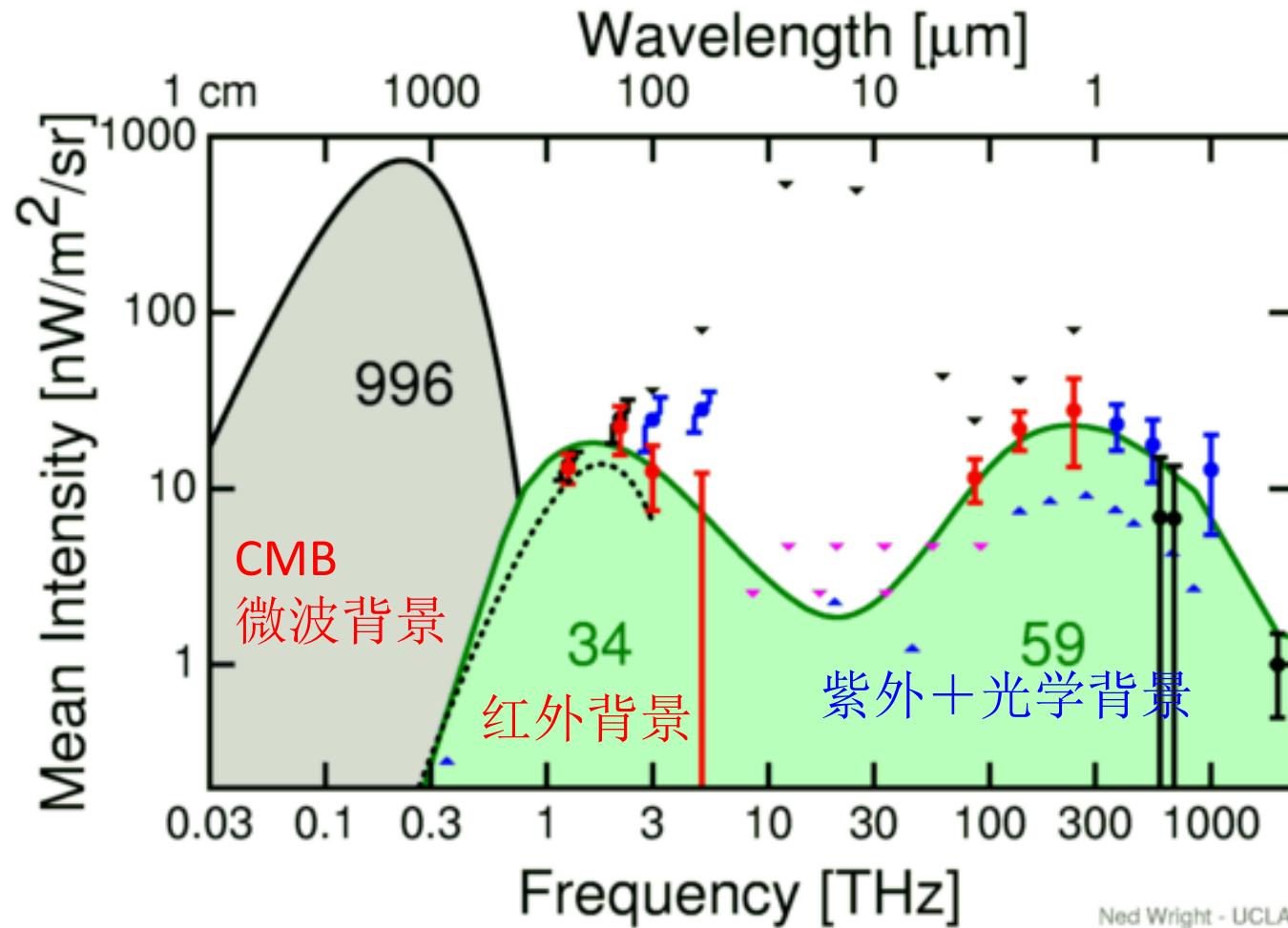
1. 尘埃的广泛存在
2. 尘埃影响天体物理众多学科
3. CSST尘埃课题进展
4. 服务CSST

# 尘埃广泛存在于各种天体环境 ← CSST观测目标

- 太阳系：彗星，小行星，行星际空间，行星环
- 前主序星：系外行星形成尘埃盘
- 主序星：碎屑盘（debris disks）
- 演化晚期恒星：星周包层（circumstellar envelopes）
- 星际尘埃
- 高红移天体：高红移类星体，毫米波星系，DLAs
- 活动星系核：尘埃环

宇宙**红外背景辐射**与**光学+紫外背景辐射**相当

→ 遥远星系的星光50%被尘埃吸收并在红外再辐射



尽管星际尘埃仅占星系  
可视质量的千分之一

CMB: 996  $\text{nW/m}^2/\text{sr}$

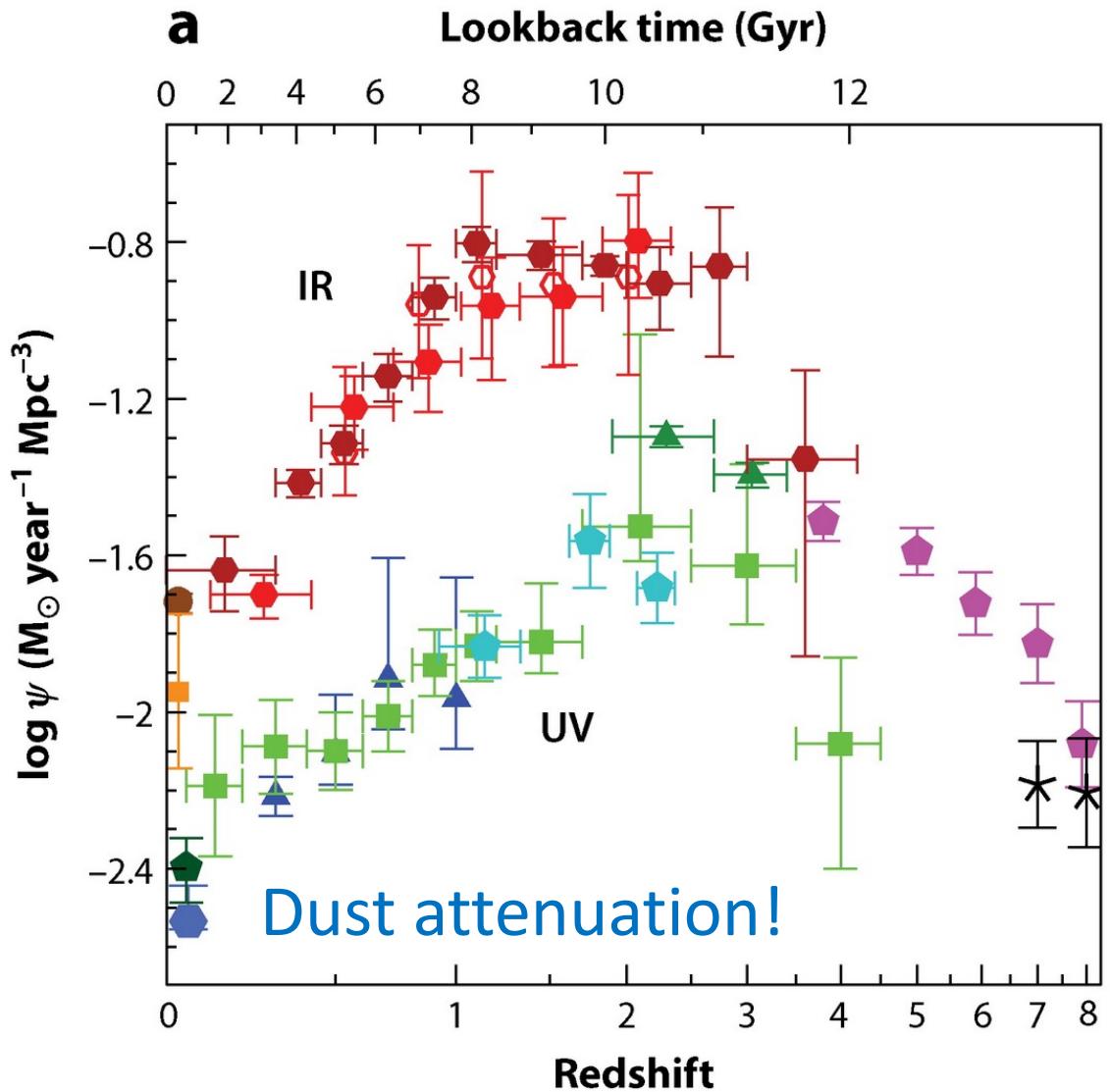
CIRB: 34  $\text{nW/m}^2/\text{sr}$

紫外光学近红外: 59  $\text{nW/m}^2/\text{sr}$

# 尘埃深刻地影响天体物理的几乎所有过程

- 恒星、行星、乃至生命的形成与化学演化
- 恒星质量流失、活动星系核 喷流
- 星系形成与演化：**数值模拟必须自洽地考虑尘埃的作用**
  - 与尘埃有关的物理过程深刻影响星系形成与演化
    - photoelectric heating of gas by dust → gas dynamics
    - $H_2$  formation on dust → star formation history
    - stellar radiation pressure on dust → galactic chemical evolution
  - **N-body+星系演化的流体动力学模拟**: 星系由暗物质、恒星、气体和**尘埃**组成。

# Cosmic Star Formation History (SFH)

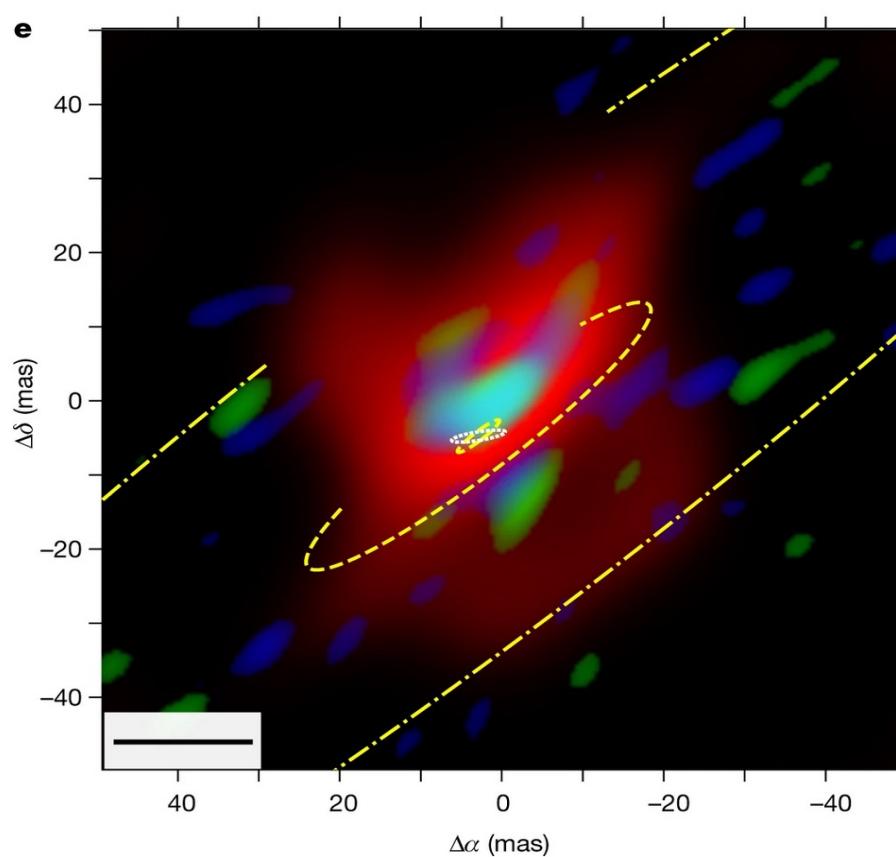
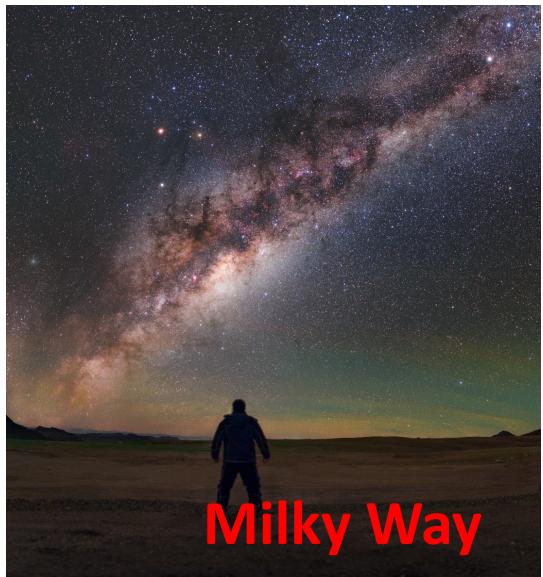
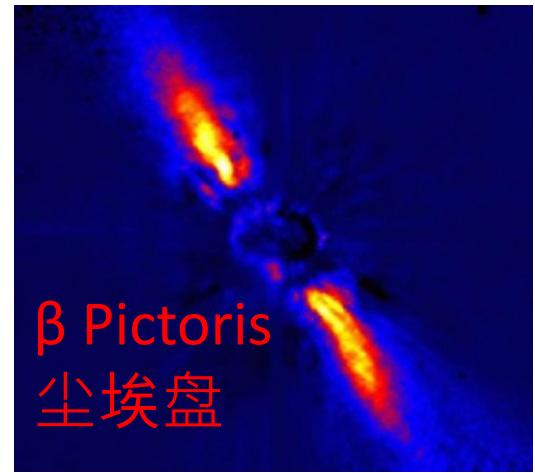


尘埃消光严重影响宇宙恒星形成率的测定

尘埃红外辐射更精准地刻画宇宙恒星形成历史

SFR densities in the FUV  
(uncorrected for dust attenuation)  
and in the FIR (Madau & Dickinson 2014)

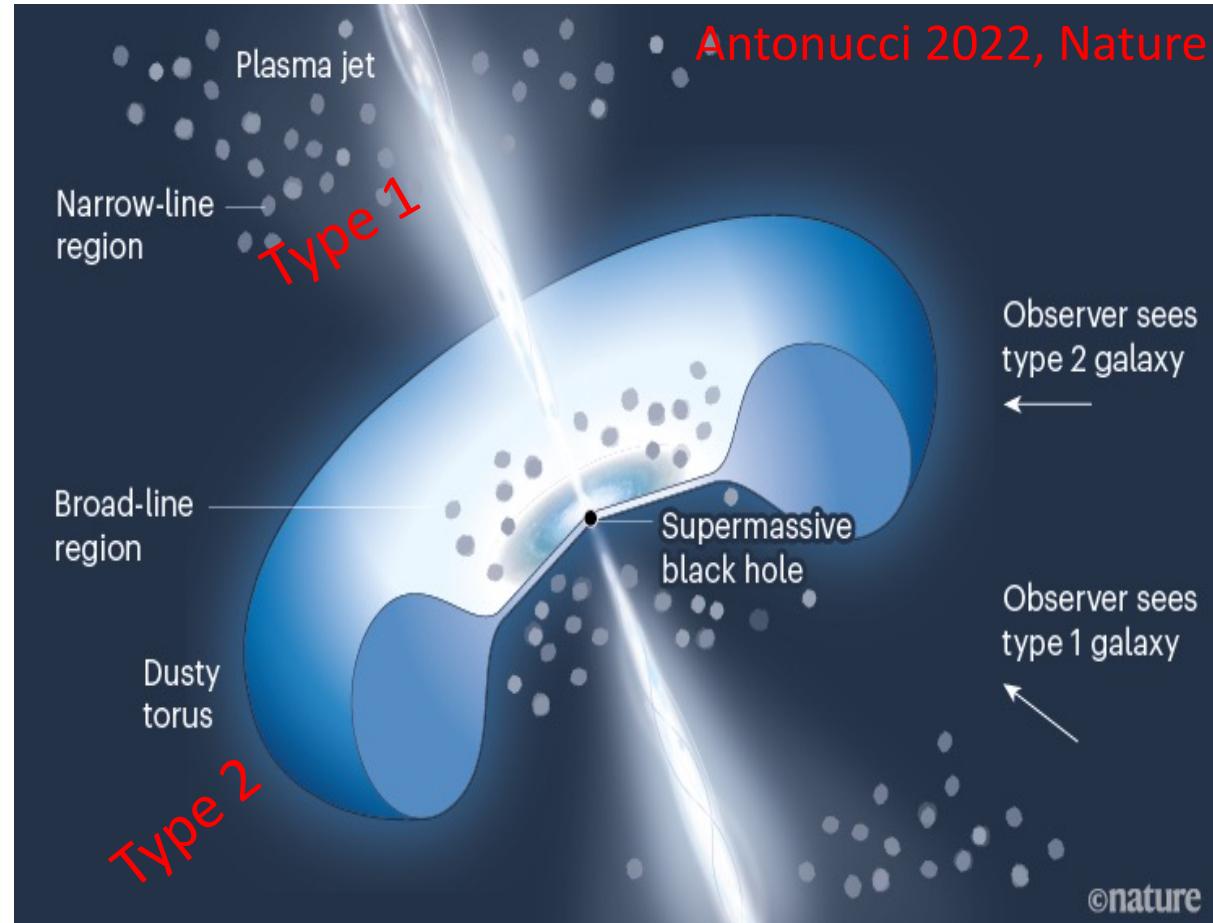
# 尘埃天体物理涉及CSST众多学科



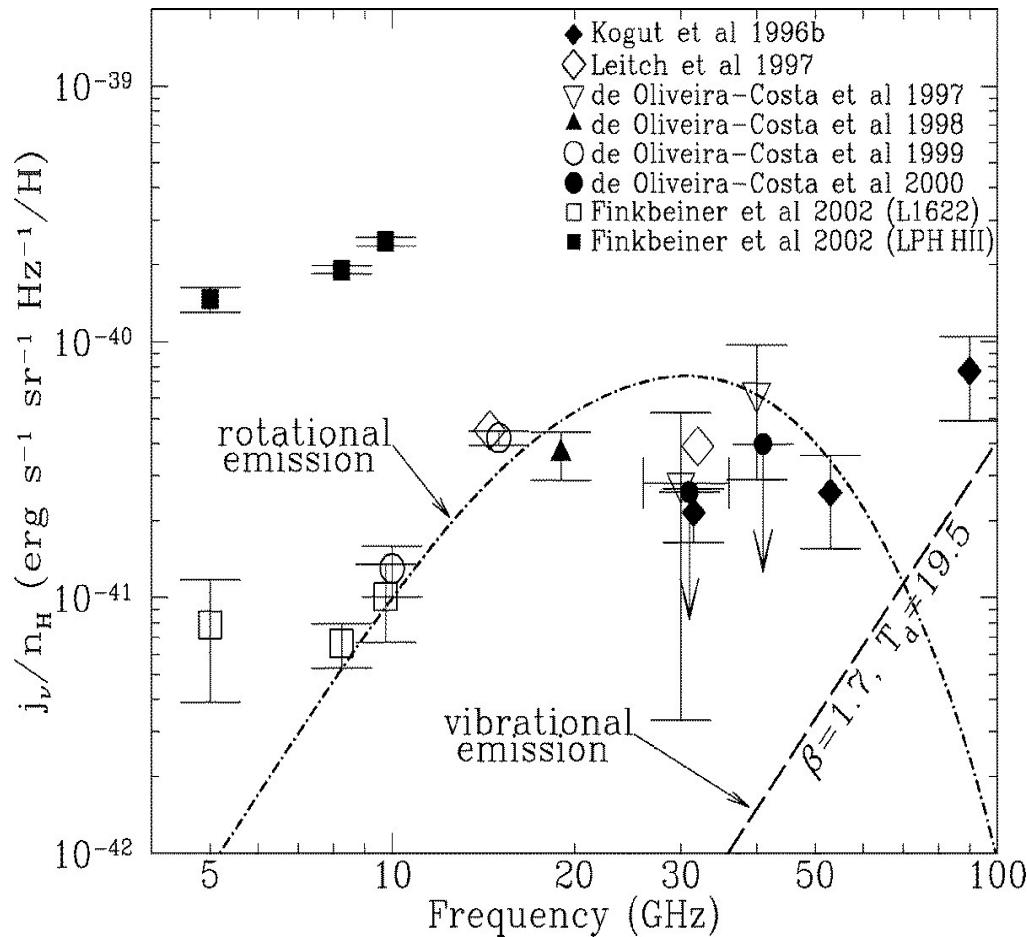
1. 各种天体环境（尘埃盘、星周包层、银河系、河外星系和活动星系核）的消光、偏振和红外辐射的研究

Composite image:  
3.7  $\mu$ m (blue), 4.6  $\mu$ m (green), 12  $\mu$ m (red)

# 尘埃是活动星系核统一模型的基石



## 2. 星际尘埃在精确宇宙学上的意义 (如：星际尘埃如何影响CMB的精确测量?)



- 纳米尘埃的转动电偶极辐射  
→ 微波辐射
- 铁尘埃磁偶极辐射  
→ 微波辐射

阿里原初引力波探测: 40GHz!

- 精确扣除银河系“前景”微波辐射(Galactic foreground microwave emission) ⇒ 精准测量宇宙微波背景辐射

# 又如： 星际偏振如何影响 B-Modes的探测？



The Bicep2 telescope, in the foreground, was used to detect the faint spiraling gravity patterns — the signature of a universe being wrenched violently apart at its birth. Steffen Richter/Associated Press

BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)

然而，银河系星际尘埃在红外和毫米波的偏振，会产生与宇宙微波背景辐射B模偏振类似的信号！

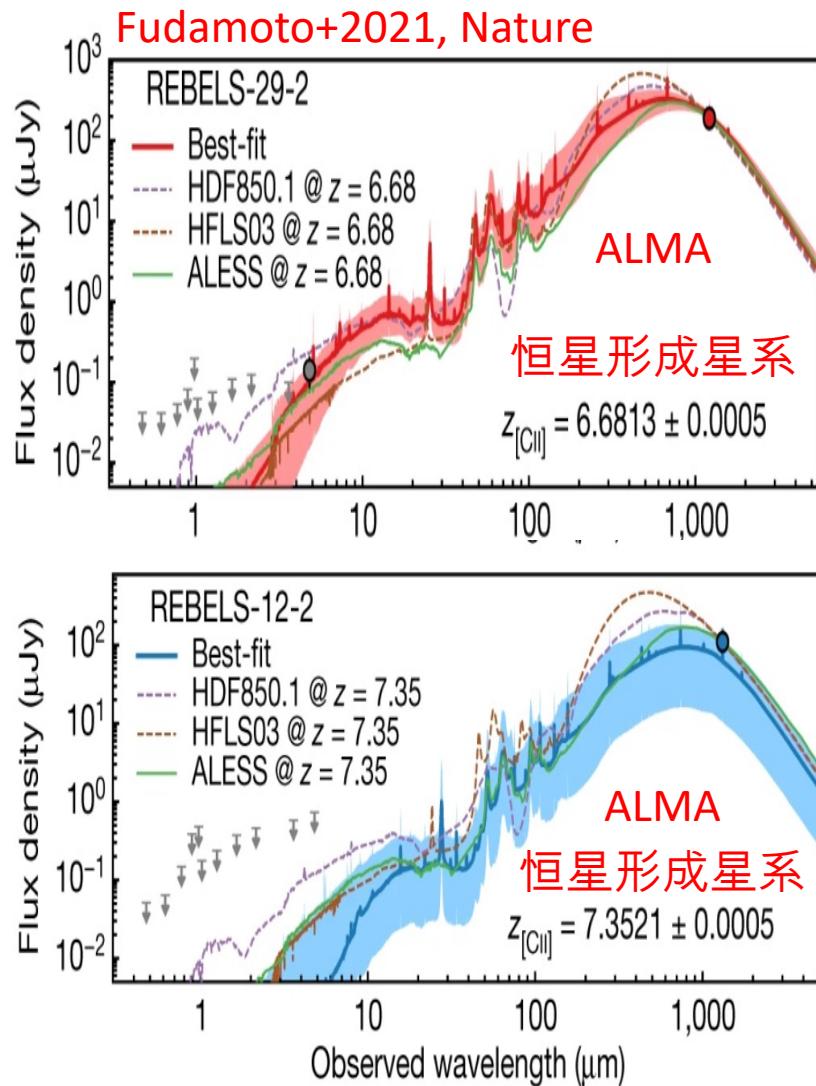
The New York Times

*Space Ripples Reveal Big Bang's Smoking Gun*

BICEP detected the first direct evidence “B-Modes” for cosmic inflation (primordial gravitational waves, quant fluctuations in the space-time metric that were generated when the universe was  $10^{-30}$  s old)?

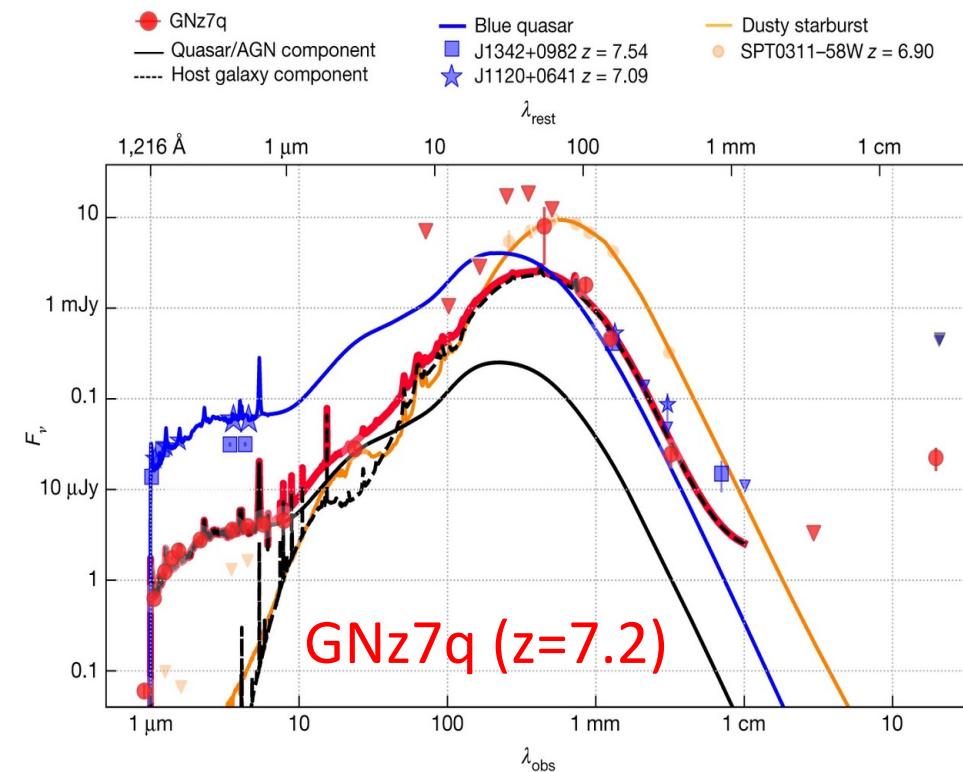
宇宙河外偏振背景成像

### 3. 星际尘埃(特别是高红移天体尘埃)的物理、化学性质及其起源与演化

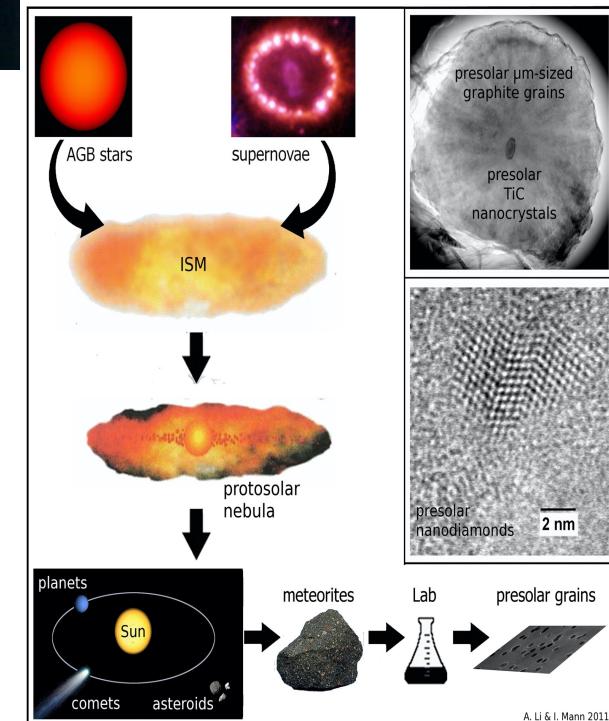
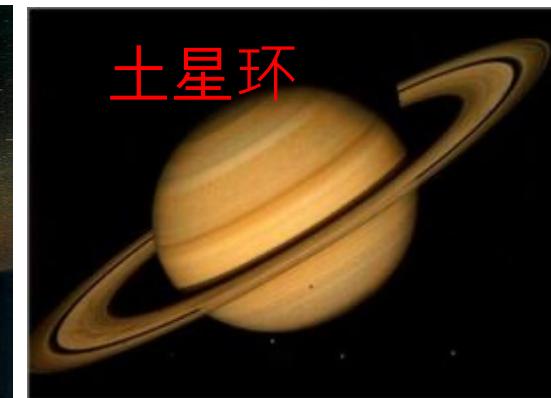
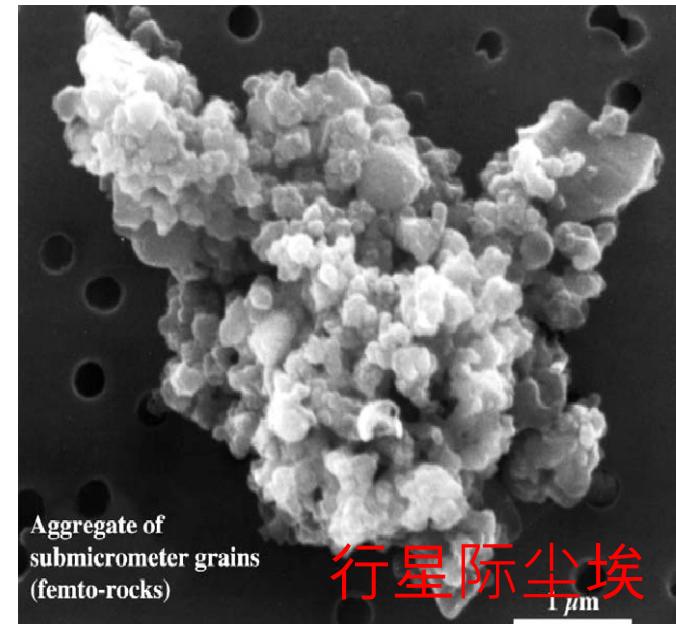
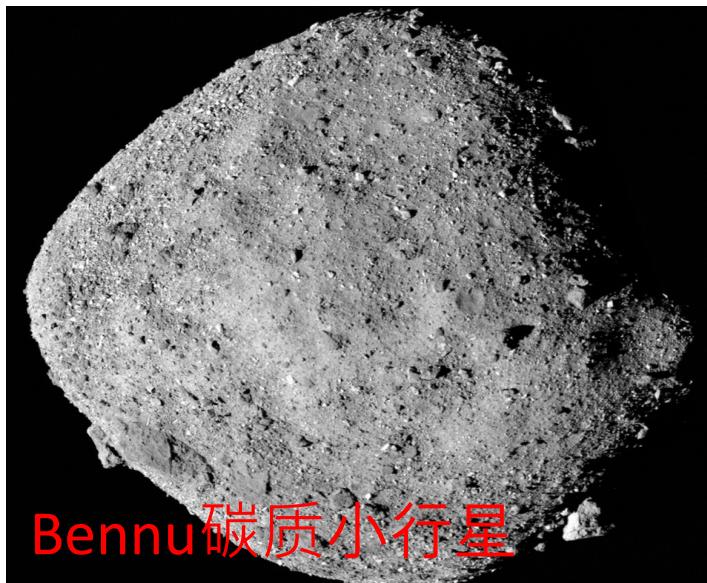


A dusty compact object bridging galaxies and quasars at cosmic dawn

Fujimoto+2022, Nature

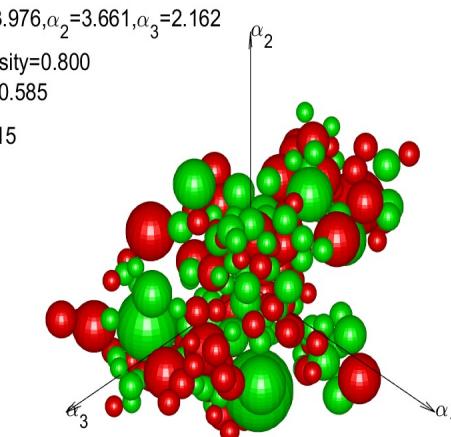
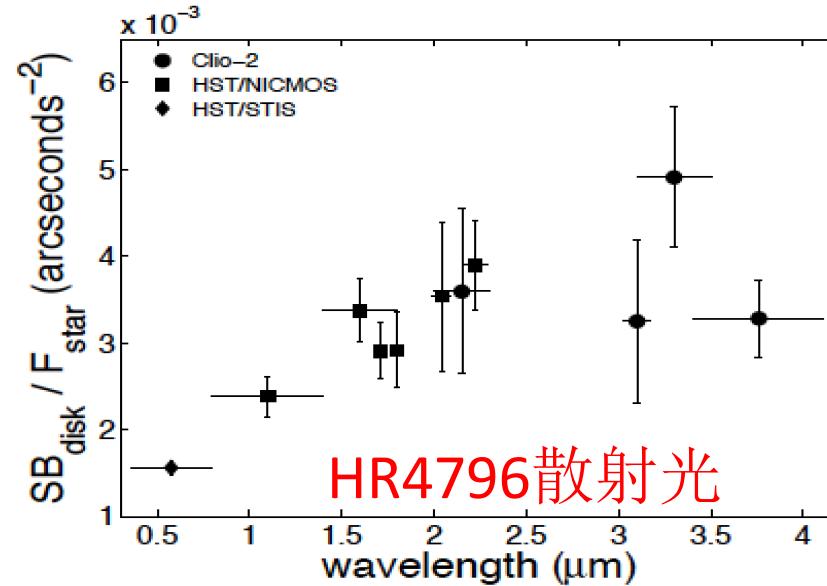
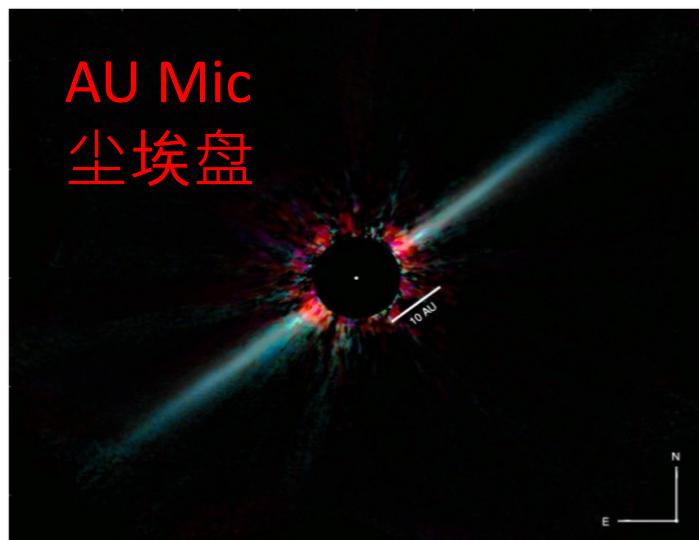
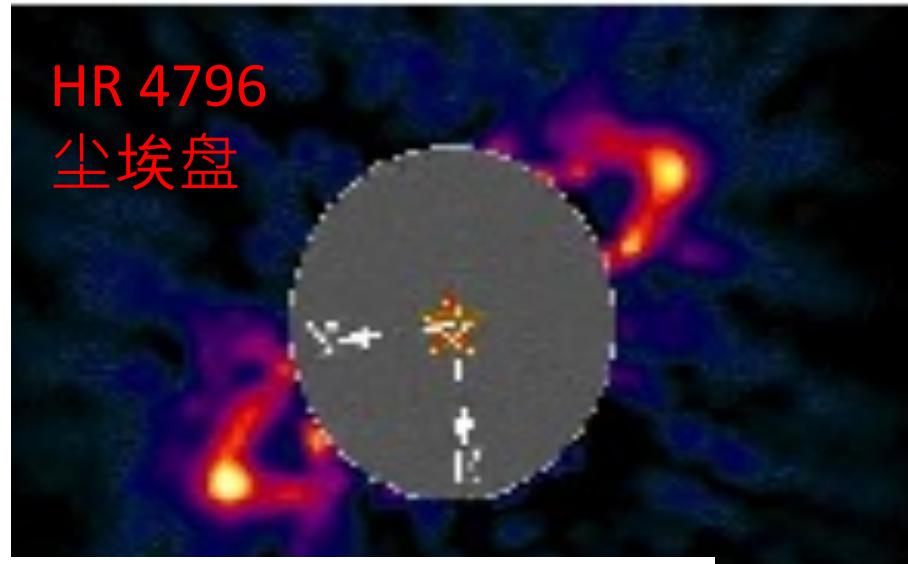


## 4. 太阳系小天体（彗星、小行星、行星际）的尘埃散射和红外辐射的观测、分析和模拟



陨石中的前太阳尘埃

## 4. 系外行星形成尘埃盘和主序星碎屑盘的尘埃散射和红外辐射的观测、分析和模拟



刘方舟+李爱根

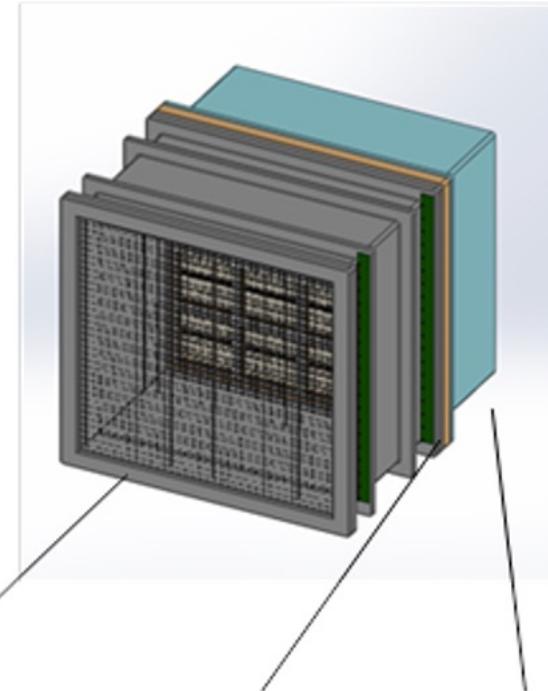
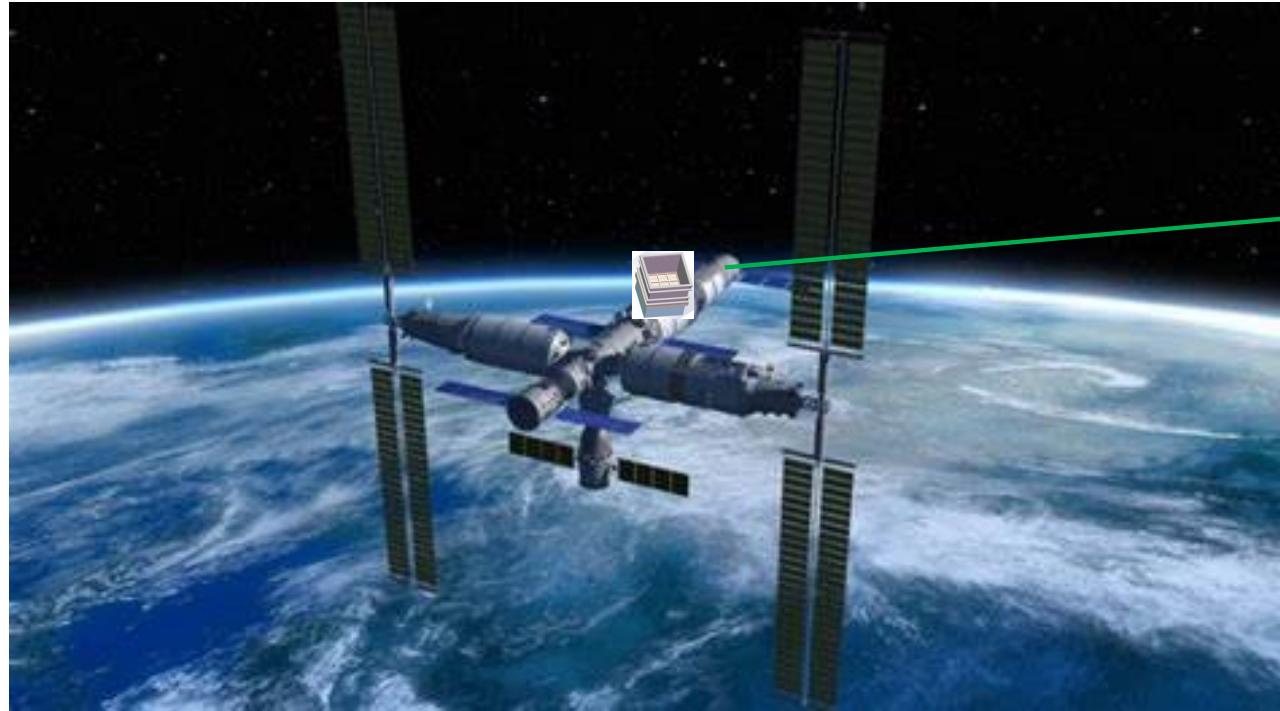
行星形成尘埃盘中尘埃的生长模拟以及电磁散射特性的计算

## 5. 太阳系尘埃的空间探测及其对太阳系早期演化和生命起源的揭示(以及实验室模拟).

这些前沿问题与当前国家空间天文观测（如CSST、阿里40GHz微波和毫米、亚毫米巡天等）和行星探测及未来发展息息相关。

# 基于中国空间站的星尘计划

(PI: 刘继峰)



径迹探测器

PVDF探测器

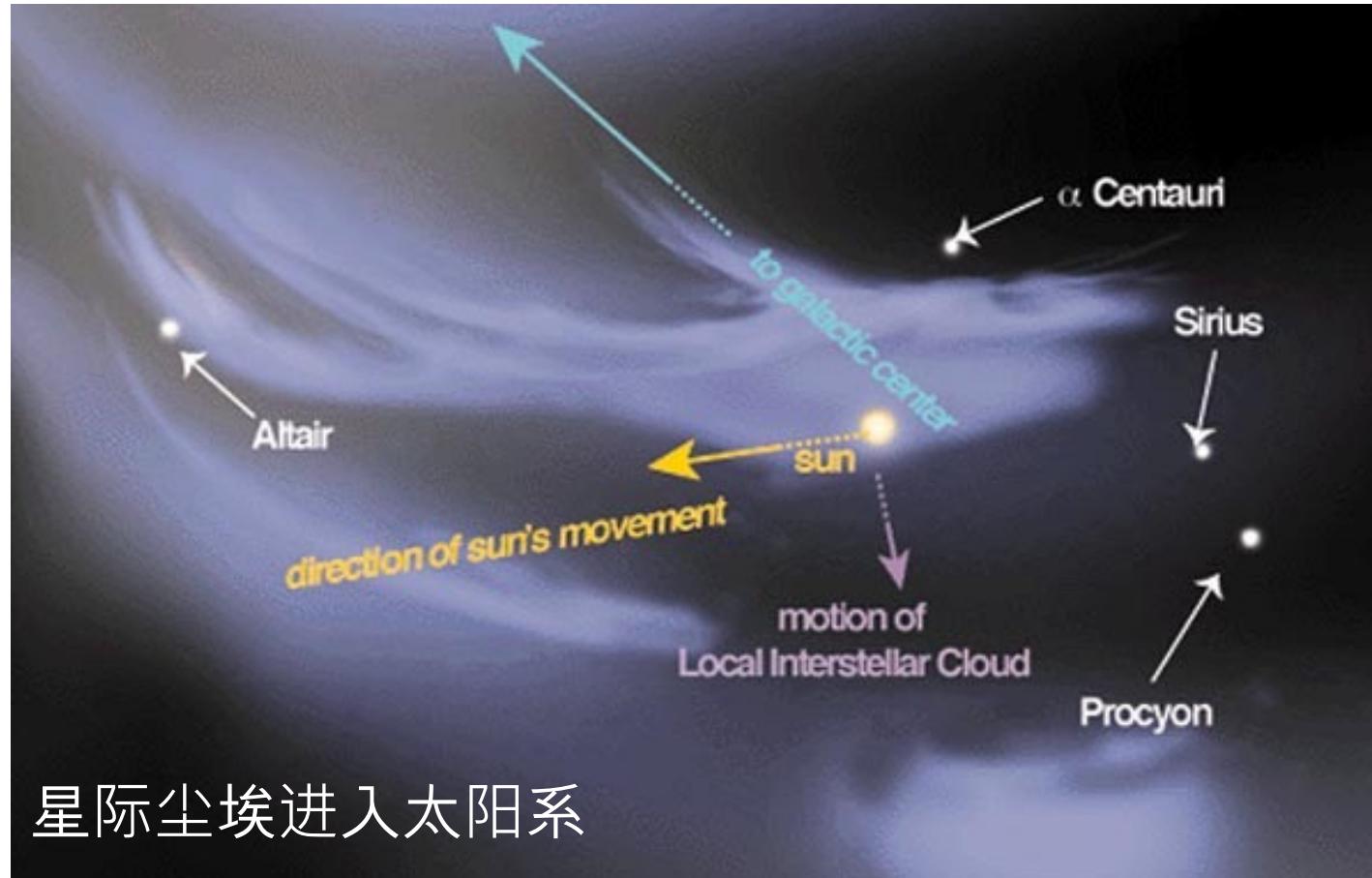
气凝胶收集器

空间站外挂宇宙尘埃探测仪

30cm\*30cm，预计每天捕获1个星际尘埃，  
300个行星际尘埃，数千个地月尘埃/碎片

星尘探测与测量、收集回收、星尘溯源算法、实验室分析

# 太阳系内星际尘埃的红外辐射 影响宇宙红外背景辐射的测量



凌霄探尘 (PI: 刘继峰)

# 太阳系内星际尘埃的红外辐射 影响宇宙红外背景辐射的测量

A simple estimation of the dust emission from the local IS cloud.

local interstellar (IS) cloud.

As seen from the Sun ( $\odot$ ),  $dF =$

$$I_d \sigma_d r^2 dr \frac{L_\odot}{4\pi r^2} \frac{1}{4\pi r^2}$$

$I_d \sigma_d L_\odot$  power absorbed from the Sun.

$I_d \sigma_d L_\odot$  observed from the Sun (Earth)

$$I = \int I_d dV = \int \frac{dF}{dr} dr$$

$$= N_d \sigma_d \frac{L_\odot}{4\pi r^2} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dr}{r^2}$$

$$\approx \frac{N_d \sigma_d L_\odot}{16\pi r_{\min}^3}$$

$$\Rightarrow I \approx \frac{N_d \sigma_d L_\odot}{(16\pi)^2 \times 15 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ erg s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ AU}} \times \left(\frac{\text{AU}}{r_{\min}}\right)$$

$$\Rightarrow I \approx 15 \times 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \left(\frac{\text{AU}}{r_{\min}}\right)$$

$N_d \equiv$  dust volume density  
 $\sigma_d \equiv$  dust absorption cross section (optical wavelength).

Typical interstellar dust:

$$N_d \sigma_d \approx 3 \times 10^{22} \frac{\text{cm}^2}{\text{AU}} + 1 \text{ H}_2 \uparrow \approx 10^{-22} \text{ cm}^{-1}$$

Take  $N_H = 0.3$  for the local IS cloud

Li & Draine

# 扣除太阳系内星际尘埃的红外辐射 是精准测量宇宙红外背景辐射的前提！

Cosmic Infrared Background: seems to peak at  $\lambda = 60\mu m$ .  $(\langle I_\nu \rangle)_{60\mu m}^{CIB} \approx 3 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$

for  $\lambda = 60\mu m \rightarrow T \approx 50K$ , in the local ISM cloud,  $T = 50K$  probably comes mainly from,

say  $R = 100\text{AU}$

Take  $R = 100\text{AU} \rightarrow I \approx 1.5 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . because  $T \propto 1/R$

$R = 50\text{AU}, I \approx 3 \times 10^{-6} \dots \dots$  heating by the Sun!

- 太阳系内星际尘埃的红外辐射与宇宙红外背景相当
- 精准测量宇宙红外背景辐射，必须扣除太阳系内星际尘埃的红外辐射

# 银河系及近邻星系的 星际消光与尘埃

## 课题进展

(银河系及近邻星系一类课题)

本课题着眼于：

- (i) 服务于CSST观测准备，服务于CSST诸学科；
- (ii) 推进星际物理学科发展。

# 课题及人员组成

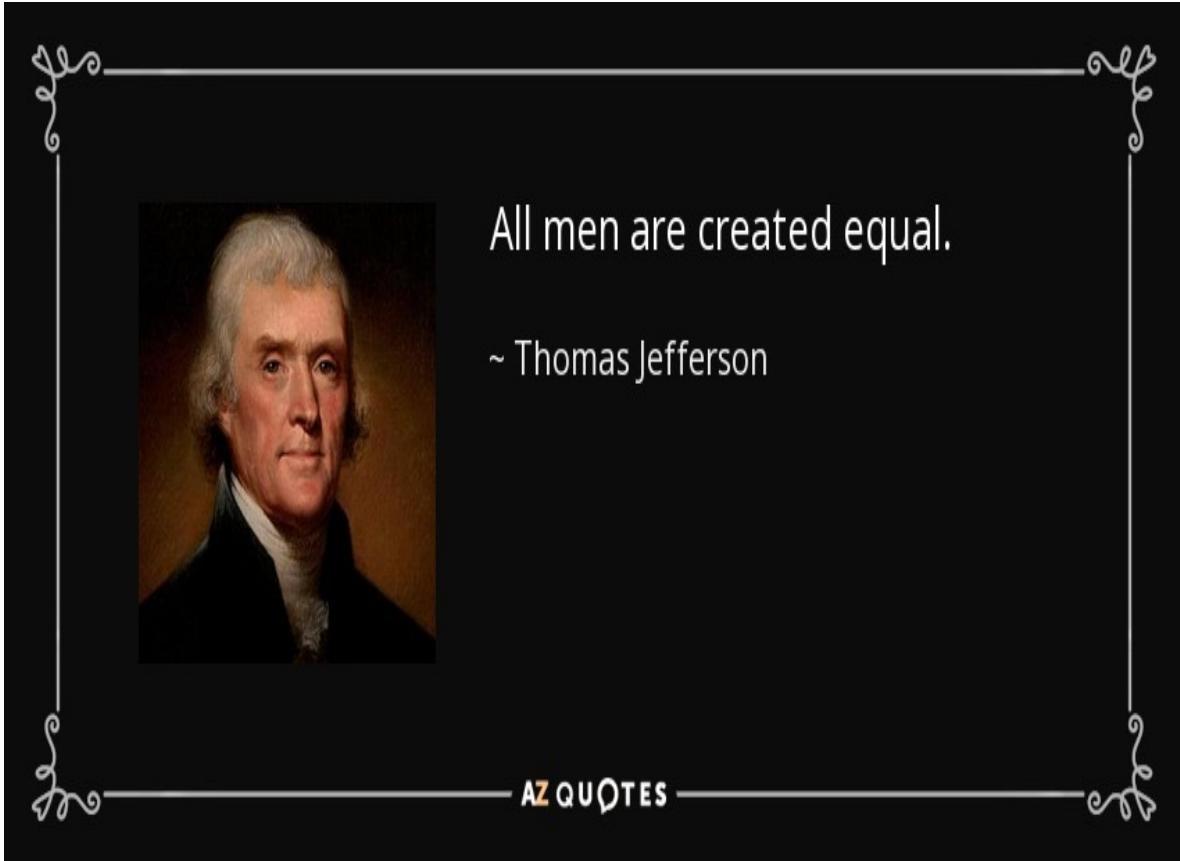
	子课题名称	负责人	成员	单位
子课题	1 银河系消光与尘埃	姜碧洮	张泳，王科，陈丙秋， 王舒，张泳，朱辉	北京师范大学，中山大学， 北京大学，云南大学，国家 天文台
	2 近邻星系消光与尘埃	高健	苑海波，邵正义， 李林林，单素素，Sarah Bird	北京师范大学，上海天文 台，河北师范大学，国家 天文台，三峡大学
	3 消光与尘埃模型		肖存英，向福元，杨雪娟，李 祺，刘方舟，闫林丽	中国科学院大学，国家天 文台，北京师范大学，湘 潭大学，湖南师范大学， 安徽建筑工程大学

- 根据研究内容设置三个子课题，成员19人，70%为40岁以下；囊括了我国星际尘埃领域的主要力量；
- 多所地方院校参与，增大天文学科布局，激励对CSST的广泛参与；

# 进展概览

1. CSST消光（预）研究进展
2. CSST尘埃物理进展
3. CSST与“新型”尘埃观测准备
4. 尘埃及消光与CSST诸学科

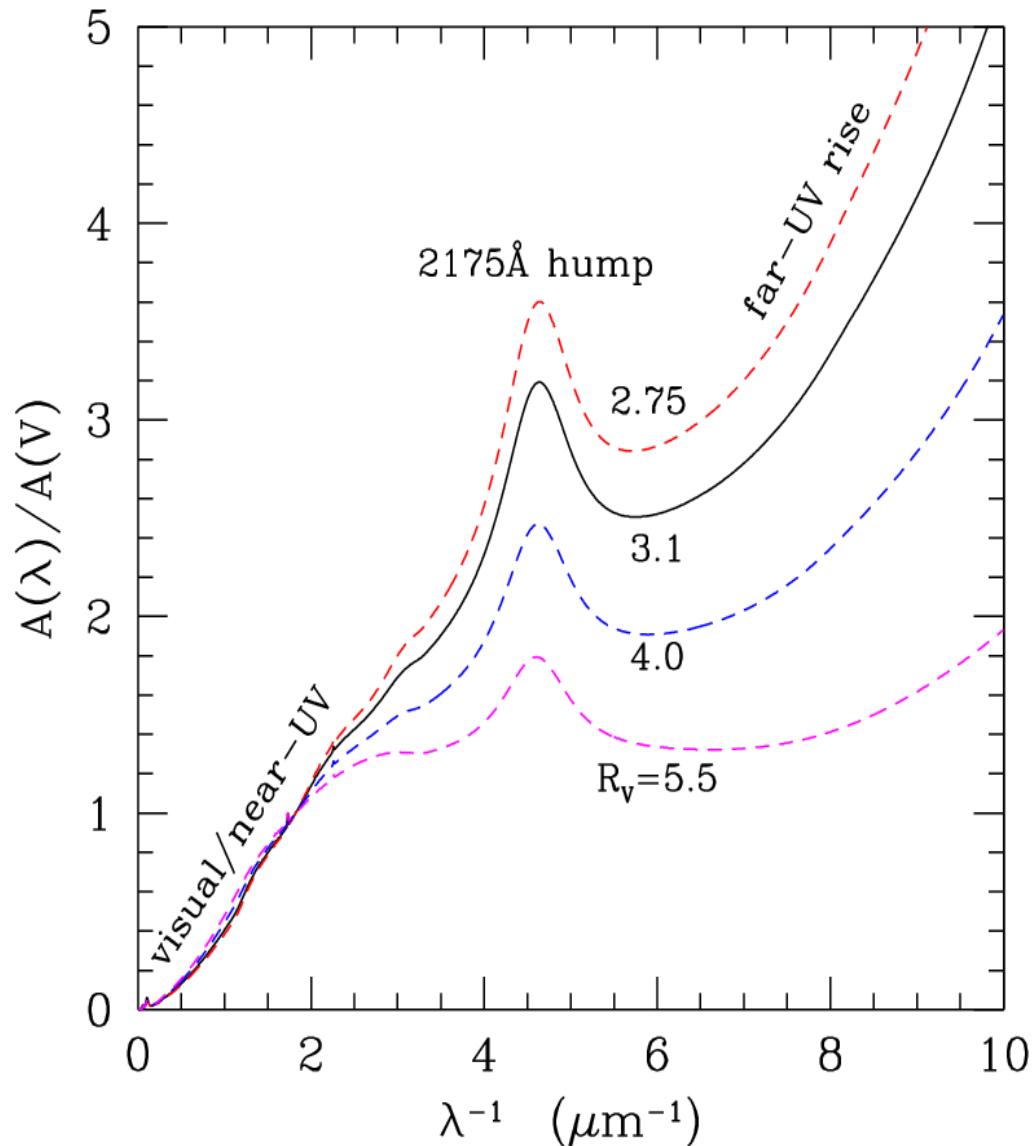
# CSST消光（预）研究



- Are all interstellar clouds created equal?
- 当前星际消光改正、主流尘埃模型大都基于银河系“平均”消光曲线
- →无从得知消光与尘埃特性（尺寸、组分）与星际环境（密度、辐射场、H/H<sub>2</sub>比率等）的关系

CSST为研究各个独特的星际环境的消光提供了契机！

# 银河系平均消光曲线 ( $R_V=3.1$ )



- 星际消光律（星际消光曲线）：  
星际消光随波长的变化
- 消光改正以及尘埃模型构建，  
通常采用银河系平均消光曲线

CCM消光曲线：仅由 $R_V$ 决定

≡ VIEW  
Abstract  
Citations (8841)  
References (43)

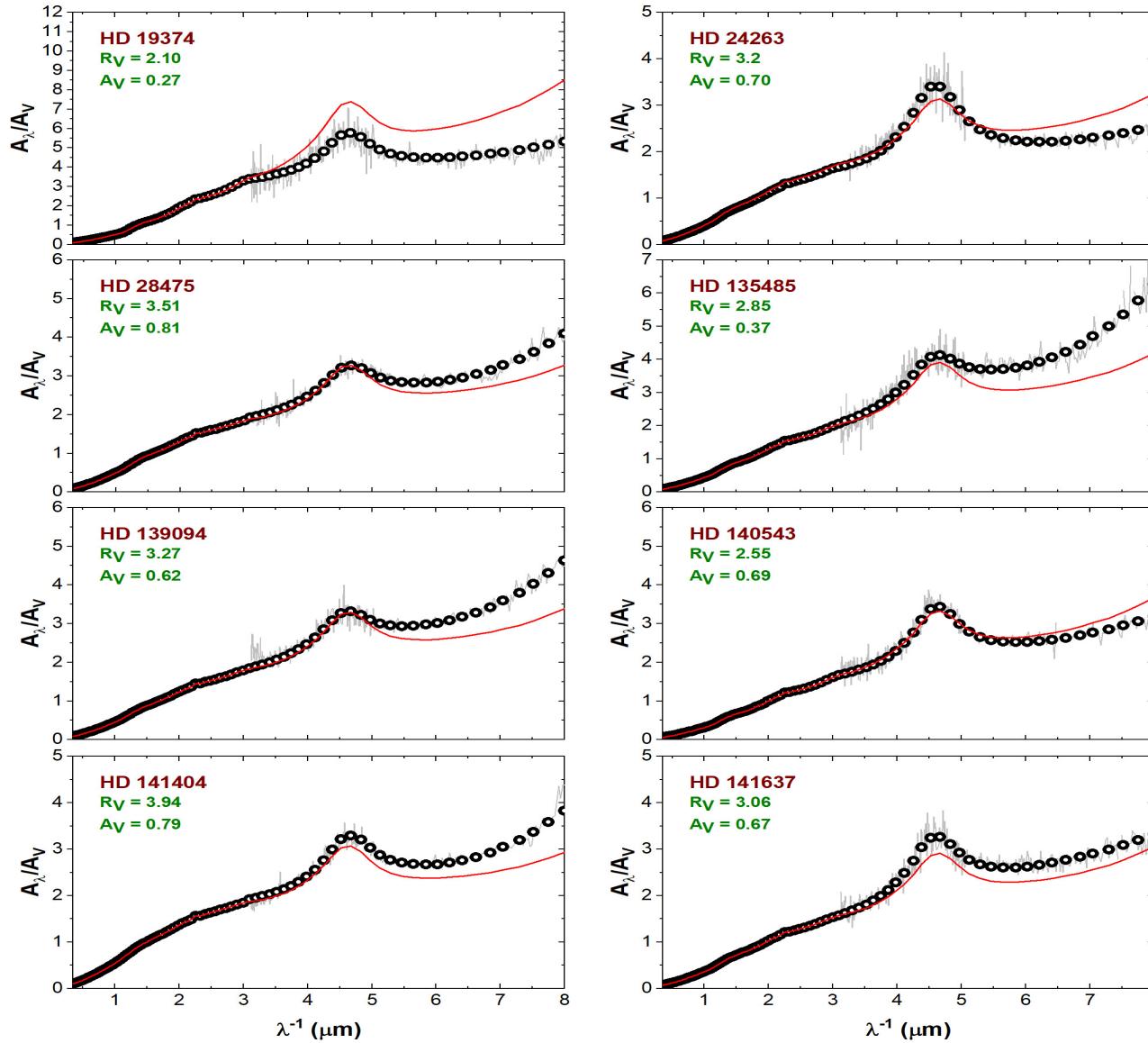
The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction

Show affiliations

Cardelli, Jason A. ; Clayton, Geoffrey C. ; Mathis, John S.

# 高银纬云消光曲线

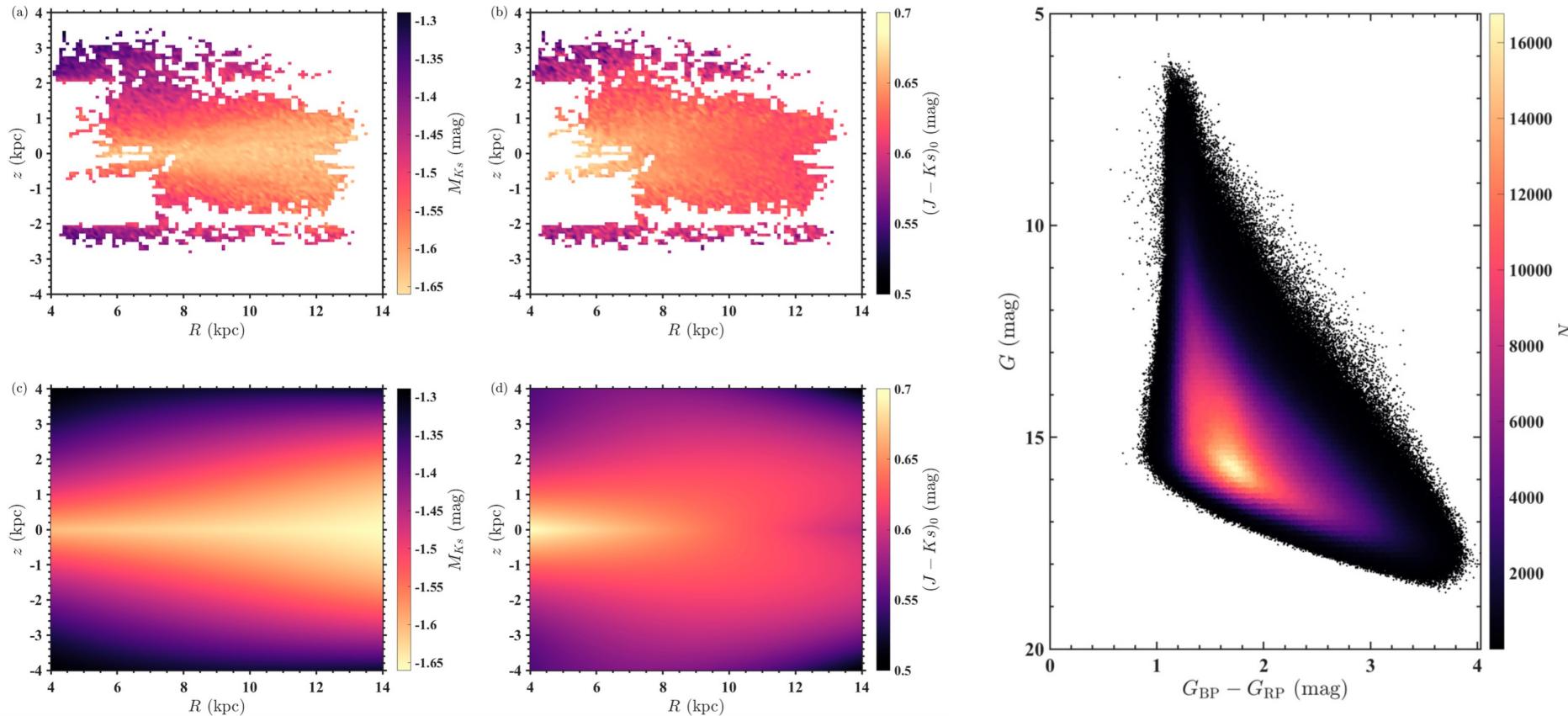
(Li, Mishra, Li 2021)



- 银纬高于 $25^\circ$ 的星际视线
- 基于IUE紫外观测
- 与银河系平均消光曲线大相迥异
- 与CCM公式亦显著不同
  - (1) 为CSST普查高银纬云的消光奠定基础
  - (2) 为CSST星系晕观测消光改正提供参考

# 3D Parameter Maps of Red Clump Stars in the Milky Way – Absolute Magnitudes and Intrinsic Colors

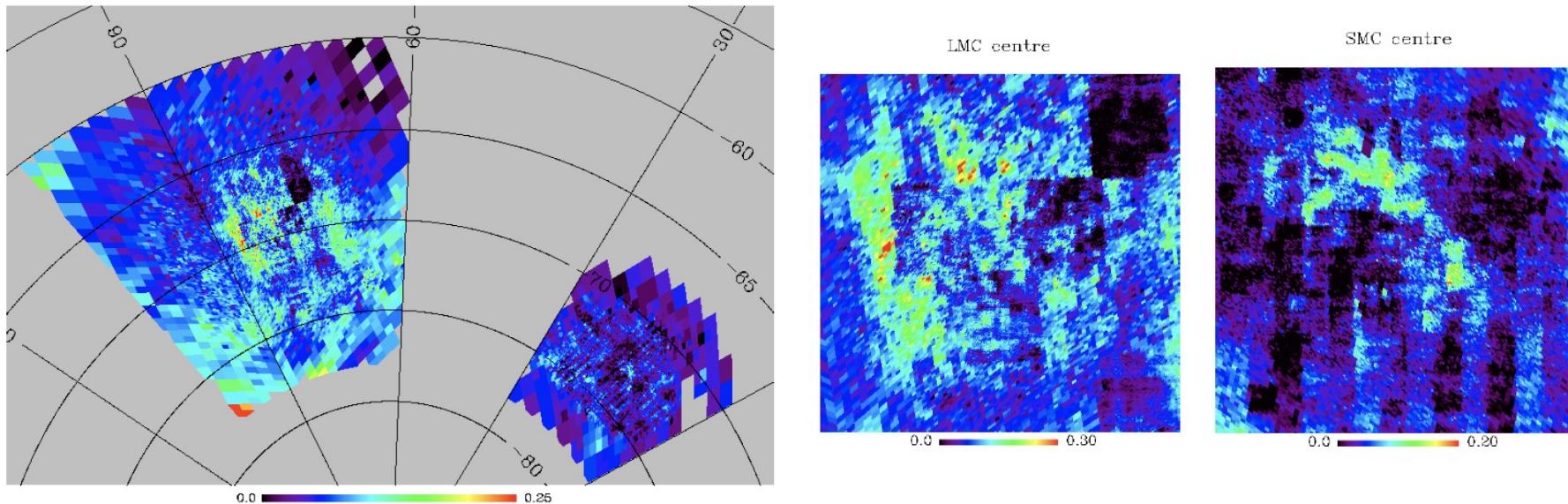
Wang & Chen (2021)



- 我们采用红团簇巨星RC做消光探针研究高精度消光规律。但是，RC的基本物理性质——内禀颜色和绝对星等是否可用单一固定值代表还有争议，为了充分利用CSST紫外数据的优势，我们首先对RC的物理性质进行全面的研究，并建立三维性质参数图预测其多波段内禀颜色和绝对星等，为下一步得的精确的消光规律打基础。
- 左图为RC绝对星等和内禀颜色分布 (a、b观测结果, c、d预测结果); 右图为RC千万样本分布。

# 大小麦哲伦云的消光分布 (Chen+2022)

- 大小麦哲伦云 (MCs) 的消光分布图是我们改正MCs中天体消光与红化的重要工具，也是我们研究MCs自身尘埃分布于性质的基础。我们收集了多个覆盖Mcs的测光数据，包括Gaia, SMASH, SkyMapper, 2MASS, VMC等，计算得到了Mcs天区中超过400万颗恒星的消光值，给出了MCs天区消光分布图，其分辨率最高可达到26角秒。我们还考虑了银河系的前景消光污染，给出了Mcs自身的尘埃分布。预期CSST更深、更精确的多波段测光数据将使我们测量并得到更多的Mcs天区中天体更精确的消光值，从而可以更加细致地对MCs中尘埃结构进行描绘。

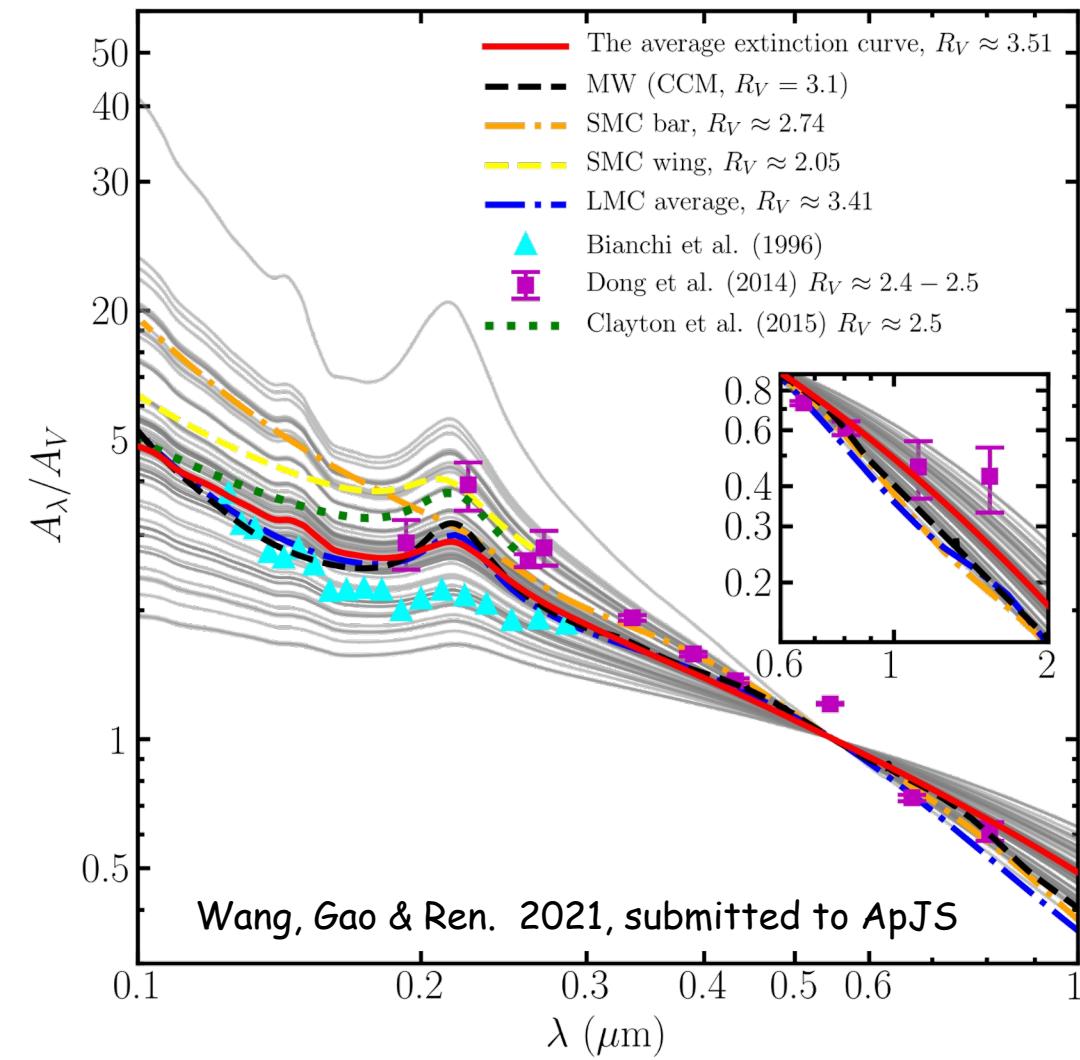
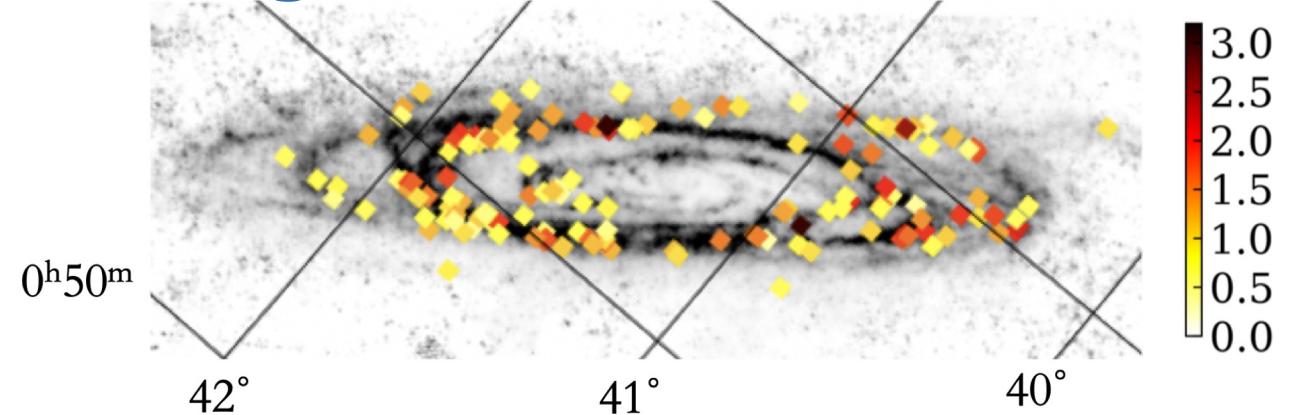


Chen et al. submitted

本工作获得的Mcs天区的高分辨率尘埃分布图

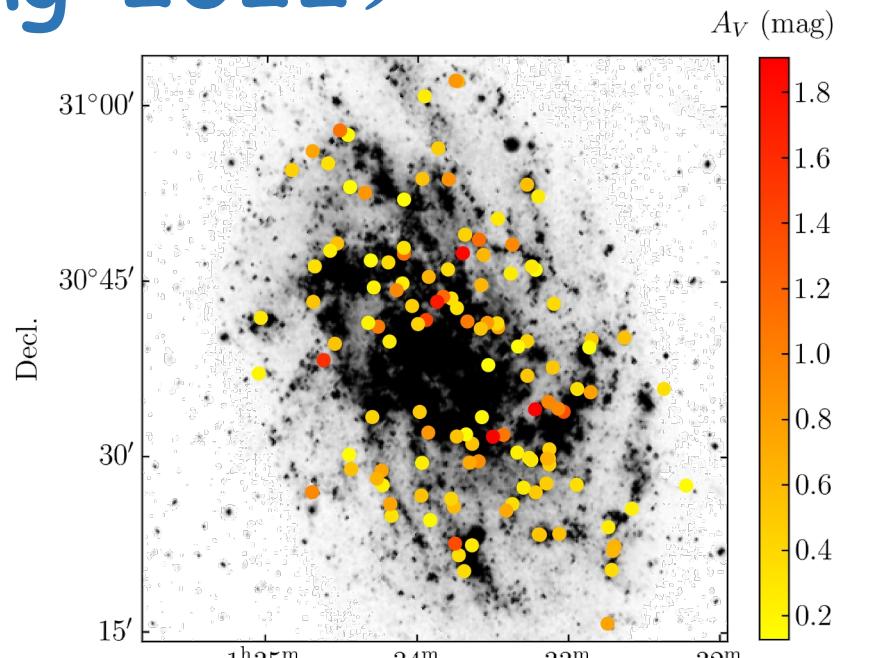
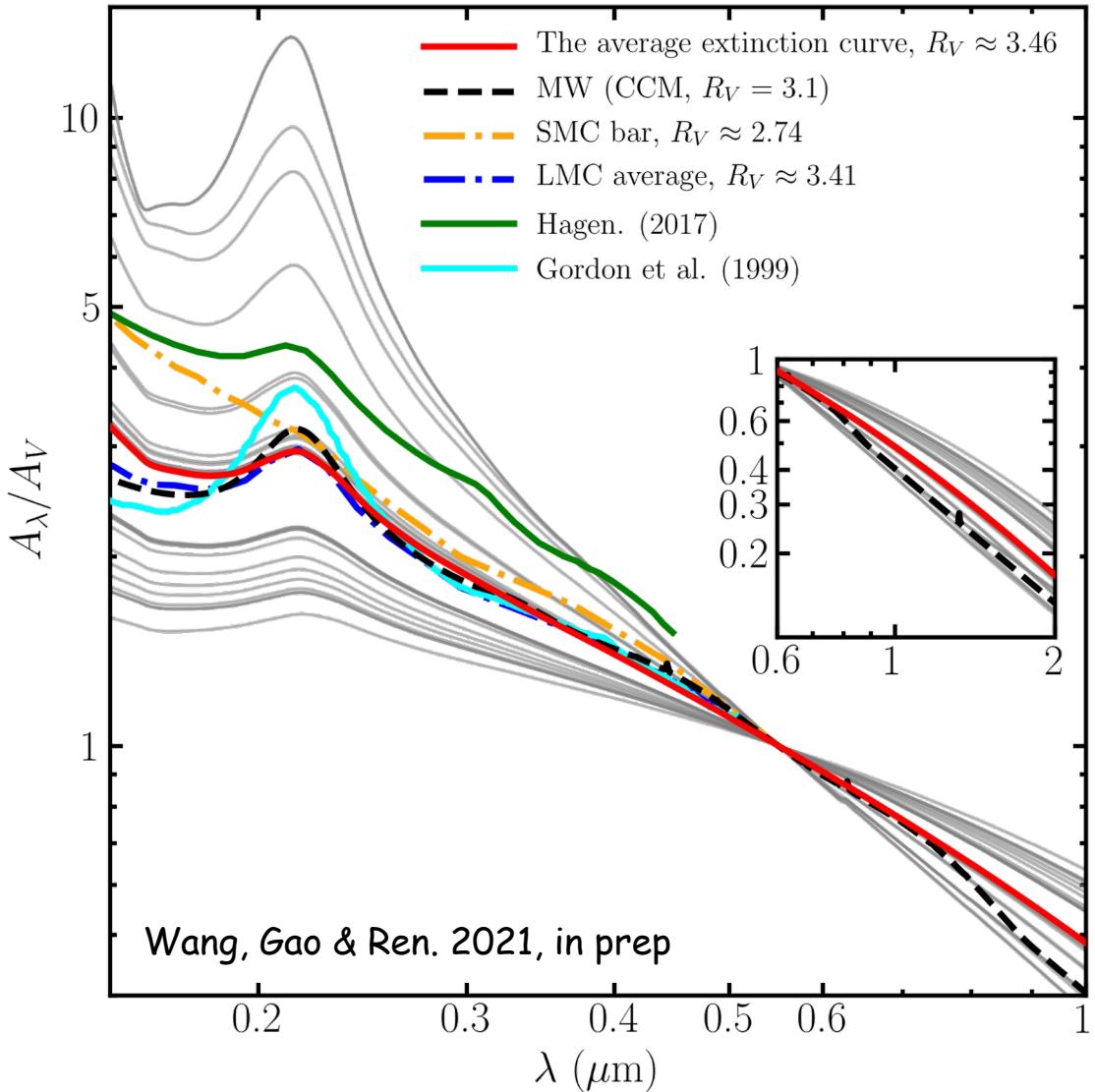
# Dust extinction in M31 (Wang+2022)

$A_V$   
(mag)



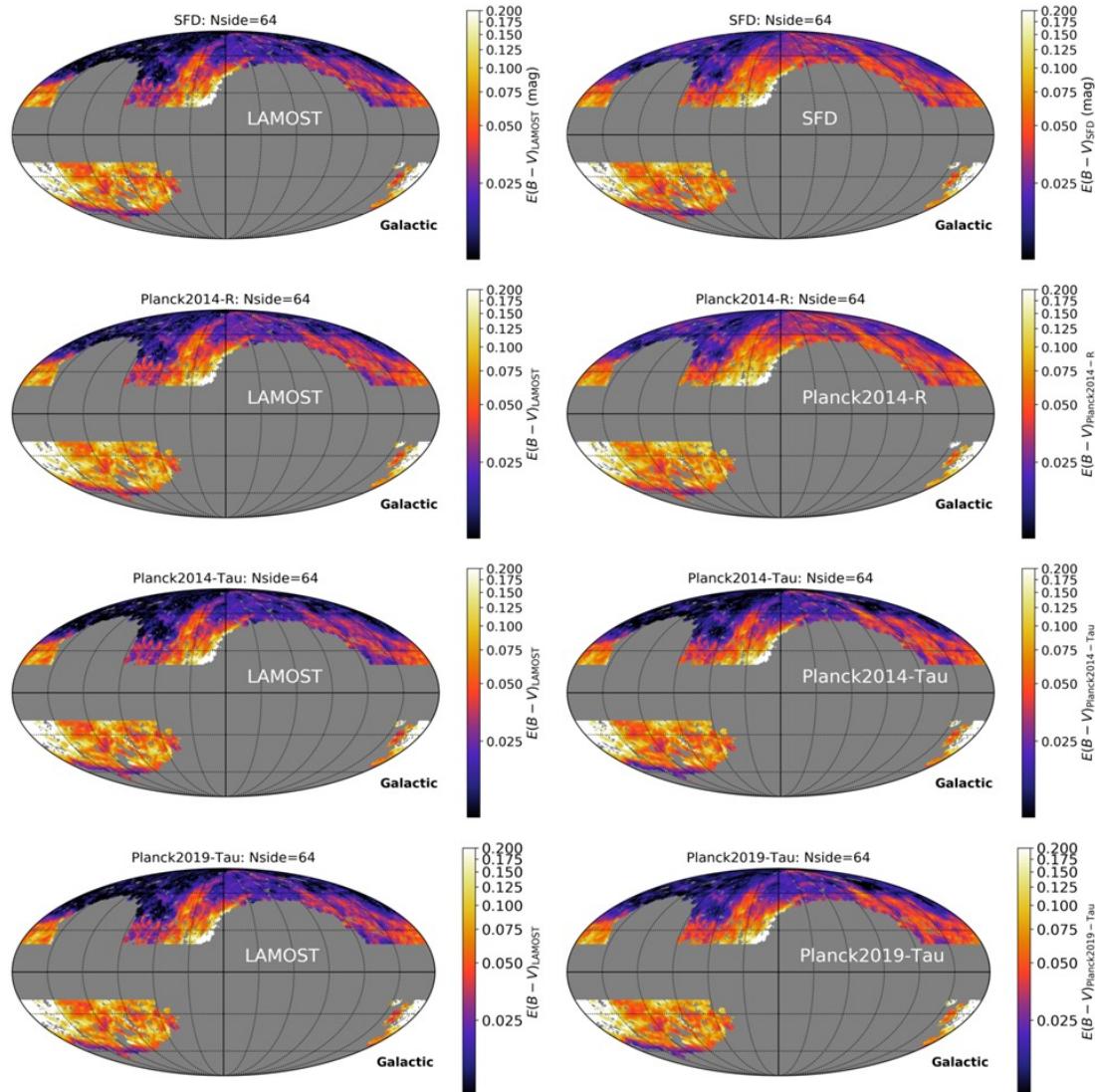
- New extinction curves towards more sightlines in M31
- Extinction curves of M31 cover a wide range of shape ( $R_V \sim 2-7$ ), the median one looks like that of the diffuse region in the MW, but rises less steeply in far-UV band.
- $\langle A_V \rangle \sim 1.05$  mag: 18 in 140 selected tracers ( 12.9 %) are with  $A_V > 1.8$  mag, 2 tracers ( 1.3 %) are with  $A_V > 2.8$  mag, and  $A_{V, MAX} < 3$  mag.

# Dust extinction in M33 (Wang+2022)



- Firstly provide a number of extinction curves of towards different sightlines in M33
- Median one: MW-like average extinction curve
- $\langle A_V \rangle = 0.43 \text{ mag}$ ,  $A_{V, \text{MAX}} < 2 \text{ mag}$ ,

( $A_V \sim 0.53 \text{ mag}$ , in Hagen 2017)



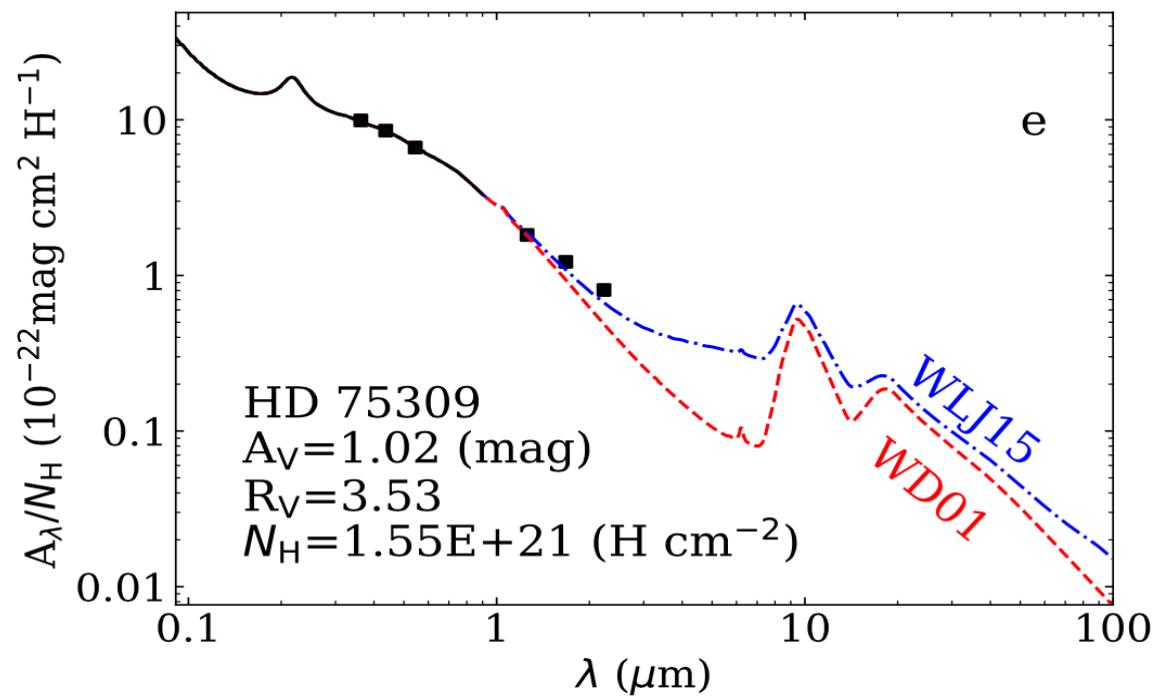
基于LAMOST和Gaia数据标准化后得到的 $E(B-V)_{\text{LAMOST}}$ 消光图  
 (左) 与对应天区原始消光图(右) 的对比 (Sun+2022)

# CSST尘埃物理

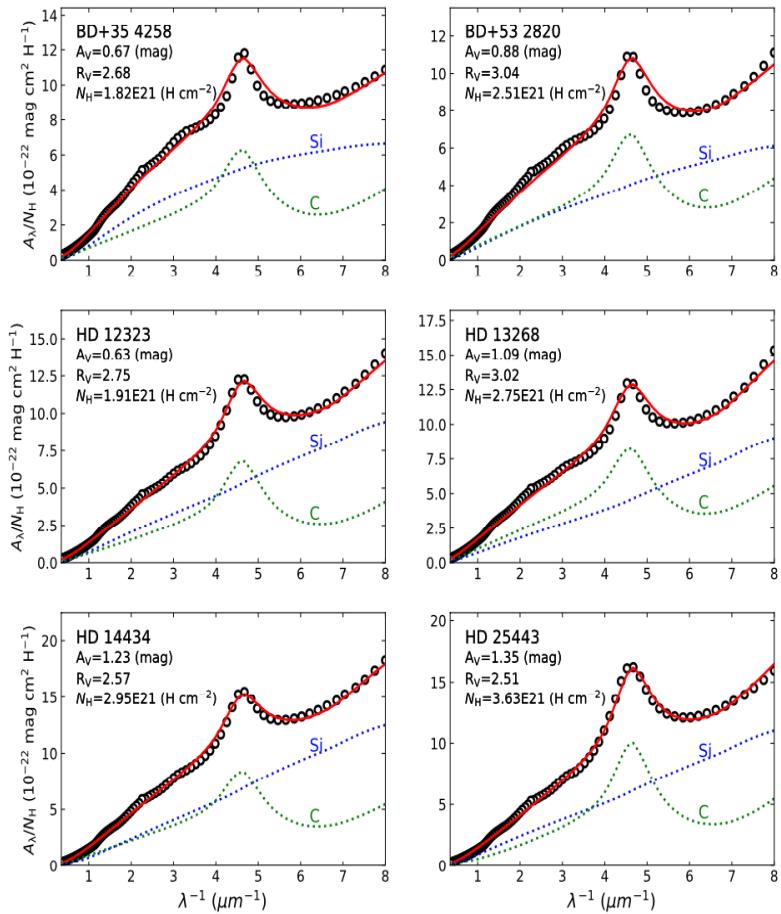
- 当前主流尘埃模型大都基于银河系“平均”消光曲线
- →无从得知尘埃特性（尺寸、组分）与星际环境（密度、辐射场、 $H/H_2$ 比率等）的关系

CSST为研究各个独特的星际环境的尘埃特性提供了契机！

星际消光与元素丰度 (I): 将Kramers-Kronig色散关系这一基本物理原理运用于星际消光和元素丰度分析, 得出了星际“标准”元素丰度, 这一结果独立于尘埃模型, 将是诠释未来CSST消光观测的基础。



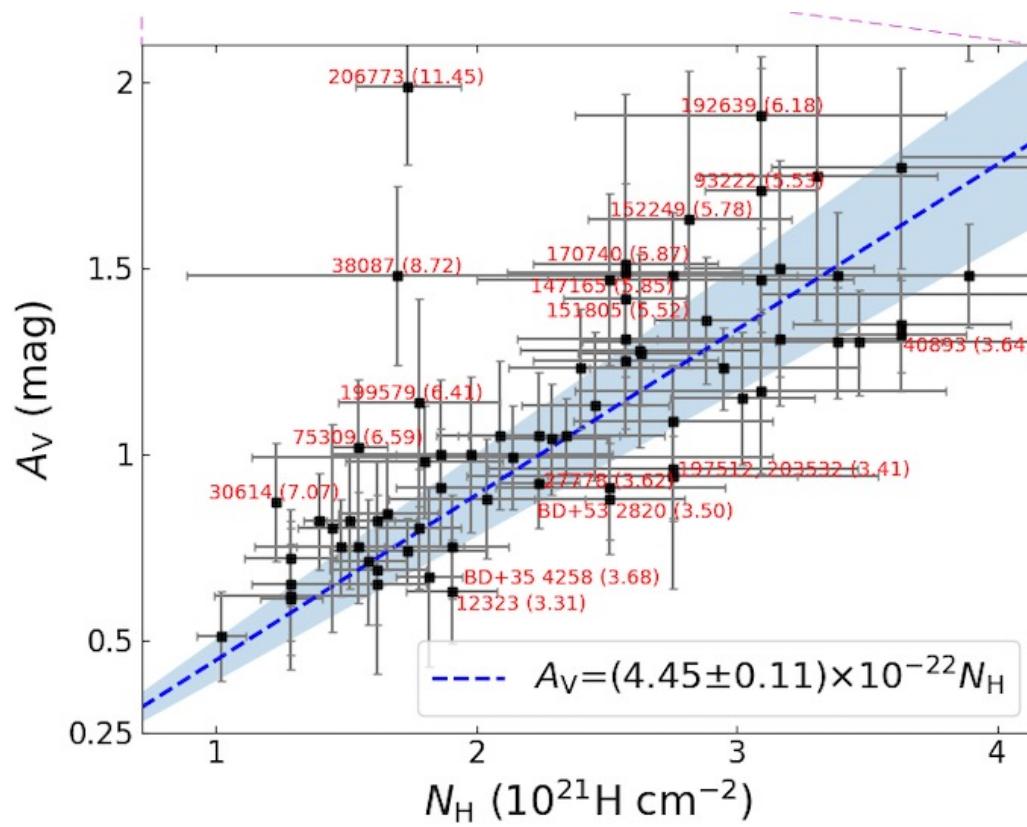
左文波+李爱根+赵刚: 2021a, ApJS, 252, 22



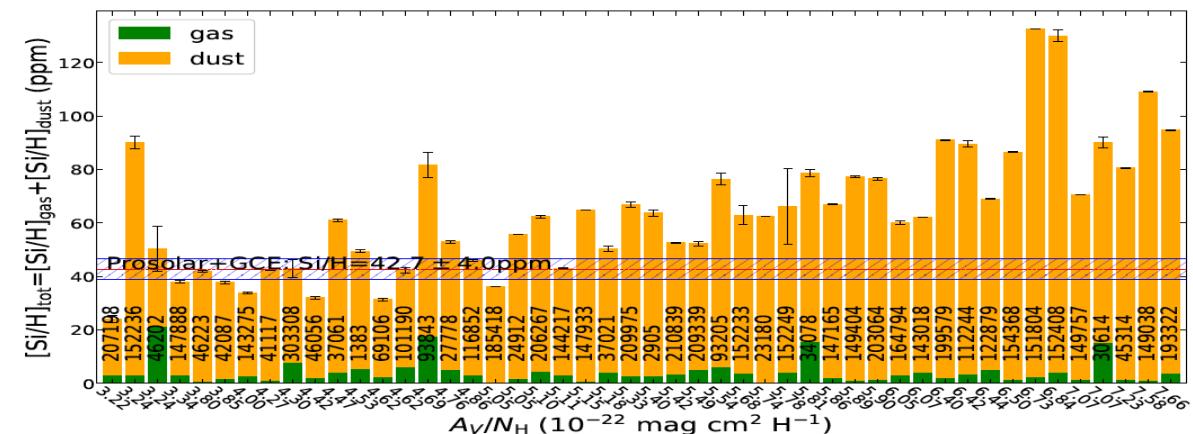
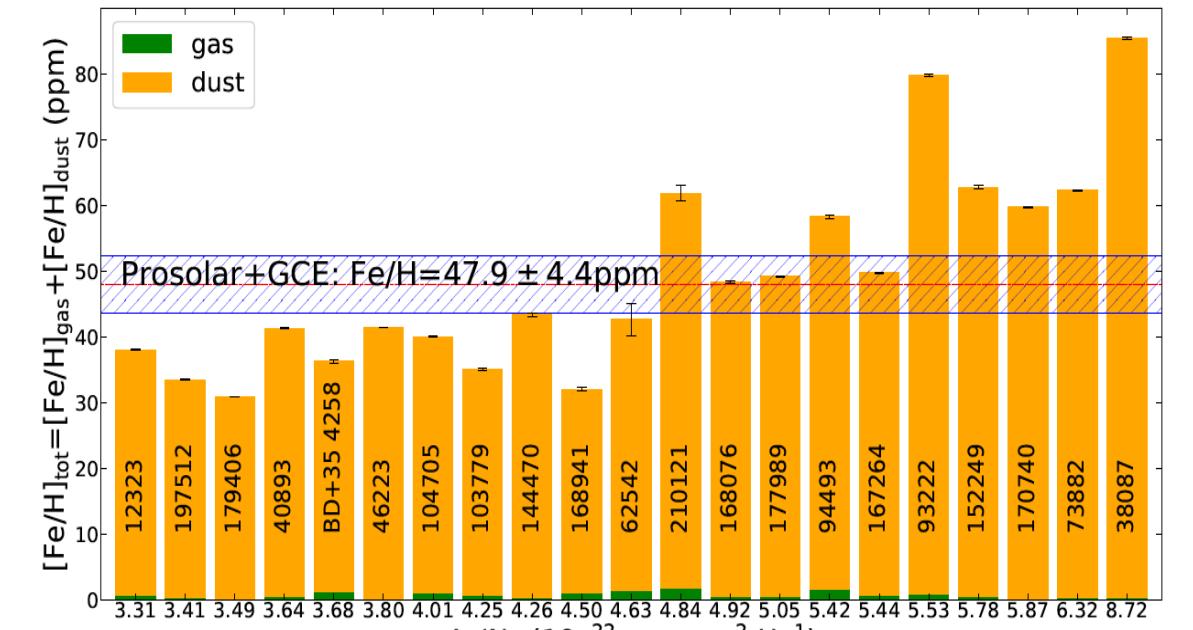
星际消光与元素丰度 (2):  
 分析了**85条**具有不同物理  
 和化学环境的星际视线，  
 定出了从紫外到中红外的  
 消光曲线，并通过尘埃模  
 型拟合，获得了各天区的  
 尘埃尺寸分布和化学组分，  
 及其与星际元素丰度的关  
 系。这些消光曲线与星际  
 元素丰度将是**CSST**观测的  
 基础。

左文波+李爱根+赵刚: 2021b, ApJS, 257, 63

多个源的消光与气体比偏大！



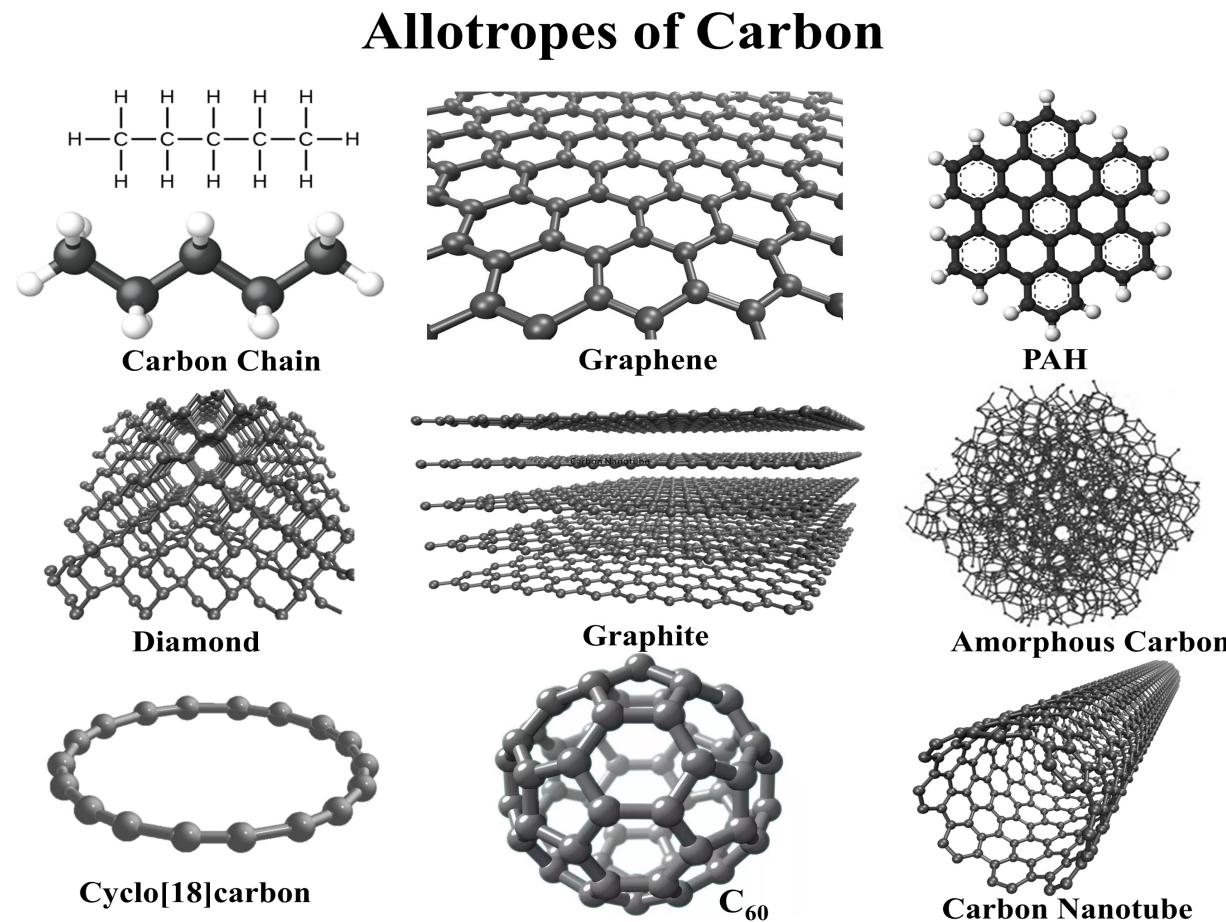
现有元素丰度不够！



这些消光曲线与星际元素丰  
度将是CSST观测校正的基础

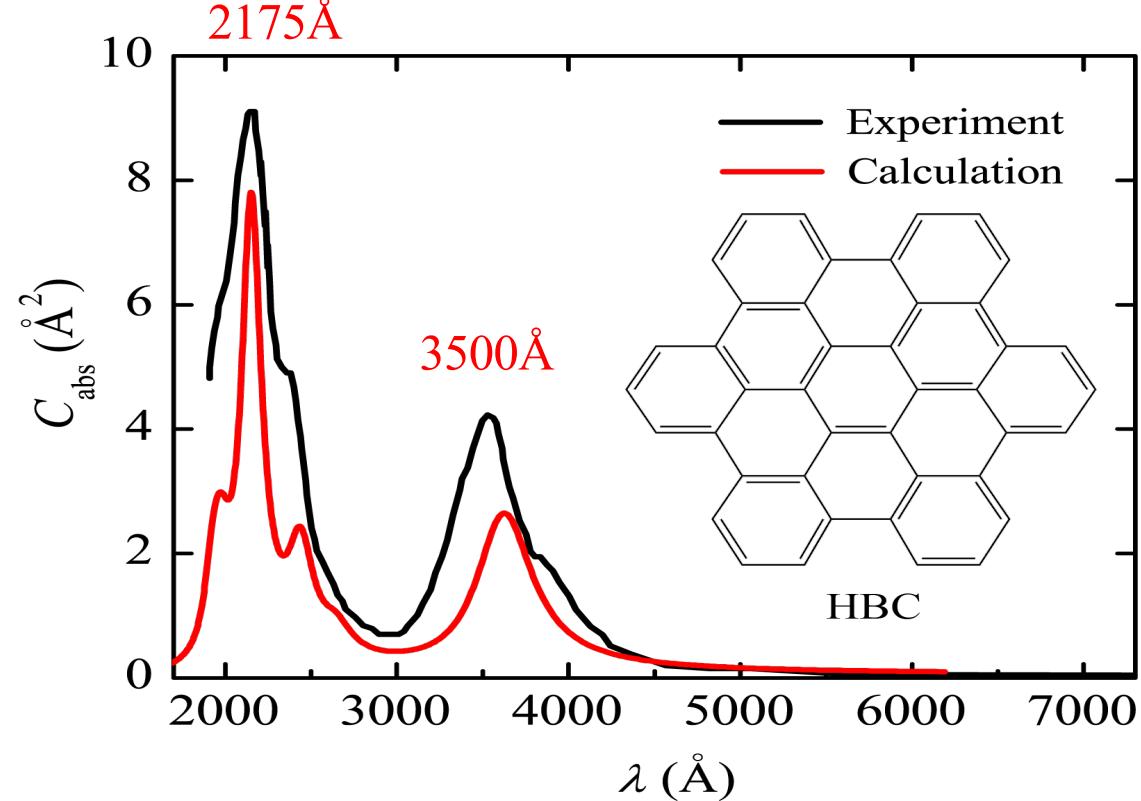
左文波+李爱根+赵刚 (2022)

# CSST与“新型”尘埃探测



CSST为探测各类尘埃的电子吸收光谱从而精准证认尘埃组分提供了契机！

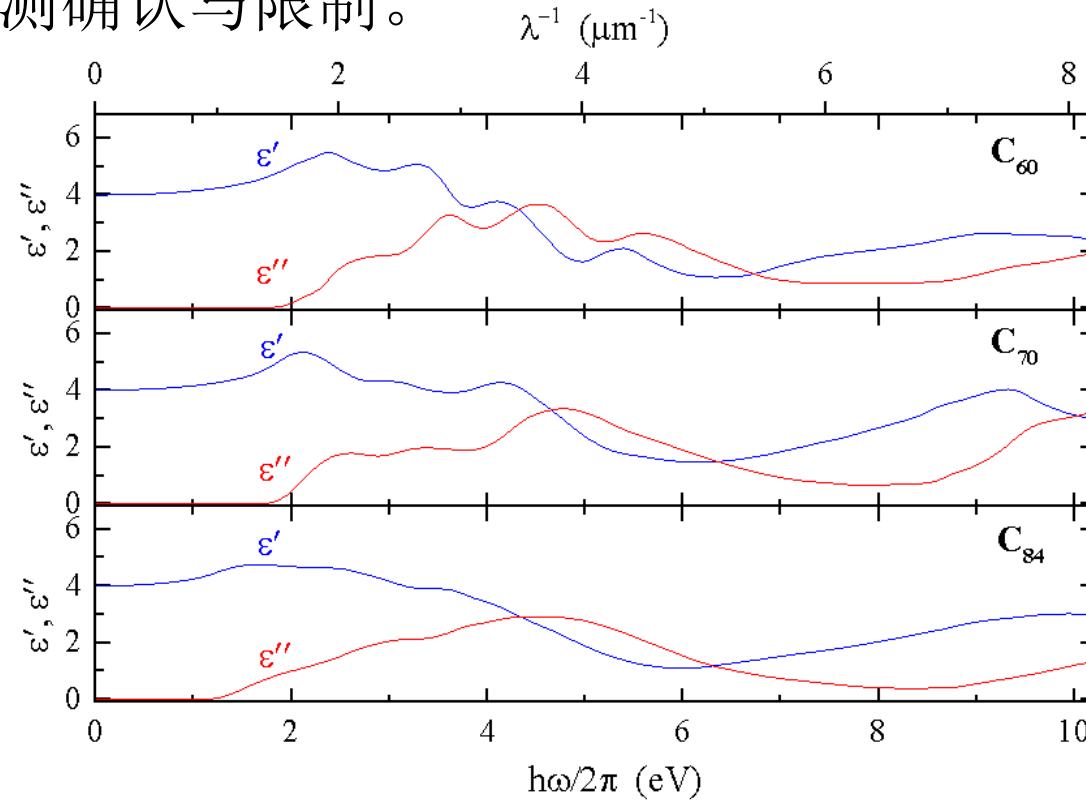
# 面向CSST紫外观测，证认PAH分子



多环芳香烃PAH紫外吸收光谱

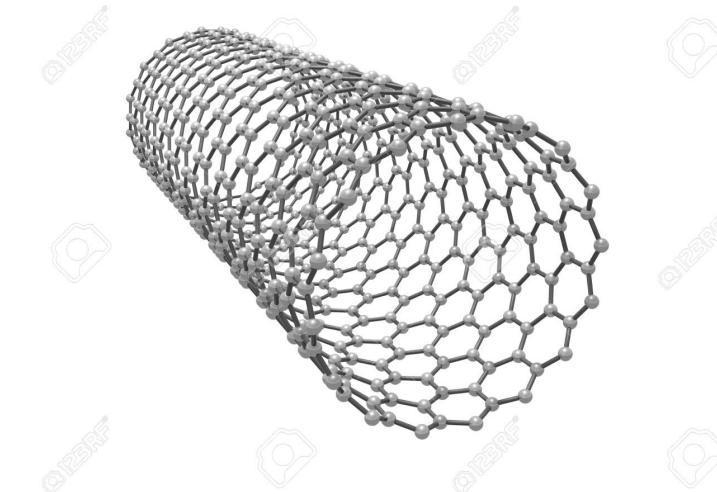
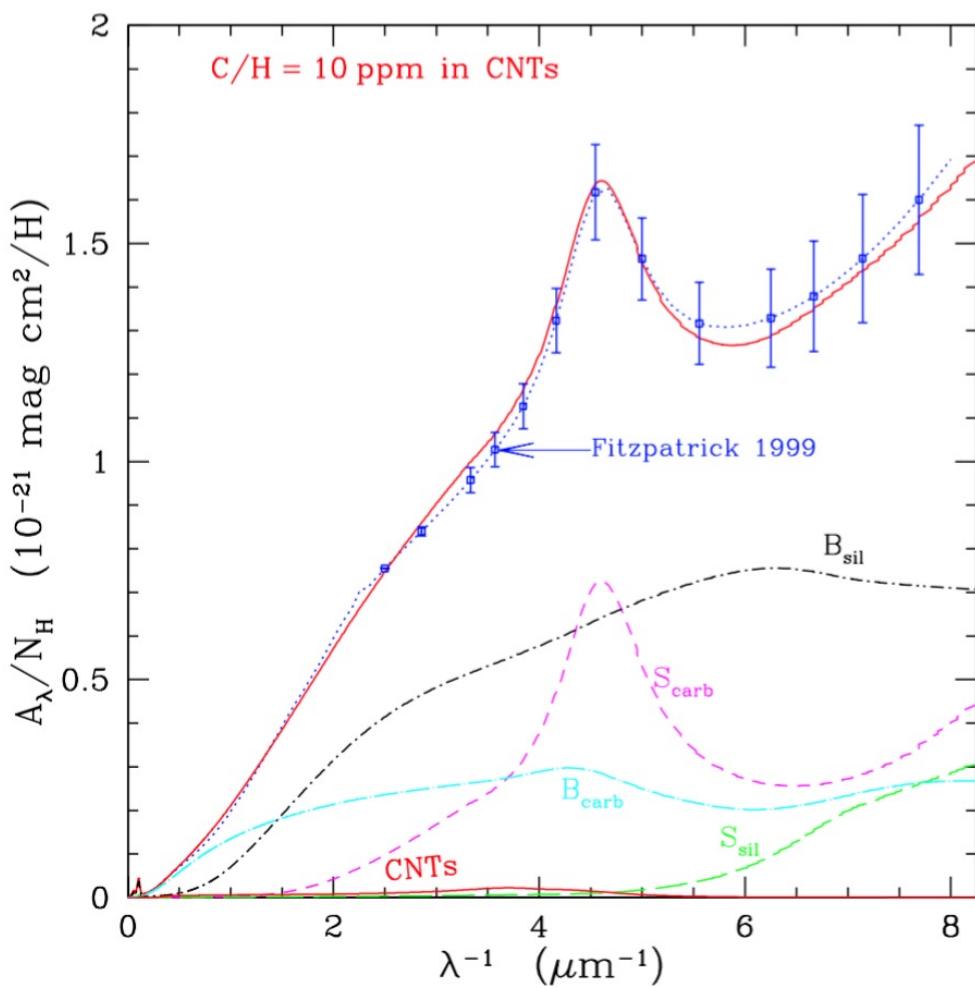
林琪+杨雪娟+李爱根（2022）

三种富勒烯的紫外和可见光波段的吸收特征  
(介电函数实部和虚部)，CCST可望予以观  
测确认与限制。

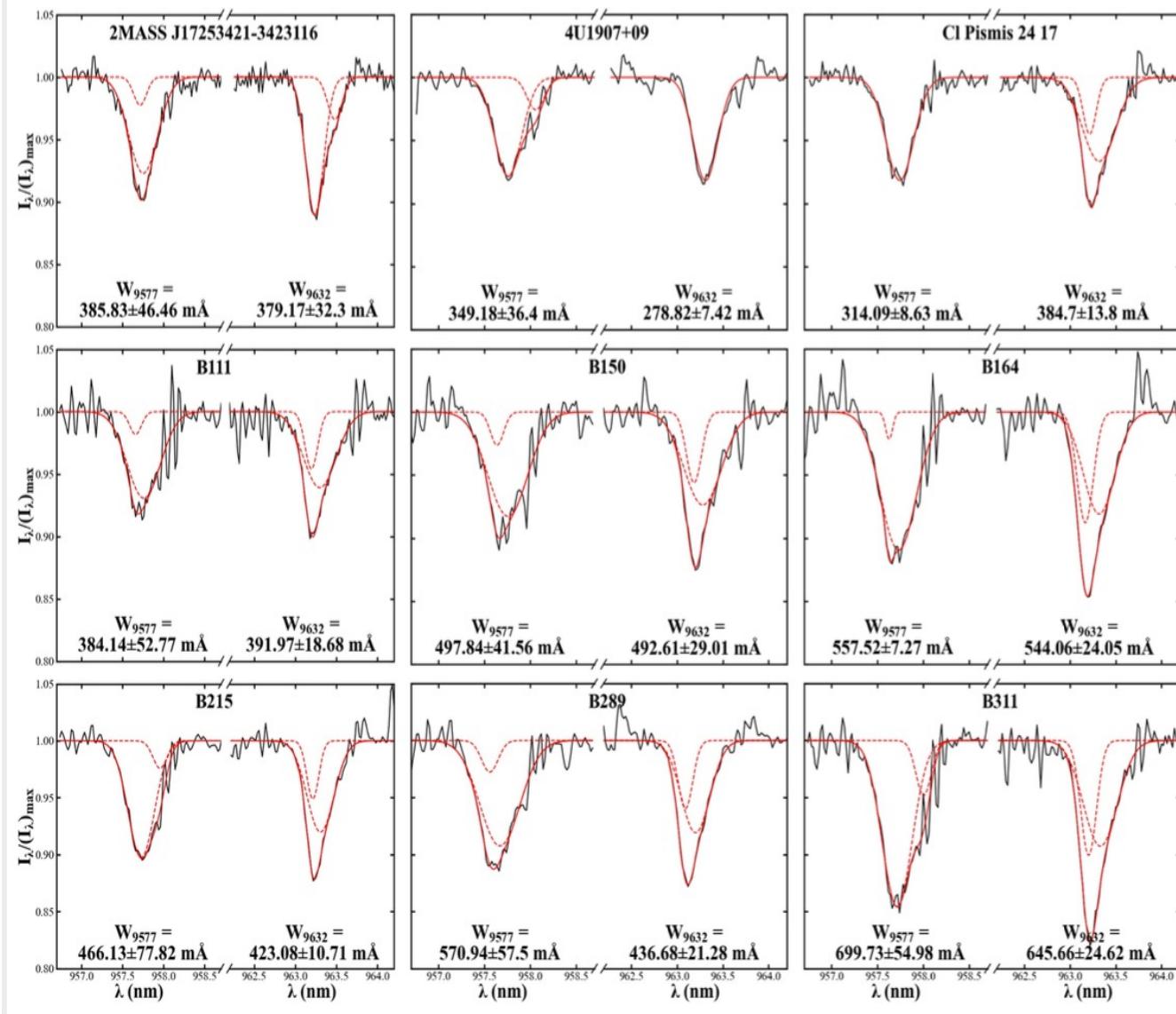


栗雪莲+李祺+李爱根+杨雪娟（2022）

# 基于星际消光，在国际上首次定量限定星际碳纳米管丰度可达 $C/H \approx 10 \text{ ppm}$

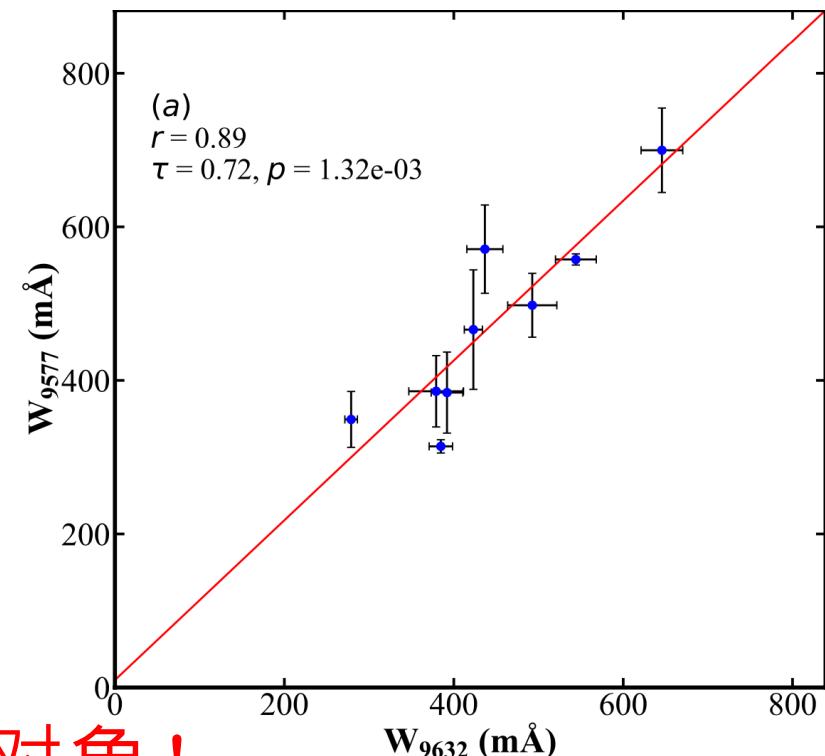


碳纳米管实验光谱的 $\pi$ -等离子激元激发产生位于4.5eV和5.25eV的两个吸收特征，这将是未来CSST探测星际碳纳米管的基础。



9577Å和9632Å 星际弥散带：  
起源于 $C_{60}^+$

采用ESO的VLT/X-Shooter光谱库，在25个源中探测到9577Å和9632Å 星际弥散带，其强度相关。



星际弥散带亦将是CSST观测的重点对象！

# 服务于CSST诸学科

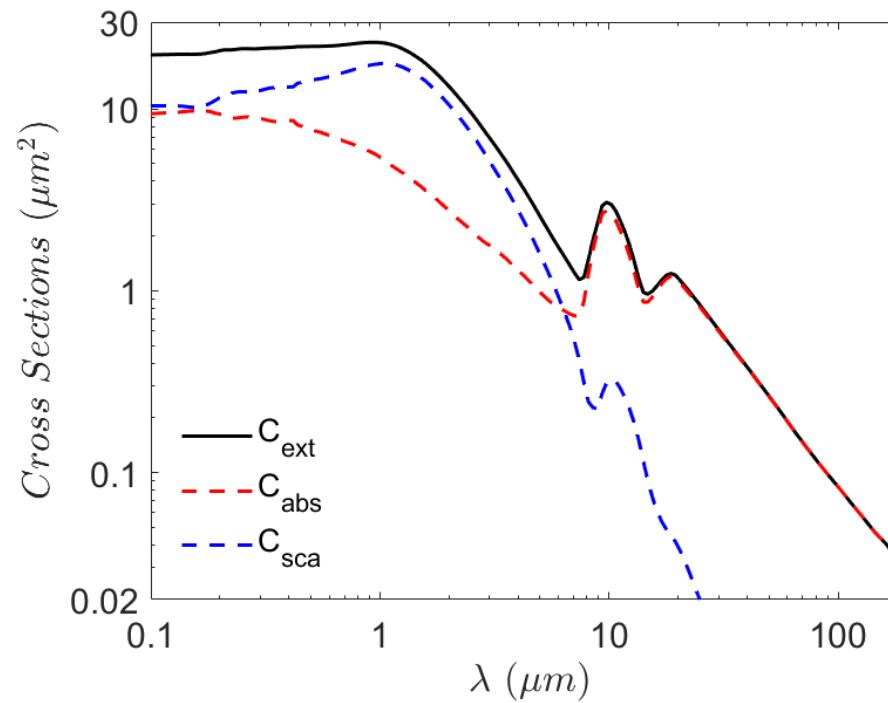
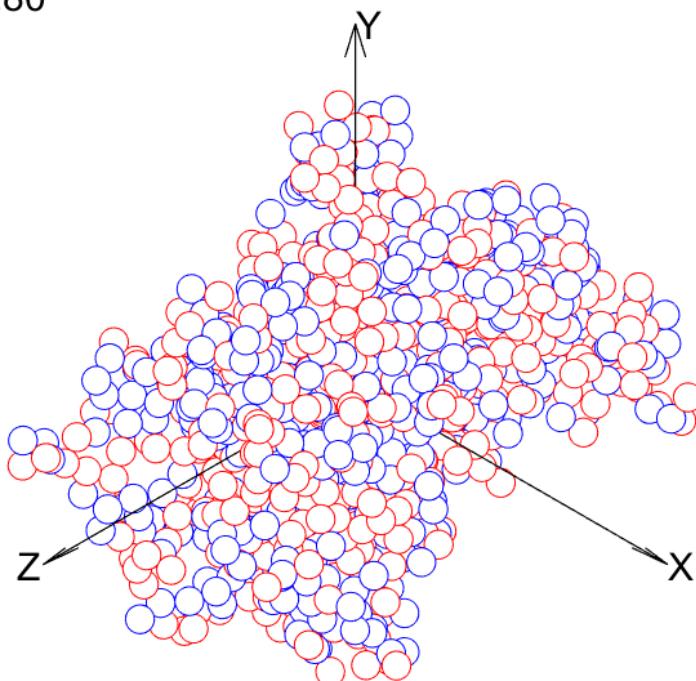
- 构建消光“库” → 为CSST几乎所有观测提供消光改正
- 构建尘埃电磁散射“库” → 为CSST多学科观测分析与诠释提供有效工具
- 构建尘埃模型 → 直接应用于CSST多学科



# 构建尘埃电磁散射“库”

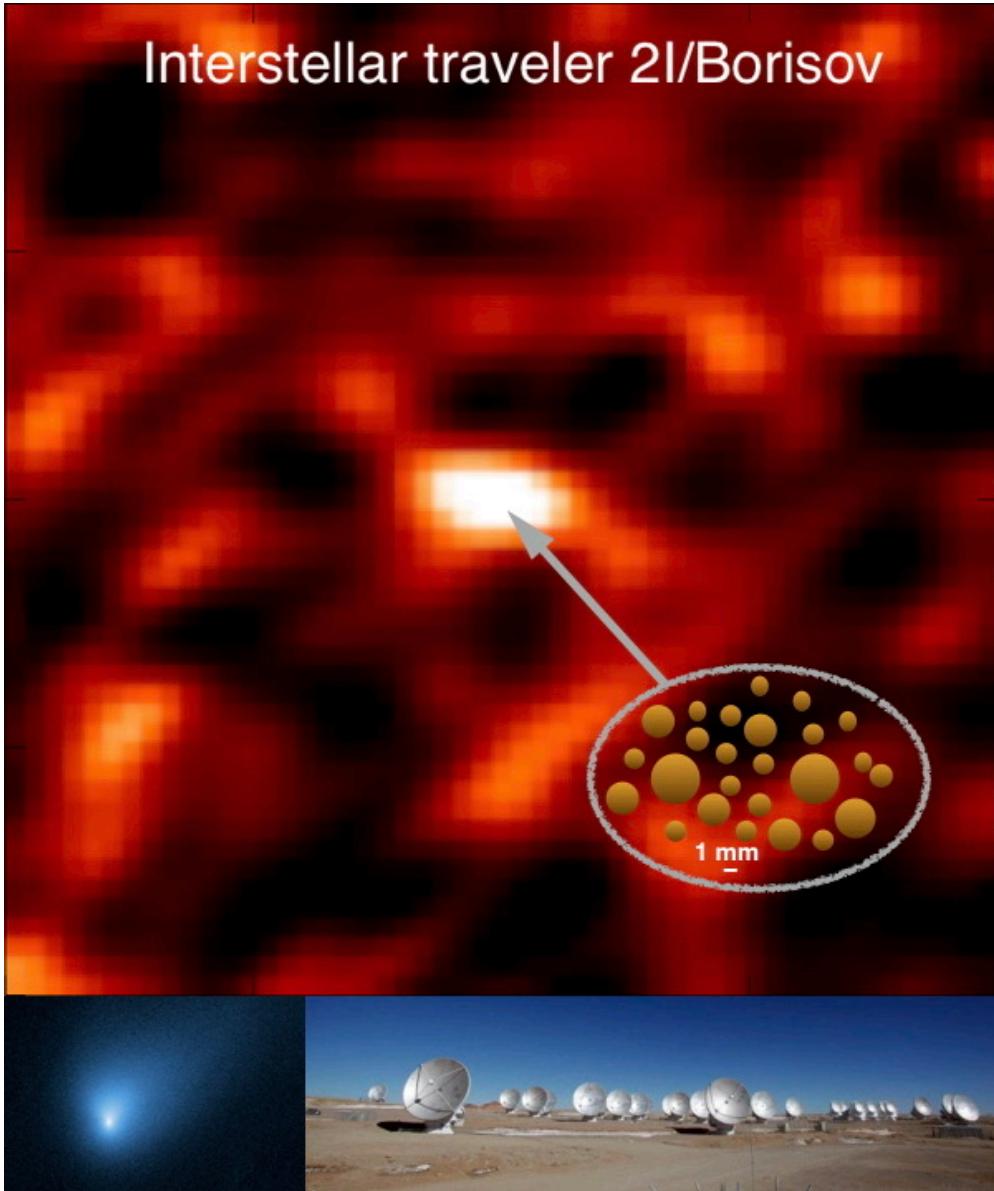
→为CSST多学科观测分析与诠释提供有效工具

Porosity=0.80  
 $a_{\text{eff}}=1 \mu\text{m}$   
 $N=1000$



刘方舟+李爱根 (2022)

初试啼声。。。



在第一颗**星际彗星**2I/Borisov的彗发里，通过ALMA的毫米波观测，探测到**卵石**，揭示了彗星的起源。

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01336-w>

nature  
astronomy

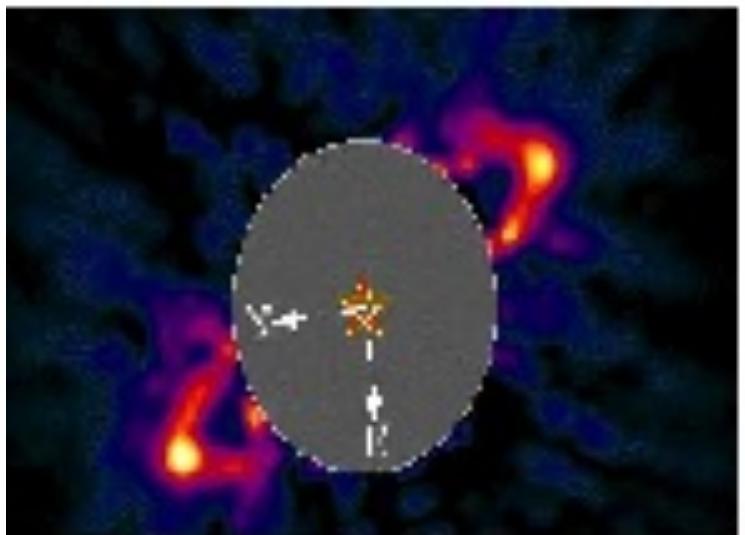
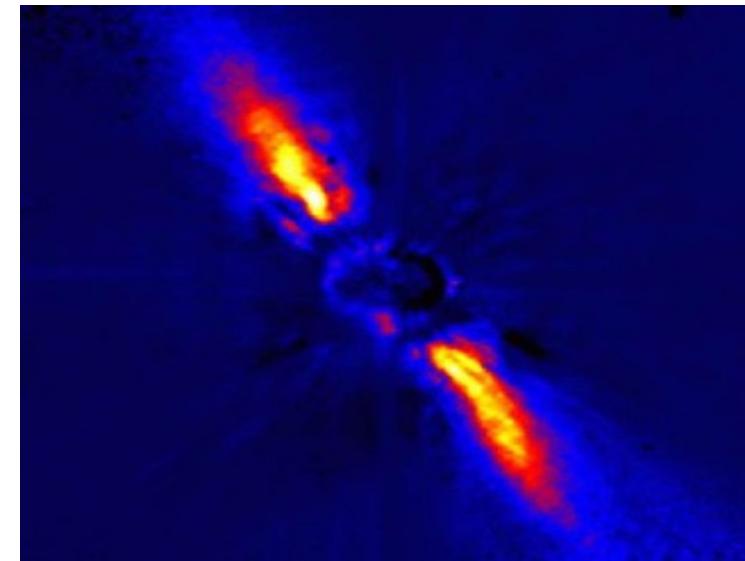
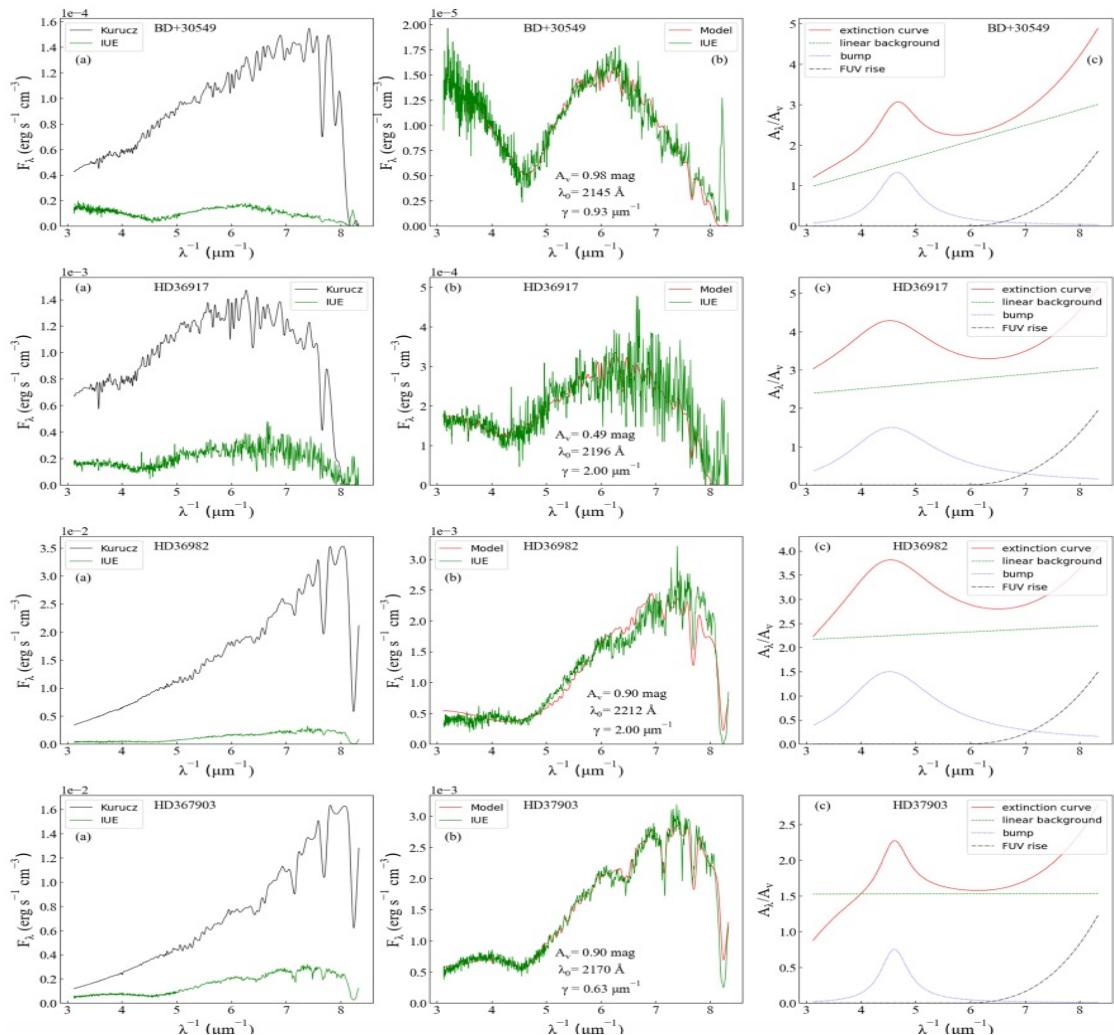
Check for updates

## Compact pebbles and the evolution of volatiles in the interstellar comet 2I/Borisov

Bin Yang<sup>1</sup>✉, Aigen Li<sup>2</sup>, Martin A. Cordiner<sup>1,3,4</sup>, Chin-Shin Chang<sup>1</sup>, Olivier R. Hainaut<sup>1</sup>, Jonathan P. Williams<sup>6</sup>, Karen J. Meech<sup>6</sup>, Jacqueline V. Keane<sup>6</sup> and Eric Villard<sup>1,5</sup>

**杨彬,李爱根等, 2021,  
Nature Astronomy, 5, 586**

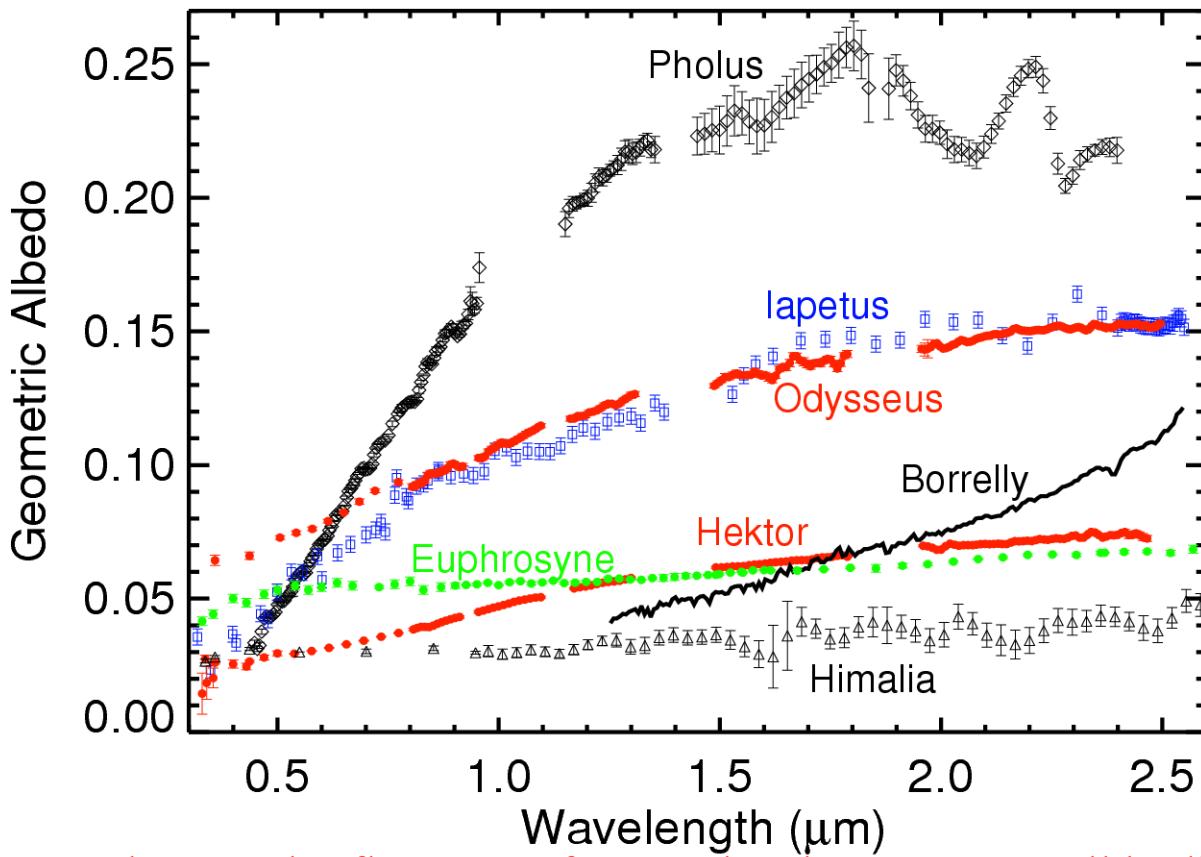
# 基于IUE光谱的原行星尘埃盘消光



王倩+李爱根+杨雪娟 (2022)

HR4796

# Red coloration of Solar system objects: organic materials? Jones+杨远贵+李爱根

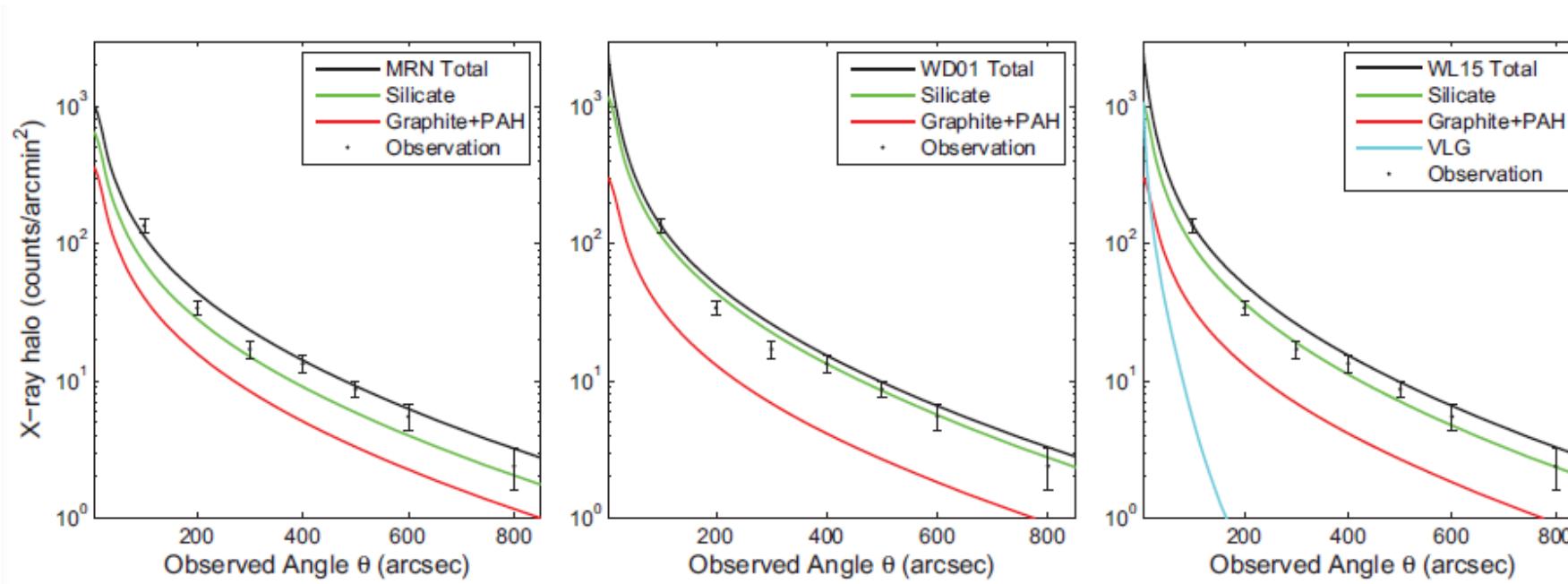


Measured spectral reflectance of several solar system small bodies (Pholus: Centaur object; Iapetus: Saturn satellite; Hektor, Odysseus, Euphrosyne: Trojan asteroids; Himalia: Jupiter satellite; Borrelly: Jupiter-family comet). Taken from Dalle Ore et al. (2011).

CSST对小天体的测光

# 星际消光与X射线晕 (闫林丽+李爱根+卢方军)

- 理论基础：X射线散射“晕”包含星际尘埃尺寸分布及其空间分布的重要信息。X射线晕是大尘埃（大于0.5微米）的有效探针。
- 现阶段结果：对现有X射线“晕”观测数据进行模型拟合，得出尘埃尺寸分布。
- 下阶段目标：为将来CSST的观测检验“预言”这些源的紫外、可见光、近红外波段的消光曲线。



# 尘埃课题对CSST的服务 (i)

1. CSST对太阳系小天体（小行星、彗星）的观测：在测光颜色和反射光谱观测方面，提供尘埃光学特性和散射参数等。
2. CSST对原行星尘埃盘的观测：提供尘埃生长模型和疏松尘埃的吸收、散射、不对称因子、辐射压等参数；提供极小尘埃及PAHs的光电加热率，定量计算其通过光致电离和电子复合对原行星尘埃盘的电子密度以及magnetorotational instability (MRI) 的影响。
3. CSST对分子云的观测：提供可能的分子云尘埃生长模型和尺寸分布及CSST波段的吸收、散射参数，以及相应的毫米波质量吸收系数 (opacities)。

## 尘埃课题对CSST的服务 (ii)

4. CSST对星际元素丰度的观测→尘埃与星际元素丰度标准
5. CSST与星系形成和演化的数值模拟←尘埃在此过程中
  - (i) 通过氢分子在尘埃表面的形成影响星系的恒星形成历史
  - (ii) 通过光电效应加热气体以及尘埃辐射压，影响星系气体的动力学行为
  - (iii) 通过损耗重元素丰度影响星系化学演化等
6. CSST对活动星系核的观测←尘埃环在CSST波段的消光及散射特性

## 尘埃课题对CSST的服务 (iii)

7. CSST对Ia型超新星的观测：

消光曲线 $R_V=1.4-1.5$ ？

8. CSST波段星系际消光：

消光量及其随波长的分布

9. CSST对宇宙原初D丰度及星际D丰度的观测：

碳尘埃（和PAH）对D的沉积作用