

Образование звезд и планетных систем

Image credit: Michael Sherick

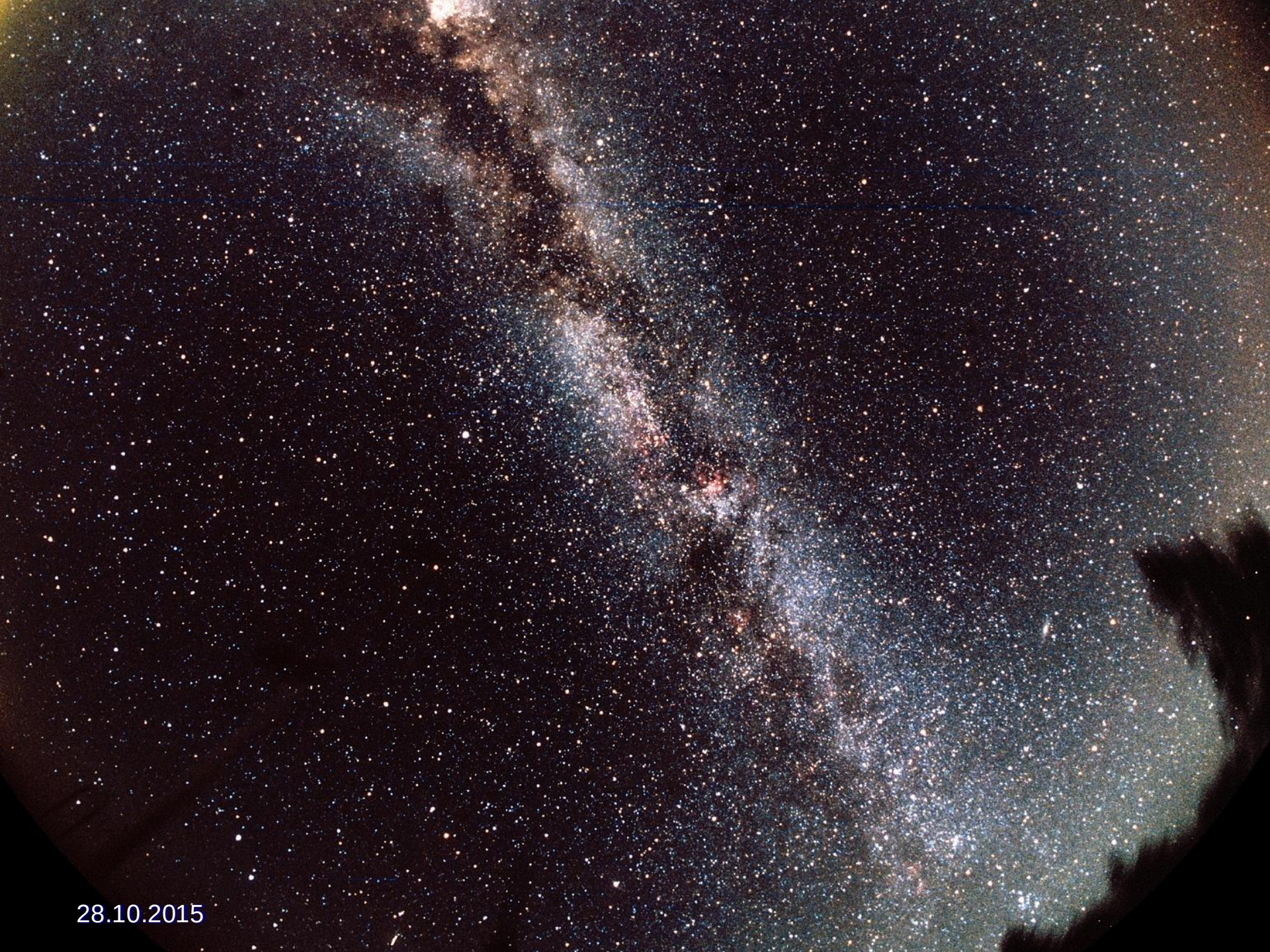


К.А. Постнов
ГАИШ МГУ

Литература:

- Астрономия Век XXI (под ред. В.Г. Сурдина, 2-е изд., Фрязино, Век-2, 2008)
- А.В. Засов, К.А. Постнов. Общая астрофизика. 2-3 изд., Фрязино, Век-2, 2011, 2015
- Интернет-ресурсы: www.astronet.ru

Часть 1. Холодная межзвездная среда



28.10.2015

Наша Галактика – Млечный путь



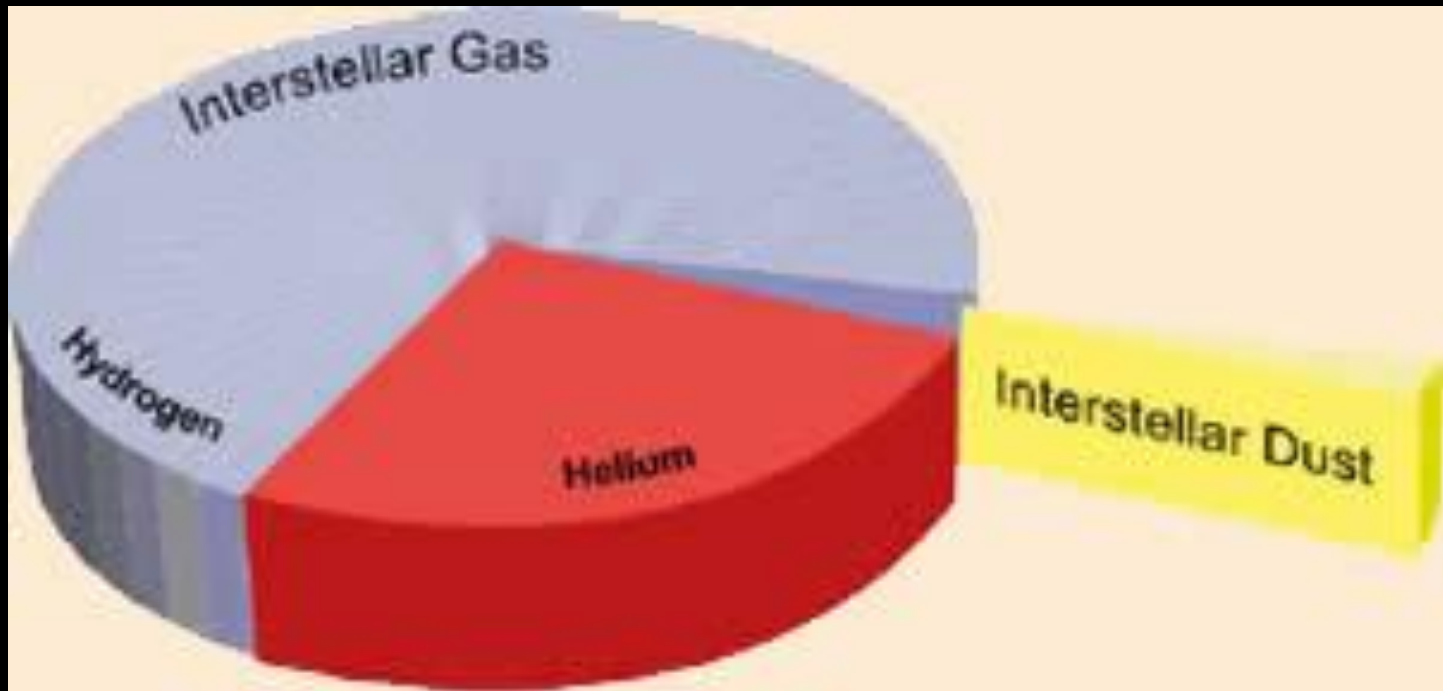
© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

28.10.2015

Состав Галактики

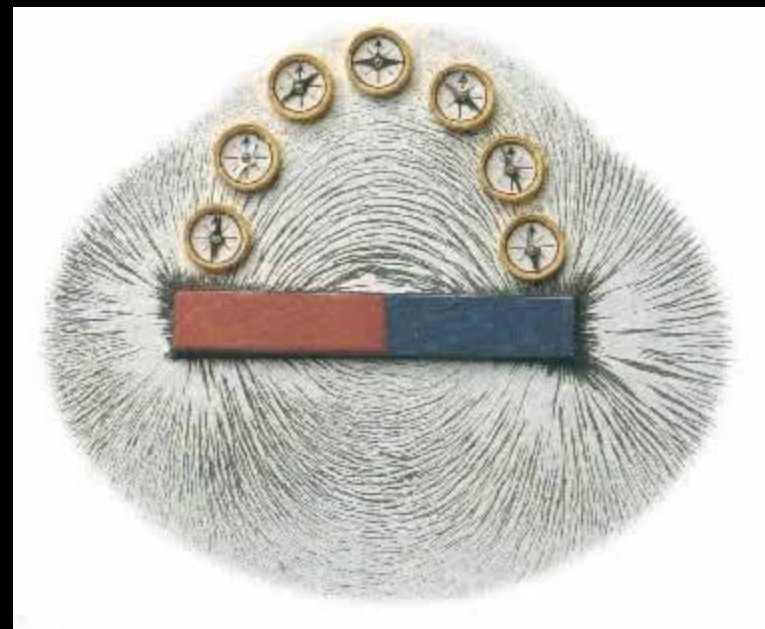
- Видимое вещество
 - Звезды (~ 100 млрд)
 - Газ 10%
 - Пыль 1%
- Невидимая материя (темное вещество - скрытая масса) – не взаимодействует со светом. Одна из ключевых проблем современной астрофизики

Межзвездный газ и пыль



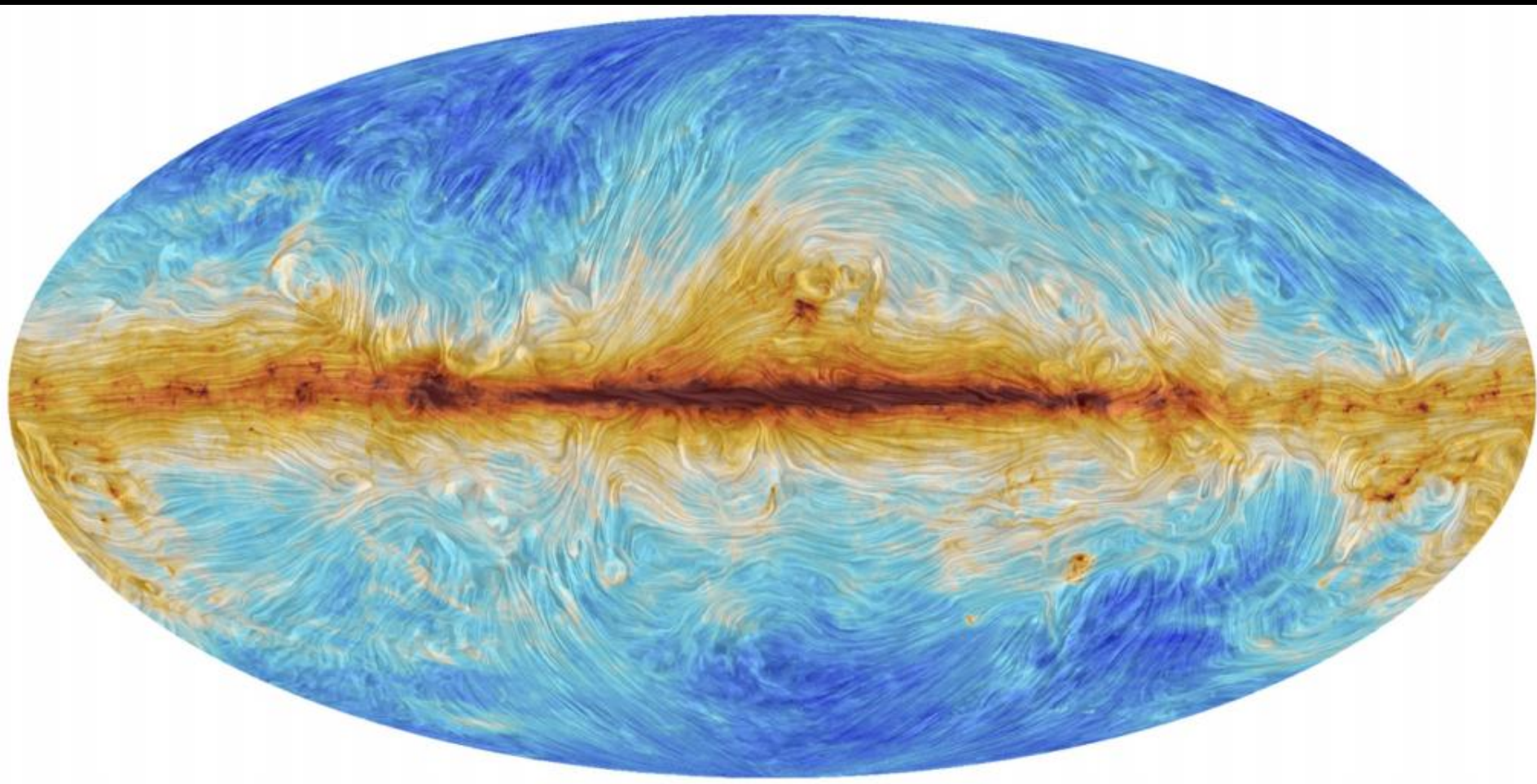
Магнитные поля в Галактике

- Наблюдаются по поляризации пылинок в радио и субмм диапазоне (
- По синхротронному излучению релятивистских электронов в радио диапазоне



Пылинки — маленькие магниты

М.п. Галактики по данным Planck (2015)



Магнитное поле «вытянуто» вдоль спиральных рукавов



28.10.2015

Основные состояния межзвездного газа:

Горячий ионизованный ($10^5 - 10^7 \text{K}$)

(Рентген, жесткий УФ)

Теплый ионизованный (около 10 тыс. K)

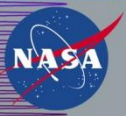
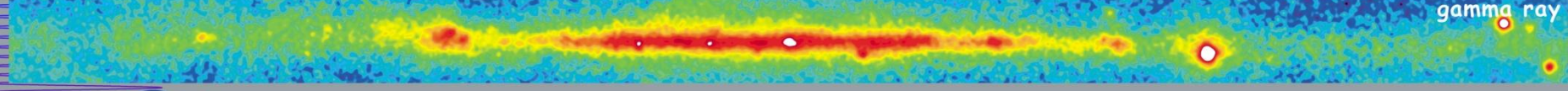
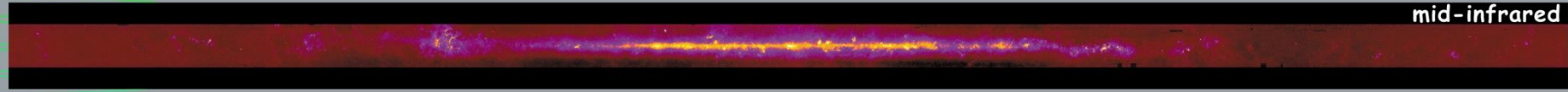
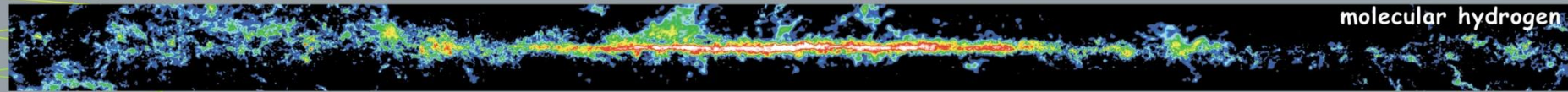
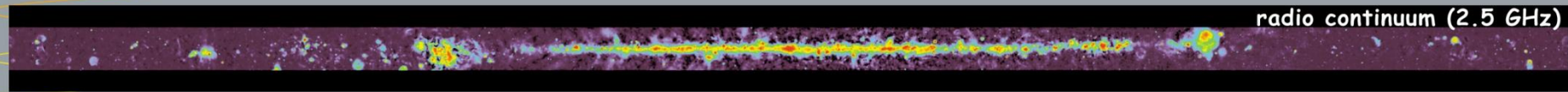
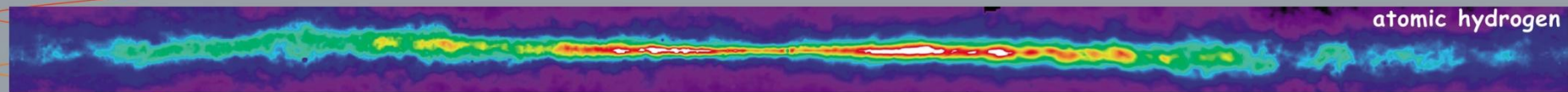
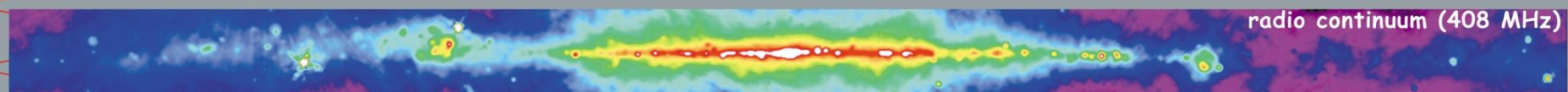
(Оптика, радио)

Атомарный (HI) (от 100K до 8000K)

(Радио 1420 МГц)

Холодный молекулярный газ (от 5 до 100K), от H_2 до полиароматических углеводородов.

(Радиолинии молекул)



Multiwavelength Milky Way

<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>

Молекулярный газ в Галактике (по данным космического телескопа Гершель)



Пыль и газ в других галактиках

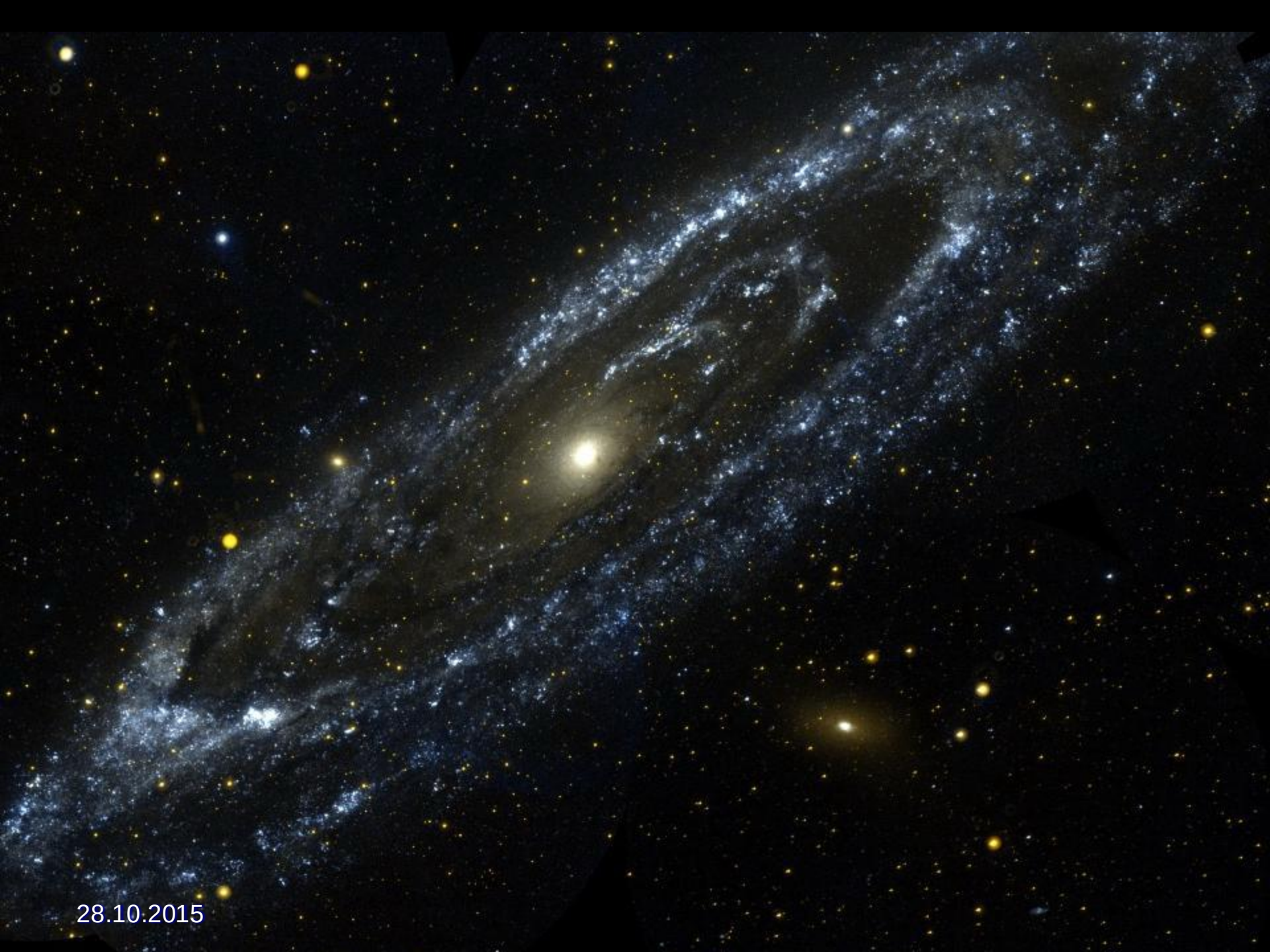
- Хорошо видны (газ – по радио, оптическому. УФ и рентгеновскому излучению, пыль- по поглощению или ИК-излучению)



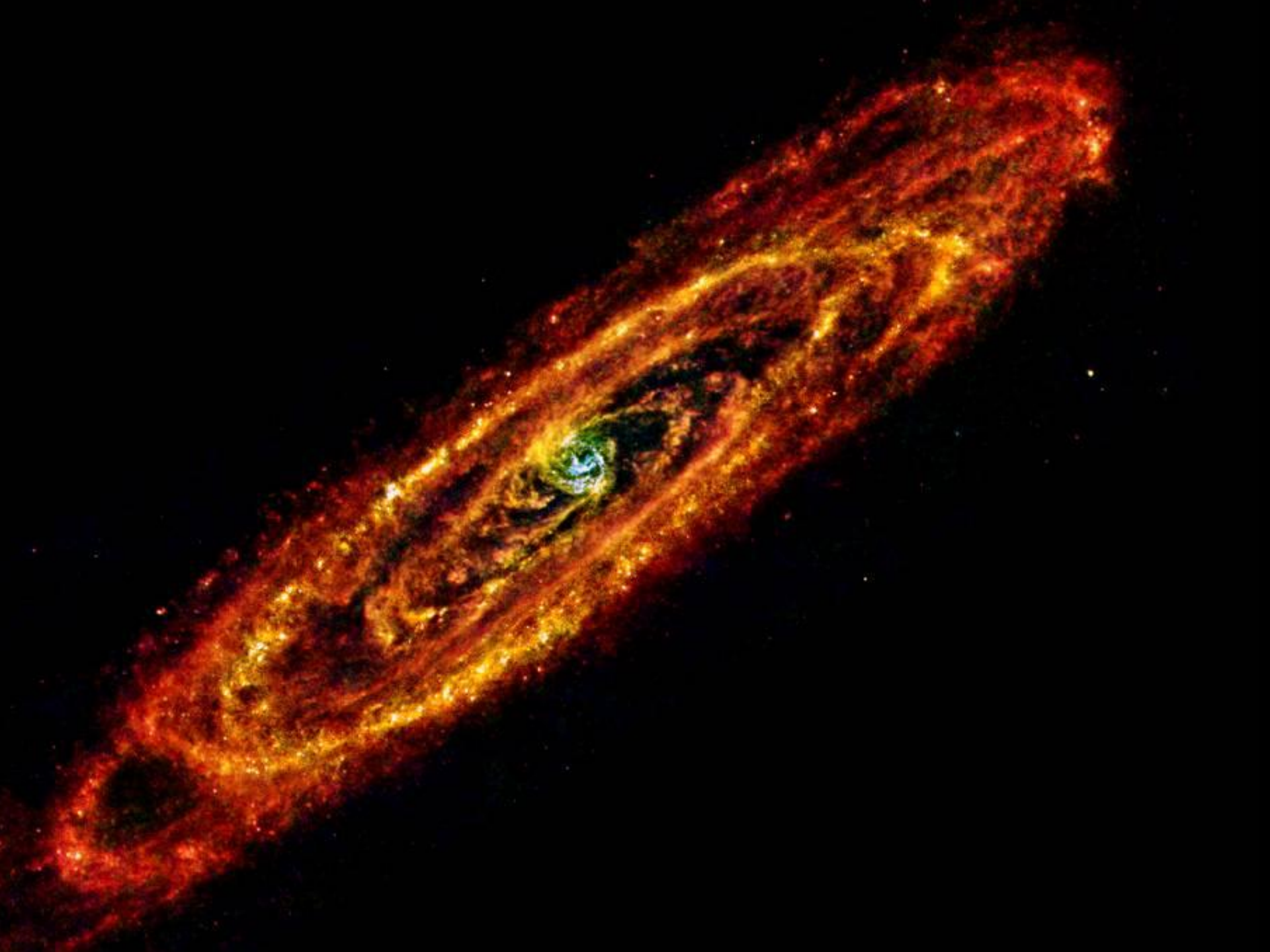
28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015





(M51 NASA HST)



(Eagle Nebula: HST)

Межзвездная пыль

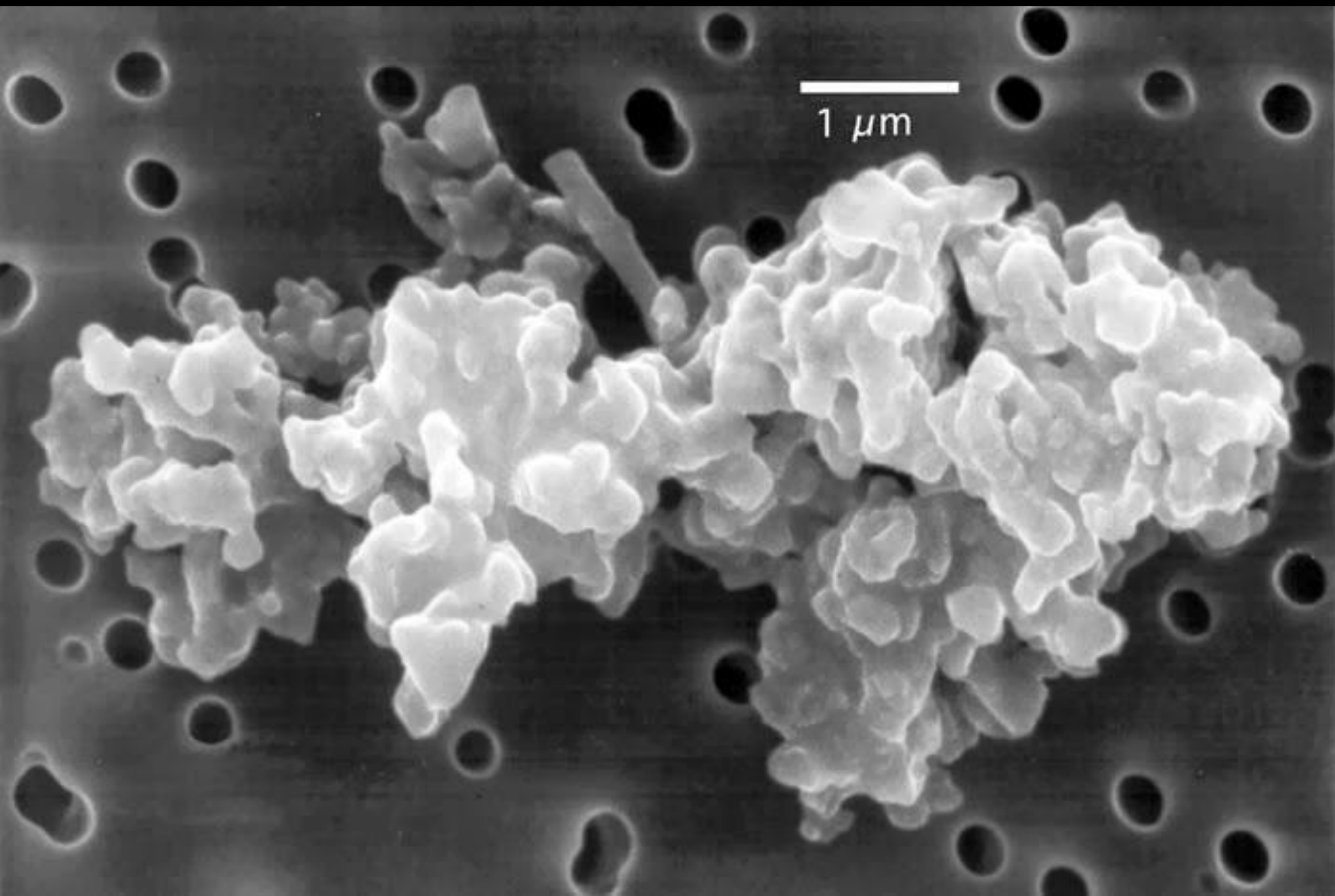
Характерный размер пылинок

– неск. десятых долей мкм

Общая масса – около 1% от массы газа

Проявляет себя:

- в поглощении (оптика, УФ)
- в излучении (20 – 200 мкм)



28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015



Ophiuchus Giant Molecular Cloud (by Loke Tan)

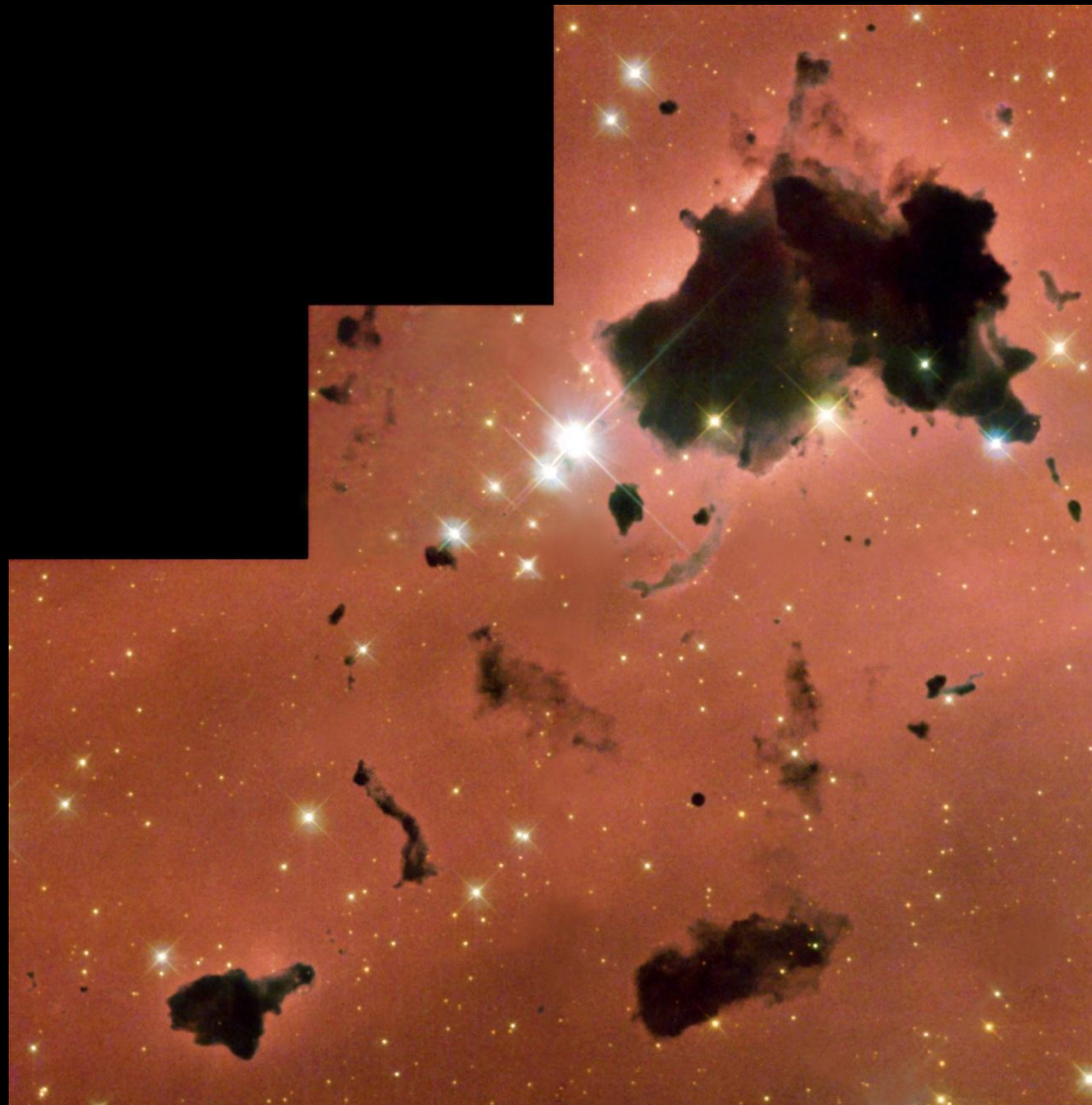


28.10.2015



28.10.2015

Глобулы Бока



28.10.2015

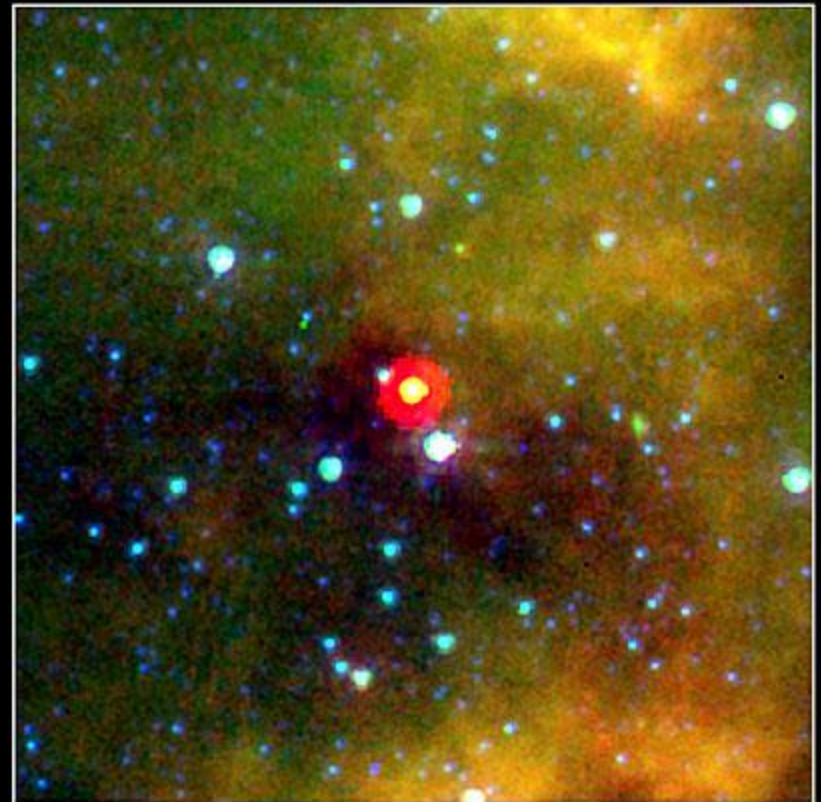
Visible



"Starless" Core L1014

NASA / JPL-Caltech / N. Evans (Univ. of Texas at Austin)

Infrared



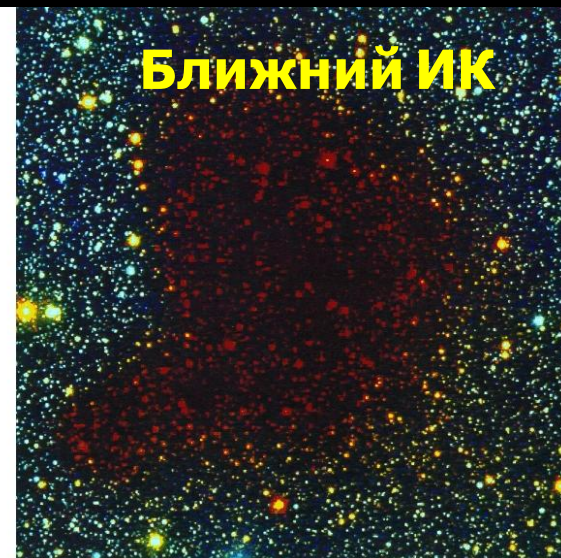
Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

Visible: DSS
ssc2004-20a

Звздообразование в облаках

Массы:
0.1-100 солнца

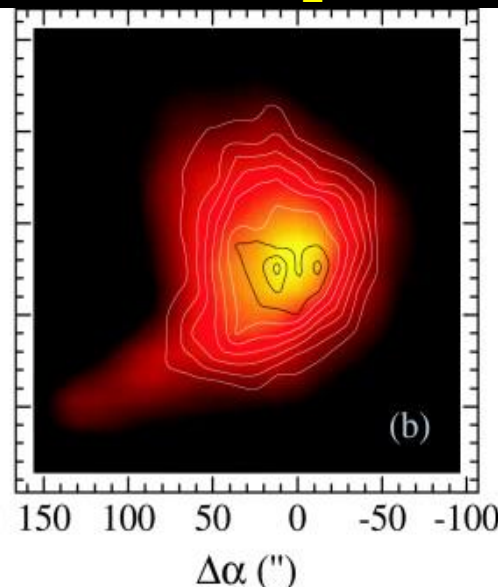
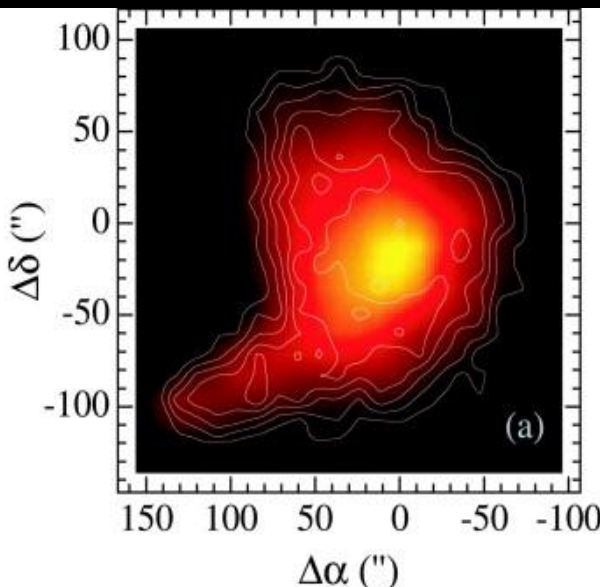
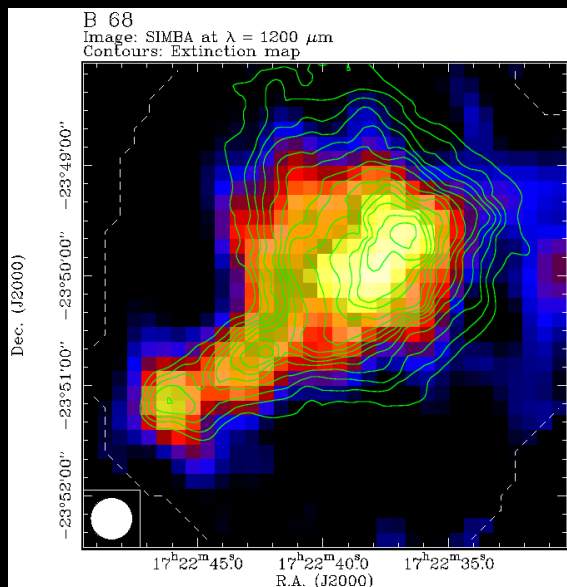
Плотность:
 $\sim 10^6 \text{cm}^{-3}$



1.2 mm континуум (пыль)

C^{18}O

N_2H^+



Характеристики МО

ТИП	n [cm ⁻³]	Размер [пк]	T [K]	Масса [M _{sun}]
Гигантские МО	10 ²	50	15	10 ⁵
Комплекс МО	5x10 ²	10	10	10 ⁴
Глобула	10 ³	2	10	30
Ядро глобулы	10 ⁴	0.1	10	10

Часть 2. Образование звезд

- Физическая причина – гравитационная неустойчивость (Джинс, 1902)
- Развивается в холодных плотных облаках межзвездной среды
- Время неустойчивости $\sim$ времени свободного падения в поле тяжести

$$\lambda_J \approx 1n\kappa \left(\frac{T}{10K} \right)^{1/2} \left(\frac{n}{10^3 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

$$M_J \approx 26M_s \left(\frac{T}{10K} \right)^{3/2} \left(\frac{n}{10^3 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

Различие между звездами, коричневыми карликами и планетами

- В **коричневом карлике** не горит водород, но горит дейтерий

$$13 M_{\text{jup}} < M < 0.08 M_{\text{sun}}$$

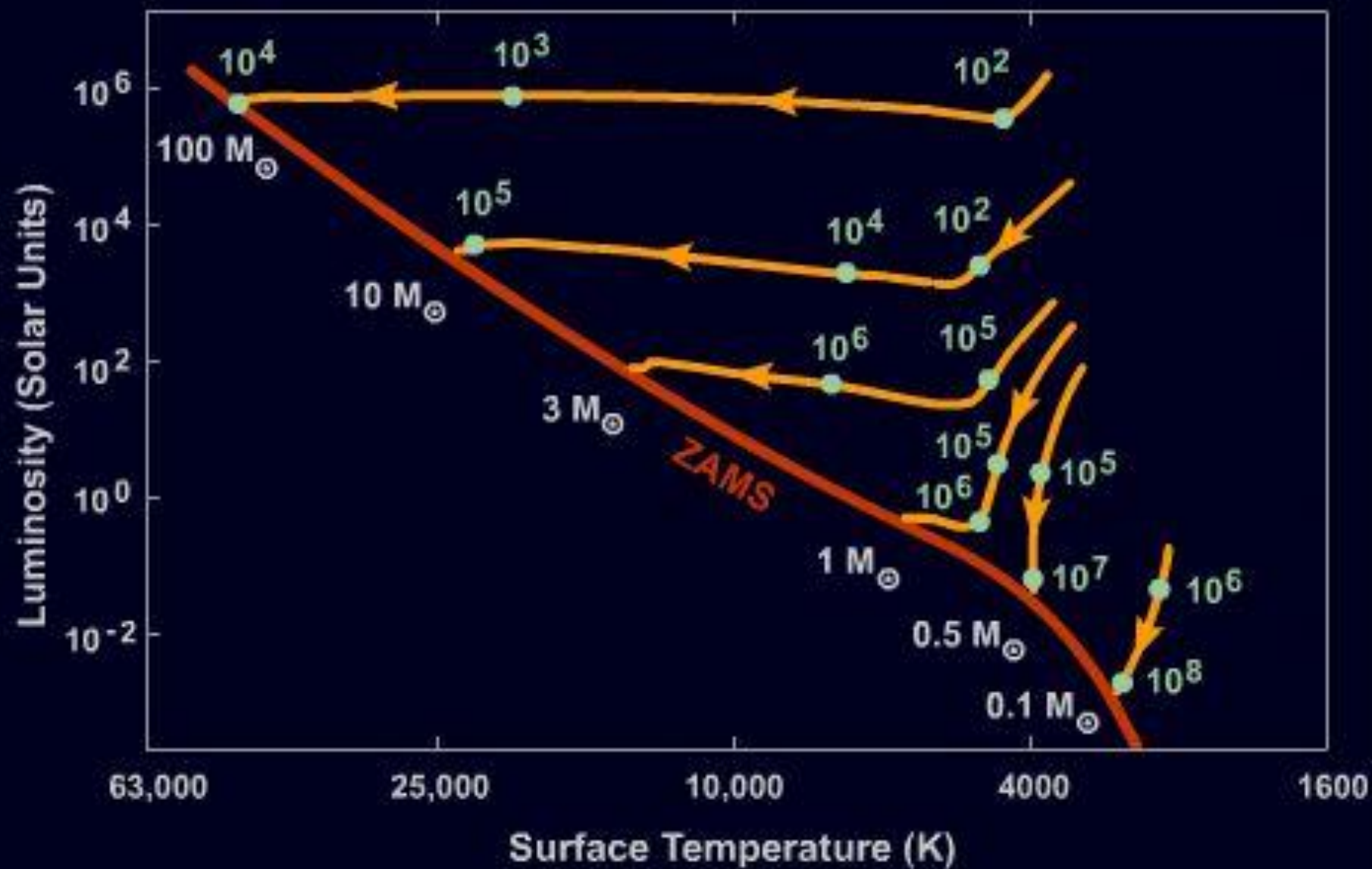
- В **планете** нет никаких термоядерных реакций $M < 13 M_{\text{jup}}$

Из протозвездного облака к звезде главной последовательности

- Протозвезда = самогравитирующий газовый шар, на который постоянно идет аккреция (выпадение) вещества из протозвездного облака
- Контракционная фаза: нет термоядерного горения
- Прозрачна для фотонов и охлаждается излучением:
 - Сжатие в тепловой шкале времени (КГ)

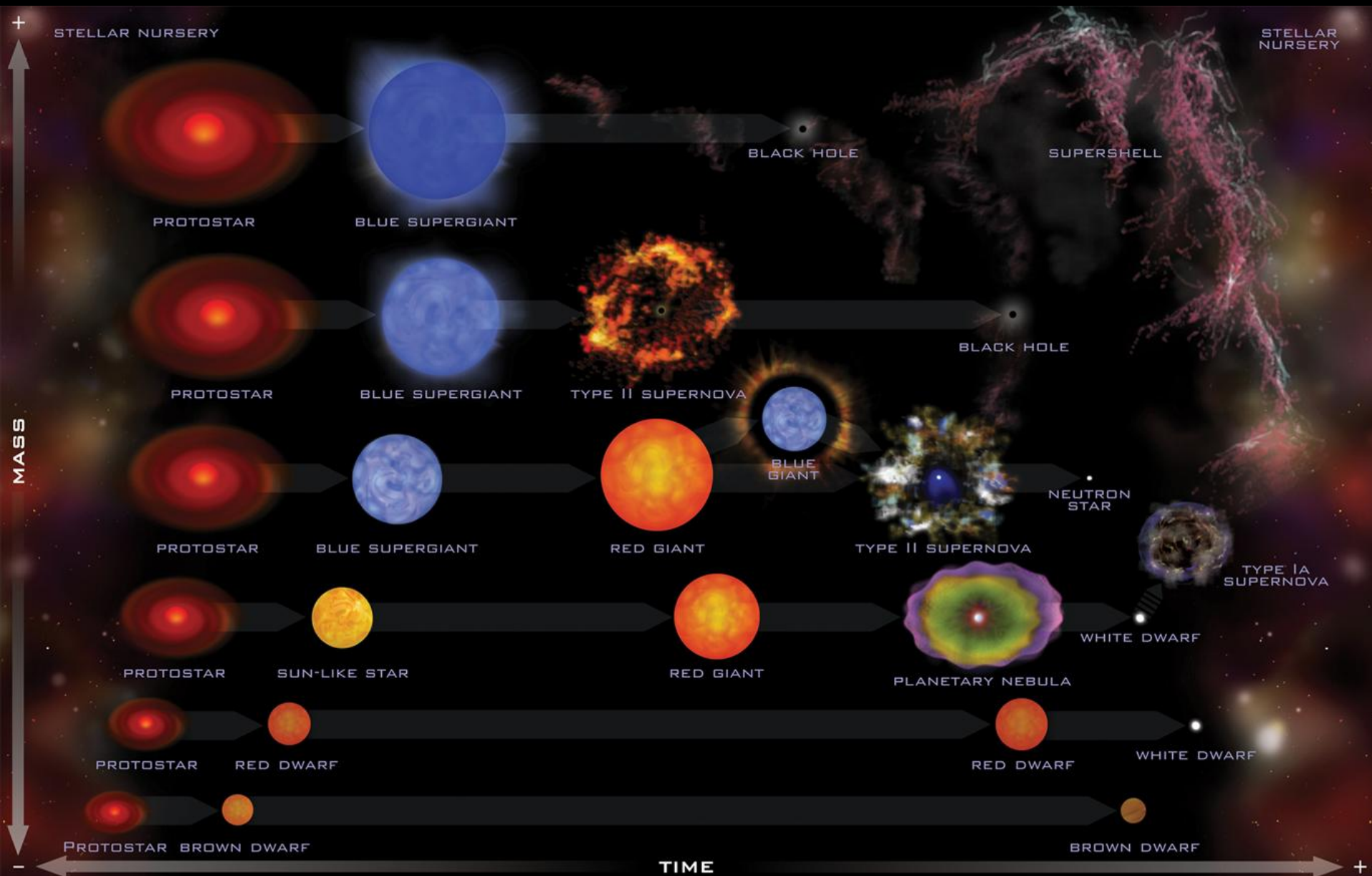
- Звезда сжимается, центральная температура и плотность растут
- Загорание дейтерия при $T_c \geq 1 \times 10^6 \text{ K}$
- Фотоны не справляются с переносом энергии
→ включается конвекция
- Радиус звезды увеличивается до $3 \dots 5 R_{\odot}$.

- Стадия Т Тельца (T Tauri)
- Сжатие замедлилось и стало адиабатическим (для маломассивных звезд)
 - Звезда движется почти вертикально вниз на диаграмме ГР
- T_c и ρ_c возрастают до:
- Начала термоядерного горения водорода
 - Самая длительная фаза эволюции звезды
 - «Взрослая» стадия эволюции
 - Звезда стала звездой главной последовательности



Evolutionary Tracks for Collapse to the Main Sequence

Масса звезды определяет ее эволюцию

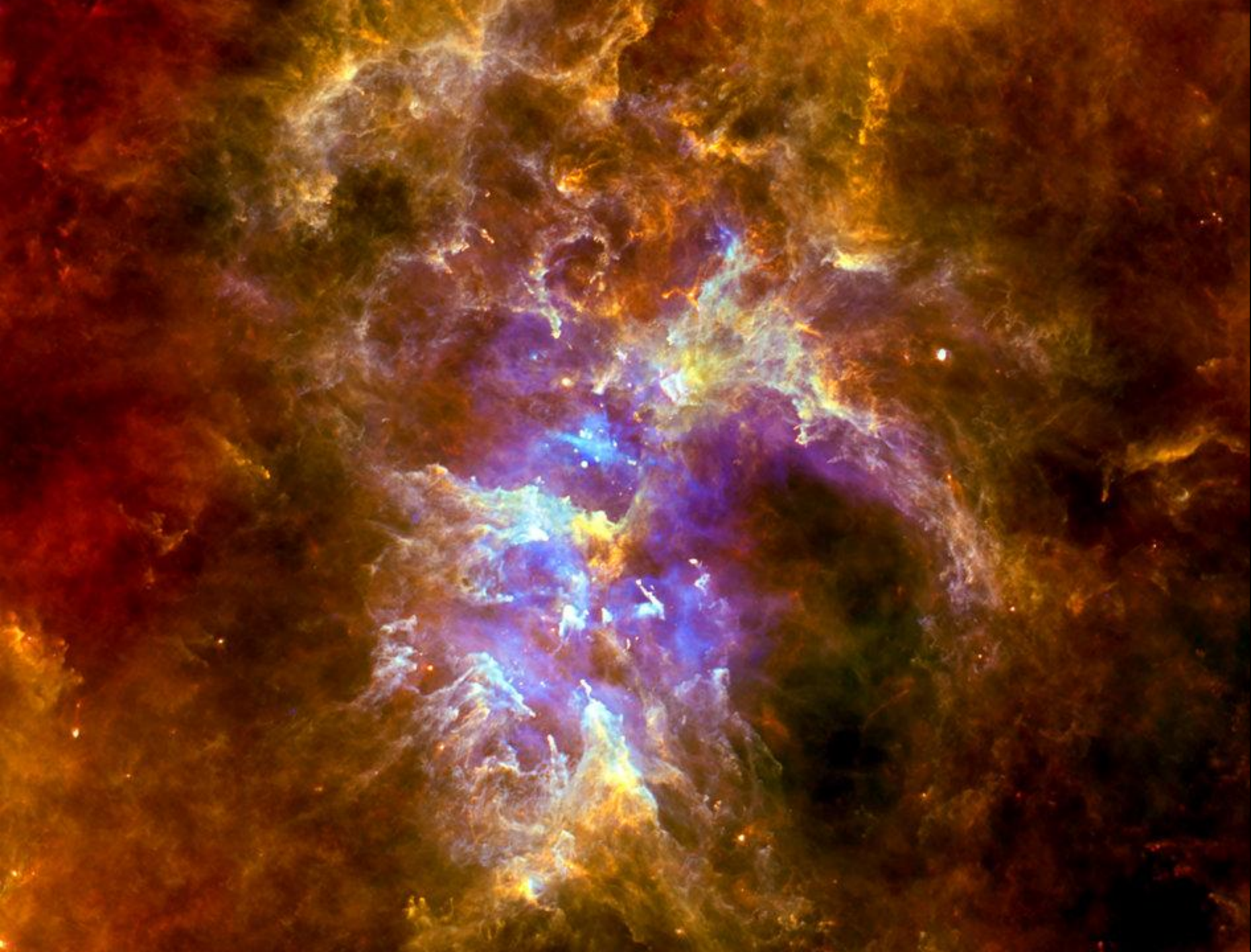


- Протозвезды проявляют себя как мощные ИК источники в ядрах молекулярных облаков.
- Излучает пыль.
- Источник энергии излучения: гравитационное сжатие протозвезды.

С образованием массивных звезд молекулярные облака начинают быстро разрушаться.



28.10.2015



- НАИБОЛЕЕ ЯРКИЕ МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДЫ – ГОЛУБЫЕ СВЕРХГИГАНТЫ

$T = 20\text{-}50$ ТЫСЯЧ К

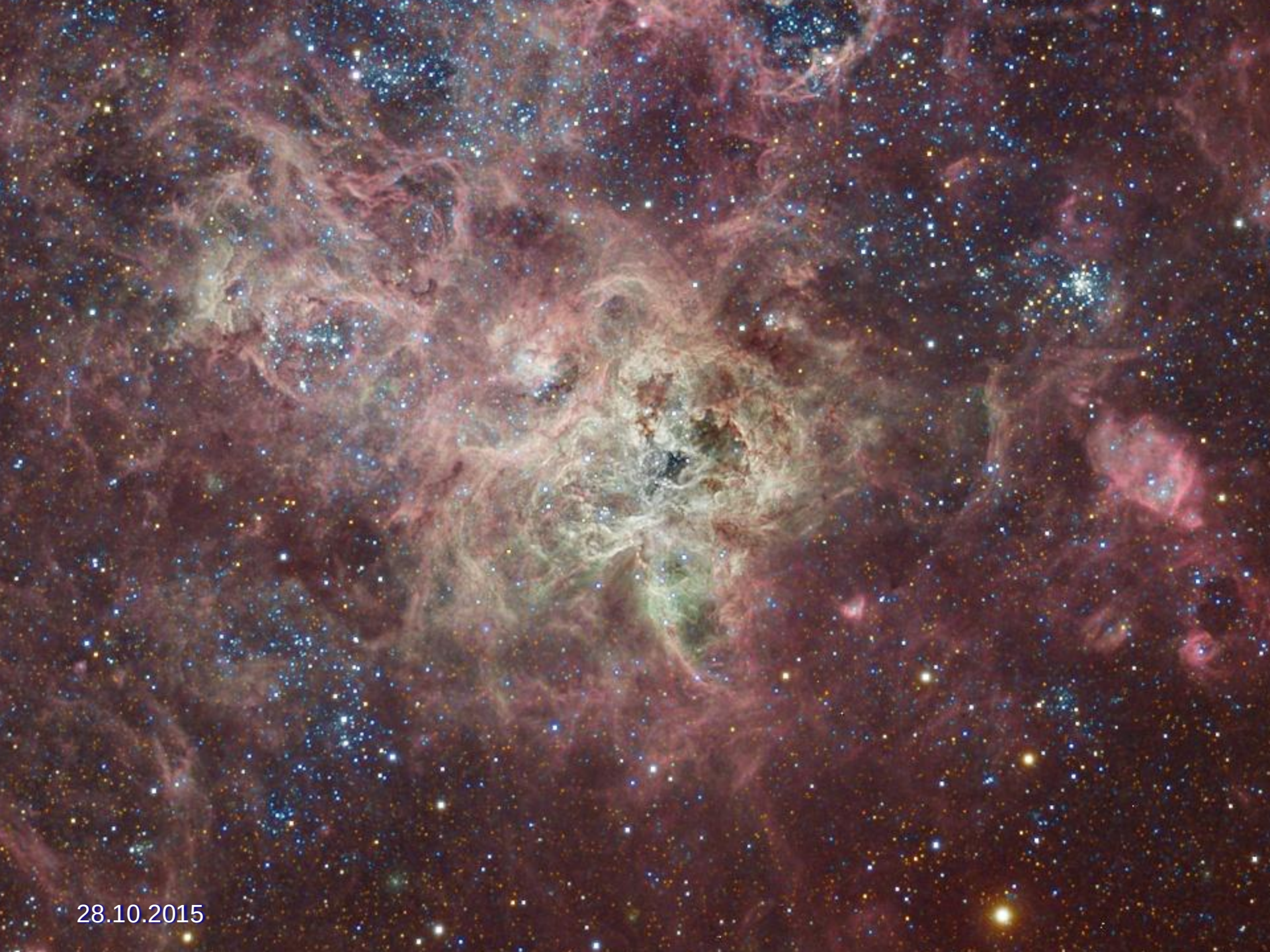
Они рождают большой поток
ионизирующего излучения, для которого
среда мало прозрачна



28.10.2015



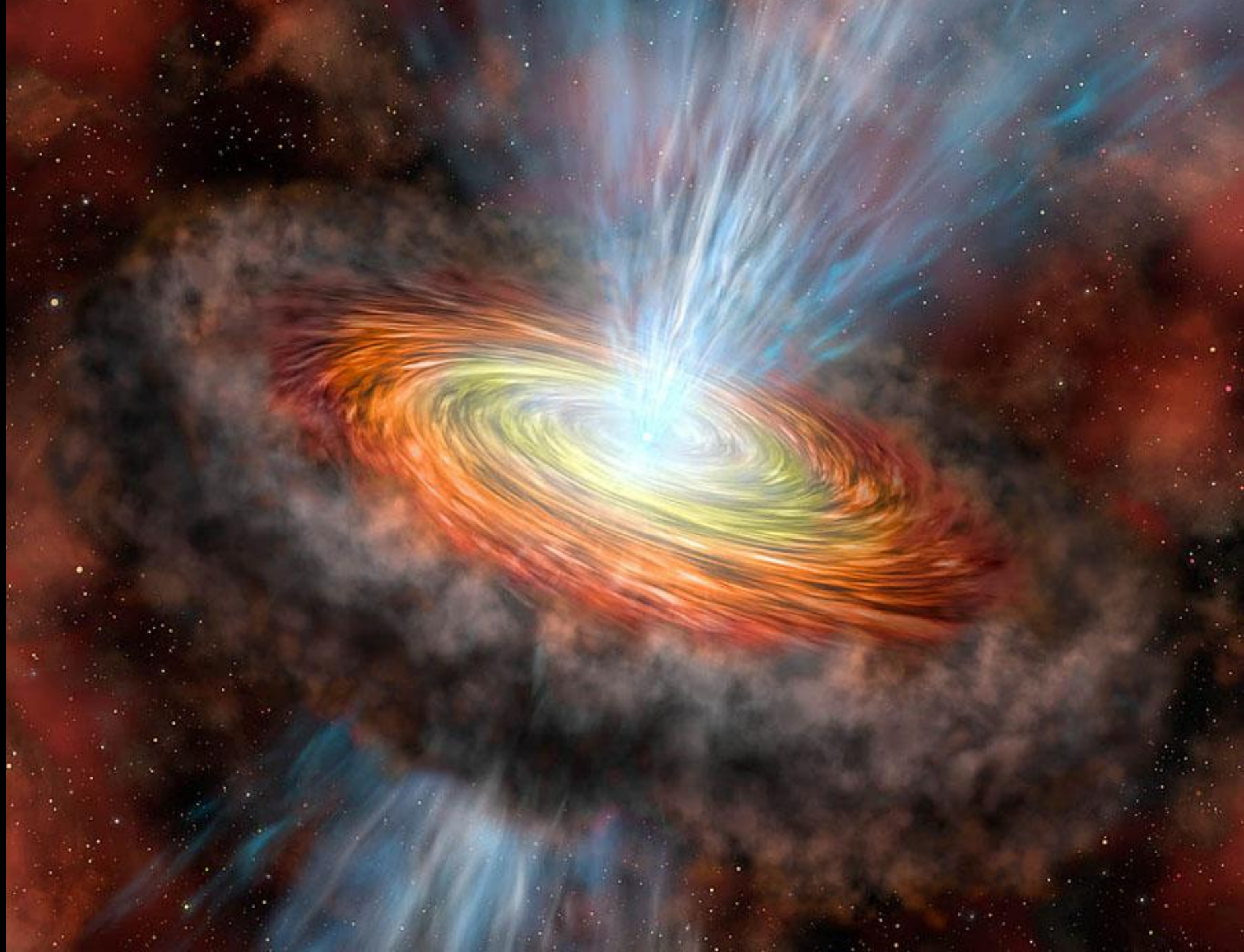
28.10.2015



28.10.2015

На больших масштабах (1 -- 2 кпк) и малых масштабах (десятки пк) звездообразование управляется различными факторами:

- ***Большие масштабы:*** крупномасштабные неустойчивости, наличие спиральных ветвей, внешнее воздействие на галактику
- ***Малые масштабы:*** тепловая неустойчивость, турбулентность, расширяющиеся оболочки, локальные условия молекуляризации газа, интенсивность нагревающего излучения



**РАЗРЕЖЕННЫЙ
ГАЗ**

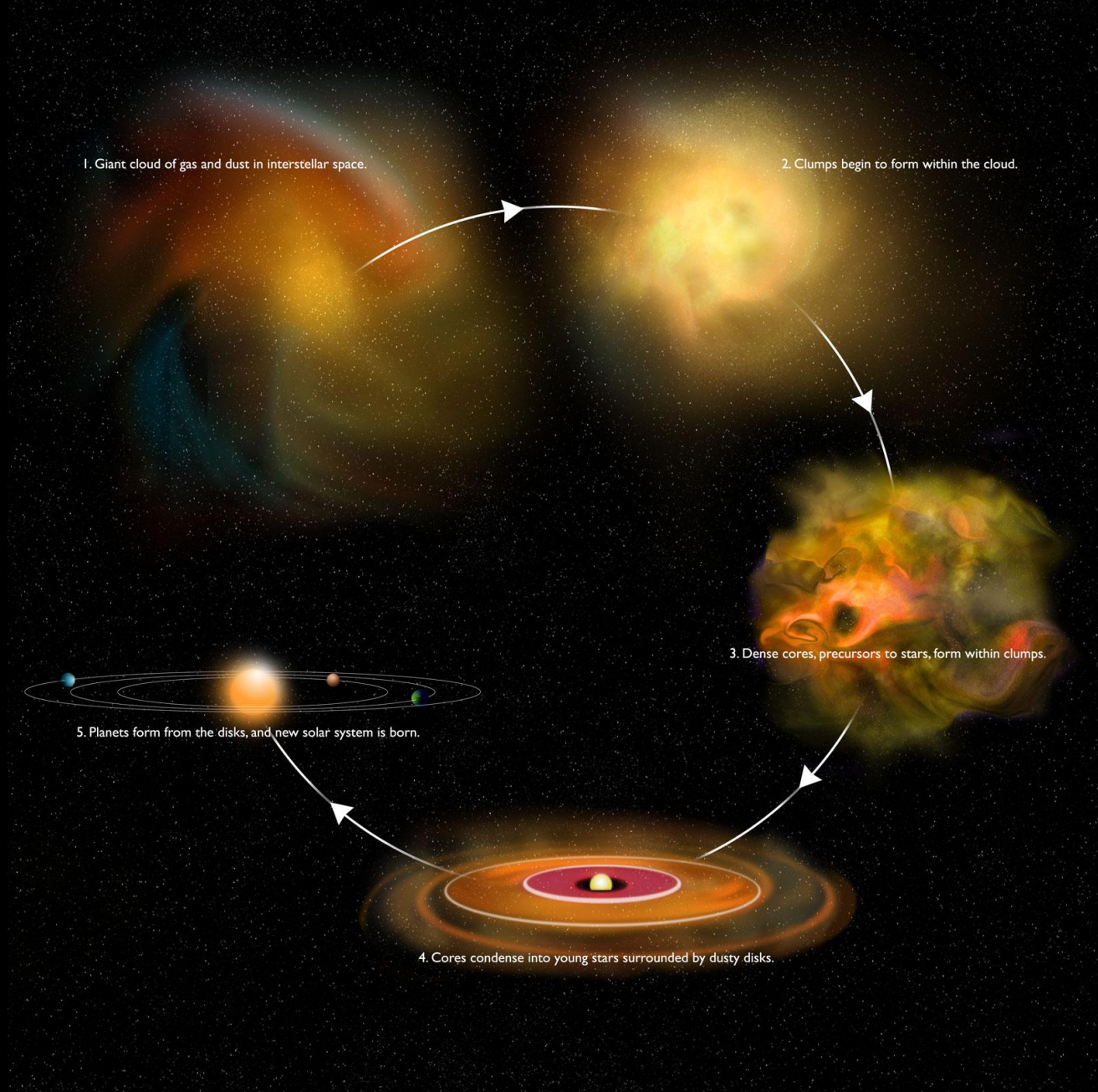


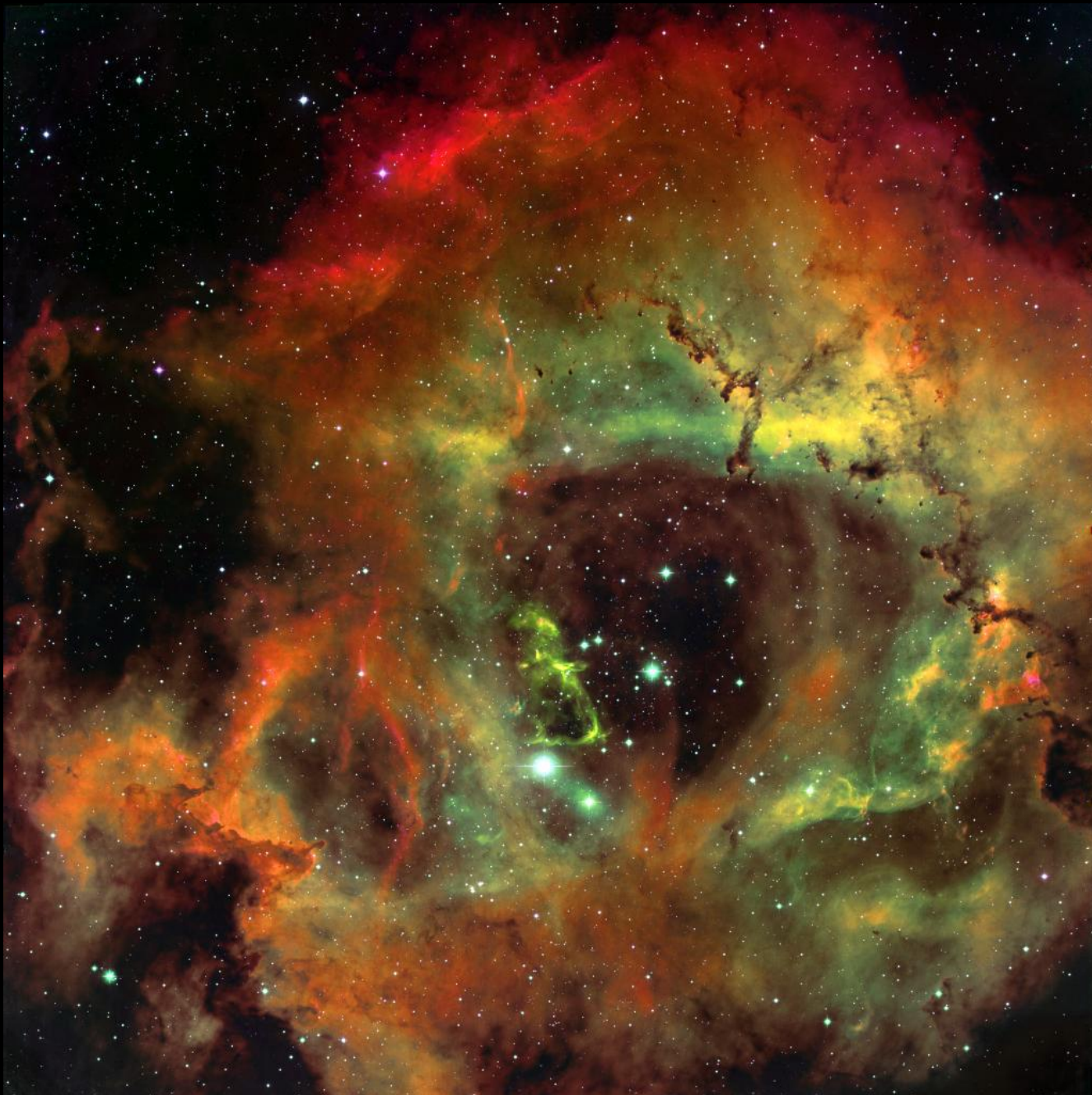
Ударные волны
Тепловая неустойчивость
Гравитационная неустойчивость

**ГРАВ. СВЯЗАННЫЕ
ГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ**

**МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ
СКОПЛЕНИЯ**

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ
ОБЛАКА**





28.10.2015

Пример моделирования турбулентного звездообразования

Bate 2003

Начальные данные

$$M=50M_{\odot}$$

$$R=0.188 \text{ пк}$$

$$M_J = 1 M_{\odot}$$

$$\text{Mach number}=6$$

$$\text{Heating density } 10^{-13} \text{ г/см}^3$$

Результаты

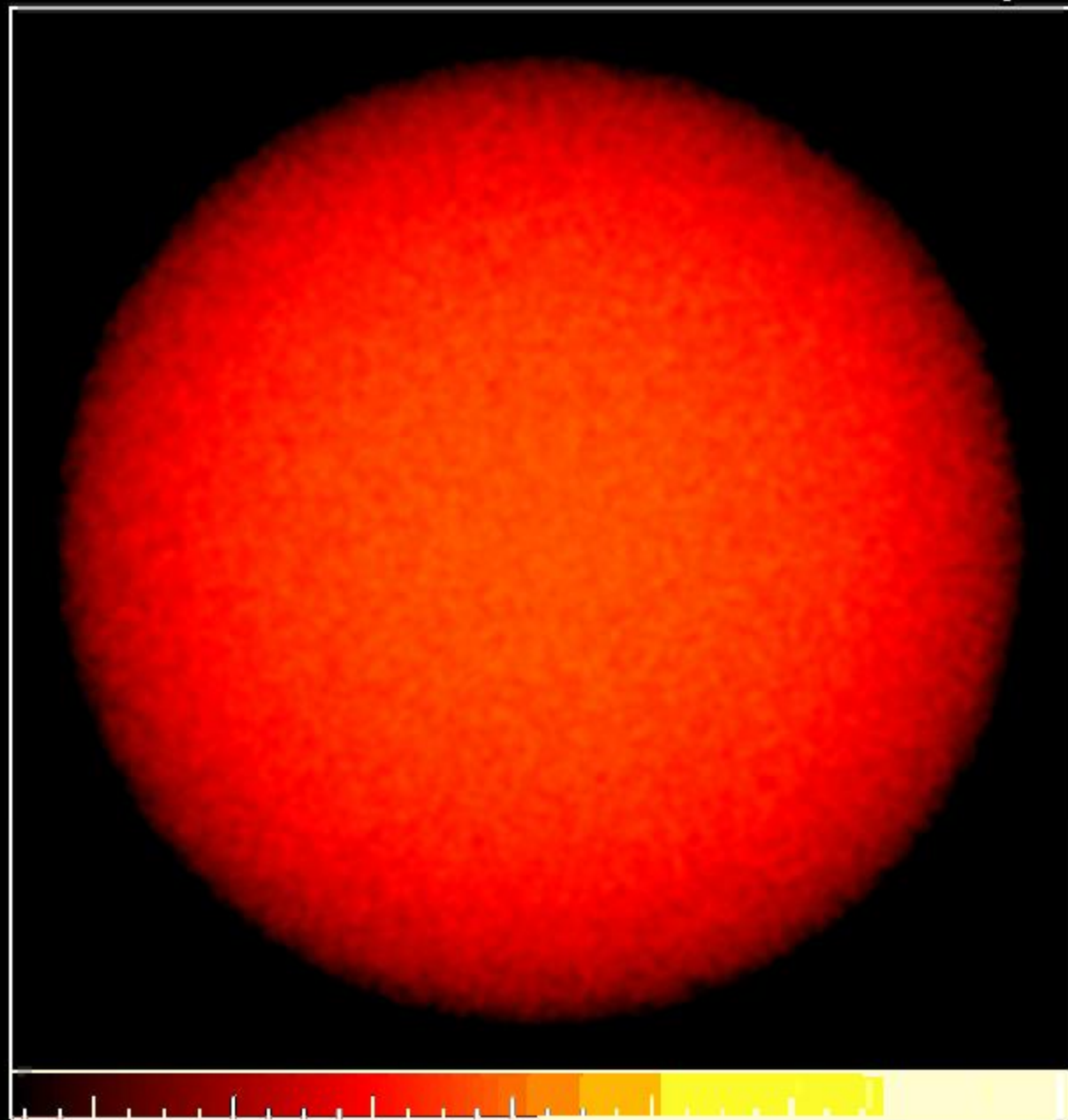
$$N \text{ звезд} = 23$$

$$N \text{ коричн. карл. } (M < 0.075 M_{\odot}) = 27$$

$$\text{Масса звезд и} \\ \text{коричн.карл.} = 5.89 M_{\odot}$$

Dimensions: 82500. AU

Time: 0. yr



-1.4

-1.2

-1.0

-0.8

-0.6

-0.4

-0.2

0.0

Log Column Density [g/cm^2]

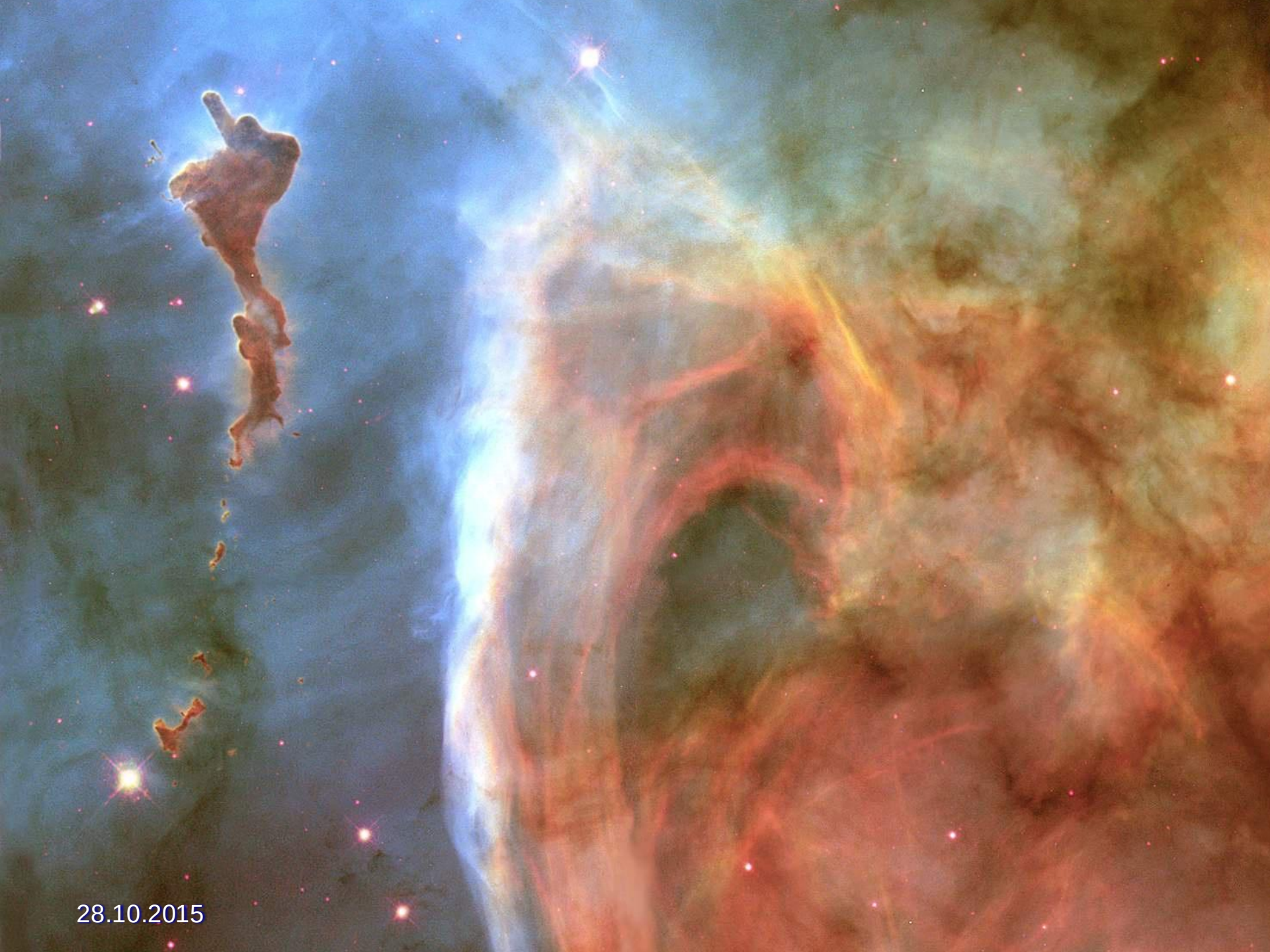
Matthew Bate

28.10.2015





28.10.2015



28.10.2015



28.10.2015

Часть 3. Образование протопланетных дисков и планет



28.10.2015

Удивительные факты о Солнечной системе

Компланарные орбиты планет

Планеты вращаются в одном направлении вокруг Солнца

Распределение массы и момента вращения:

Солнце: 99.86% массы но $< 2\%$ момента вращения!

Возраст: Солнце и планеты образовались одновременно



Экзопланеты:

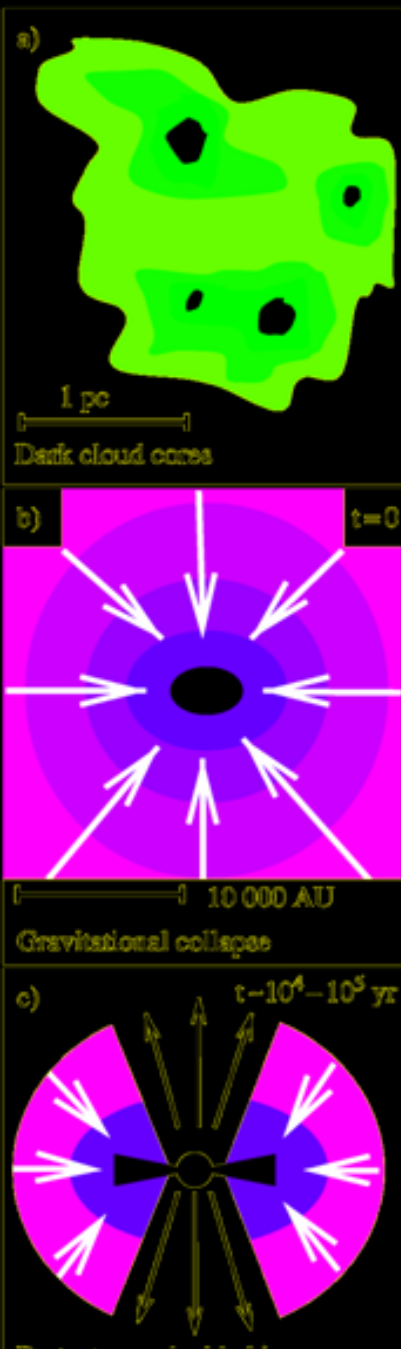
Горячие Юпитеры, большие эксцентриситеты



Immanuel Kant
"Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels"
(1755)

Солнечная система эволюционирует
Планеты образовались из вращающегося газо-
пылевого диска





Парадигма образования звезд и планет

□ Протозв. облако / протопланетный диск:

- газо-пылевой диск вокруг протозвезд
- Типичный размер $\sim$ неск. 100 АЕ

□ Образование планет: “Byproduct” звездообразования:

Коллапс вращающегося ядра МО

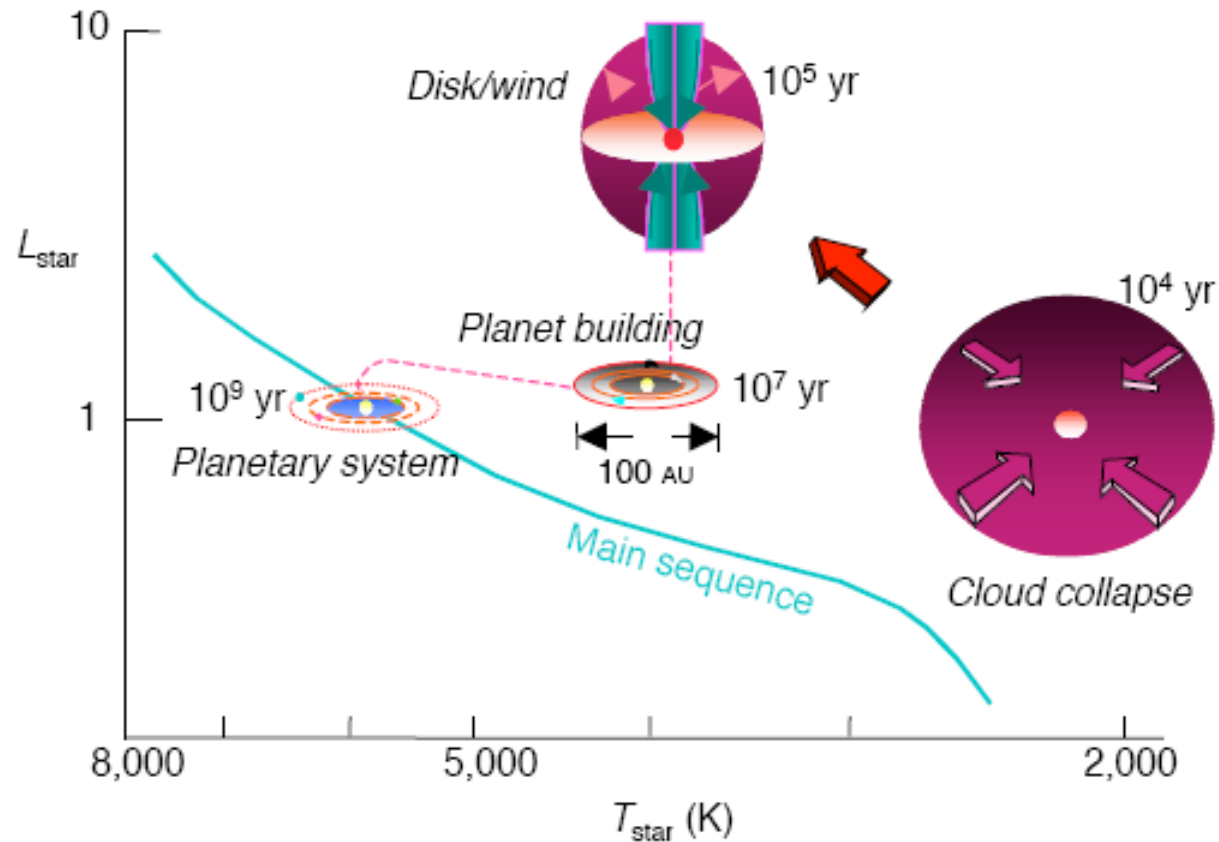
(момент вращения $\neq 0$)

=> Образование вращающейся оболочки
вокруг молодой звезды

□ Околозвездные диски

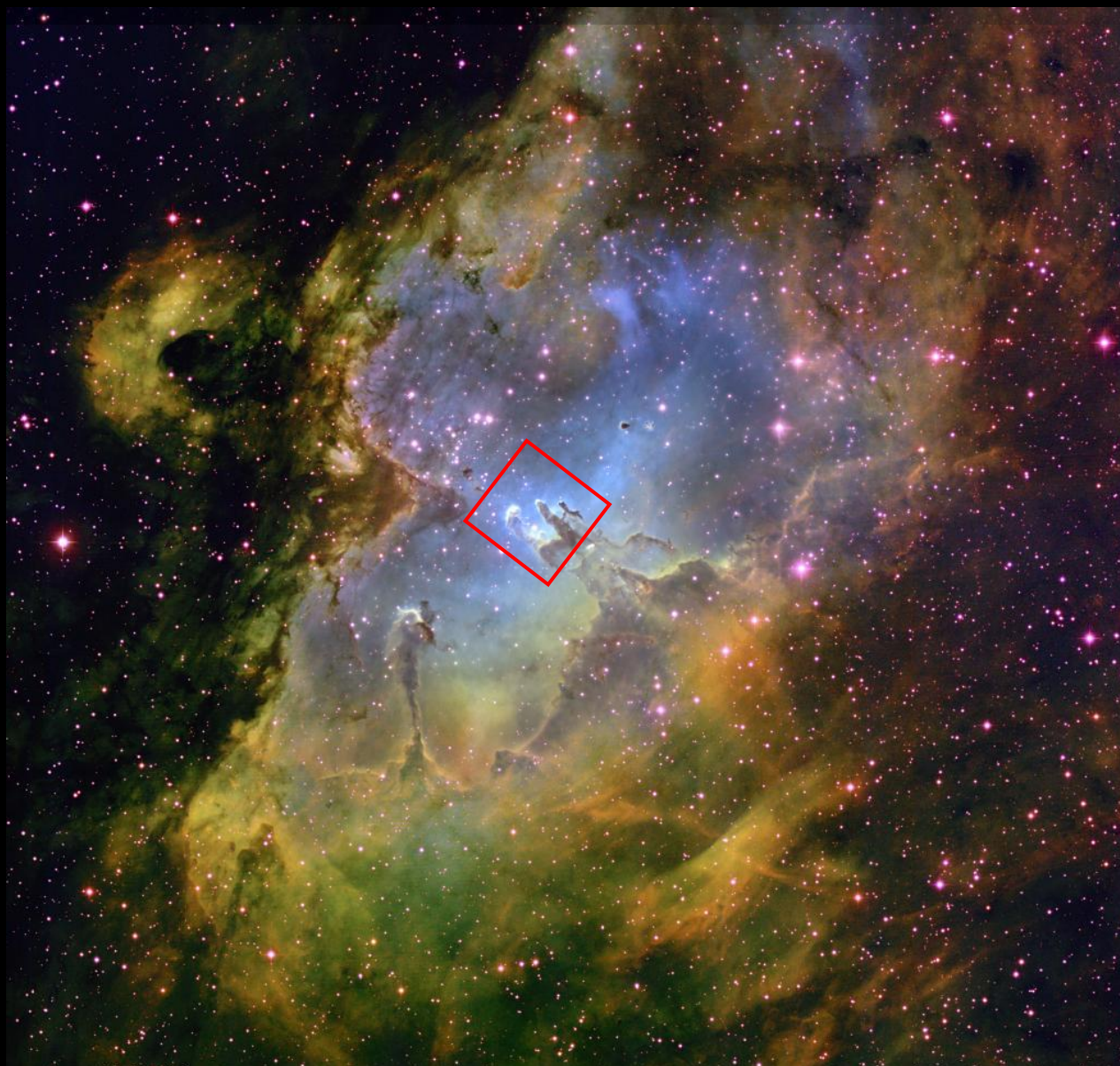
- “Резервуар” массы и момента вращения
- Внешняя среда и источник массы для образования планет
- Эволюция во времени (структура и состав)

Pre-main Sequence Evolution

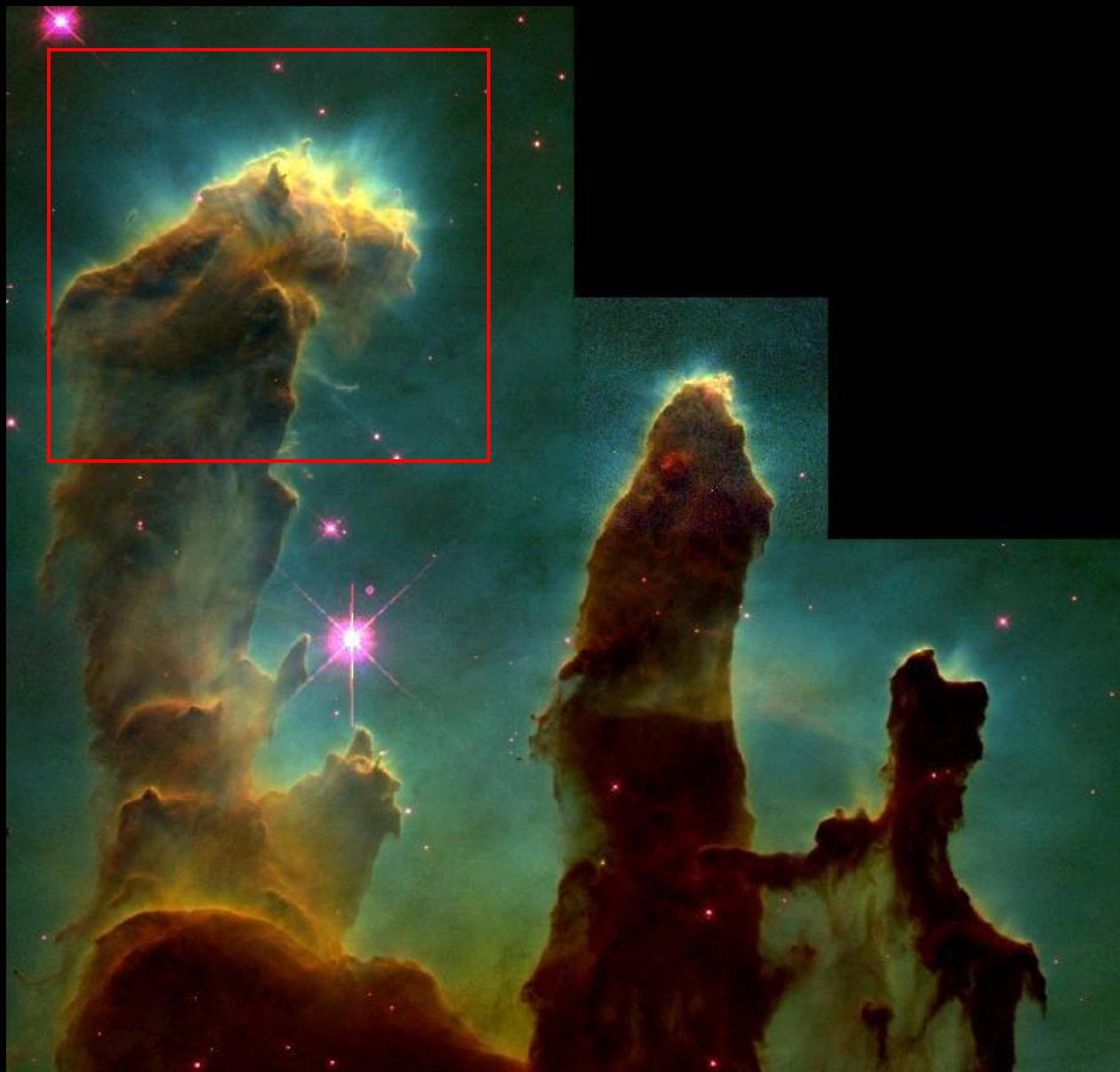


Приближение к месту рождения звезд

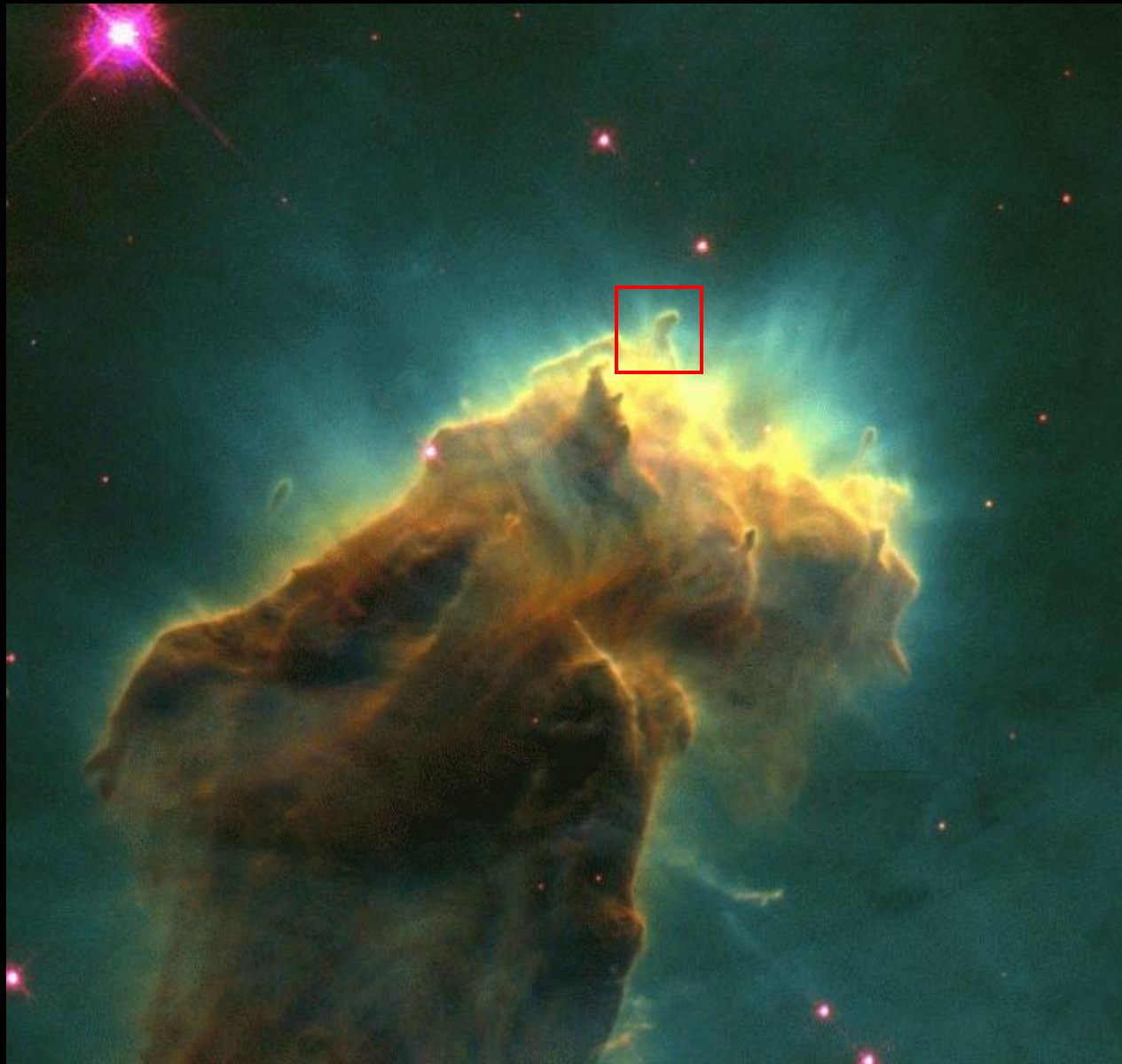




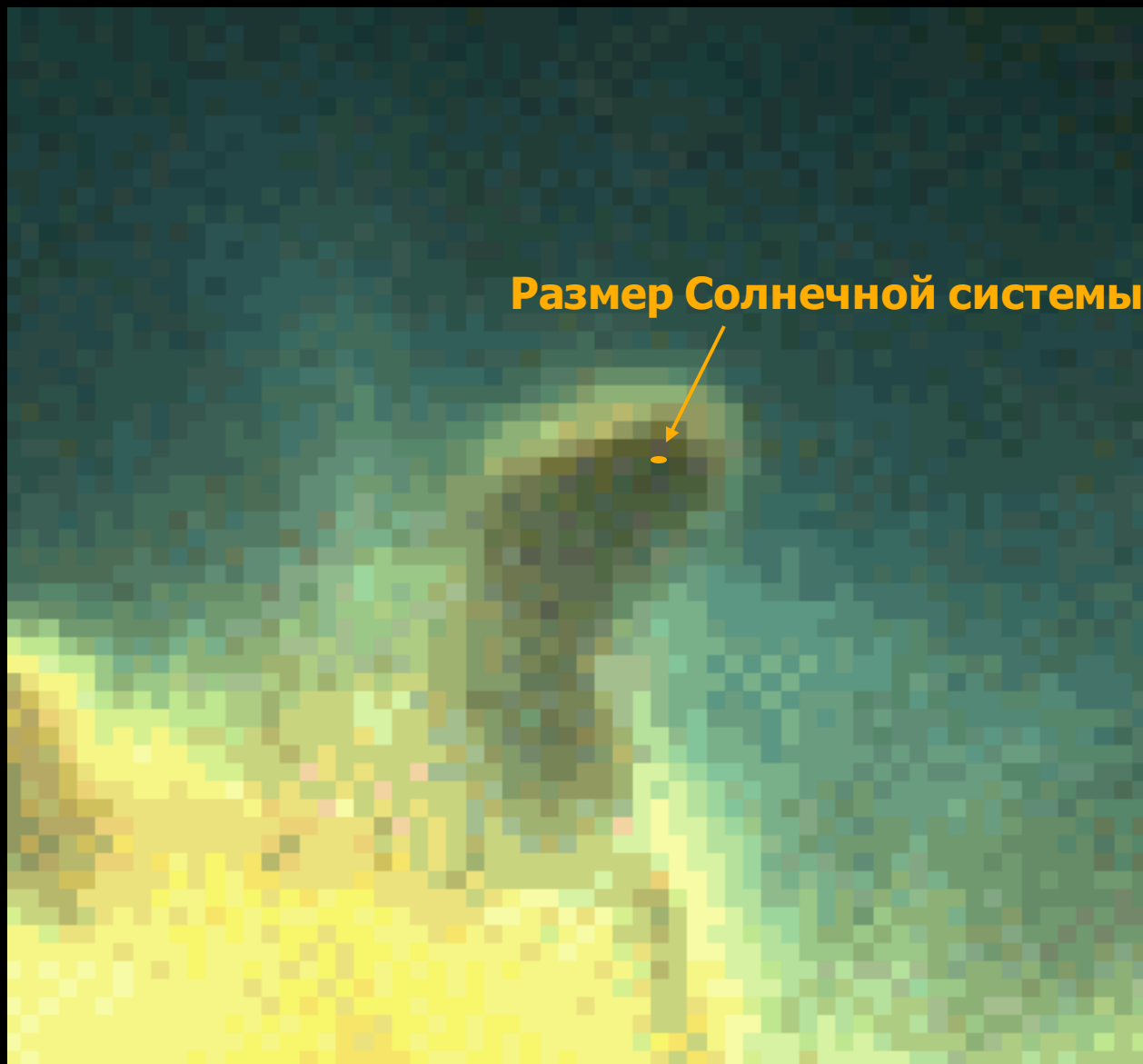
**Eagle
Nebula
(M16)**



**Eagle
Nebula
(M16)**



**Eagle
Nebula
(M16)**



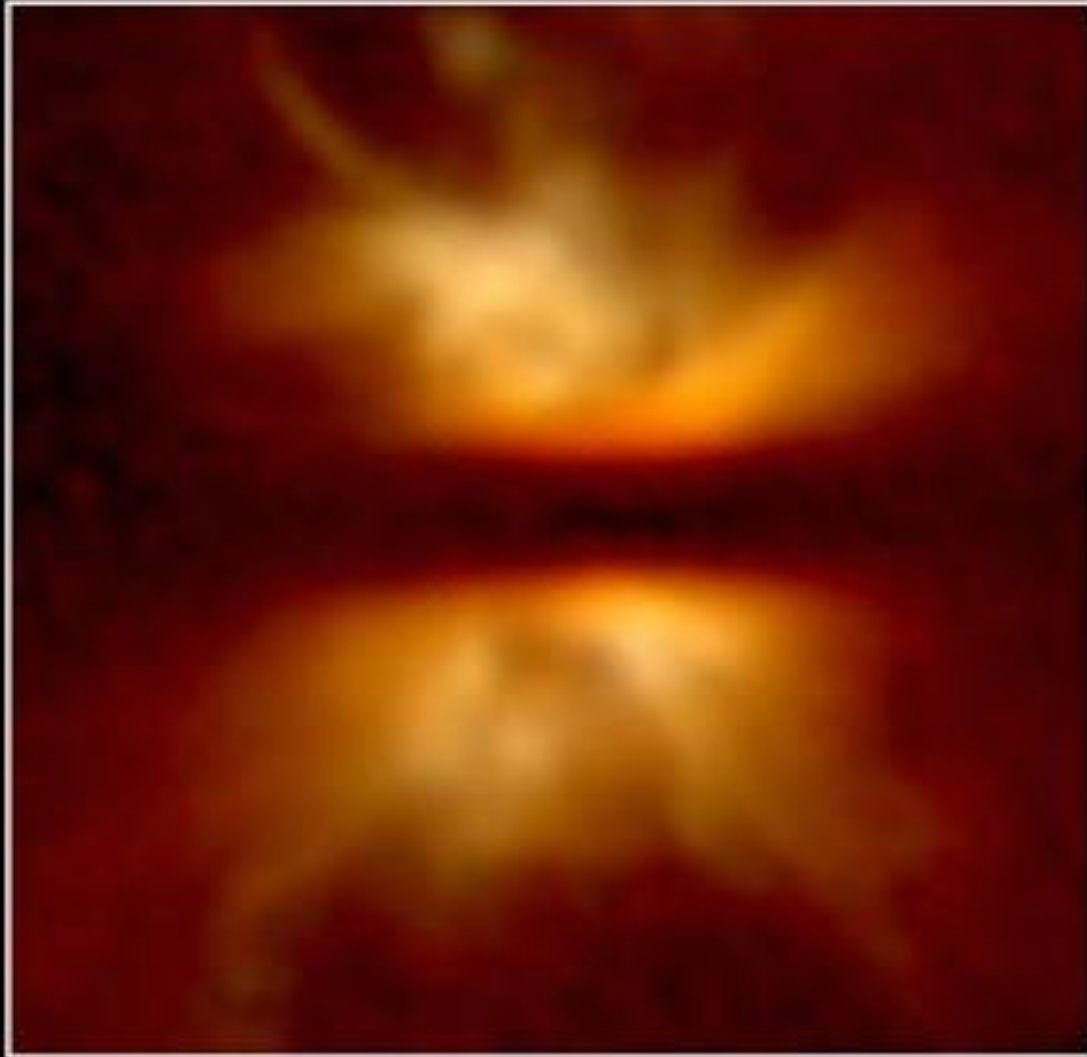
Размер Солнечной системы

**Eagle
Nebula
(M16)**

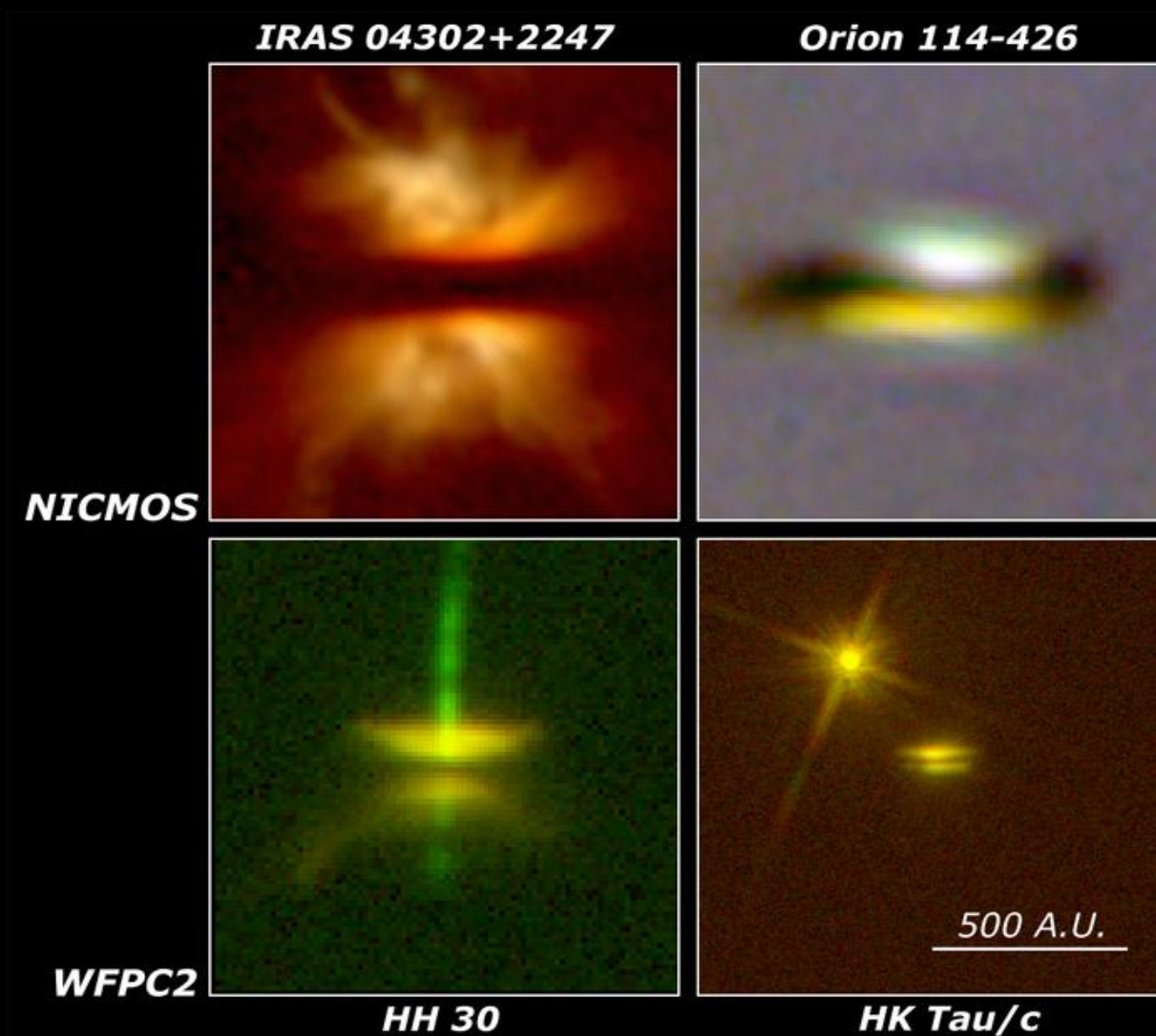


Вещество выметается из окрестности
протопланетного диска

IRAS 04302+2247



Остается звезда + протопланетный диск...

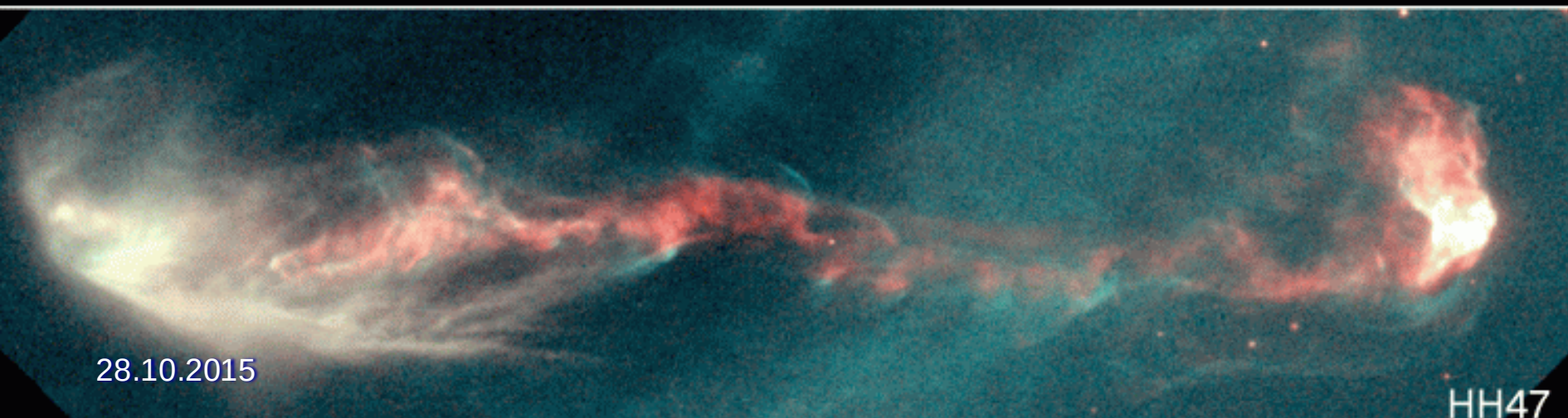
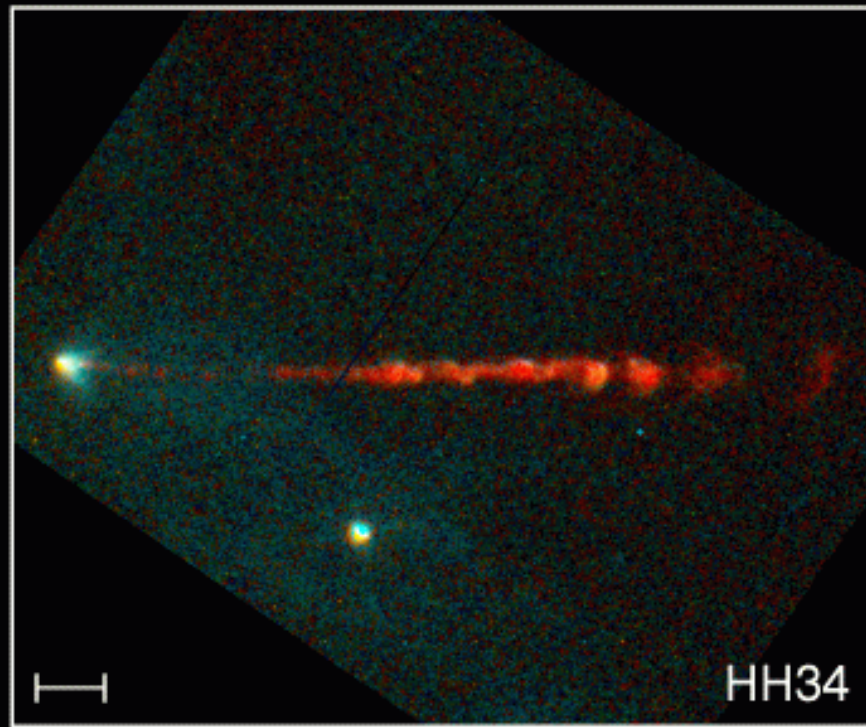
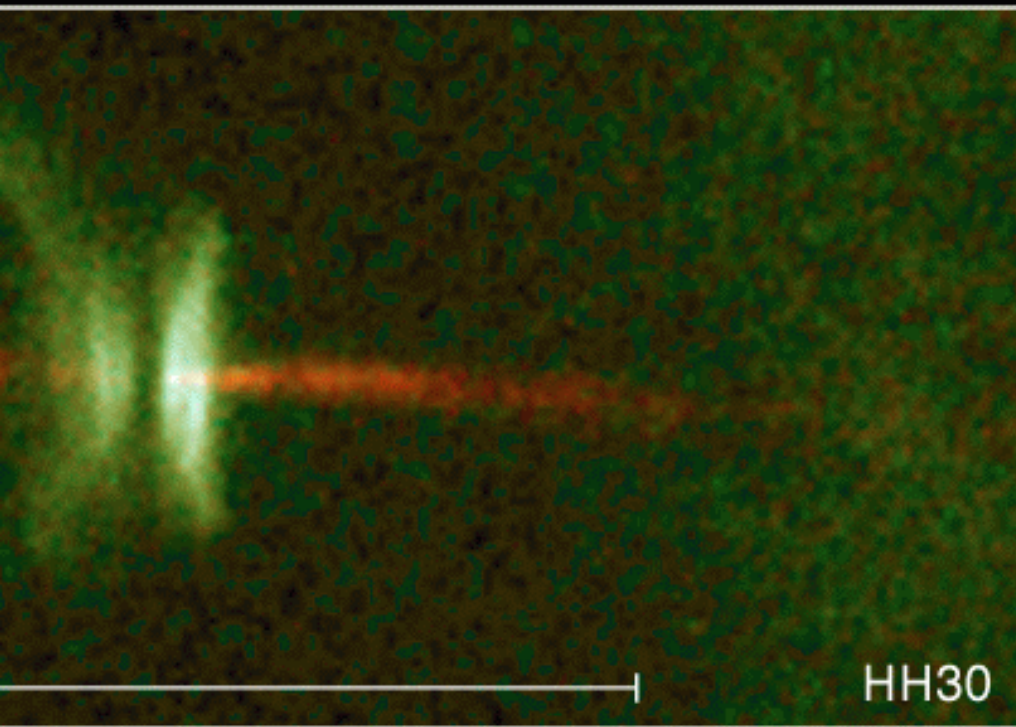


Протопланетные диски



28.10.2015
Edge-On Protoplanetary Disk

HST • W

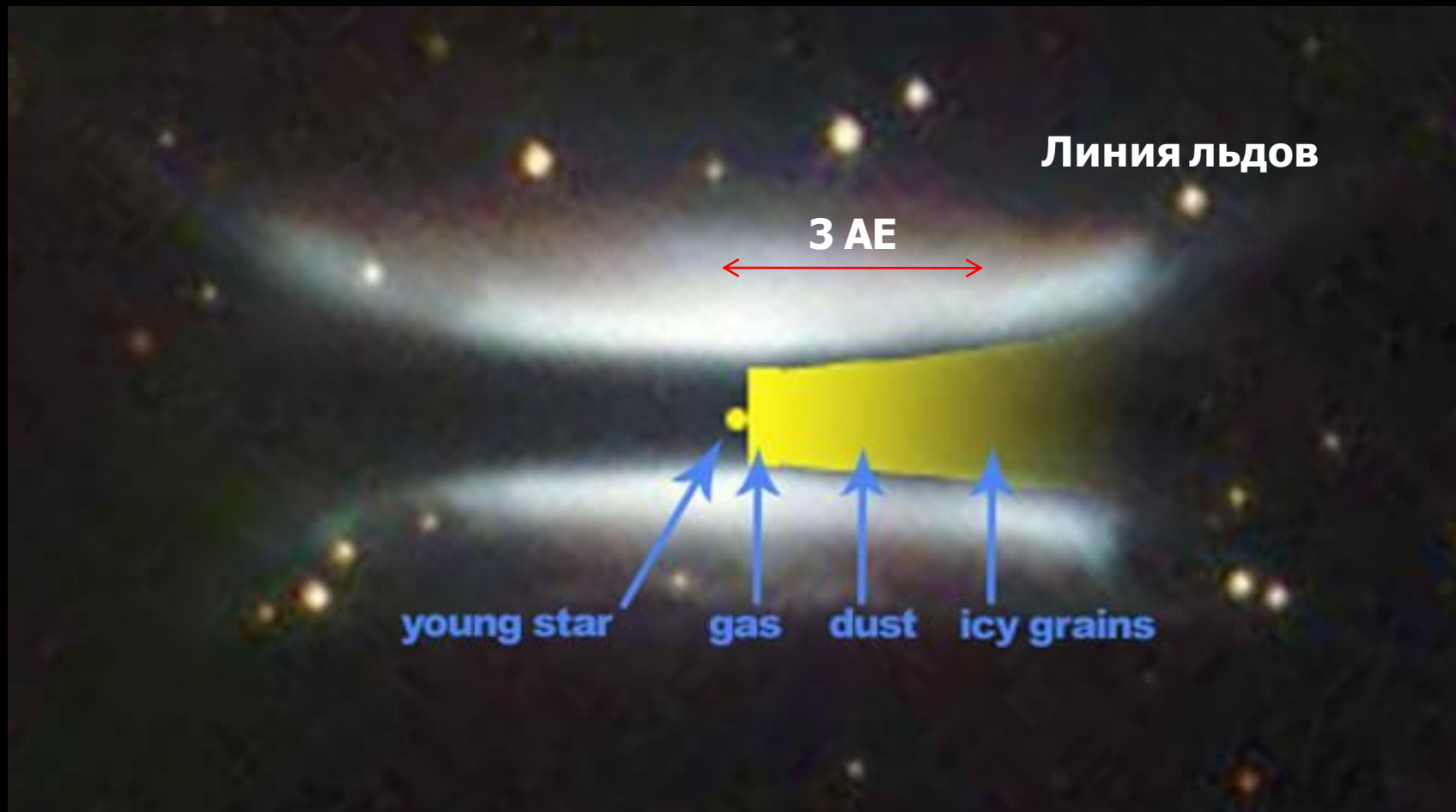


AU Microscopii

Size of
Neptune's
Orbit

28.10.2015

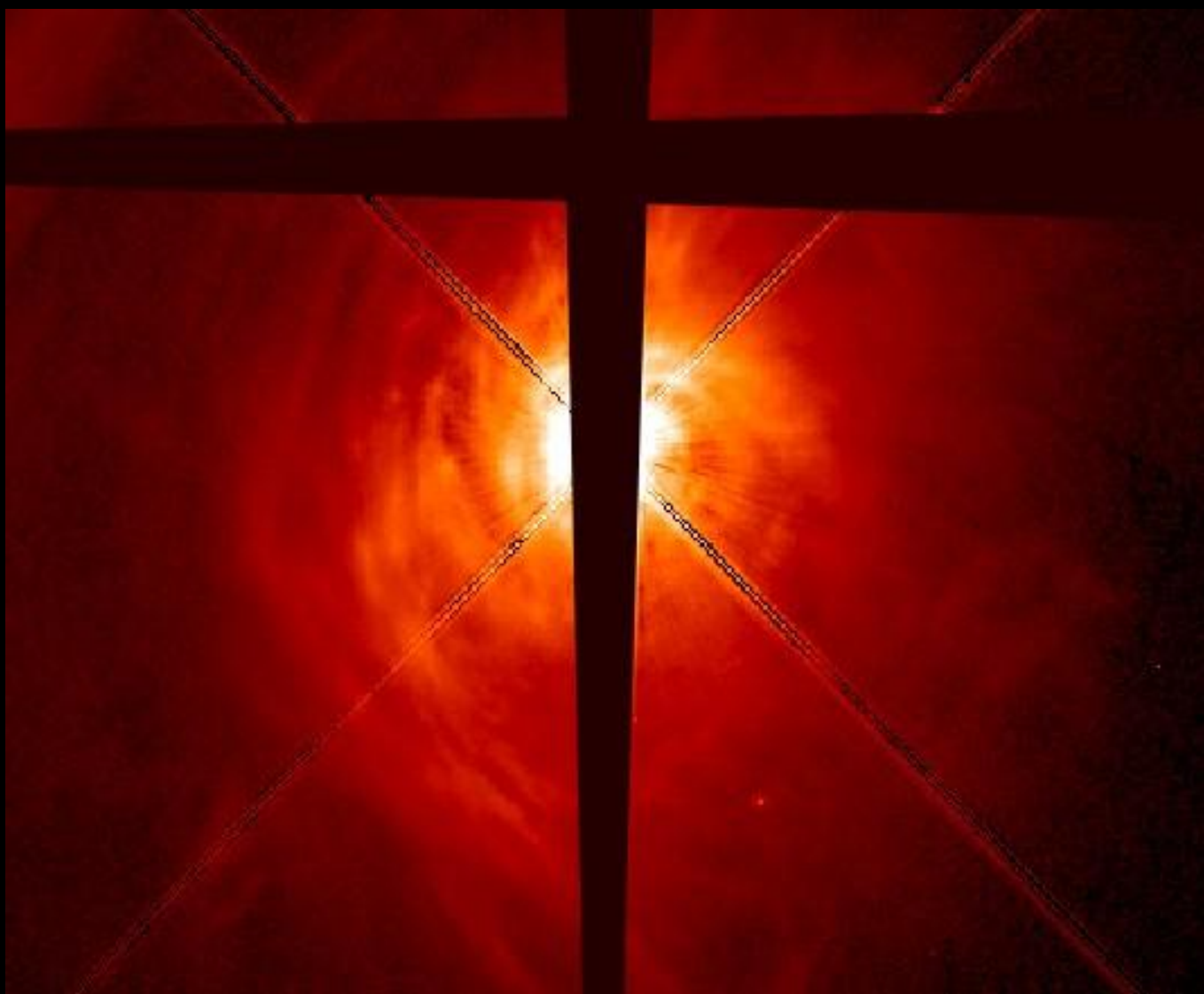






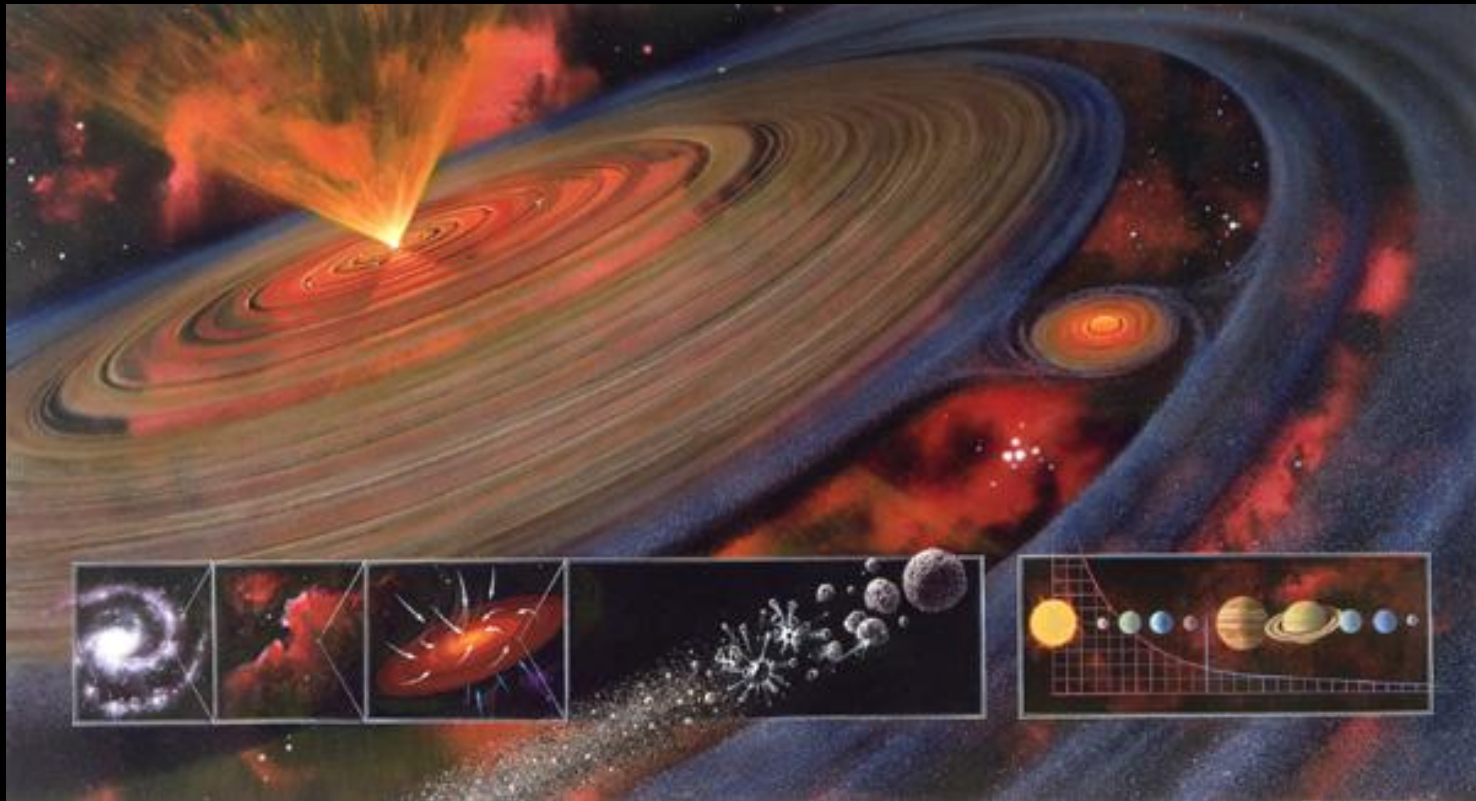
28.10.2015

Вот как это видит космический телескоп



HST image of AB Aurigae by Carol Grady

Планеты формируются в диске

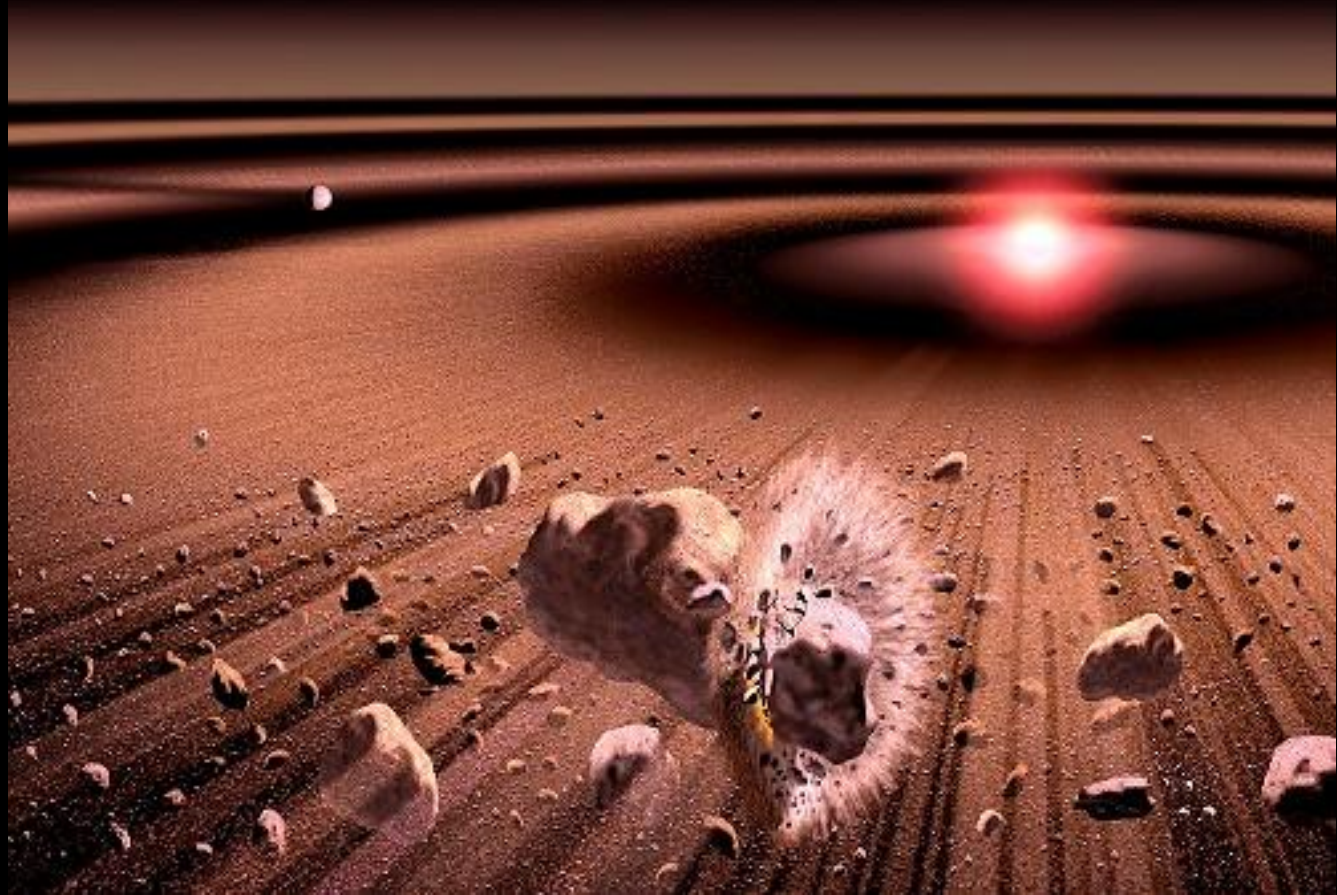


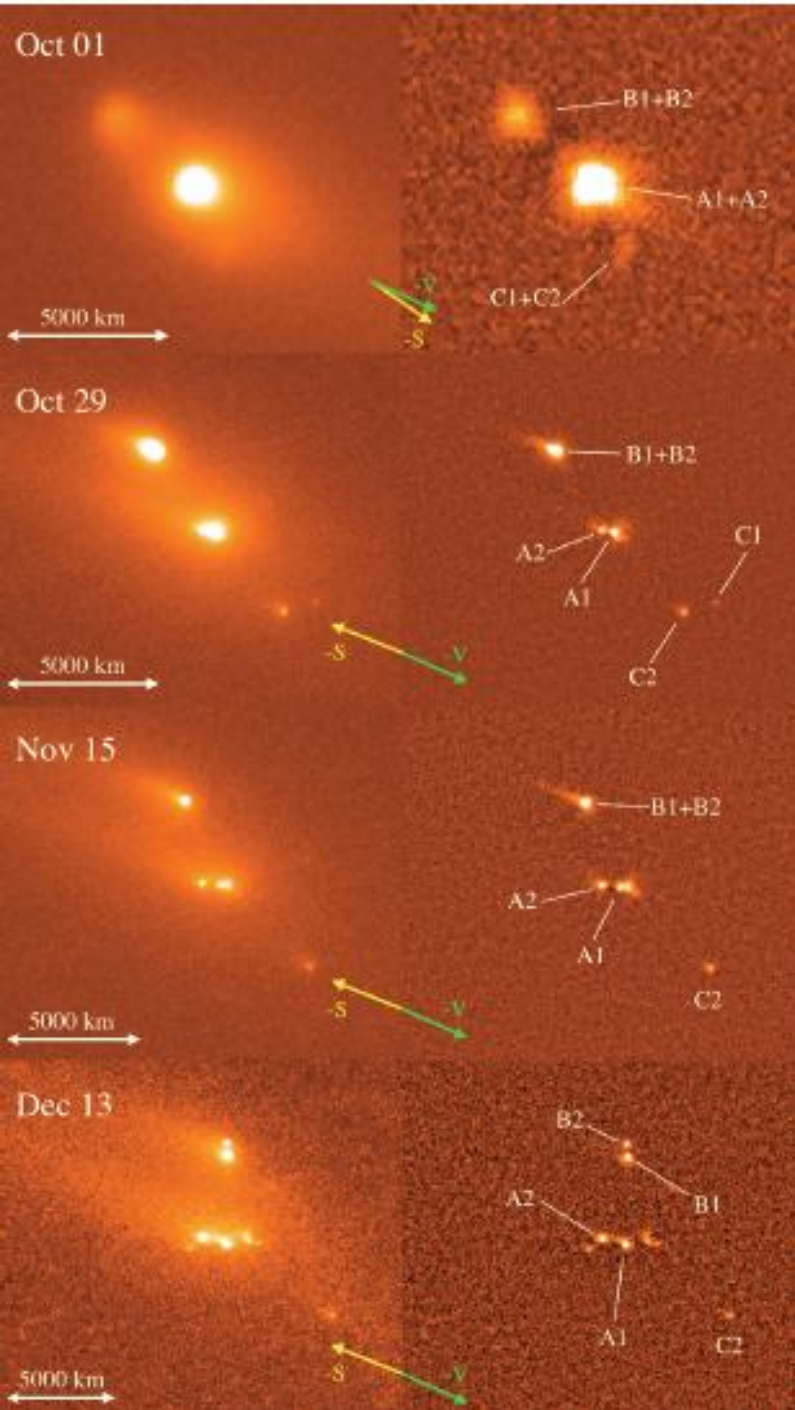
Так видит этот процесс художник...



28.10.2015

Рост планетезималей:
слипание + аккреция
Разрушение: столкновения



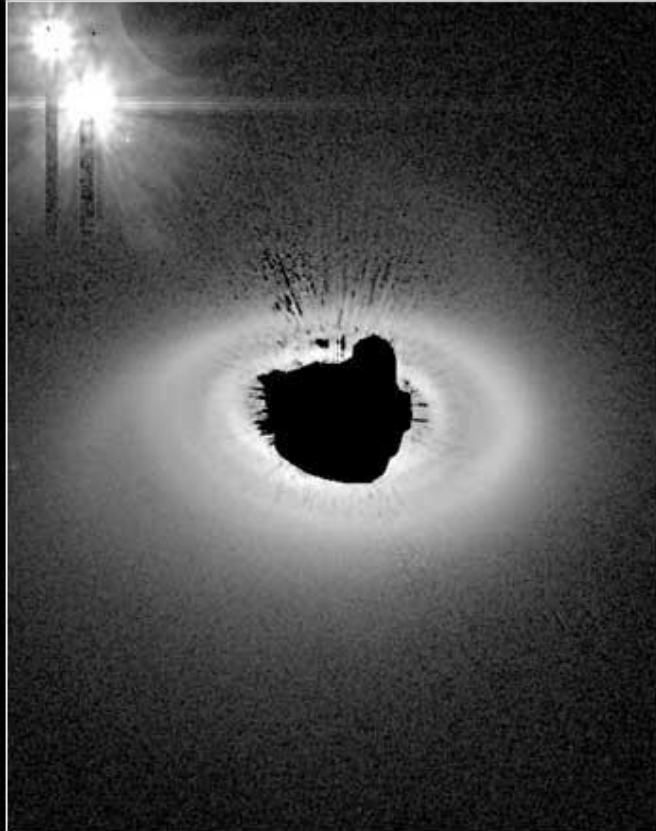


Разрушение астероида P 2013/R3 «на глазах»

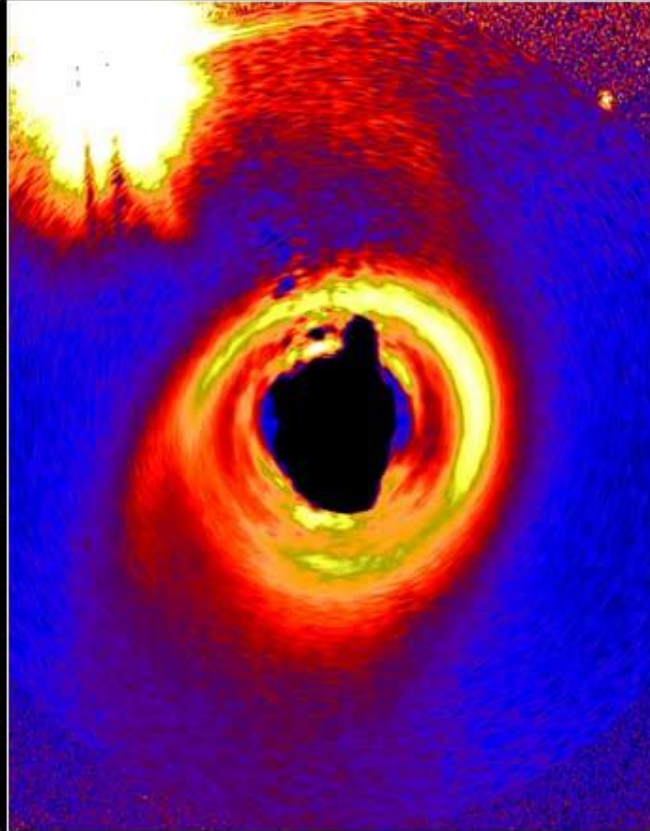
Jewitt et al. 2014

Как это видит космический телескоп...

HD 141569 Circumstellar Disk



HST • ACS



NASA, M. Clampin (STScI), H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCO/Lick), J. Krist (STScI),
D. Ardila (JHU), D. Golimowski (JHU), the ACS Science Team and ESA

STScI-PRC03-02

Стадии формирования планет

1 μm

- Слипание пылевых частиц в км планетезимали. Газ и пыль перемешаны.

1 km

- Образование зародышей планет ~ Луны
Много гравитационно-взаимодействующих частиц. Гравитация играет главную роль. Столкновение планетезималей и их слипание ведет к образованию крупных объектов.

10^3 km

- От зародышей (эмбрионов) к планетам земной группы и ядрам планет-гигантов. Много массивных изолированных тел. Динамическое взаимодействие приводит к пересечению орбит и столкновениям.

10^4 km

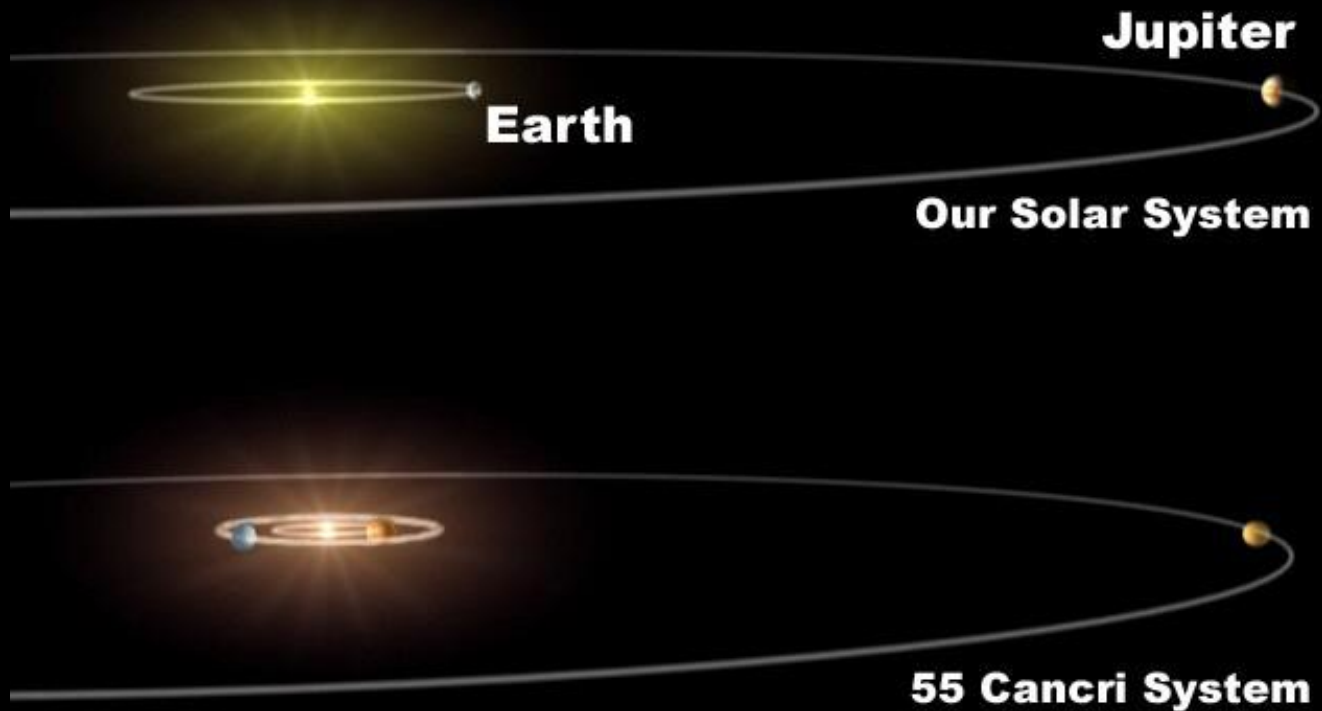
- Аккреция газа и образование ядер планет-гигантов



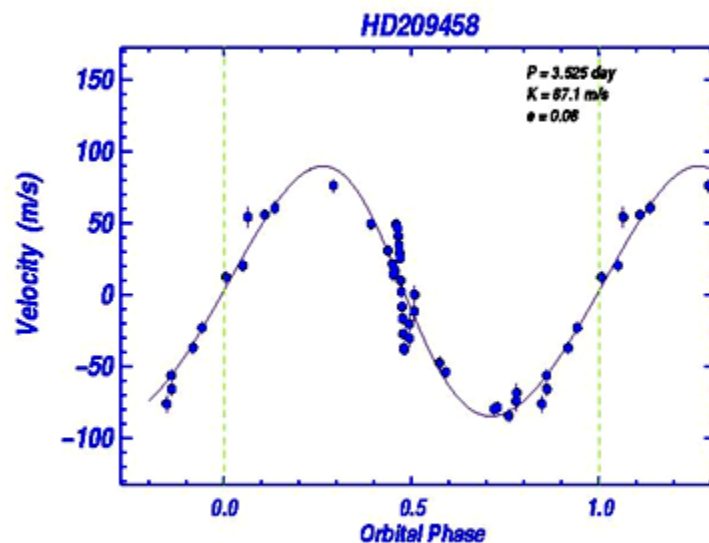
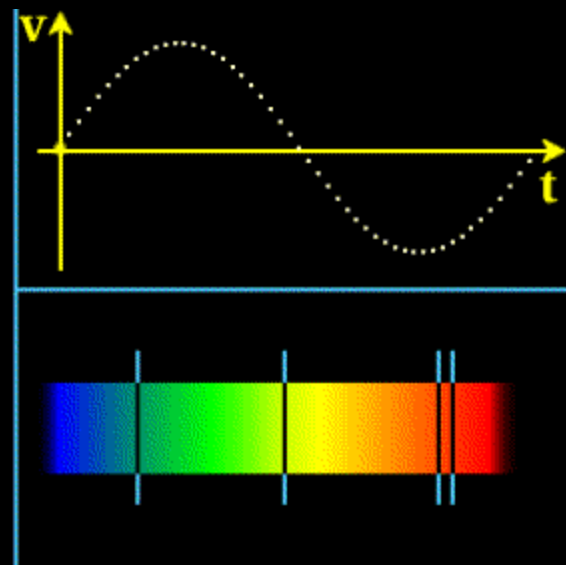
www.pearson.de

Часть 4. Коротко об экзопланетах

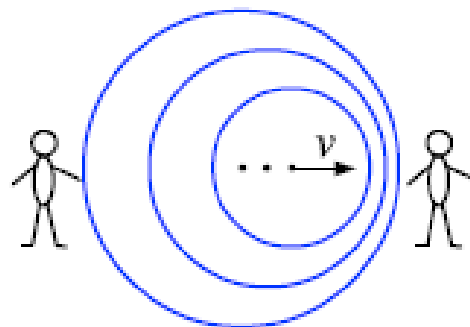
ЭКЗОПЛАНЕТЫ (22 октября 2015: свыше 6000), См. <http://exoplanets.org>



- Открыты в 1991 (1я – вокруг нейтронной звезды – пульсара PSR 1957+12)
- Основной метод** – спектроскопический (эффект Доплера). Современная точность измерения скоростей до 10 м/с



$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c - v}{c + v}}$$

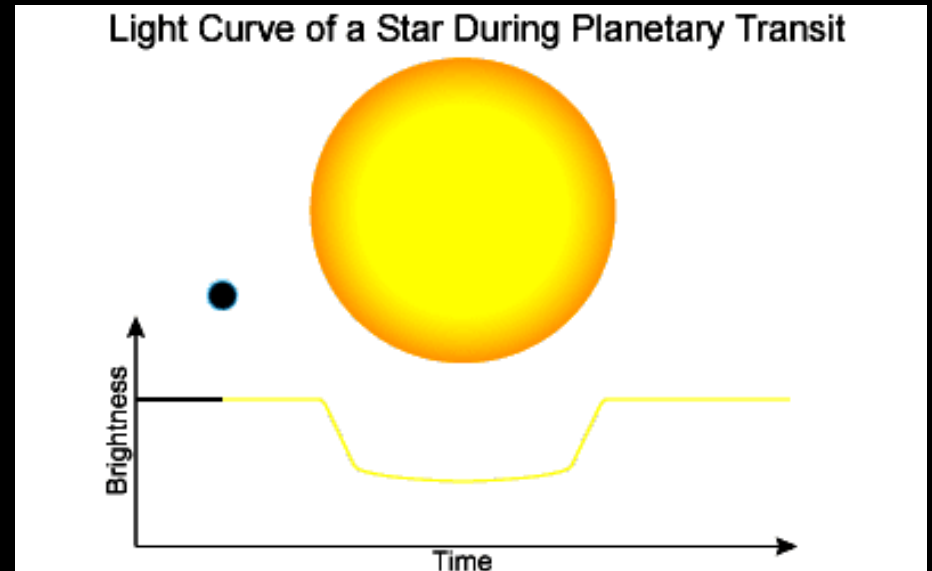


$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c + v}{c - v}},$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{V}{c}$$

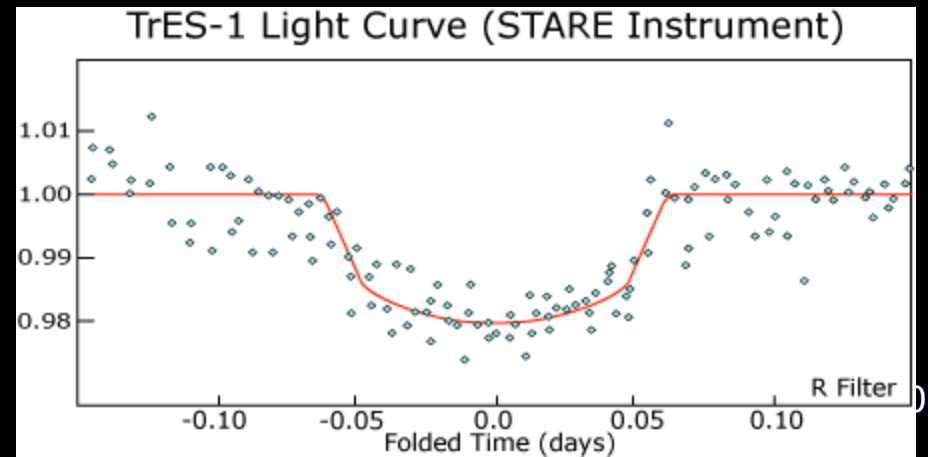
Фотометрический метод.

Прохождение планеты по диску звезды вызывает периодические изменения блеска



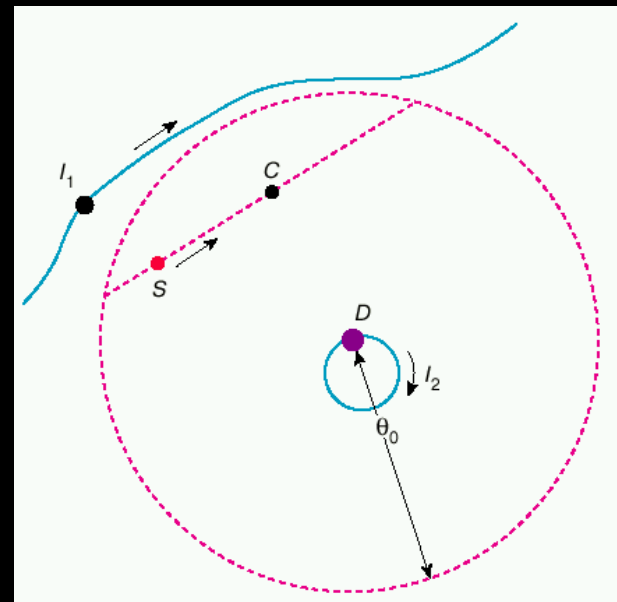
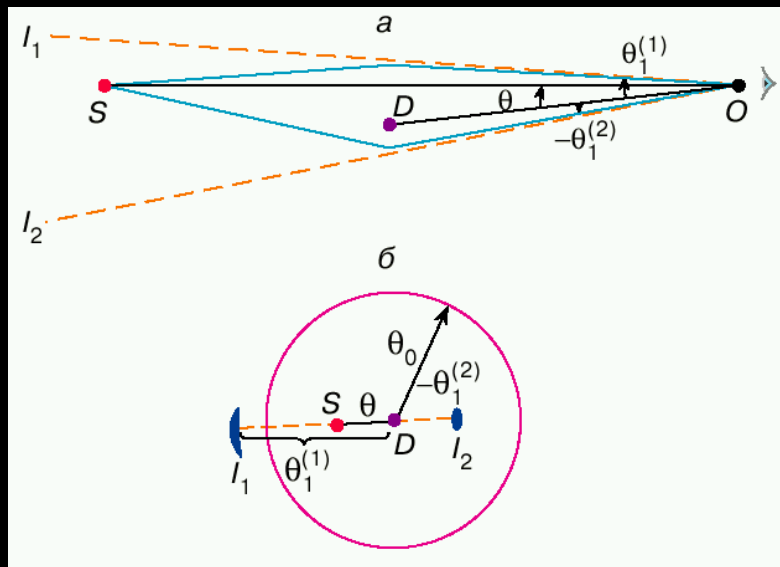
**2011: первые планеты
суб-земной массы**

28.10.2015



Гравитационное микролинзирование

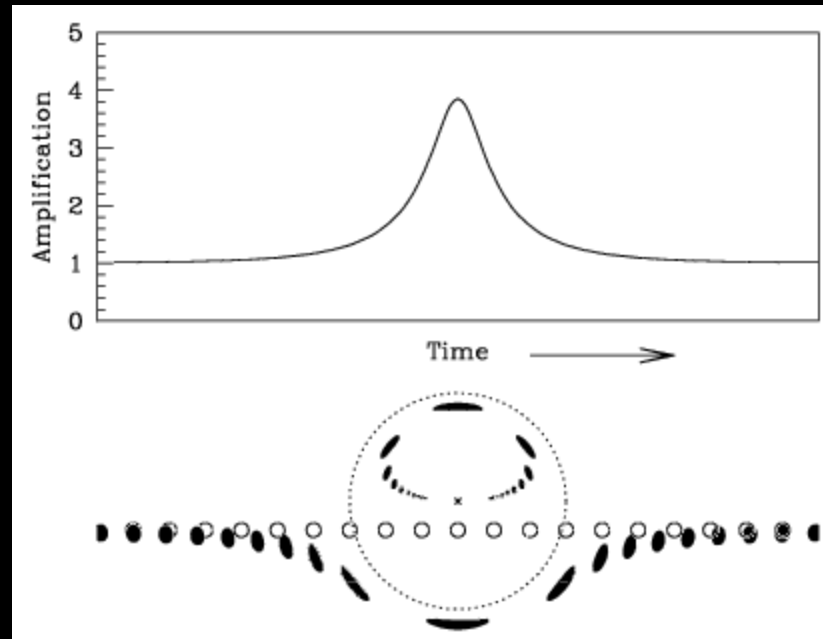
Эйнштейн, 1936

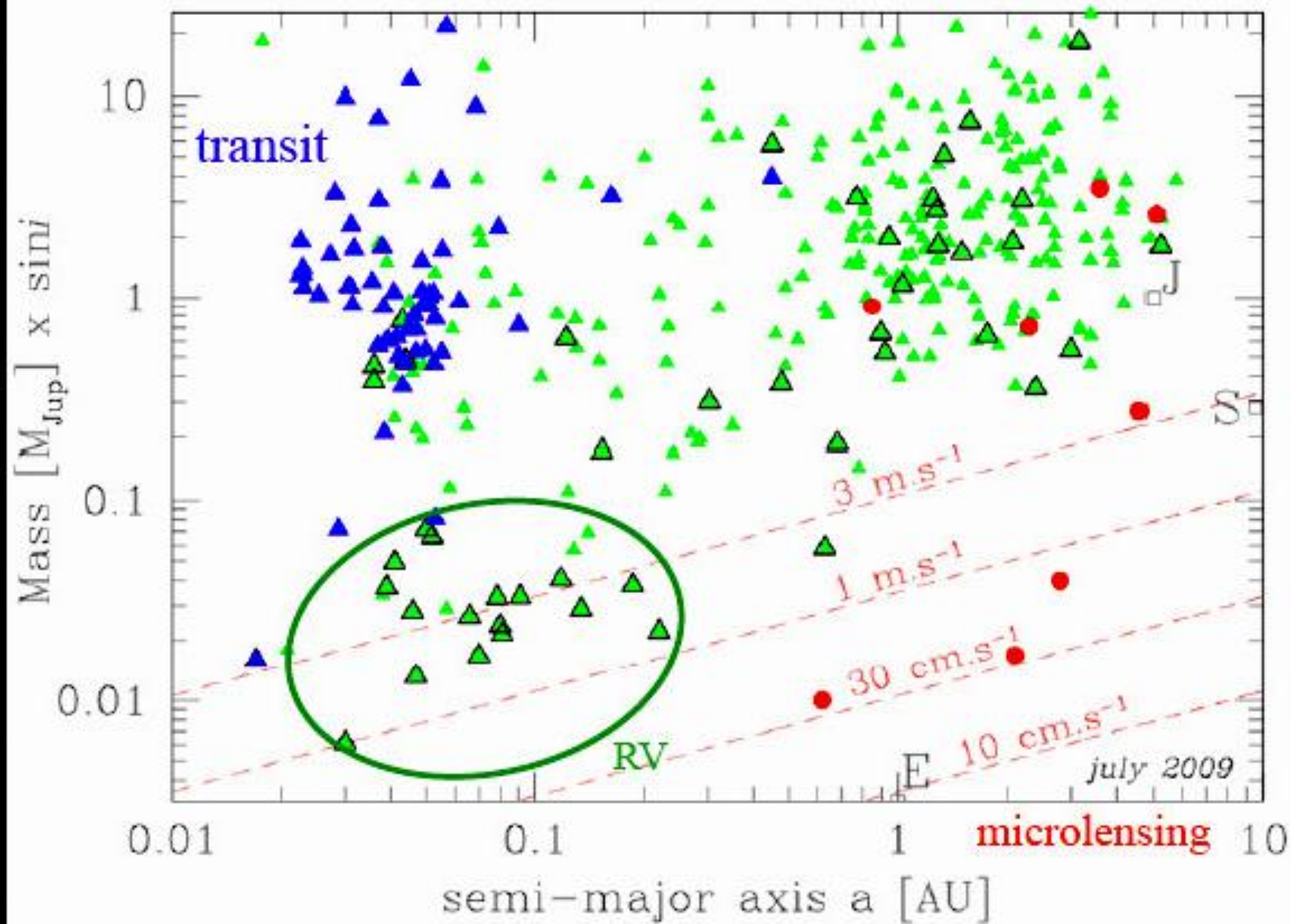


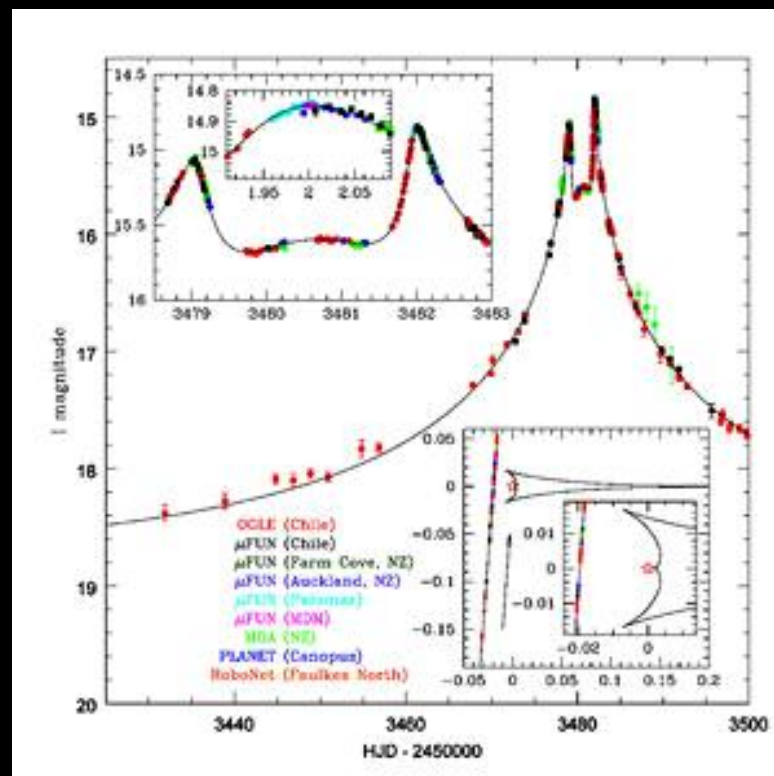
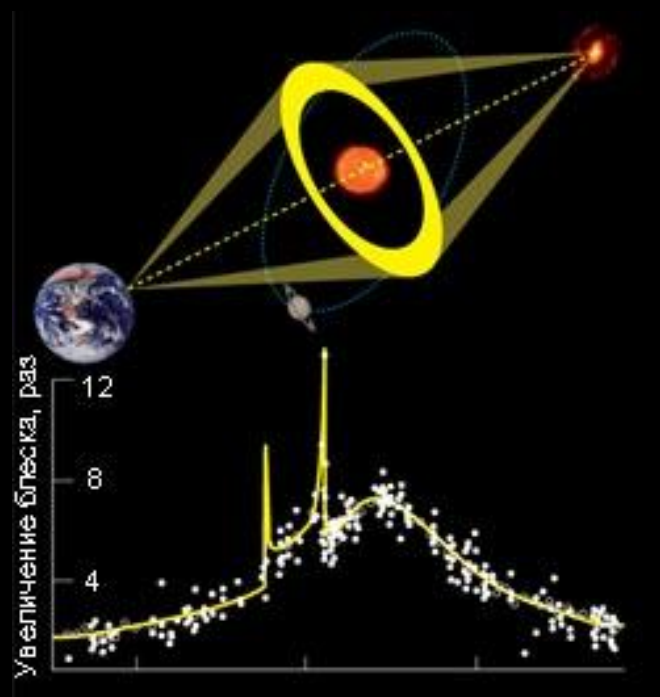
$$\theta_0^2 = \frac{4Gm}{c^2} \frac{L_{SD}}{(L_{SD} + L_{OD})L_{OD}},$$

$$\theta_1^2 - \theta_1 \theta - \theta_0^2 = 0$$

- Суммарная интенсивность изображений больше, чем интенсивность источника
- Если изображения не разрешаются по отдельности, то возникает эффект «микролинзы» -- усиление яркости при пересечении линзой направления на источник







Планеты типа Земли.

Астробиология

Current Potential Habitable Worlds

Compared with Earth and Mars and Ranked in Order of Similarity to Earth



Earth
1.00



Mars
0.66



#1
Gliese 581 g
0.92



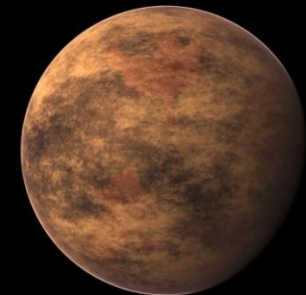
#2
Gliese 667C c
0.85



#3
Kepler-22 b
0.81



#4
HD 85512 b
0.77



#5
Gliese 581 d
0.72

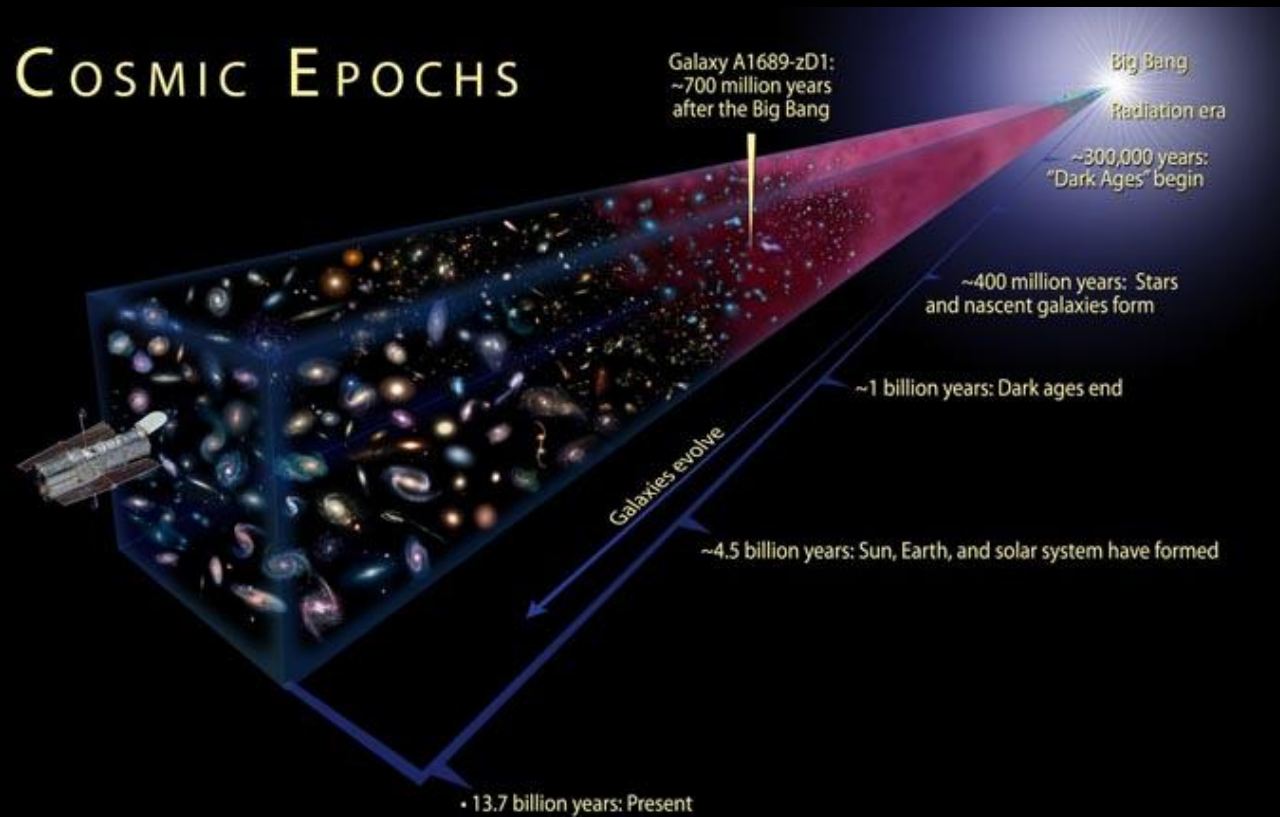
Last Update: July 20, 2012

CREDIT: The Habitable Exoplanets Catalog, PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu)

28.10.2015

Часть 5. Первые звезды (население III)

- Самые первые звезды из «чистой» МЗС с первичным химсоставом
- Ожидается их образование на $z \sim 20-30$



- Для образования планет земной группы нужно обогатить МЗС тяжелыми элементами по крайней мере до 10% от солнечного химсостава
- Вероятно, первые планеты земной группы образовывались гораздо позже, чем первые звезды
- Первые звезды планируется наблюдать новыми крупными наземными (30м) телескопами и космическими телескопами (JWST)

Заключение

- Звездообразование из холодных молекулярных облаков
- Физическая причина – гравитационная неустойчивость. Звездообразованию может препятствовать магнитное поле и вращение
- Образование звезд сопровождается образованием протопланетных газо-пылевых дисков
- Формирование планет в протопланетных дисках из-за слипания пылинок в планетезимали, аккреции газа и динамических взаимодействий
- Звезда без планет – исключение
- Новая область астрономии - астробиология



28.10.2015