

Образование звезд и планетных систем

Image credit: Michael Sherick

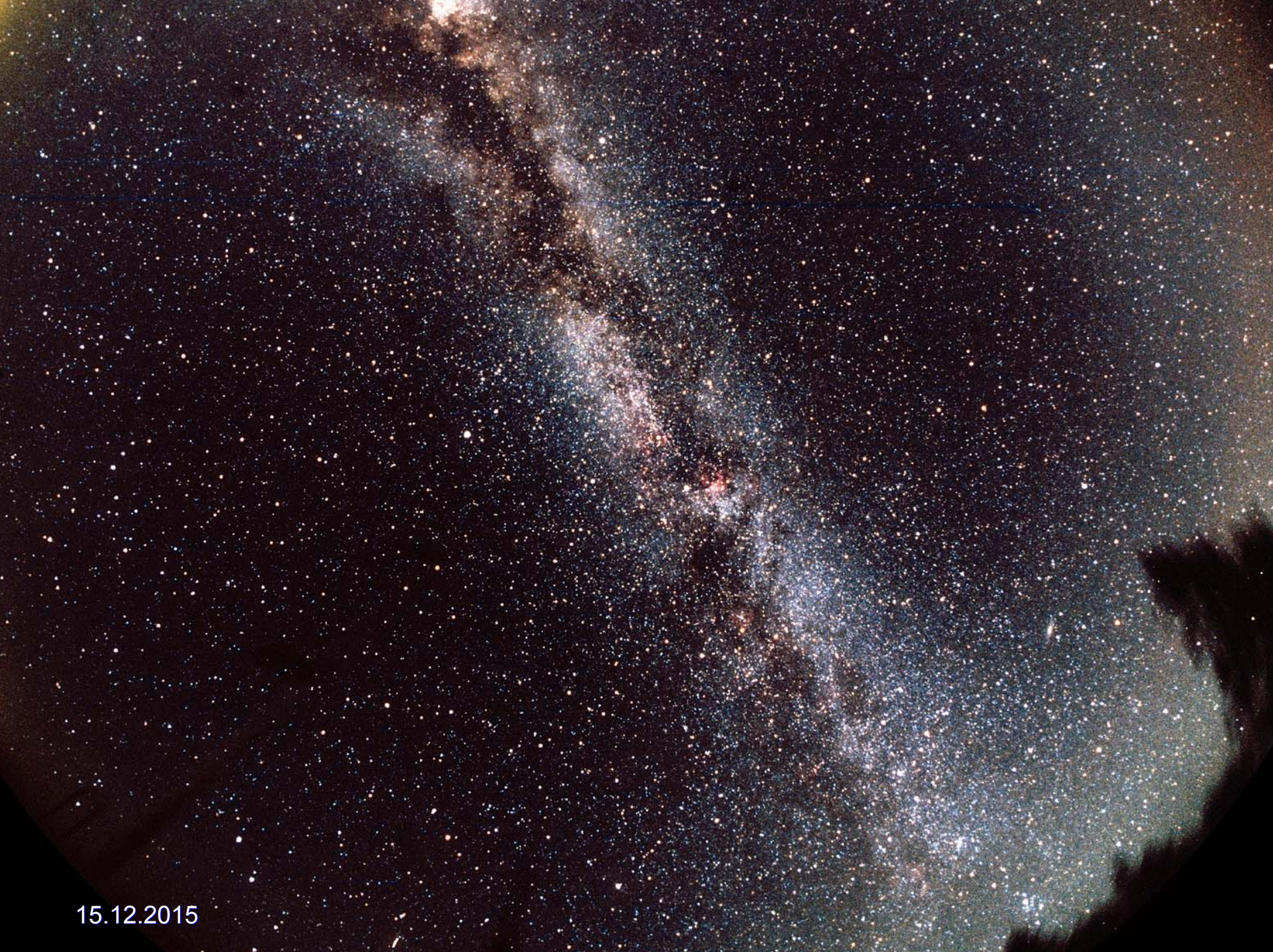


К.А. Постнов
ГАИШ МГУ

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



15.12.2015

Наша Галактика – Млечный путь



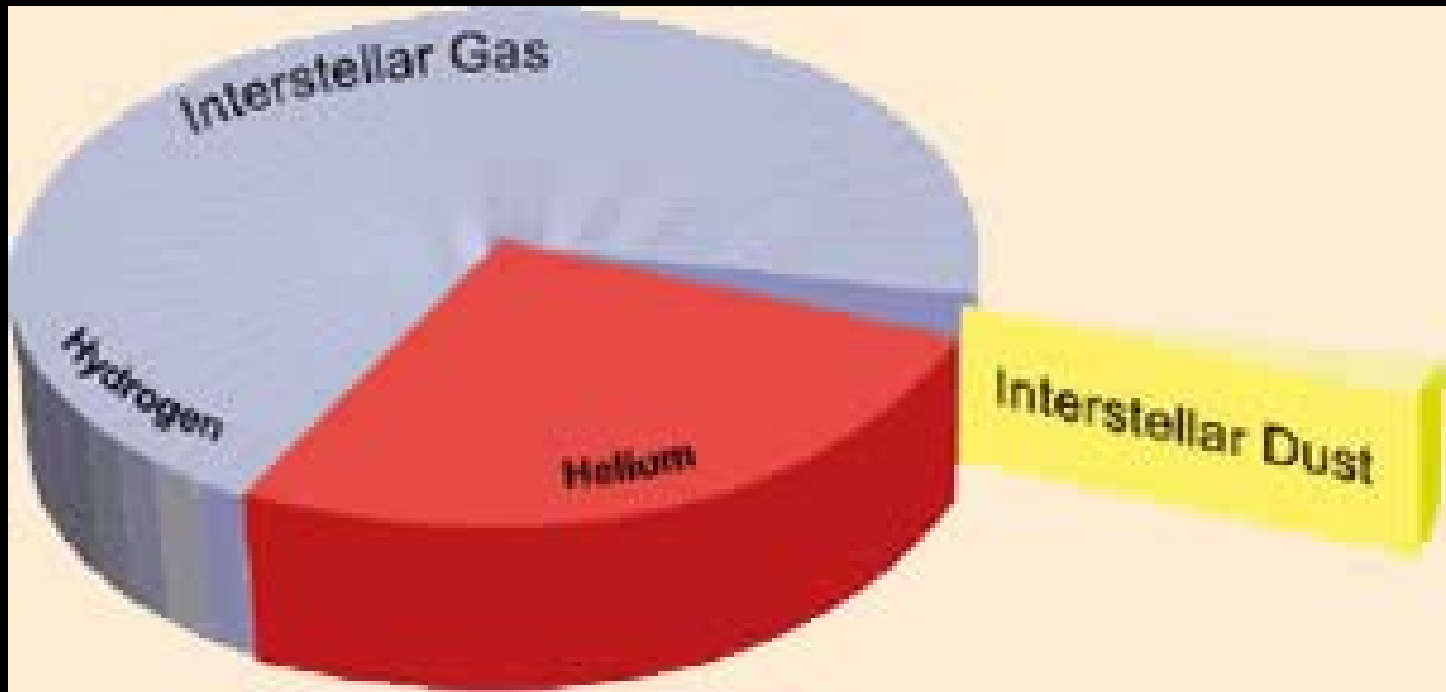
© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

15.12.2015

Состав Галактики

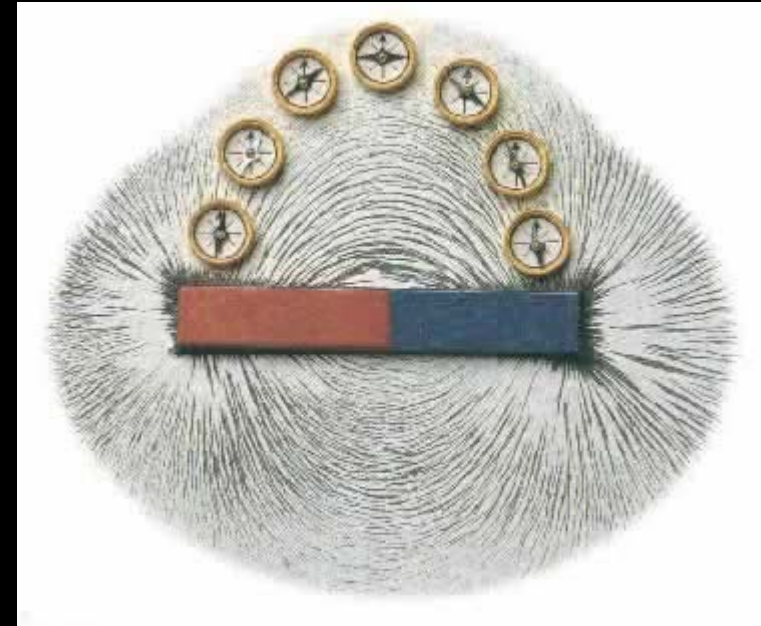
- Видимое вещество
 - Звезды (~ 100 млрд)
 - Газ 10%
 - Пыль 1%
- Невидимая материя (темное вещество - скрытая масса) – не взаимодействует со светом. Одна из ключевых проблем современной астрофизики

Межзвездный газ и пыль



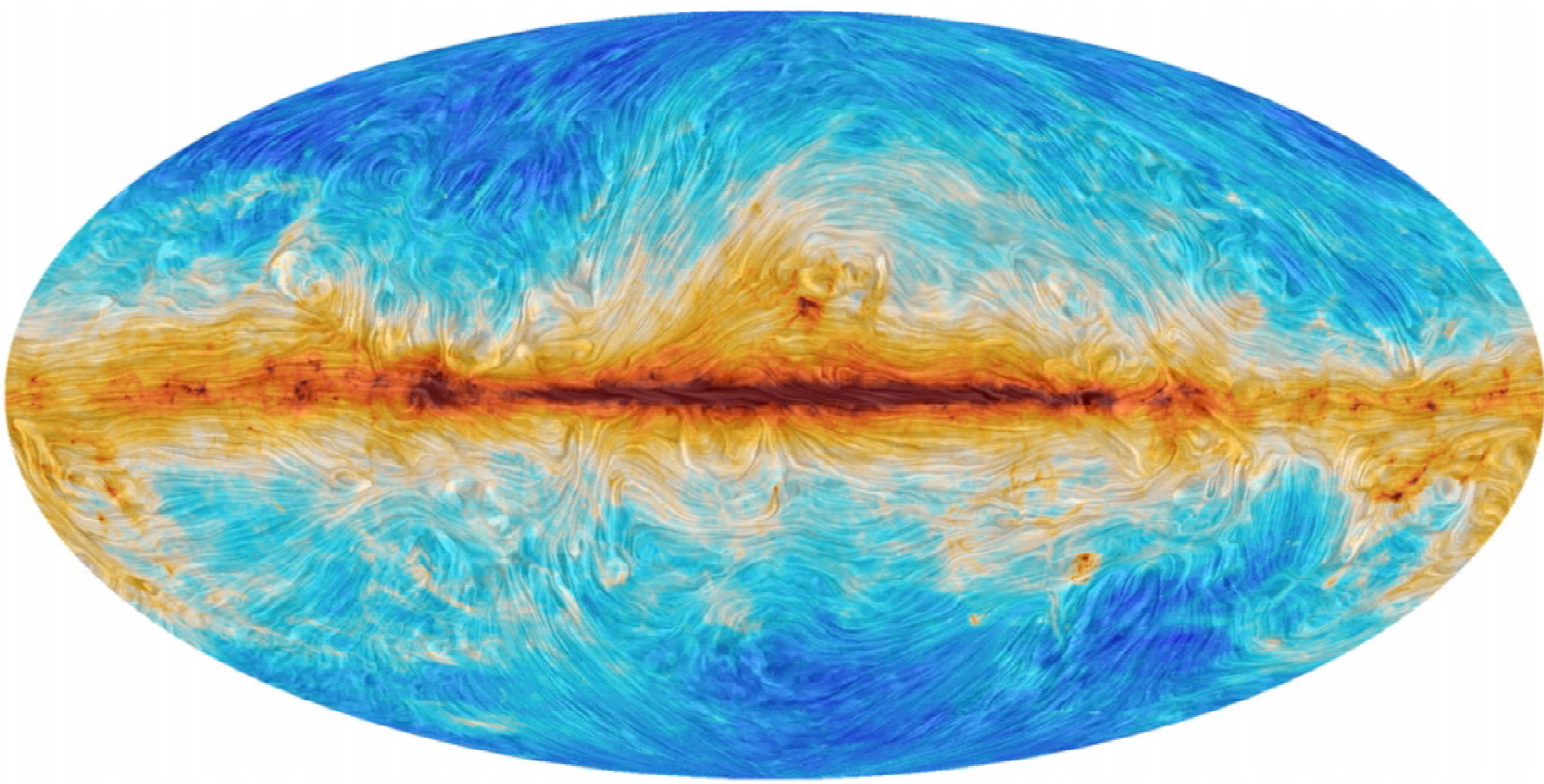
Магнитные поля в Галактике

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

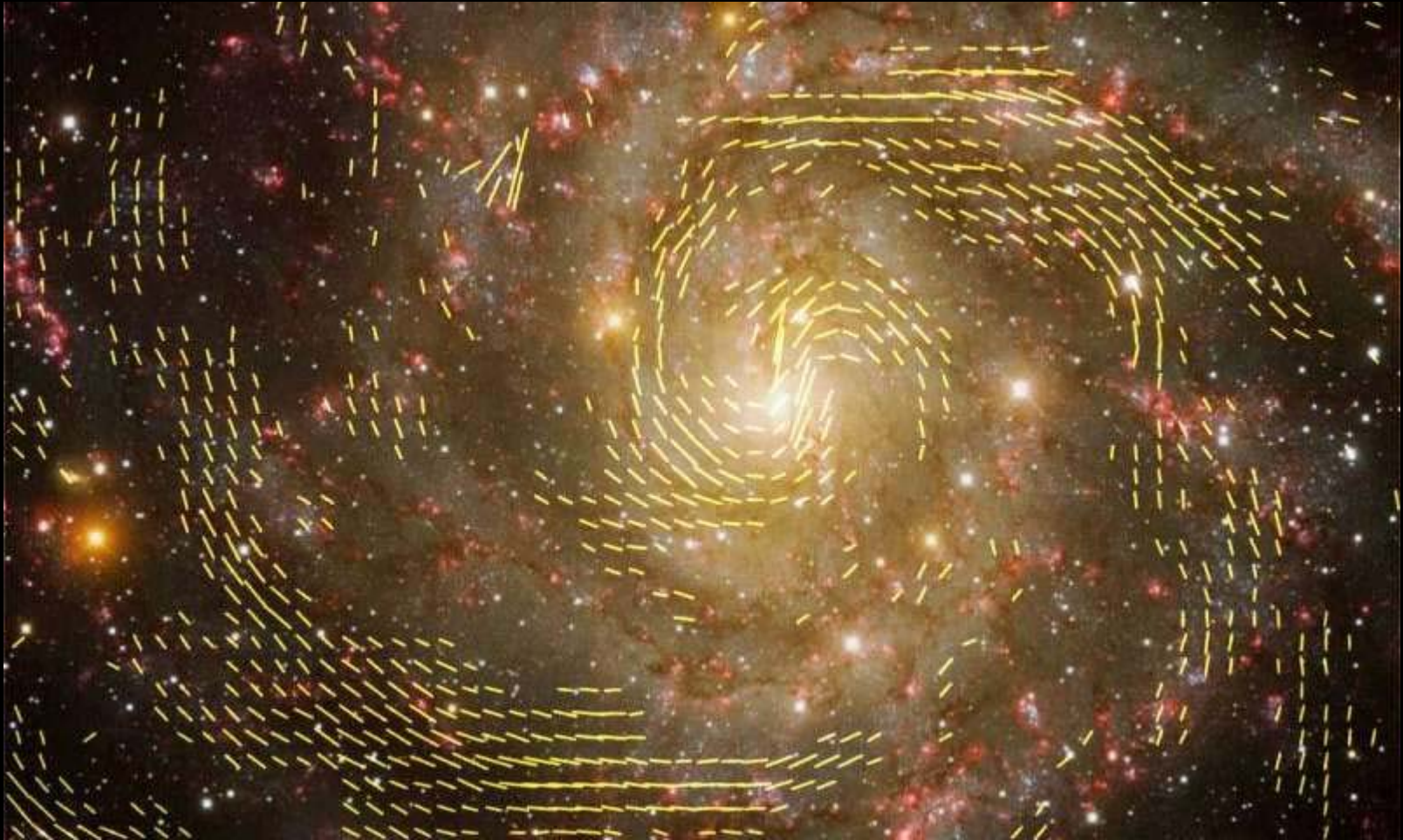


Пылинки – маленькие магниты

М.п. Галактики по данным Planck (2015)



Магнитное поле «вытянуто» вдоль спиральных рукавов



Основные состояния межзвездного газа:

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

(Рентген, жесткий УФ)

Теплый ионизованный (около 10 тыс. K)

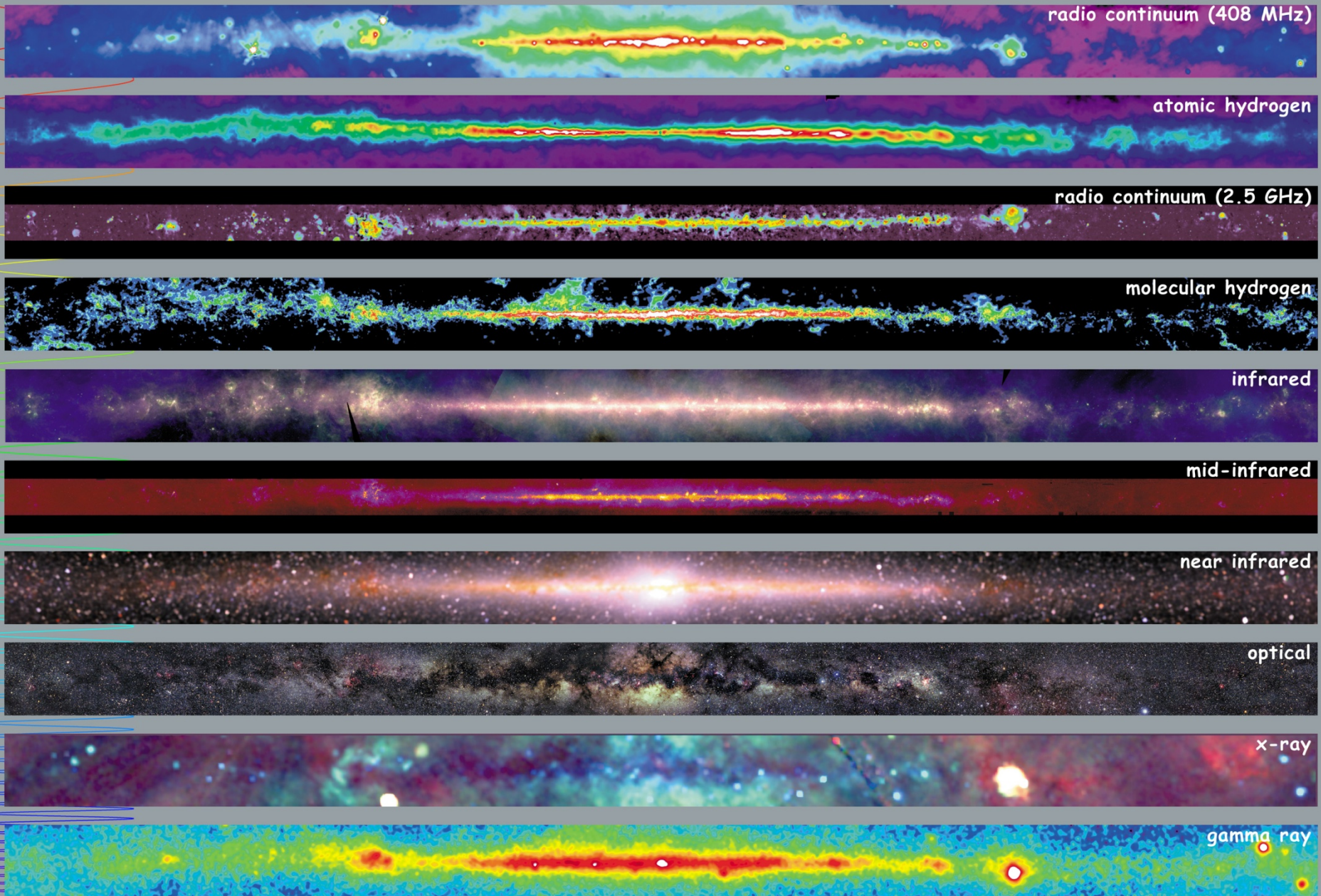
(Оптика, радио)

Атомарный (HI) (от 100K до 8000K)

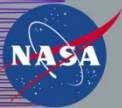
(Радио 1420 МГц)

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

(Радиолинии молекул)



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



Multiwavelength Milky Way

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)



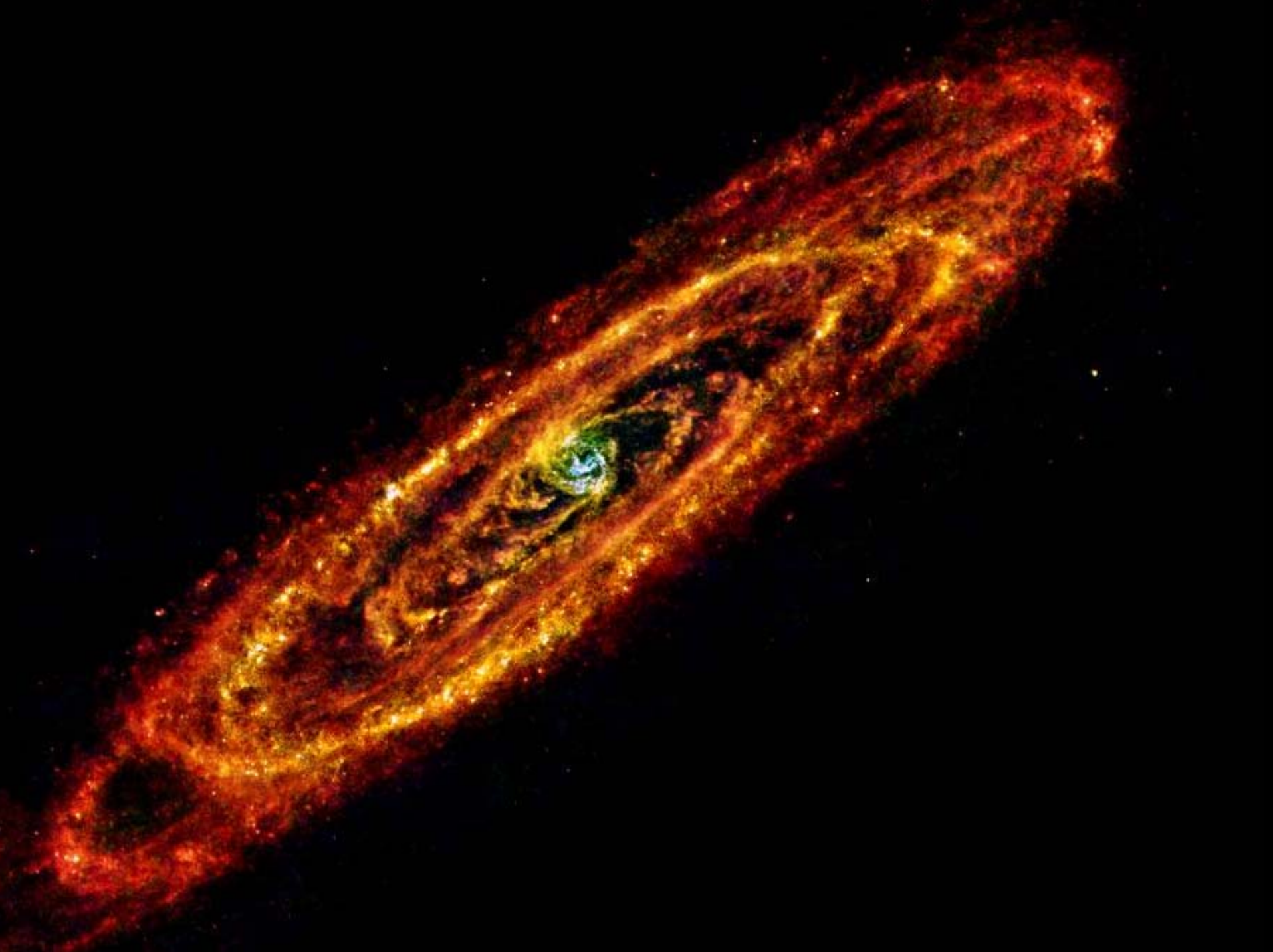
15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015





(M51 NASA HST)



(Eagle Nebula: HST)

Межзвездная пыль

Характерный размер пылинок

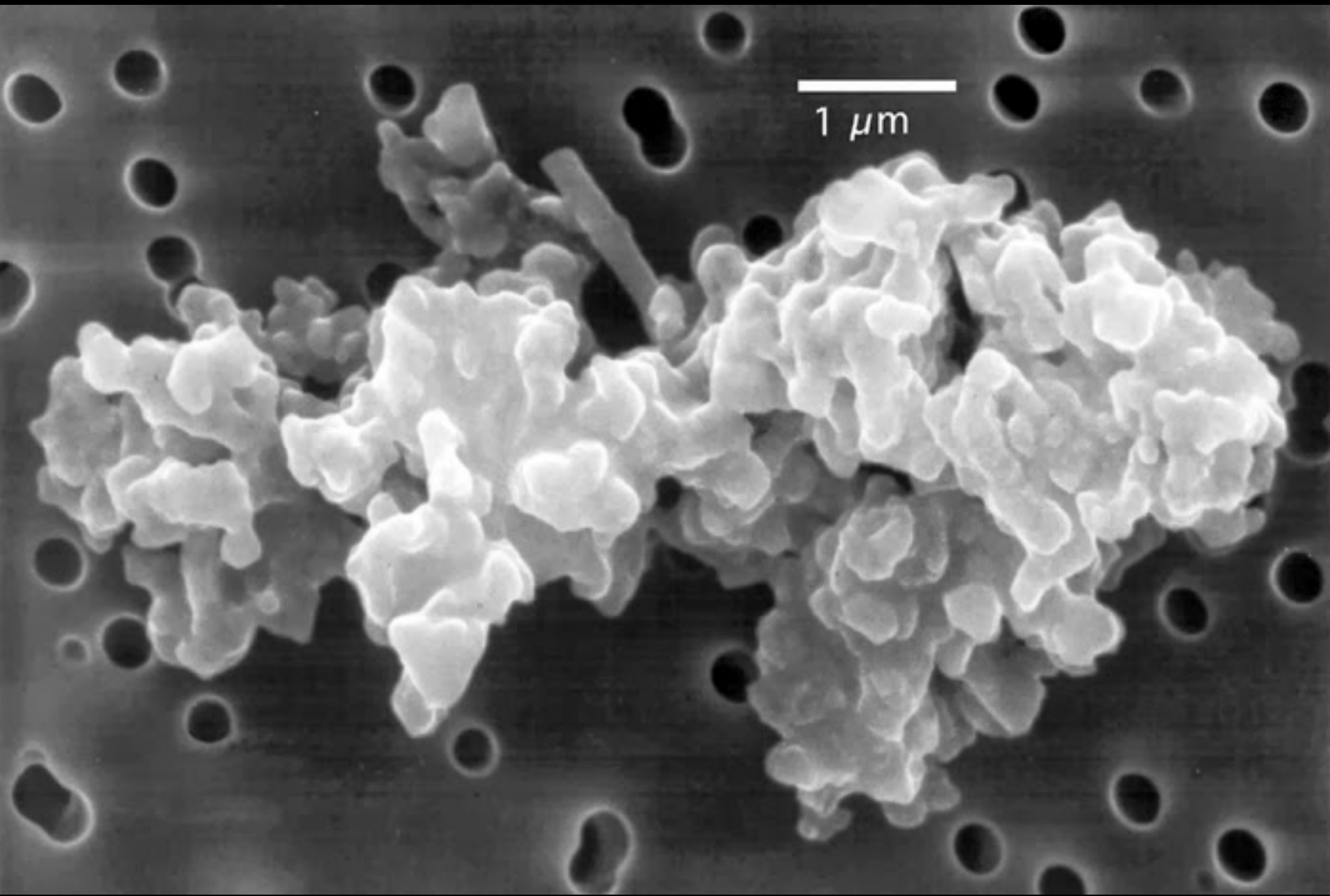
– неск. десятых долей мкм

Общая масса – около 1% от массы газа

Проявляет себя:

- в поглощении (оптика, УФ)

- в излучении (20 – 200 мкм)



15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015

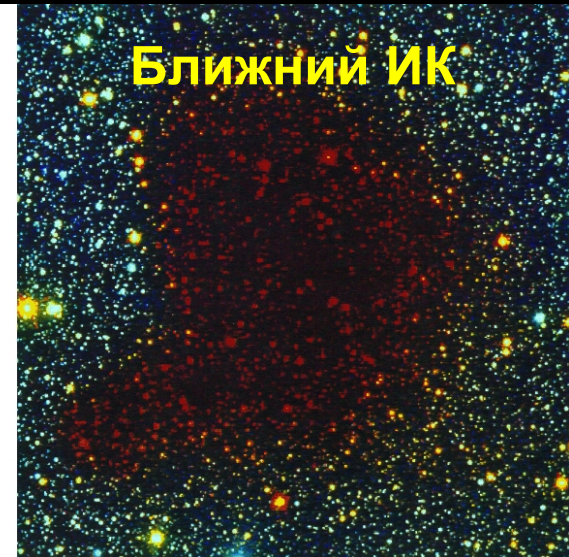


15.12.2015

Звздообразование в облаках

М ассы:
0.1-100 солнца

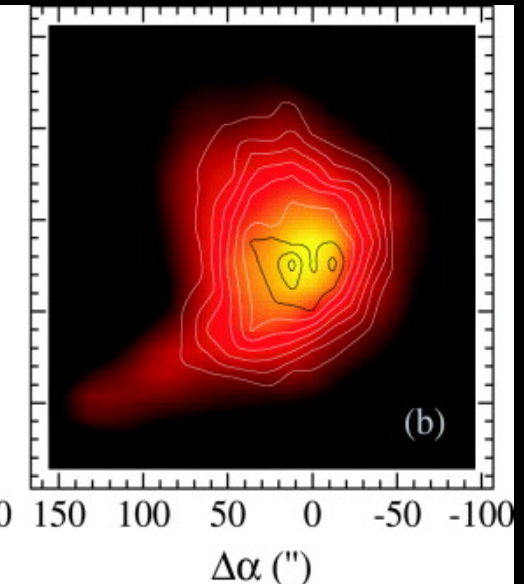
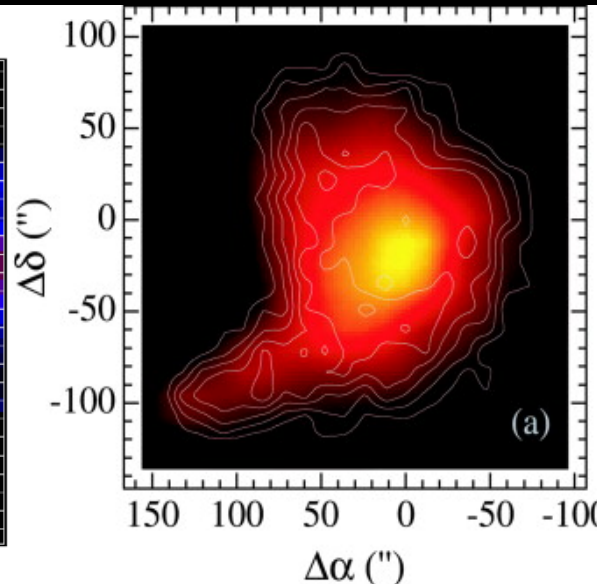
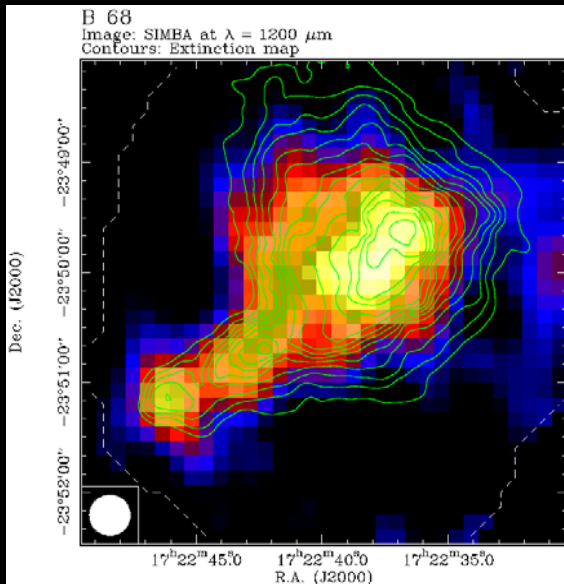
Плотность:
 $\sim 10^6 \text{cm}^{-3}$



1.2 mm континуум (пыль)

C^{18}O

N_2H^+



Visible



"Starless" Core L1014

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

Infrared



Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

Visible: DSS
ssc2004-20a

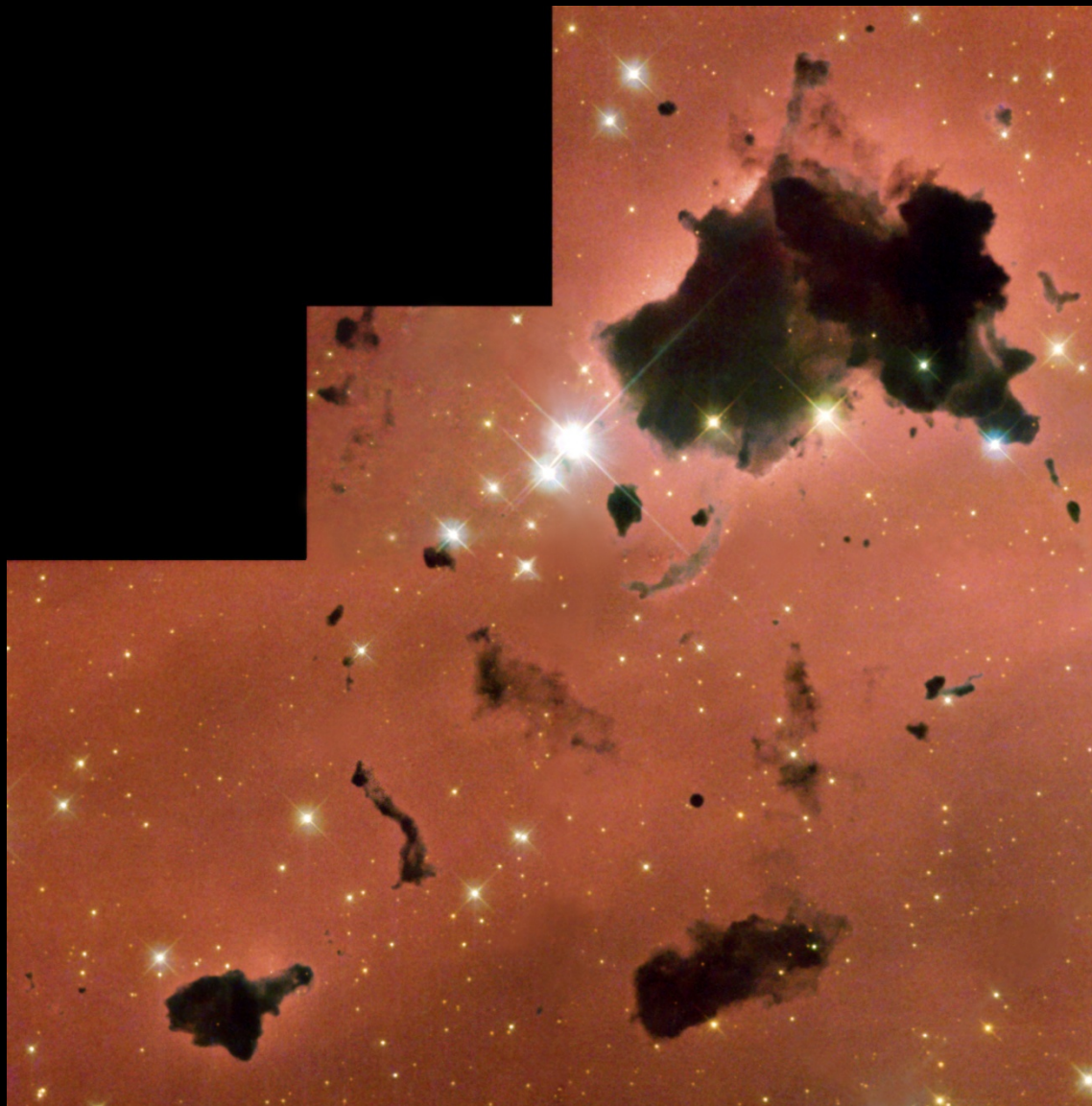


Ophiuchus Giant Molecular Cloud (by Loke Tan)



15.12.2015

Глобулы Бока



15.12.2015

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

Физическая причина сжатия -- гравитационная неустойчивость

- Джинс (1902):

$$\lambda_J = c_s t_{ff} \sim (P/\rho)^{1/2} (\pi/G\rho)^{1/2} \sim (T/\rho)^{1/2}$$

$$M_J \sim \rho \lambda_J^3 \sim T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

$$M_{J, \min} \sim 7 M_{\text{jup}} \sim 0.007 M_{\text{sun}}$$

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

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

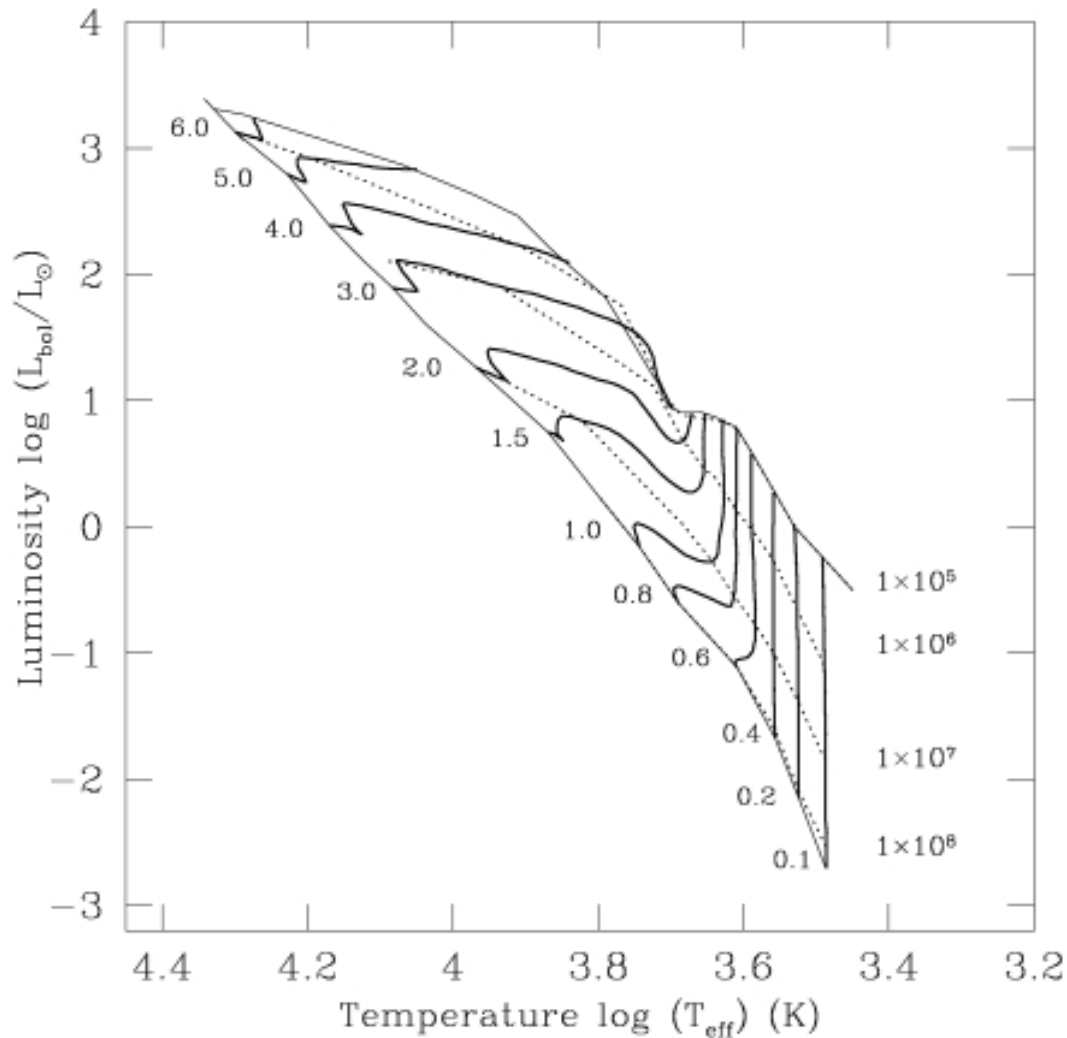
Различие между звездами, коричневыми карликами и планетами

- 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 $M < 13 M_{\text{jup}}$

Звезды до главной последовательности: детство звезды



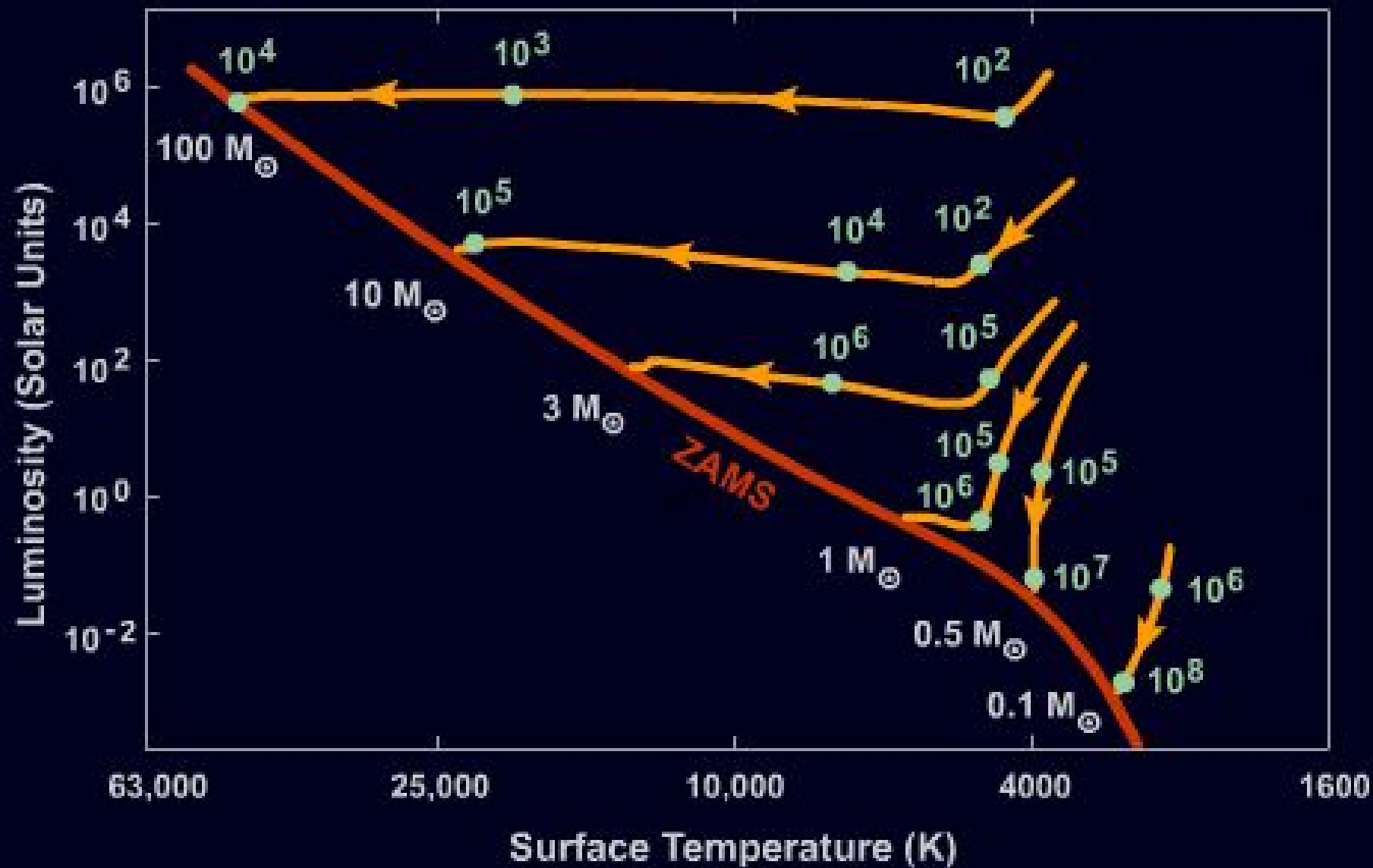
Palla & Stahler

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 $3 \dots 5 R_{\odot}$.

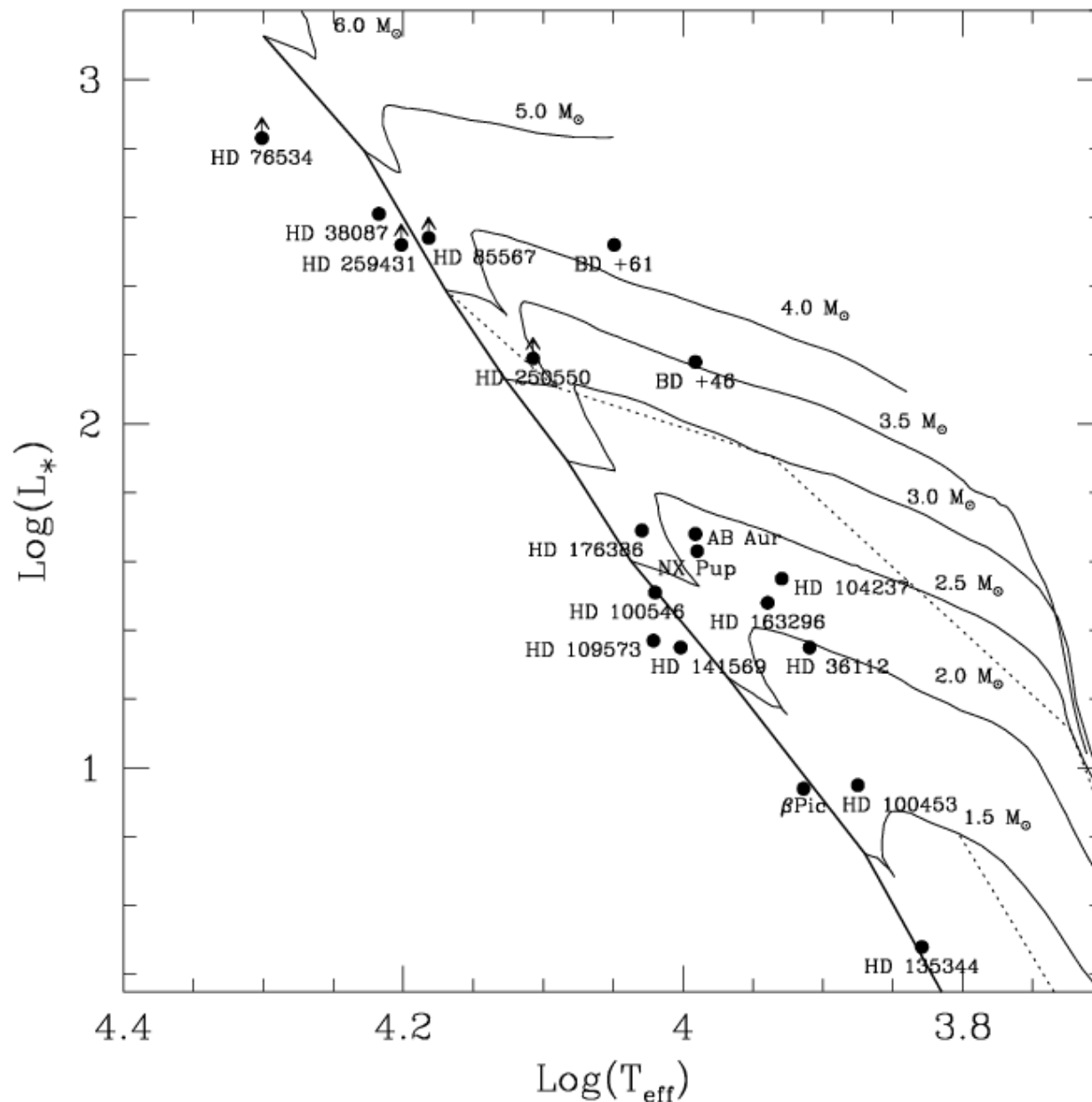
- Стадия Т Тельца (T Tauri)
- Сжатие замедлилось и стало адиабатическим (для маломассивных звезд)
 - Звезда движется почти вертикально вниз на диаграмме ГР
- T_c и ρ_c возрастают до:
- Начала термоядерного горения водорода
 - Самая длительная фаза эволюции звезды
 - «Взрослая» стадия эволюции
 - Звезда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



Evolutionary Tracks for Collapse to the Main Sequence

Молодые звезды на диаграмме

ГД



Testi et al.
Martin et al.

Контракционная фаза

- Сферическое облако:
 $Q \sim (M/\mu) \mathcal{R}T$, $U \sim -GM^2/R$
- Сжатие, если $E = Q + U < 0 \rightarrow$
 $R < (0.1 \text{ пк}/T)(M/M_{\text{sun}})$
- Время сжатия
 $t \sim 1/(G\rho)^{1/2} \sim 6 \times 10^7 \text{ лет } (\mu/T)^{3/2} (M/M_{\text{sun}})$
- Сжатие изотермическое, пока облако прозрачно для фотонов

Адиабатическая фаза

- Ионизация вещества: 0.4 эВ (дисс. H_2) + 13.6 эВ $\rightarrow q \sim 1.5 \times 10^{13}$ эрг/г (H_2)
- $T \sim 10^4 K$
- Сильно возрастает непрозрачность
- Появляется фотосфера $\rightarrow$
$$L = 4\pi R^2 \sigma_B T_{\text{eff}}^4$$
- Освобождаемая энергия переносится конвекцией (стадия Хаяши, $T_{\text{eff}} \sim 3500 K$)
- $t \sim GM^2/RL \sim 8 \times 10^7 \langle \rho \rangle (M/M_{\text{sun}})$ лет

- 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.



15.12.2015



- НАИБОЛЕЕ ЯРКИЕ МОЛОДЫЕ
ЗВЕЗДЫ – ГОЛУБЫЕ СВЕРХГИГАНТЫ
 $T = 20\text{-}50$ ТЫСЯЧ К

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

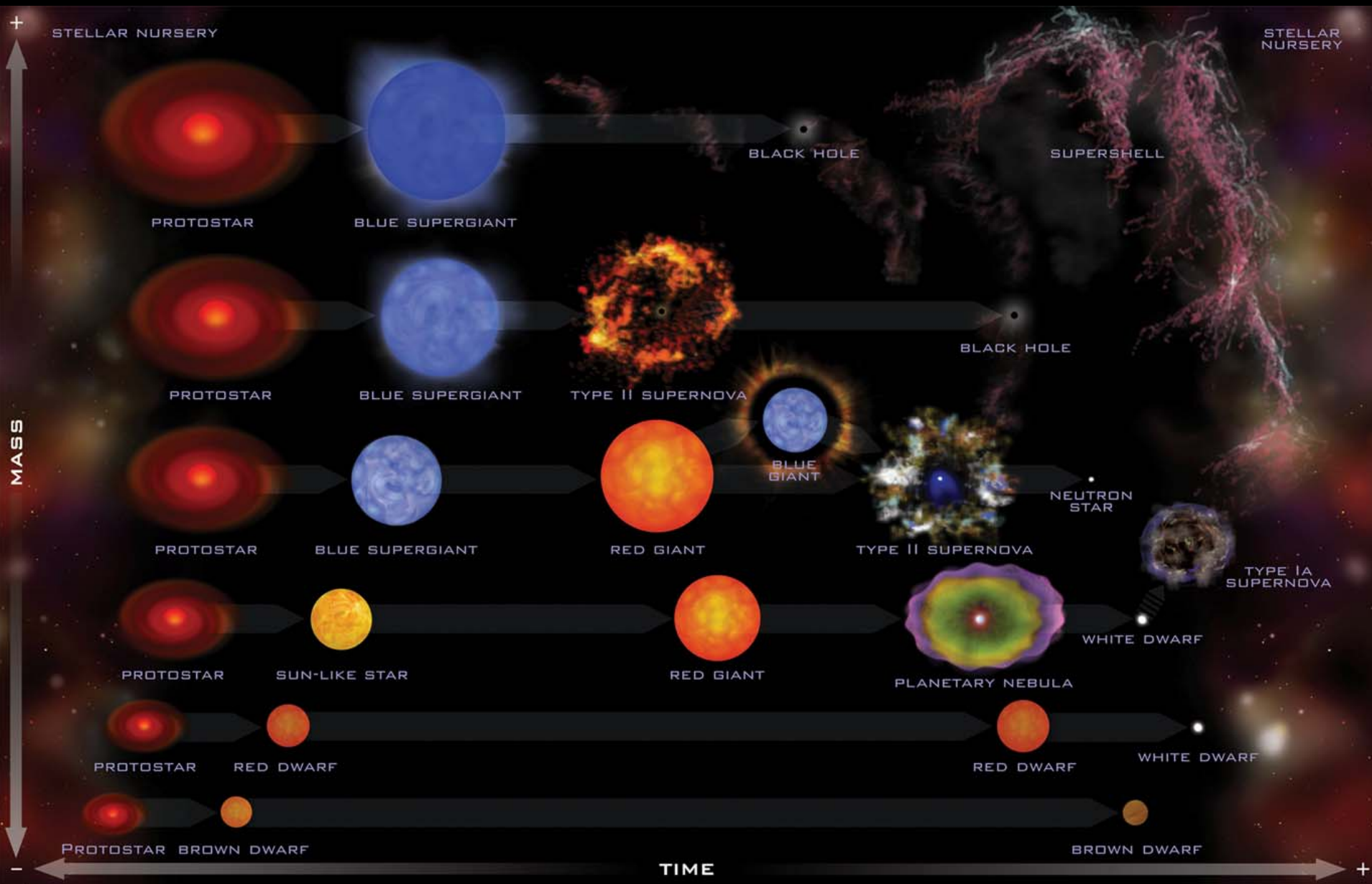


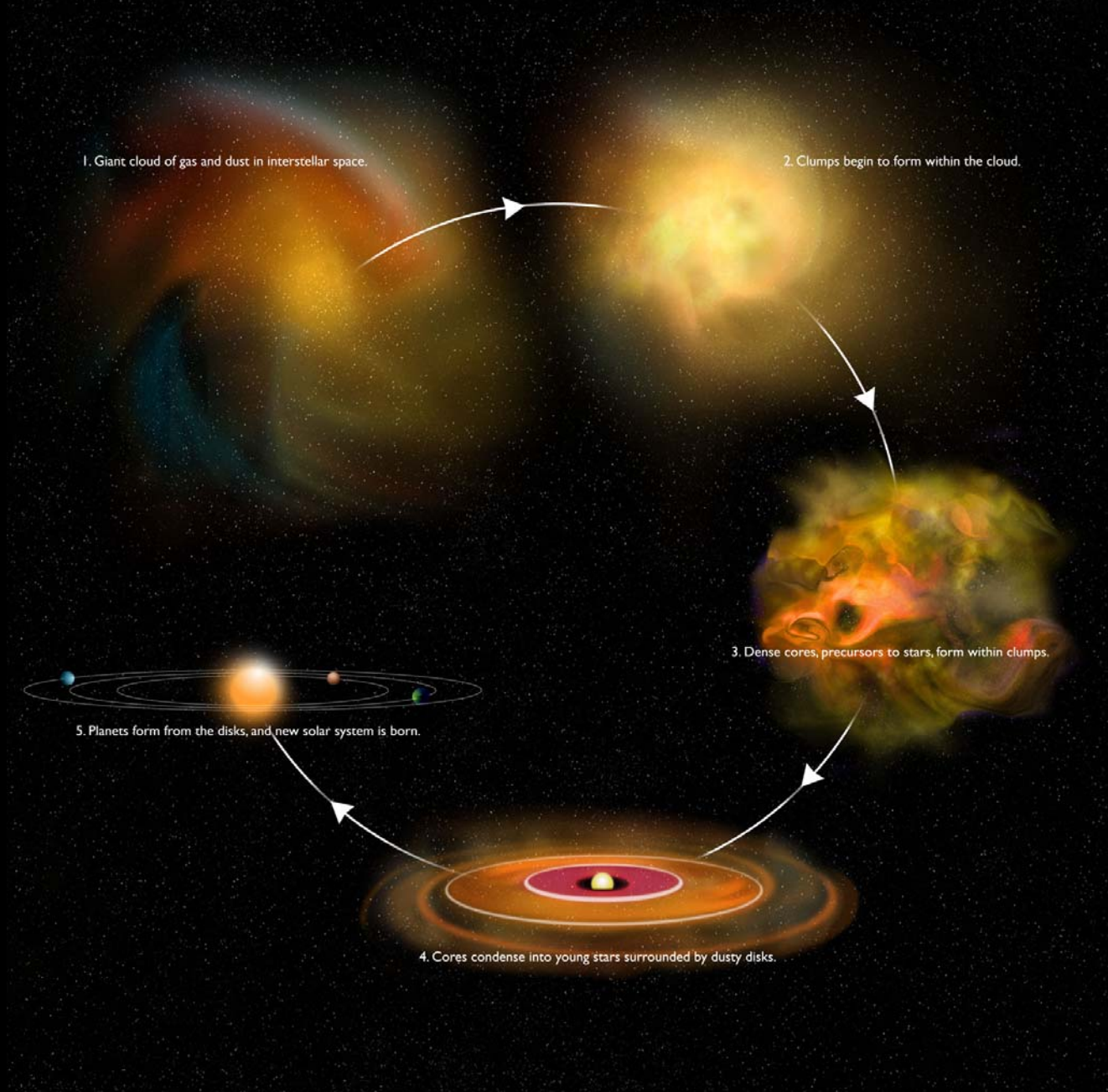
15:12.2015

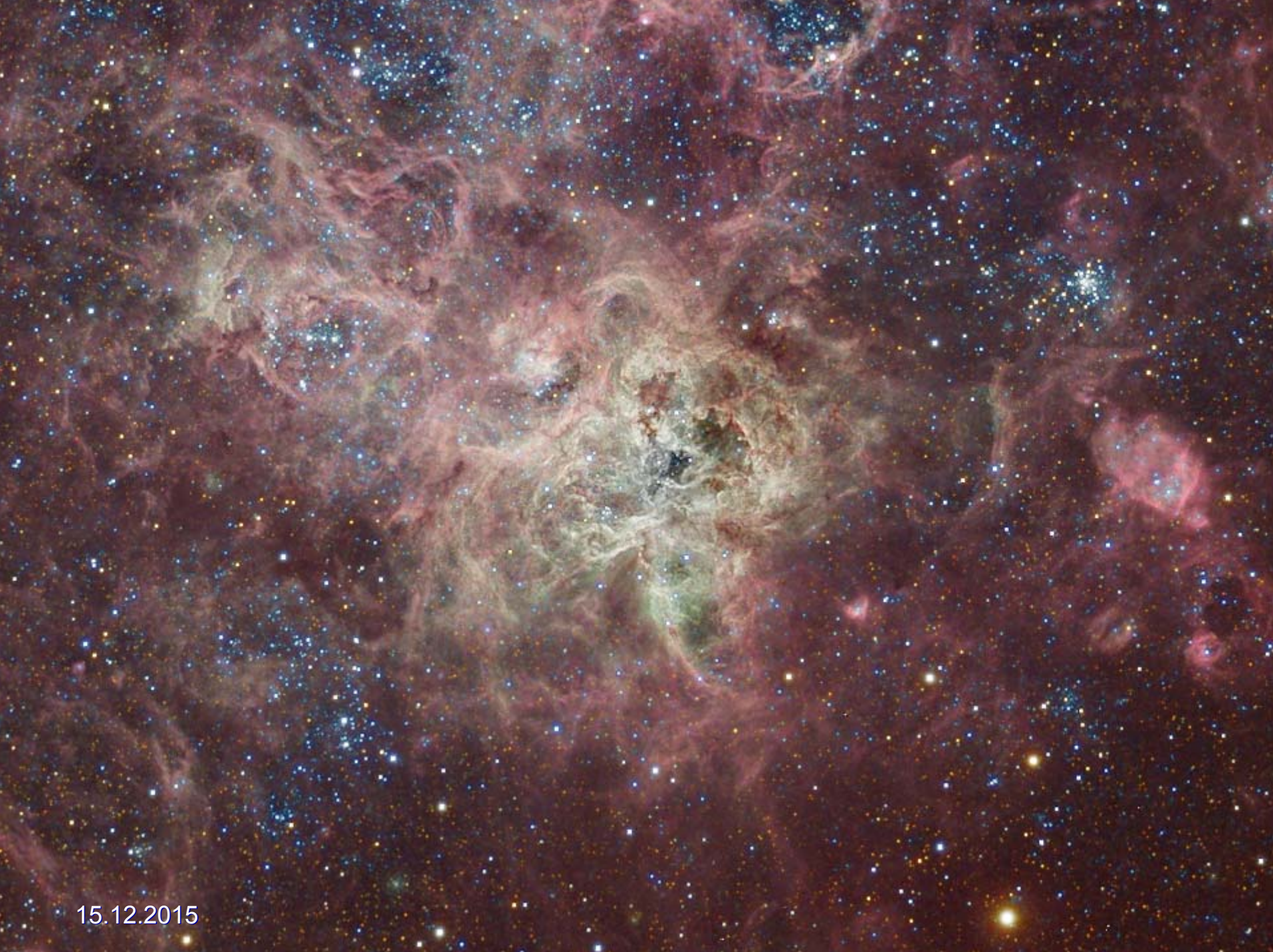


15.12.2015

Масса звезды определяет ее эволюцию







15.12.2015

**РАЗРЕЖЕННЫЙ
ГАЗ**



Ударные волны
Тепловая неустойчивость
Гравитационная неустойчивость

**ГРАВ. СВЯЗАННЫЕ
ГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ**

**МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ
СКОПЛЕНИЯ**

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ
ОБЛАКА**

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

Проблема эффективности звездообразования

Из-за гравитационной неустойчивости превращения газа в звезды идет в шкале времени свободного сжатия:

$$t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} = \frac{3.4 \times 10^7}{\sqrt{n}} \text{ лет}$$

Для межзвездной среды (ISM):

$$n \approx 17 \text{ cm}^{-3}$$

$$t_{\text{ff}} = 8 \times 10^6 \text{ лет}$$

Полная масса молекулярного газа в Галактике:

$$\sim 2 \times 10^9 M_{\text{sun}}$$

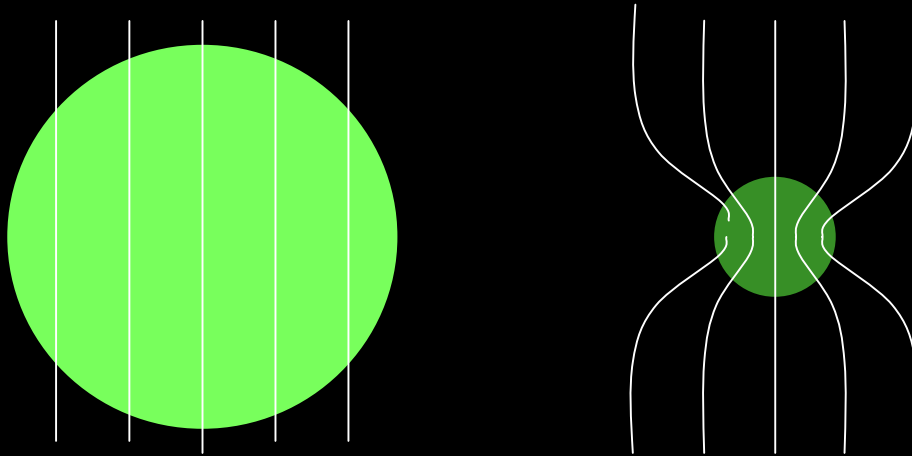
Ожидаемый темп звездообразования: $\sim 250 M_{\text{sun}} / \text{год}$

Наблюдаемый темп звездообразования: $\sim 3 M_{\text{sun}} / \text{год}$

Есть факторы, препятствующие звездообразованию!

Эффекты магнитного поля

Магнитное поле может остановить сжатие из-за вмороженности
В межзвездный газ.

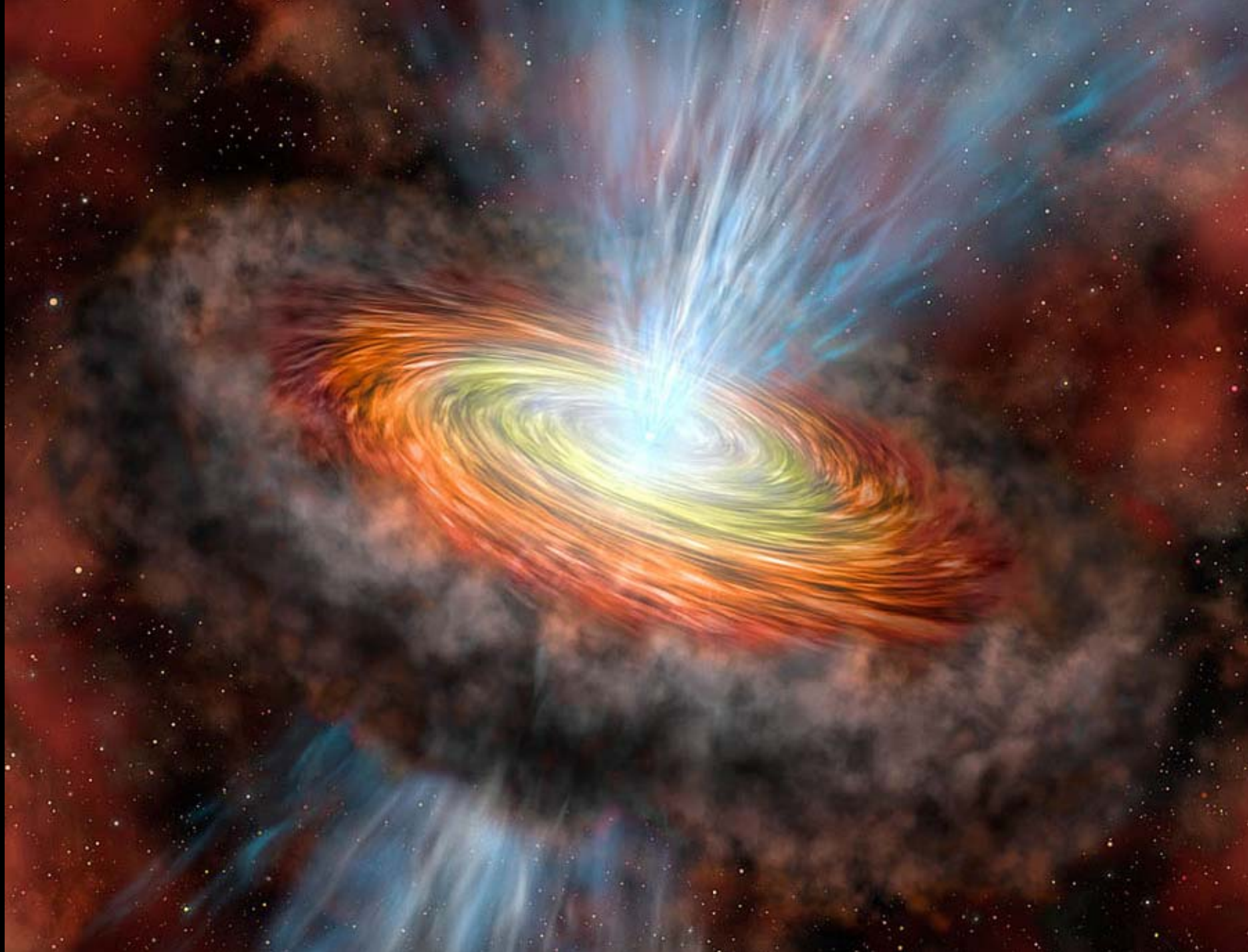


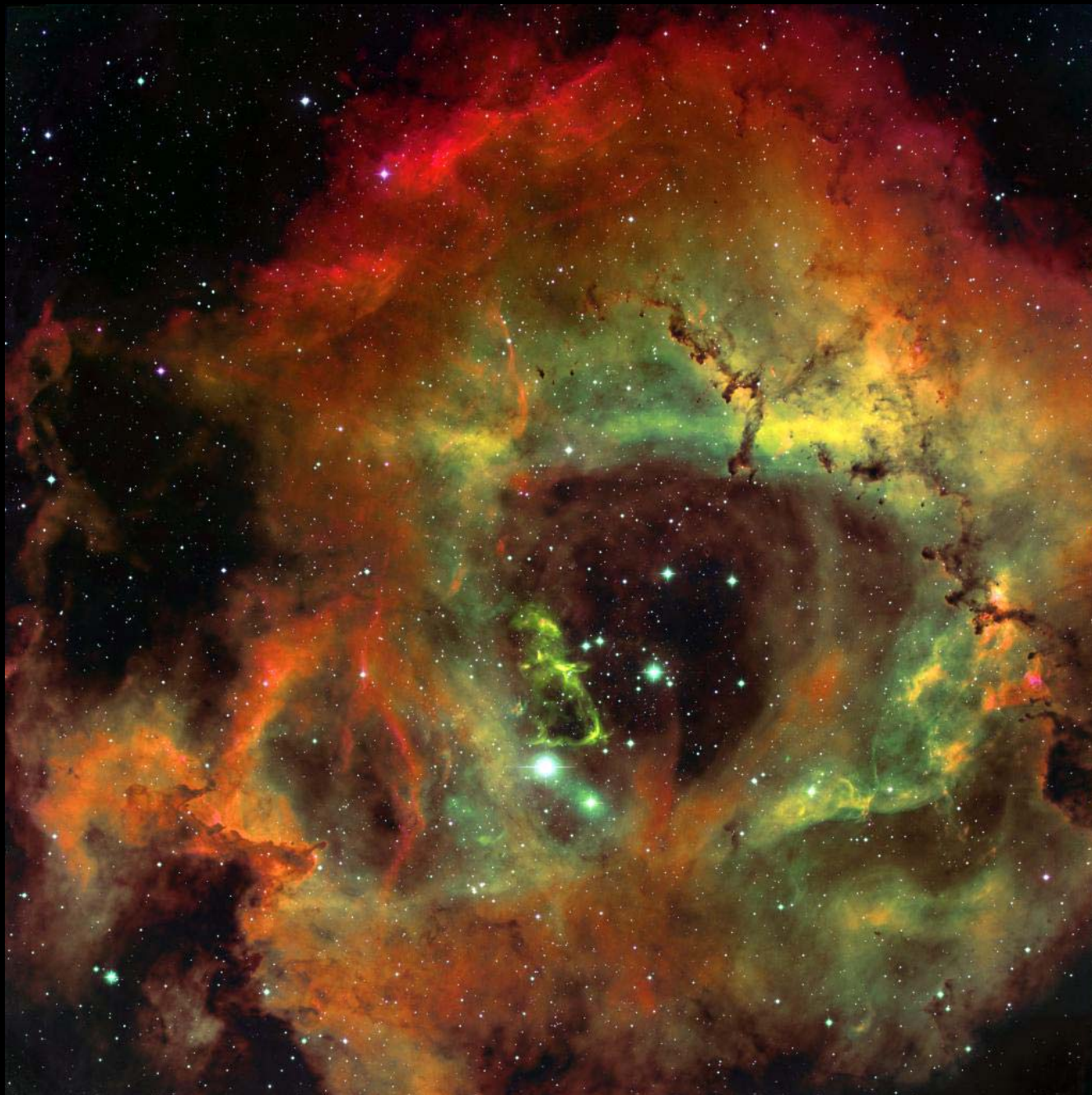
Критическая (джинсовская) масса при наличии поля изменяется:

$$M_{\text{cr}} = 0.12 \frac{\Phi_{\text{M}}}{G^{1/2}} \approx 10^3 M_{\text{sun}} \left(\frac{|\mathbf{B}|}{30 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R}{2 \text{pc}} \right)^2$$

Эффекты вращения

- @ $M=\text{const}$, $J=I\Omega=\text{const}$: $I \sim MR^2 \sim R^2$
- $E_{\text{rot}} = I\Omega^2 / 2 = J^2 / 2I \sim 1/R^2$
- $E_{\text{gr}} \sim -GM^2/R \sim -1/R$
- Остановка сжатия из-за вращения, как только $E_{\text{rot}} + E_{\text{gr}} > 0$





15.12.2015

Самое «слабое звено» - образование плотных облаков молекулярного газа из сплошной разреженной среды

Два фактора здесь играют ключевую роль.

1. Наличие пыли (быстрое остывание, экранизация, молекуляризация)
2. Давление газа – выше определенного порога

Пример моделирования турбулентного звздообразования

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

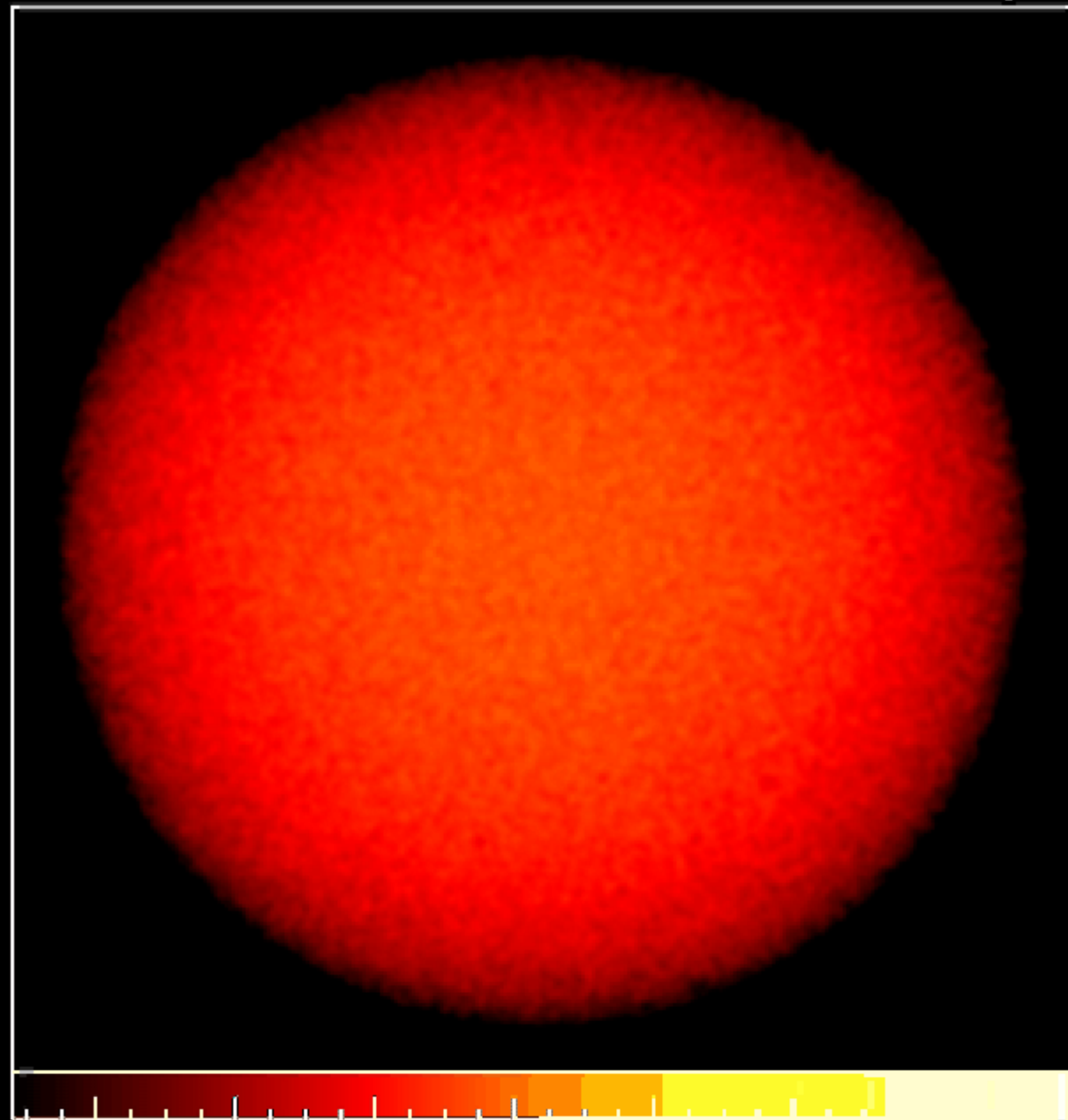
$$N \text{ звезд} = 23$$

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

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

Dimensions: 82500. AU

Time: 0. yr



-1.4

-1.2

-1.0

-0.8

-0.6

-0.4

-0.2

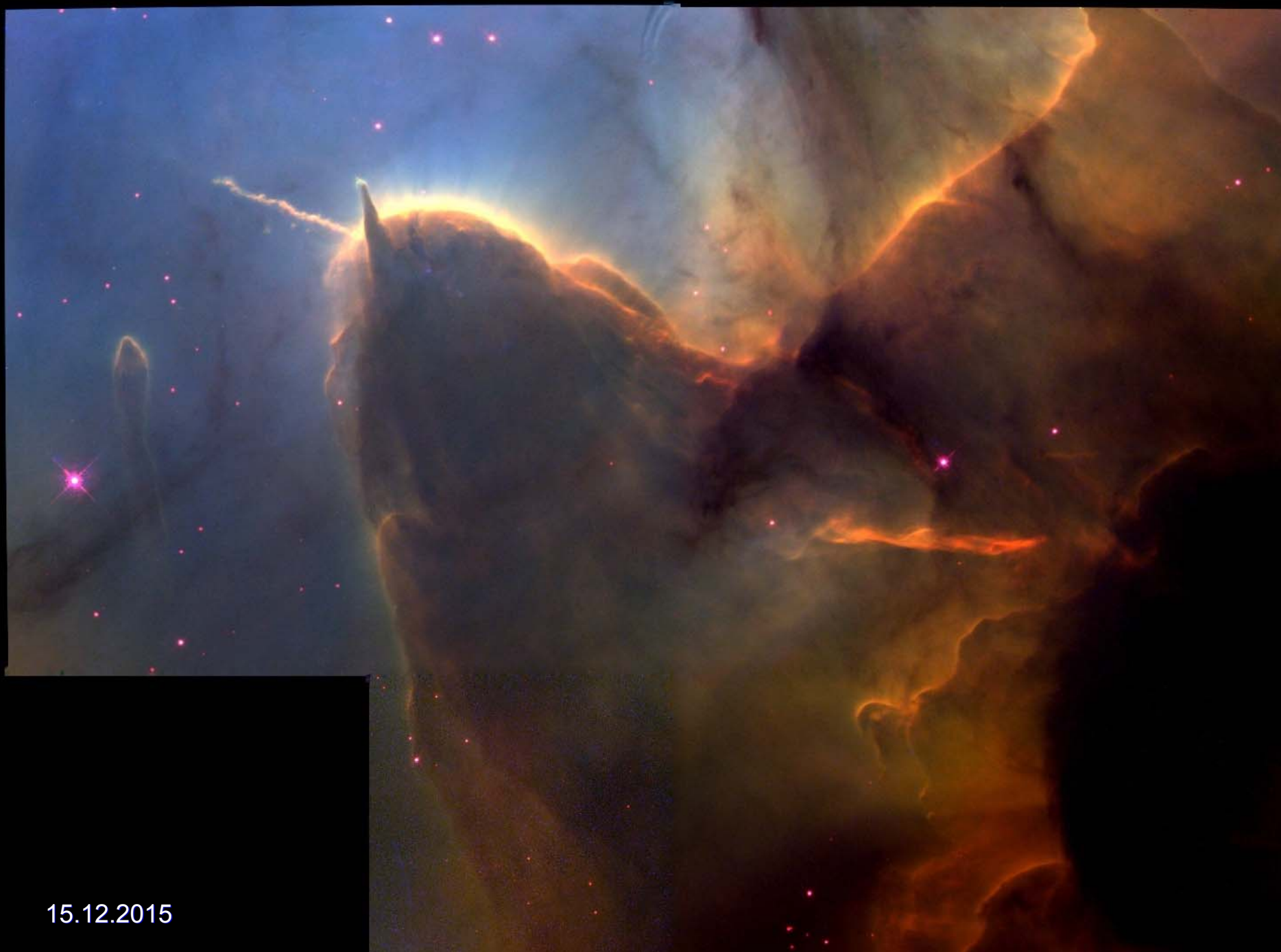
0.0

Log Column Density [g/cm^2]

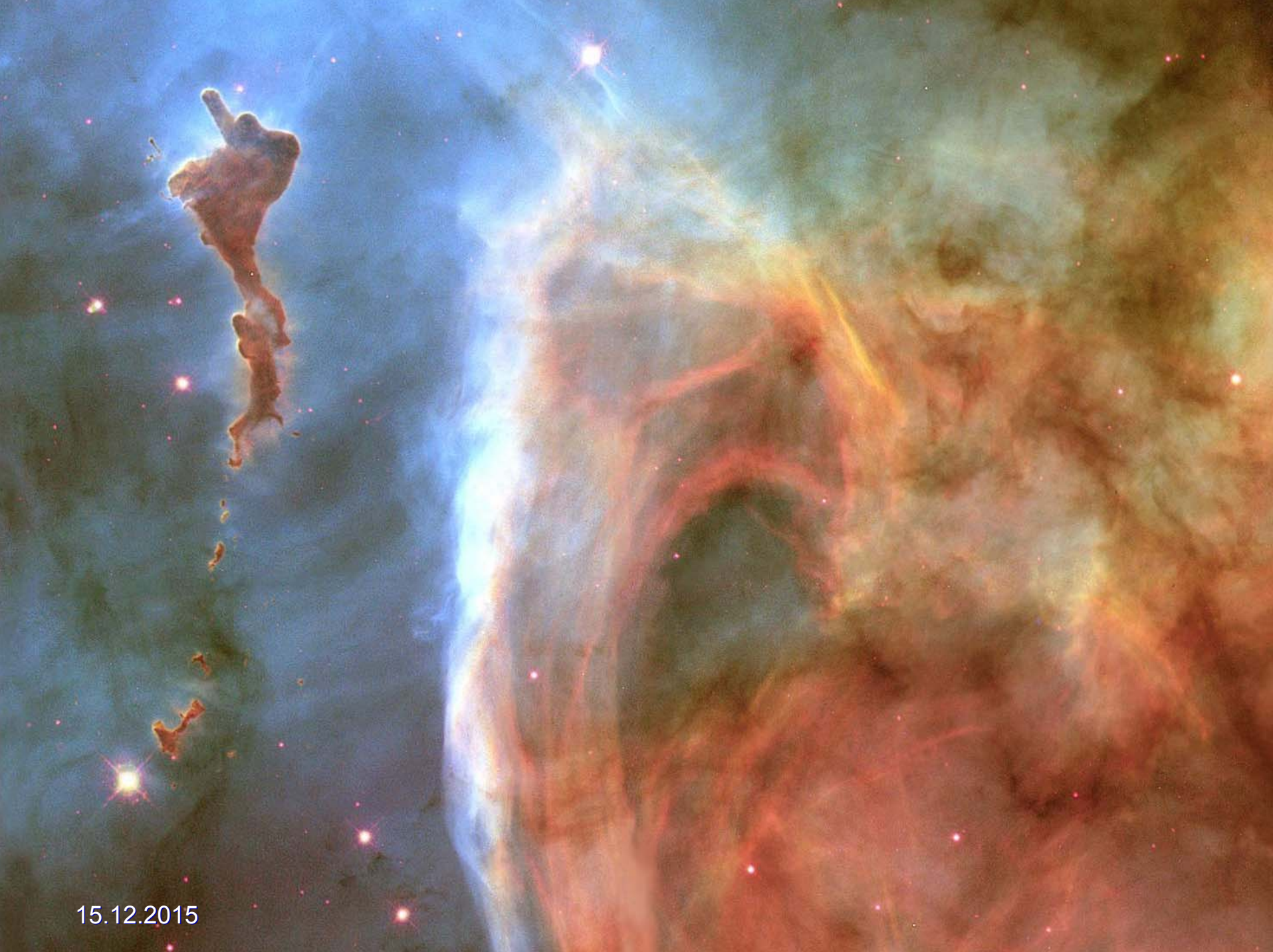
Matthew Bate

15.12.2015





15.12.2015



15.12.2015



15.12.2015

Часть 3. Образование протопланетных дисков и планет



15.12.2015

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

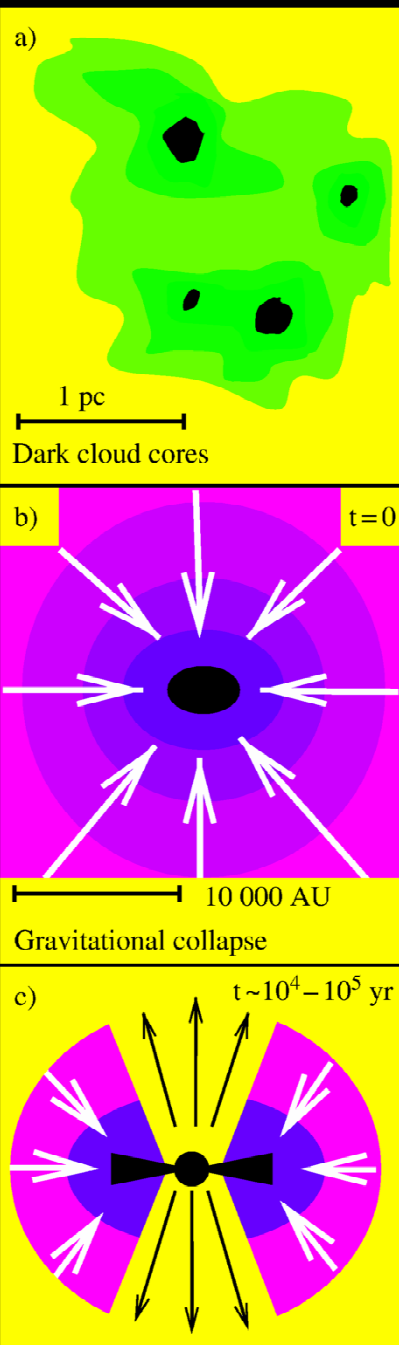


Immanuel Kant

"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 ~ неск. 100 АЕ

Образование планет: “Byproduct” звездообразования:

Коллапс вращающегося ядра МО

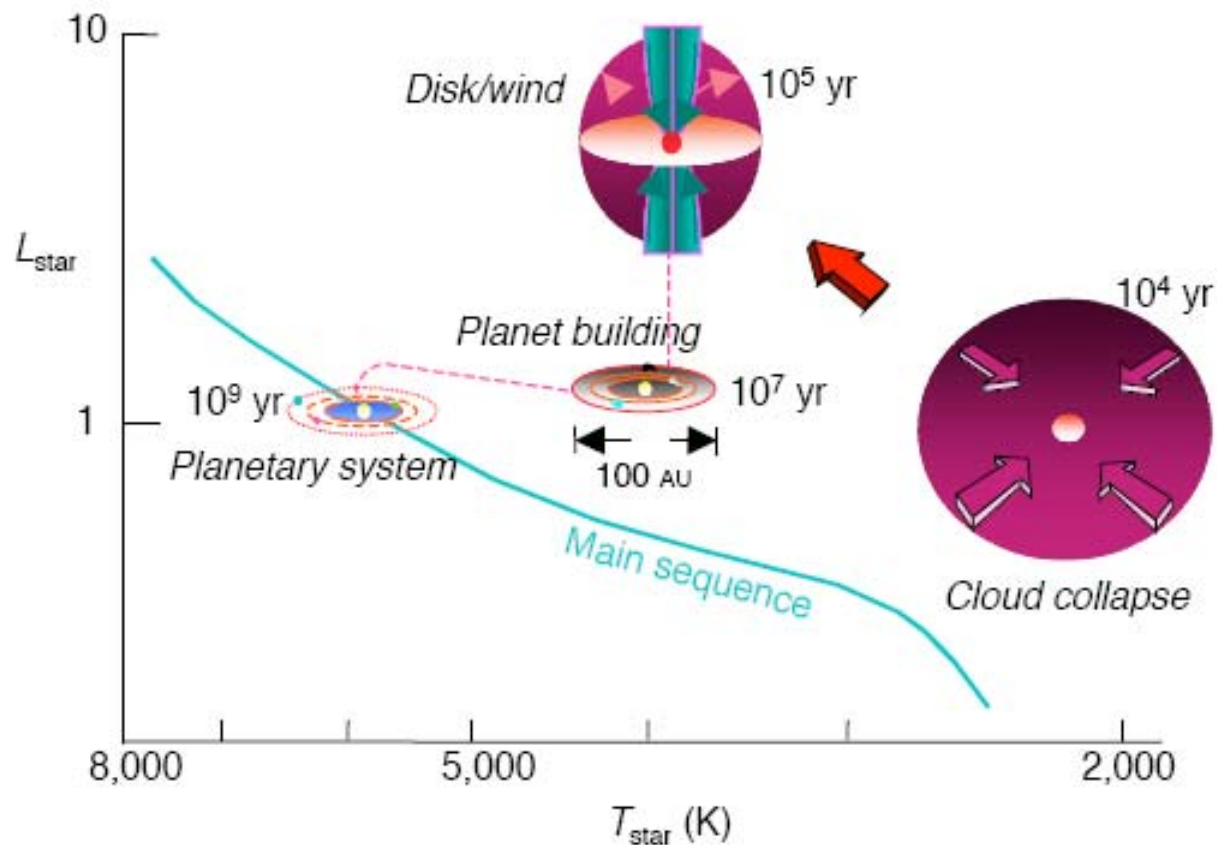
(момент вращения $\neq 0$)

=> Образование вращающейся оболочки
вокруг молодой звезды

Околозвездные диски

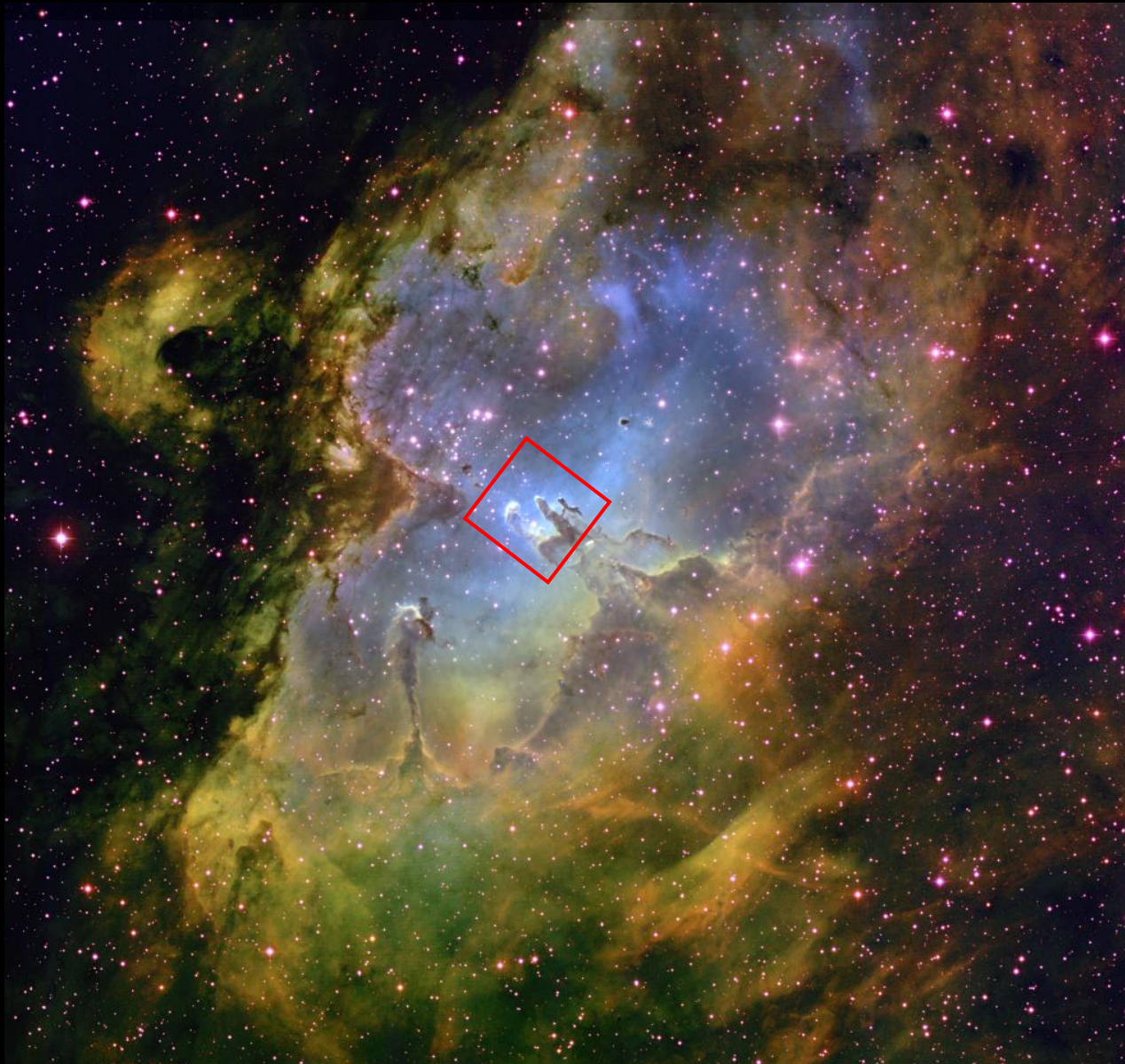
- “Резервуар” массы и момента вращения
- Внешняя среда и источник массы для образования планет
- Эволюция во времени (структура и состав)

Pre-main Sequence Evolution

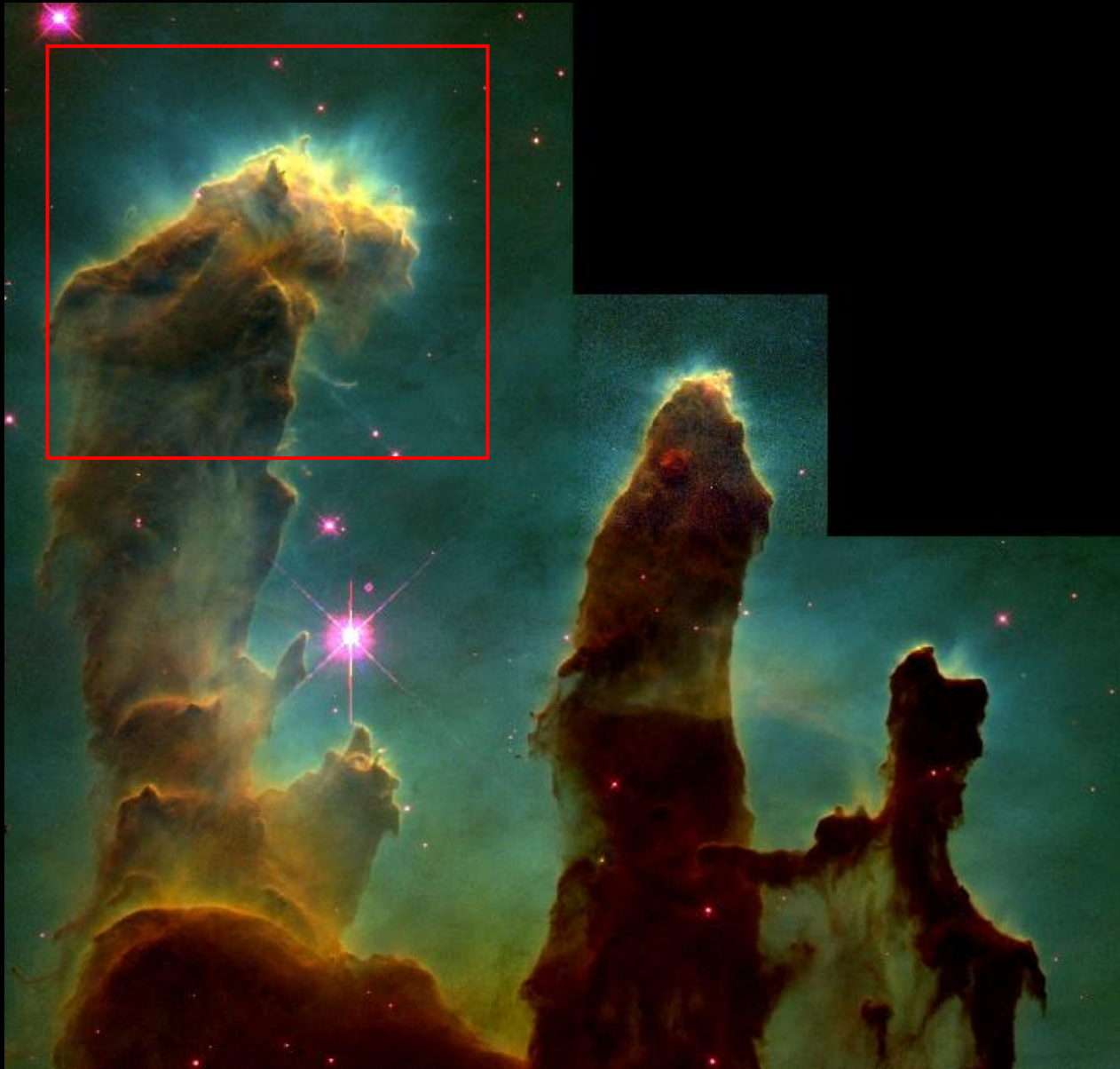


Приближение к месту рождения звезд

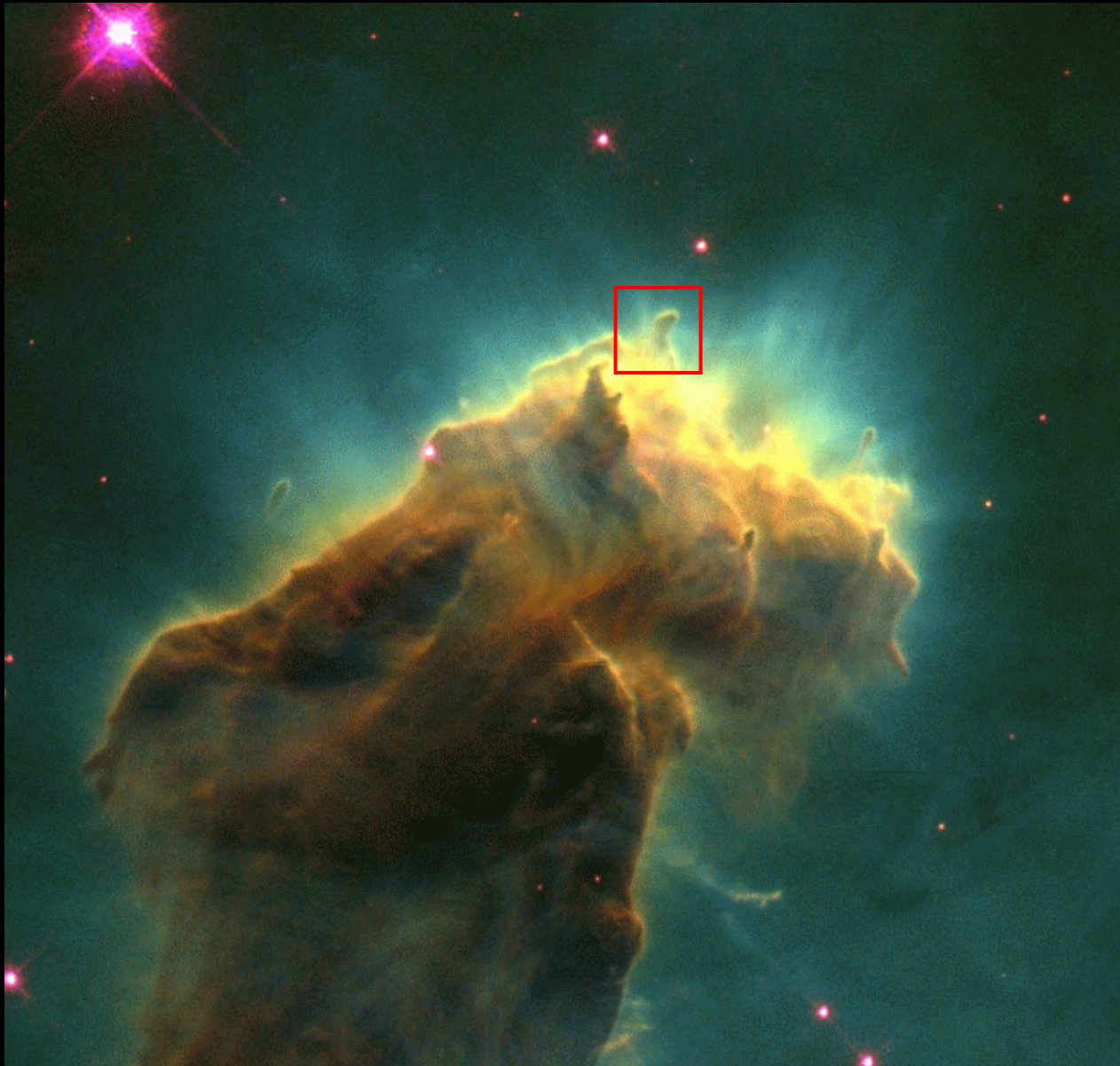




**Eagle
Nebula
(M16)**



**Eagle
Nebula
(M16)**



**Eagle
Nebula
(M16)**

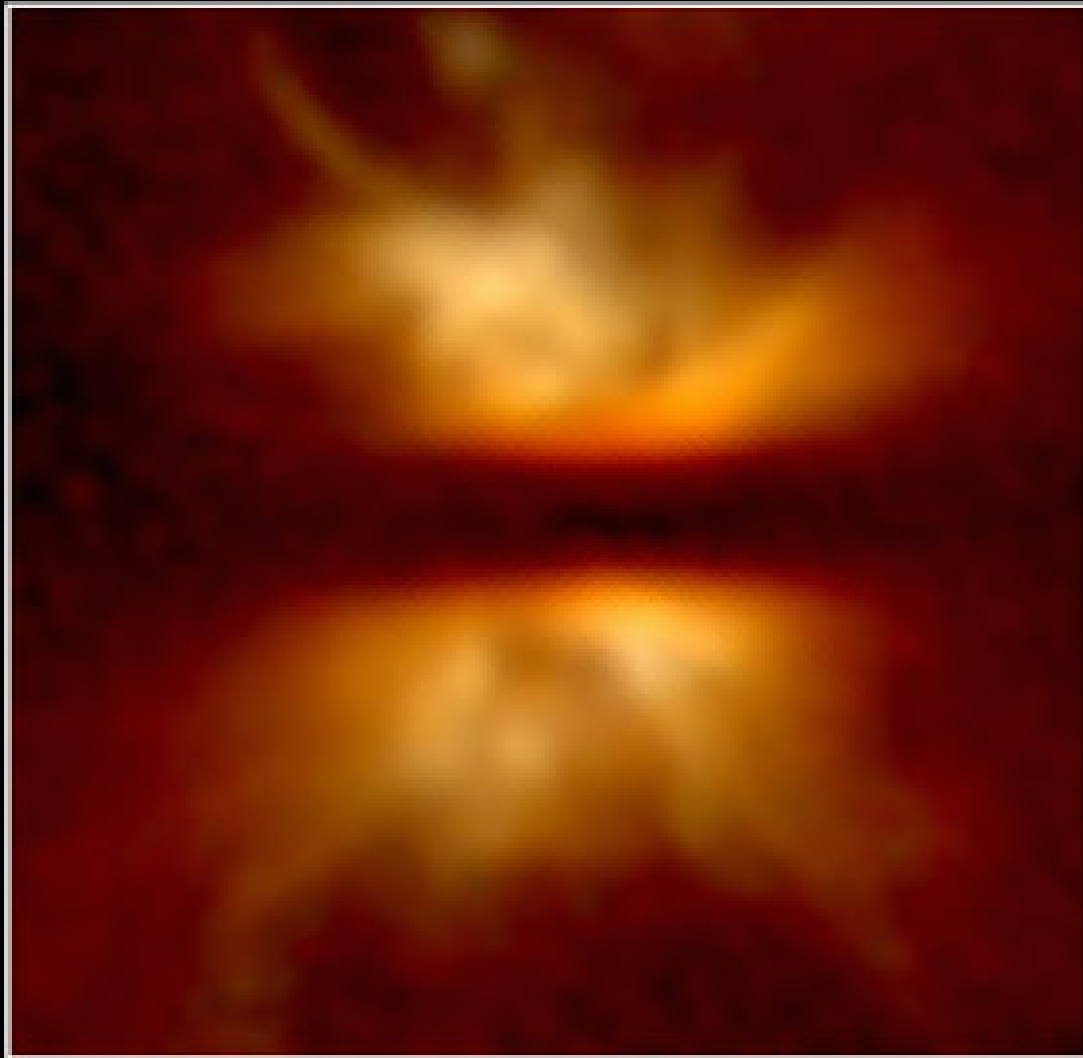


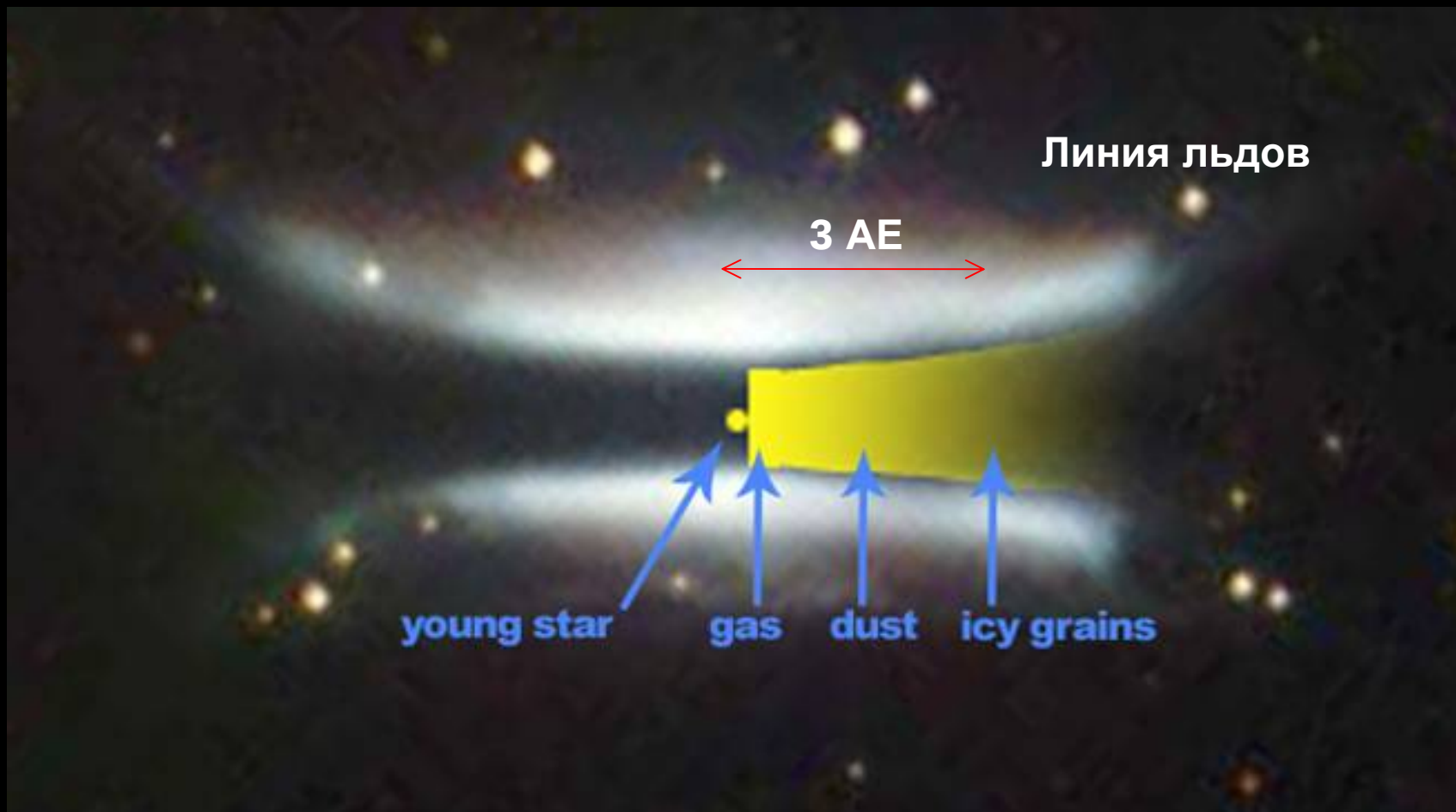
**Eagle
Nebula
(M16)**



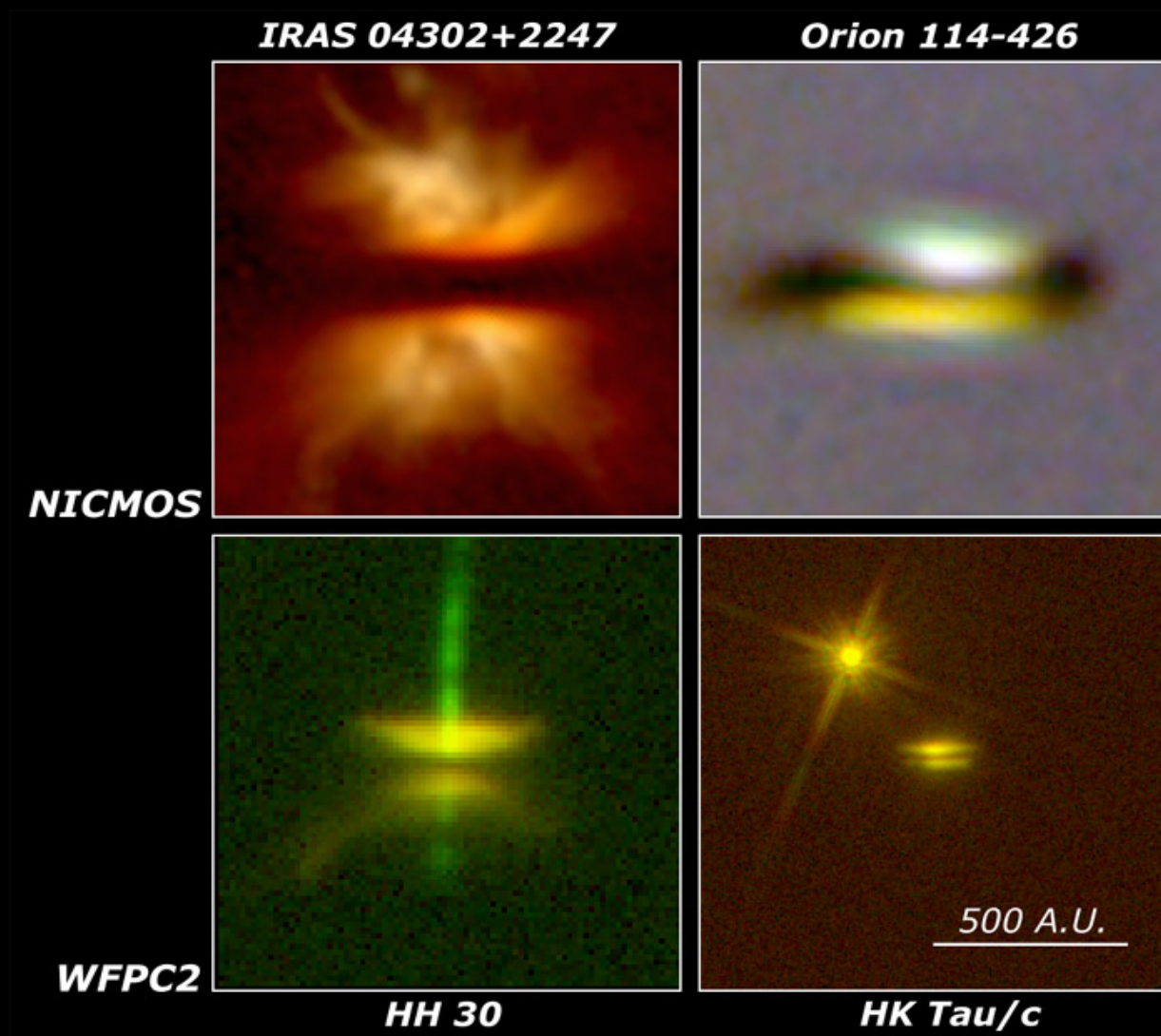
Вещество выметается из окрестности
протопланетного диска

IRAS 04302+2247

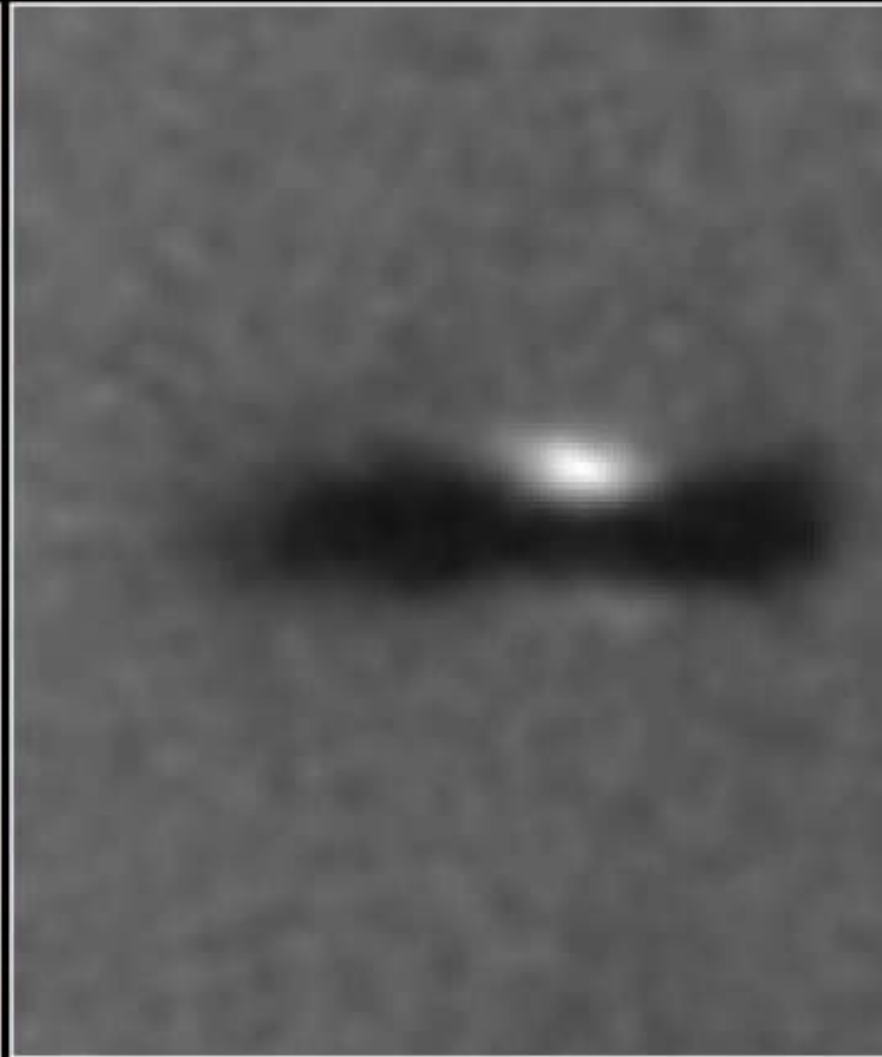




Остается звезда + протопланетный диск...

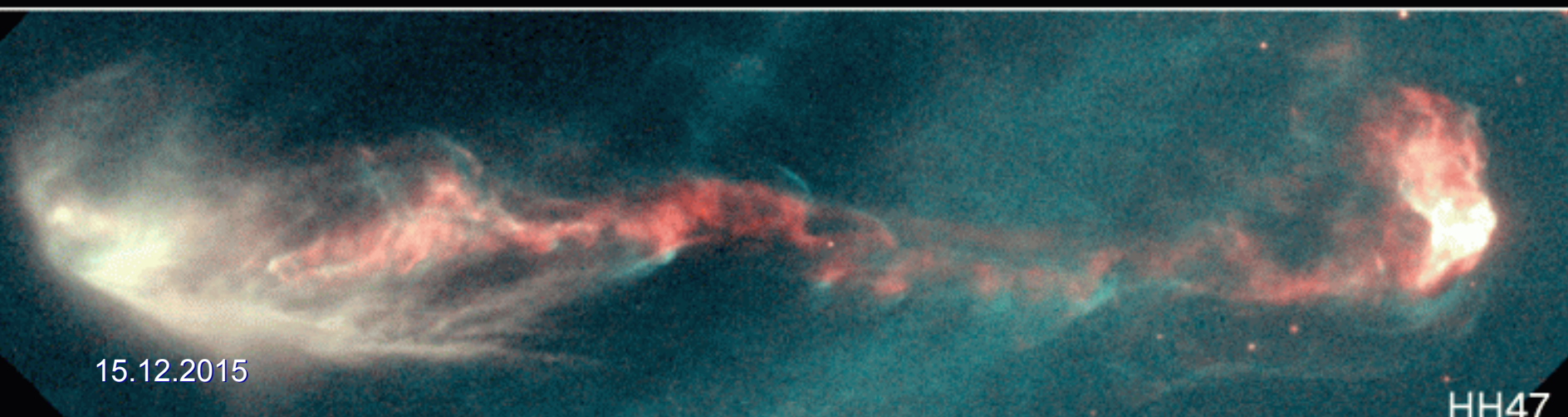
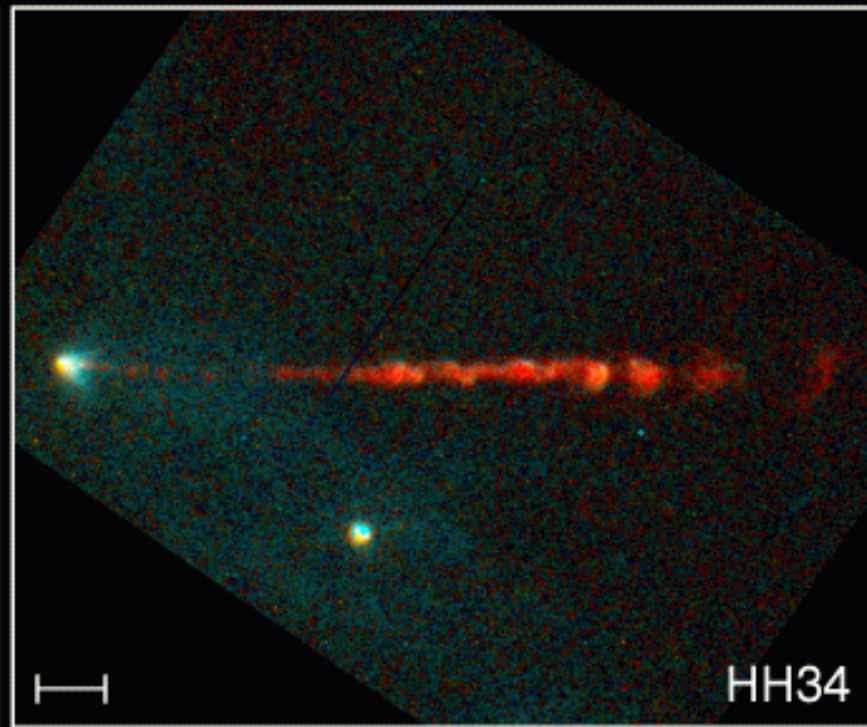
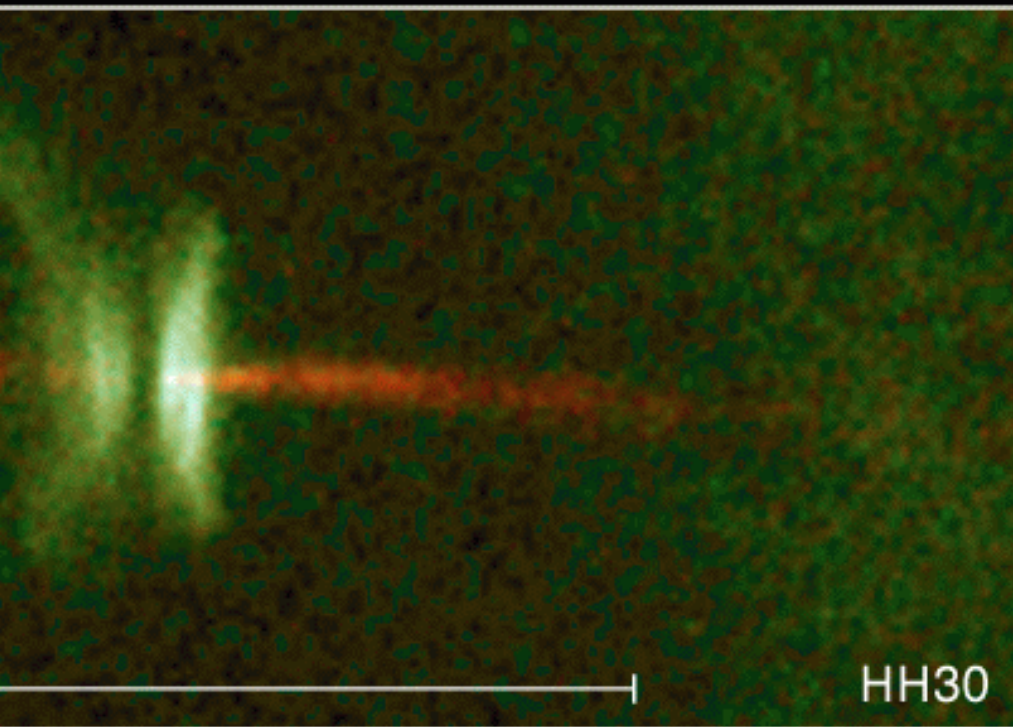


Протопланетные диски



15.12.2015
Edge-On Protoplanetary Disk

HST · W

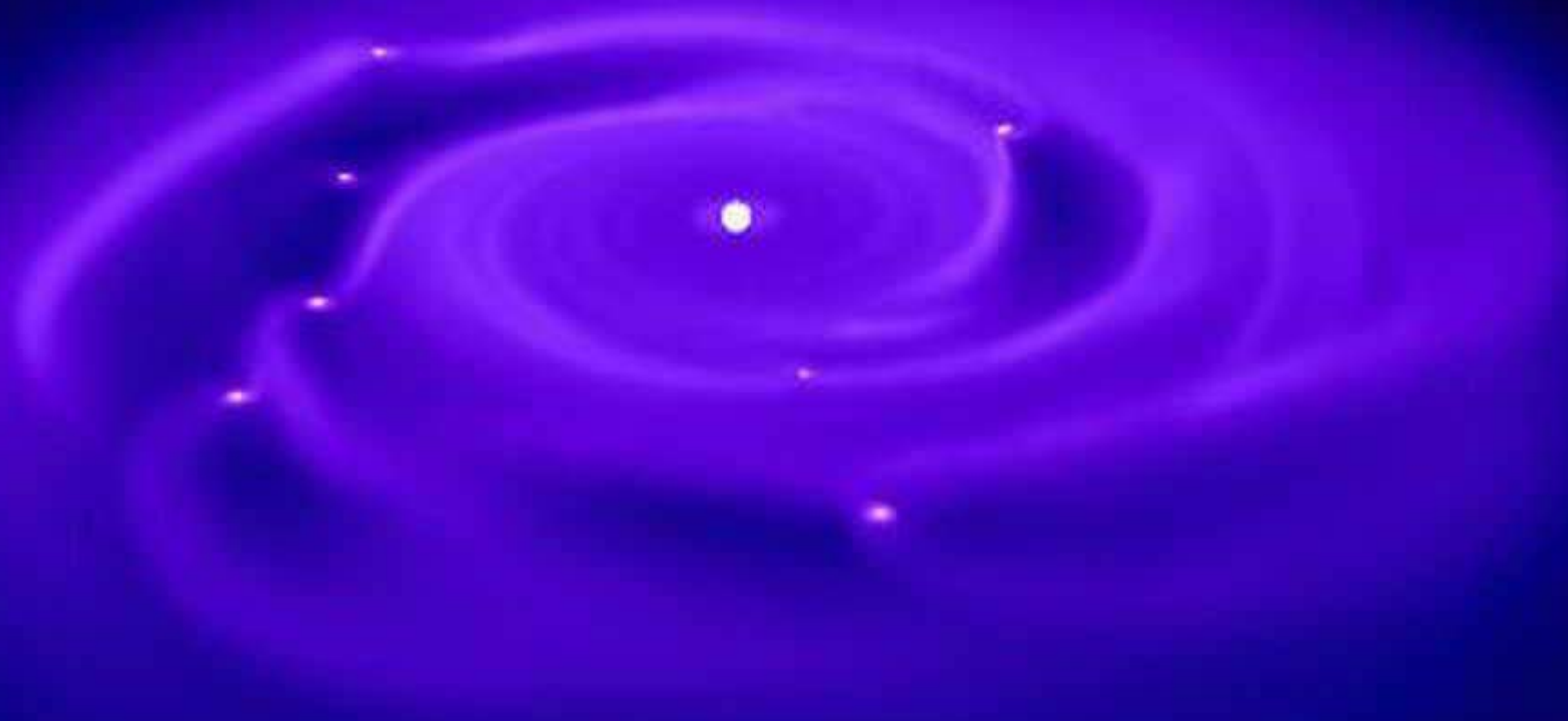


AU Microscopii

Size of
Neptune's
Orbit

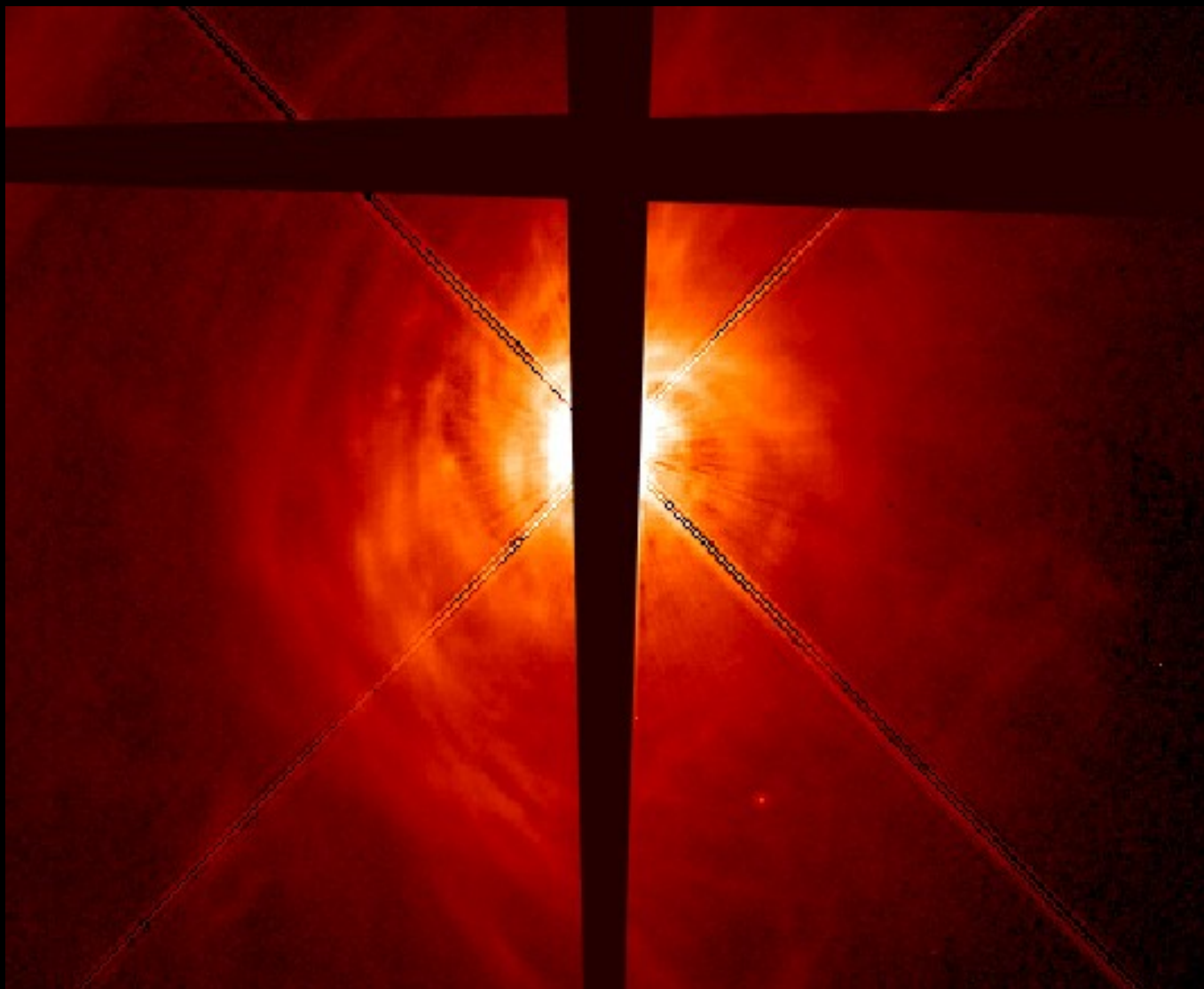
15.12.2015





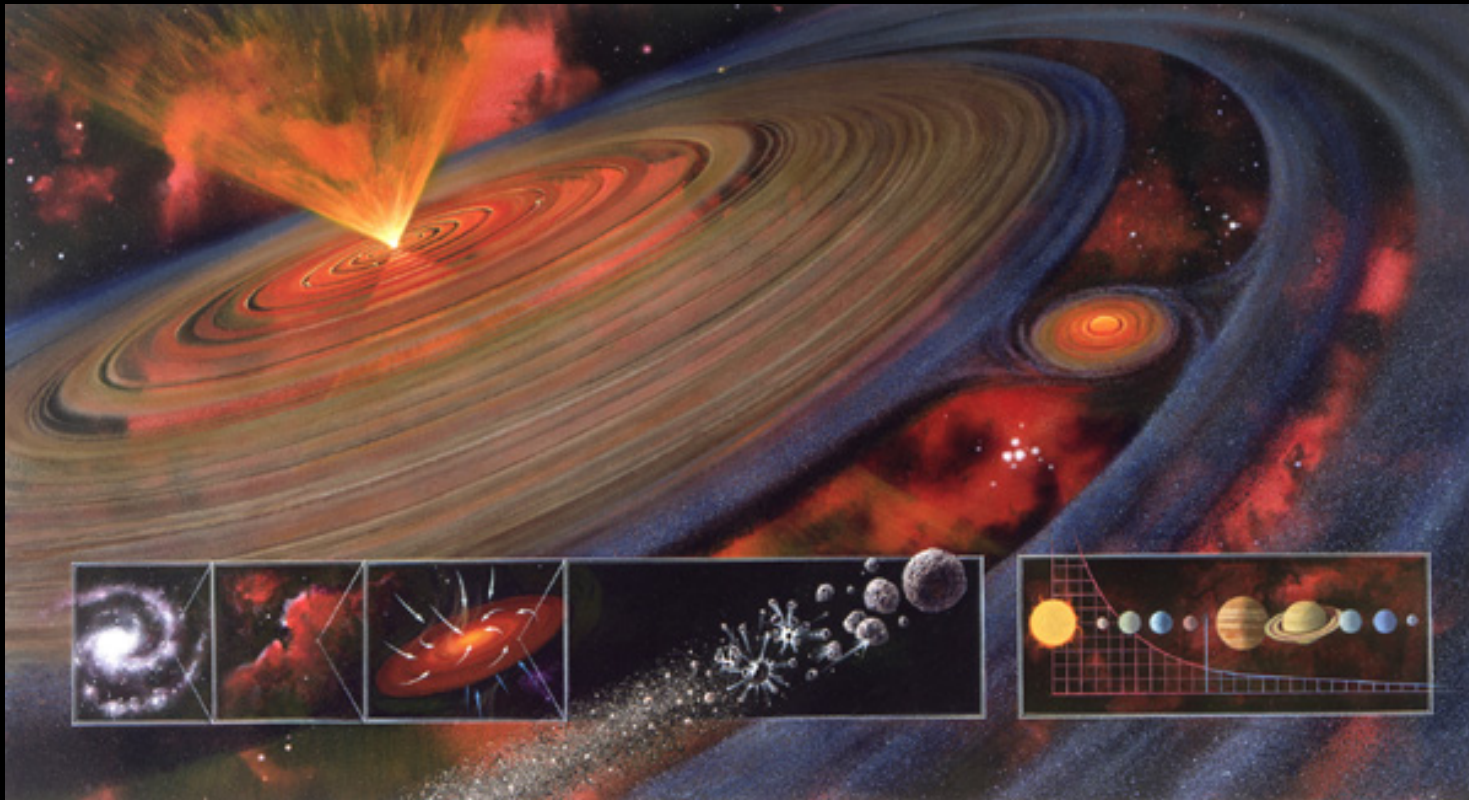
15.12.2015

Вот как это видит космический телескоп



HST image of AB Aurigae by Carol Grady

Планеты формируются в диске

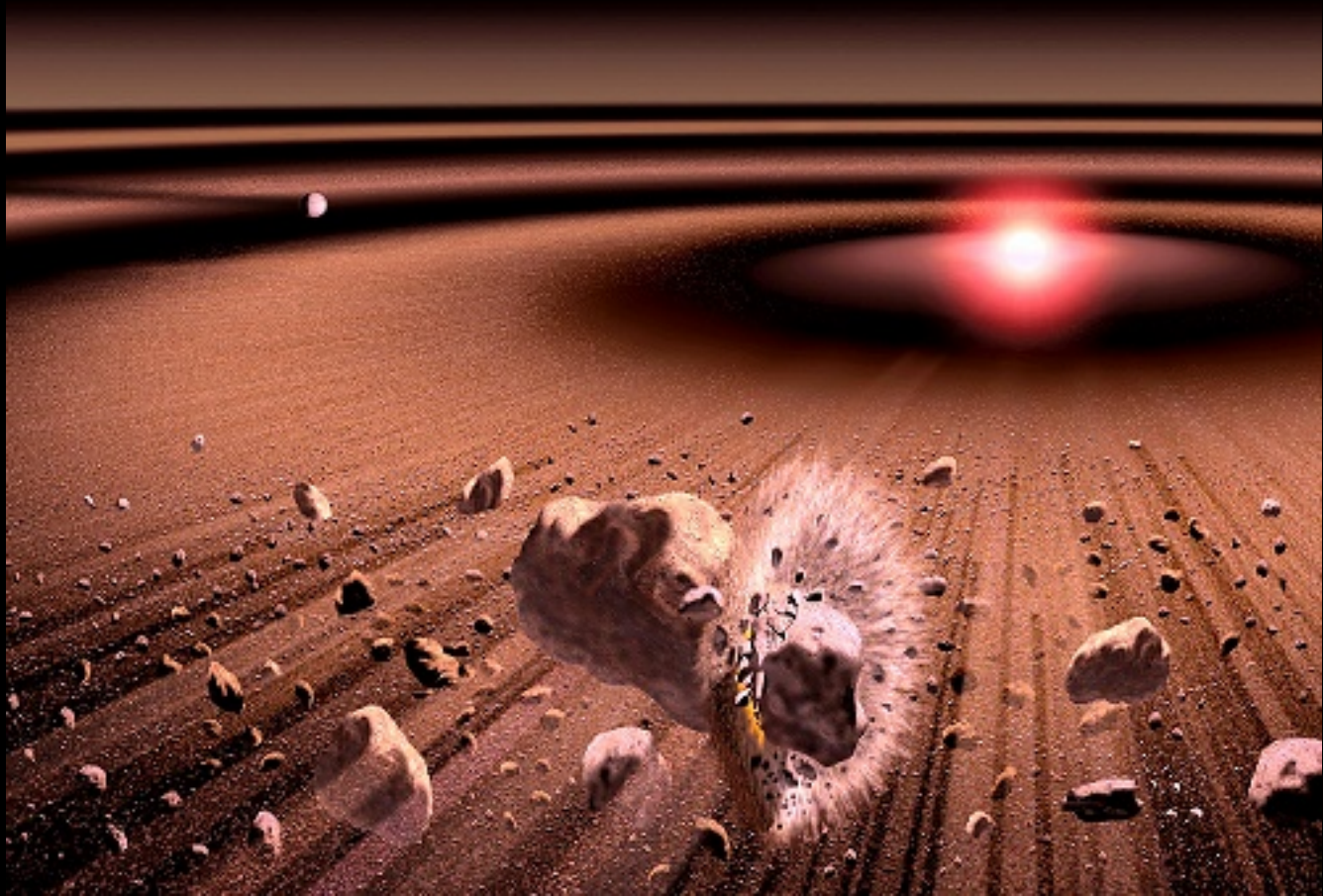


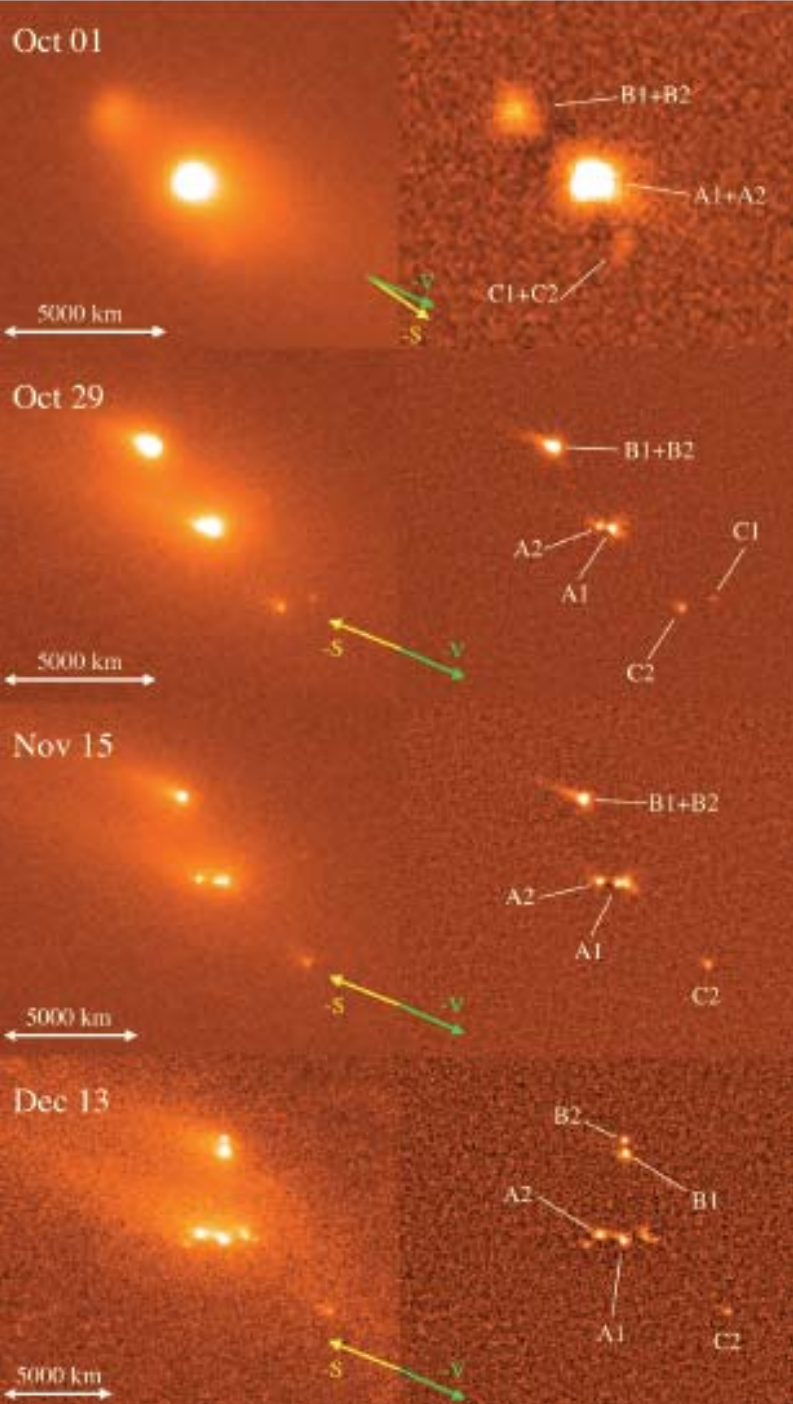
Так видит этот процесс художник...



15.12.2015

Рост планетезималей:
слипание + аккреция
Разрушение: столкновения



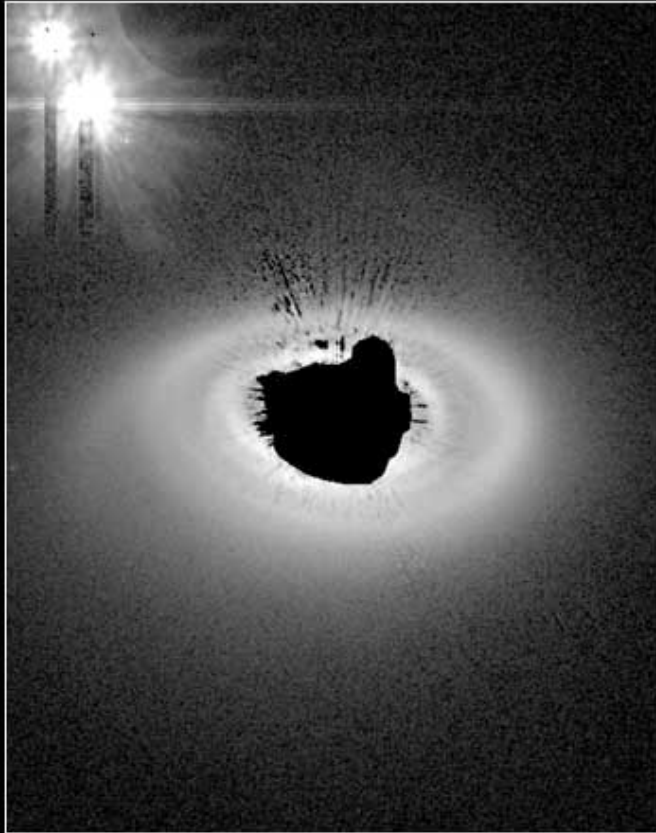


Разрушение астероида P 2013/R3 «на глазах»

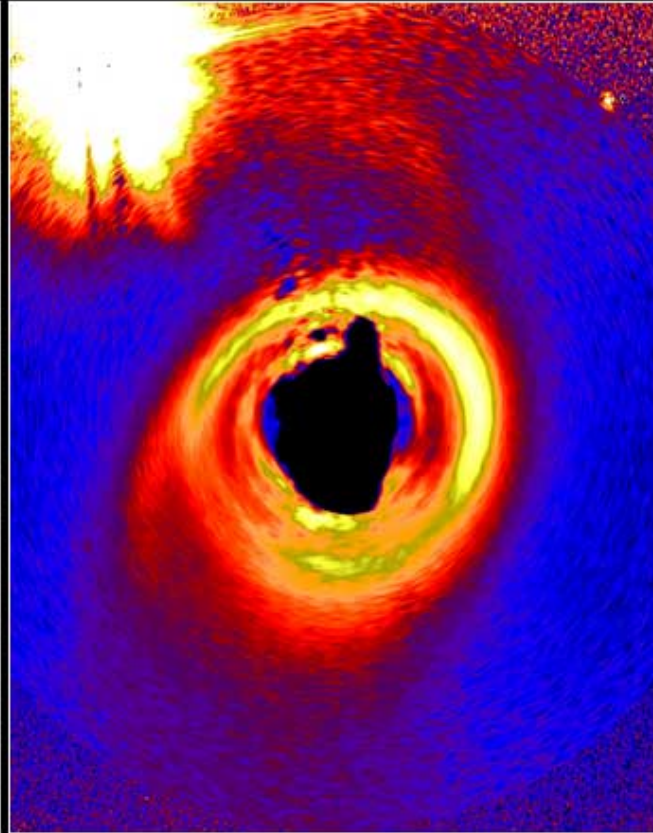
Jewitt et al. 2014

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.

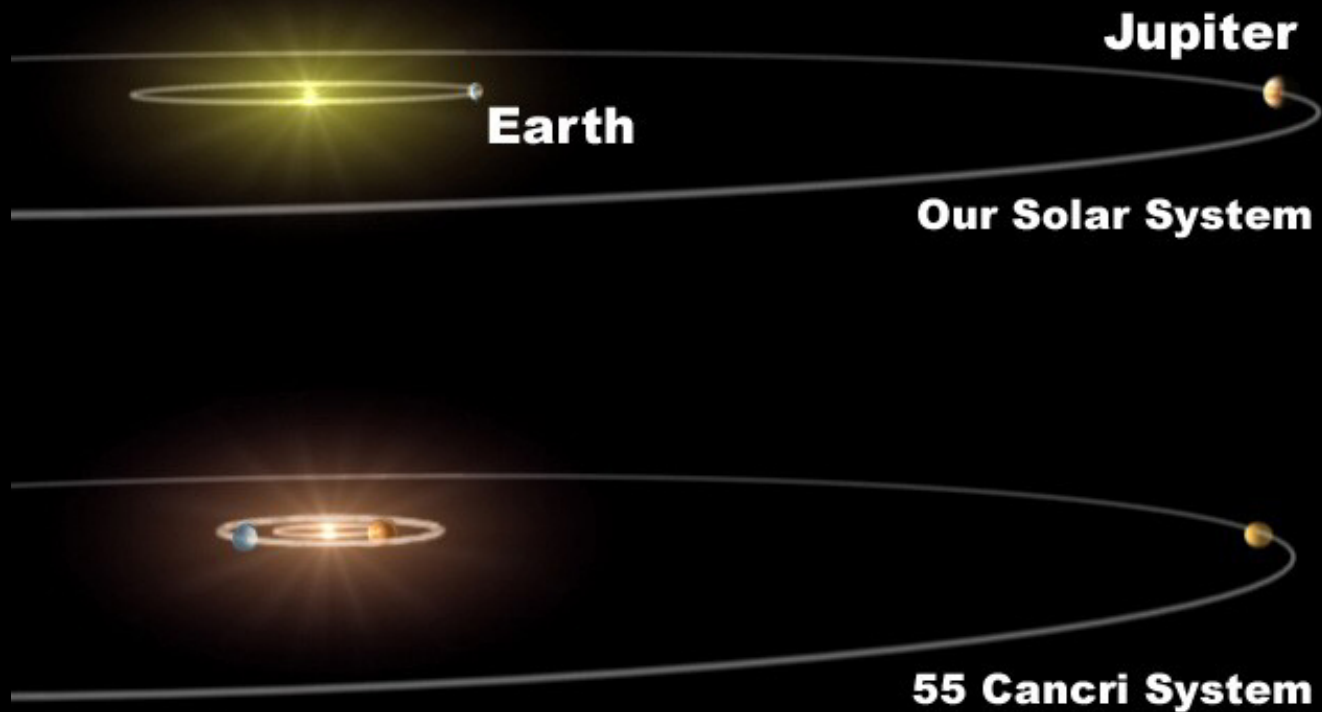
10^4 km

- Аккреция газа и образование ядер планет-гигантов

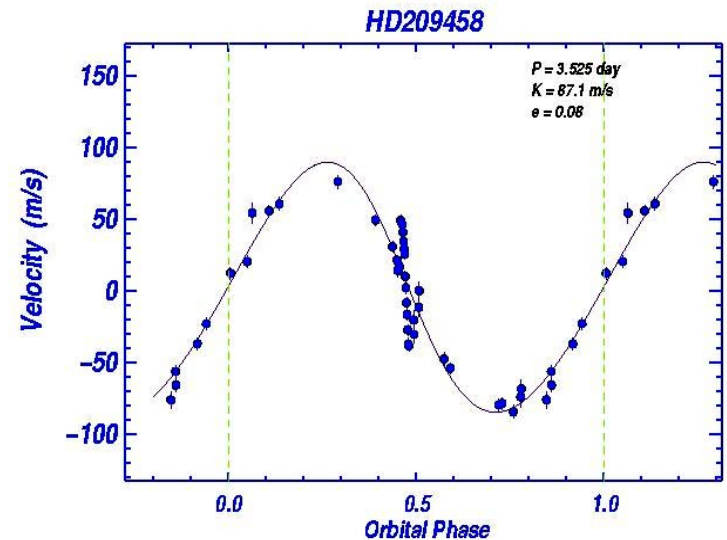
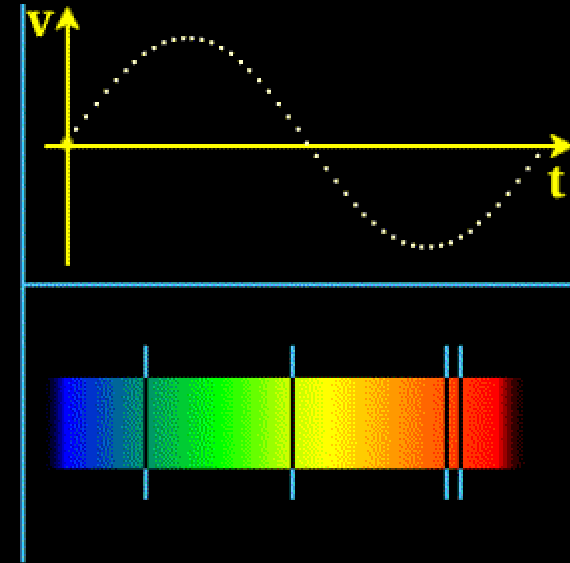


Часть 4. Коротко об экзопланетах

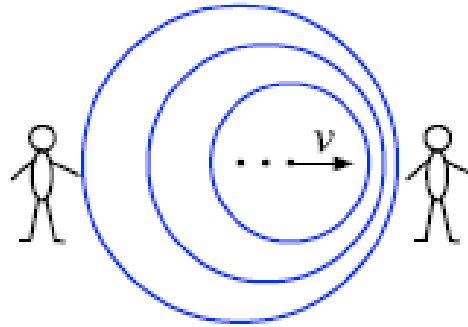
**ЭКЗОПЛАНЕТЫ (конец ноября 2015: свыше 6000),
См. <http://exoplanets.org>**



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



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

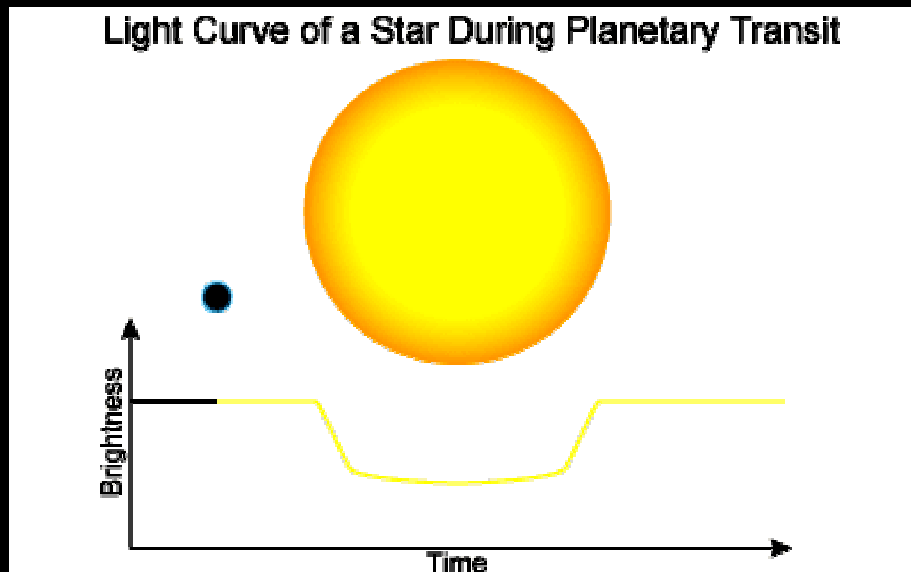
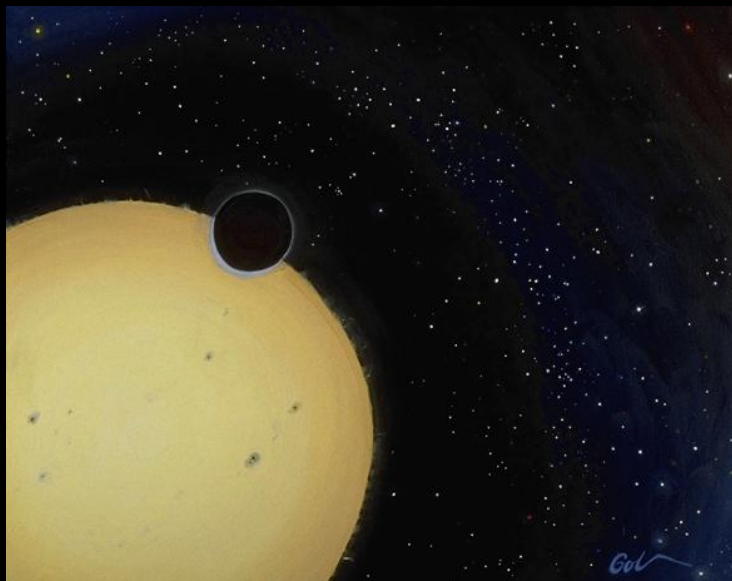


$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{\frac{c + v}{c - v}},$$

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

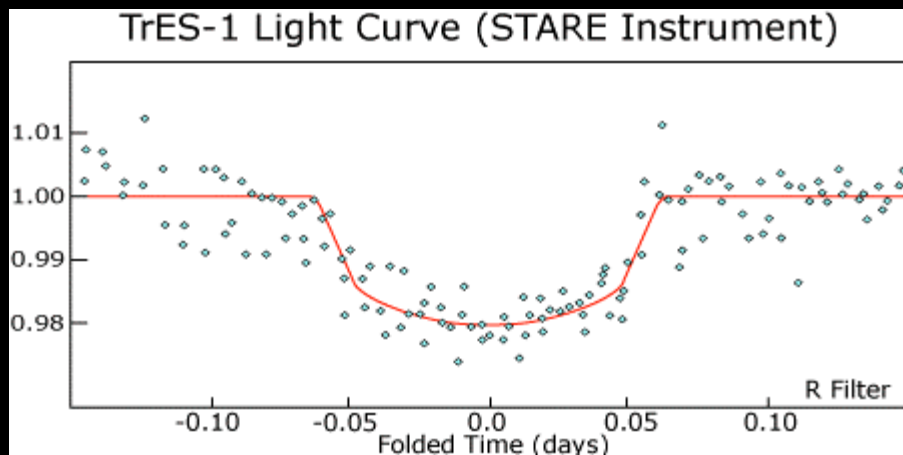
Фотометрический метод.

Прохождение планеты по диску звезды вызывает периодические изменения блеска



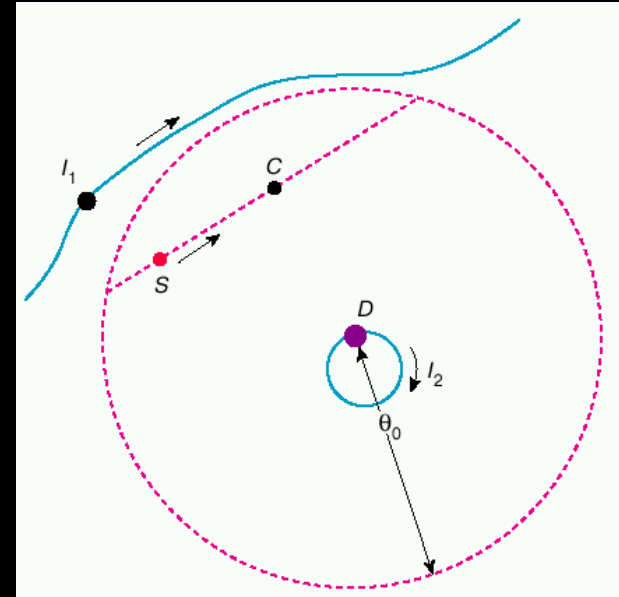
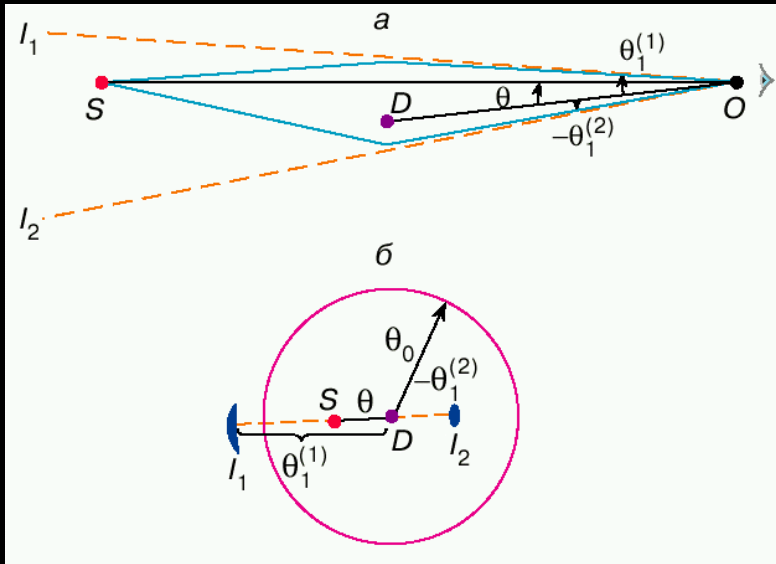
**2011: первые планеты
суб-земной массы**

15.12.2015



Гравитационное микролинзирование

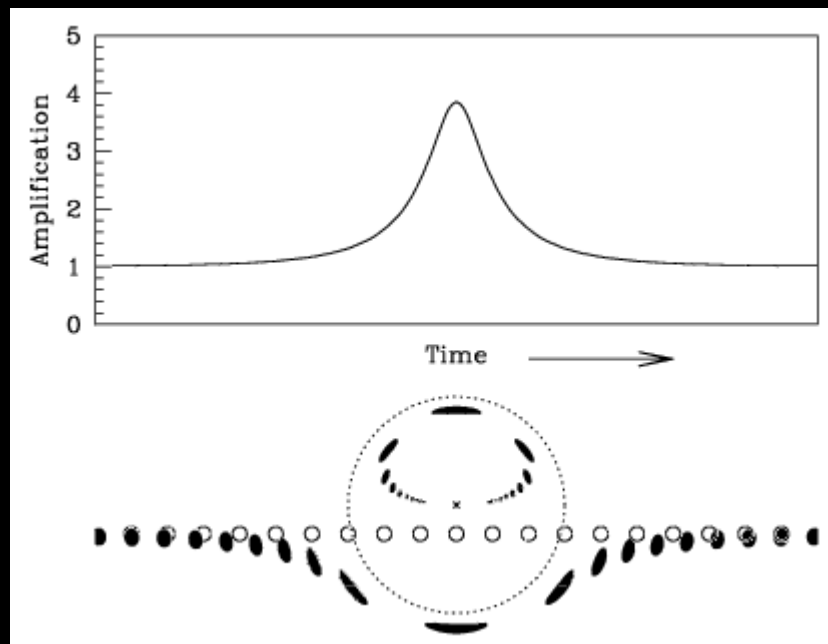
Эйнштейн, 1936

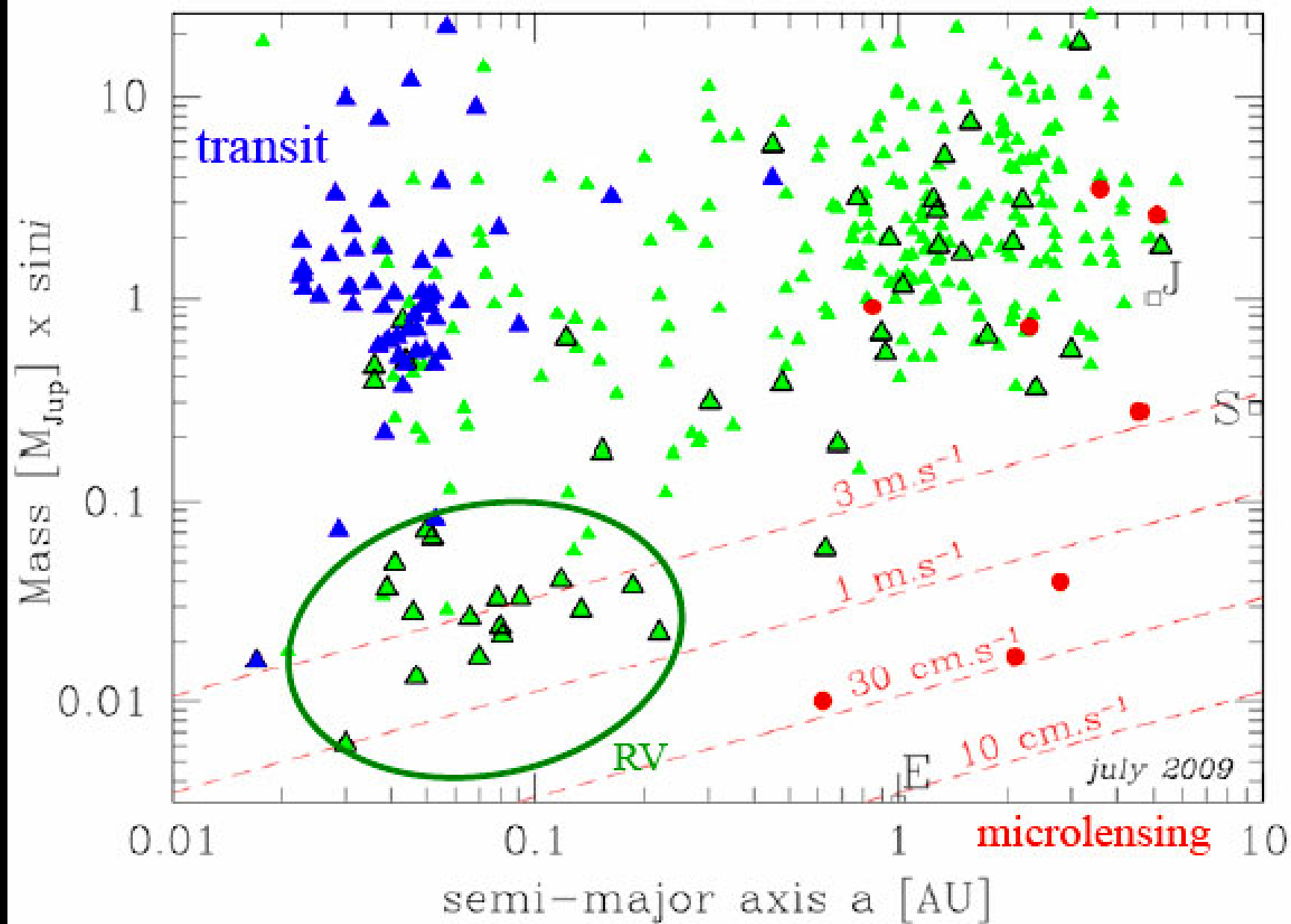


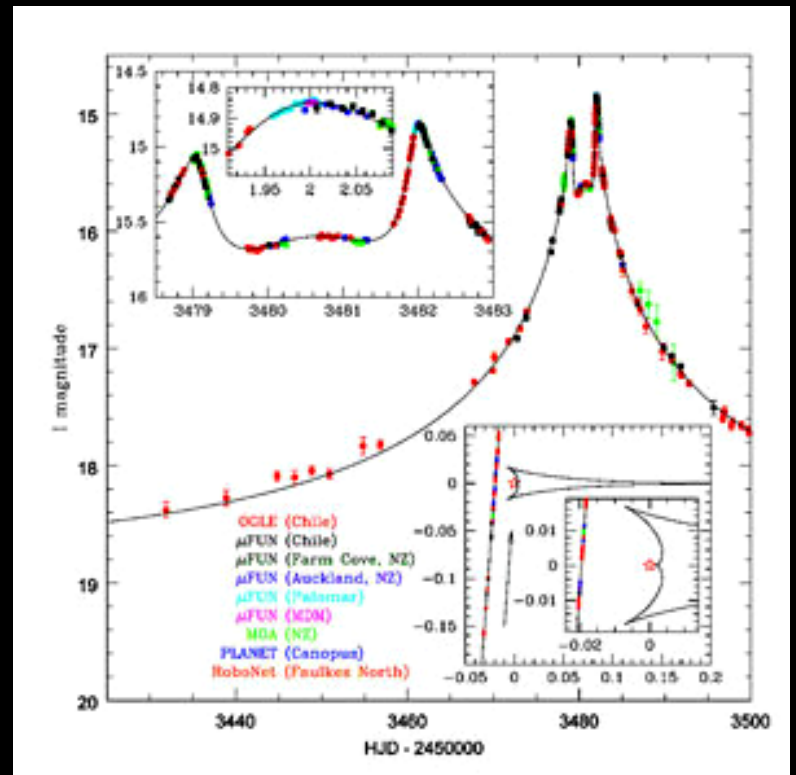
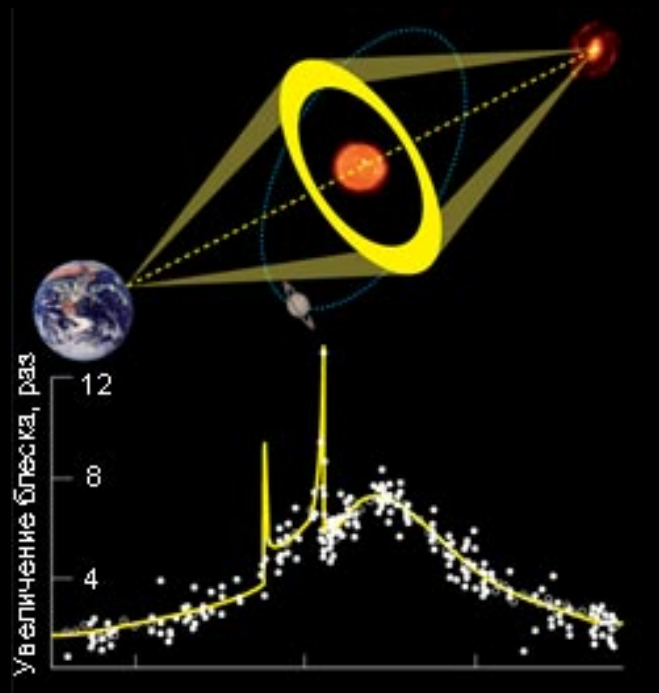
$$\theta_0^2 = \frac{4Gm}{c^2} \frac{L_{SD}}{(L_{SD} + L_{OD})L_{OD}},$$

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

- 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



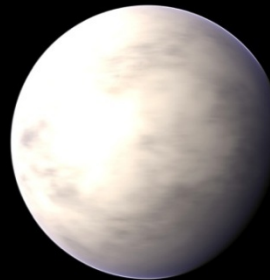
Mars
0.66



#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

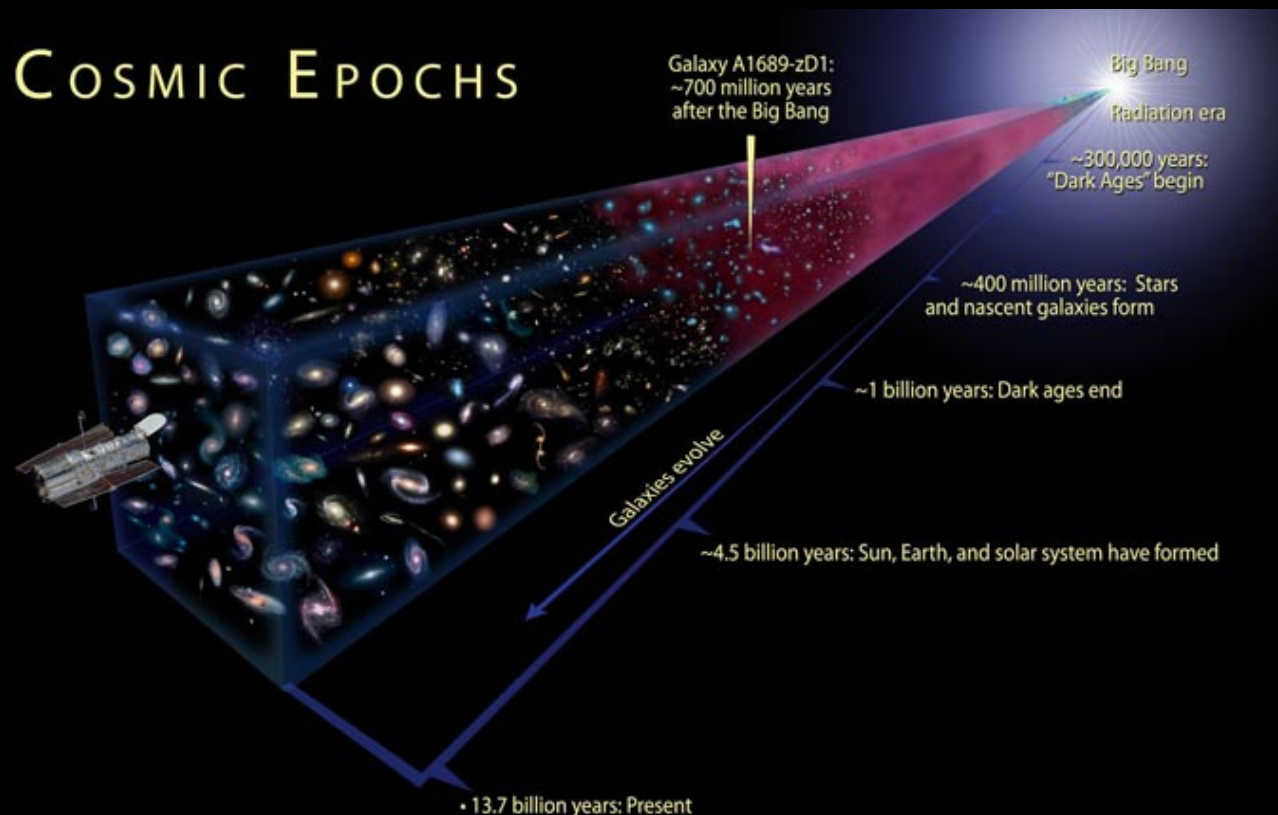
Last Update: July 20, 2012

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

15.12.2015

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



15.12.2015