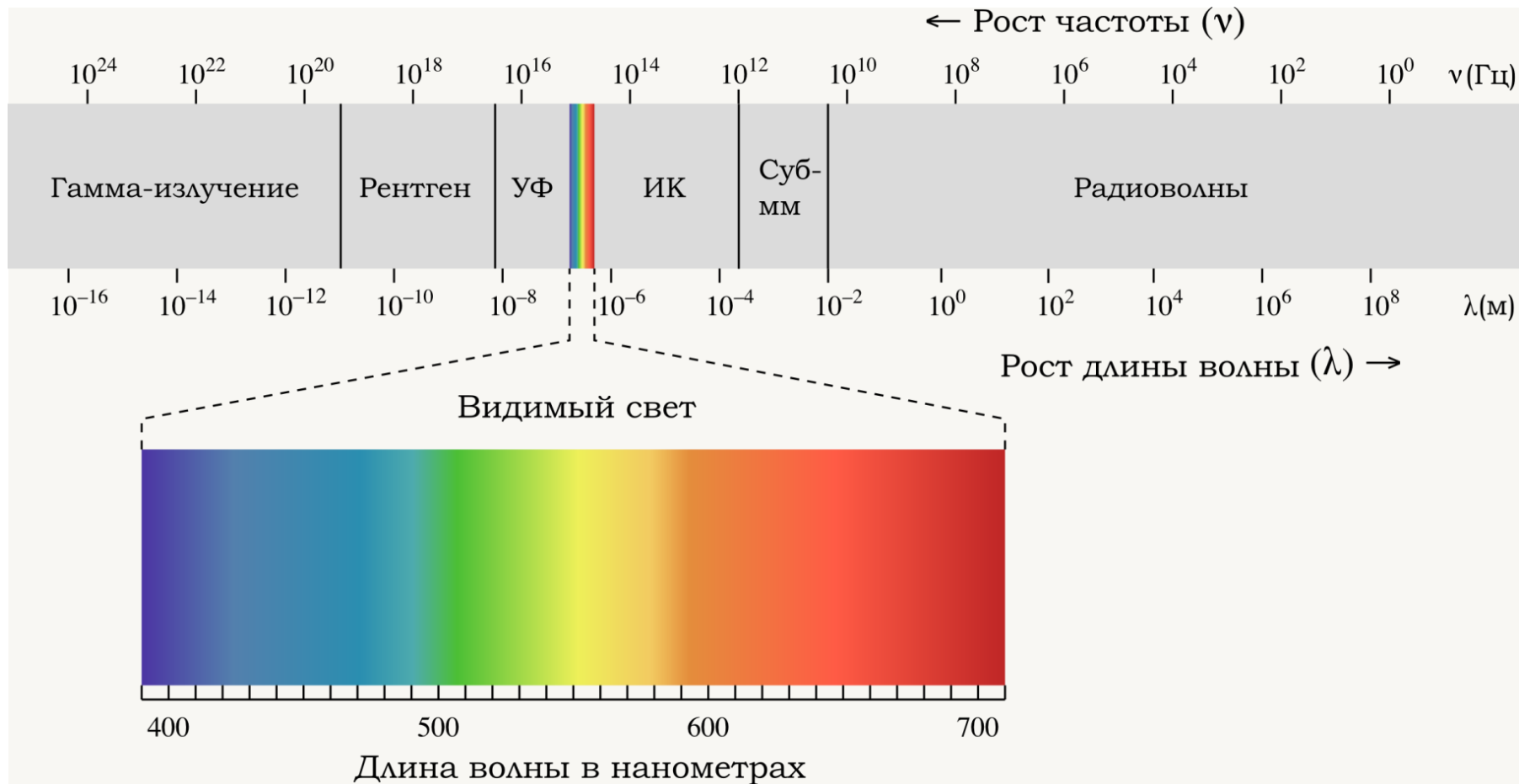


Космические пылинки — от макромолекул до планет

Дмитрий Вибе
Институт астрономии РАН

В презентации демонстрируются сцены курения.
Курение вредно!

Диапазоны электромагнитного излучения



Фотометрия

- Звёздная величина
- Цвет



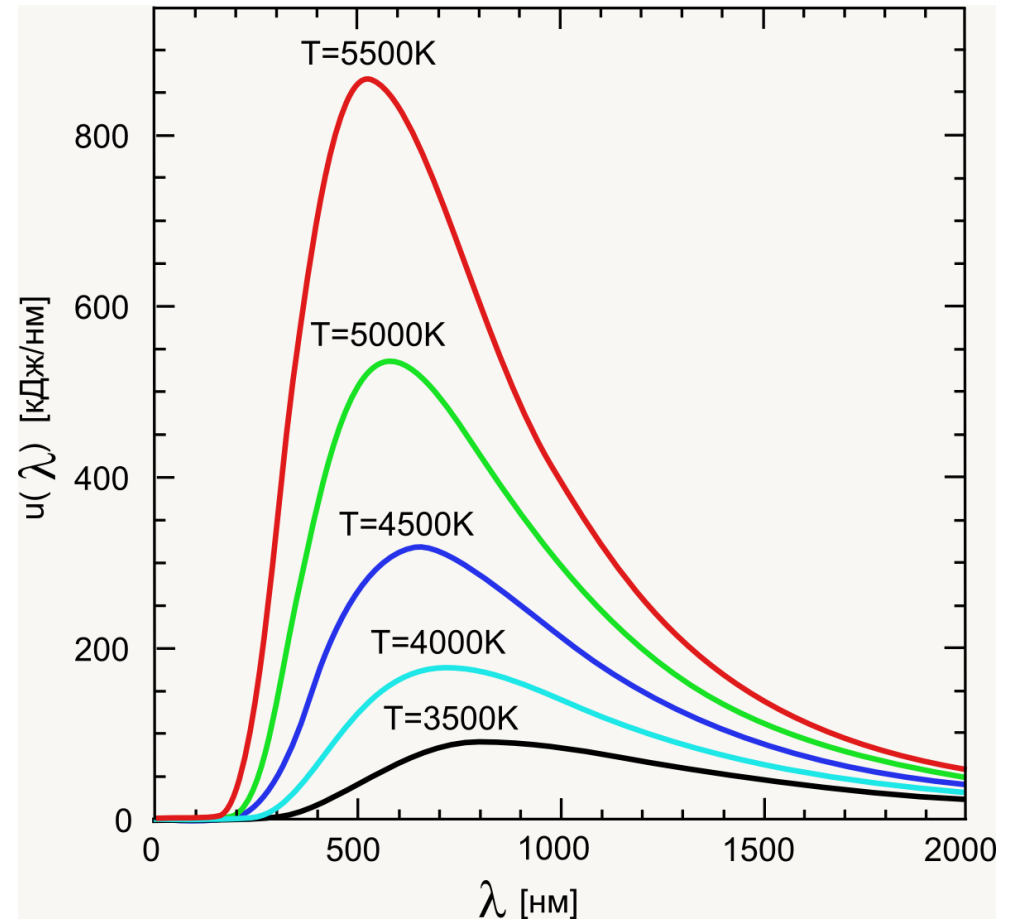
Абсолютно чёрное тело



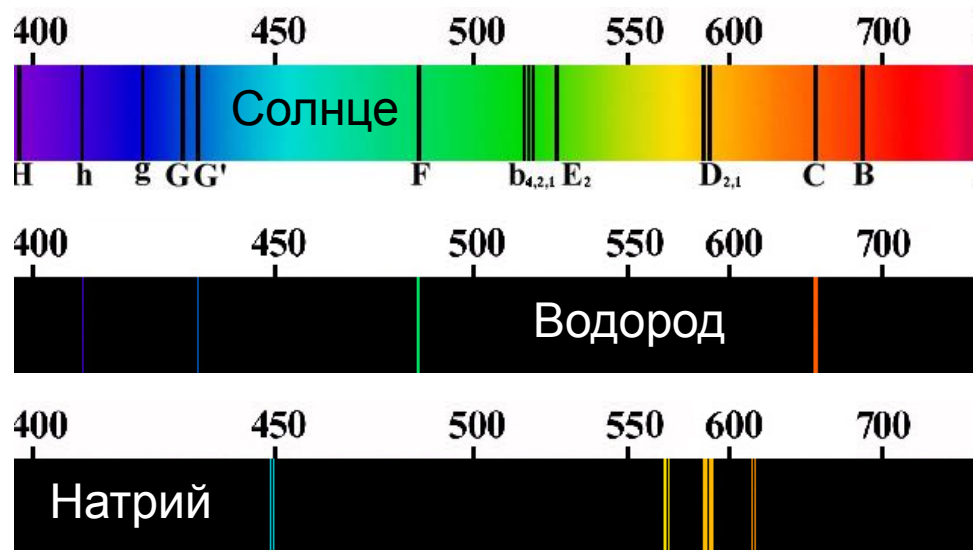
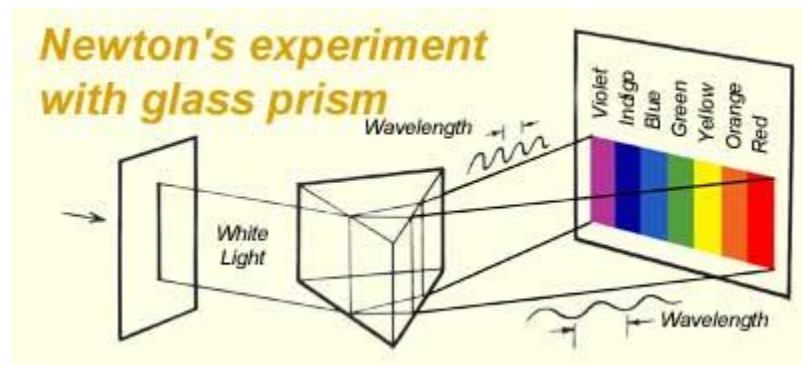
Цветная Вселенная

$$\lambda_{\max} (\text{см}) = \frac{0,3}{T}$$

Во многих случаях спектр астрономических объектов можно *примерно* описать спектром АЧТ



Спектроскопия для богатых



Вильям Волластон — 1802

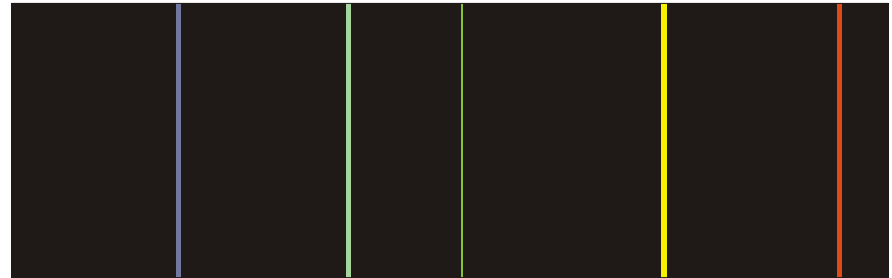
Йозеф Фраунгофер — 1814

Густав Кирхгоф, Роберт Бунзен — 1859–1862

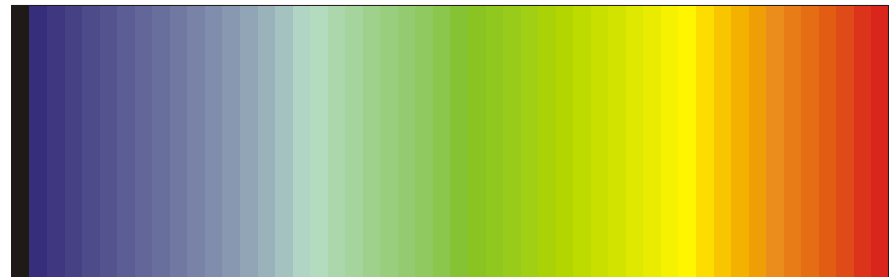
Непрерывный спектр и спектральные линии



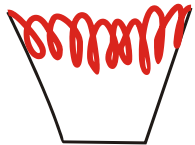
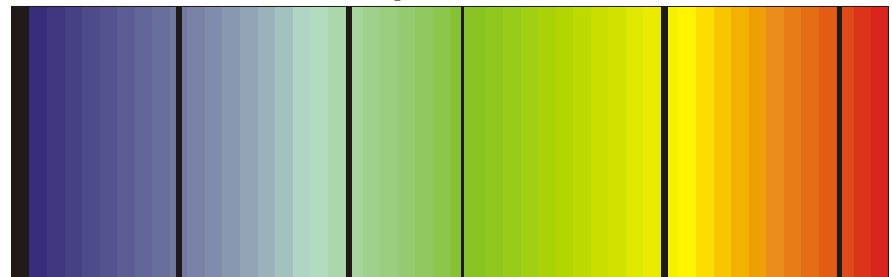
Спектр излучения



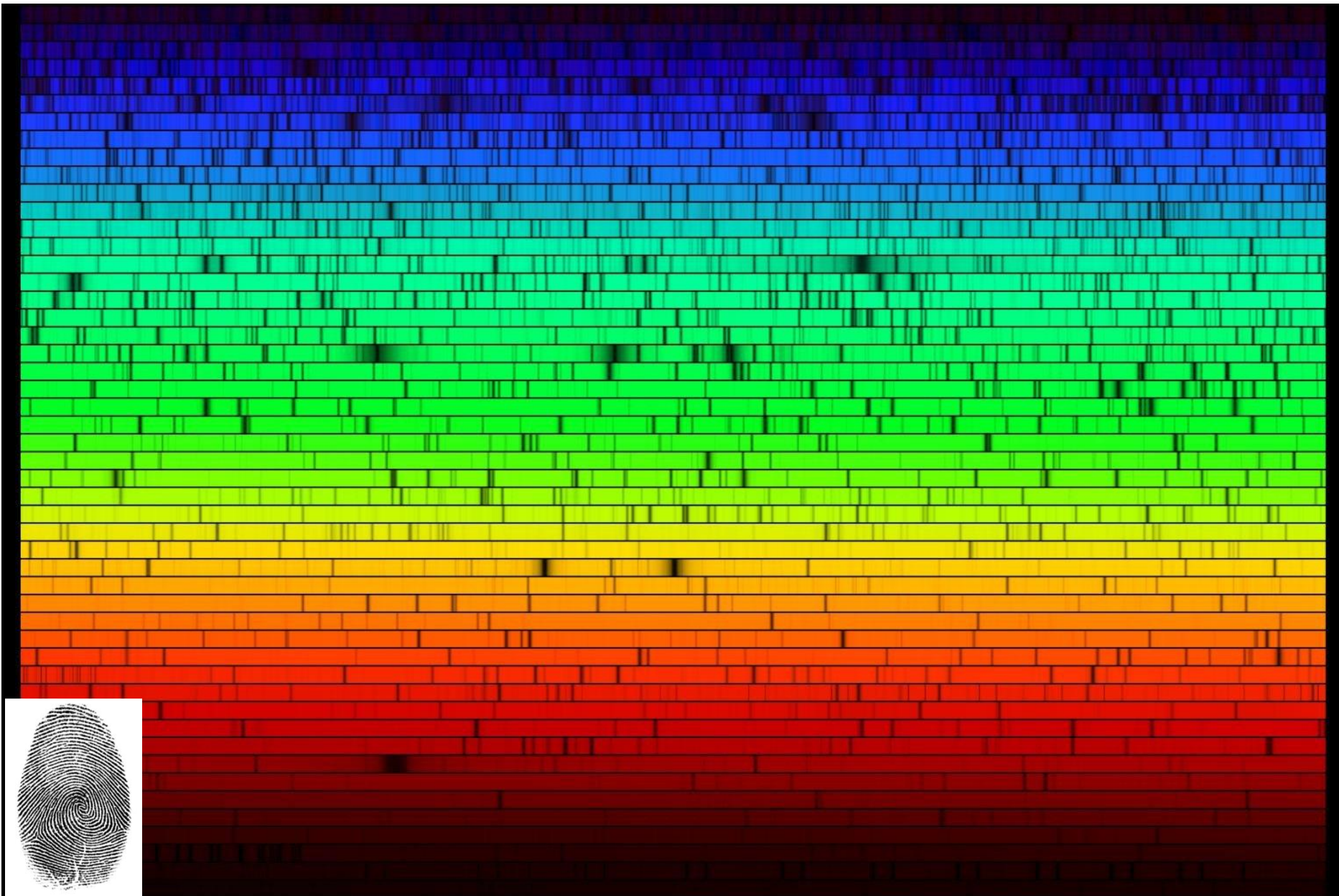
Непрерывный спектр



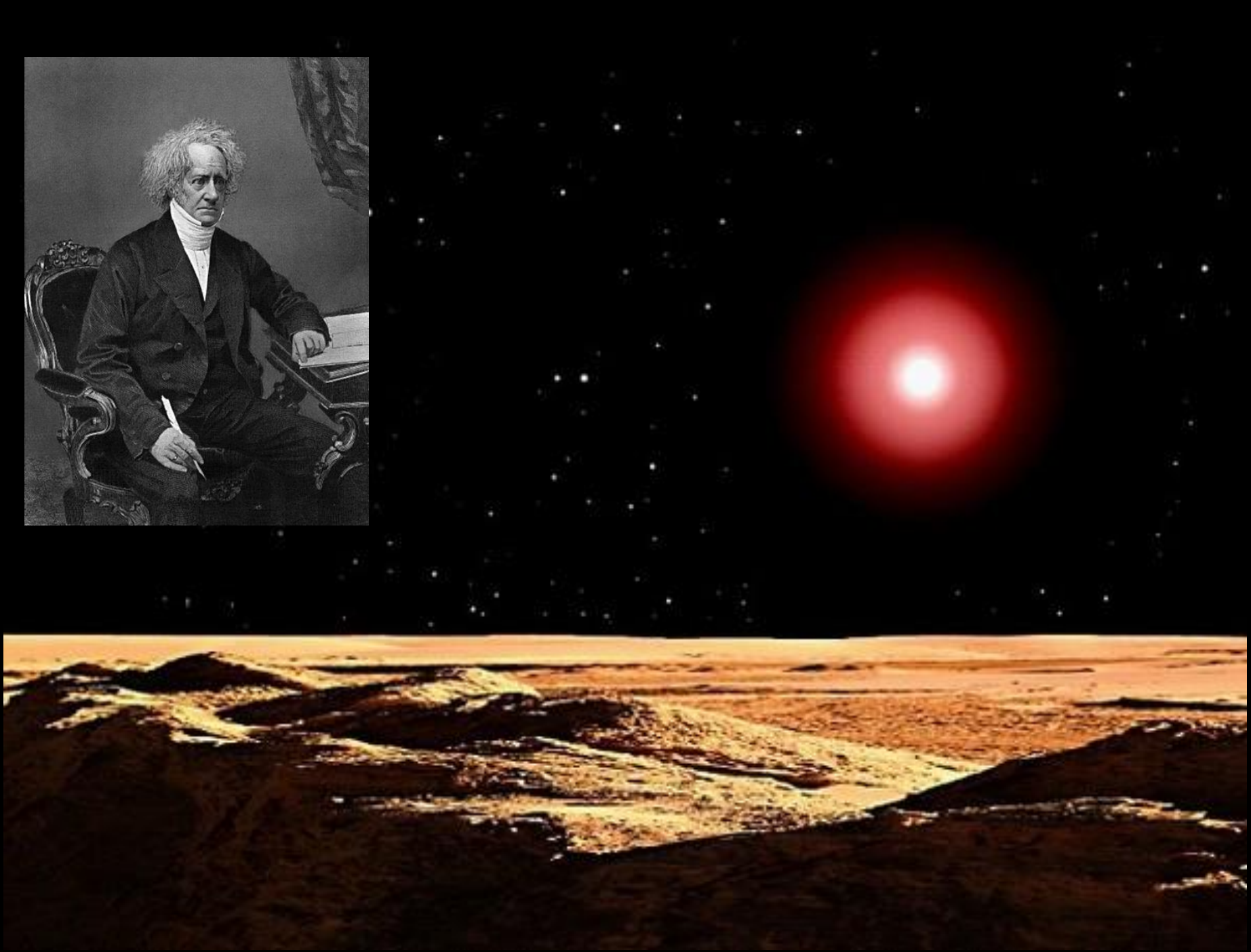
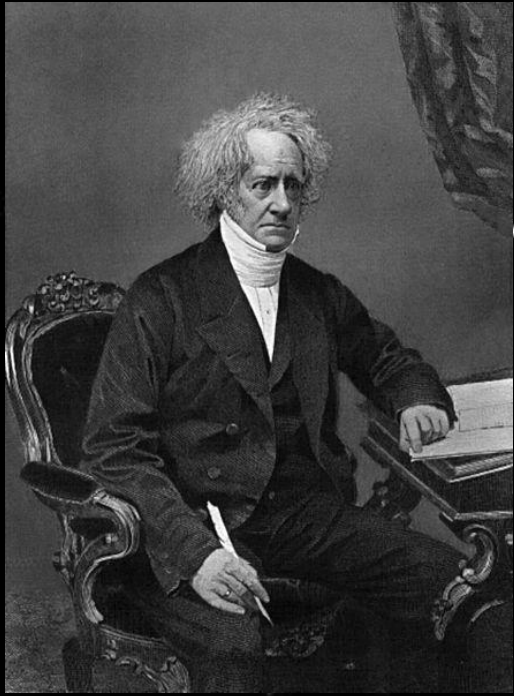
Спектр поглощения

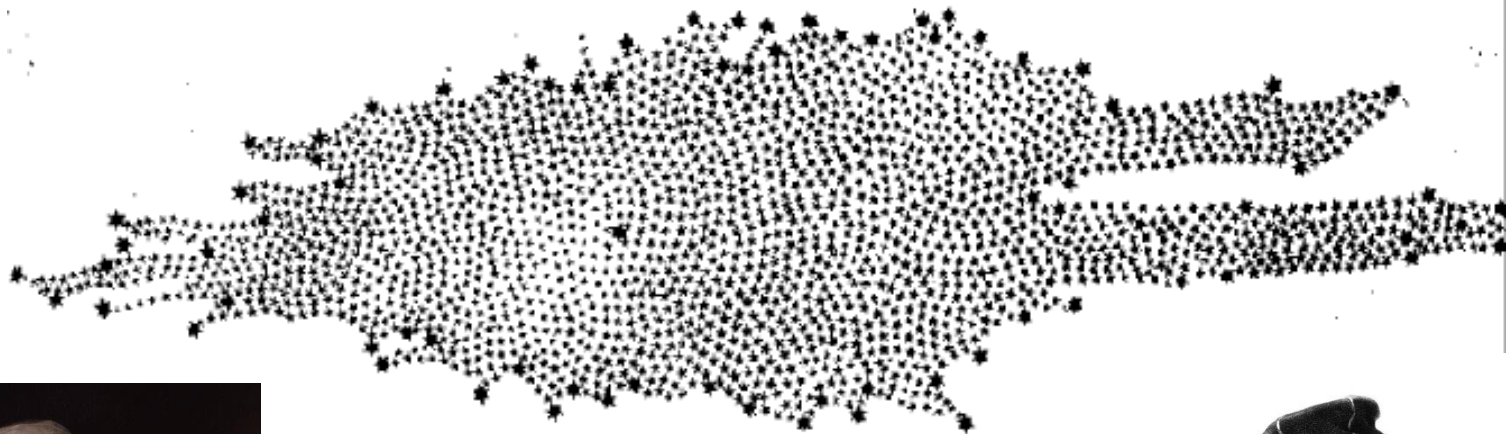


Спектральный анализ









Mein Gott, da ist ein Loch im Himmel!

Отражательные туманности

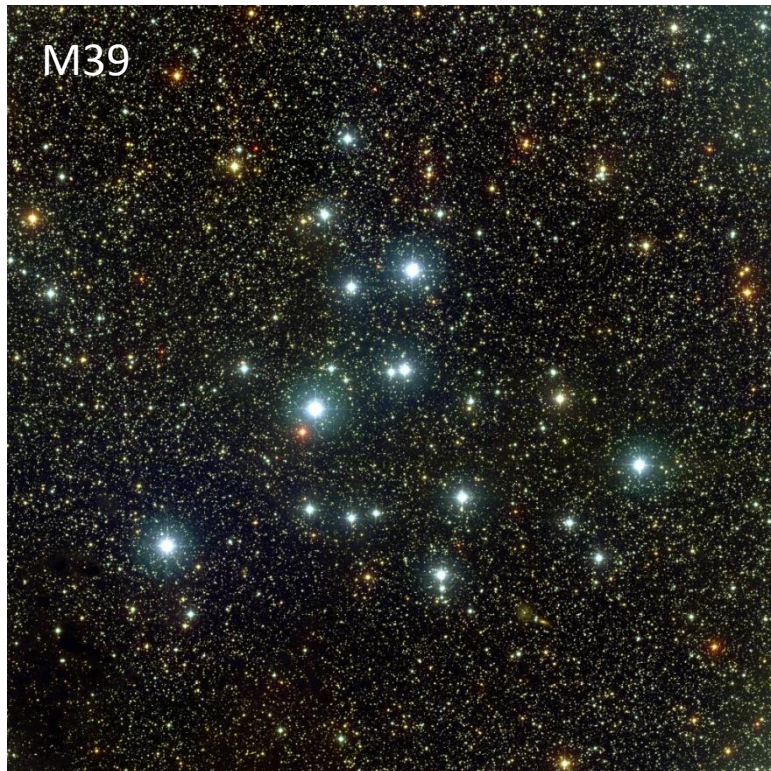


Slipher (1912): туманность состоит из вещества, подобного веществу колец Сатурна и комет.



Далёкие скопления в среднем крупнее близких

Далёкие скопления в среднем краснее близких



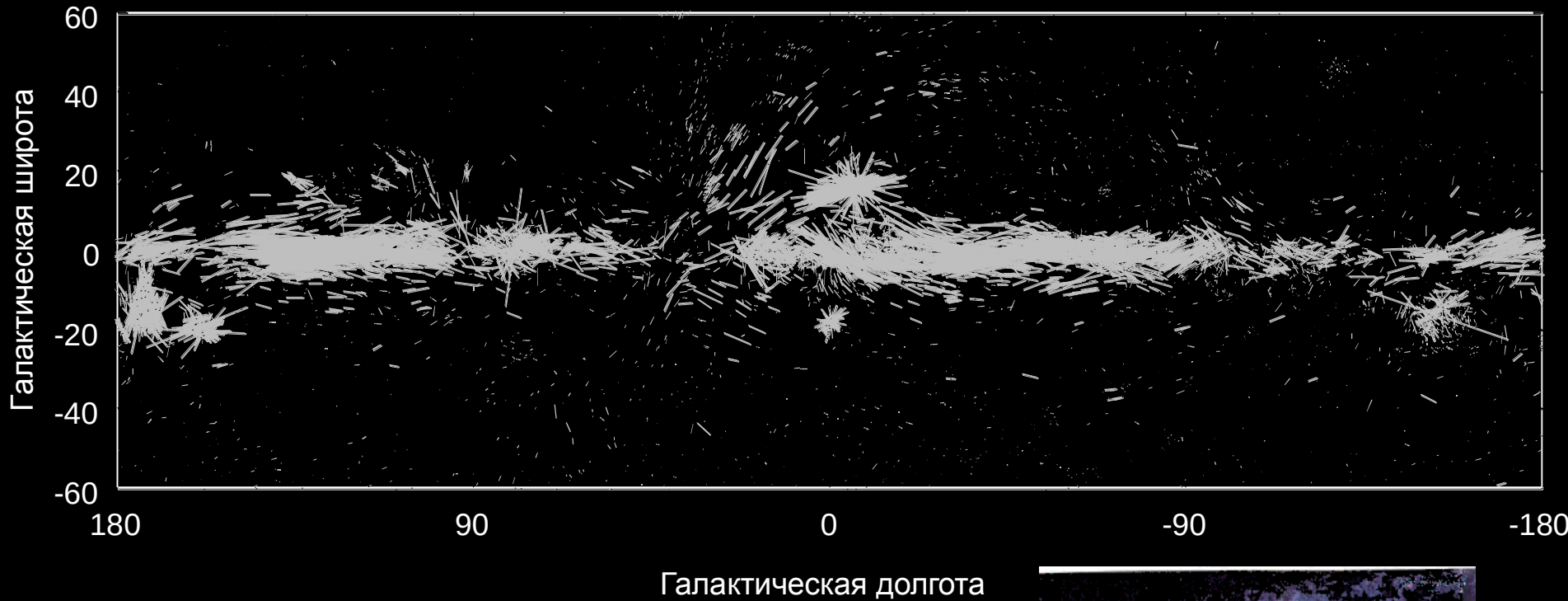
Первые модели пылинок

- Грязный лёд (вода, аммиак, метан, углекислый газ)?
- Металл?
- Графит?

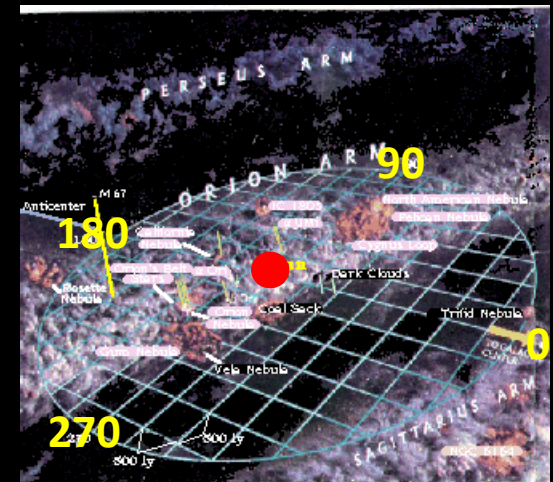


Поляризация звёздного света

Heiles (2000)



Hiltner (1949), Hall (1949),
Домбровский (1950)



Химический состав Солнца и МЗС

Солнце

Элемент	Содержание
H	1
He	0.1
C	$2.7 \cdot 10^{-4}$
N	$6.8 \cdot 10^{-5}$
O	$4.9 \cdot 10^{-4}$
S	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Si	$3.2 \cdot 10^{-5}$
Mg	$4.0 \cdot 10^{-5}$
Fe	$3.2 \cdot 10^{-5}$
Na	$1.7 \cdot 10^{-6}$

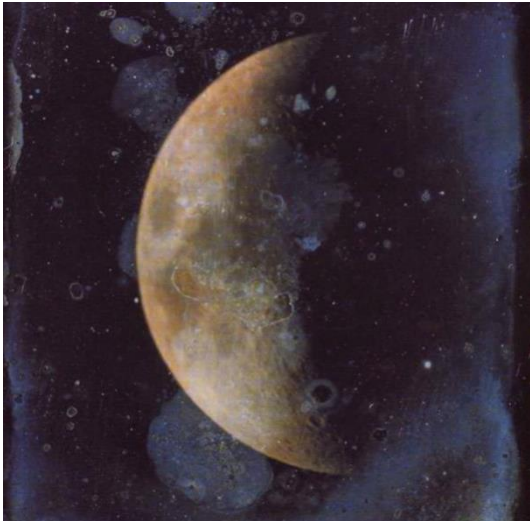
Межзвёздный газ

Элемент	Содержание
H	1
He	0.1–0.14
C	$7.9 \cdot 10^{-5}$
N	$2.5 \cdot 10^{-5}$
O	$1.8 \cdot 10^{-4}$
S	$9.1 \cdot 10^{-8}$
Si	$9.7 \cdot 10^{-9}$
Mg	$1.1 \cdot 10^{-8}$
Fe	$2.7 \cdot 10^{-9}$
Na	$2.3 \cdot 10^{-9}$

Asplund et al. (2009)

Фотометрия

- Звёздная величина, видимая и фотографическая
- Показатели цвета
- Фотометрические стандарты



- Уильям Дрепер — Луна (1840)
- Джон Уиппл и Вильям Бонд (1850) — Вега

$$\frac{E_1}{E_2} = 2.512^{m_2 - m_1}$$

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = 0.4(m_2 - m_1)$$

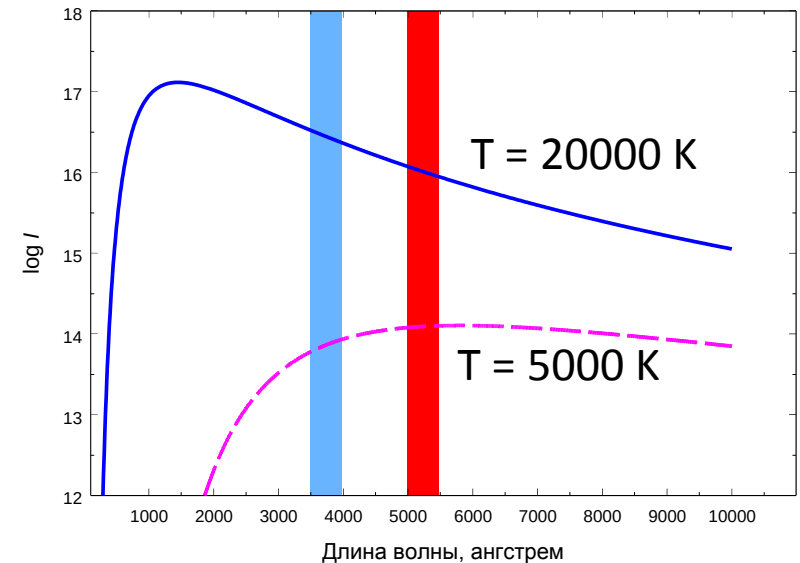
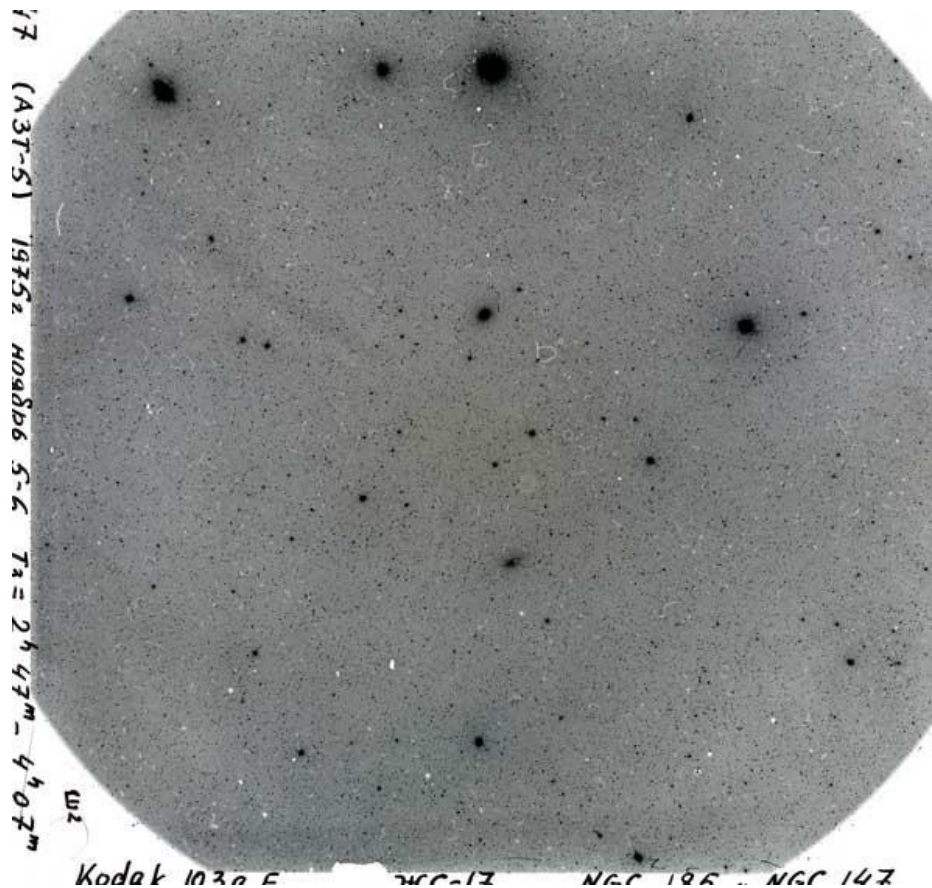
Болометрическая
видимая звёздная
величина, равная нулю,
соответствует потоку
 $2.518021002... \cdot 10^{-8}$ Вт
на кв. м.

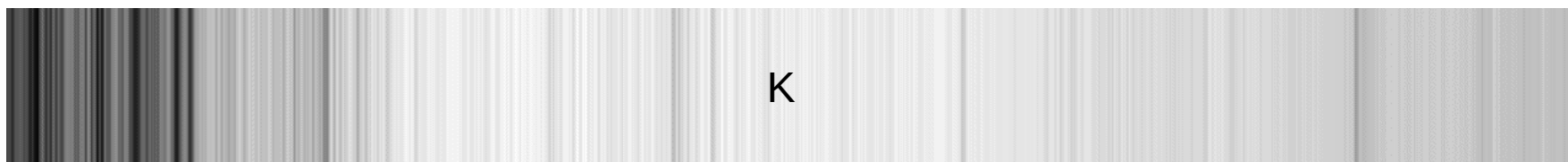
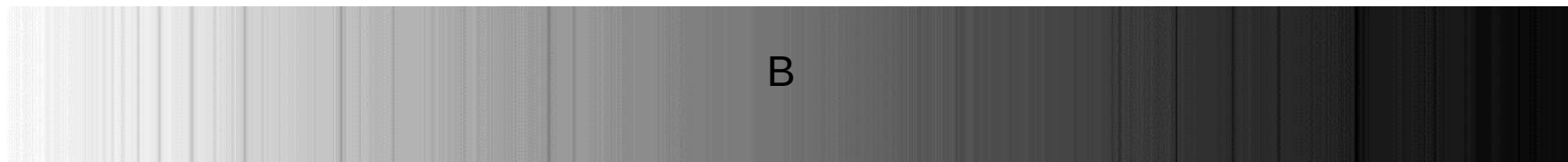
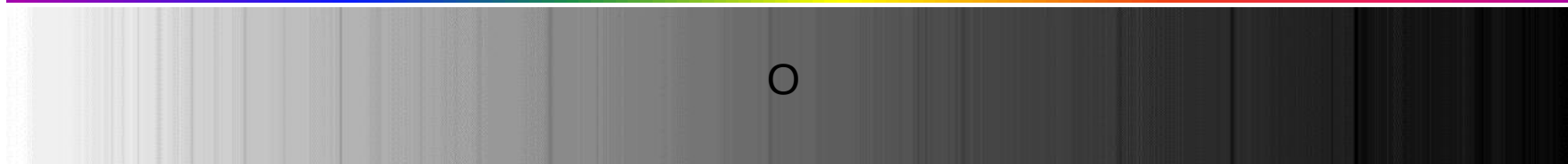
Фотография и фотометрия

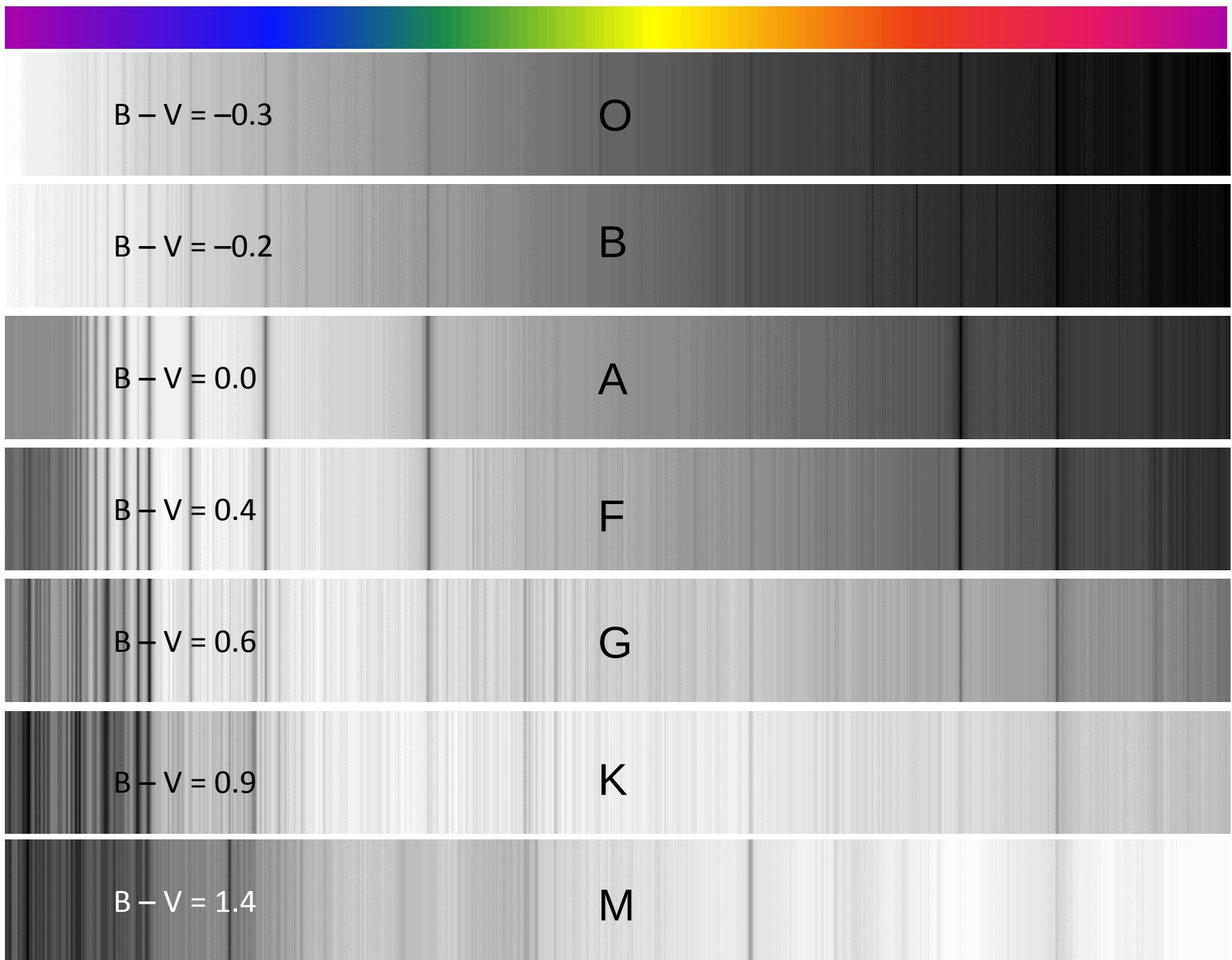
- Карл Шварцшильд — показатель цвета

$$CI = m_{pg} - m_{vis} \quad (1900)$$

B – V







Параметры поглощения

- A_V — поглощение света, примерно 1.5^m кпк^{-1}
- $E(B-V)$ — селективное поглощение света (покраснение)

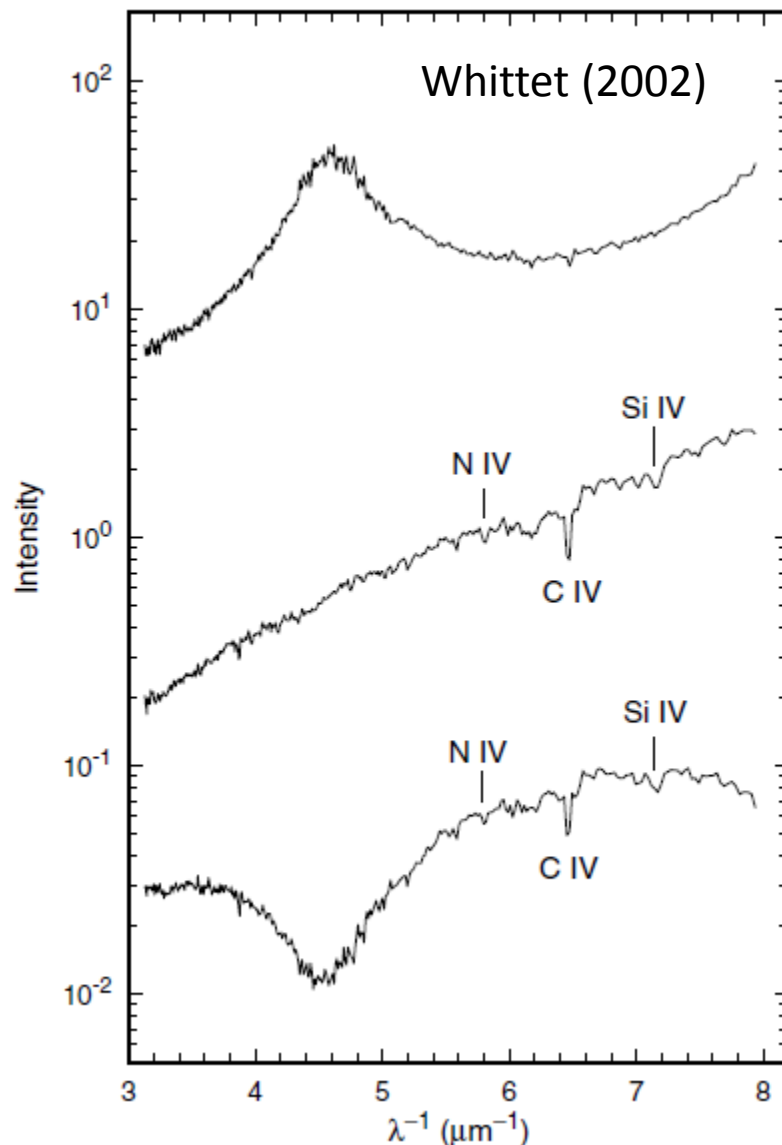
**Проходя через МЗС,
излучение краснеет,
следовательно,
поглощающие
частицы — мелкие**



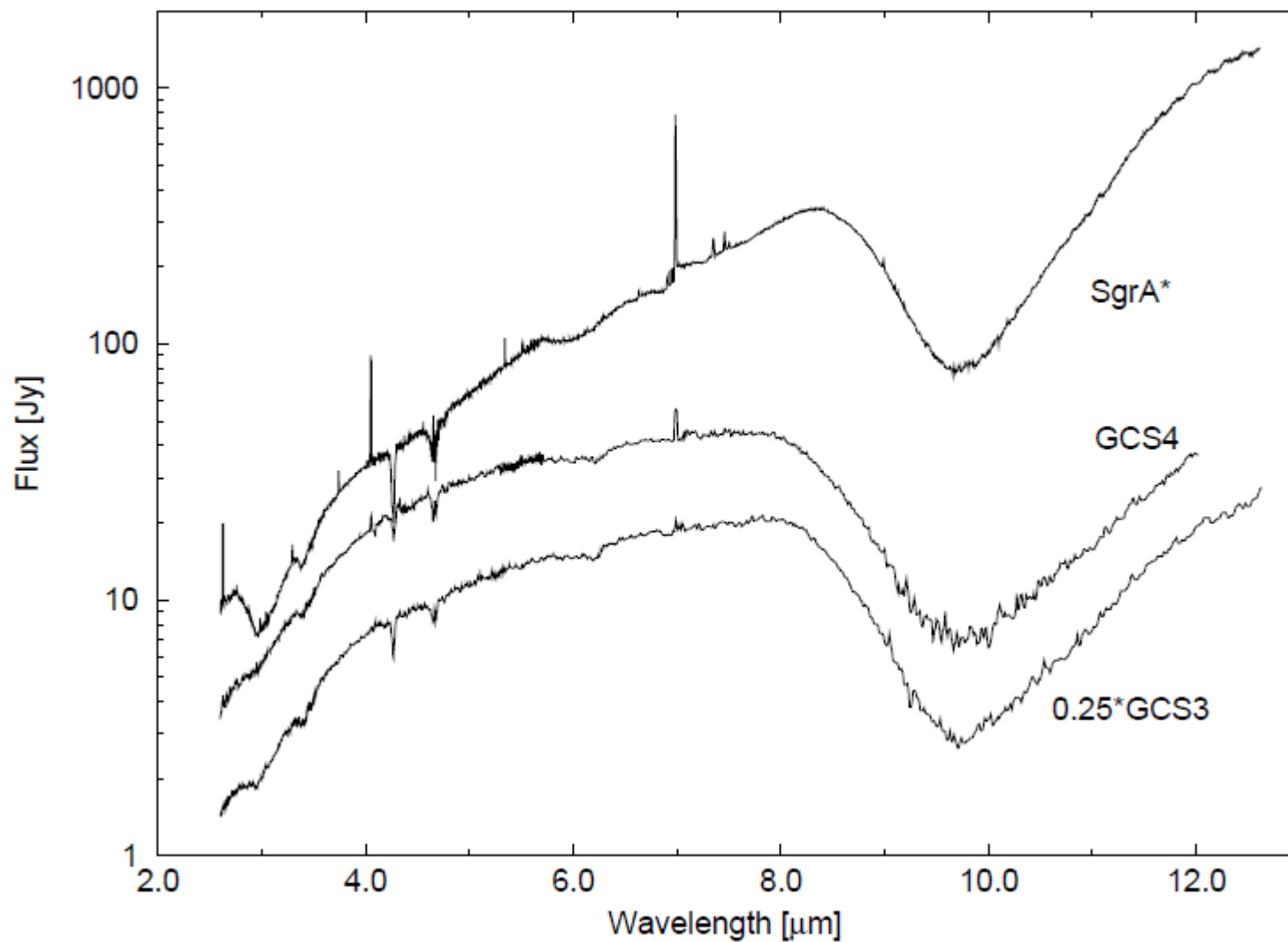
Построение кривой поглощения

Сравнение спектров звёзд
примерно одного и того же
спектрального класса O9.5V:
HD 34078 ($E_{B-V} = 0.54$) и HD 38666
($E_{B-V} = 0.03$)

Необходимо наблюдать в
ультрафиолетовом диапазоне



Силикатная особенность

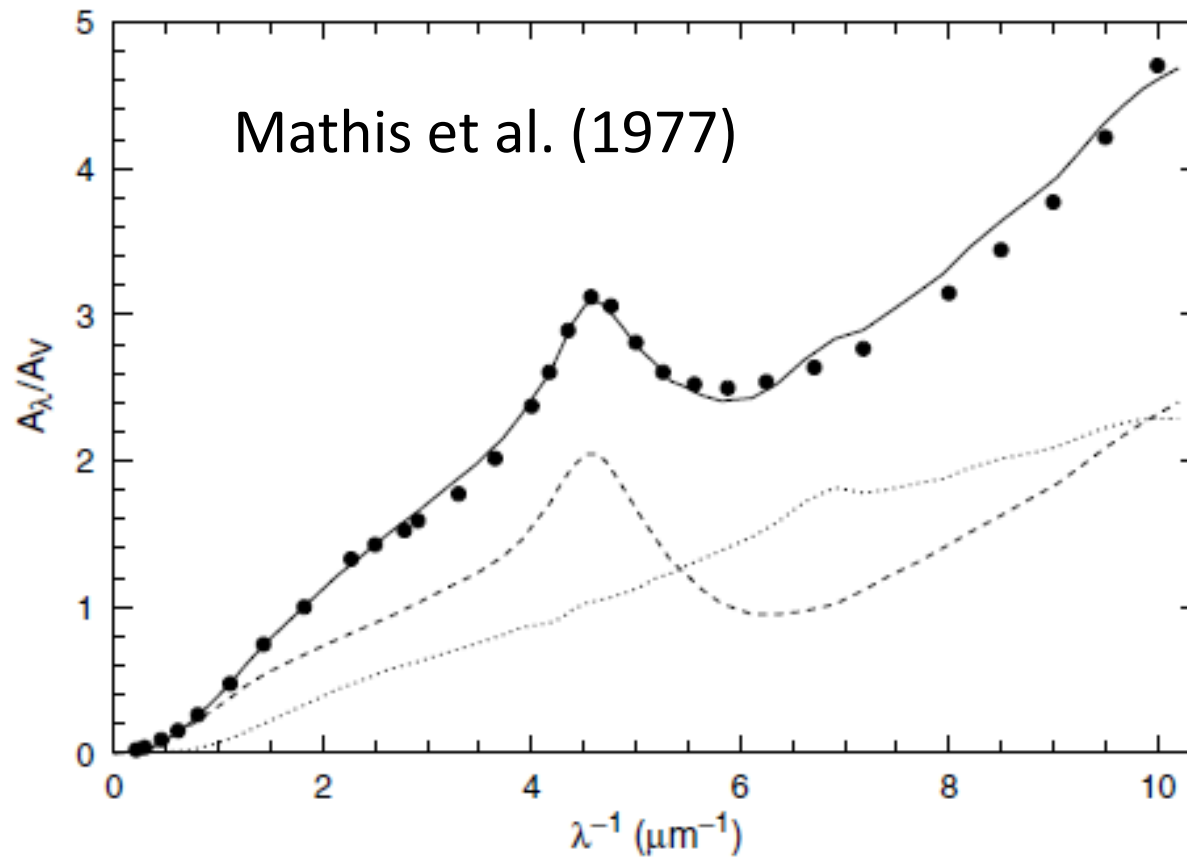


Поглощение света космической пылью

- «Синие» лучи поглощаются сильнее «красных»
- В некоторых диапазонах длин волн (2175 Å, 10 мкм, 20 мкм) поглощение усиливается



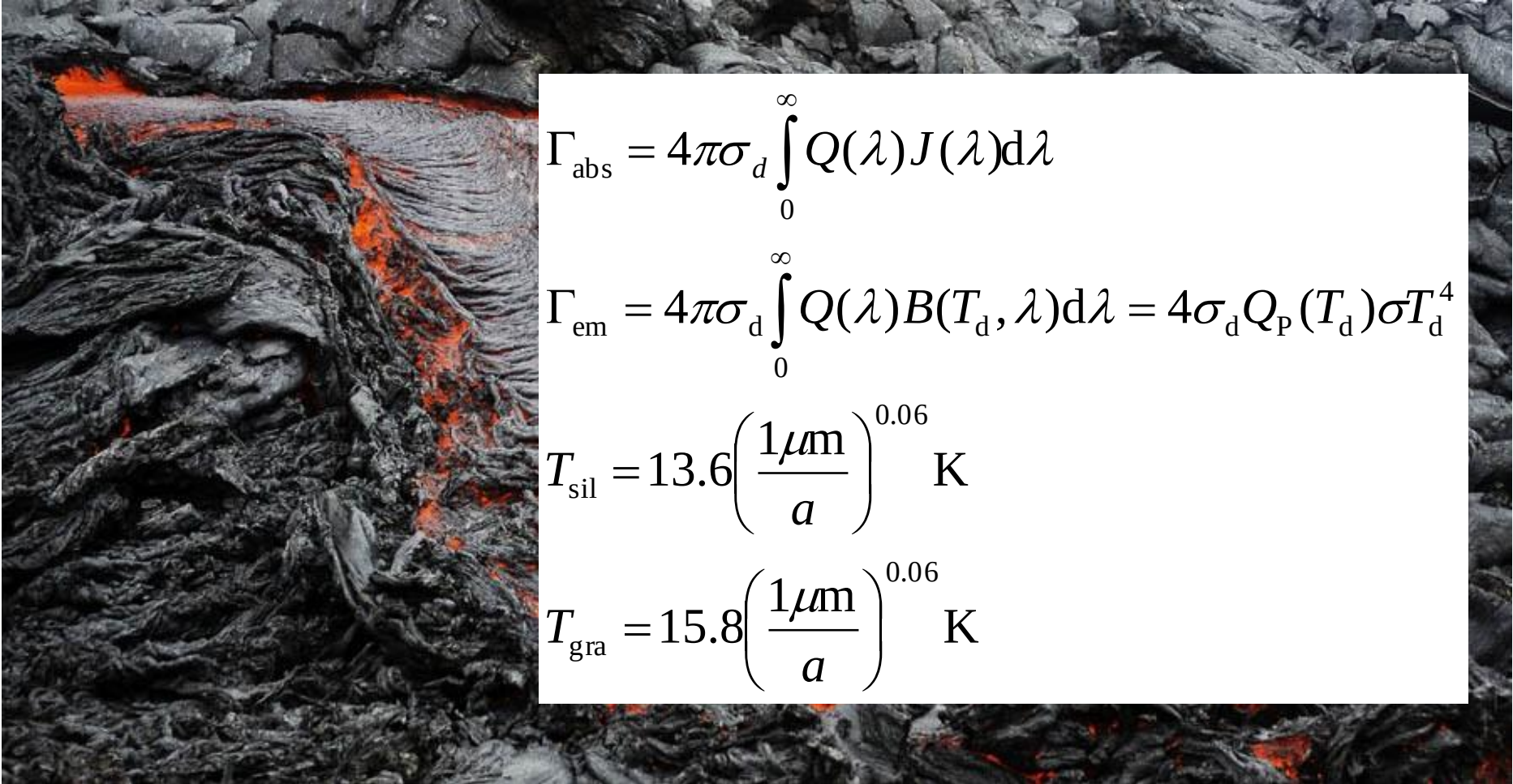
Модель MRN



$$n(a) \propto a^{-3.5}$$

$$a_{\min} \approx 0.005 \text{ MKM}, a_{\max} \approx 0.25 \text{ MKM}$$

Температура пылинок



$$\Gamma_{\text{abs}} = 4\pi\sigma_d \int_0^{\infty} Q(\lambda)J(\lambda)d\lambda$$

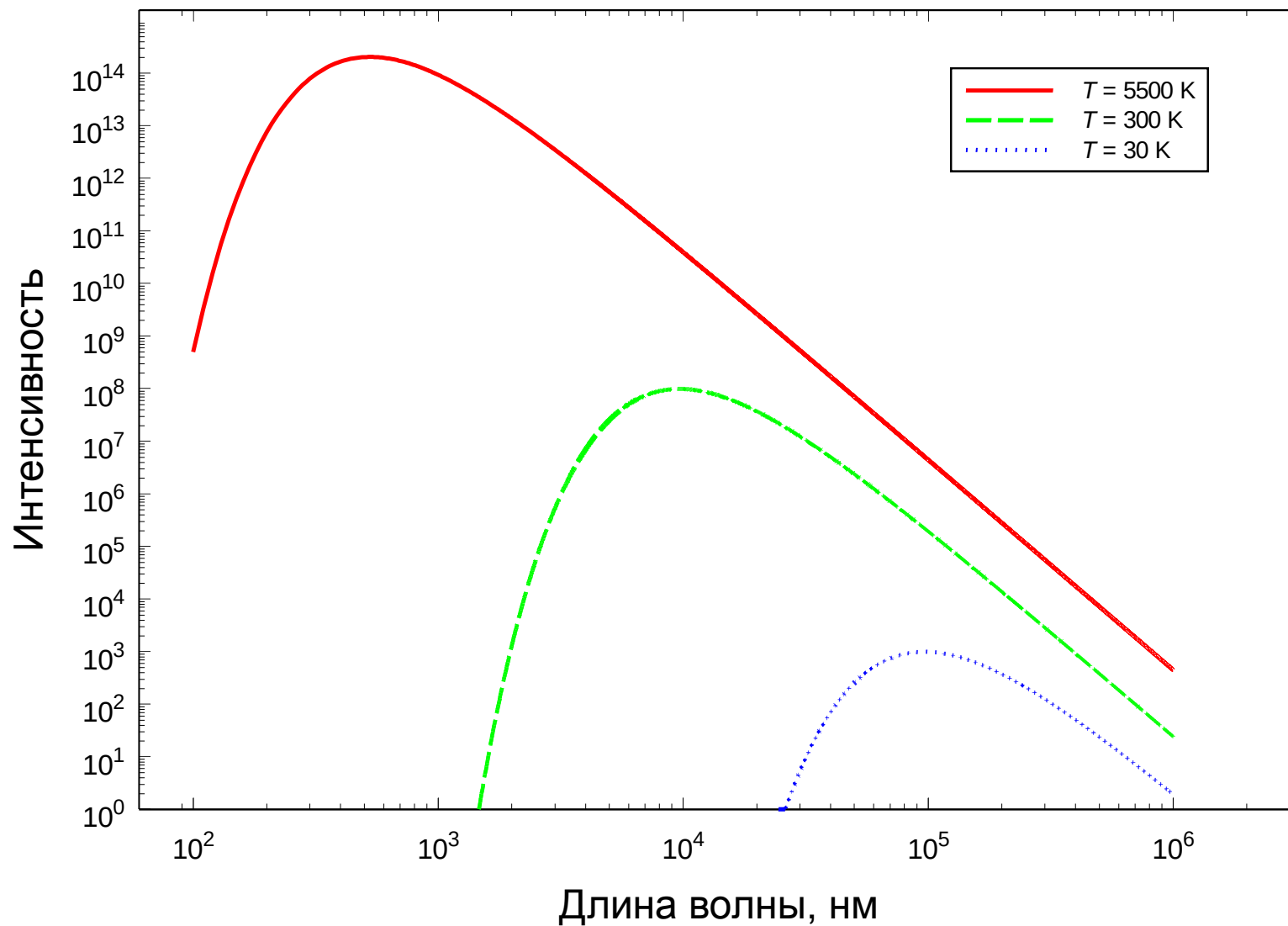
$$\Gamma_{\text{em}} = 4\pi\sigma_d \int_0^{\infty} Q(\lambda)B(T_d, \lambda)d\lambda = 4\sigma_d Q_P(T_d)\sigma T_d^4$$

$$T_{\text{sil}} = 13.6 \left(\frac{1\mu\text{m}}{a} \right)^{0.06} \text{ K}$$

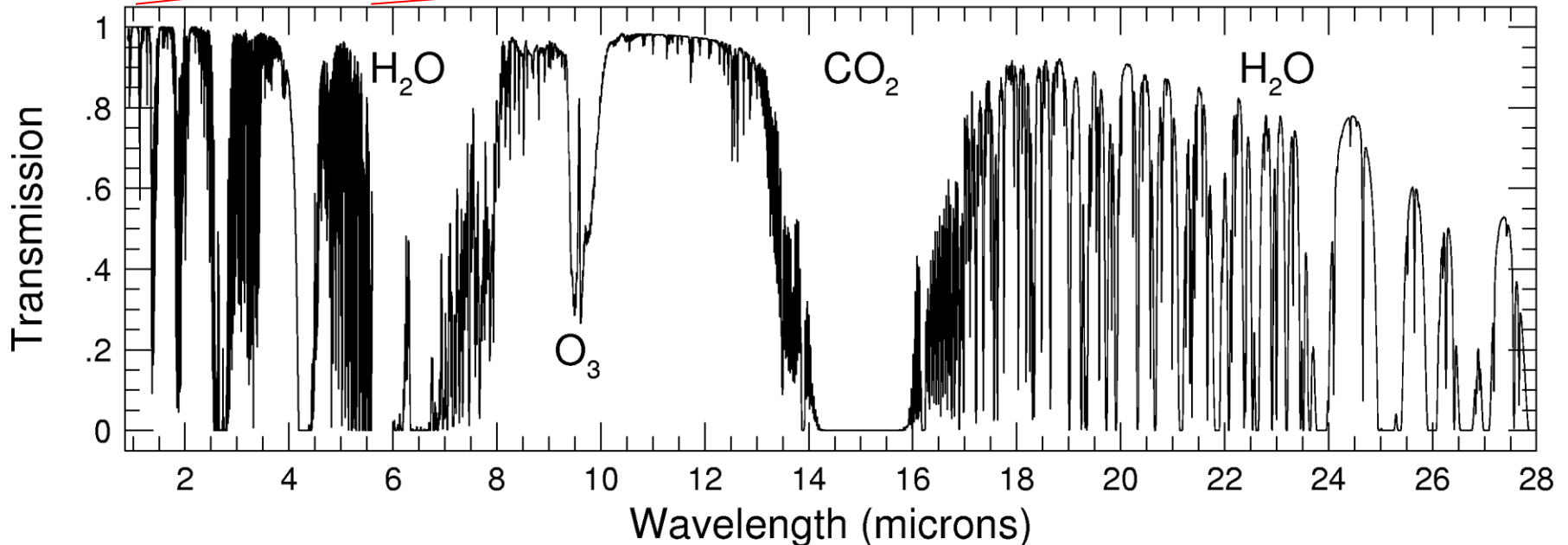
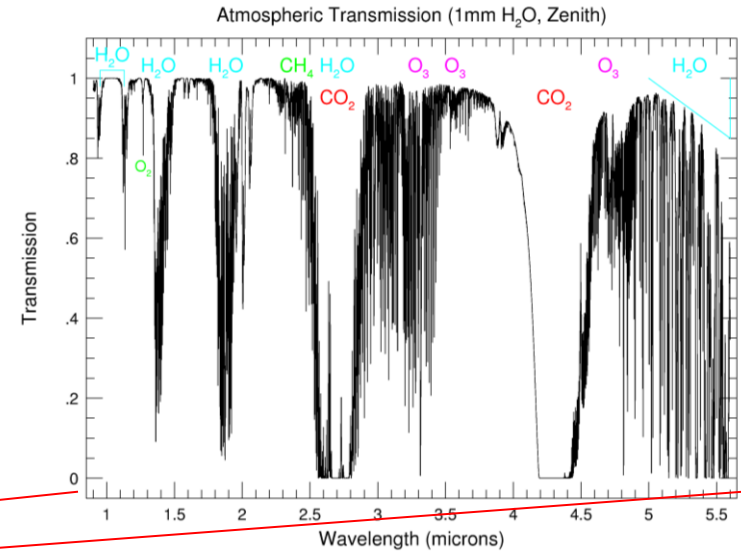
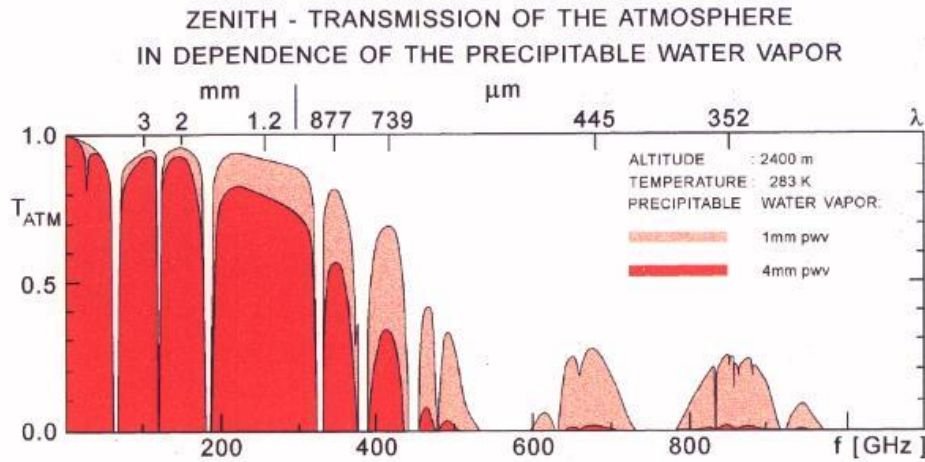
$$T_{\text{gra}} = 15.8 \left(\frac{1\mu\text{m}}{a} \right)^{0.06} \text{ K}$$

Пылинки — очень хорошие излучатели

Тепловое излучение



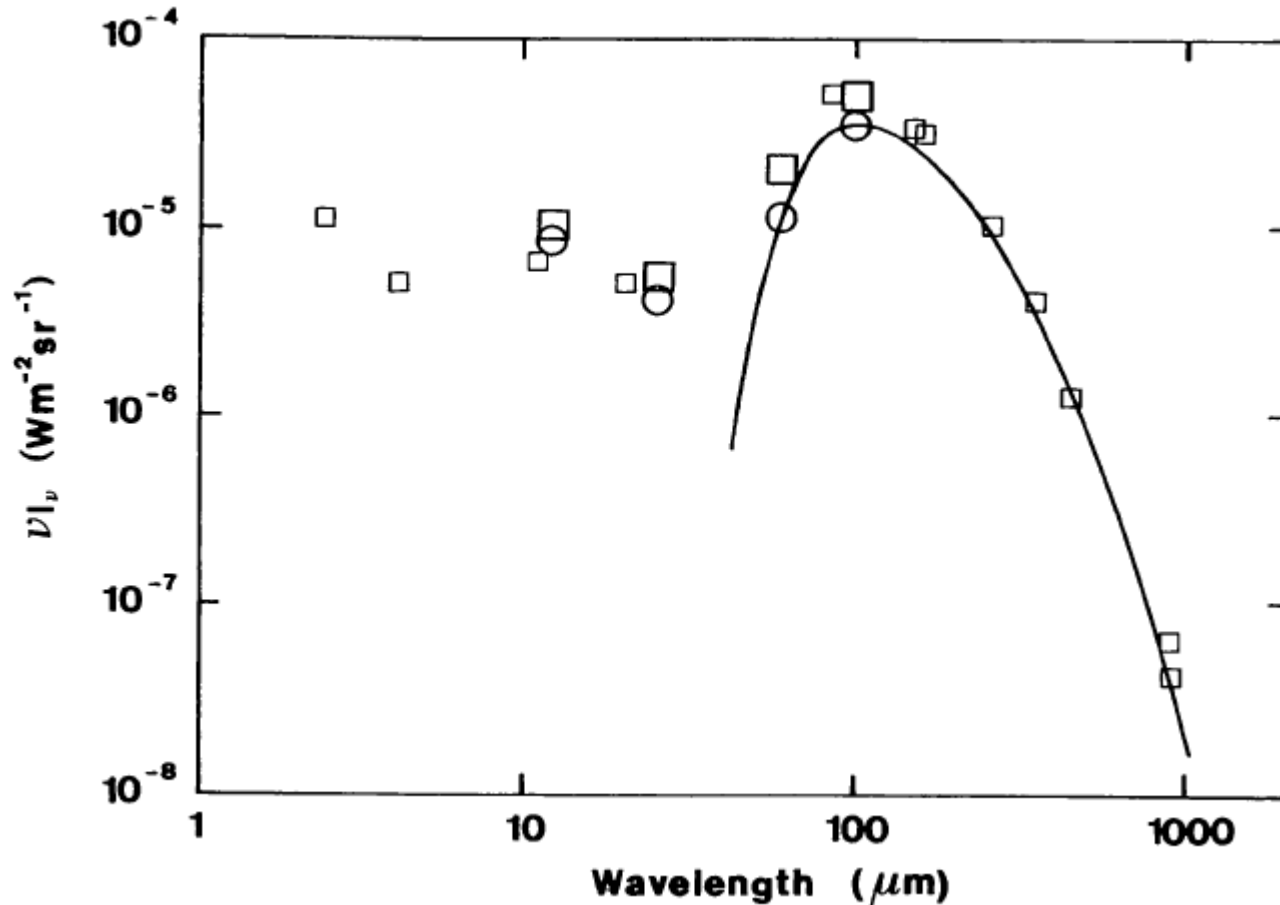
Прозрачность атмосферы в ИК-диапазоне



Космические инфракрасные телескопы

Телескоп	Фотометрия	Спектроскопия	Угловое разрешение	Время работы
<u>IRAS</u>	12, 25, 60, 100	7.5-23	30"-2'	1983
COBE/DIRBE	10 диапазонов между 1.25-240		0.7°	1989-1993
Infrared Telescope in Space	150, 250, 400, 700	1.4-11.7	0.5°	1995
MSX	4.29, 4.35, 8.28, 12.13, 14.65, 21.3			1996-1997
<u>ISO</u>	2.5-240	2.4-196.8	1.5"-12"	1995-1998
AKARI	1.7-26.5, 50-180			2006-2011
WISE	3.4, 4.6, 12, 22		6"	2009-2011
<u>Spitzer</u>	3.6, 4.5 , 5.8, 8, 24, 70, 160	5.3-40	2"-40"	2003-

Инфракрасное излучение межзвёздной пыли

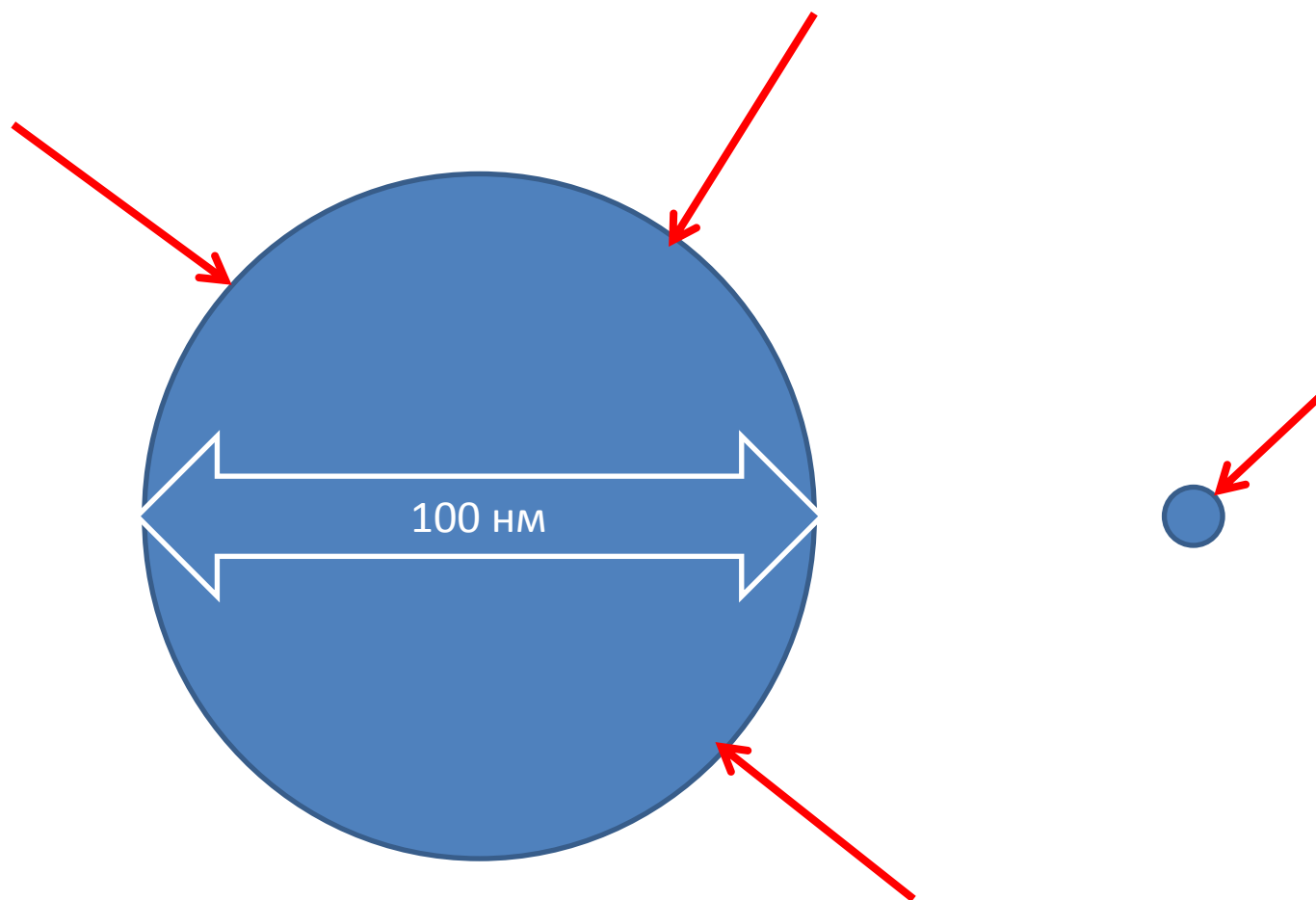


$$\frac{I_\nu(60 \mu\text{m})}{I_\nu(100 \mu\text{m})} = 0.11, \quad \frac{I_\nu(25 \mu\text{m})}{I_\nu(100 \mu\text{m})} = 2 \times 10^{-6},$$

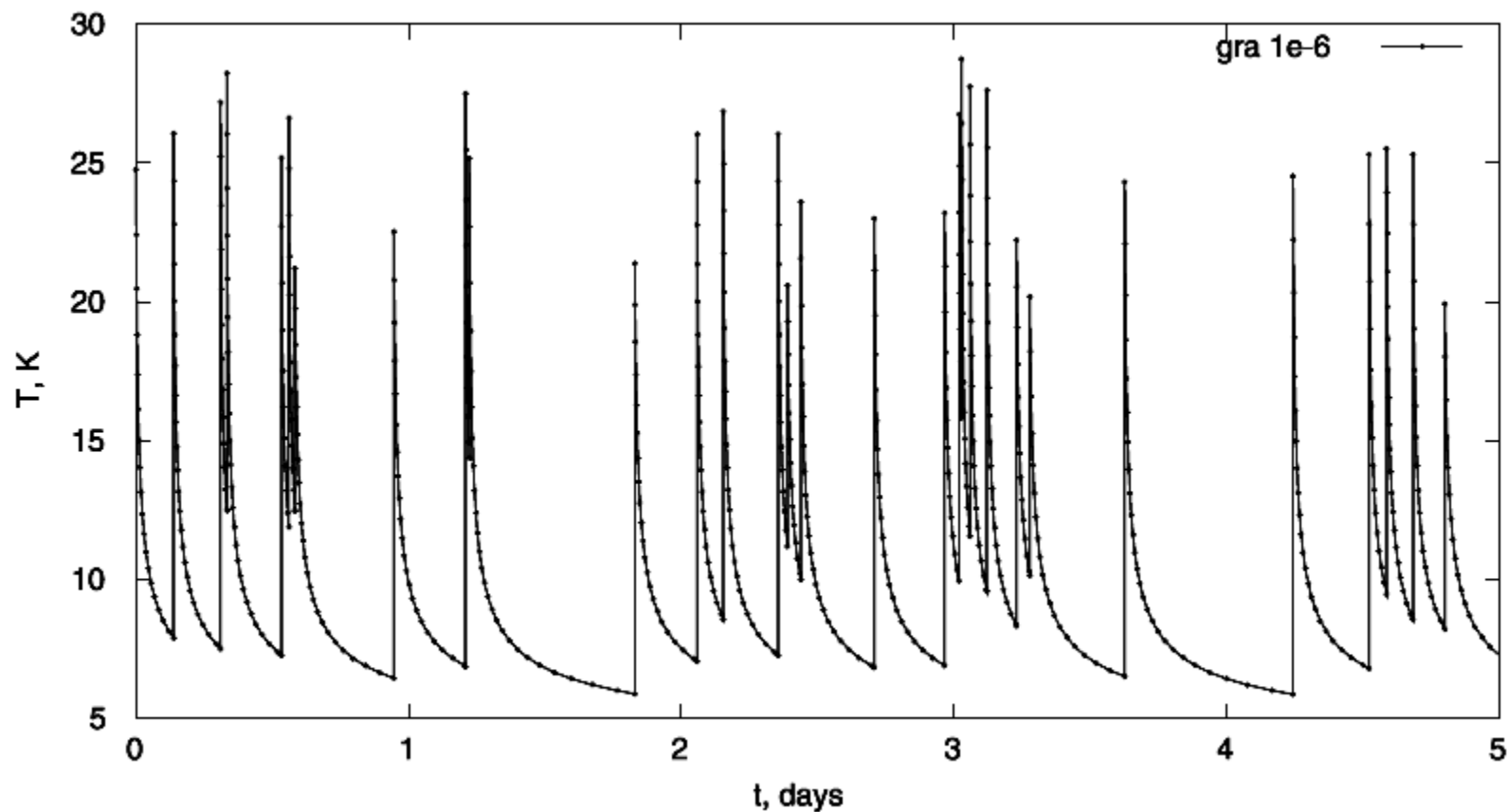
Puget & Leger (1989)

$$\frac{I_\nu(12 \mu\text{m})}{I_\nu(100 \mu\text{m})} = 1 \times 10^{-13}.$$

Стохастический нагрев пылинок



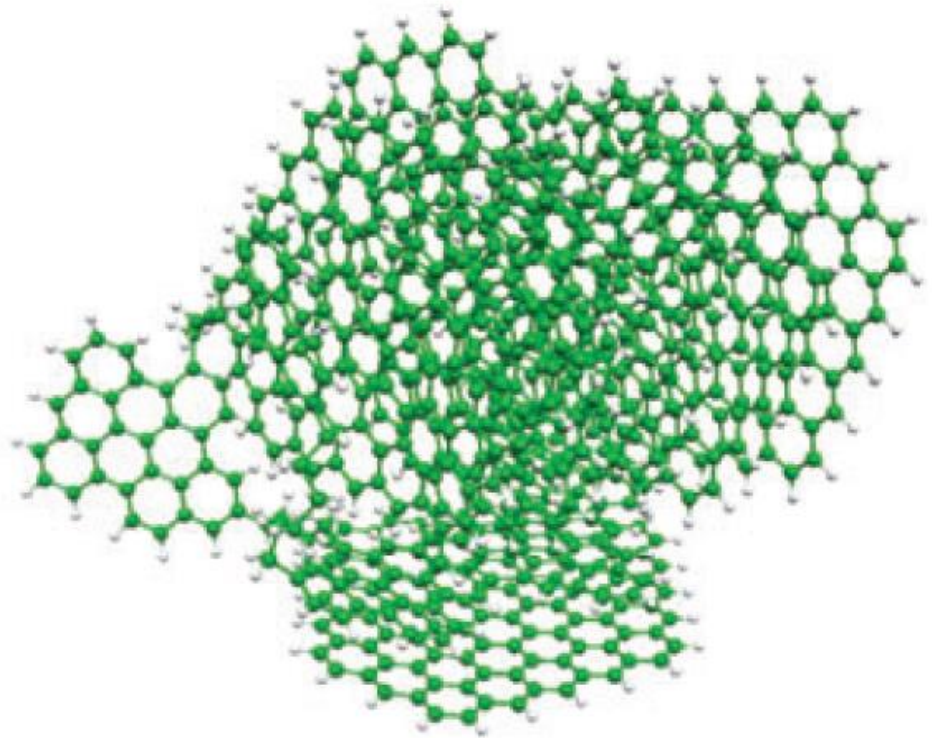
Стохастический нагрев пылинок



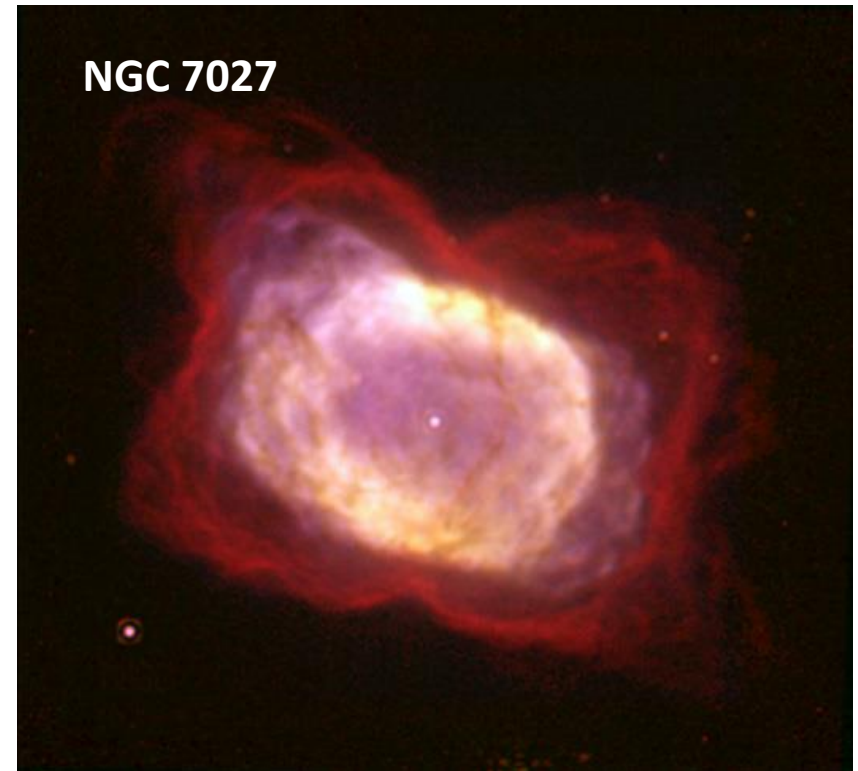
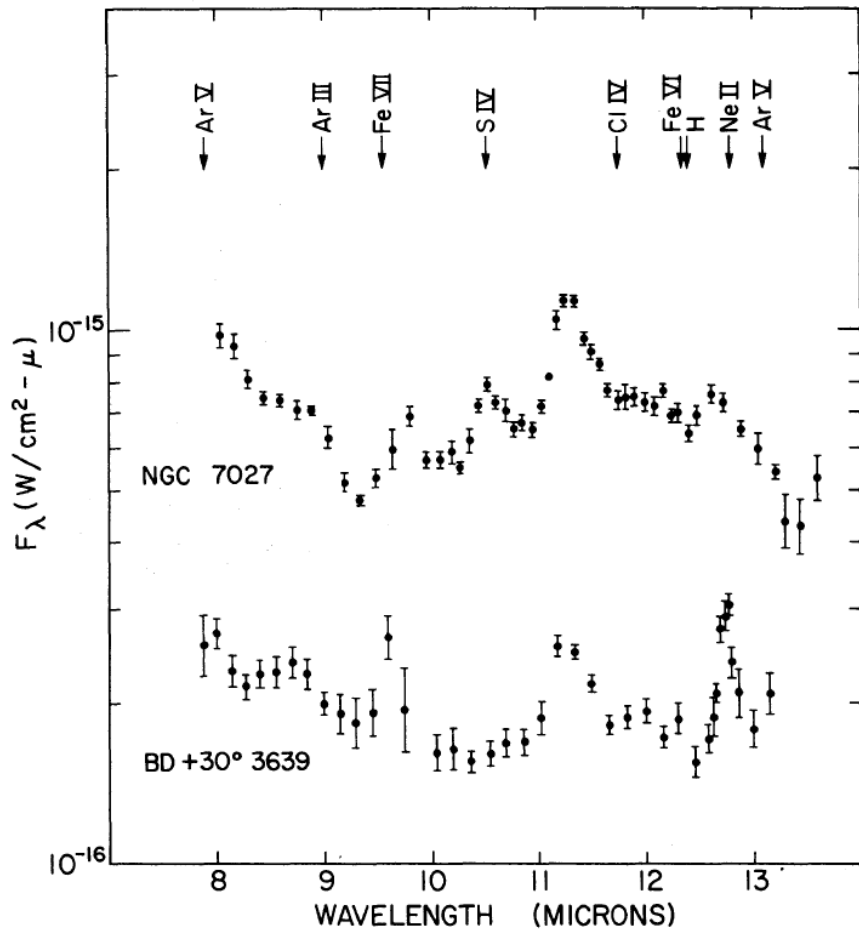
Pavlyuchenkov et al. (2012)

Варианты строения ОМП (VSG)

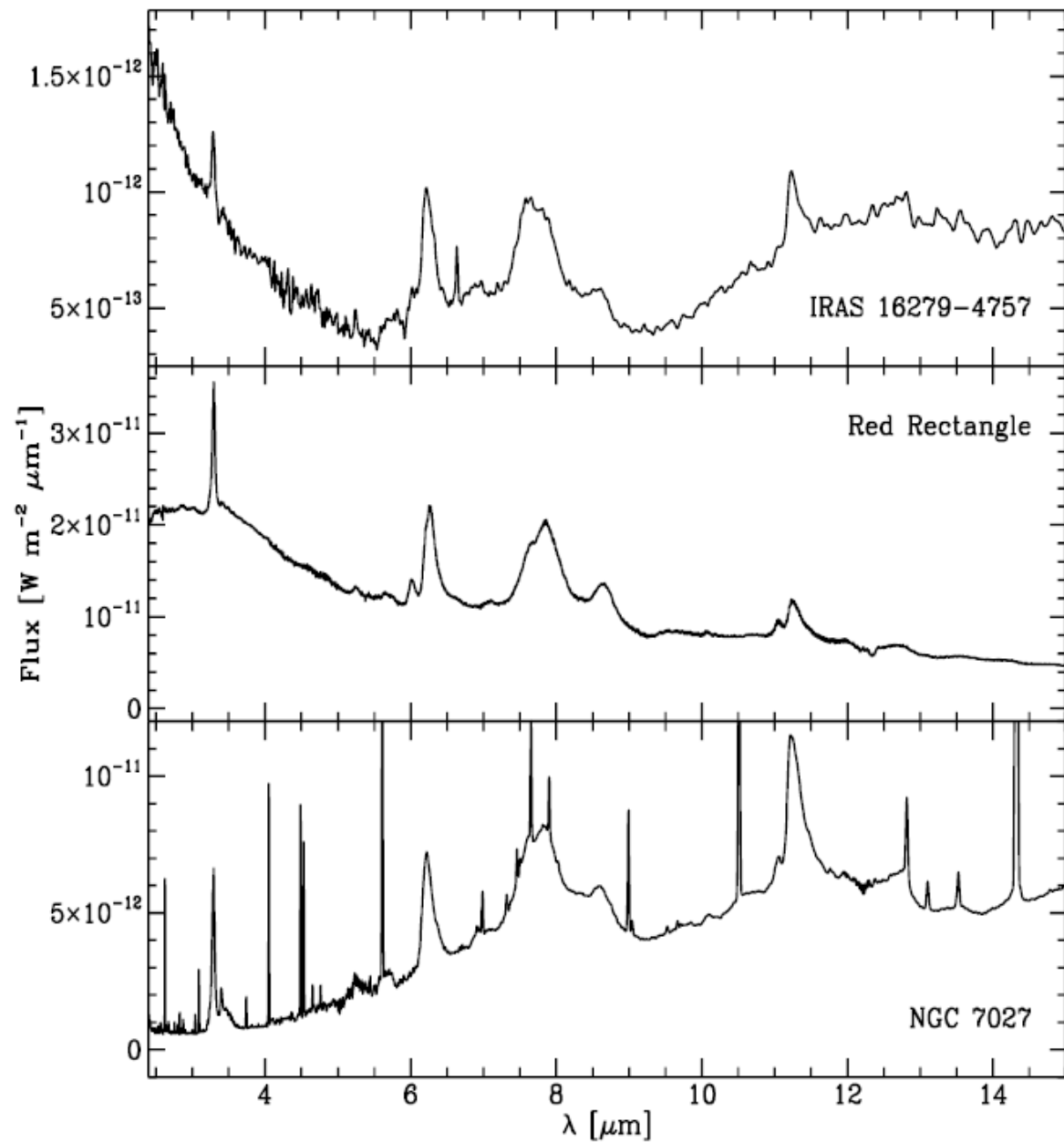
- Гидрогенизированный аморфный углерод
- ПАУ-кластеры
- Наноалмазы
- Графит



Неидентифицированные инфракрасные полосы

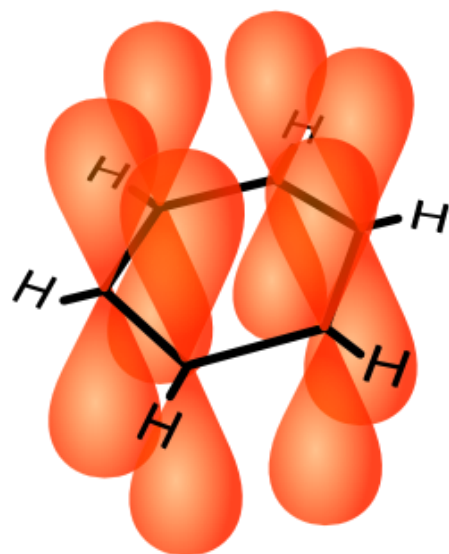


Gillett et al. (1973)

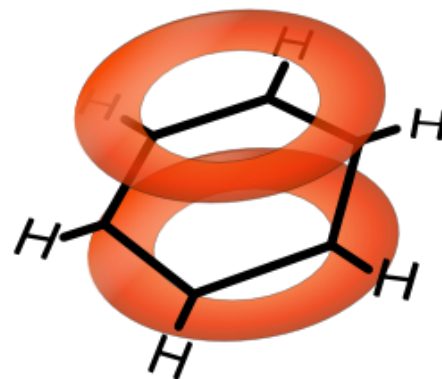


Существенная доля (десятки процентов) всего излучения в ИК-диапазоне

Полициклические ароматические углеводороды



6 p-орбиталей



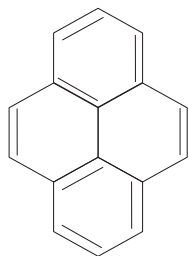
Делокализованные



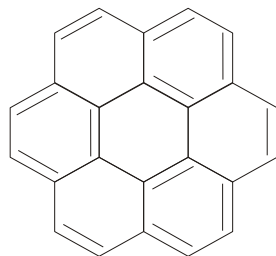
Структура ПАУ



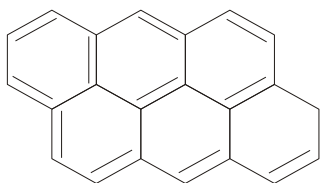
Пери-конденсированные



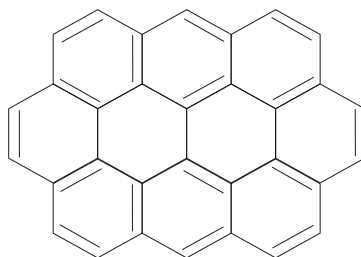
Пирен ($C_{16}H_{10}$)



Коронен ($C_{24}H_{12}$)

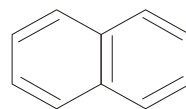


Антантрен ($C_{14}H_{10}$)

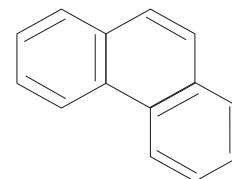


Овален ($C_{32}H_{14}$)

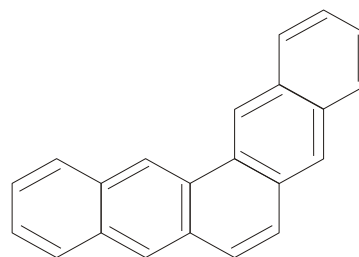
Орто-конденсированные



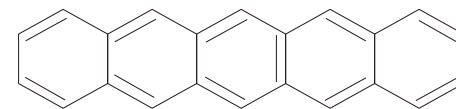
Нафталин ($C_{10}H_8$)



Фенантрен ($C_{14}H_{10}$)

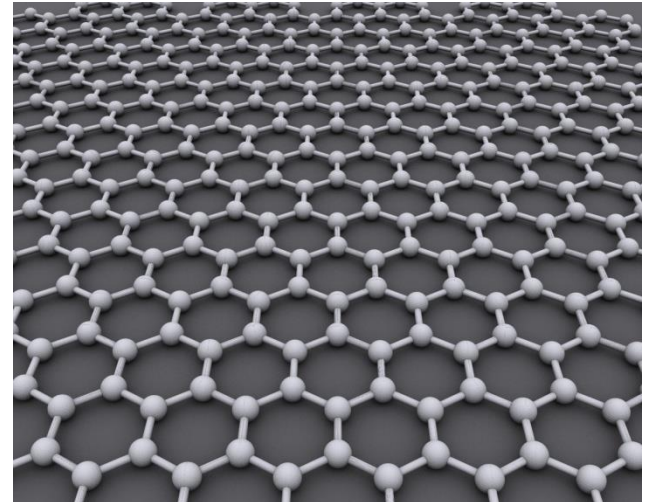


Пентафен ($C_{22}H_{14}$)



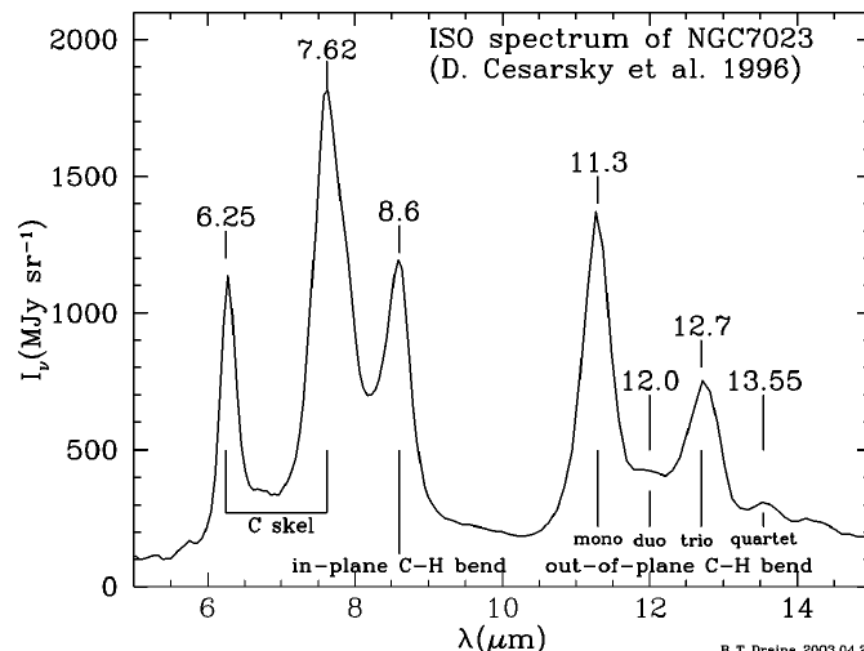
Пентацен ($C_{22}H_{14}$)

ПАУ на Земле

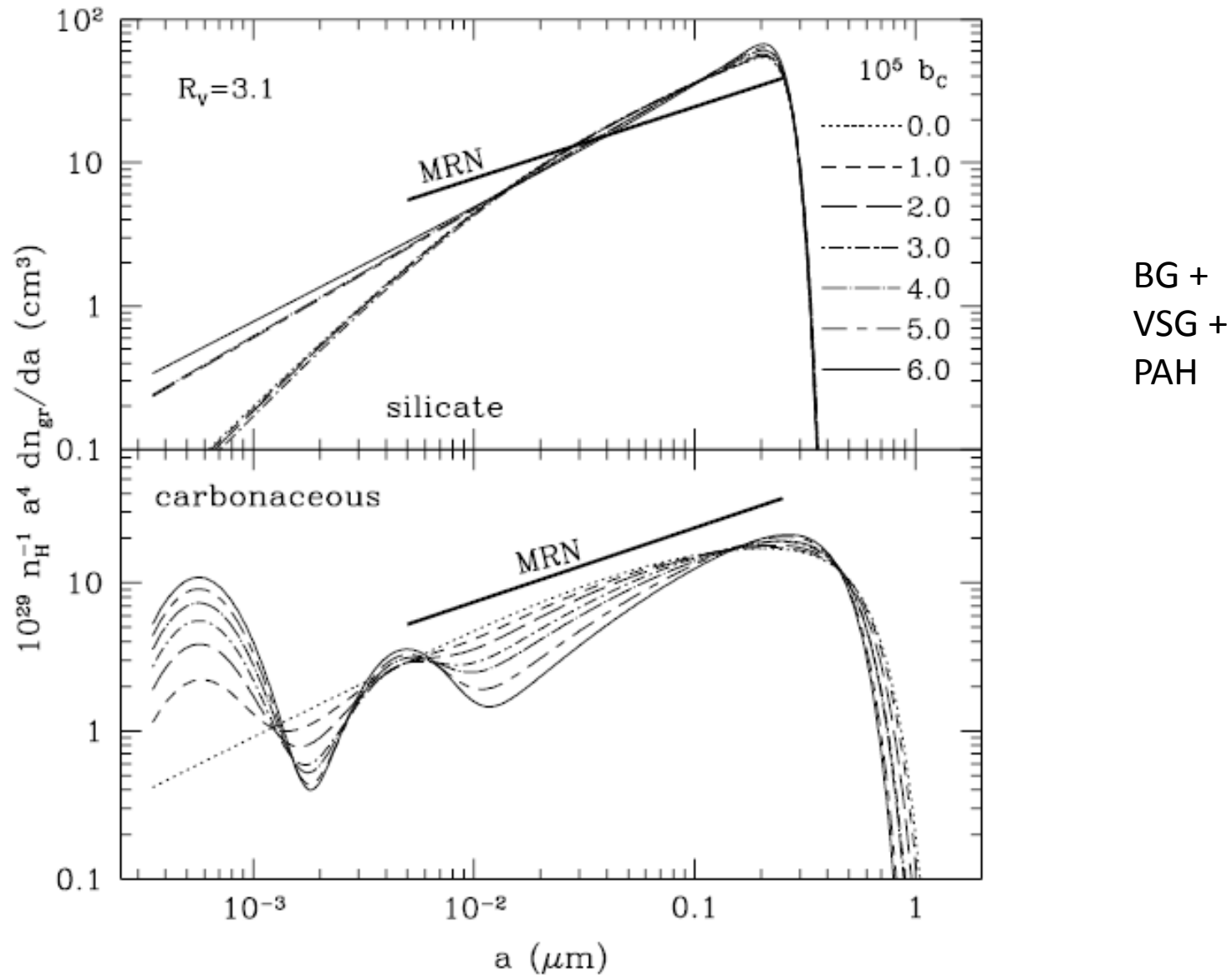


Основные UIR-полосы

Полоса	Описание
3.3 мкм	Растяжение ароматических связей C–H
5.2, 5.65 мкм	Изгиб C–H, растяжение C–C
6.2 мкм	Растяжение ароматических связей C–C
7.6, 7.8 мкм	Растяжение C–C, изгиб C–H в плоскости молекулы
8.6 мкм	Изгиб C–H в плоскости молекулы
11, 11.2, 13.6, 14.2 мкм	Изгиб C–H вне плоскости молекулы



Современная модель пыли



Weingartner & Draine (2001)

Образование пыли в проэволюционировавших звёздах

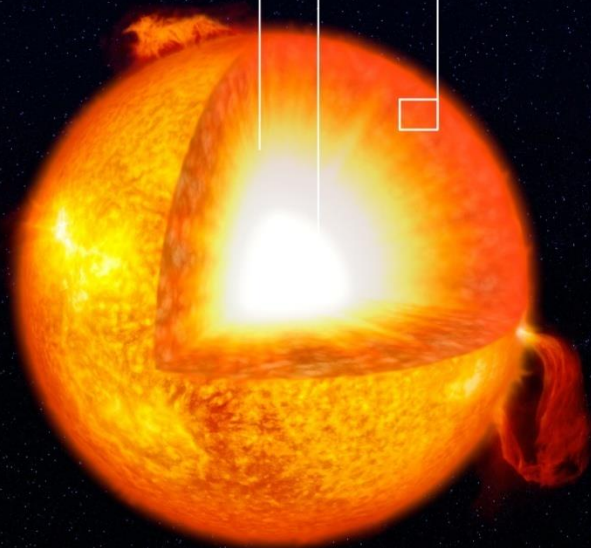
- Силикатная пыль (SiO , MgO , MgS ...)
- Графитовая пыль (C_2H_2 , C_2H , SiC ...)
- Полициклические ароматические углеводороды (C_2H_2)



Радиативная
зона

Ядро

Конвективная
зона

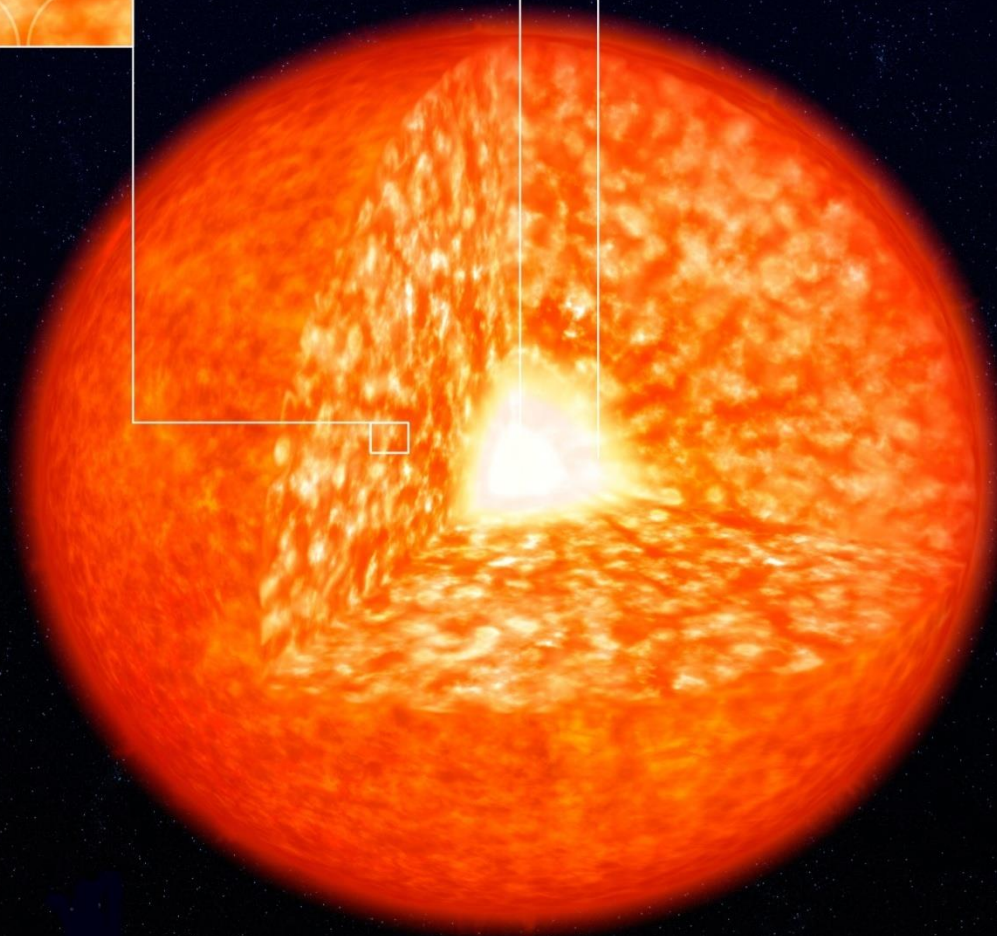


Солнце

Внутреннее строение
красного гиганта

Ядро

Слоевой
источник



Красный гигант



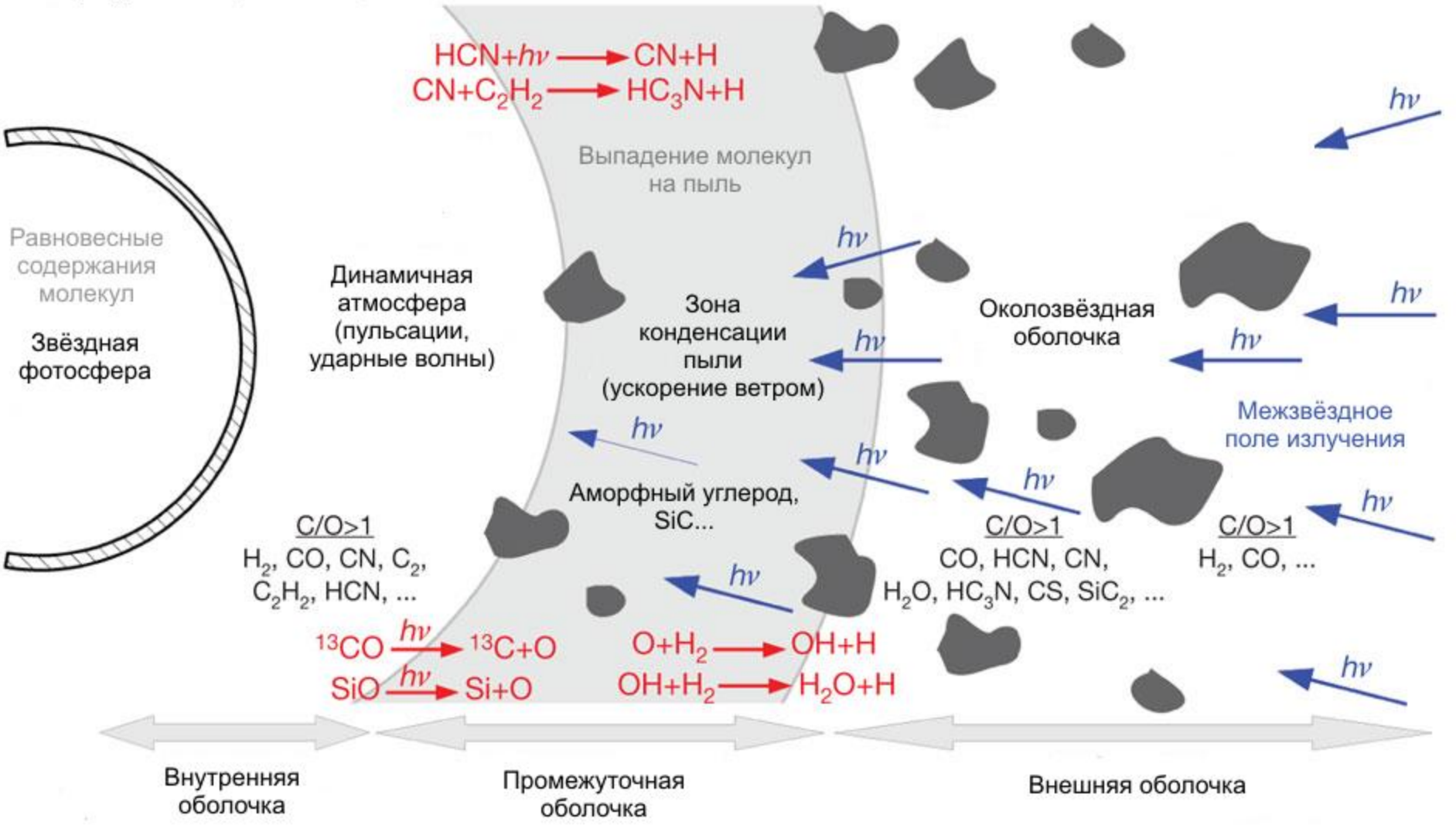
Масштаб — 200 радиусов Земли

Молекулы в оболочках старых звёзд

- **Кислородные звёзды** (M, S, OH/IR) — OH, H₂O, SiO, CO, CO₂, SO₂, HCl, HF, полосы ZrO, VO, LaO, YO, TiO
- **Углеродные звёзды** (N, R, CH) — аномально сильные полосы C₂, CH, CN...

Ключевой параметр — C/O

Расстояние: 5×10^{13} см $\leftarrow$ $\sim 2.5 \times 10^{14}$ см $\leftarrow$ $\sim 5 \times 10^{15}$ см $\leftarrow$ $\sim 1 \times 10^{17}$ см
 $1 R_*$ $R_{\text{inner}} \sim 5 R_*$ $\sim 100 R_*$ $\sim 20,000 R_*$
 Температура: $\sim 2,000$ K $\sim 1,000$ K ~ 100 K ~ 10 K



Образование пыли в кислородных звёздах

1500 К

Оксид алюминия,
 Al_2O_3

Оксид кремния, SiO



Шпинель, MgAl_2O_4 ,
геленит, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$

Форстерит, Mg_2SiO_4 ,
энстатит, $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$



1000 К

Диопсид,
 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

Оливин, $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$,
пироксен,
 $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$

Образование пыли в углеродных звёздах

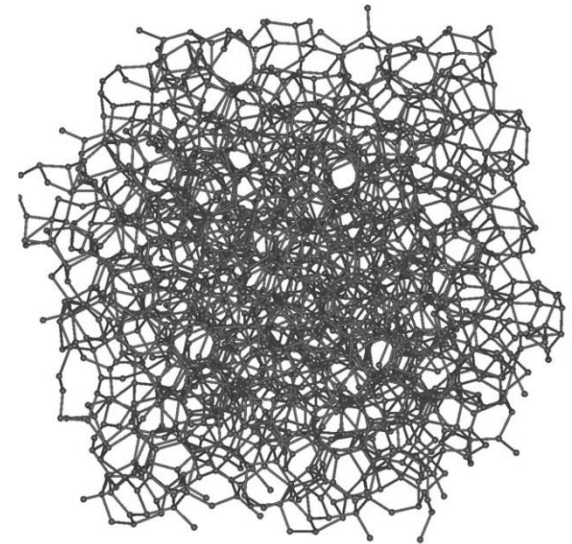
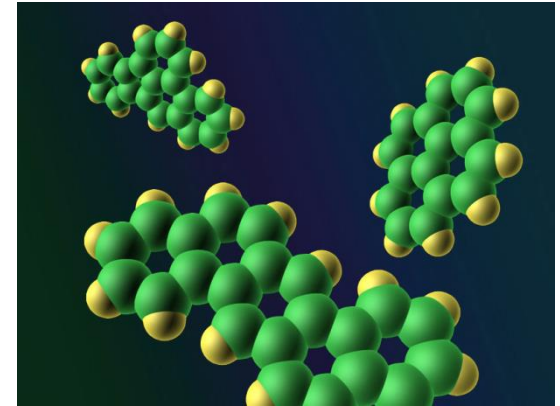
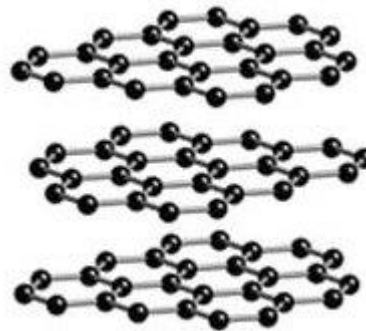
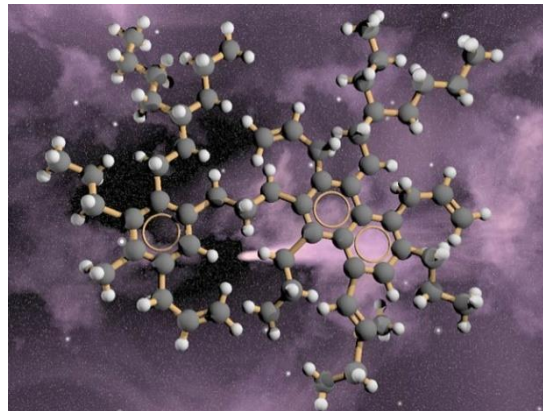
Ацетилен, C_2H_2 ,
карбид
кремния, SiC



Бензол, C_6H_6



ПАУ, кластеры
ПАУ, графит,
алмазы, «НАС»



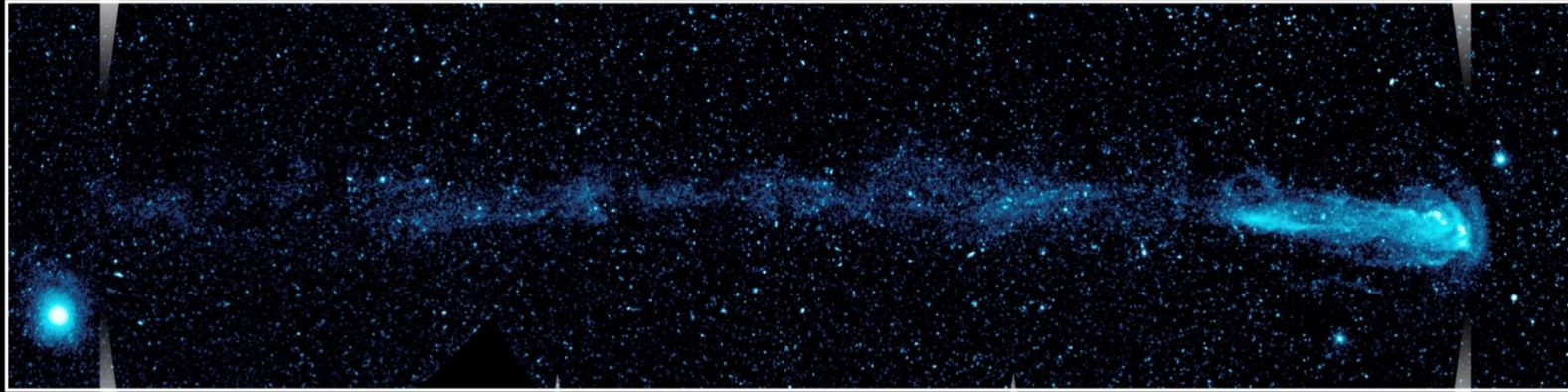
GALEX Galaxy Evolution Explorer

Хвостатая звезда

Distance between our Sun and
its nearest neighbor star

4 Light-Years

LENGTH OF TAIL
13 Light-Years



AGE OF TAIL

30,000 Years

20,000 Years

10,000 Years

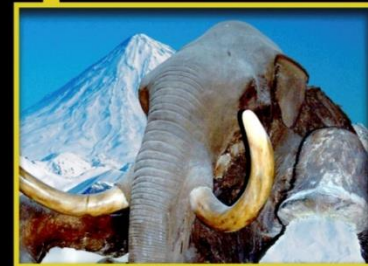
TODAY



26,000 years ago
Neanderthals die out



15,000 years ago
Earliest known human
artifacts in North America

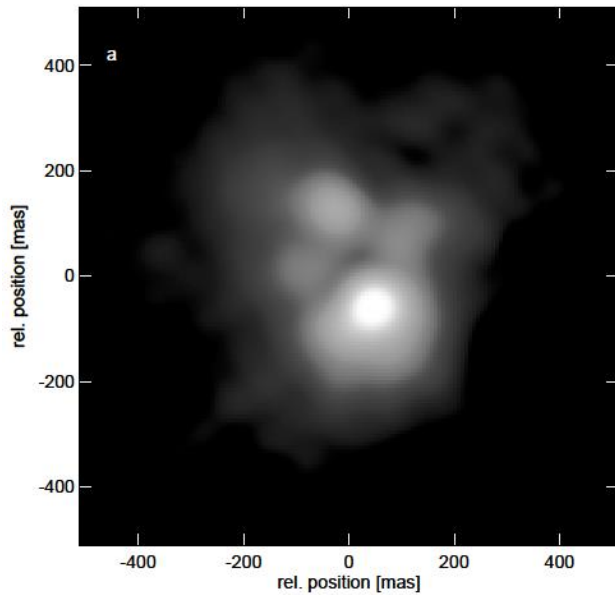


9,000 years ago
Ice age ends; first agriculture

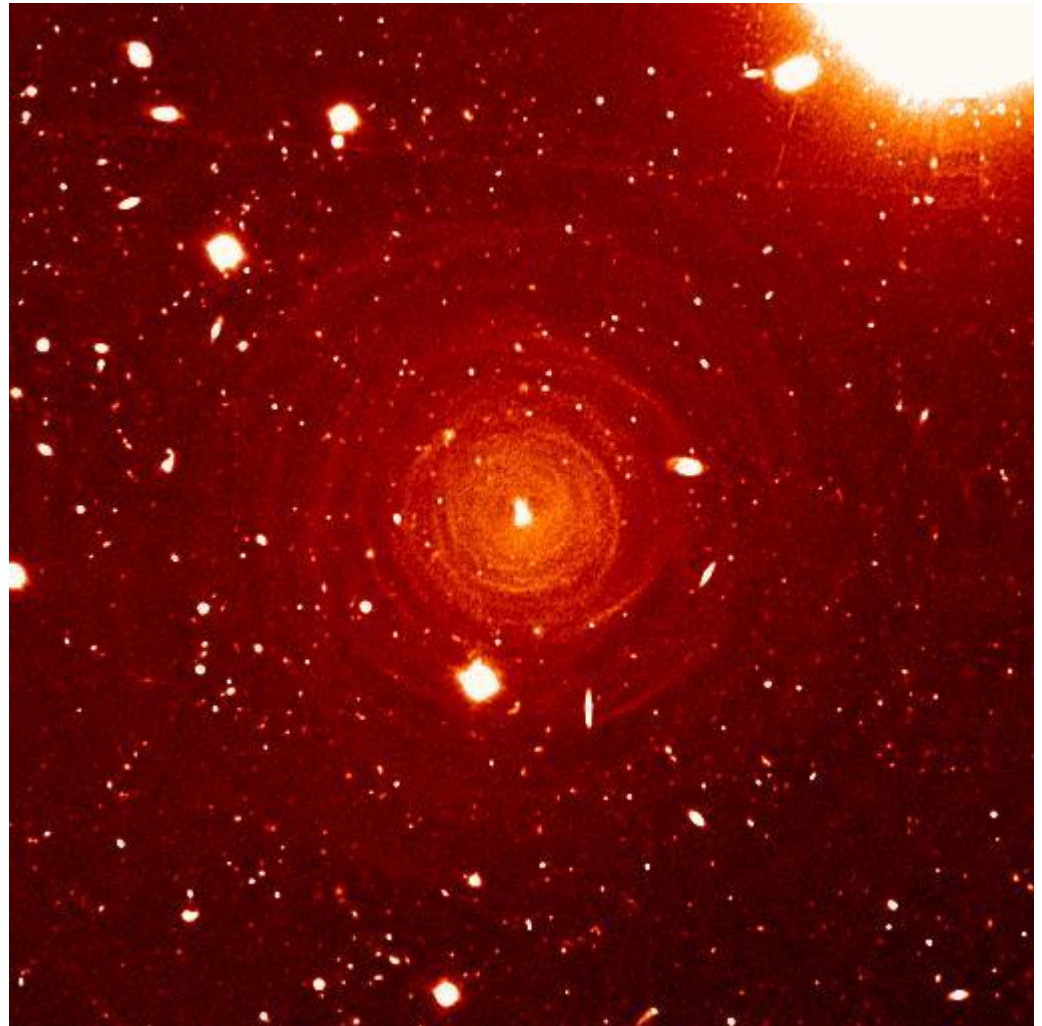
Putting Mira's Tail Into Context

GALEX • FUV

IRC+10216 aka CW Leo



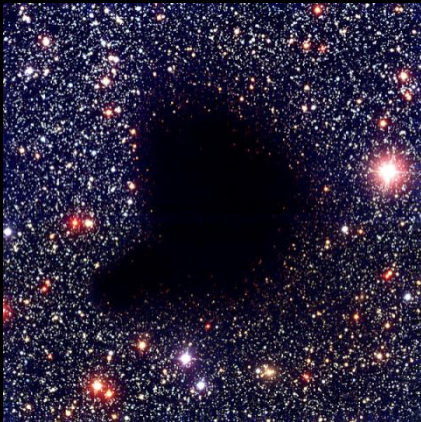
C_nH , C_nH_2 , C_nN , HC_nN ,
 CH_2CHCN , CH_2CN , H_2CS ,
 CH_3CCH , C_3O

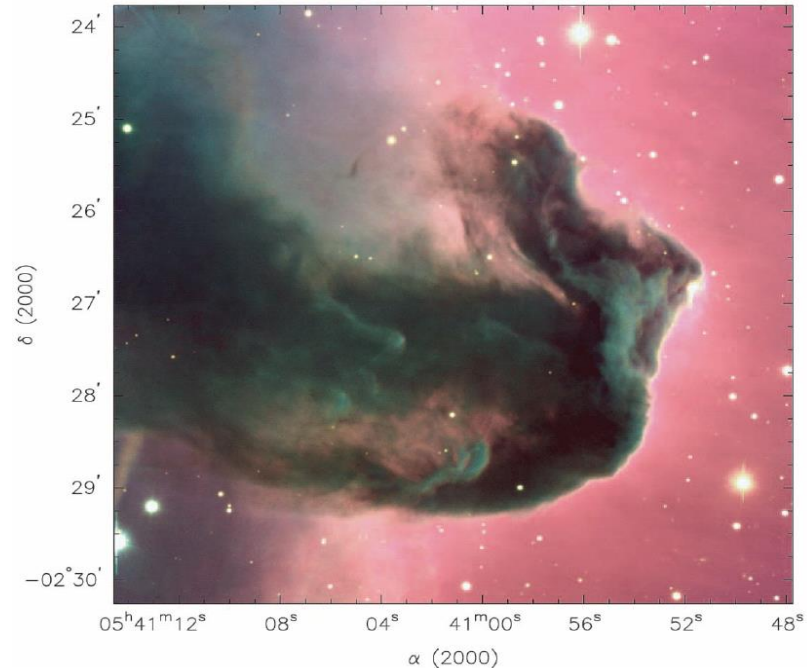


Пылевые облака

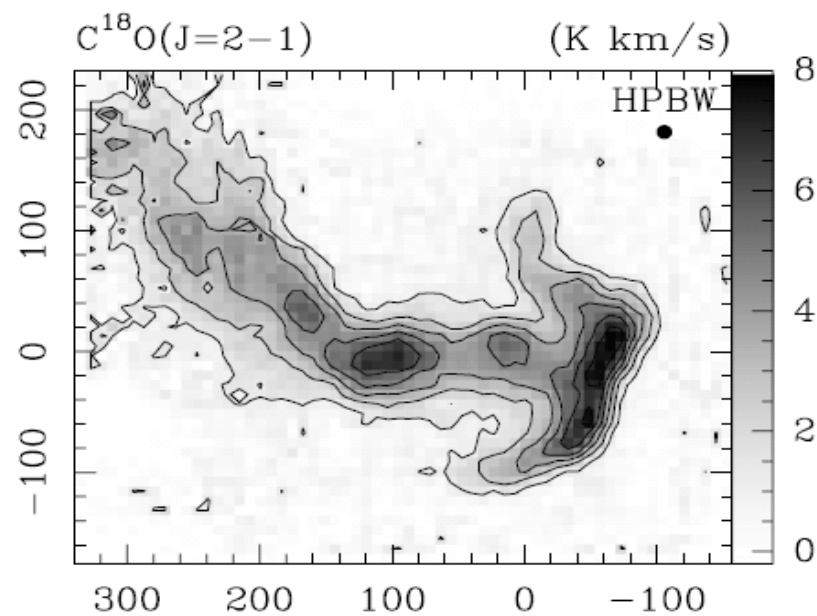


Тёмные туманности и глобулы

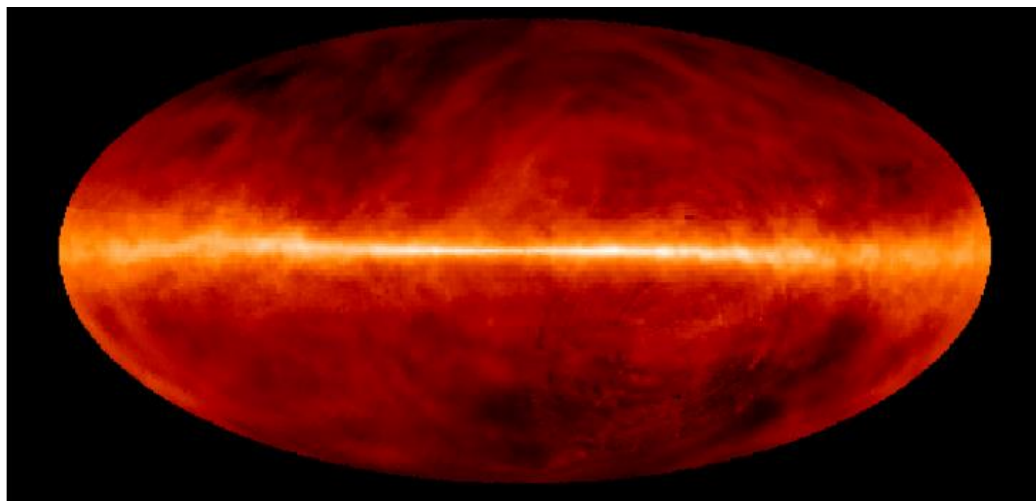




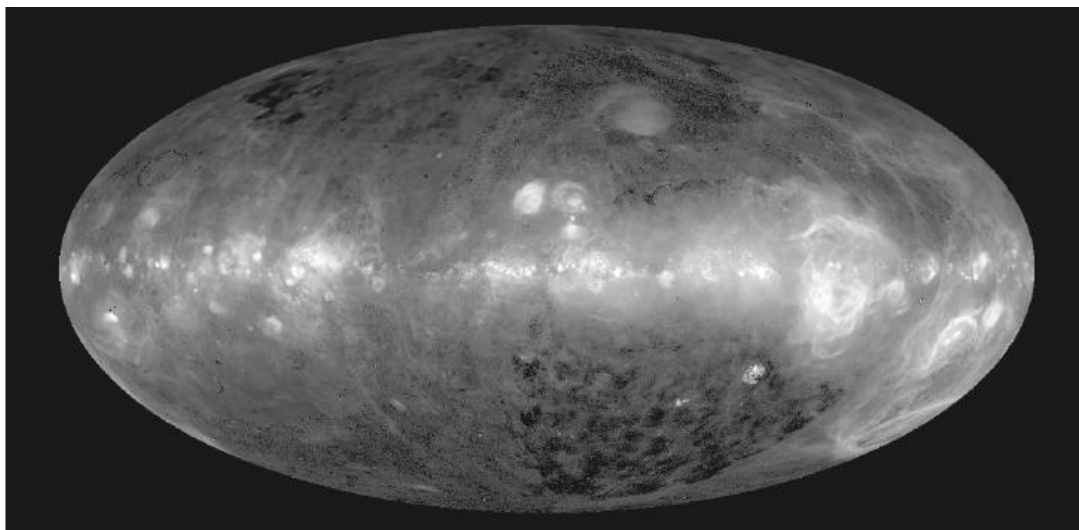
Повторяет ли пыль судьбу газа?



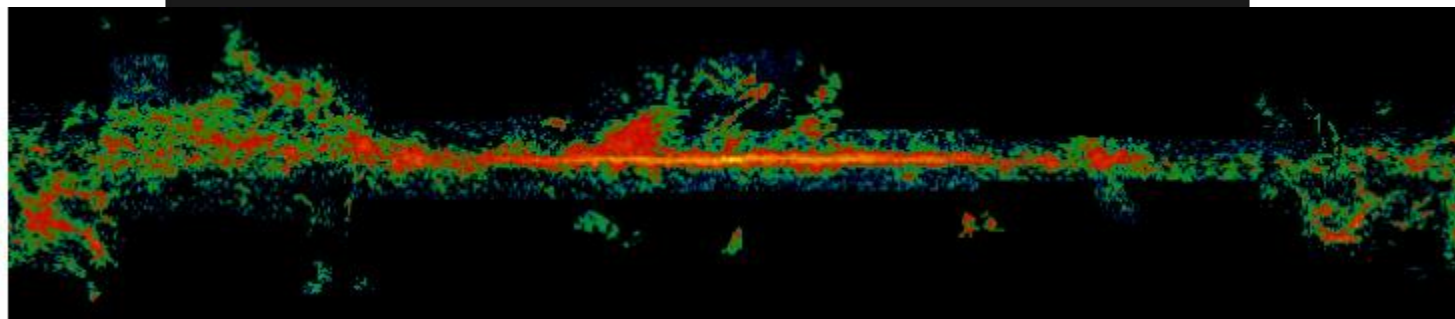
HI

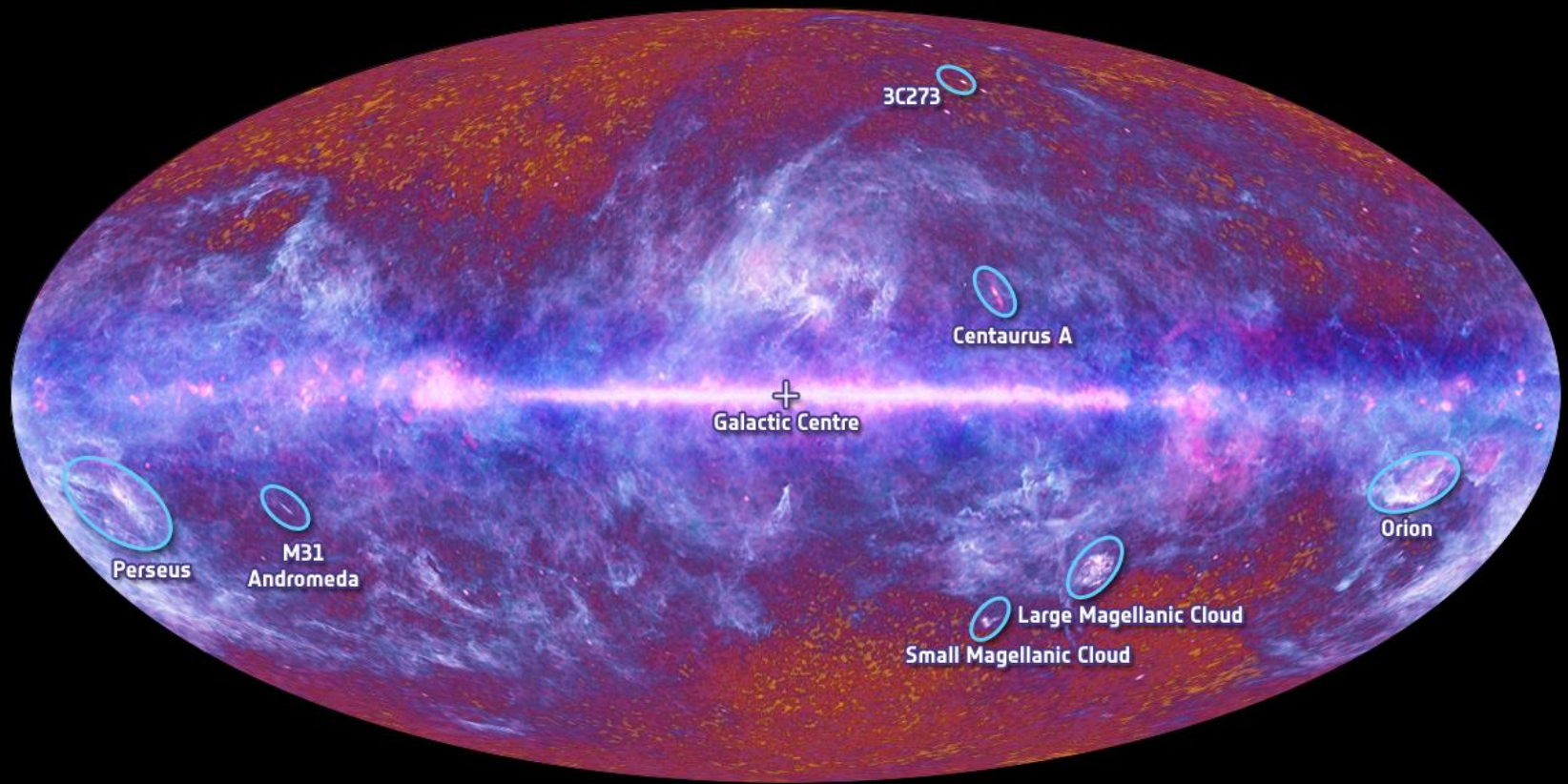


H α



CO



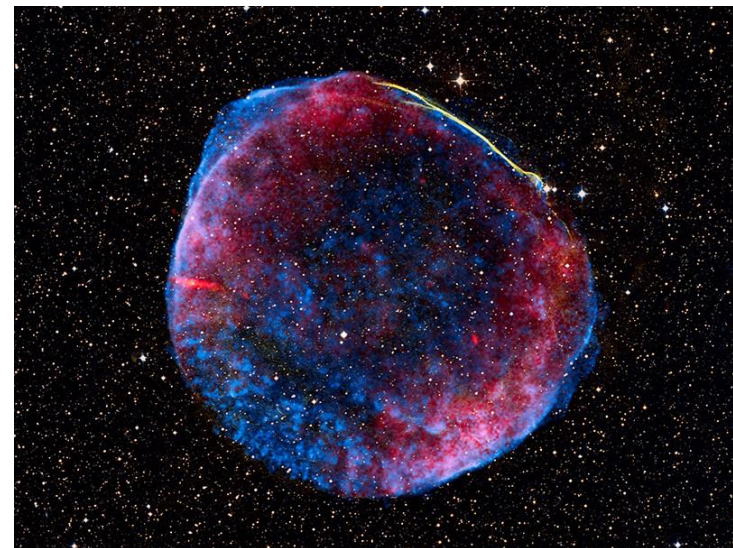
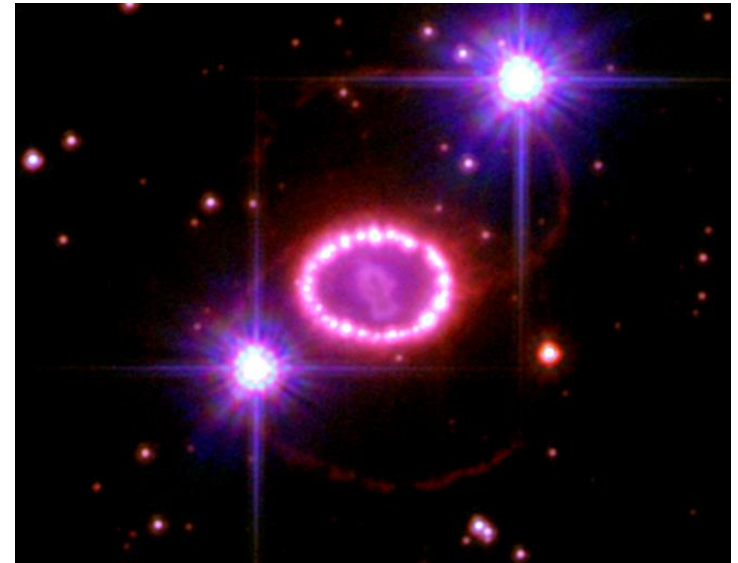
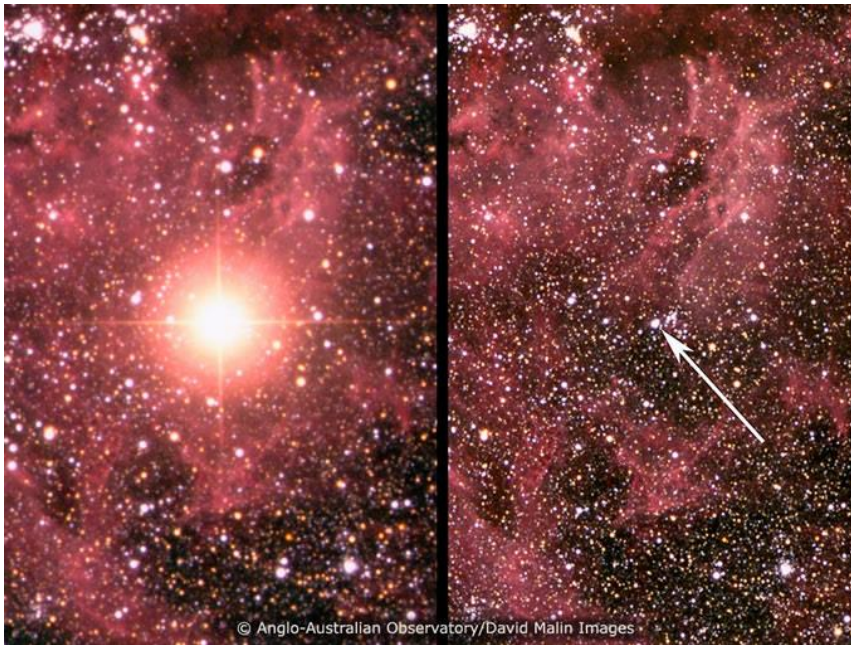


The Planck one-year all-sky survey

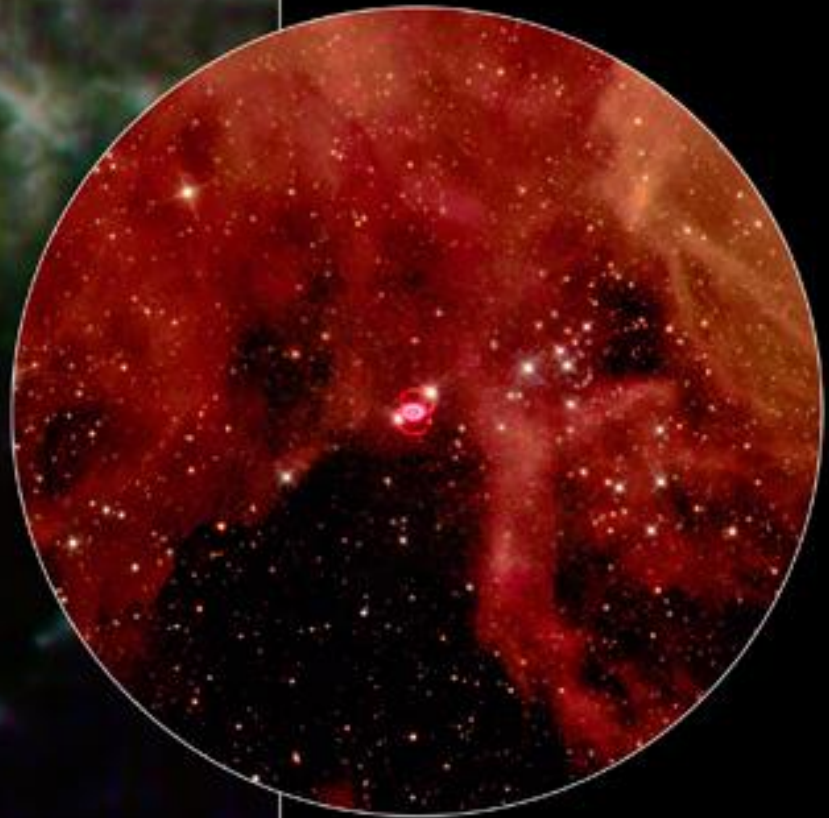
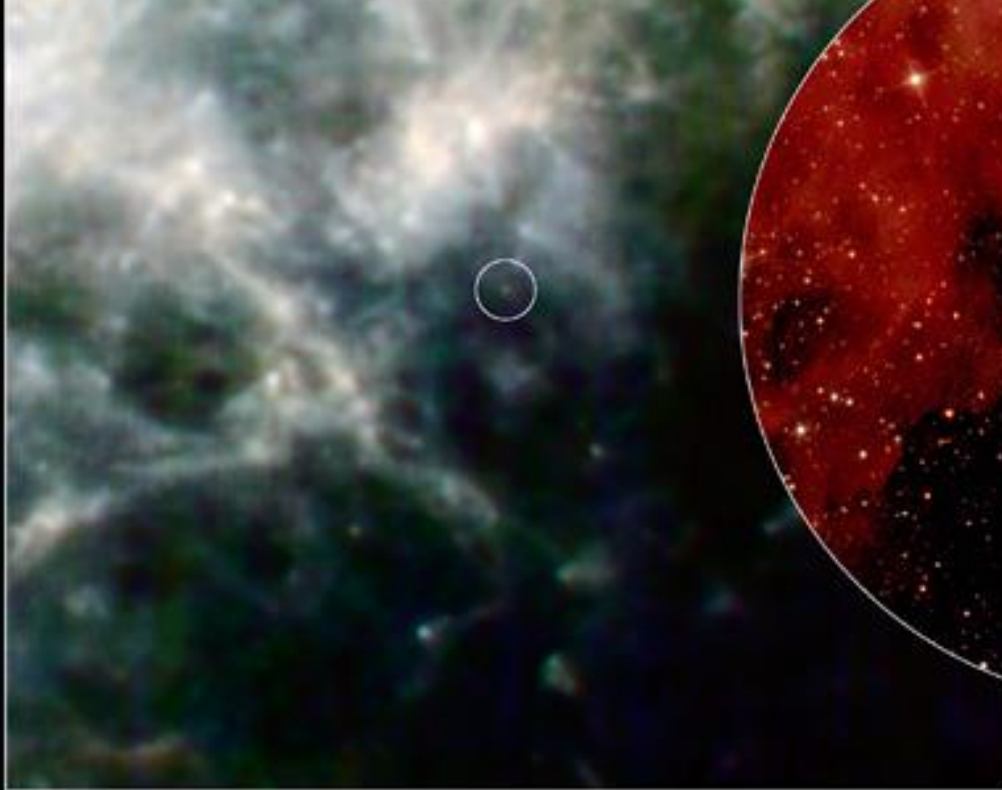


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

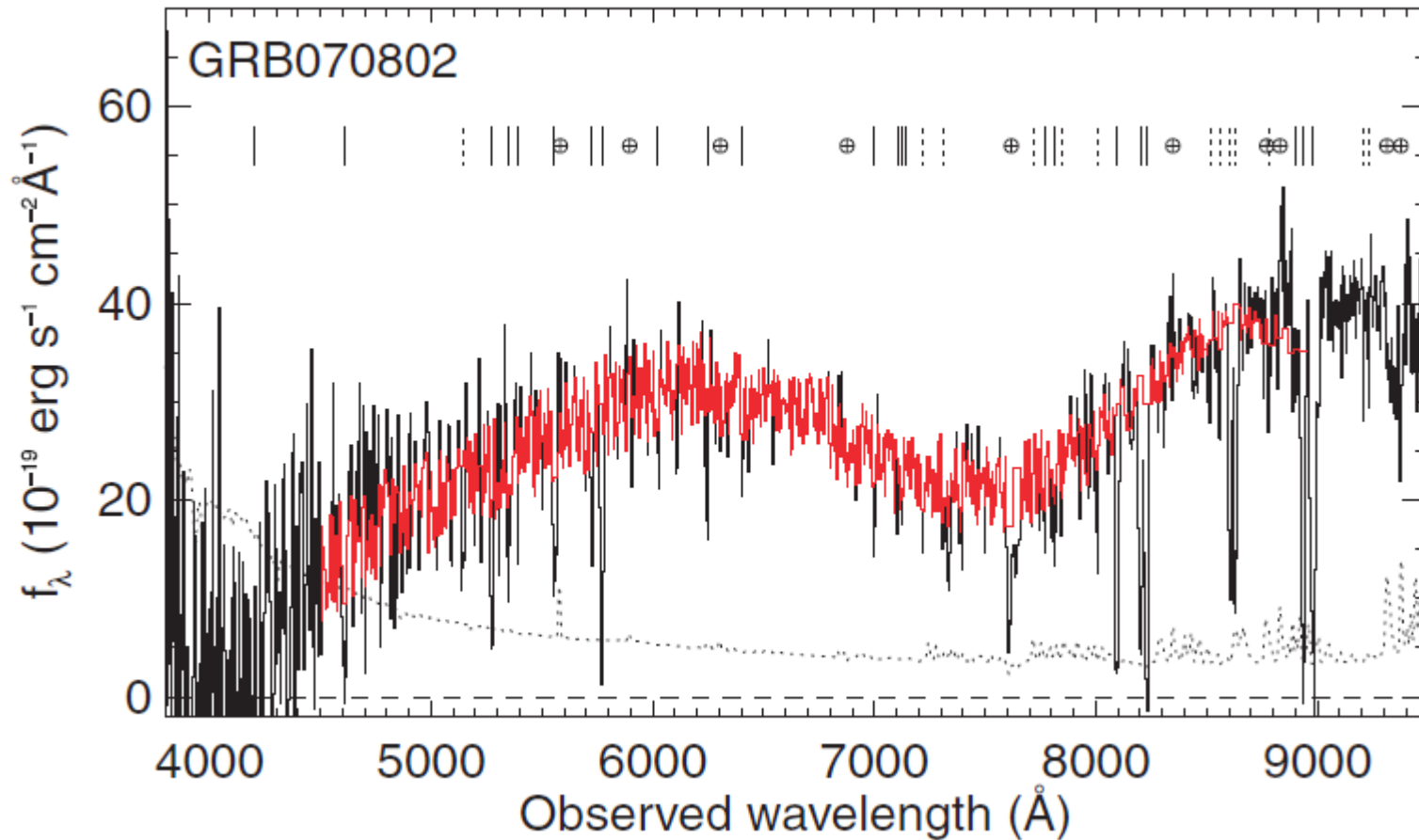
Разрушение пыли



Сверхновая 1987А

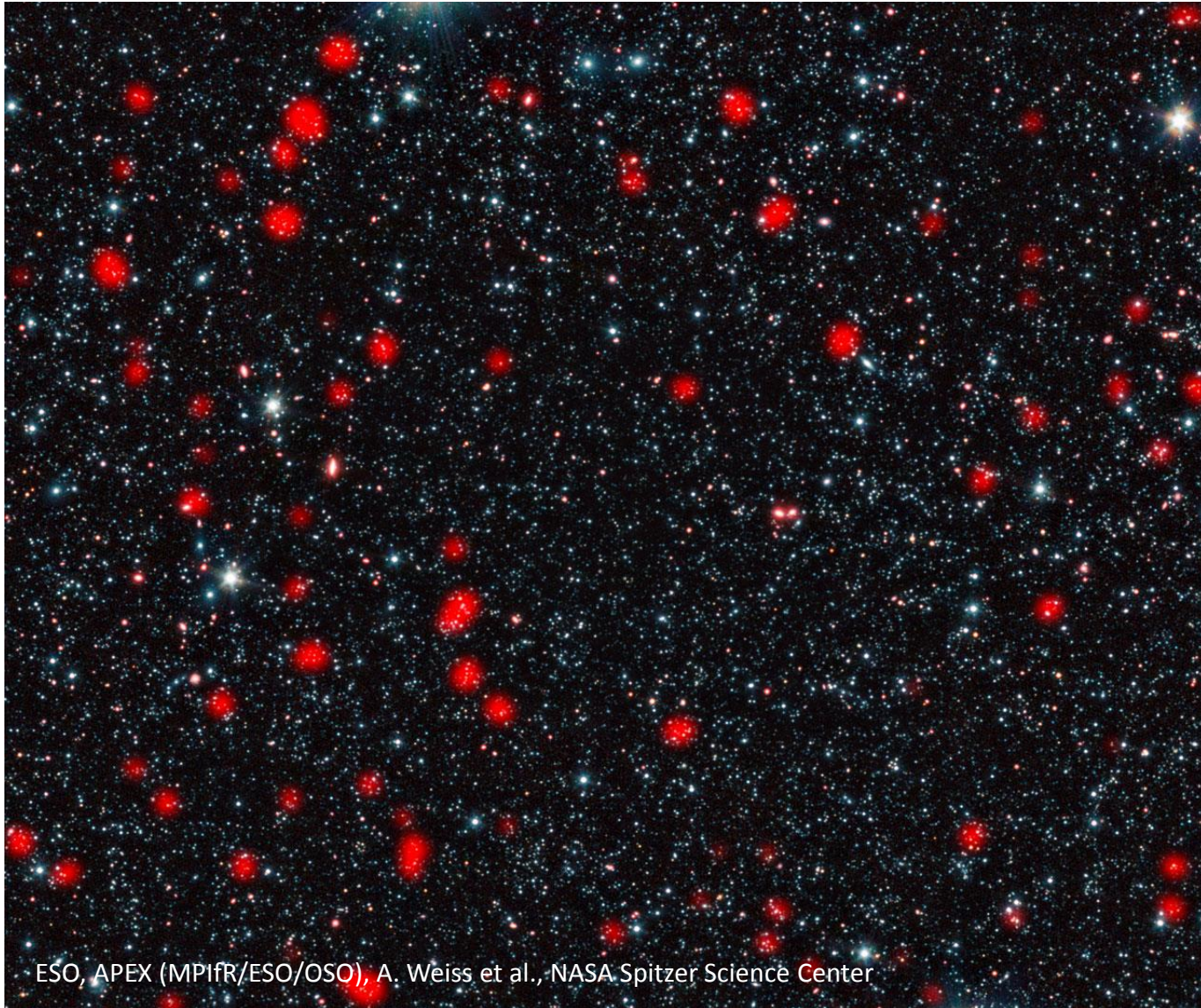


Пыль на больших красных смещениях



Elíasdóttir et al. (2009)

Субмиллиметровые галактики



ESO, APEX (MPIfR/ESO/OSO), A. Weiss et al., NASA Spitzer Science Center

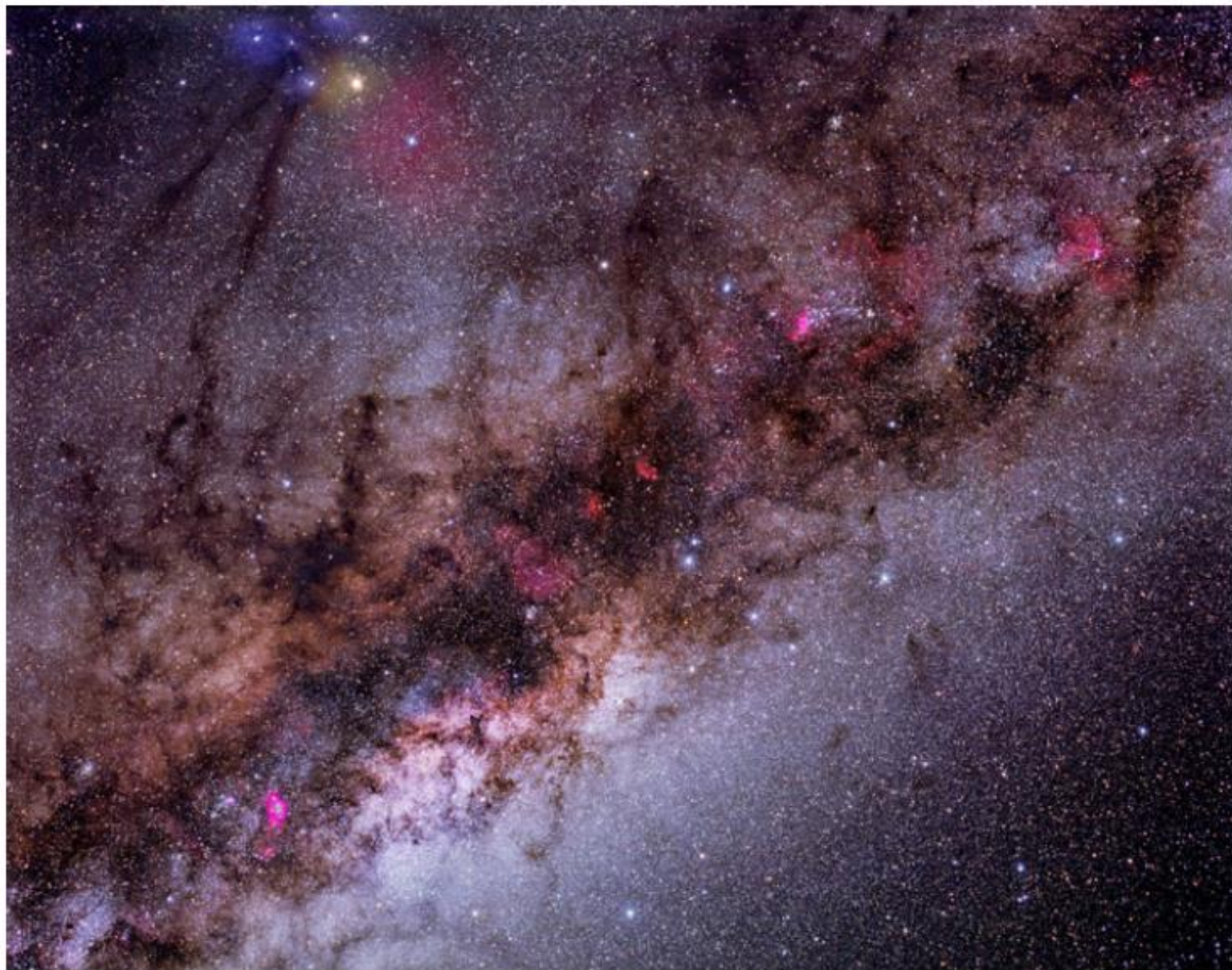
Пыль как помеха



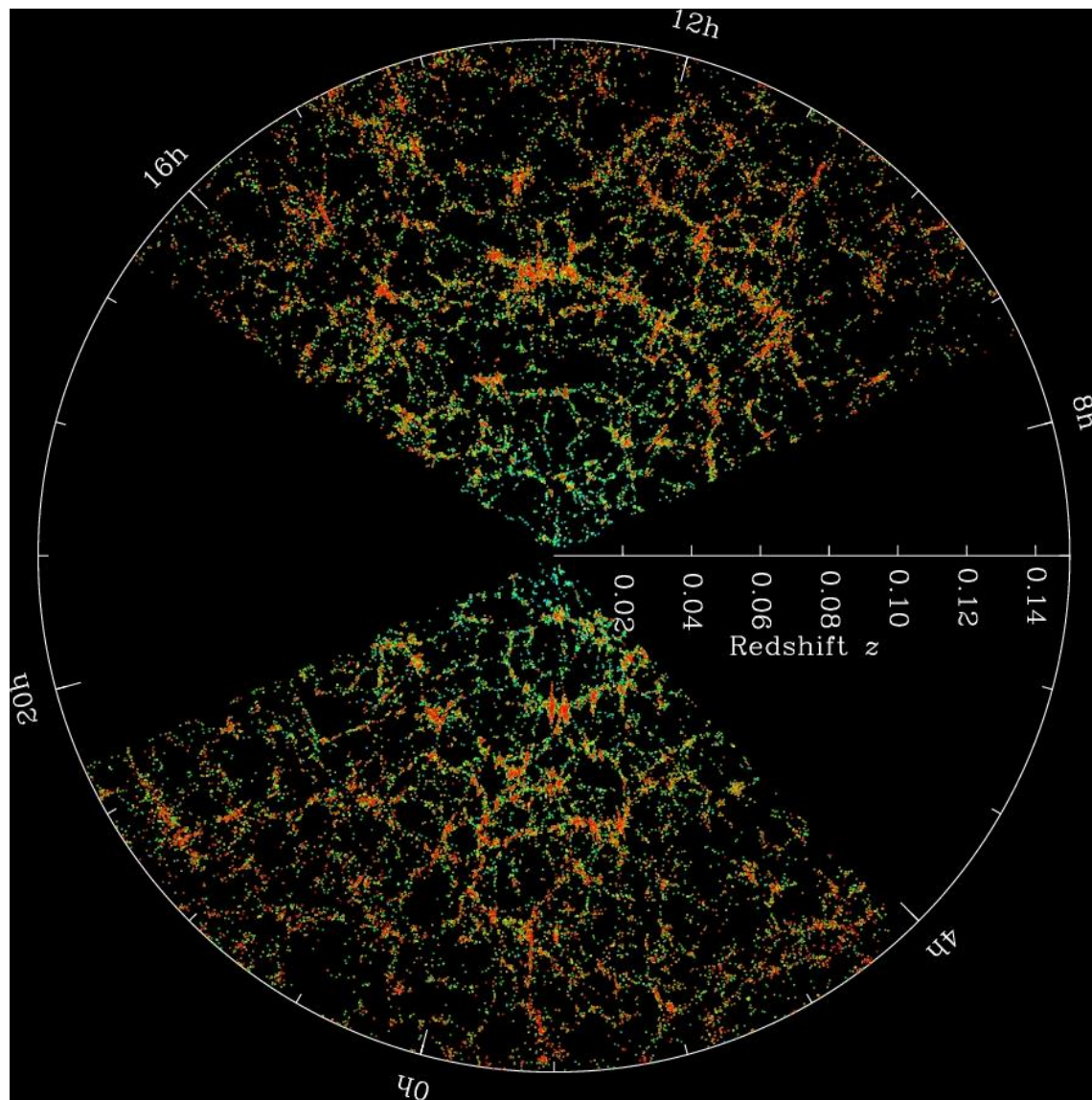
Это работа для дворников, а не для астрофизиков!

С. Лем

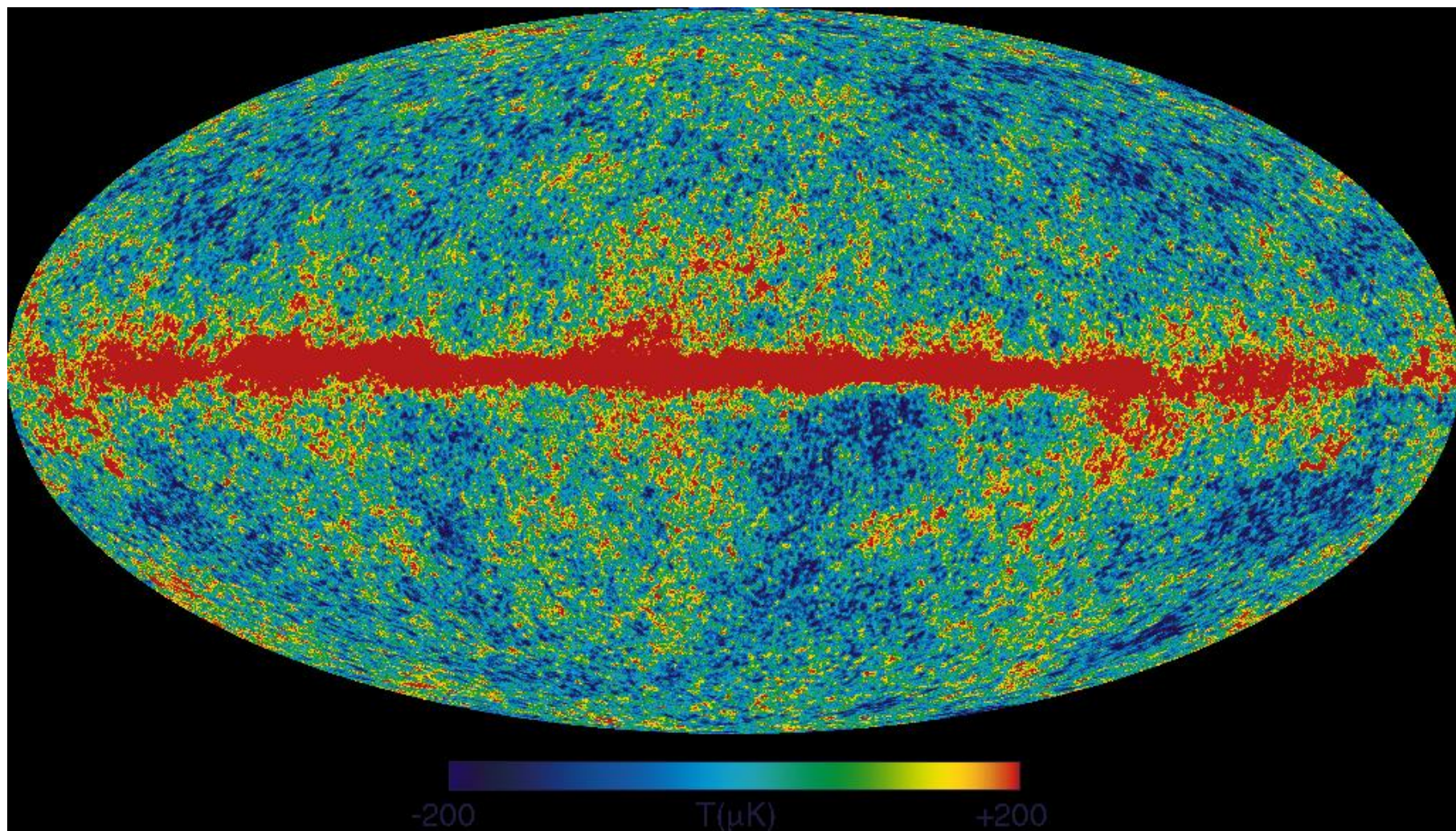
Пыль как помеха



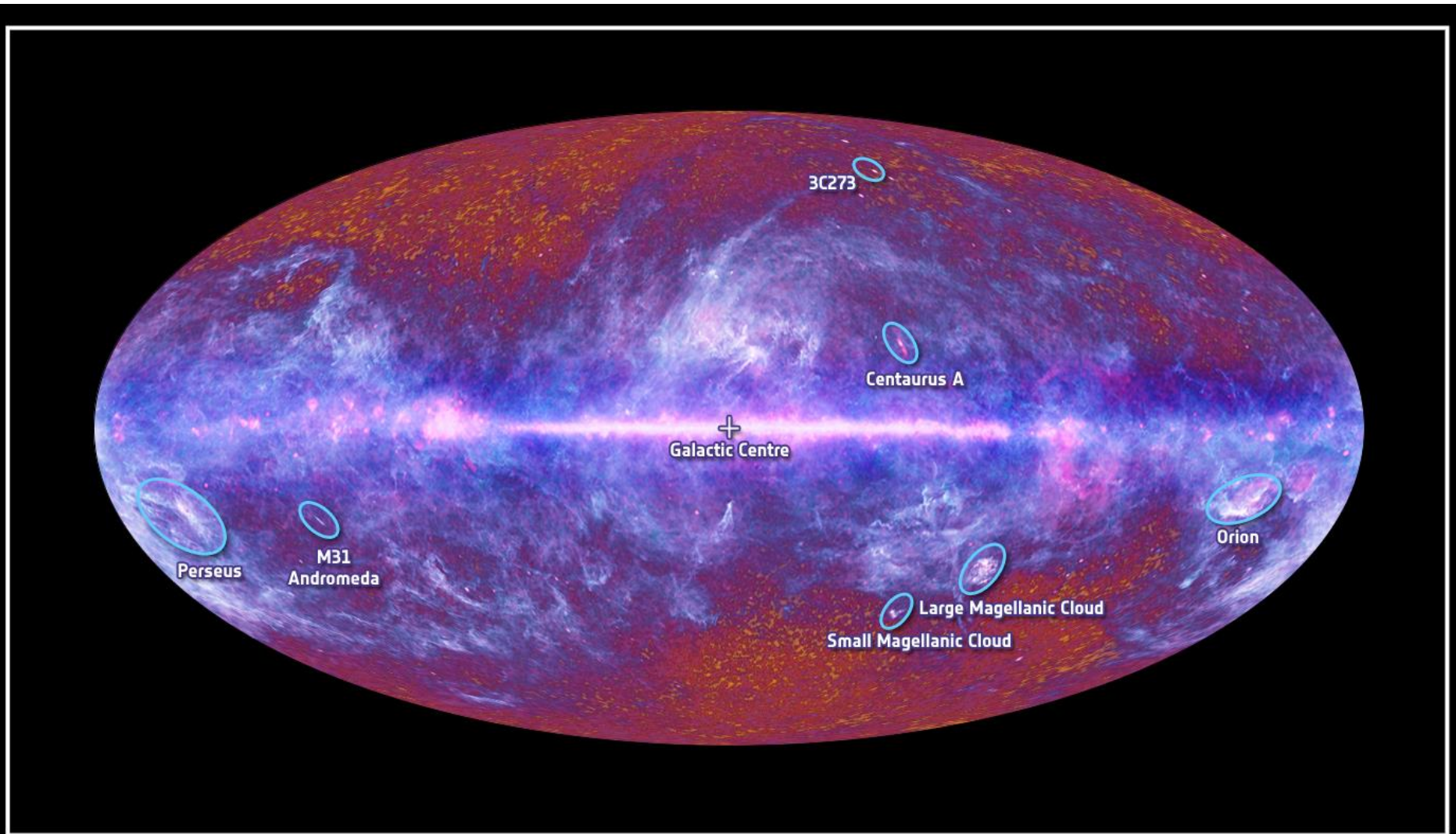
Пыль как помеха



Пыль как помеха



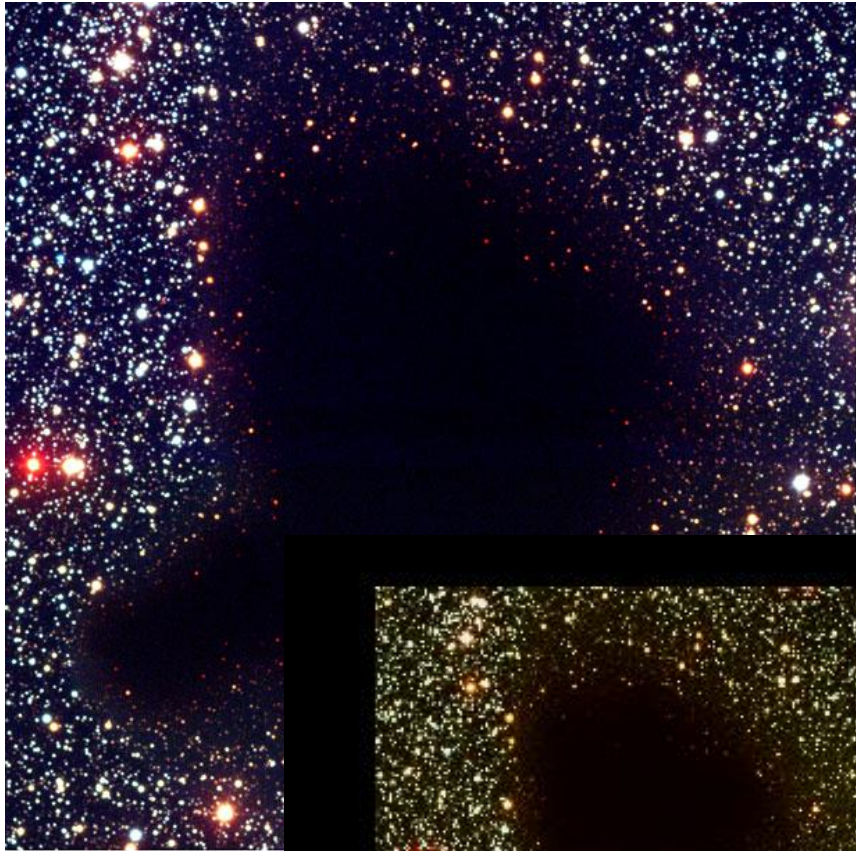
Пыль как помеха



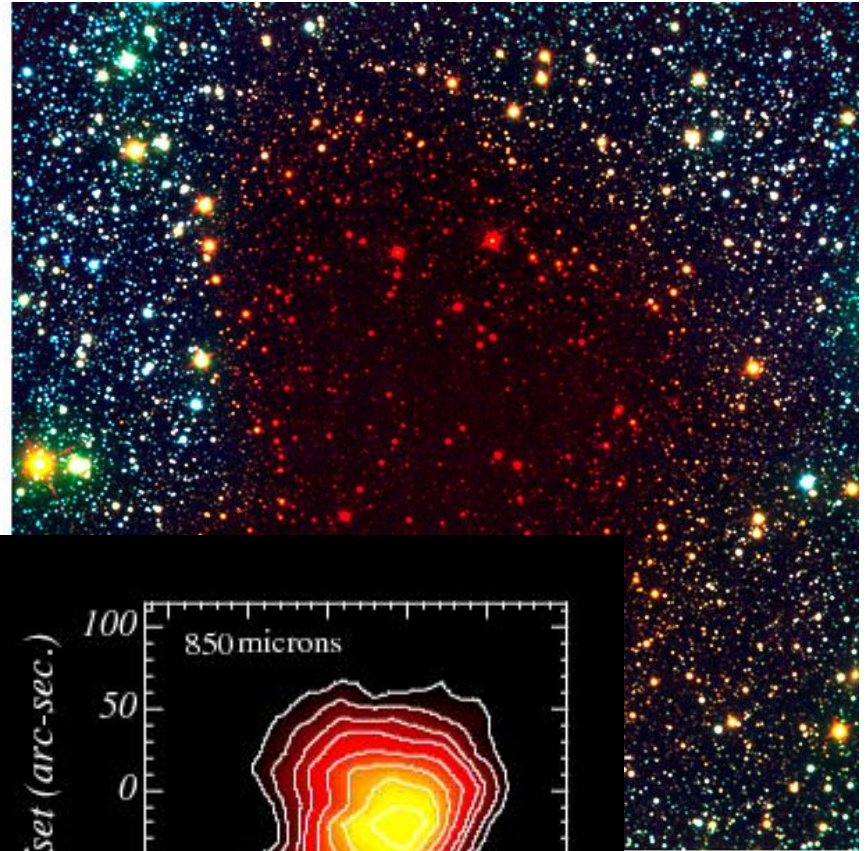
Пыль как необходимость

- Пыль — источник информации как о веществе, так и о физических условиях в межзвёздной среде
- Пыль — защита и катализатор химических процессов
- Пыль — охладитель
- Пыль — переносчик органики
- Пыль — исходный материал для формирования планет

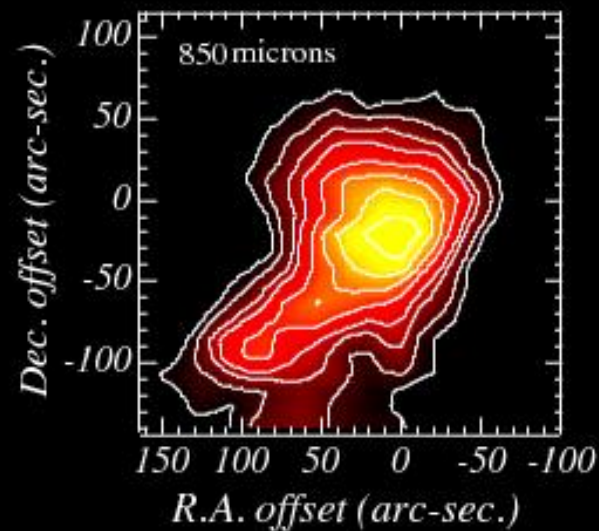
Пыль как источник информации



B, V, I

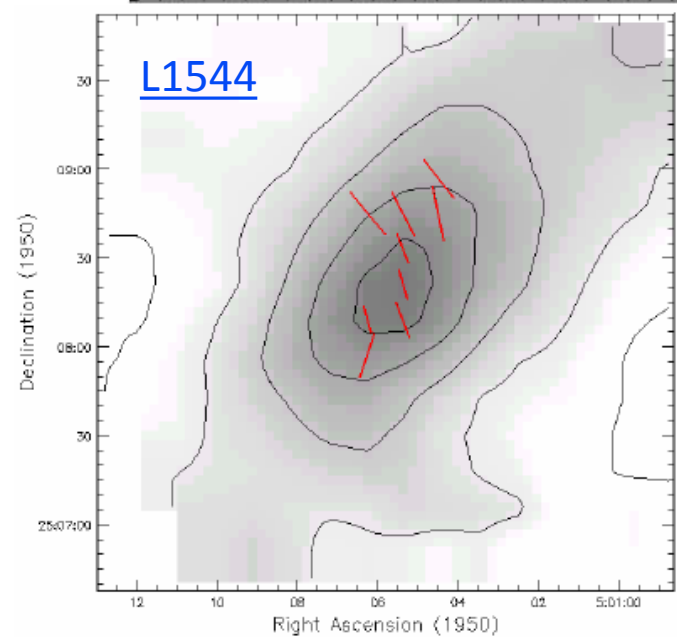
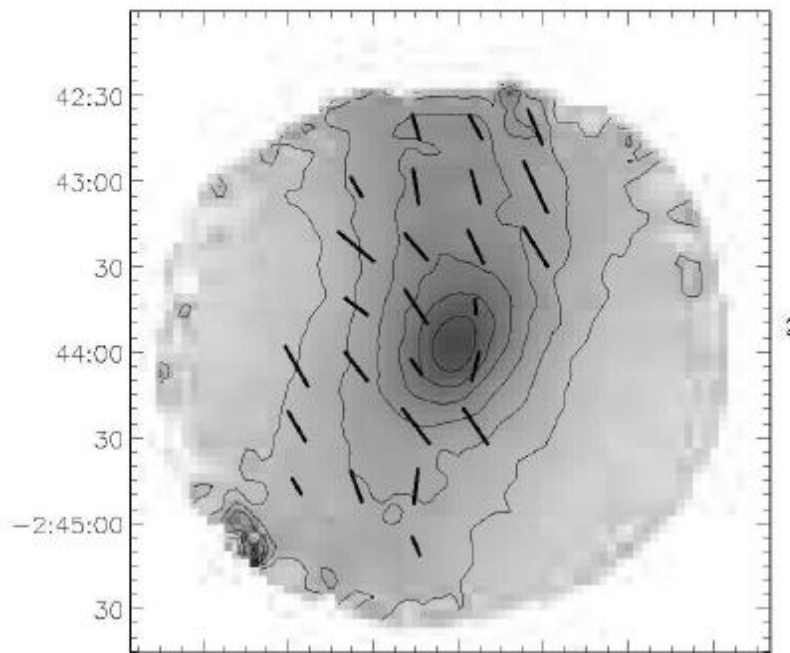


B, I, K



L183

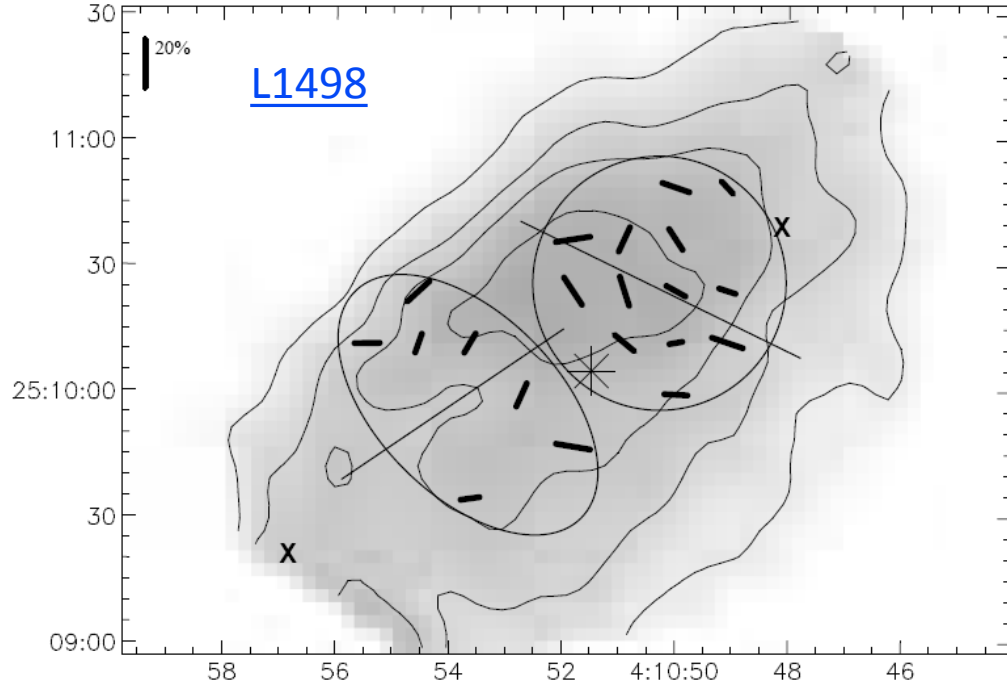
Crutcher et al. (2004)



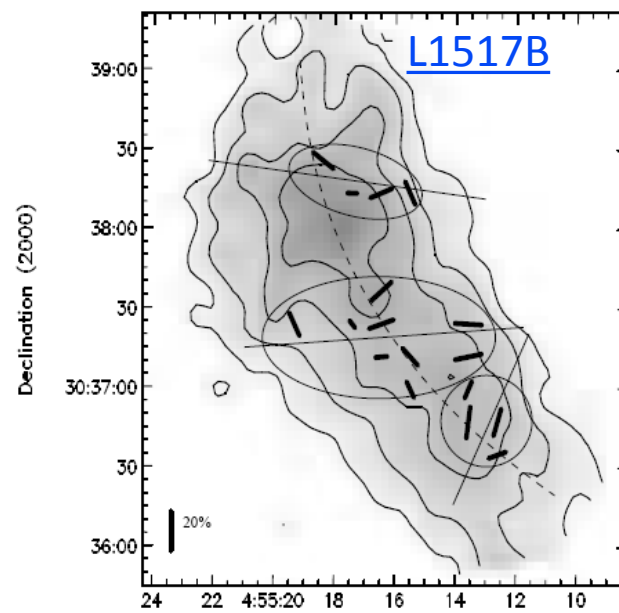
Ward-Thompson et al. (2000)

L1498

Declination (2000)



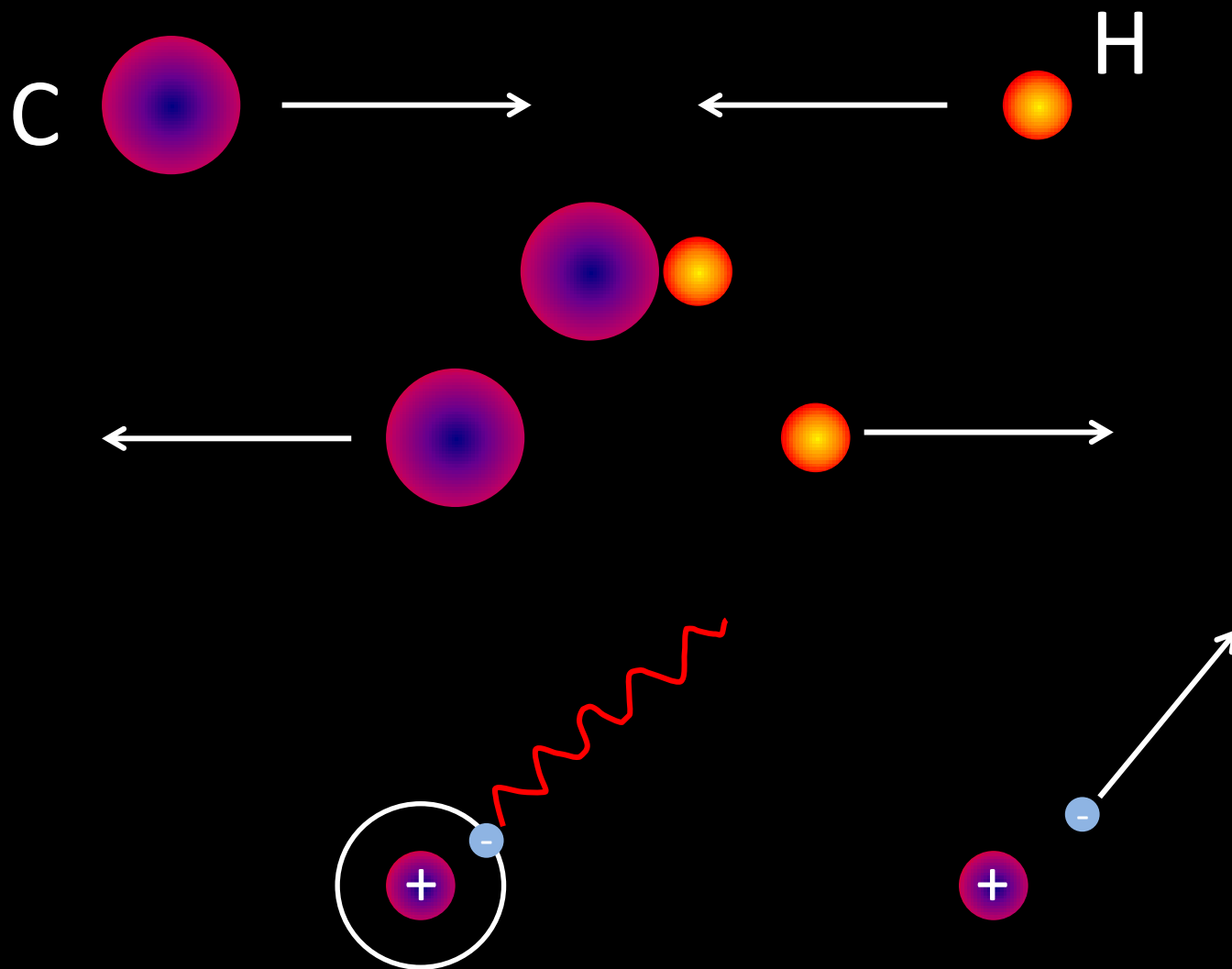
Right ascension (2000)



Right ascension (2000)

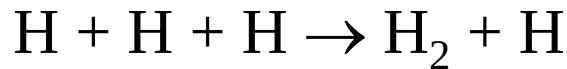
Kirk et al. (2006)

Как образуются молекулы в МЗС?

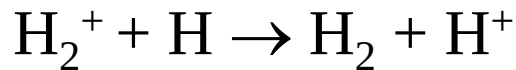
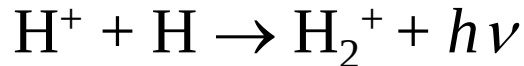


Молекулярный водород почти не образуется в газовой фазе!

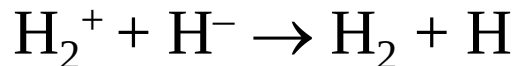
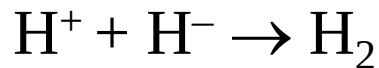
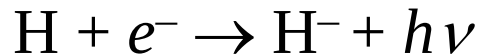
Трехчастичные столкновения:



Очень-очень медленная пара реакций:

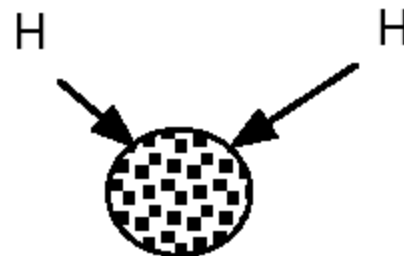


Очень медленная пара реакций:

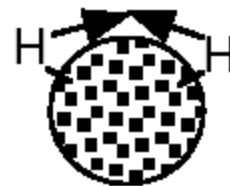


Пыль как катализатор химических процессов

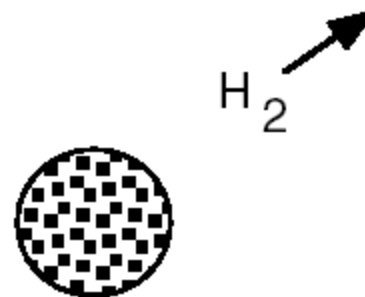
1. Атомы водорода прилипают к пылинке.



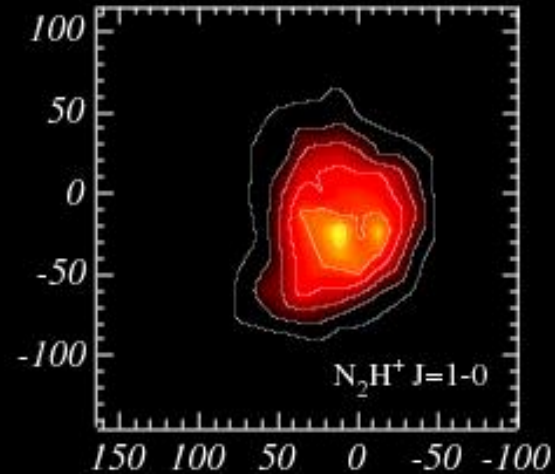
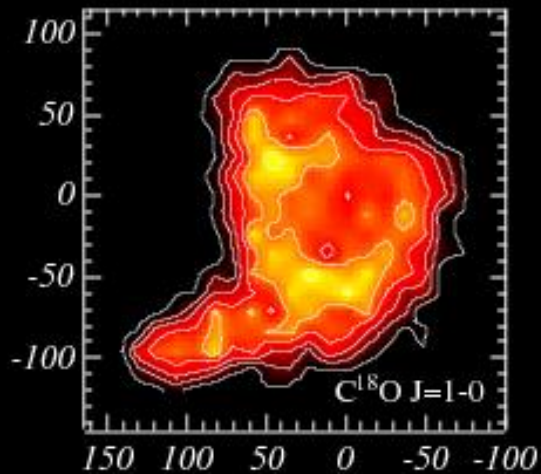
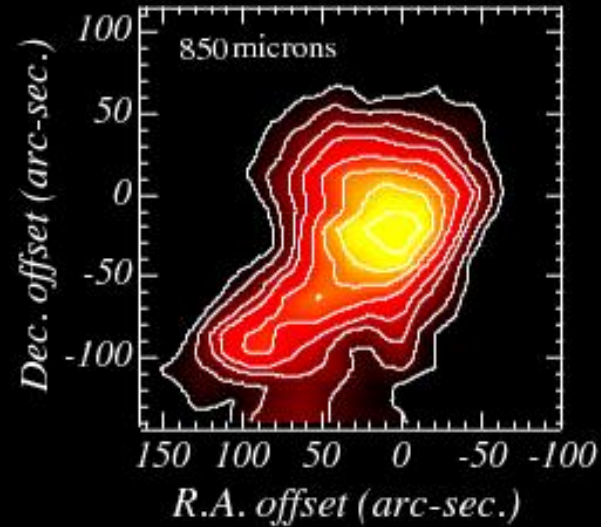
2. Перемещаясь по поверхности пылинки, атомы сталкиваются друг с другом и образуют молекулу H_2 .



3. Энергия, выделившаяся при образовании молекулы H_2 , отрывает ее от пылинки.



Вымораживание молекул



Поверхностные реакции

Конечные продукты:

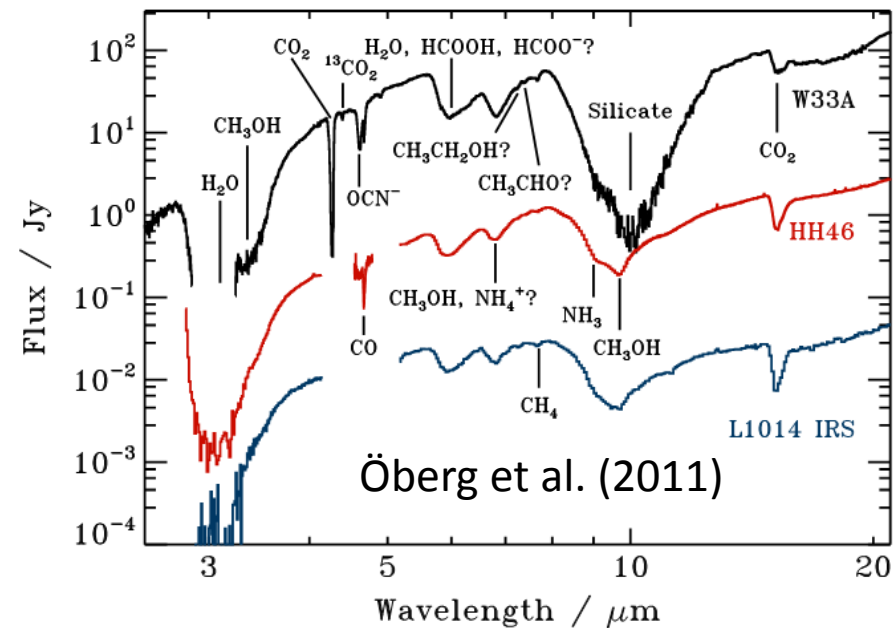
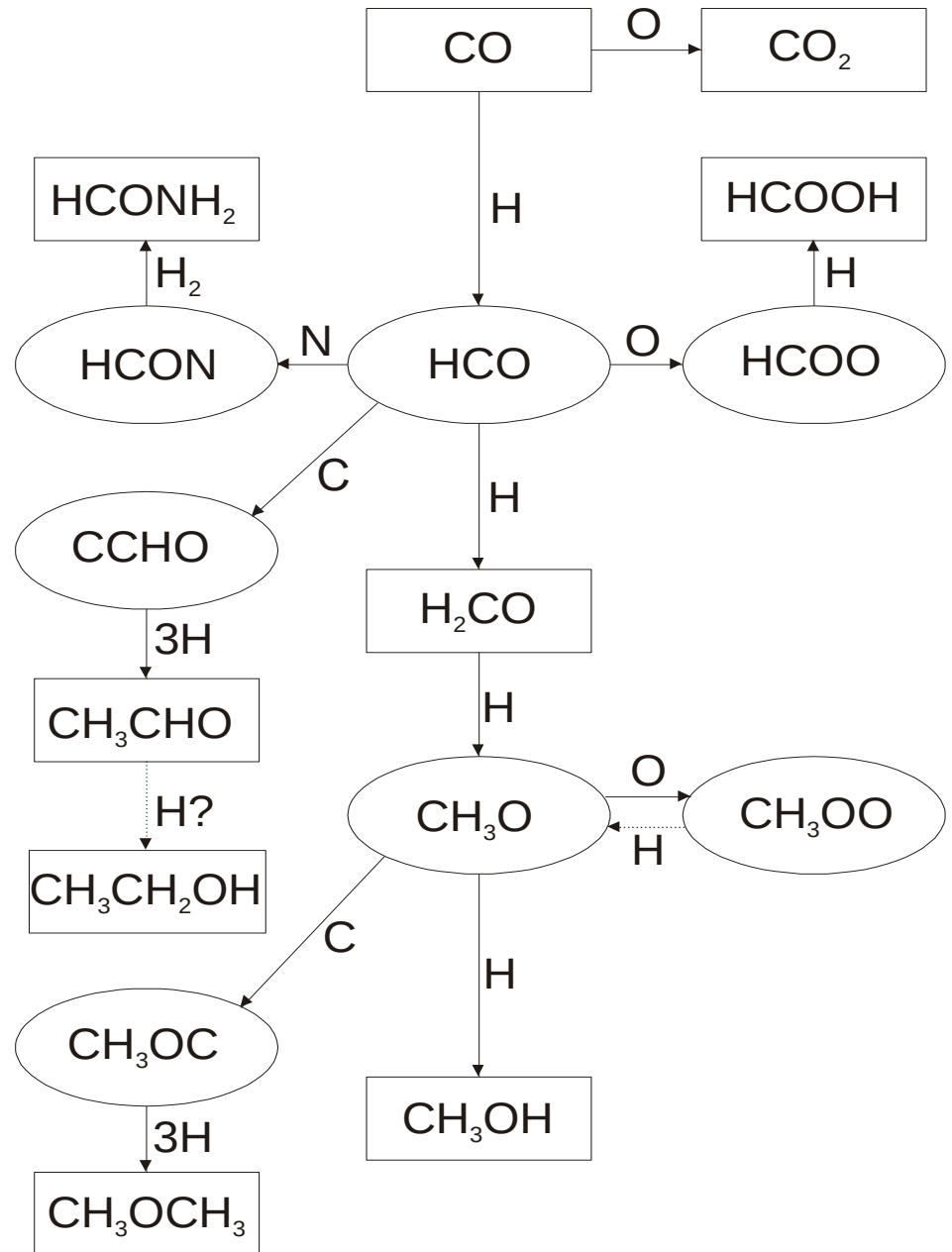
Формальдегид

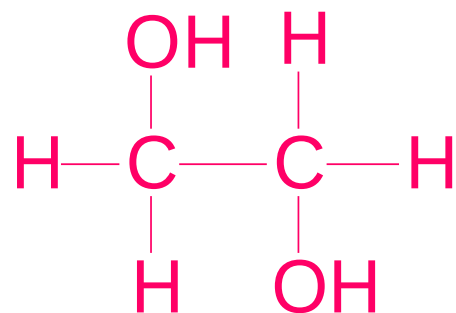
Метанол

Этанол

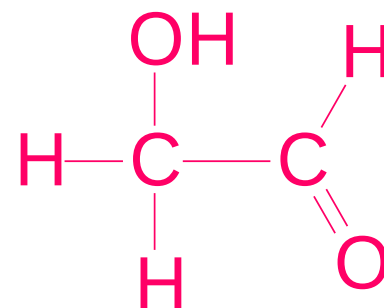
Диметилловый эфир

Муравьиная кислота

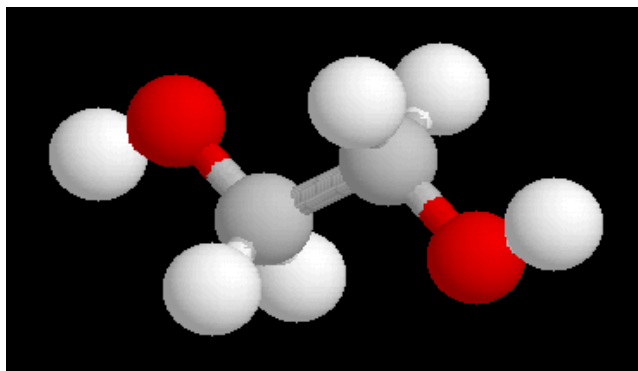




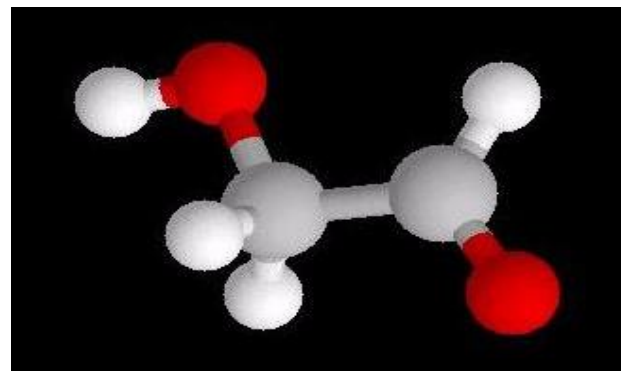
Этиленгликоль



Гликольальдегид

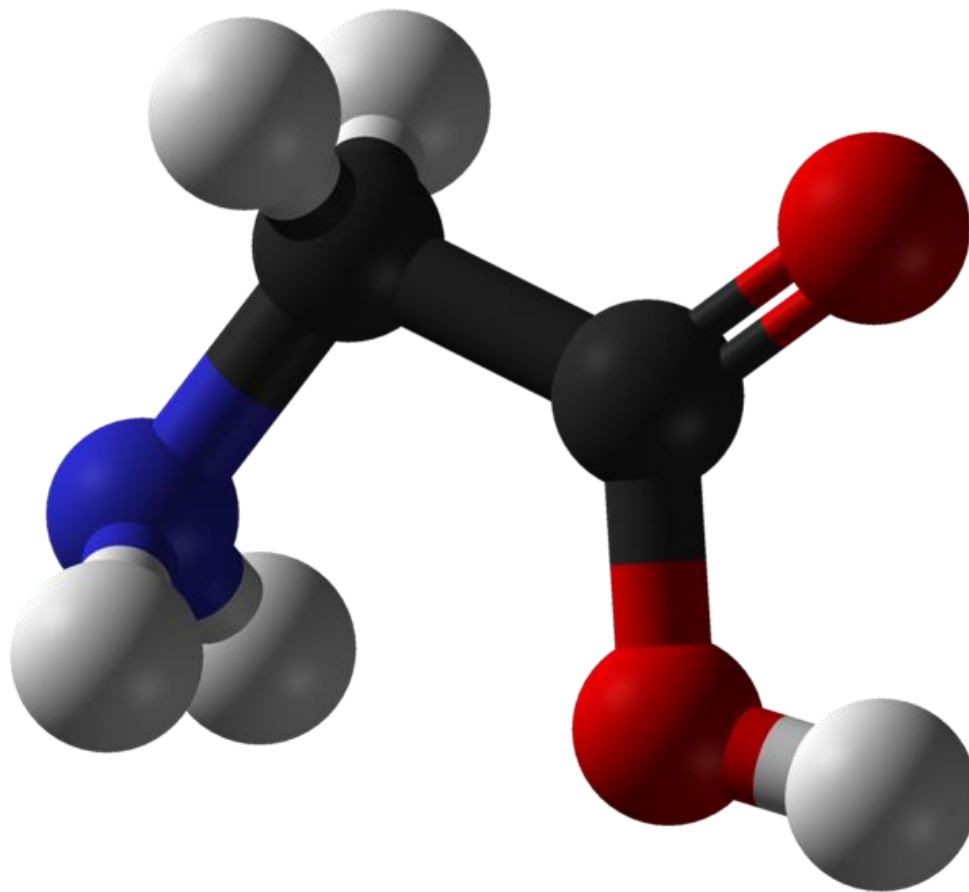


**Открыт в МЗС в 2002 году
и в комете Хейла-Боппа в
2004 году!**

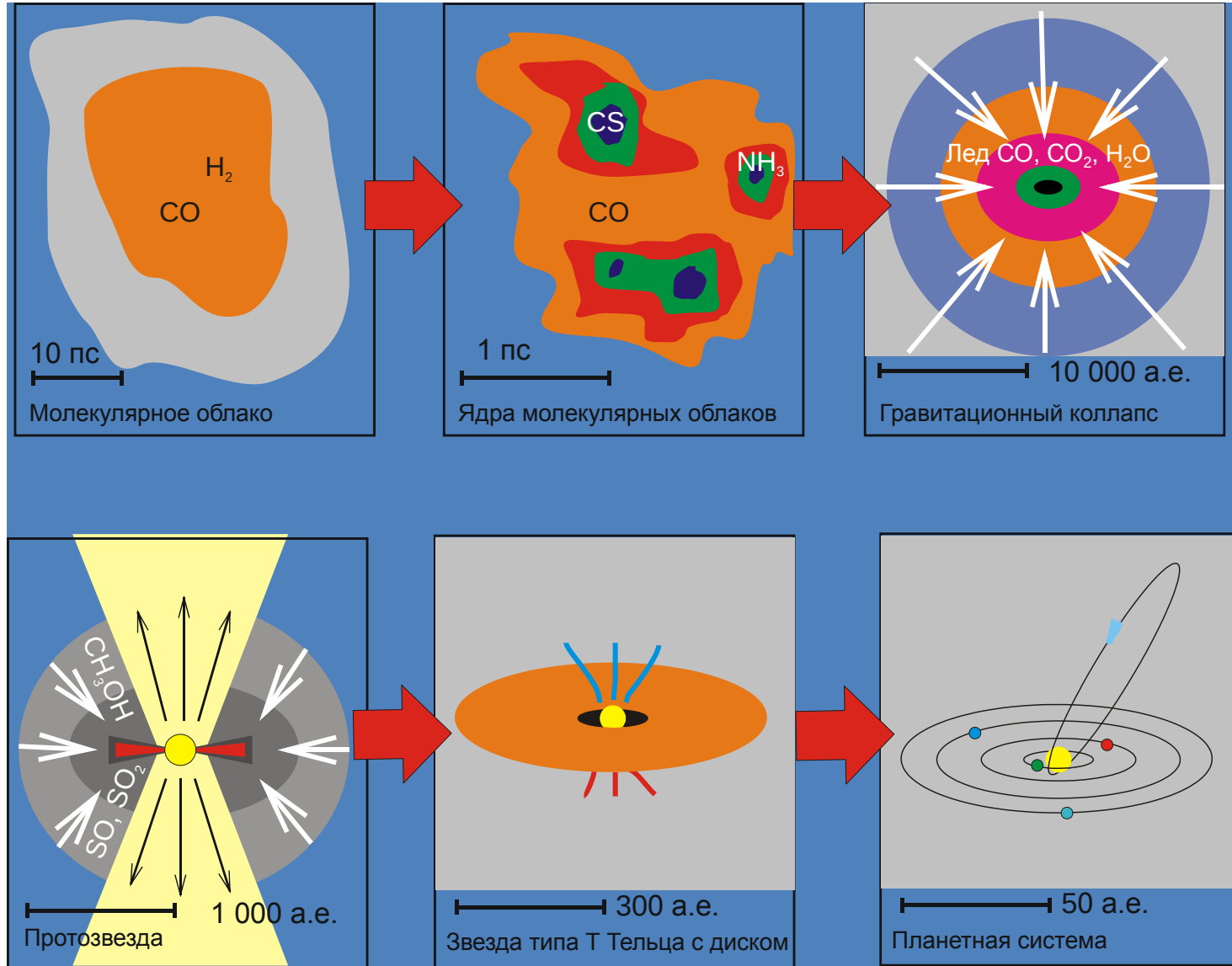


**Открыт в МЗС в 2002
году**

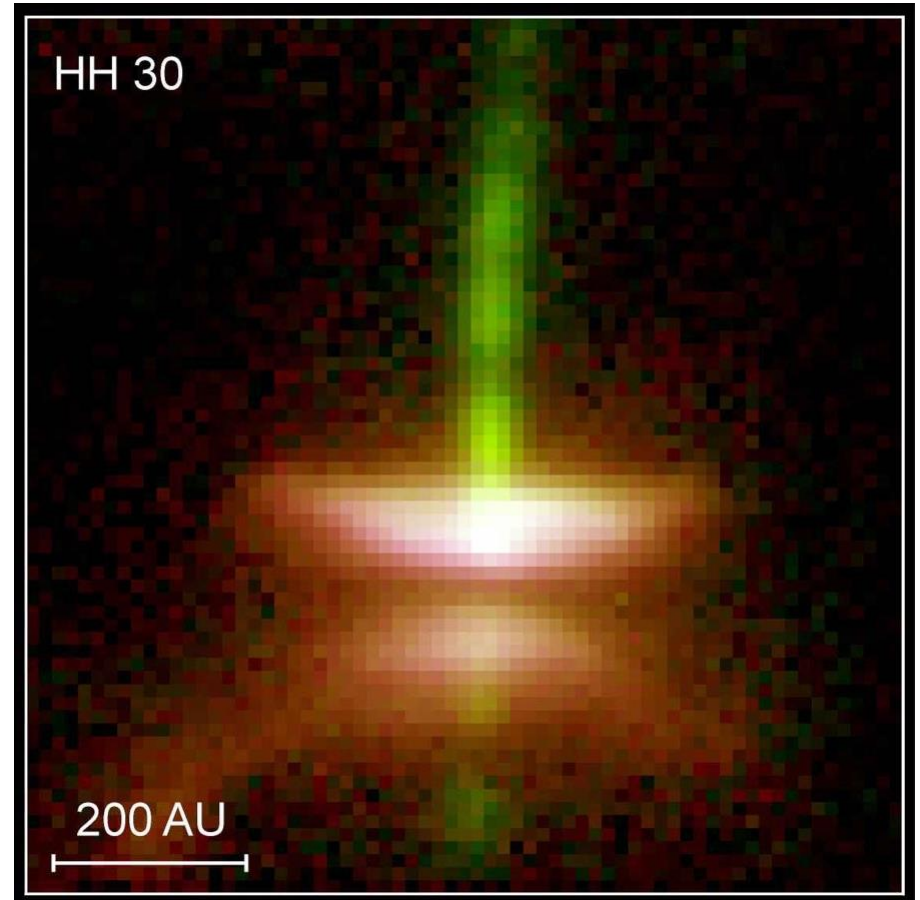
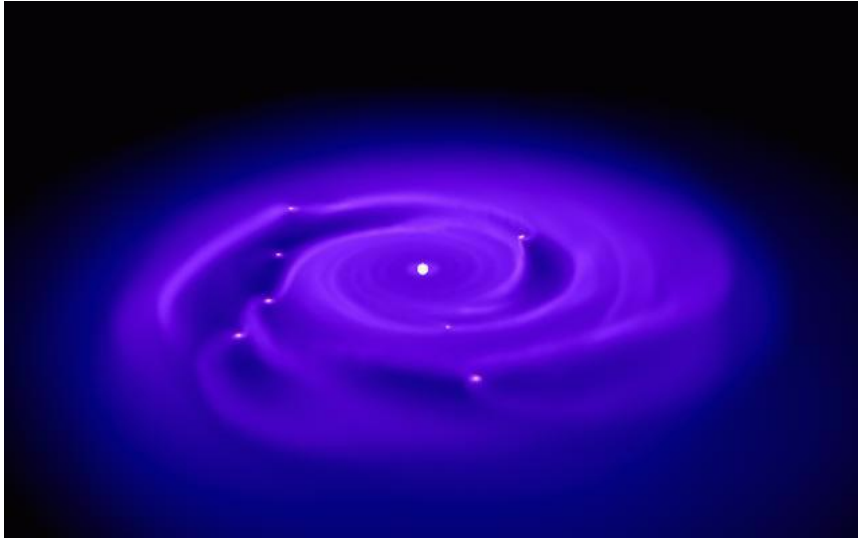
Аминокислоты?



Пыль как охладитель



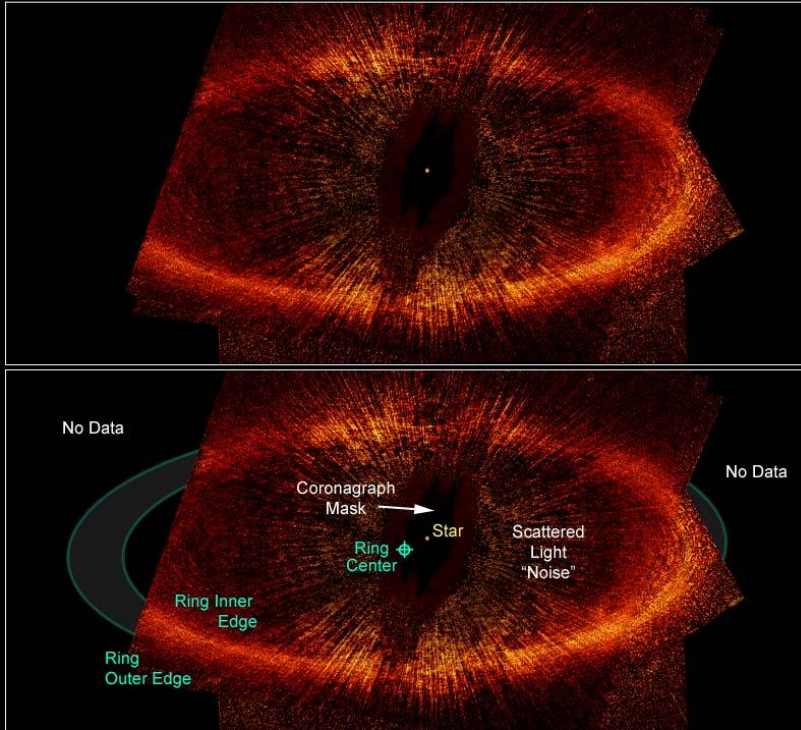
Пыль в (прото)планетных системах



Пыль в осколочных дисках

Fomalhaut Debris Ring

Hubble Space Telescope • ACS HRC

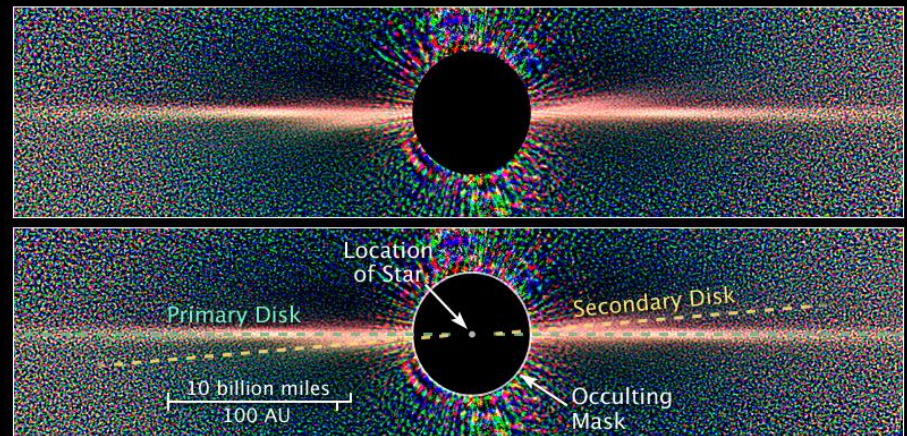


NASA, ESA, P. Kalas and J. Graham (University of California, Berkeley)
and M. Clampin (NASA/GSFC)

STScI-PRC05-10

Beta Pictoris

Hubble Space Telescope • ACS/HRC



NASA, ESA, and D. Golimowski (Johns Hopkins University)

STScI-PRC06-25



© Yuri Beletsky

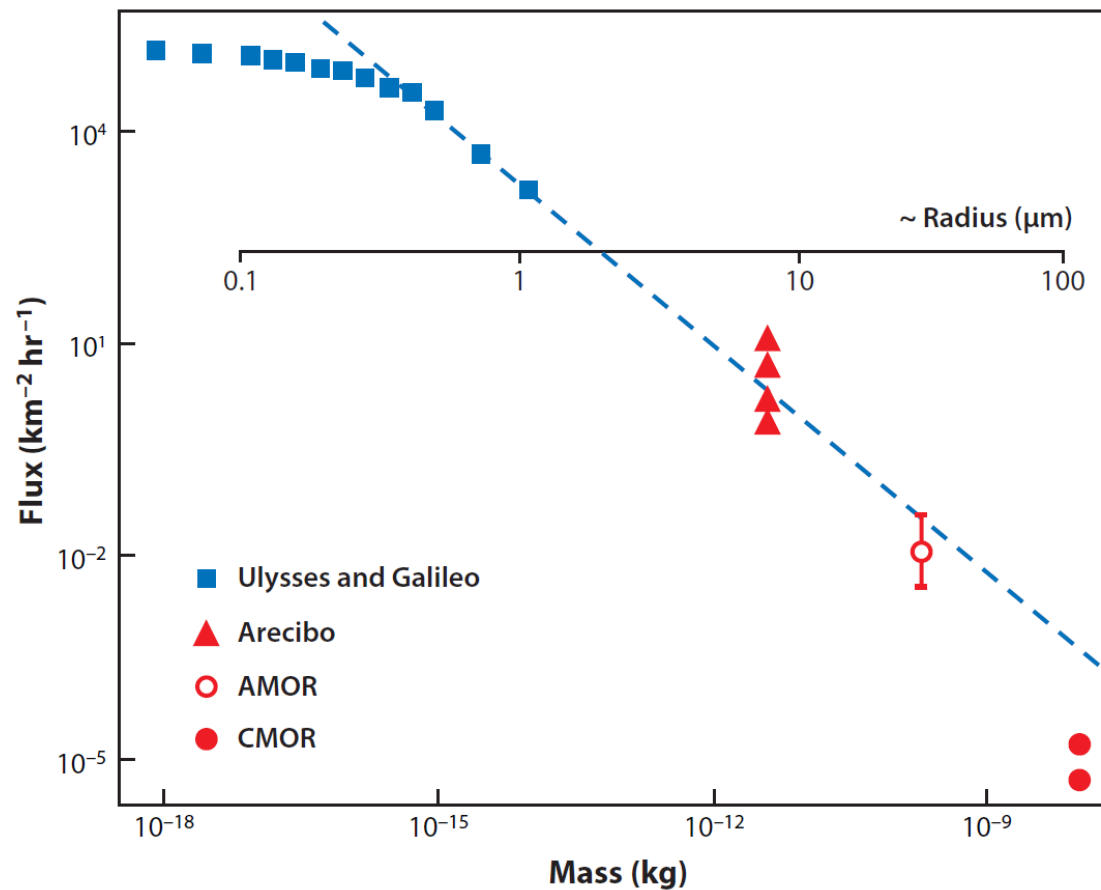
Zodiacal Light at Paranal

ESO Press Photo 12c/08 (2 May 2008)



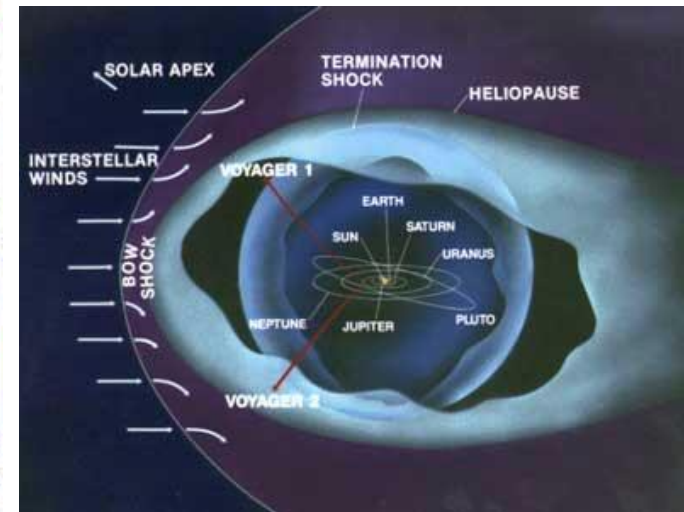
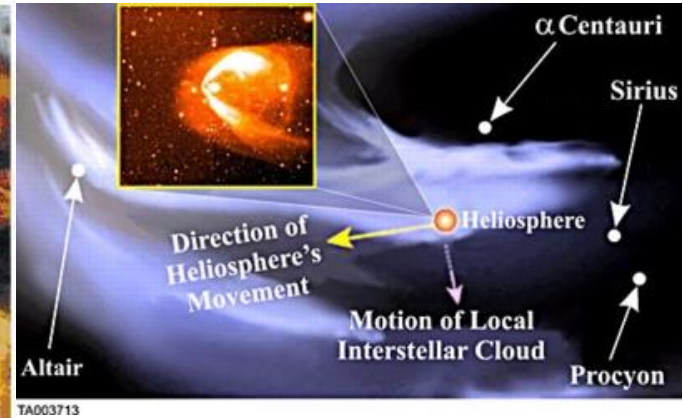
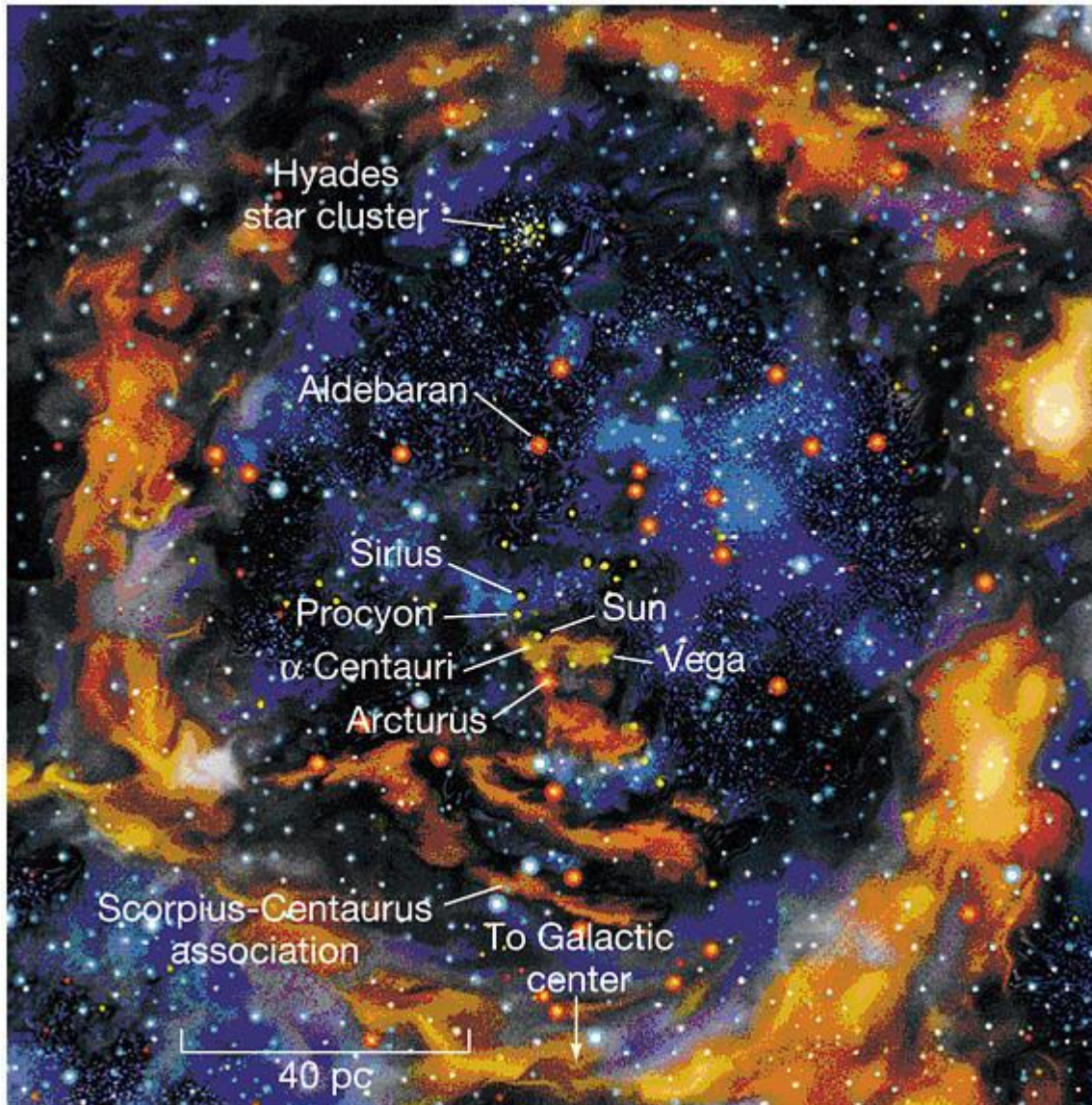
Межзвёздная пыль в Солнечной системе

- Анализ при помощи космических аппаратов
- Межзвёздные метеоры
- Межзвёздные пылинки в метеоритах

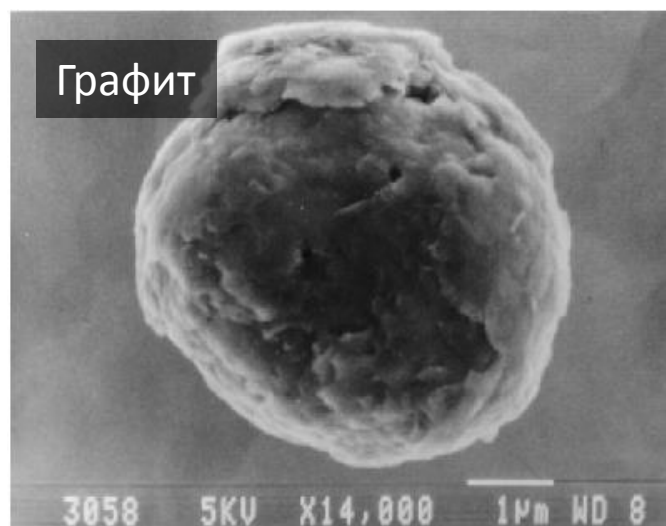


Mann (2010)

Межзвёздная пыль в Солнечной системе



Досолнечные пылинки



Сухой остаток

- Межзвёздное пространство заполнено пылью, масса которой примерно в 100 раз меньше массы газа
- Пыль состоит из смеси углистых (органических) и силикатных частиц
- Характерный размер силикатных частиц — 0.1 мкм
- Углеводородные пылинки — гораздо мельче