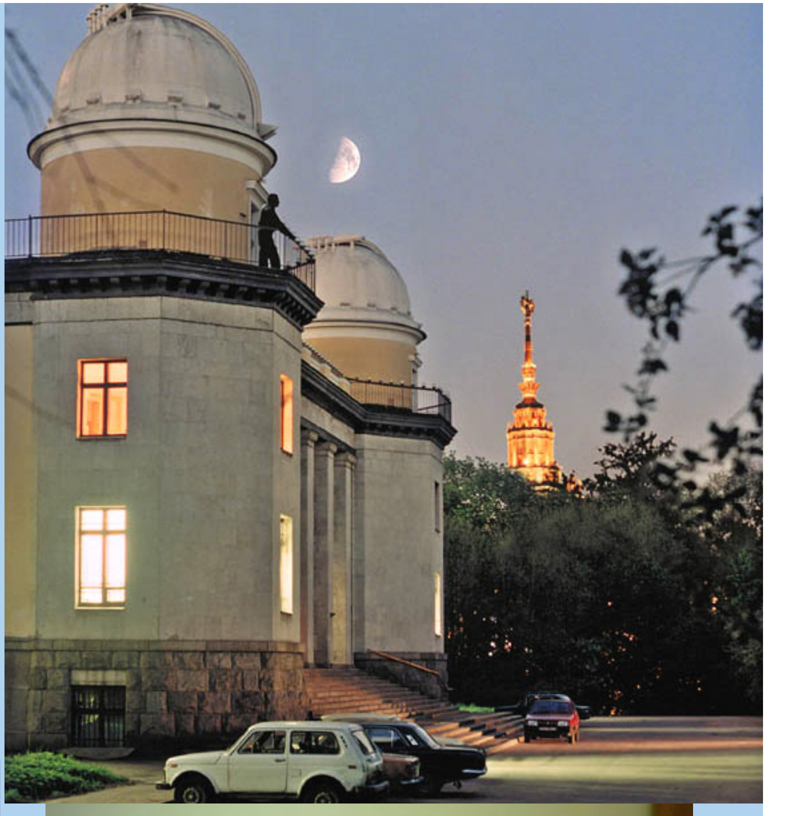
Цефеиды – звёздные маяки Вселенной

Расторгуев Алексей Сергеевич,
д.ф.-м.н., профессор, и.о. зав. кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова; заведующий отделом изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ МГУ
http://lnfm1.sai.msu.ru/~rastor



- **Содержание**
  - Такие разные звёзды
  - Источники звёздной энергии
  - Жизнь и гибель звёзд
  - Звёзды, меняющие блеск
  - Цефеиды – пульсирующие переменные
  - Физика пульсаций
  - Закон Мисс Ливитт: зависимость "период – светимость"
  - Цефеиды меняются !
  - Цефеиды в других галактиках
  - Как цефеиды помогли открыть Тёмную Энергию

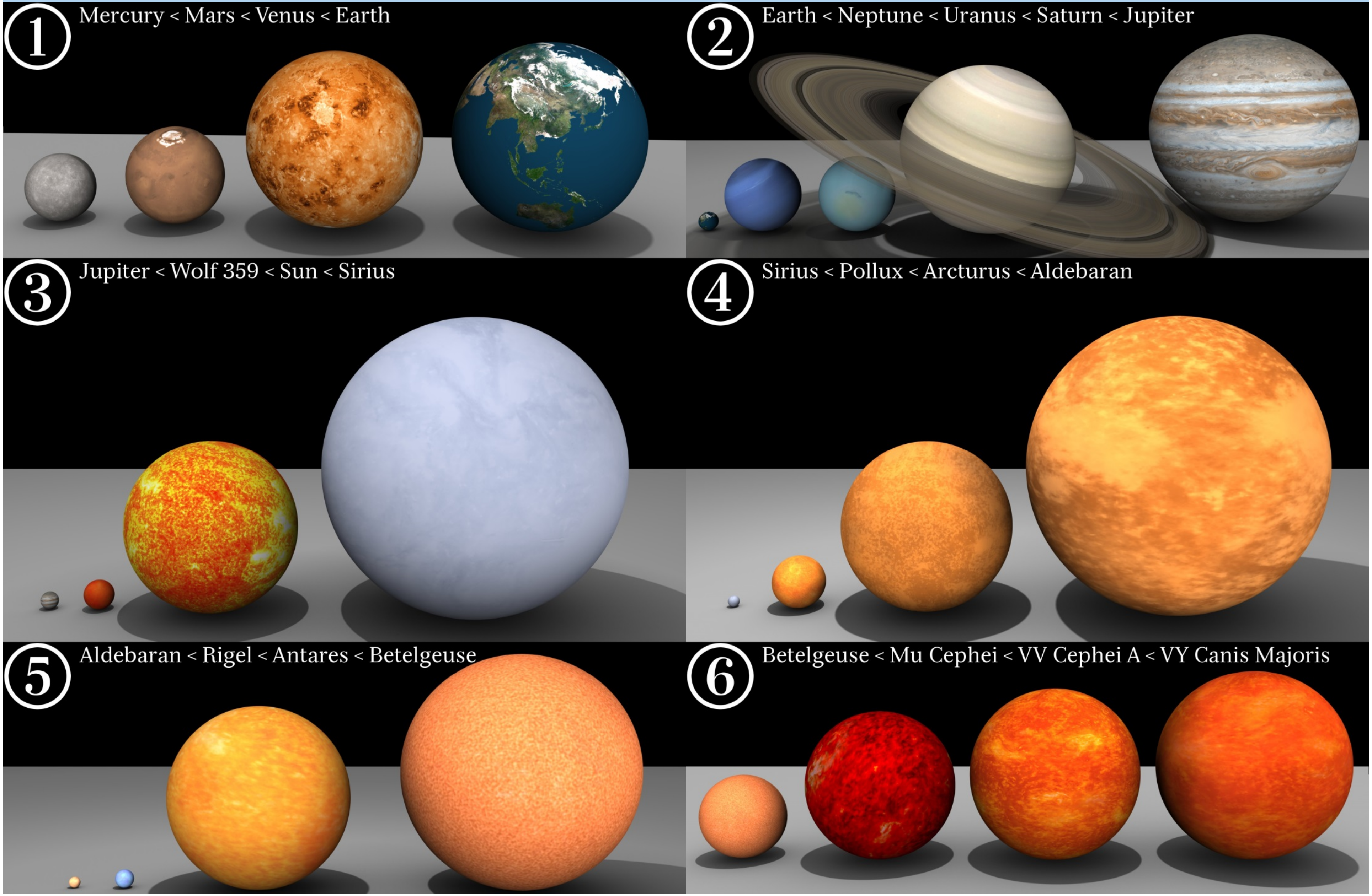
- **Единицы измерения:**
- **Расстояний:**
  - $R_{Sun} \approx 696$ тыс. км $\approx 109\ R_{Earth}$ (радиус Солнца)
  - 1 а.е. ≈ 150 млн. км $\approx 215\ R_{Sun}$
  - 1 пк ≈ 206265 а.е. $\approx 3{\cdot}10^{13}$ км ≈ 3.26 св. года
  - 1 кпк = 1000 пк
  - 1 Мпк = 1000 кпк
- **Массы (измеряются в массах Солнца):**
  - $1\ M_{Sun} \approx 2{\cdot}10^{33}$ г
- **Полная мощность излучения Солнца:**
  - $L_{Sun} \approx 4{\cdot}10^{33}$ эрг/с $\approx 4{\cdot}10^{20}$ Твт

Мир видимых звёзд: от бурых карликов до гипергигантов

- **Массы:**
  - 0.012 - 0.077 M_{Sun} (~12 – 80 масс Юпитера) - бурые (коричневые) карлики, или субзвёзды
  - 0.077 – ~150 (?) M_{Sun} – нормальные звёзды
  - < 1.40 M_{Sun} – белые карлики (плотные звёздные остатки)

- **Размеры:**
  - 5000-10000 км – белые карлики (размер Земли !)
  - ~0.01 – 0.2 R_{Sun} - бурые карлики
  - ~0.1 – 50 R_{Sun} – большинство нормальных звёзд
  - ~100 - 1500 R_{Sun} – звёзды от гигантов до гипергигантов

Сравнение размеров звёзд и планет



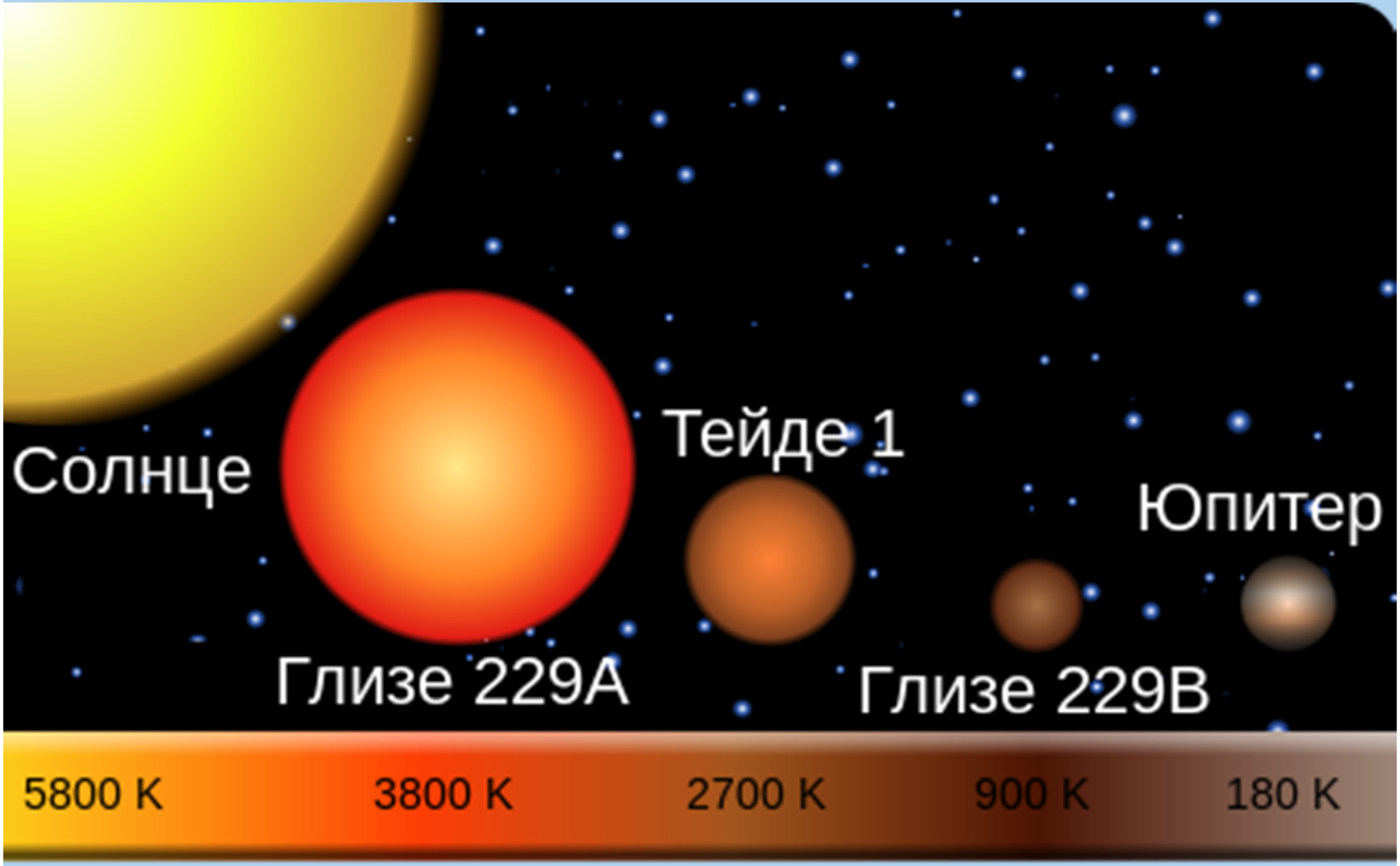
Мир видимых звёзд: от бурых карликов до гипергигантов

- **Средняя плотность вещества звёзд:**
  - 1.4 г/см^3 – Солнце (в центре 130 г/см^3)
  - **1 г/см^3 – плотность воды (для сравнения)**
  - 50 – 70 г/см^3 - бурые карлики
  - ~10^3 кг/см^3 = 1 т/см^3 – белые карлики
  - ~ 4 мг/см^3 – красные гиганты
  - ~ 0.03 мг/см^3 – сверхгиганты
  - ~ 0.0001 мг/см^3 – гипергиганты
  - **1.29 мг/см^3 – нормальная плотность воздуха (для сравнения)**

- **Температуры на поверхности звёзд:**
  - ~700 – 3000 K - бурые карлики
  - ~5000 – 70000 K – белые карлики
  - ~3000 – 50000 K – нормальные звёзды
  - ~50000 – 70000 K – горячие массивные звёзды типа Вольфа-Райе
  - **0 K = -273.16°C – точка отсчёта абсолютных температур**

- Звёзды-крохи: белые карлики, самые плотные астрономические объекты, наблюдаемые в оптическом диапазоне

Планеты, бурые и красные карлики, Солнце…



Звезда Красный карлик Коричневые карлики Планета

- **Массы, размеры, температуры и светимости звёзд связаны между собой**

- Закон Стефана-Больцмана:

$$L_* = 4\pi R_*^2 \cdot \sigma T_*^4$$

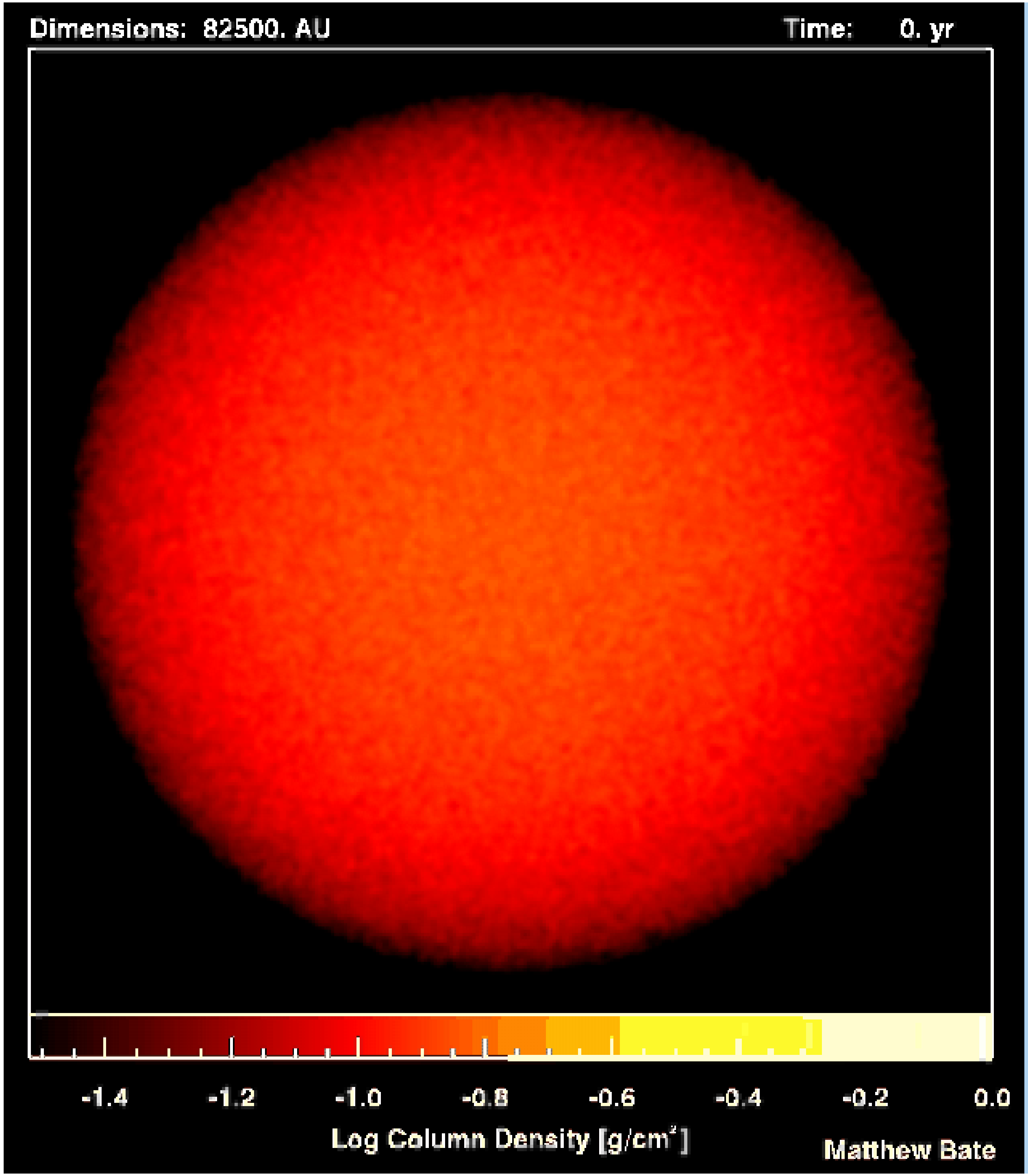
- L_* - полная излучаемая звездой мощность (светимость)

Скопление М 16 и молекулярный газ в туманности Орёл = IC 4703

Звёзды рождаются путём гравитационного сжатия облаков холодного (Т~20-50 К) молекулярного газа (водорода)

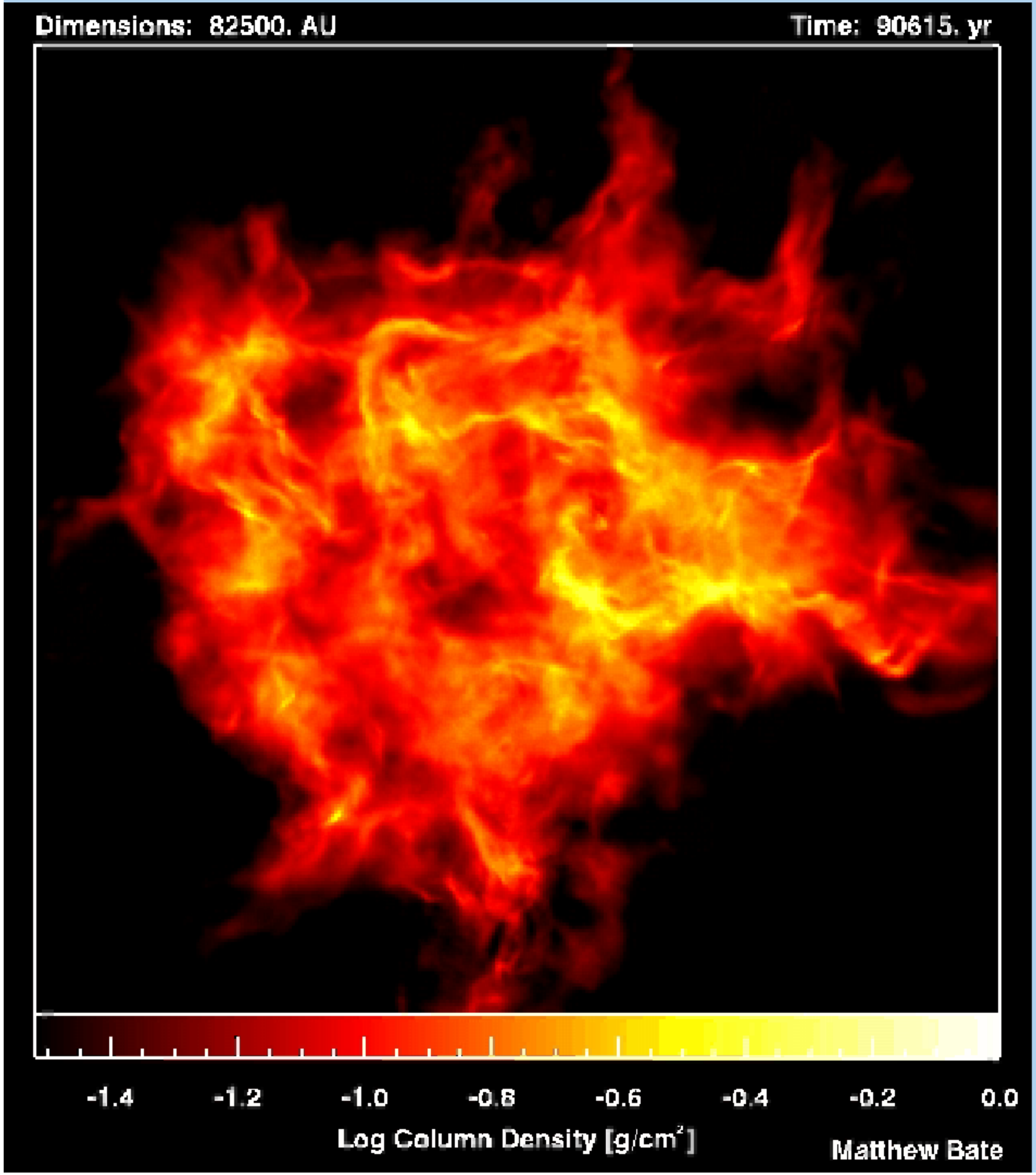
Их наблюдают в радио- и ИК-диапазонах спектра

- Покажем результаты расчётов коллапса (сжатия) молекулярного облака, сопровождающегося рождением звёзд и звёздных скоплений



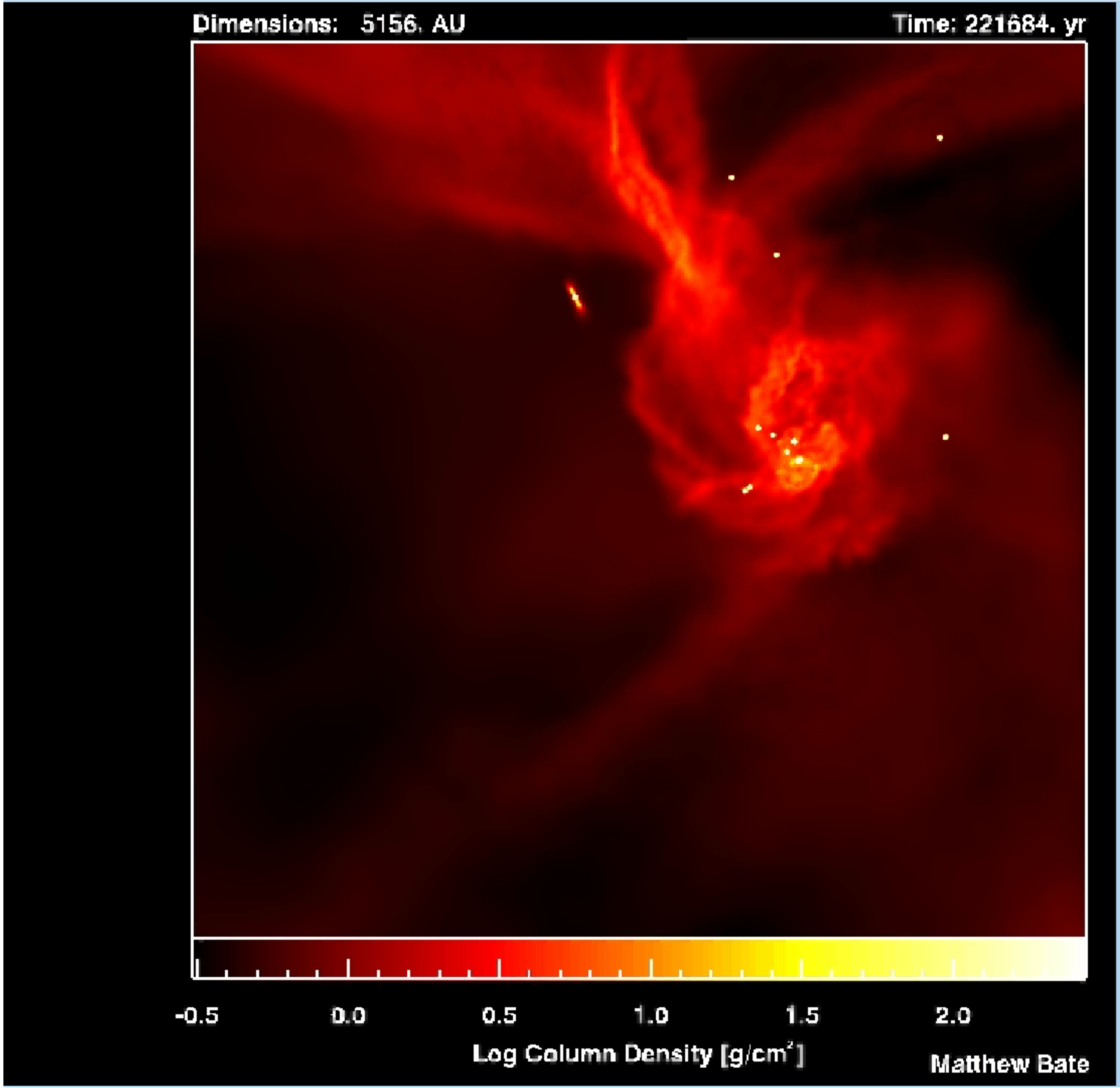
Имитация
коллапса
и фрагментации
молекулярного
облака

Масса ~500 M_{Sun}
Размер ~0.8 пк
Весь цикл
~240 тыс. лет



Имитация коллапса и фрагментации молекулярного облака

Масса ~500 M_{Sun}
Размер ~0.8 пк
Весь цикл ~240 тыс. лет



Имитация
коллапса
и фрагмент
молекулярн
облака

Масса ~500
Размер ~0.8
Весь цикл
~240 тыс. л

Источники звёздной энергии

- **Быстрое гравитационное сжатие** – сразу после рождения звезды из молекулярного газа, а также в промежутках между сменами вида ядерного "горючего". Запасы гравитационной энергии невелики.

- **Термоядерные реакции** синтеза тяжёлых ядер из водорода, гелия и других элементов – самая длительная фаза жизни звёзд. Запасы ядерного "горючего" велики. **Дефект массы - эффект СТО: $E = \Delta m \cdot c^2$.**

Источники звёздной энергии

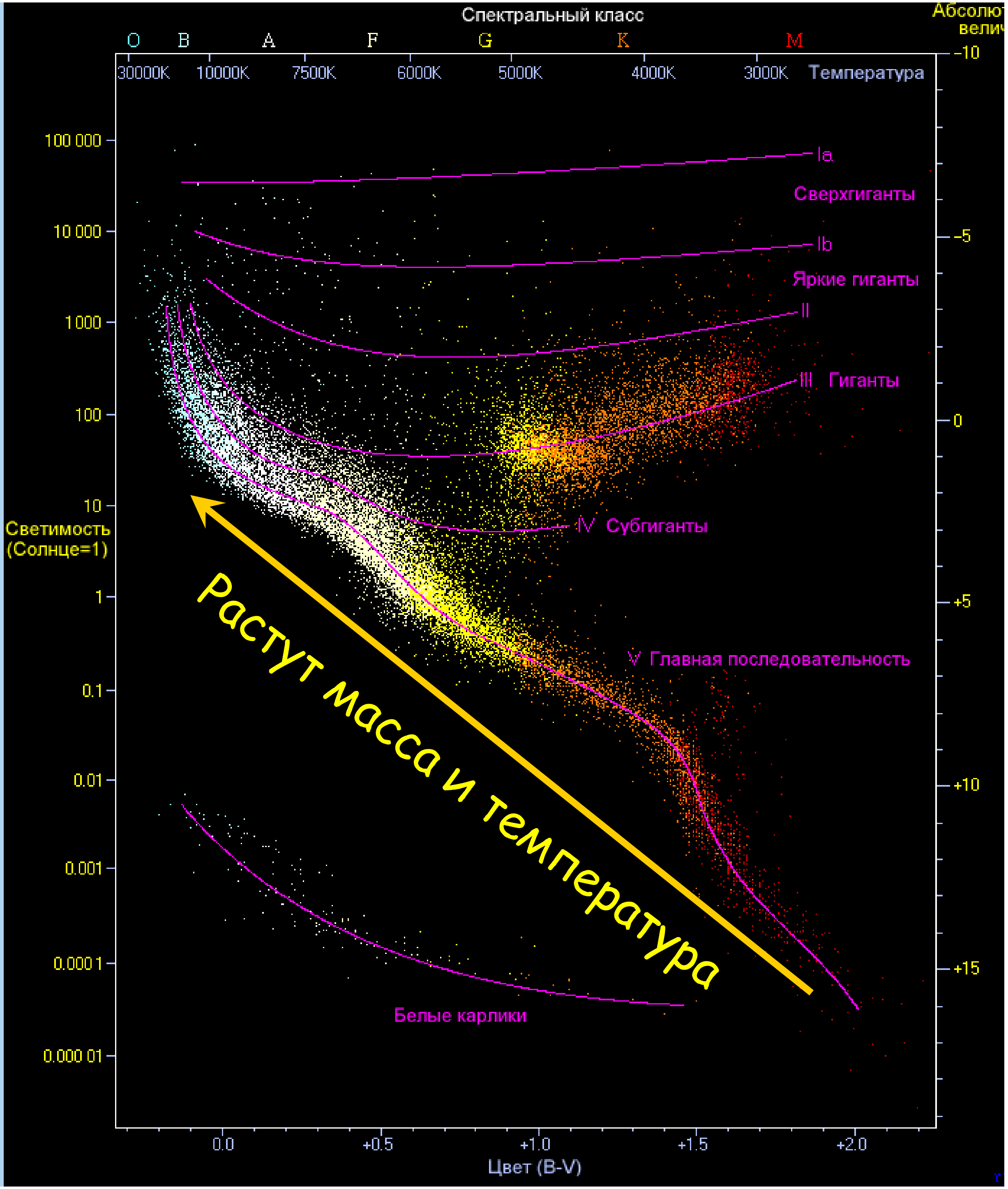
- **Быстрое гравитационное сжатие** – сразу после рождения звезды из молекулярного газа, а также в промежутках между сменами вида ядерного “горючего”. Запасы гравитационной энергии невелики.

Запасов гравитационной энергии Солнцу хватило бы всего на 17 – 20 млн. лет, в то время как возраст Солнца – не менее 4 млрд. лет

Диаграмма "цвет – светимость"

Большинство звёзд лежат **на Главной Последовательности звёзд-карликов**

Это звёзды, в которых из водорода синтезируется гелий



От газового шара к звезде

- При сжатии под действием тяготения звезда разогревается, пока давление газа не сравняется с силой гравитации
- После достижения центральной температуры ~15 млн. К и плотности ~100 г/см^3 в ядре звезды "зажигаются" термоядерные реакции превращения водорода в гелий.
- **Это начало первого этапа настоящей жизни звезды на Главной Последовательности, здесь звезда проводит бОльшую часть жизни**

От газового шара к звезде

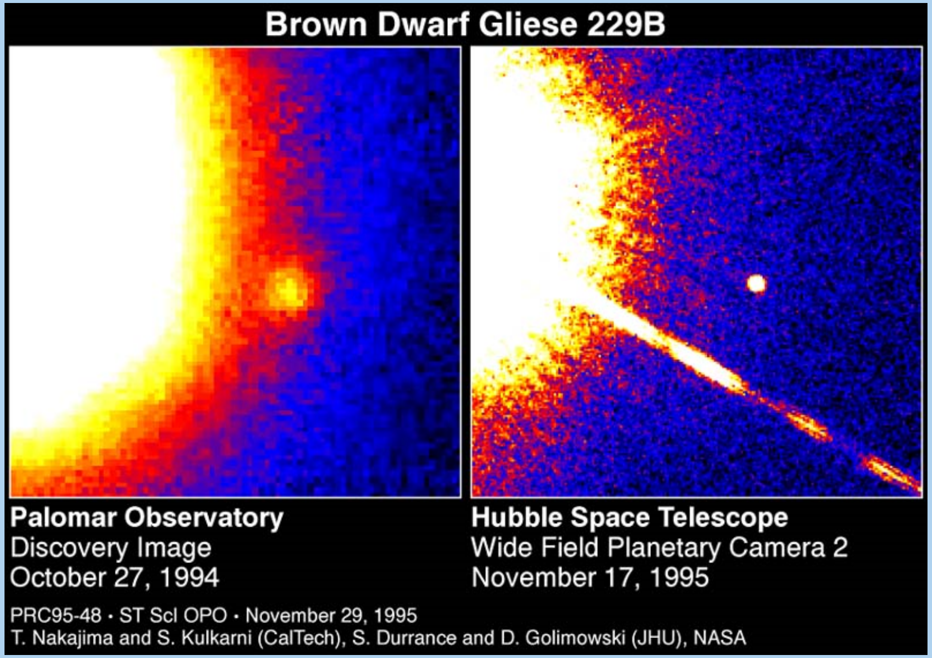
- В недрах Солнца каждую секунду в излучение превращаются 470 млн. тонн ядерного горючего – водорода.

  Это непрерывный термоядерный "взрыв", "управляемый" гравитацией

- Это начало первого этапа настоящей жизни звезды на Главной Последовательности, здесь звезда проводит бОльшую часть жизни

Бурые карлики – не звёзды !

- В недрах звёзд с массами менее 0.076 M_{Sun} (бурые карлики) термоядерные реакции никогда не "зажгутся" – из-за низкой температуры в ядре

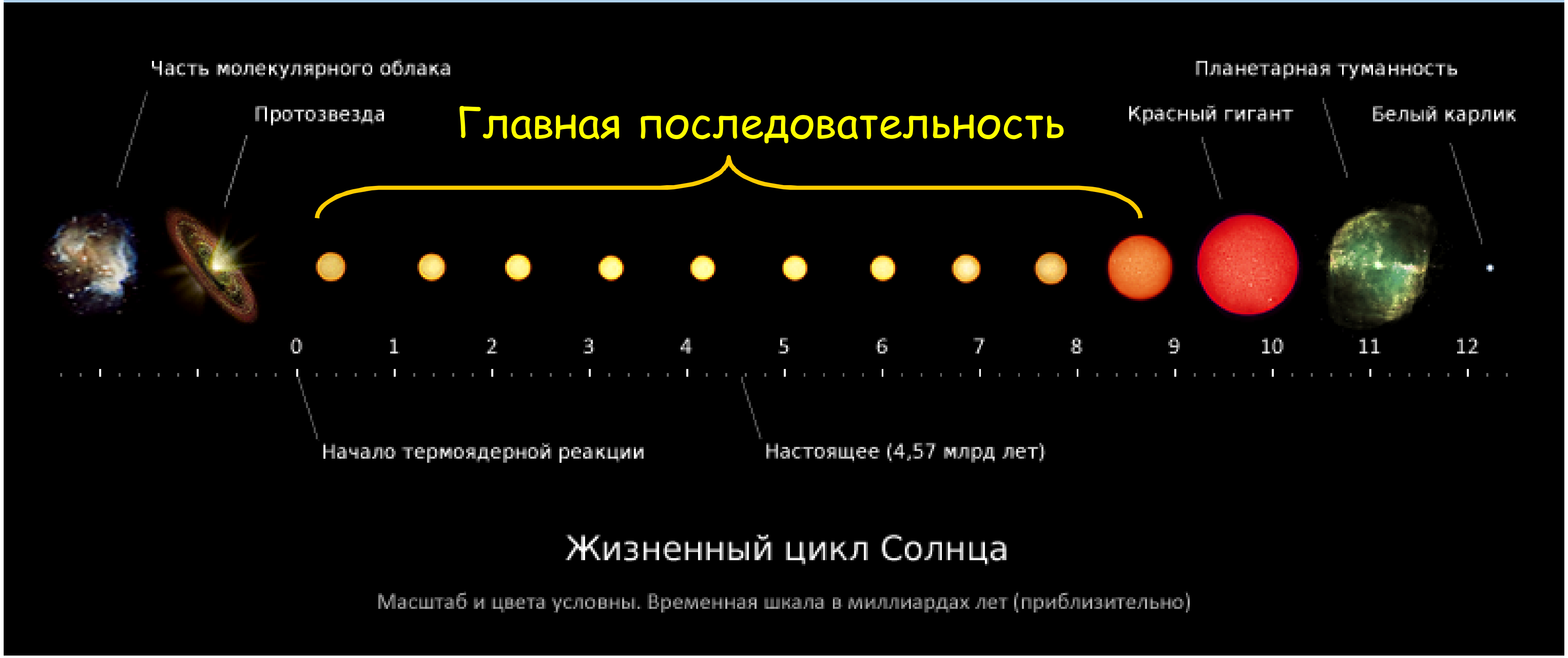


- Это не звёзды в полном смысле слова, а **субзвёзды.** Их источник энергии в течение всей жизни - только гравитационное сжатие, а эволюция – постепенное остывание

- После истощения ядерного “горючего” – водорода – ядро снова будет сжиматься, температура ядра и радиус звезды – расти

- **Следующий жизненный цикл звезды (синтеза ядер углерода из ядер гелия) требует центральной температуры уже порядка 100 млн. К**
- В ходе дальнейшей эволюции температура в ядре звезды всё время растёт, достигая 2-3 млрд. К

- **Биография Солнца**
- Главная последовательность: ~9 млрд. лет
- Стадия субгиганта/красного гиганта: ~1 млрд. лет
- Сброс оболочки, планетарная туманность
- Белый карлик; охлаждение ~100 млрд. лет



- В течение “жизни“ звезды на ГП в её ядре “сгорает“ примерно 10% всей массы водорода, дефект массы реакции $\Delta M/M \approx 0.7\%$ и выделяется полная энергия $E_{ГП} = \Delta M \cdot c^2 \approx (M/M_{Sun}) \cdot 10^{51}$ эрг
- Мощность излучения звезды на ГП

$$L_{ГП} \approx (M/M_{Sun})^3 \cdot 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$$

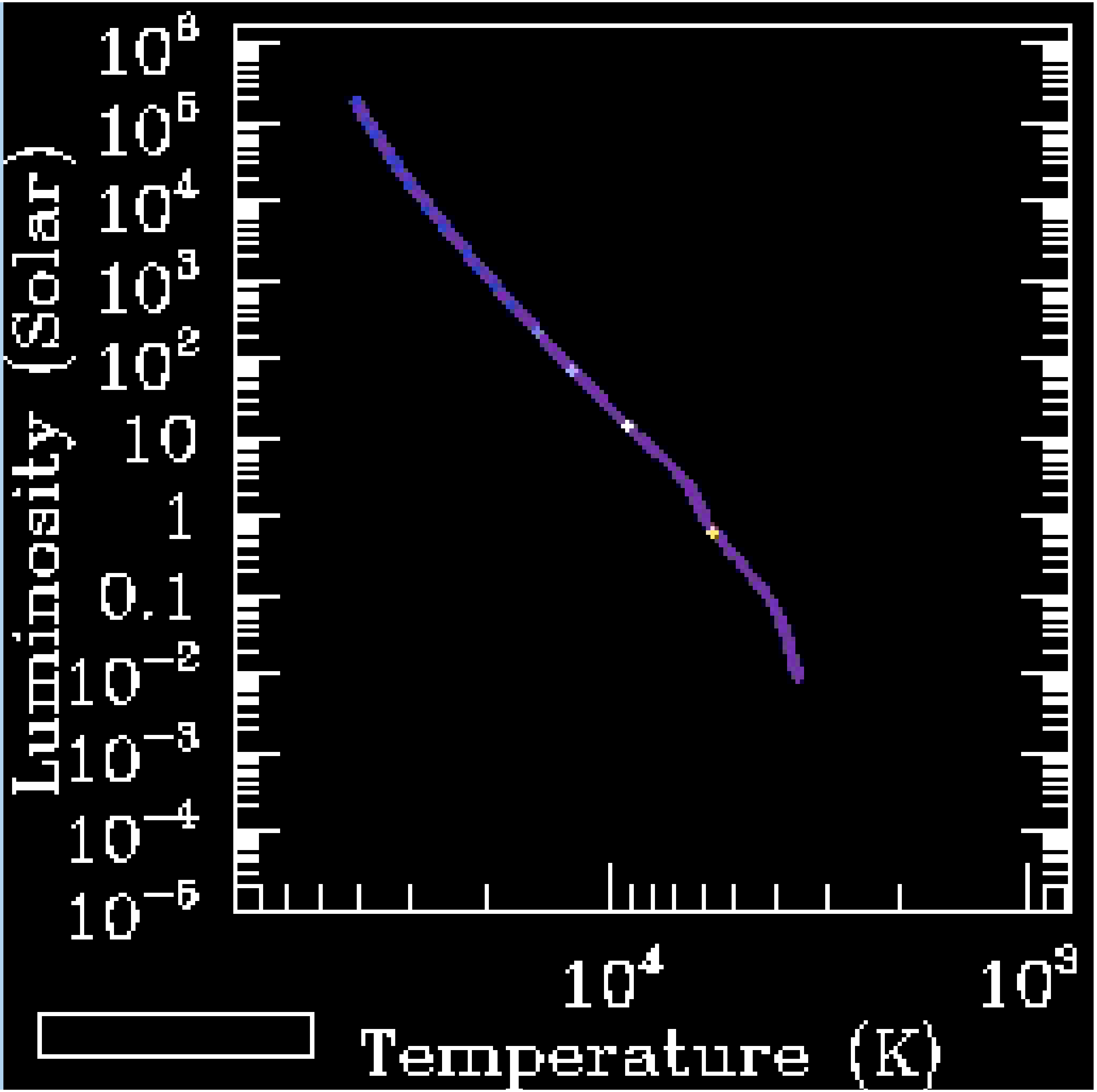
- Значит, время жизни на ГП
- $$T_{ГП} \approx E_{ГП} / L_{ГП} \approx (M/M_{Sun})^{-2} \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

быстро уменьшается с ростом массы звезды (у Солнца $T_{ГП} \approx$ 9-10 млрд. лет)

Следующие стадии эволюции ещё короче

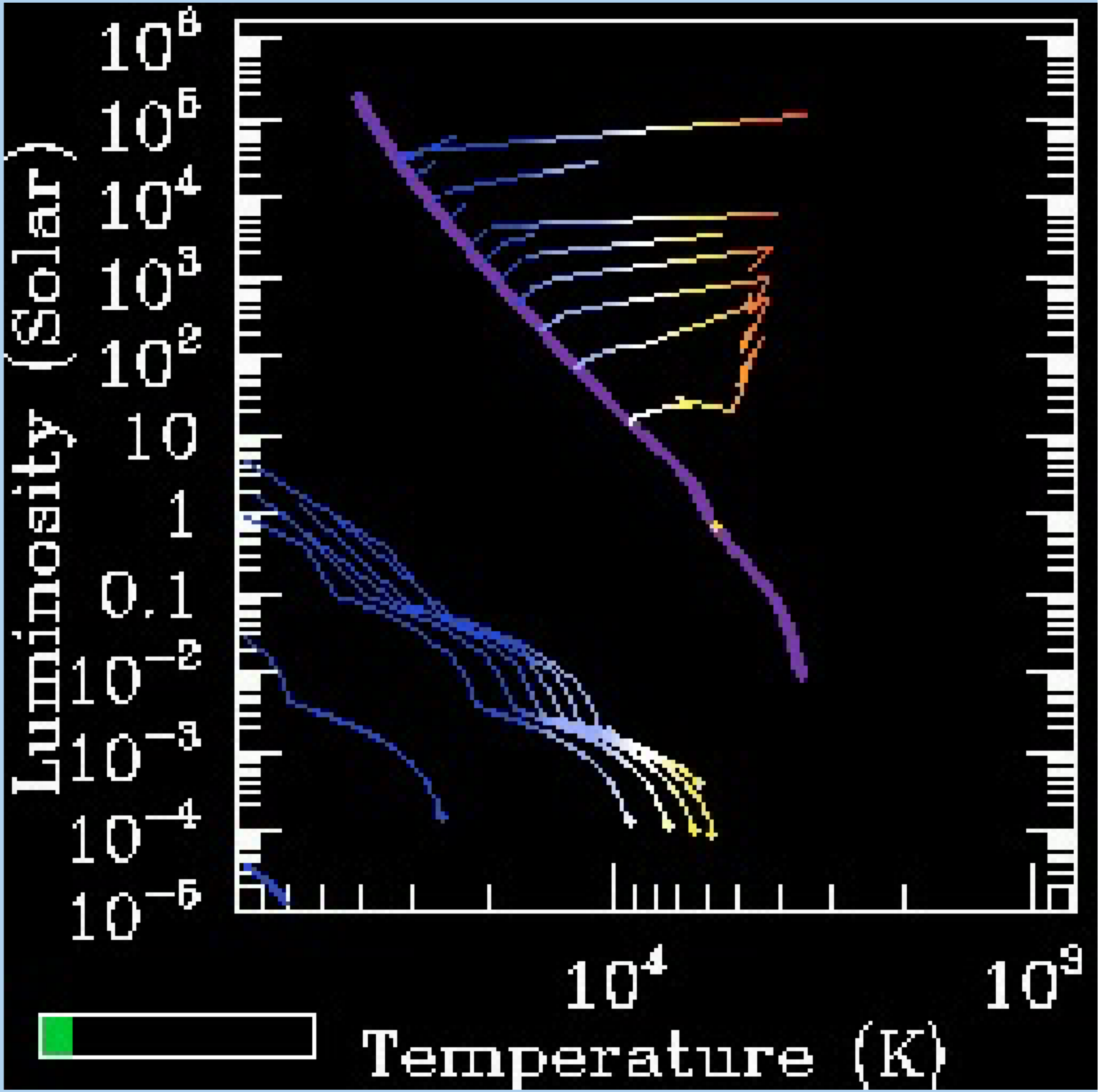
Эволюция звёзд с массами от 1 до 40 Солнечных

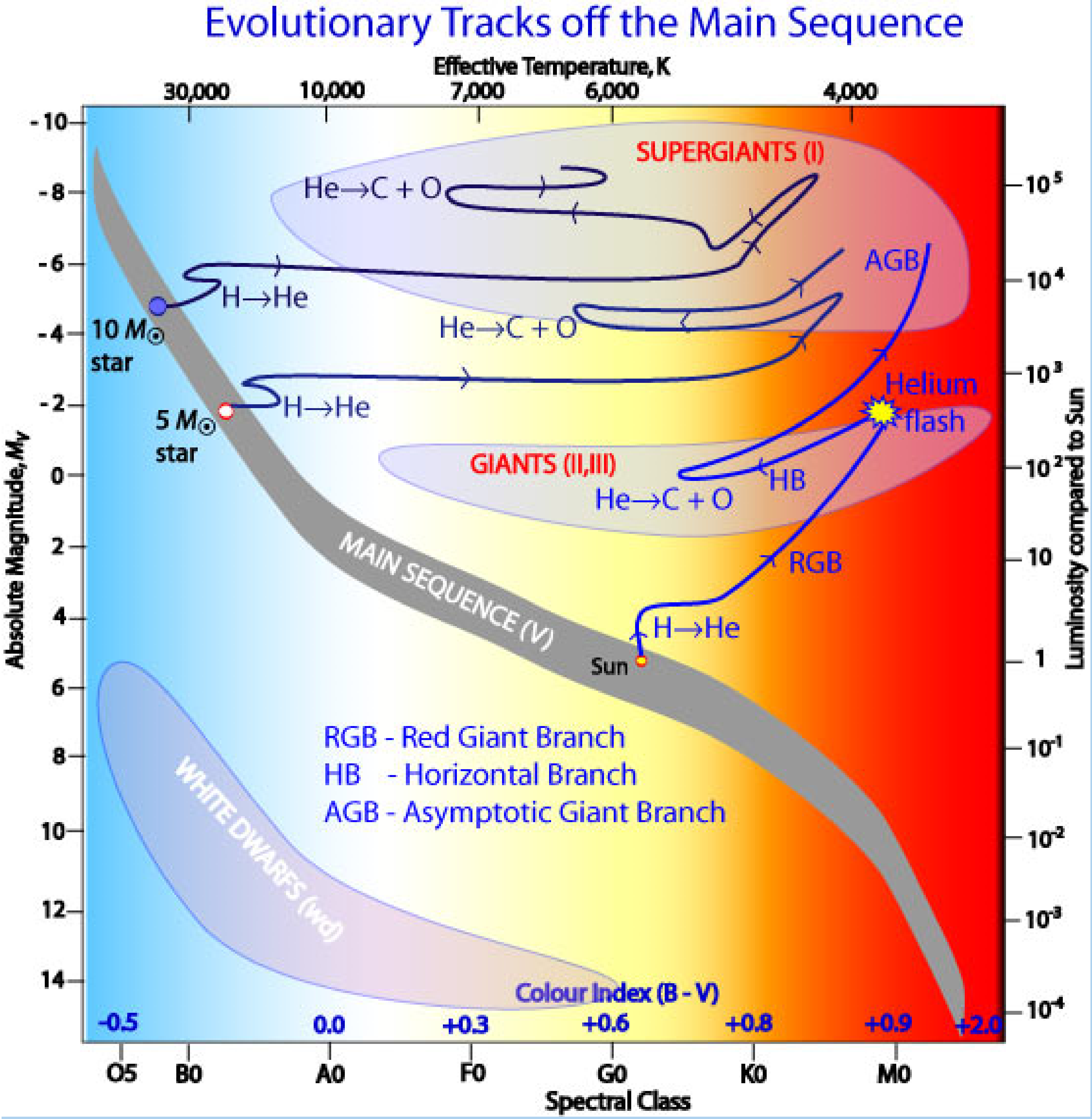
Компактные остатки: белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры



Эволюция звёзд с массами от 1 до 40 Солнечных

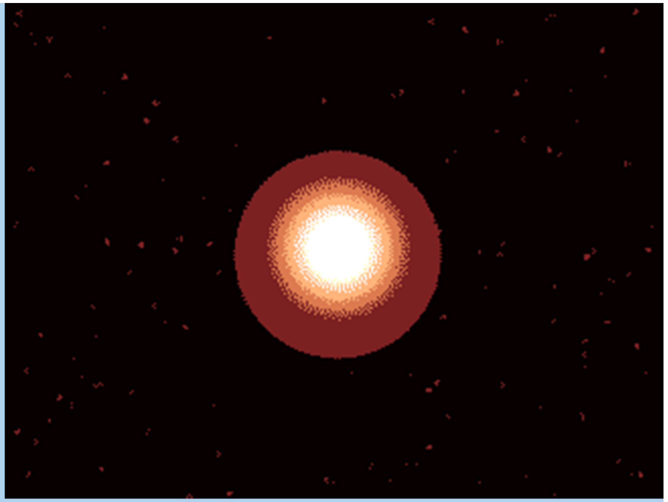
Компактные остатки: белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры



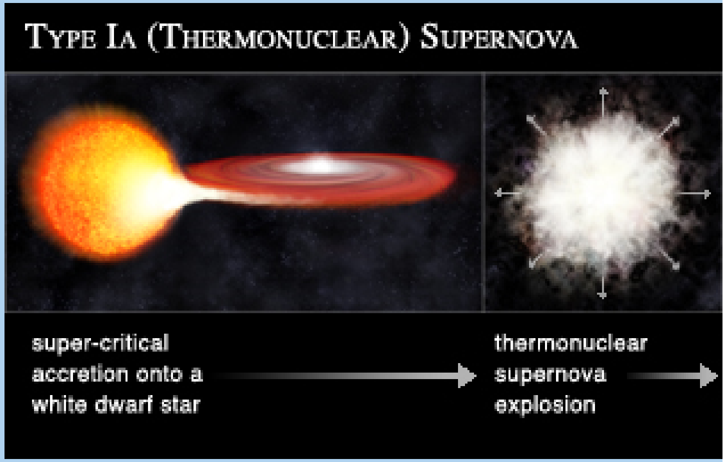


- Пути эволюции звёзд разных масс

- Конечные стадии эволюции массивных звёзд – взрывы Сверхновых с образованием компактного остатка (нейтронной звезды или чёрной дыры) и обширной расширяющейся оболочки.



- **Это Сверхновые типов I b/c и II (или Сверхновые с коллапсом ядра)**
- Если масса белого карлика в двойной системе превысит предельную (≈1.4 M_{Sun}) либо из-за натекания вещества от спутника, либо из-за слияния двух белых карликов – произойдёт вспышка **Сверхновой типа Ia (или "термоядерной Сверхновой")**



Полная энергия взрыва достигает 10^{51} эрг (такую энергию выделит Солнце за всю жизнь)

В максимуме блеска светит почти как вся галактика

Фабрики химических элементов

- **Первые звёзды** состояли из водорода (H – 75%, D – 0.003%), изотопов гелия (^4He – 25%, ^3He – 0.002%) лития (Li – 10^{-7}%): эти элементы образовались при первичном нуклеосинтезе в ранней горячей Вселенной, в первые три минуты, при T ~ 1 MeV ≈ 12 млрд. K
- **---- Современный состав звёзд: ----**
- **Водород (H) – 70-75% массы**
- **Гелий (He) – 23-28% массы**
- Все остальные ("тяжёлые") элементы (C, N, O, Mg, Si, S, Ca, …) – < **2-3% массы**

- На стадиях эволюции после "горения" водорода идёт ***термоядерный синтез*** ещё более тяжёлых элементов (на примере первичных нуклидов):
- $3\,^{4}He \rightarrow {}^{12}C$ (тройной α-процесс)
  - $^{4}He + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O$
  - $2\,^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$
  - $^{4}He + {}^{20}Ne \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$
  - $2\,^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^{4}He$ …

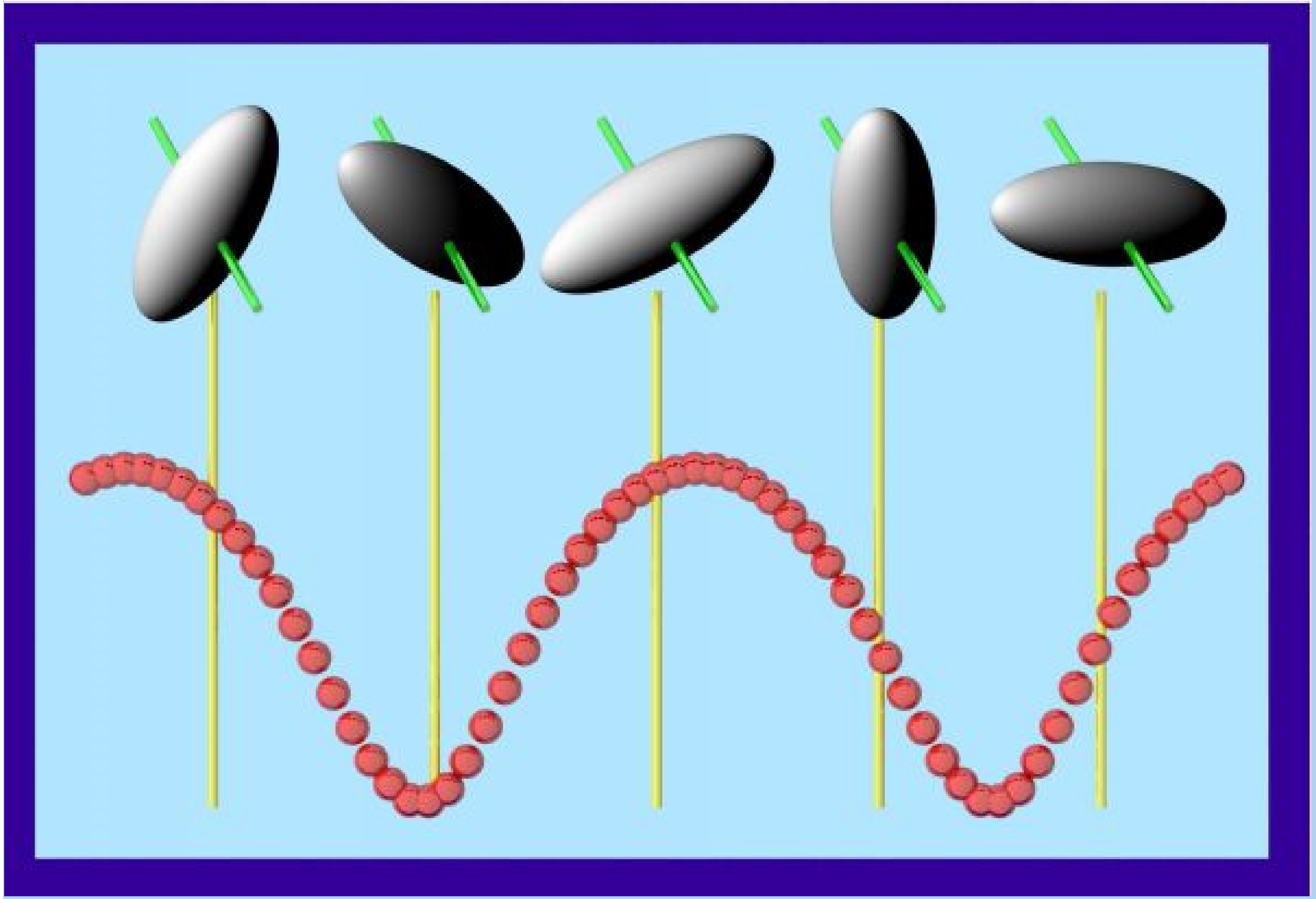
  (в порядке роста температуры от ~100 млн. К до ~3 млрд. К)
- Реакции ***синтеза*** завершаются на элементах "железного пика" (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu)
- Элементы за железным пиком образуются путём радиоактивного распада ядер (захват нейтрона + бета-распад ➔ увеличение заряда ядра)


M1 - Crab Nebula
Туманность
Расстояние: 9,6407 св. л.
Радиус: 5,5000 св. л.
Видимый диаметр: 69° 34' 12,5"
2012 янв 26 13:17:40 UTC
Текущее время
SN 1054
CTA 36
Крабовидная туманность
Скорость: 0,00000 м/с
Синх. вращение NP0532
FOV: 34° 48' 56,4" (1,00×)

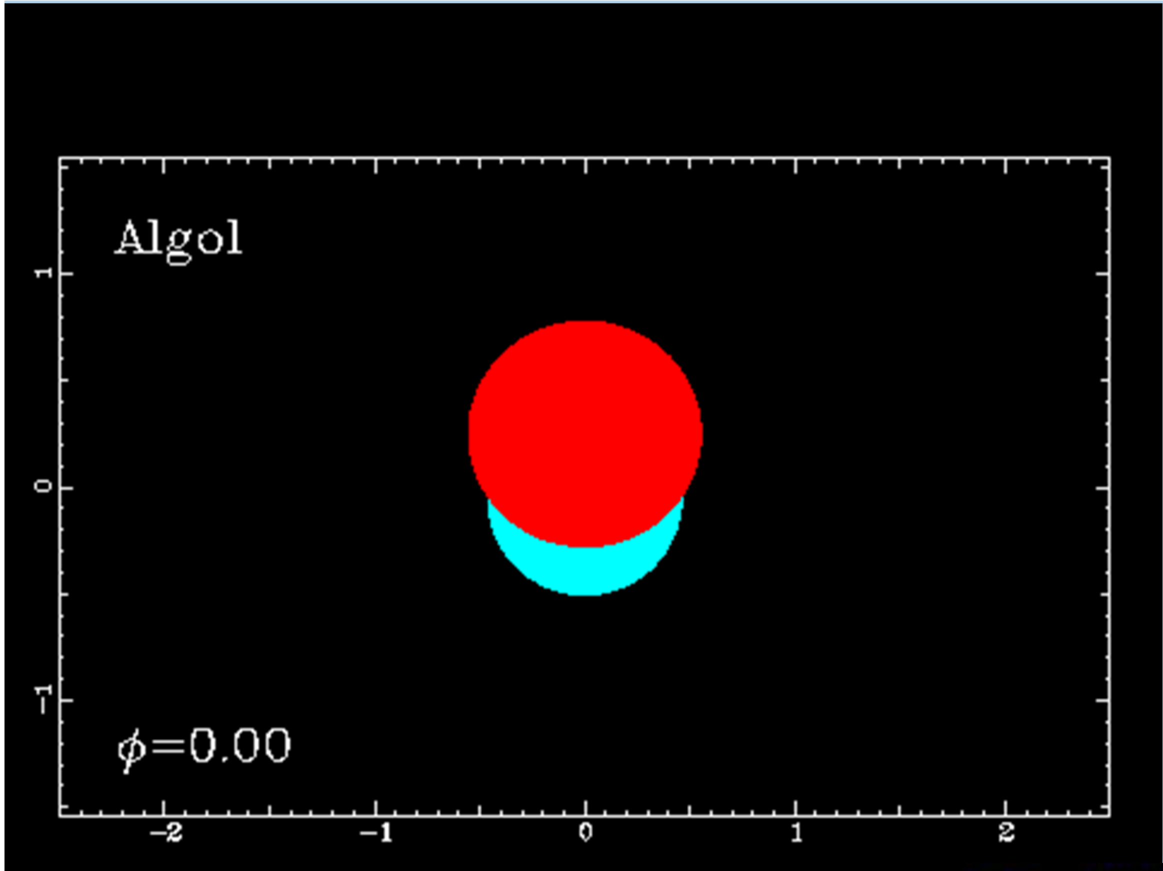
Мы – “дети” звёзд

- Образовавшиеся в звёздах тяжёлые химические элементы вбрасываются в межзвёздную газо-пылевую среду при сбросе оболочек и взрывах Сверхновых
- Новые поколения звёзд и планет рождаются из вещества, обогащённого тяжёлыми химическими элементами
- **Всё, что мы видим вокруг, “сделано” из вещества, когда-то родившегося в звёздных недрах и выброшенного взрывами Сверхновых**

- Есть много причин, по которым звёзды могут менять свой блеск…
- Такие звёзды называют “переменными“

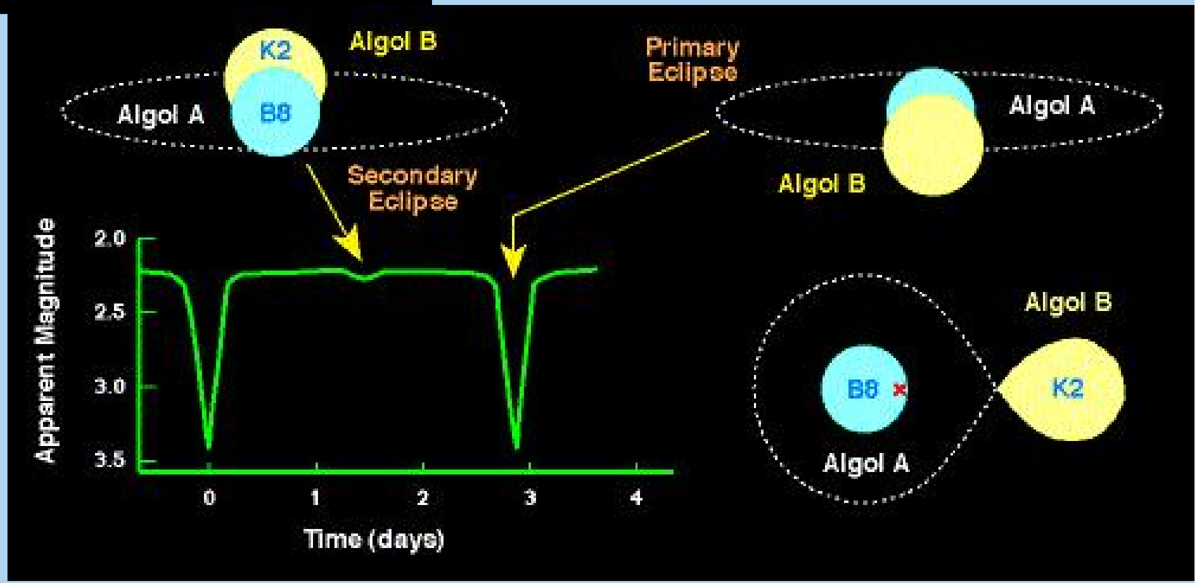


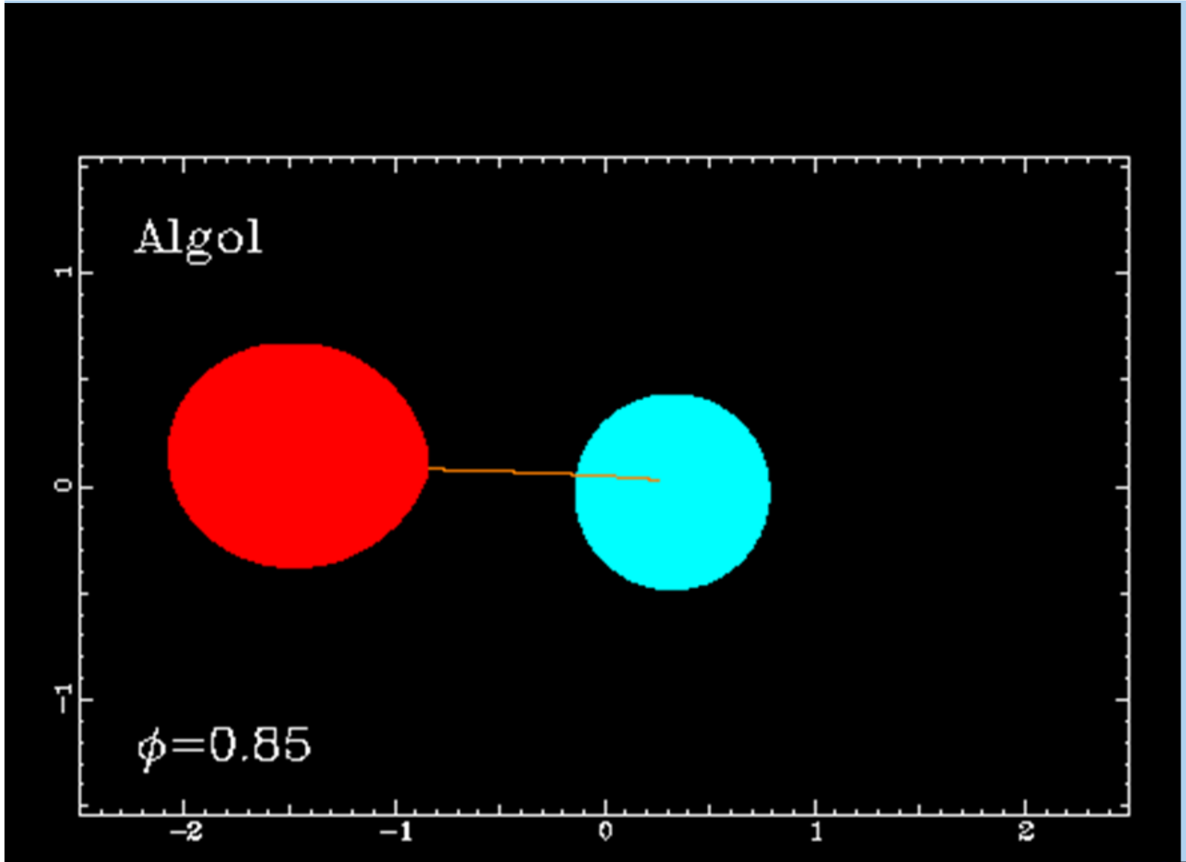
- Переменность блеска из-за эллипсоидальной формы вращающейся звезды



- Пример затменно-двойной переменной звезды

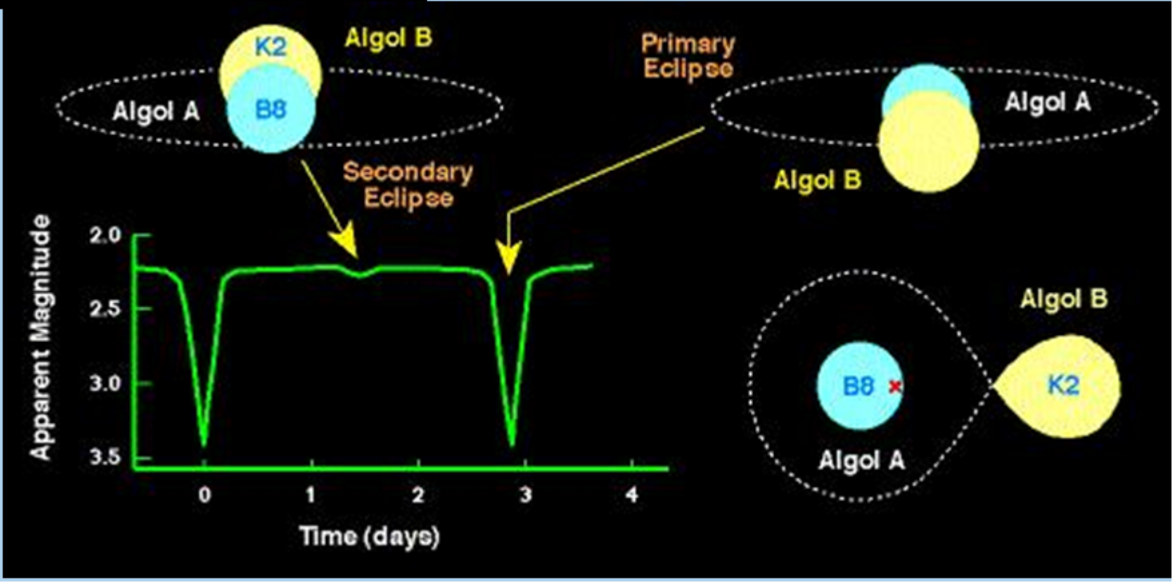
- Изменение блеска Алголя (β Персея)



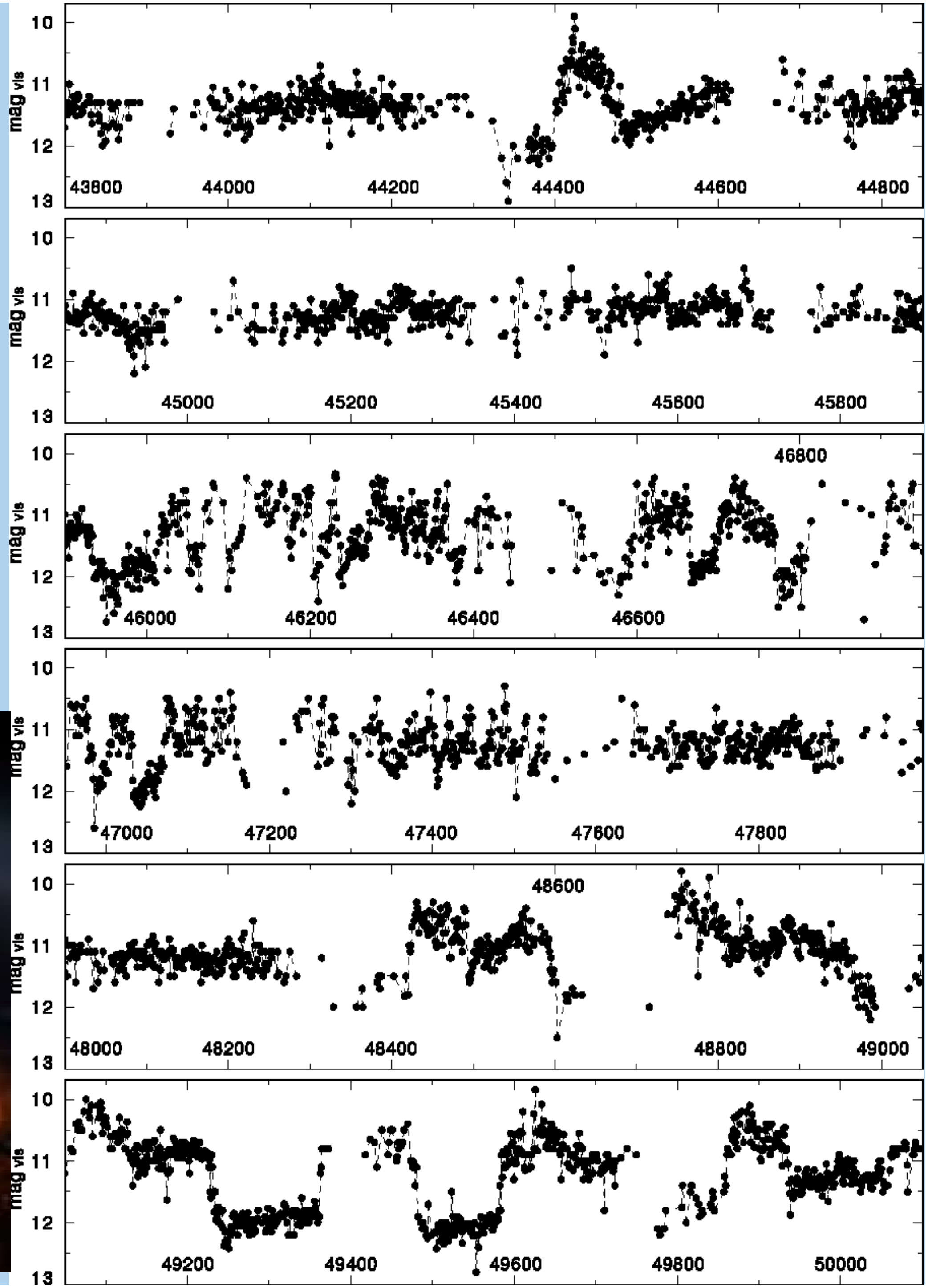


- Пример затменно-двойной переменной звезды

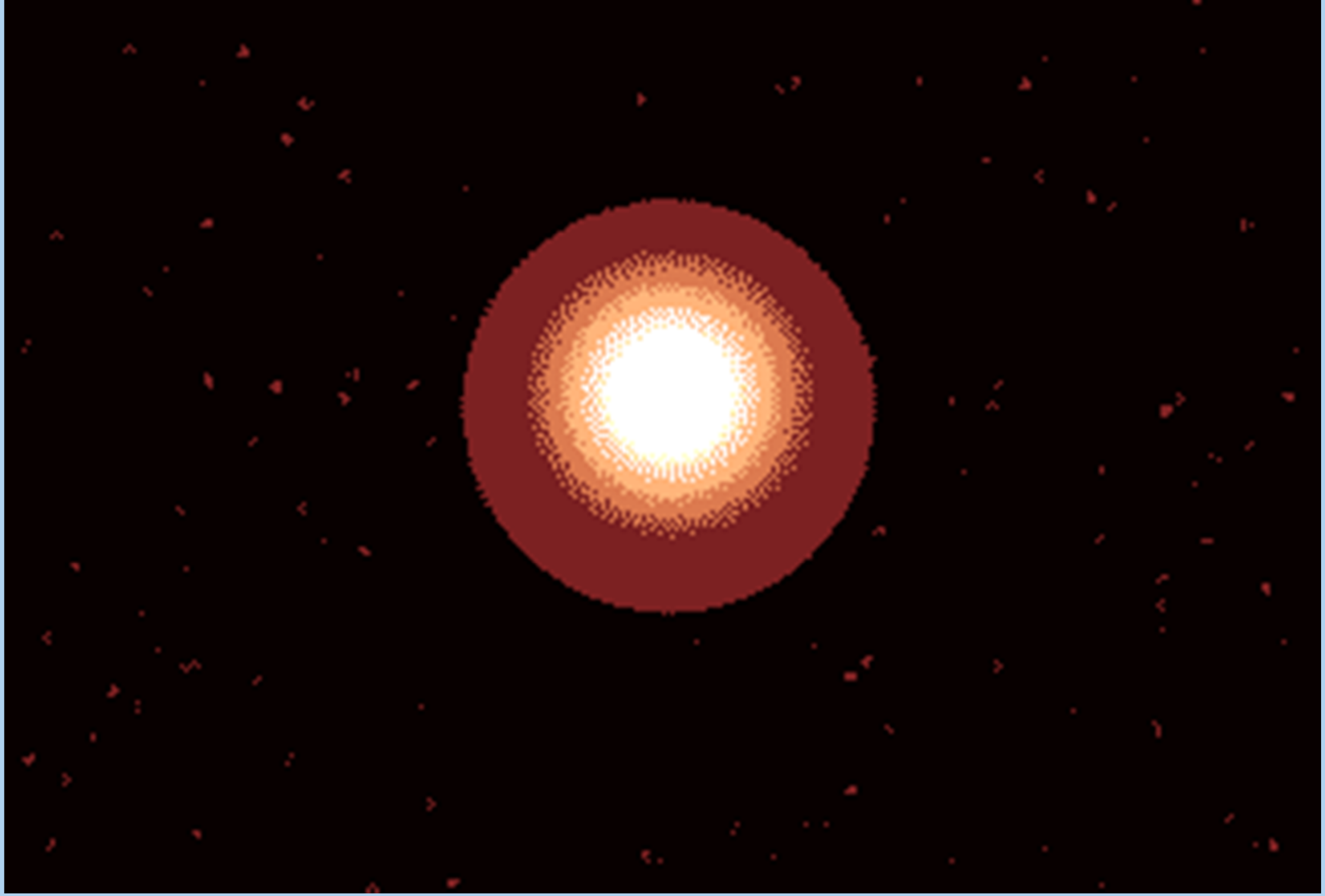
- Изменение блеска Алголя (β Персея)

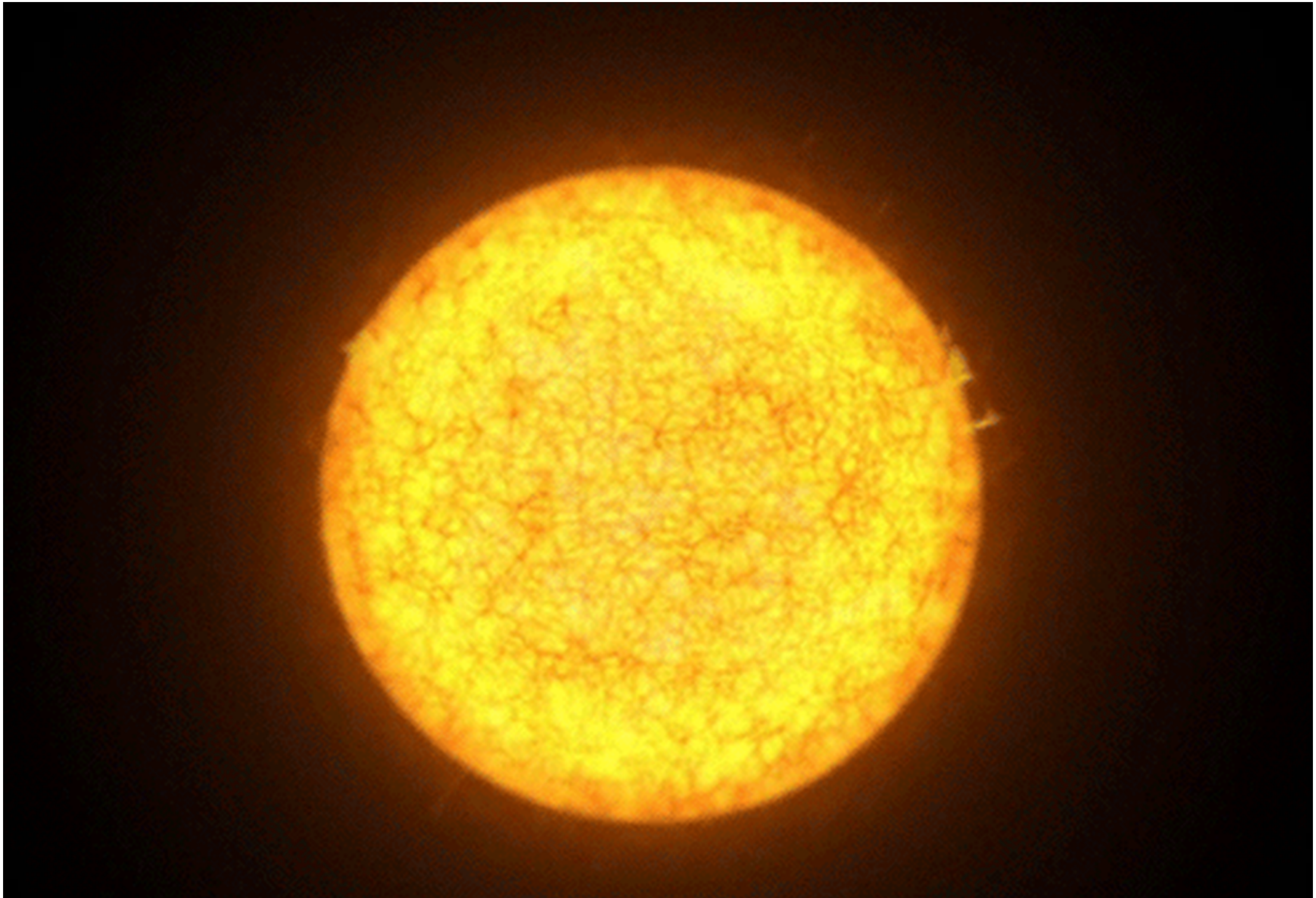


- Катаклизмические (взрывные) переменные – перетекание вещества на горячий аккреционный диск

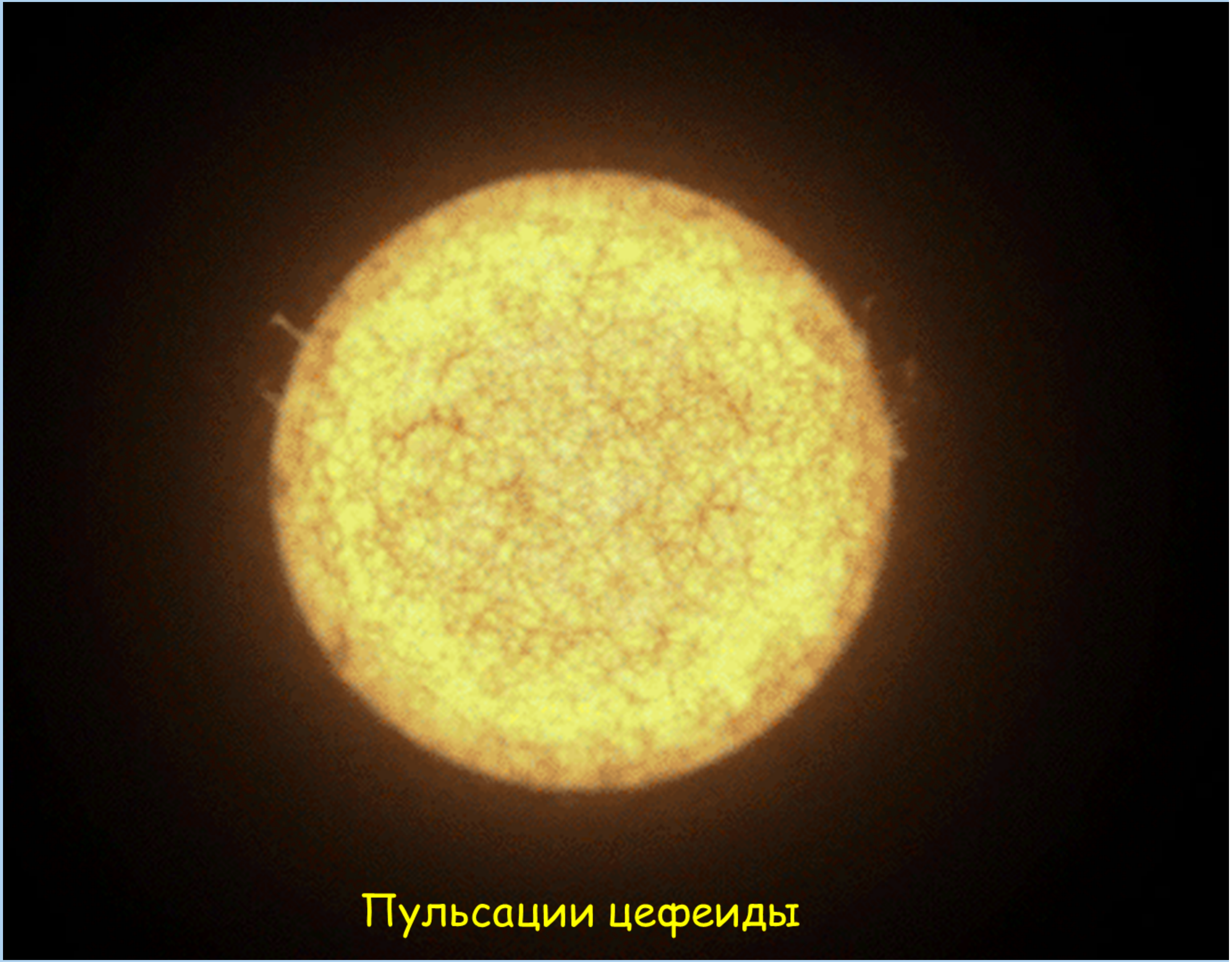


Сверхновые – тоже переменные звёзды

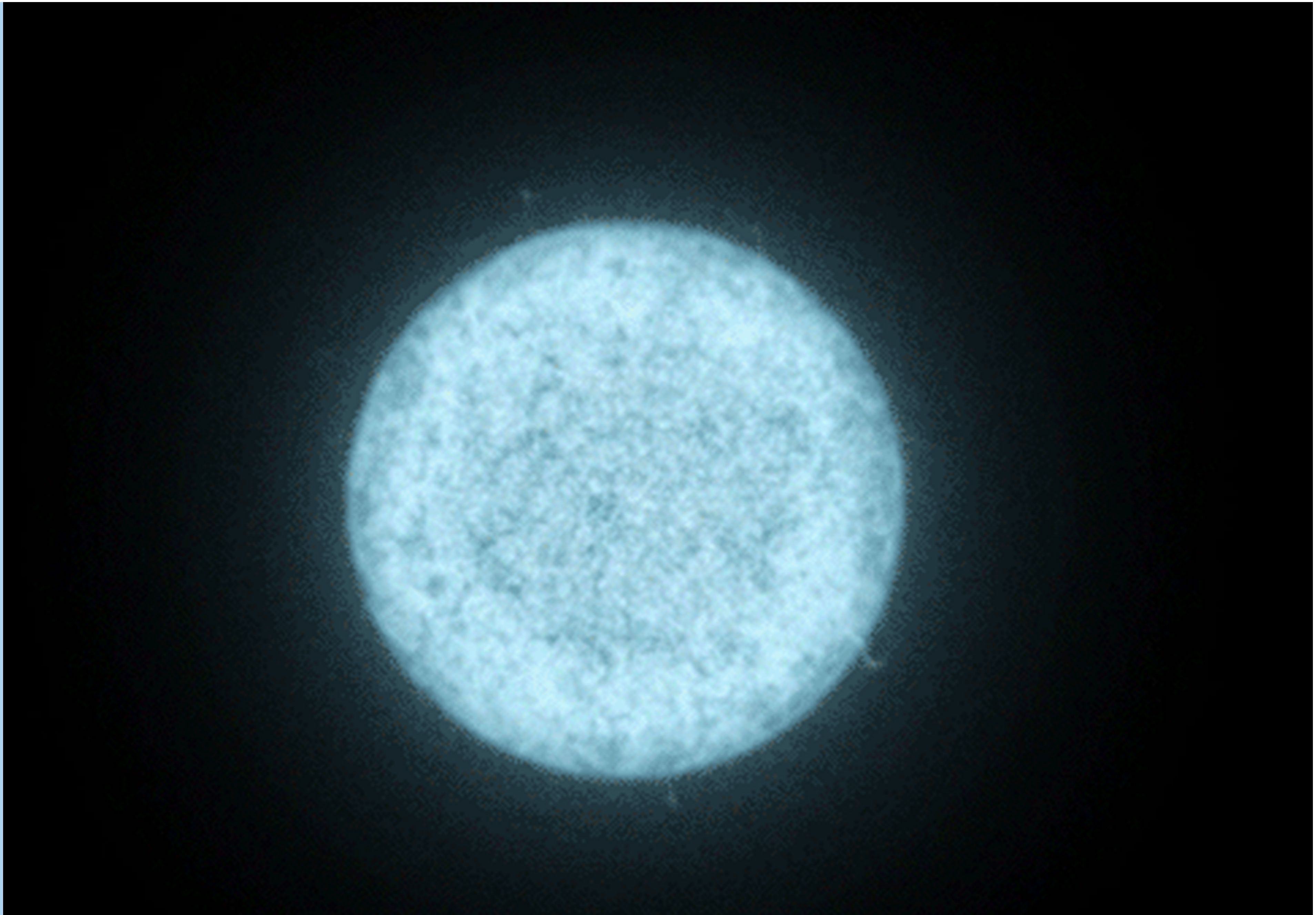




Пульсации цефеиды

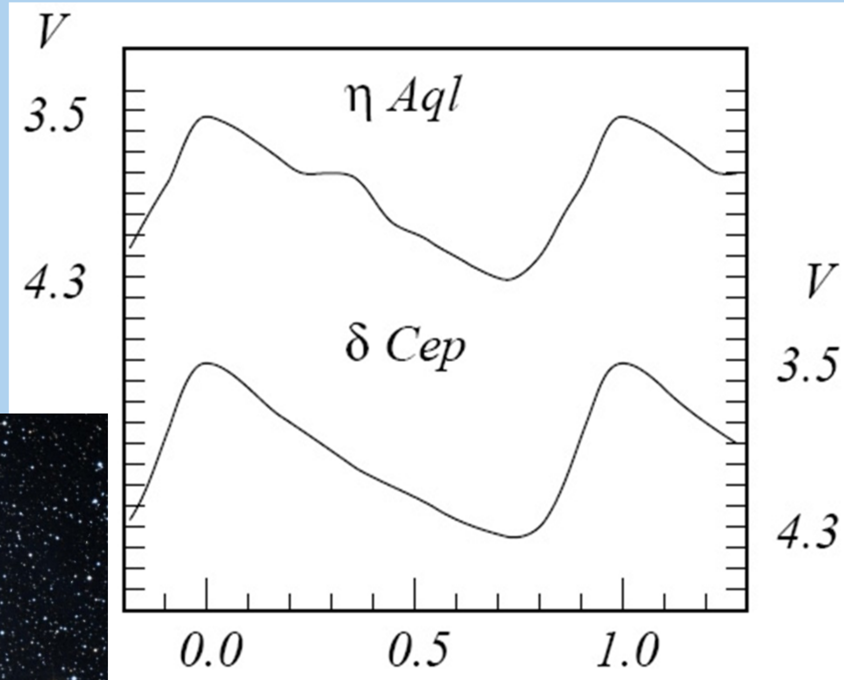


Пульсации цефеиды



Пульсации цефеиды

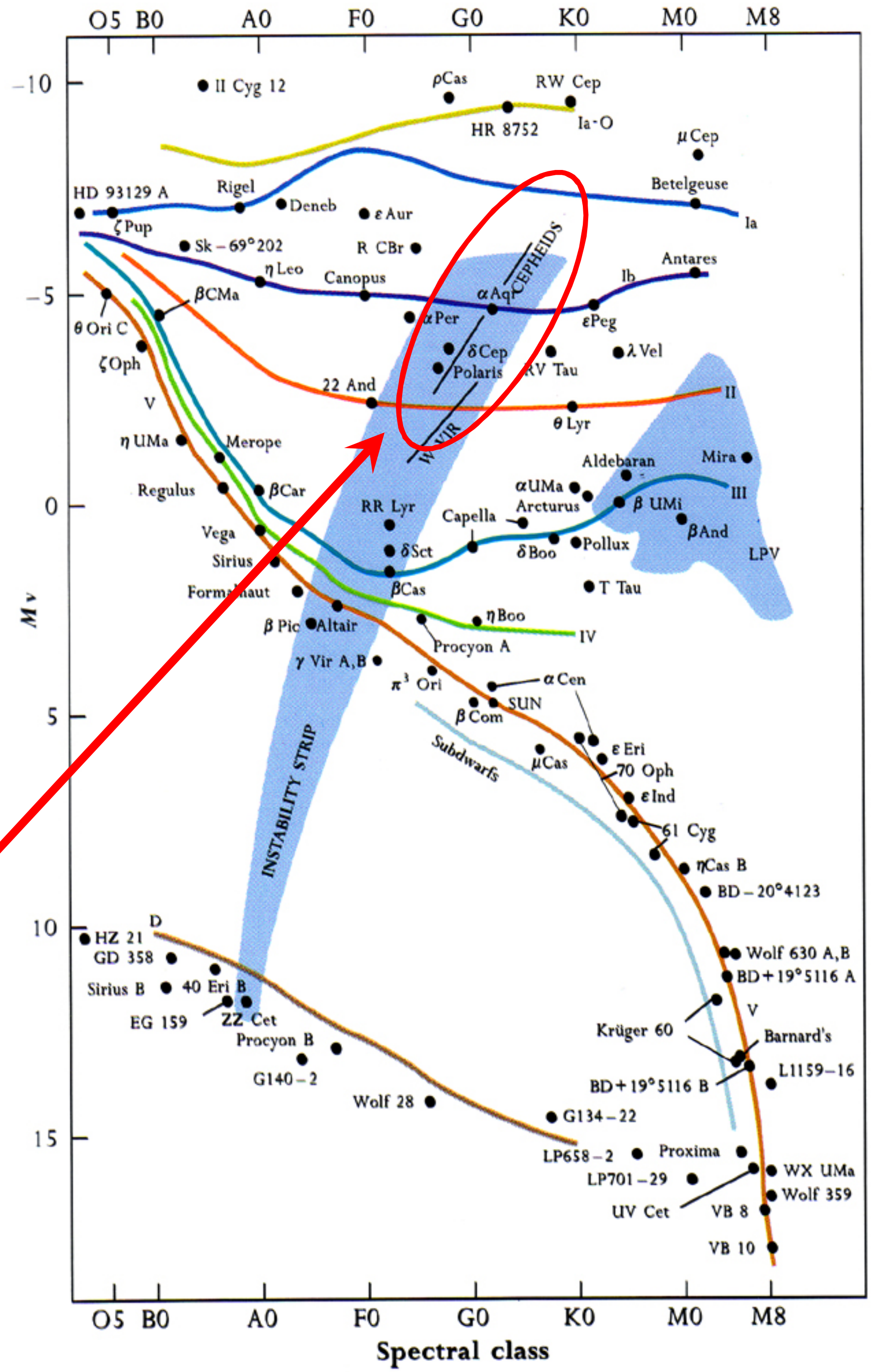
- Первые цефеиды – η Орла и δ Цефея - были визуально открыты английскими любителями Э. Пиготтом и Дж. Гудрайком (1783-1784)



Космический "хронометр": хоть часы проверяй !

- Цефеиды – звёзды-сверхгиганты, молодые (< 150 млн. лет) массивные звёзды, радиально пульсирующие с периодами от 1 до ~100 суток
- В Млечном Пути хорошо изучено более 700 цефеид

- Цефеиды в полосе нестабильности для радиально пульсирующих звёзд

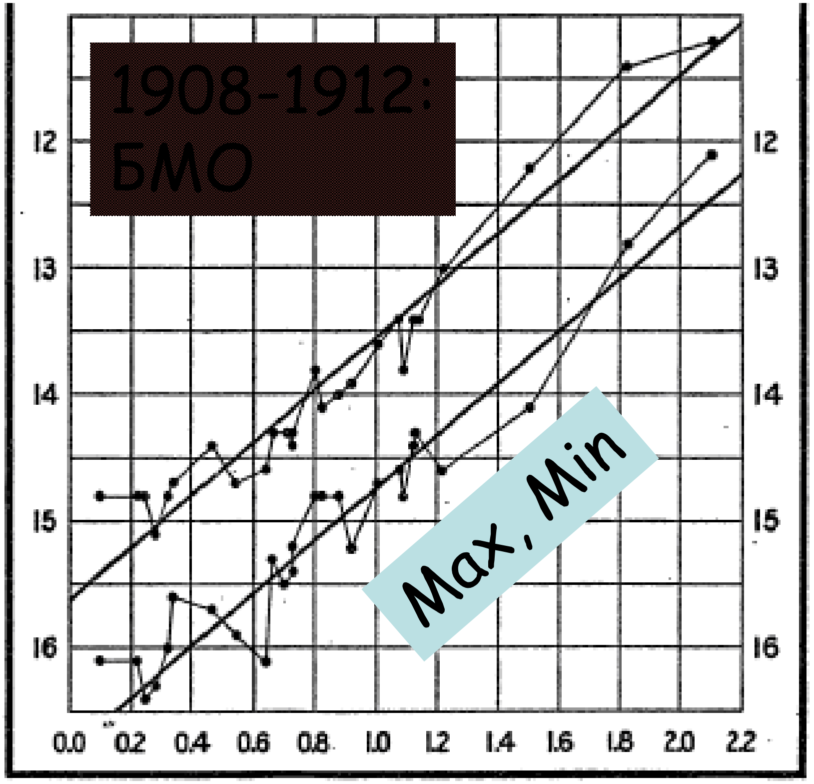


World's Greatest Creation Scientists
1000 2000

HENRIETTA SWAN LEAVITT

Astronomy **1868 - 1921**

- **Measured over 2000 Cepheid variable stars**
- **Discovered the Period-Luminosity Relation**
- **Leavitt's cosmic beacons used by Edwin Hubble for distance to galaxies**
- **Opened the way for measuring the universe**



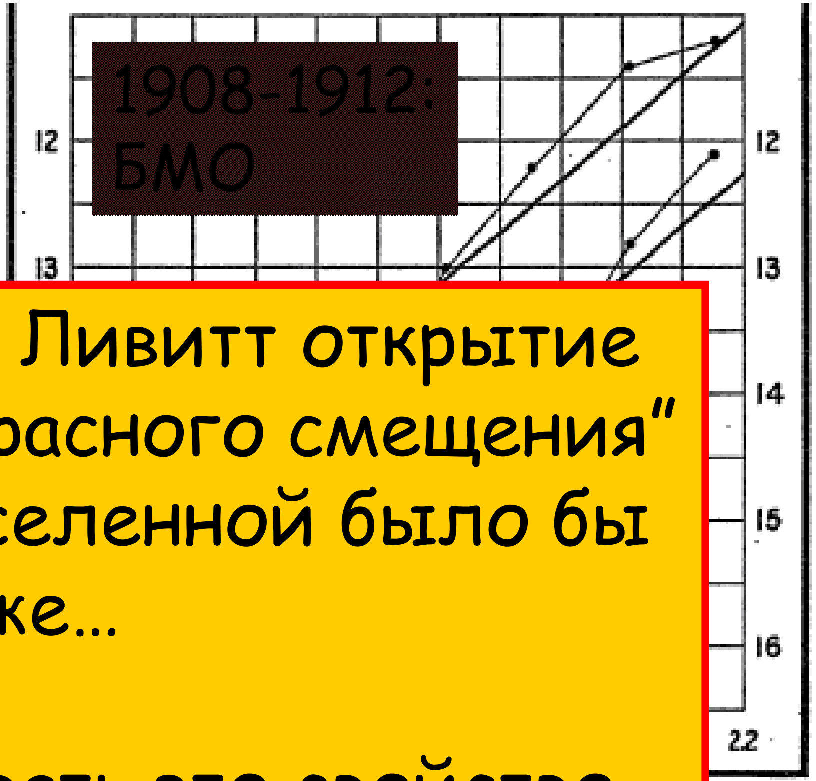
"Miss Leavitt . . . . [was] steadfastly loyal to her principles, and deeply conscientious and sincere in her attachment to her religion and church. She had the happy faculty of appreciating all that was worthy and lovable in others, and was possessed of a nature so full of sunshine that, to her, all of life became beautiful and full of meaning."

– Solon I. Bailey, 1922

"Look also at the distant stars, how high they are!" – Job 22:12

"There is one glory of the sun, and another glory of the moon, and another glory of the stars; for star differs from star in glory."

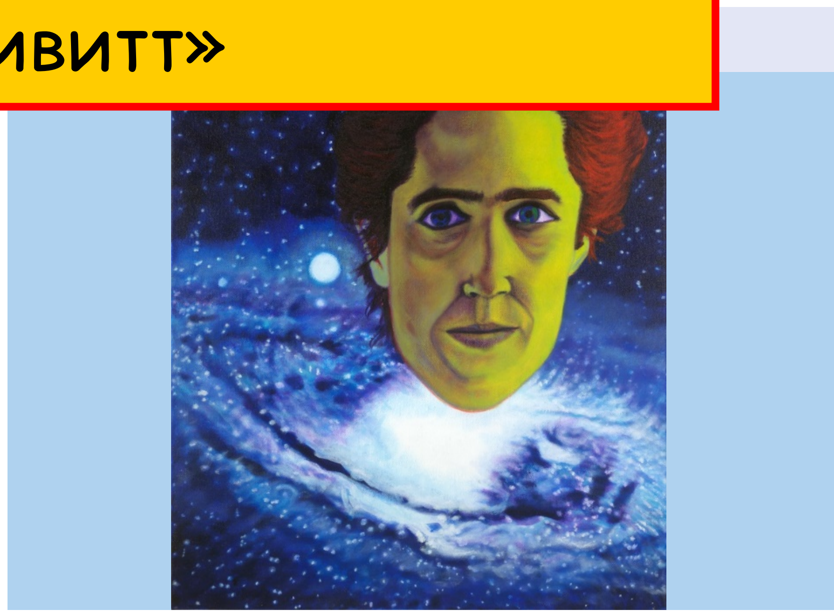
– I Cor 15:41



1908-1912: БМО

Без этих работ Генриэтты Ливитт открытие Слайфером и Хабблом “красного смещения” галактик и расширения Вселенной было бы сделано значительно позже…

В 2012 г. предложено назвать это свойство цефеид «Законом мисс Ливитт»



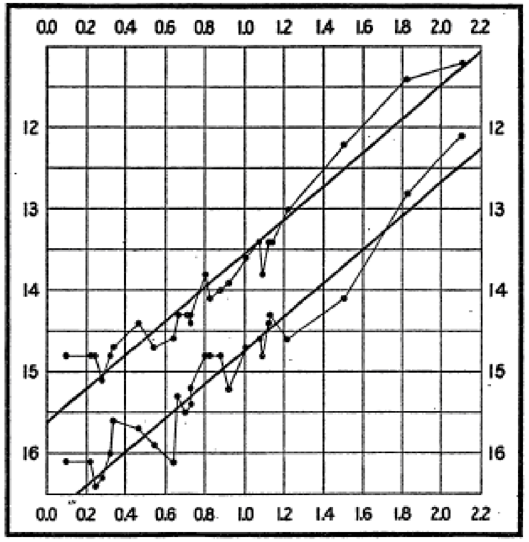
- # Физика цефеидных пульсаций
- А.Эддингтон: колебания звезды (упругого газового шара) – это перенос тепла “звуковыми волнами”; период колебаний связан со средней плотностью шара степенным соотношением

$$P\sqrt{\bar{\rho}} \approx \sqrt{\frac{3\pi}{2G}} = const$$

- Чем массивнее и ярче звезда-сверхгигант, тем больше радиус, меньше средняя плотность и больше период пульсаций

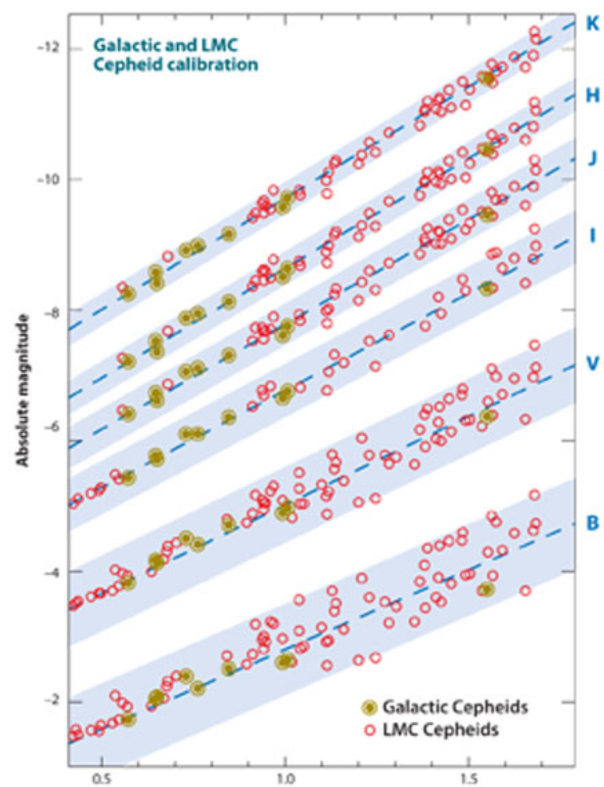
- Зависимость “период - светимость” в виде

$$\langle M \rangle_I \approx a + b \cdot \log P$$

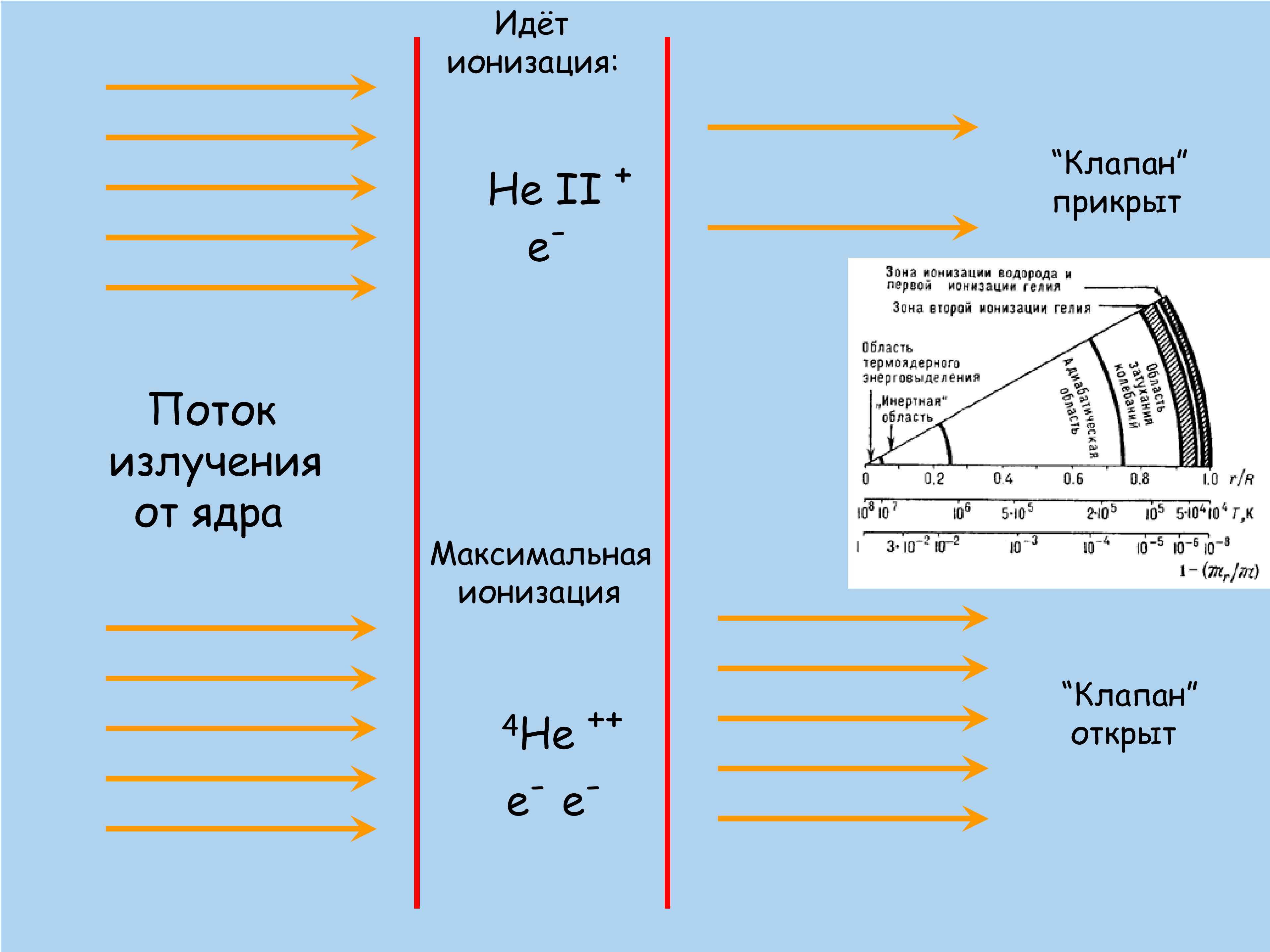


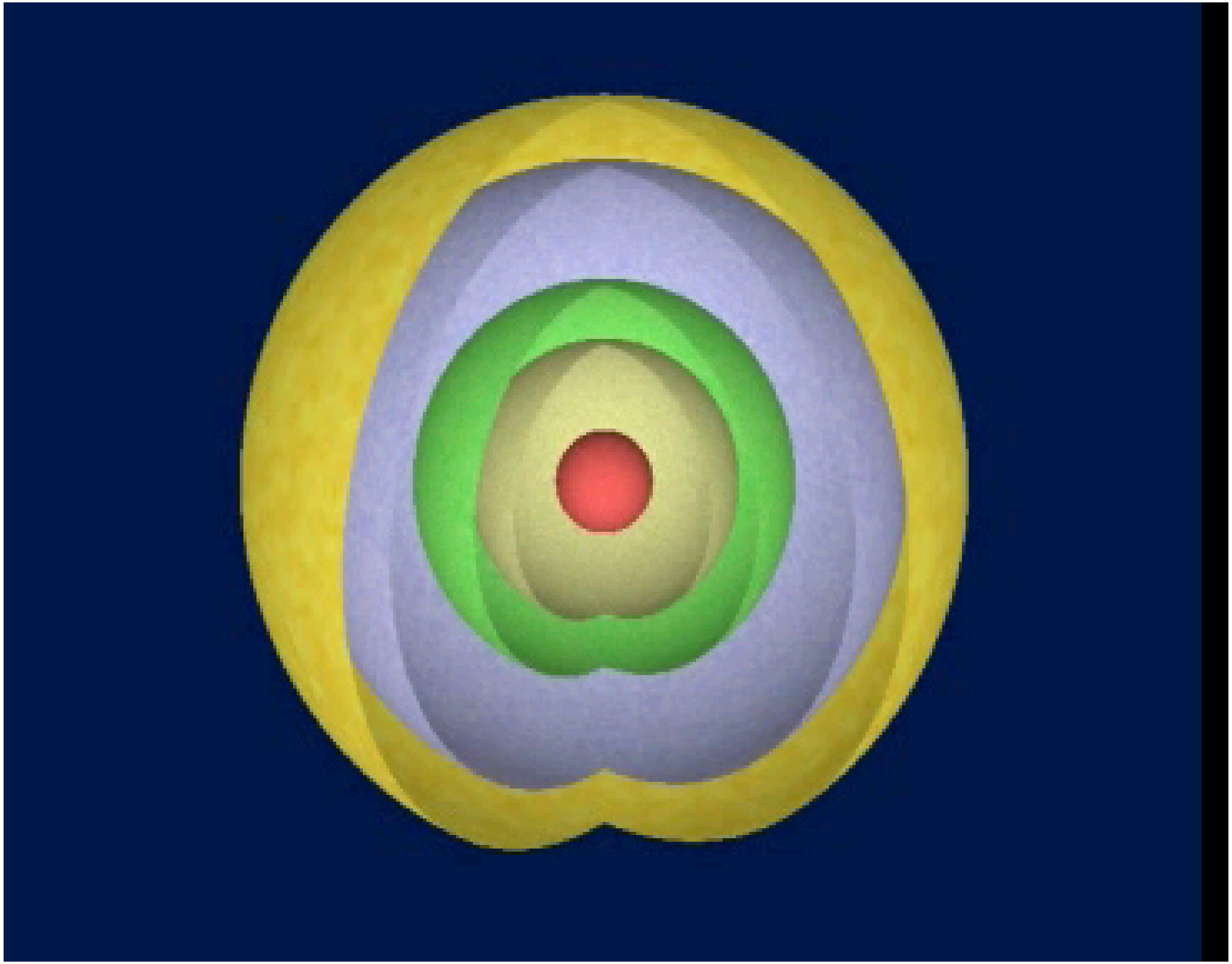
1912

1970-е



- **Физика радиальных пульсаций:**
- Где та "пружина", что поддерживает пульсации?
- С.А. Жевакин (НИРФИ, 1950-е): внутри оболочки "работает" "клапанный" механизм, периодически задерживающий перенос энергии (тепла) от ядра наружу
- Это слой второй ионизации гелия (He II → ^{4}He, T ~ 40000-60000 K, т.е. гелий "теряет" второй электрон):
  - В цикле сжатия оболочки температура слоя растёт, большая доля излучения уходит на ионизацию He II и "запасается" в слое ионизации
  - Ионизованный слой снова становится прозрачным для излучения, и поток тепла "раздувает" оболочку


Идёт
ионизация:
He II +
e-
Поток
излучения
от ядра
Максимальная
ионизация
4He ++
e- e-
"Клапан"
прикрыт
"Клапан"
открыт
Зона ионизации водорода и
первой ионизации гелия
Зона второй ионизации гелия
Область
термоядерного
энерговыделения
„Инертная"
область
Адиабатическая
область
Область
затухания
колебаний
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
r/R
10^8
10^7
10^6
5·10^5
2·10^5
10^5
5·10^4
10^4
T, K
1
3·10^-2
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
10^-6
10^-8
1 − (m_r/m)

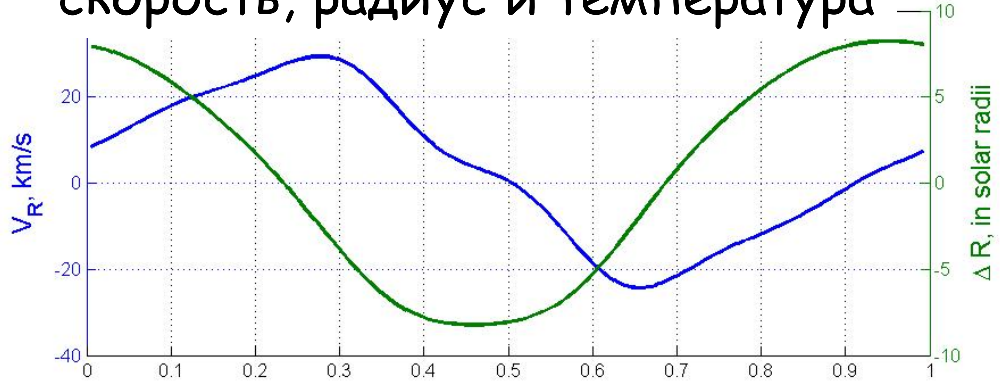


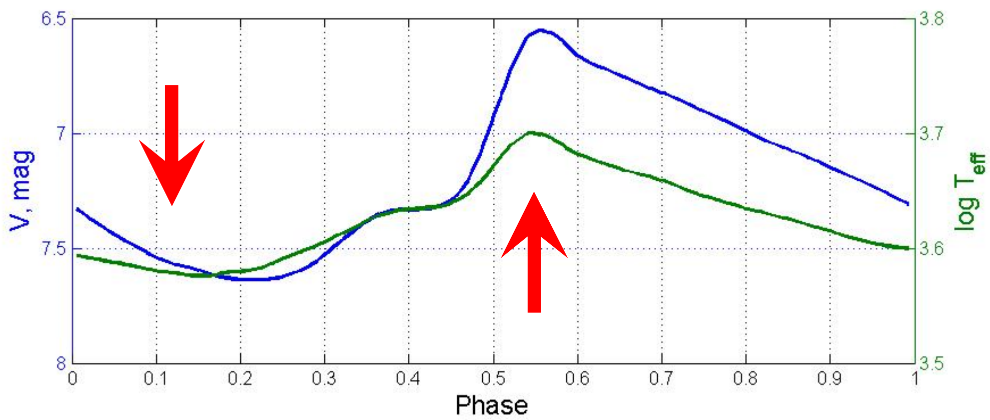
Что у звезды внутри:
картина радиальных пульсаций

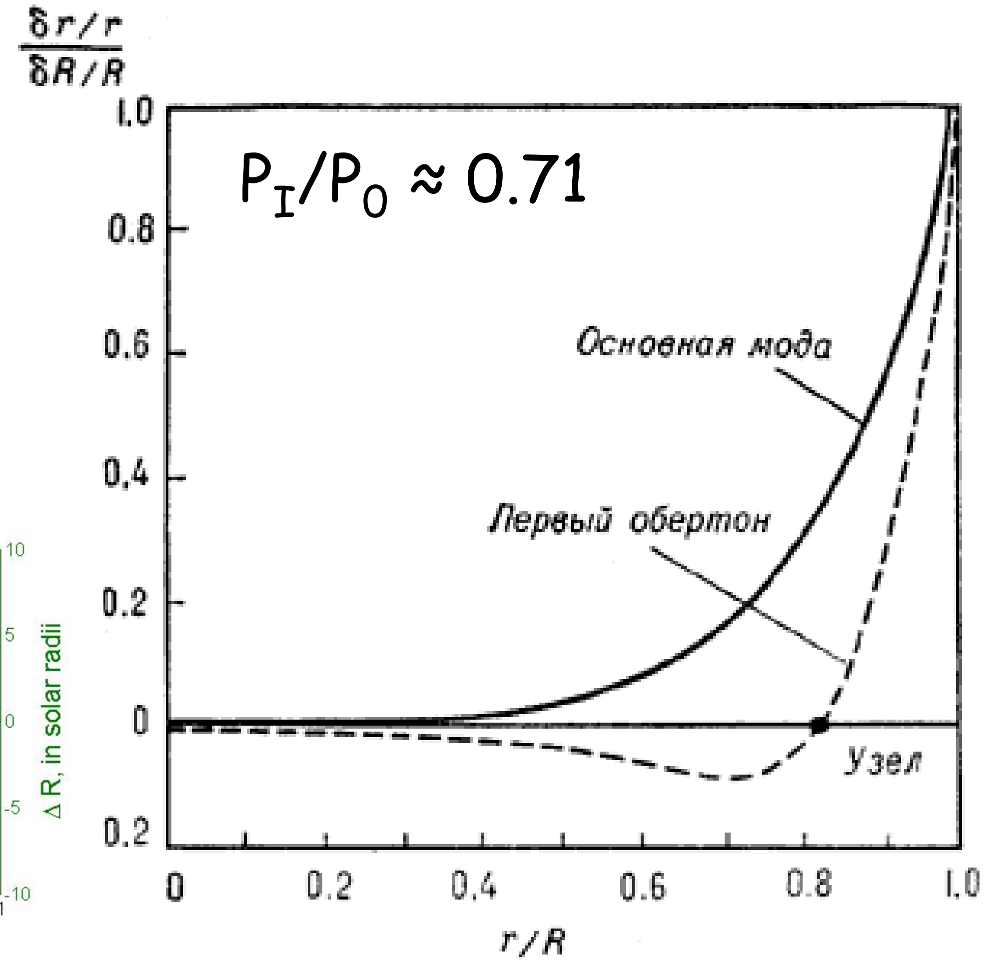
Пульсирует оболочка:
амплитуда пульсаций
уменьшается с глубиной

Бывают пульсации
в разных модах (обертонах)

Так меняются блеск звезды,
скорость, радиус и температура

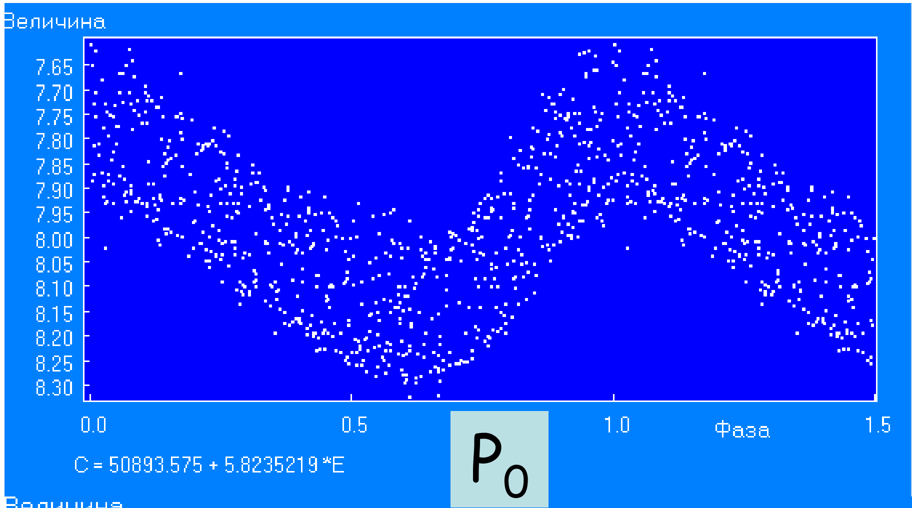


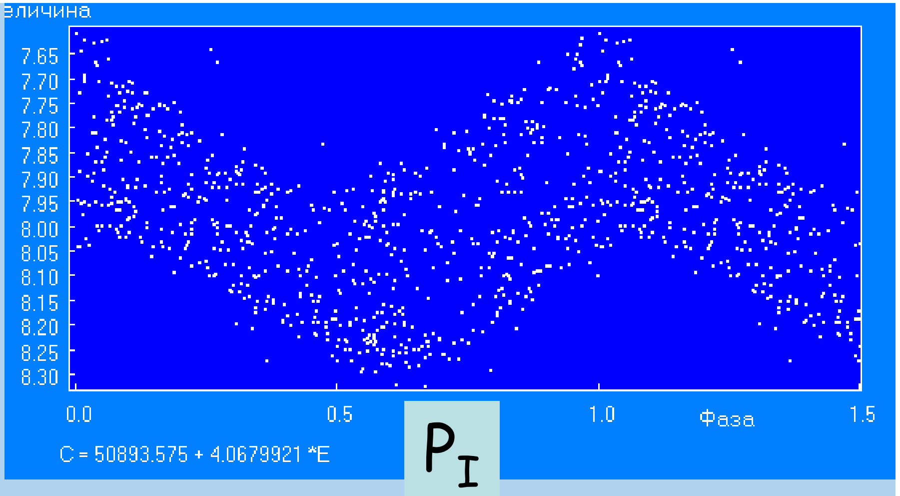


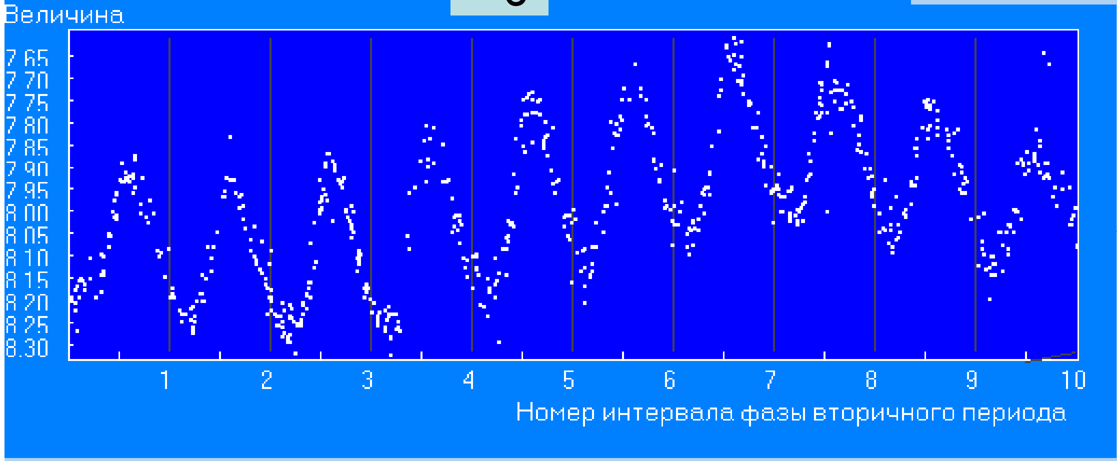


$P_I/P_0 \approx 0.71$

Цикл сжатия:
максимум блеска
и температуры,
более голубой цвет

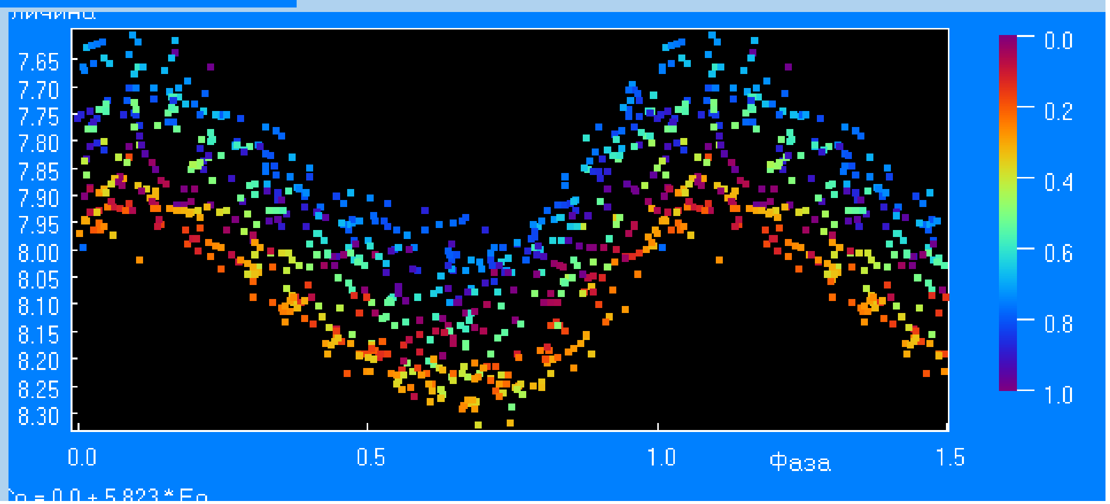






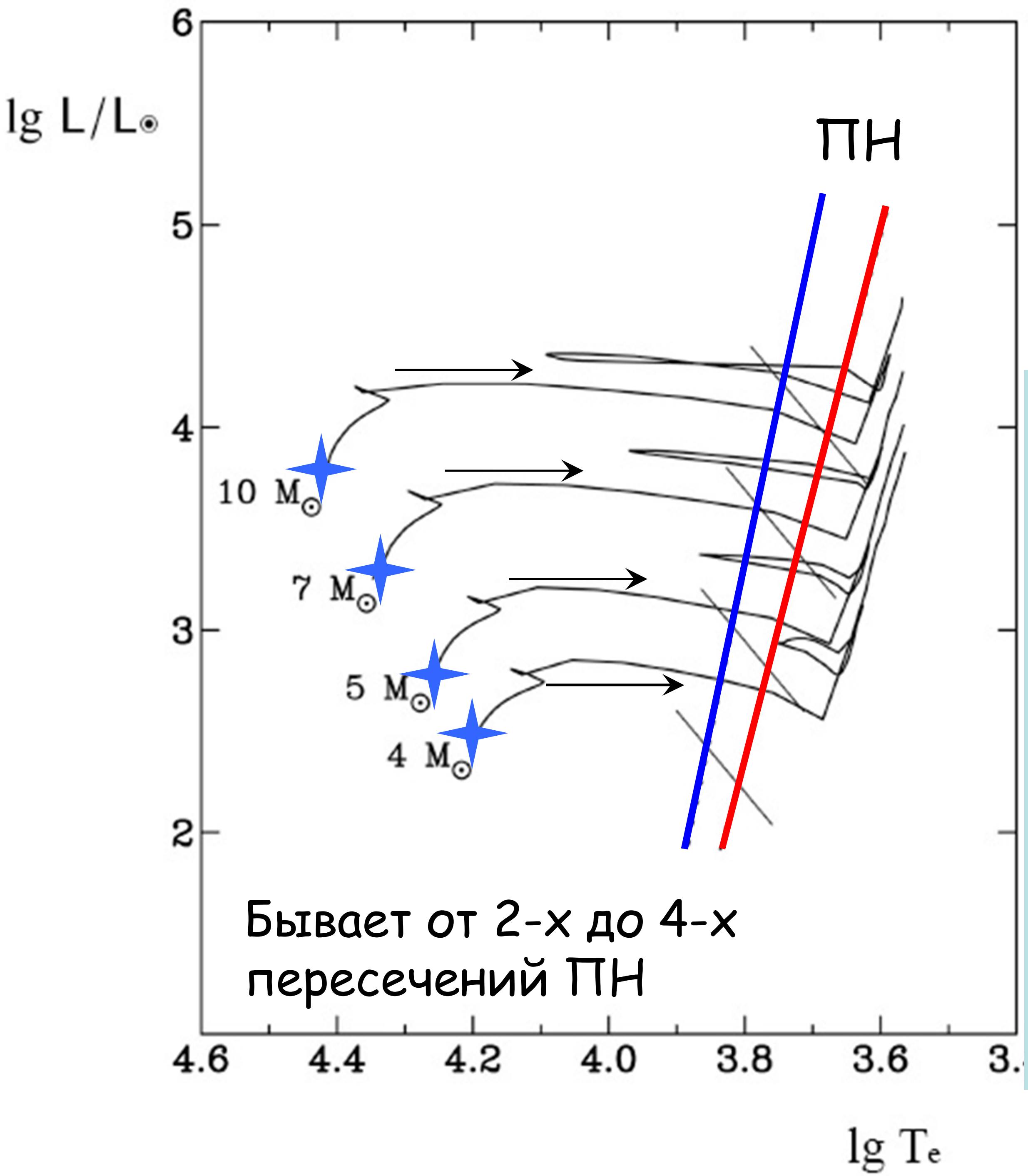
Разный средний блеск в разных фазах пульсации 1-го обертона (P_I)

- Бимодальная цефеида EW Щита
- Наложение колебаний с периодами $P_I / P_0 \approx 0.71$



- **Почему пульсируют не все звёзды ?**

- Всё определяется глубиной “залегания“ слоя He II
  - Если звезда ***холодная*** (мала температура фотосферы), слой He II в глубине, и клапанный механизм не может “раскачать“ массивную протяжённую оболочку; колебания быстро затухают
  - Если звезда ***горячая***, над слоем He II тонкая оболочка, и её колебания очень слабы
- Значит, есть узкий интервал температур звёзд, у которых возникают радиальные пульсации (“полоса нестабильности“)



Эволюционные треки, красная и голубая границы полосы нестабильности

Цефеиды начинают свою жизнь как горячие звёзды Главной Последовательности спектрального класса В (синие звёзды)

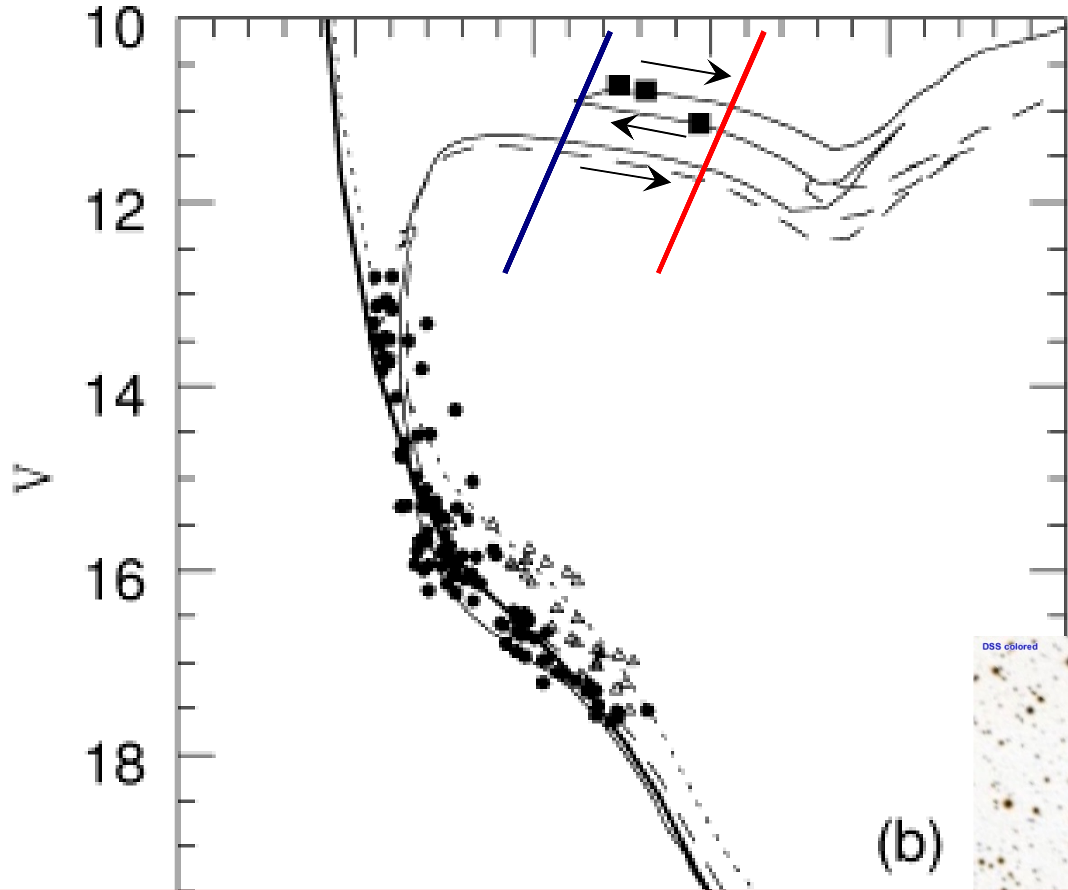
Показано направление эволюции от ГП в сторону красных сверхгигантов

- **Вопрос:** Зачем вообще нужна зависимость "период - светимость" ?
- $\langle M \rangle_I \approx a + b \log P$
- **Ответ:** Для определения **фотометрических расстояний** далёких галактик, звёздных скоплений и молодых группировок звёзд путём сравнения **видимых (измеренных)** и **абсолютных (вычисленных по зависимости "период - светимость")** величин цефеид

$$\boxed{m_{app} - M_{abs} = 5 \cdot \log D(kpc) + 10 + A}$$

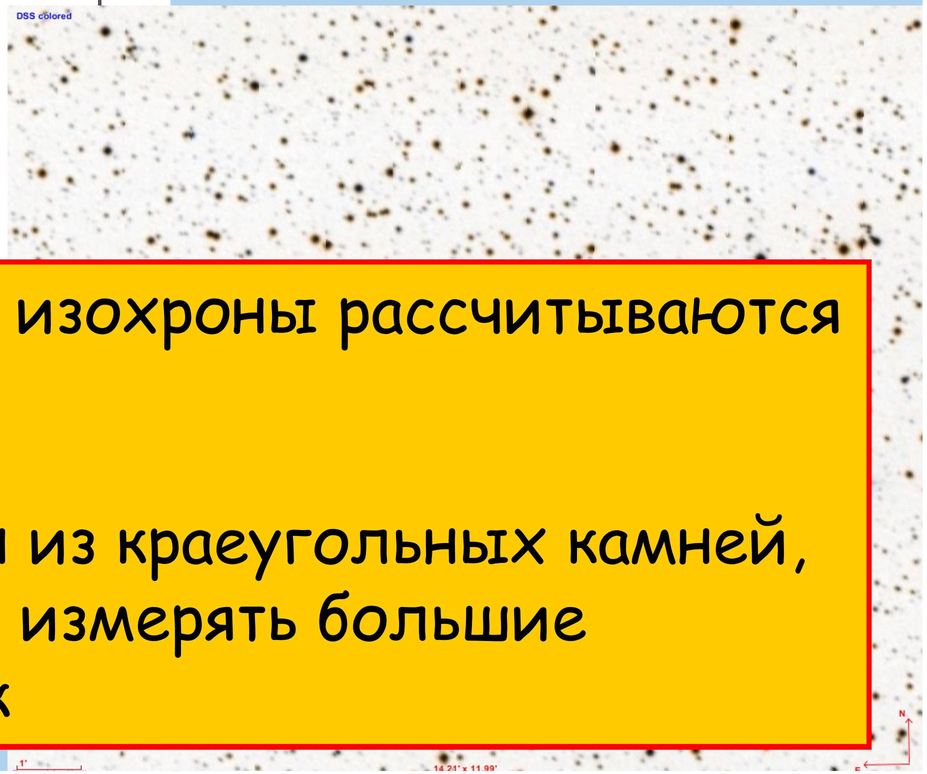
где ***A*** – величина поглощения света

- **Основа определения цефеидных расстояний:** нуль-пункт и наклон зависимости "период – светимость"
- $\langle M \rangle_I \approx a + b \log P$ (a – нуль-пункт, b – наклон)
- Для цефеид Млечного Пути они определяются
  - По тригонометрическим расстояниям
  - По цефеидам – членам рассеянных скоплений и ассоциаций с известными расстояниями (совмещение с рассчитанными теоретическими изохронами)
  - Интерферометрическими измерениями радиусов и их сравнением с расчётами ББВ



Уникальное рассеянное скопление NGC 7790: 3 (!) цефеиды на диаграмме “цвет - видимая величина”

Возраст ~ 126 млн. лет



Треки (эволюционные пути) и изохроны рассчитываются теоретически.

Теория эволюции звёзд – один из краеугольных камней, обеспечивающих возможность измерять большие расстояния до звёзд и галактик

- **Список цефеид – возможных членов молодых рассеянных скоплений и ассоциаций** (Д.Тёрнер, Дж.Бурке, 2002)
- Список нуждается в проверке и пересмотре в свете современных данных
- Самое сложное – доказательство членства цефеид в скоплениях

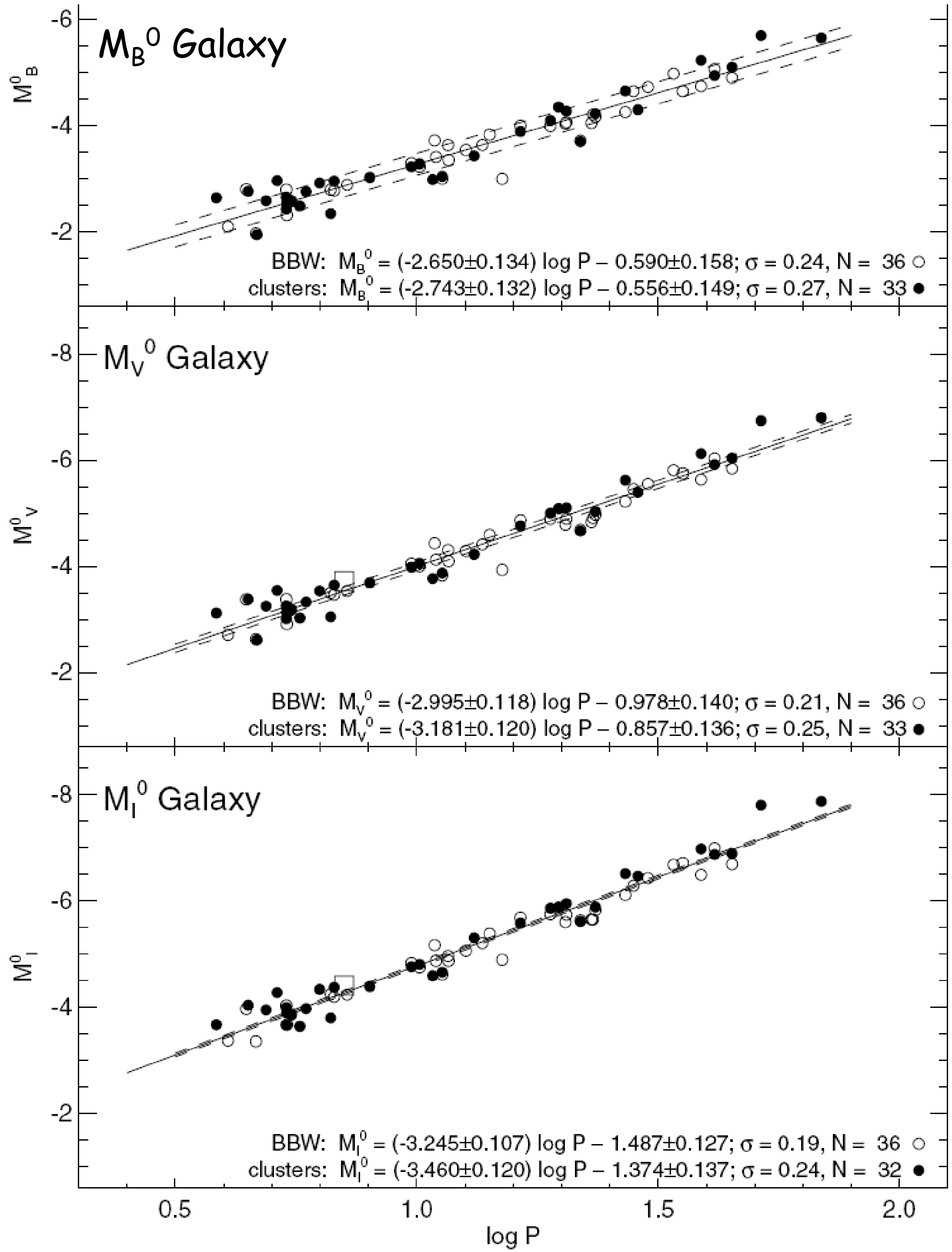
Cepheid	log P_0	Cluster	π_{Hip} (mas)	π_{ZAMS} (mas)	Ref.
SU Cas	0.290	Cas R2	2.31 ± 0.58	3.87 ± 0.05	1, 2
EV Sct	0.490	NGC 6664	0.91 ± 1.92	0.62 ± 0.02	3
SU Cyg	0.585	C1943+291	0.51 ± 0.77	1.17 ± 0.03	4, 5
V1726 Cyg	0.627	C2128+488	...	0.64 ± 0.01	6, 7
CG Cas	0.640	Berkeley 58	...	0.26 ± 0.04	8
CE Cas B	0.651	NGC 7790	...	0.29 ± 0.02	3
SZ Tau	0.651[a]	NGC 1647	3.12 ± 0.82	1.85 ± 0.02	1, 9
TV CMa	0.669	NGC 2345	0.90 ± 1.97	0.53 ± 0.01	3
CF Cas	0.688	NGC 7790	−3.20 ± 2.16	0.29 ± 0.02	3
CE Cas A	0.711	NGC 7790	...	0.29 ± 0.02	3
BD Cas	0.720[a]	Czernik 1	1.31 ± 1.92	0.51 ± 0.02	7
UY Per	0.730	Czernik 8	...	0.43 ± 0.01	10
δ Cep	0.730	Cep OB6	3.32 ± 0.58	4.55 ± 0.21	7
CV Mon	0.731	C0644+013	3.76 ± 2.77	0.61 ± 0.01	11
QZ Nor	0.737[a]	NGC 6067	...	0.60 ± 0.03	12
V Cen	0.740	NGC 5662b	0.05 ± 0.82	1.51 ± 0.03	13
GH Car	0.758	Trumpler 18	0.43 ± 1.03	0.65 ± 0.06	14
α UMi	0.760[a]	ADS 1477	7.56 ± 0.48	8.36 ± 0.18	1, 7
R Cru	0.765	NGC 4349	1.97 ± 0.82	...	...
T Ant	0.771	C0929-364	0.60 ± 1.29	...	...
CS Vel	0.771	Ruprecht 79	...	0.31 ± 0.02	15
V367 Sct	0.799[b]	NGC 6649	...	0.61 ± 0.01	16
BB Sgr	0.822	Cr 394	0.61 ± 0.99	1.56 ± 0.06	1, 17
T Cru	0.828	NGC 4349	0.86 ± 0.62	...	...
U Sgr	0.829	IC 4725	0.27 ± 0.92	1.67 ± 0.08	18
DL Cas	0.903	NGC 129	2.32 ± 1.09	0.60 ± 0.01	19
S Nor	0.989	NGC 6087	1.19 ± 0.75	1.11 ± 0.02	20
ζ Gem	1.006	ADS 5742AB	2.79 ± 0.81	2.75 ± 0.13	1, 7, 21
TW Nor	1.033	Lyngå 6	−5.57 ± 3.47	0.52 ± 0.02	7, 22
V340 Nor	1.053	NGC 6067	...	0.60 ± 0.03	12
GT Car	1.119	Anon. Car OB	...	0.10 ± 0.02	23
X Cyg	1.215	Rup 173	1.47 ± 0.72	0.89 ± 0.02	7, 24
VY Car	1.277	Car OB2	1.28 ± 1.76	0.49 ± 0.02	25
RU Sct	1.294	Trumpler 35b	0.89 ± 1.61	0.48 ± 0.03	26
RZ Vel	1.310	Vel OB1a	1.35 ± 0.63	0.57 ± 0.08	27
WZ Sgr	1.339	C1814-191a	−0.75 ± 1.76	0.56 ± 0.01	23
SW Vel	1.370	Vel OB5	1.30 ± 0.90	0.40 ± 0.01	23
T Mon	1.432	Mon OB2	0.42 ± 1.64	0.63 ± 0.04	7, 28
KQ Sco	1.458	R103ab OB	0.07 ± 2.31	0.35 ± 0.04	27
AQ Pup	1.479	Pup OB3	8.85 ± 4.03	0.45 ± 0.02	7
U Car	1.589	Car OB1	−0.04 ± 0.62	0.52 ± 0.01	29
RS Pup	1.617	Pup R3	0.49 ± 0.68	...	...
SV Vul	1.653	NGC 6834/Vul OB1	0.79 ± 0.74	0.45 ± 0.01	1, 28
GY Sge	1.713	Sge OB1	...	0.29 ± 0.01	30
S Vul	1.838	Vul OB2	...	0.23 ± 0.01	31, 32
V810 Cen	2.184[b]	Stock 14	1.27 ± 0.52	0.36 ± 0.01	33

- А.Сэндидж и др. (2004)
- Зависимости "период - светимость":

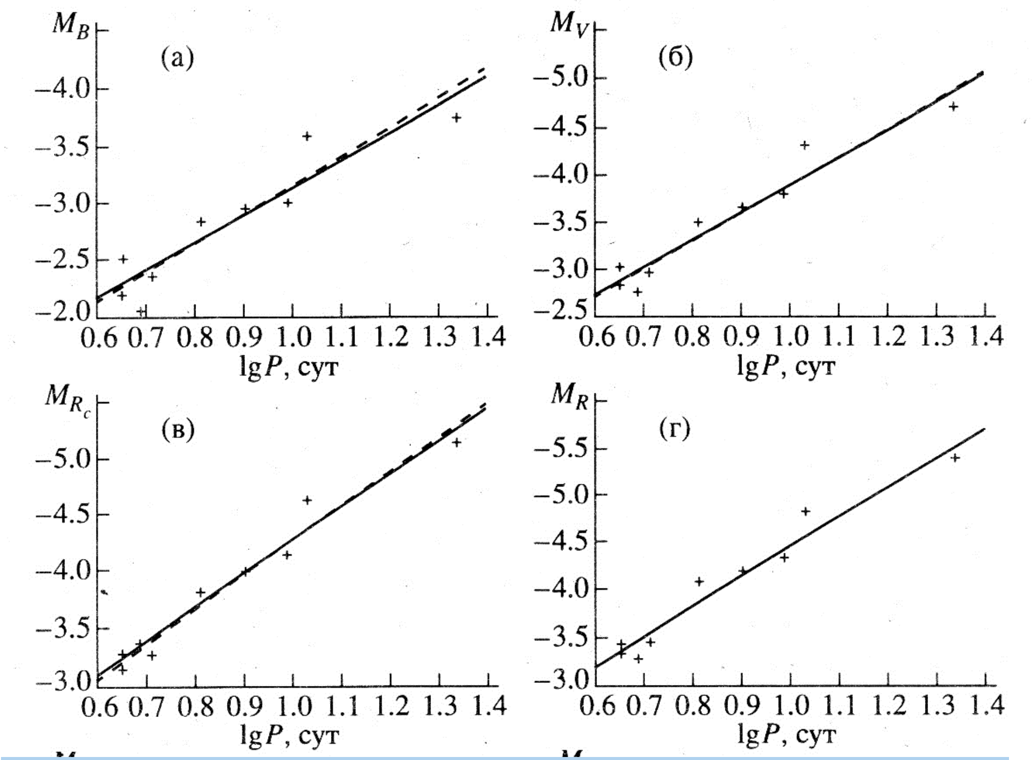
  - для 33 цефеид в скоплениях

  - для 36 цефеид с "пульсационными" радиусами, определёнными методами ББВ

Точность определения расстояний ~10%



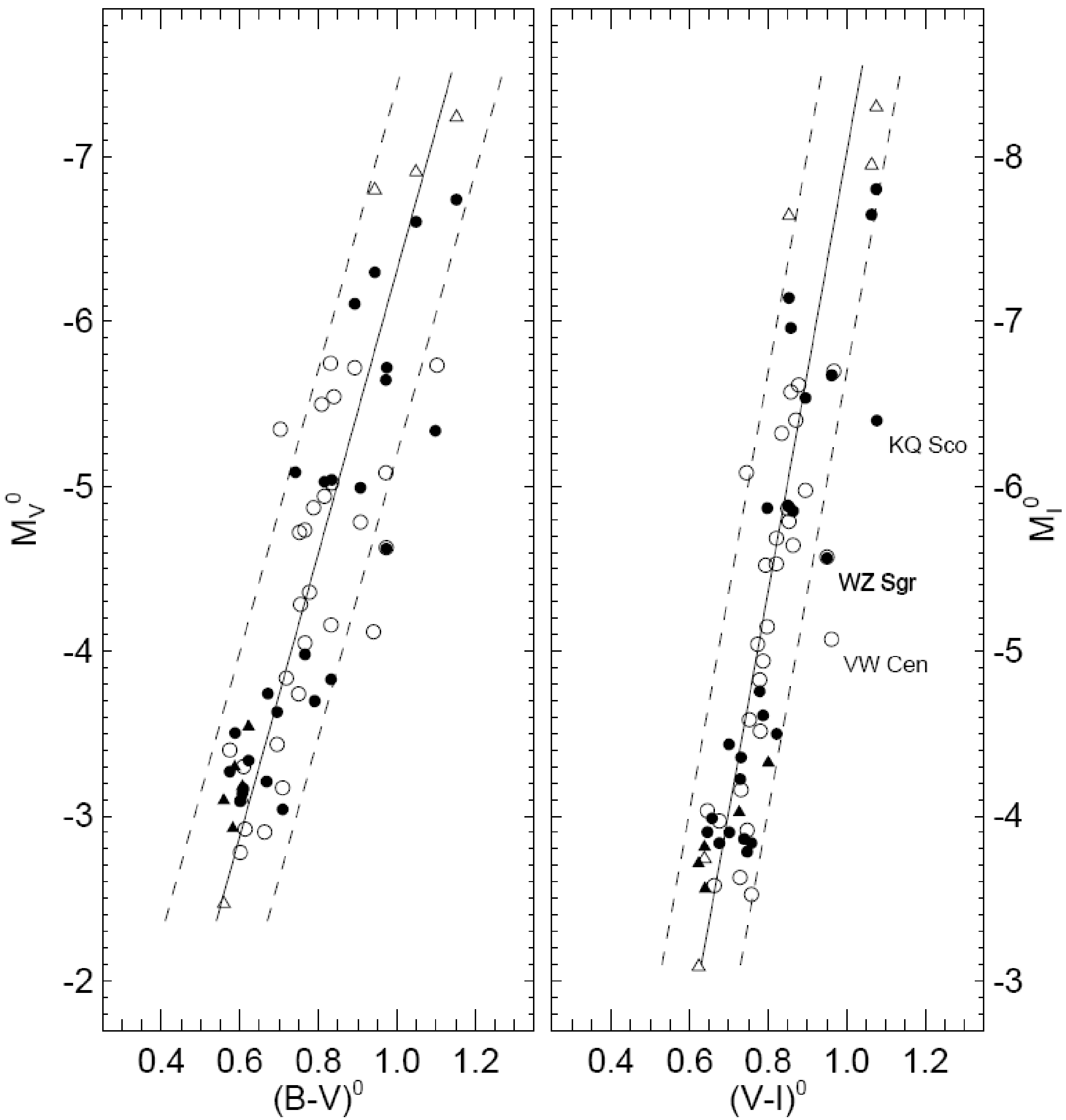
Пример определения наклона и нуль-пункта многоцветных зависимостей “период - светимость” по 9 цефеидам – самым надёжным членам рассеянных скоплений Галактики (Бердников и др., 1996)



Наклон зависимости “период - светимость” растёт с увеличением длины волны (B ⟶ K)

$$\langle M_B \rangle = -3.13 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_V \rangle = -3.88 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_{R_c} \rangle = -4.27 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_R \rangle = -4.45 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_{I_c} \rangle = -4.53 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_I \rangle = -4.78 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_J \rangle = -5.06 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_H \rangle = -5.37 - [redacted] (\log P - 1),$$
$$\langle M_K \rangle = -5.46 - [redacted] (\log P - 1),$$

Г.Таманн и др., 2003



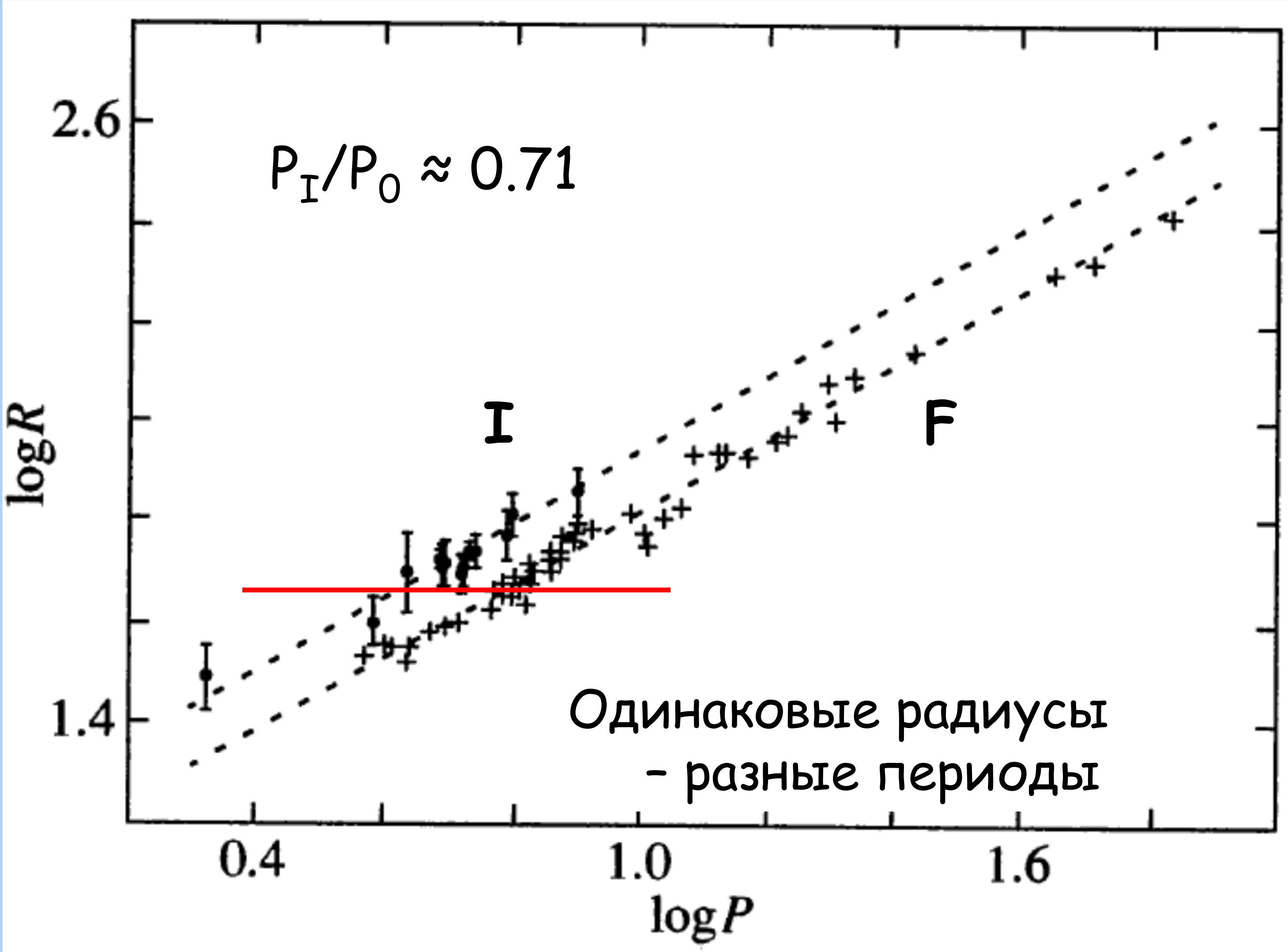
- Полоса нестабильности на диаграмме “цвет - величина“ для цефеид – членов РЗС и цефеид с “пульсационными“ определениями радиусов и светимостей

M_V-(B-V)

M_I-(V-I)

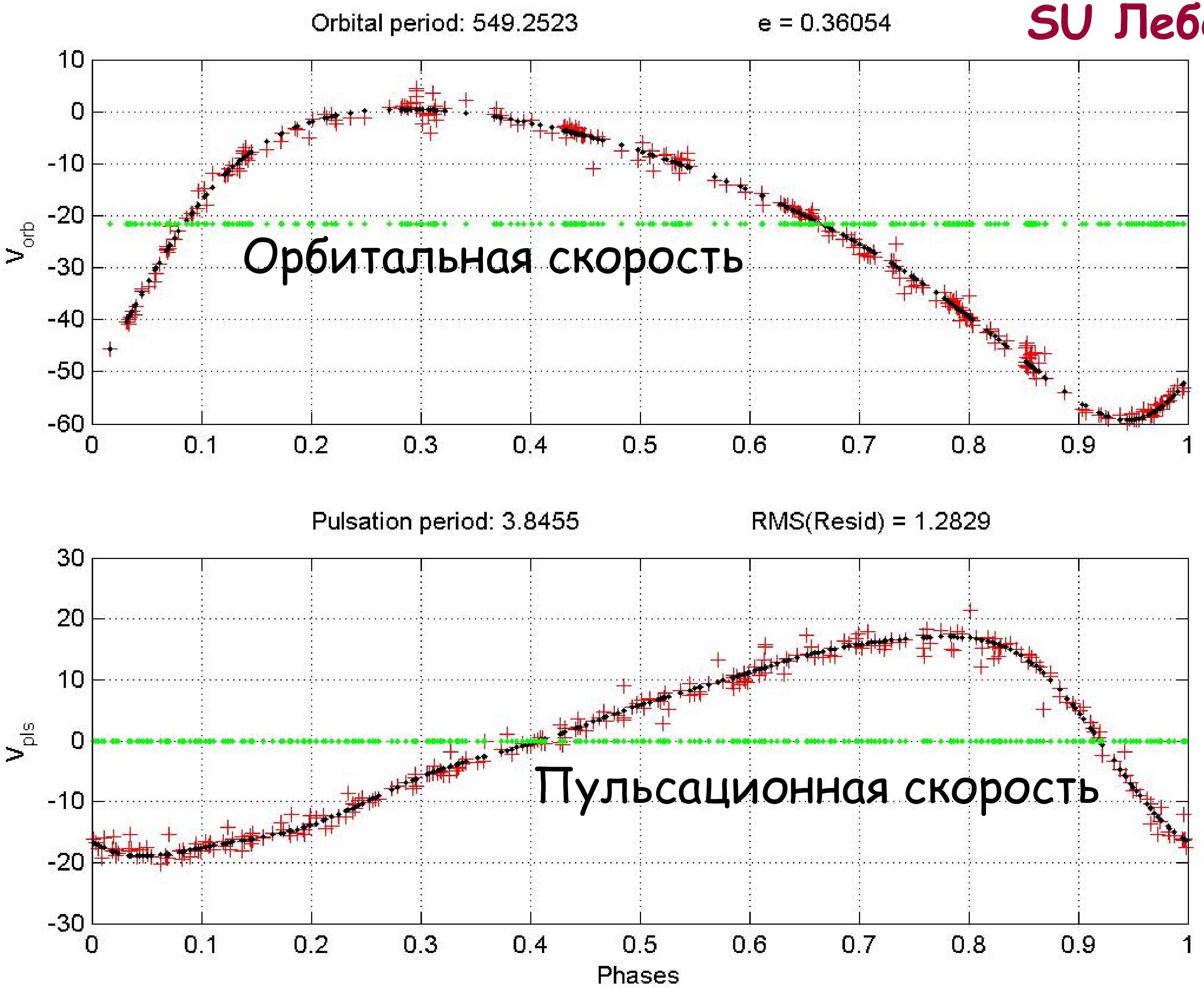
- **Зависимость "период - радиус" для цефеид**
- Классификация по модам пульсаций (F-основной тон / I-первый обертон)

М.Е.Сачков (2002)



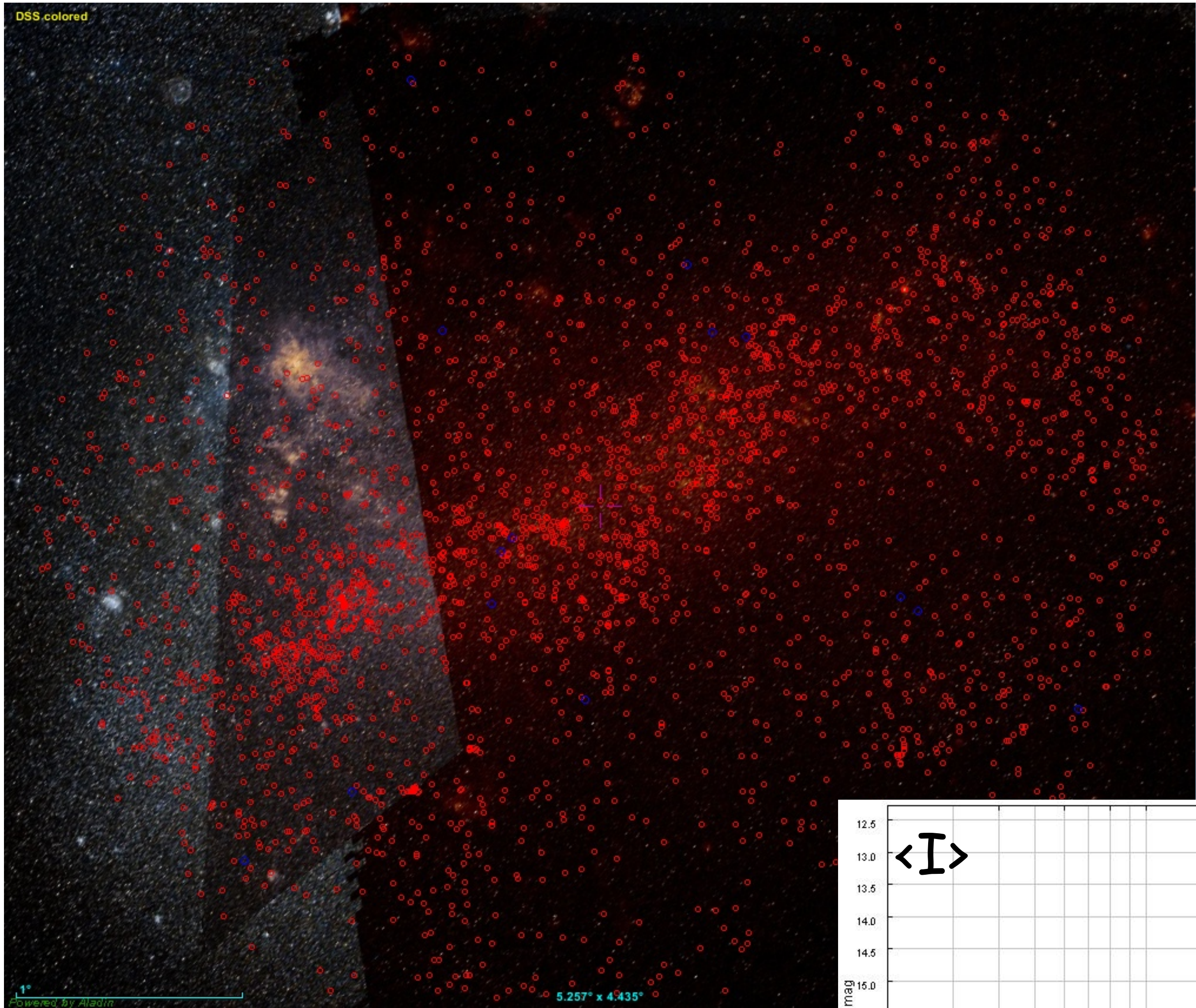
- **Двойственность цефеид**
- Не менее 30% цефеид имеют спутники (как правило, горячие B-звёзды)
- Двойственность проявляется через изменение скорости цефеиды, вызванное орбитальным движением (спектральная двойственность)
- **Лучшие в мире наблюдения:**
- **Н.А.Горыня** и др. (1987-2014) – более 13000 измерений скорости для 170 цефеид северного неба (Москва, Крым, Узбекистан)
- **Измеренная скорость: Орбита + Пульсации**

SU Лебедя


Orbital period: 549.2523
e = 0.36054
V_{orb}
Орбитальная скорость
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
Pulsation period: 3.8455
RMS(Resid) = 1.2829
V_{pls}
Пульсационная скорость
30
20
10
0
-10
-20
-30
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
Phases

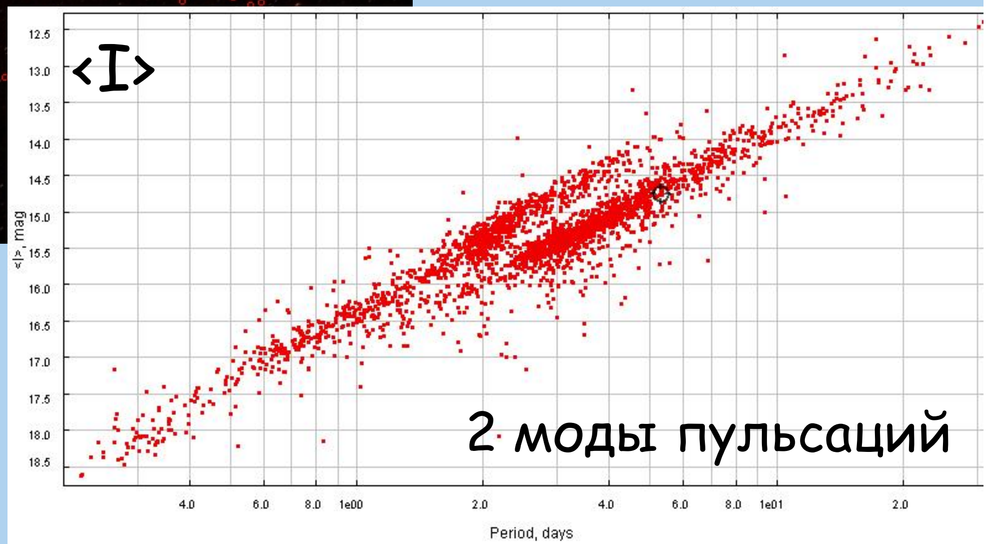
- **Цефеиды в других галактиках, близких и далёких:**

  они есть везде, где рождаются звёзды

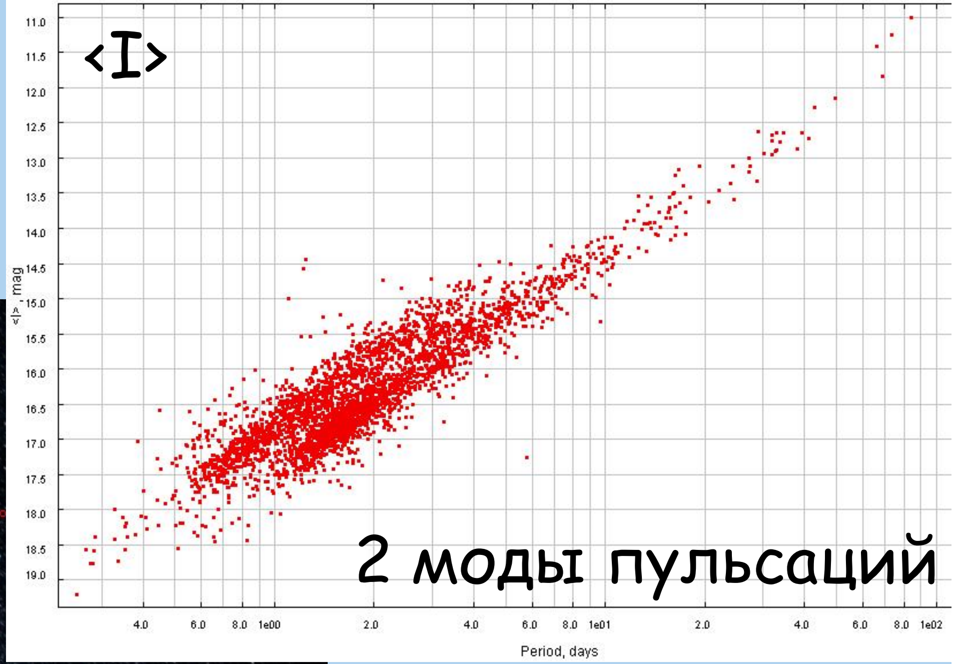


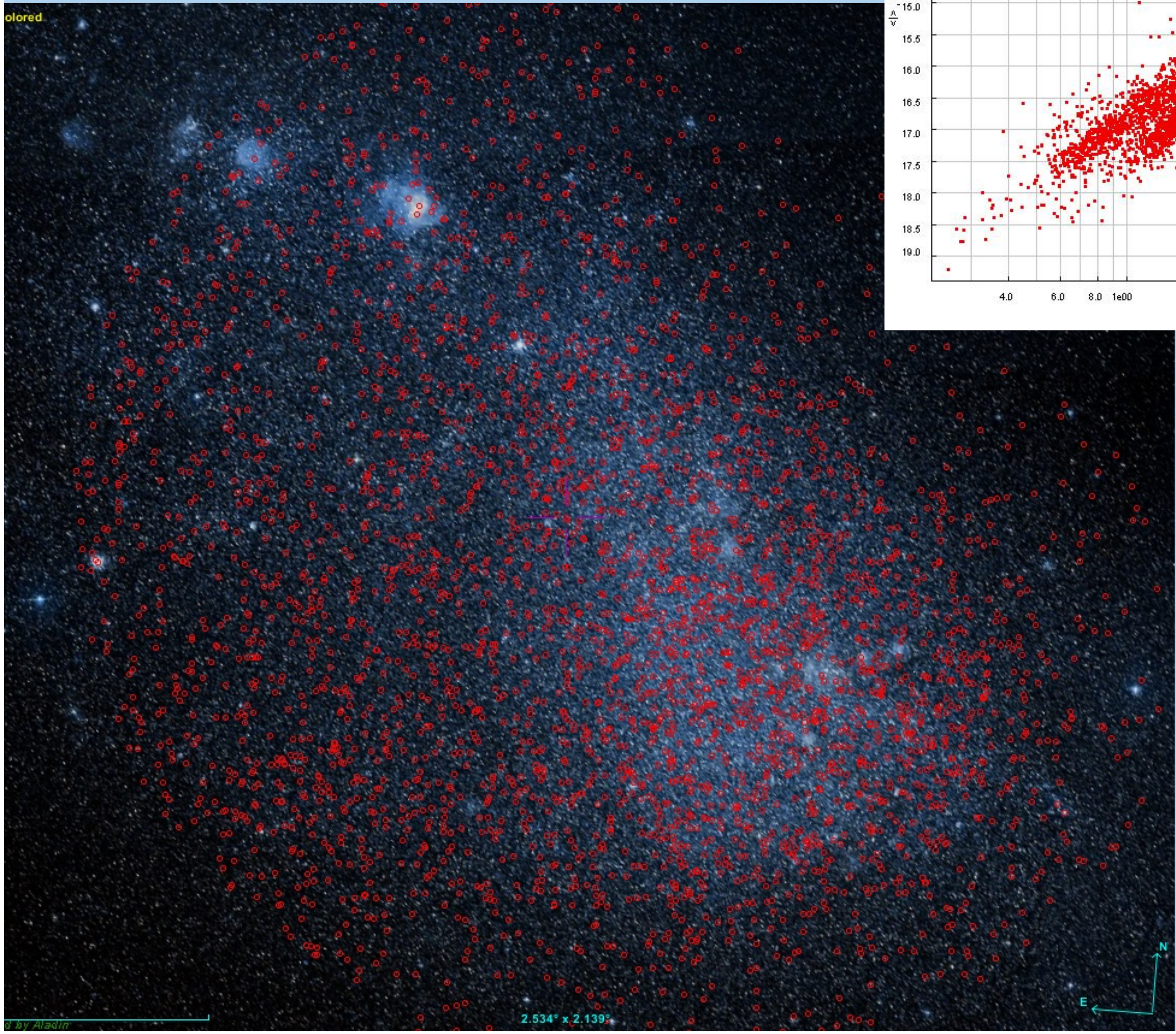
Эксперимент OGLE (гравитационное линзирование): более 2500 цефеид

- Цефеиды БМО
- D ~ 50 кпк



- Цефеиды ММО
- D ~ 61 кпк

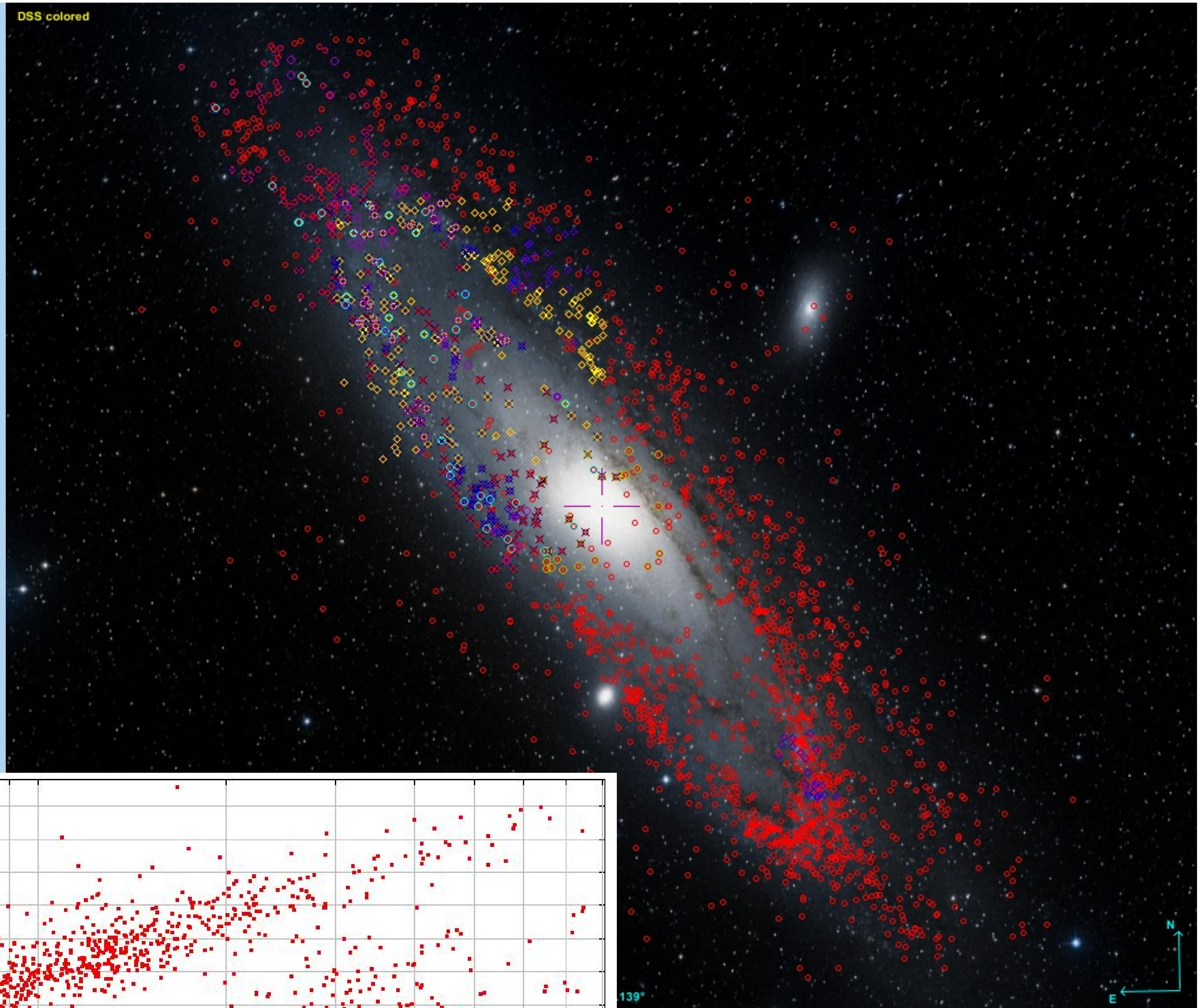


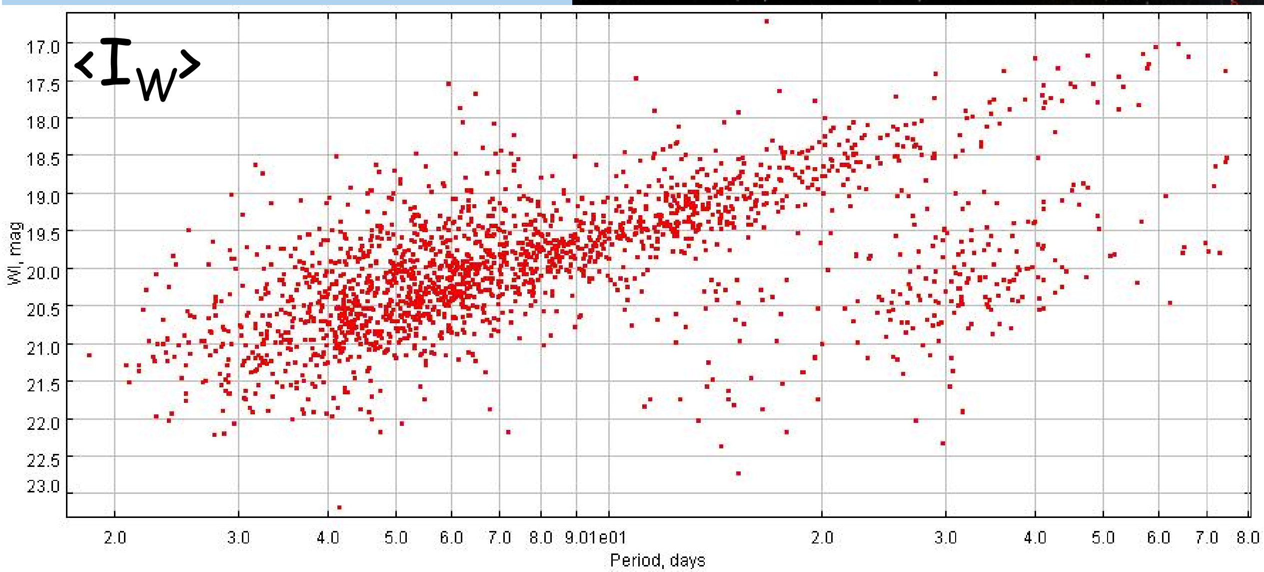


Эксперимент OGLE: более 4000 цефеид

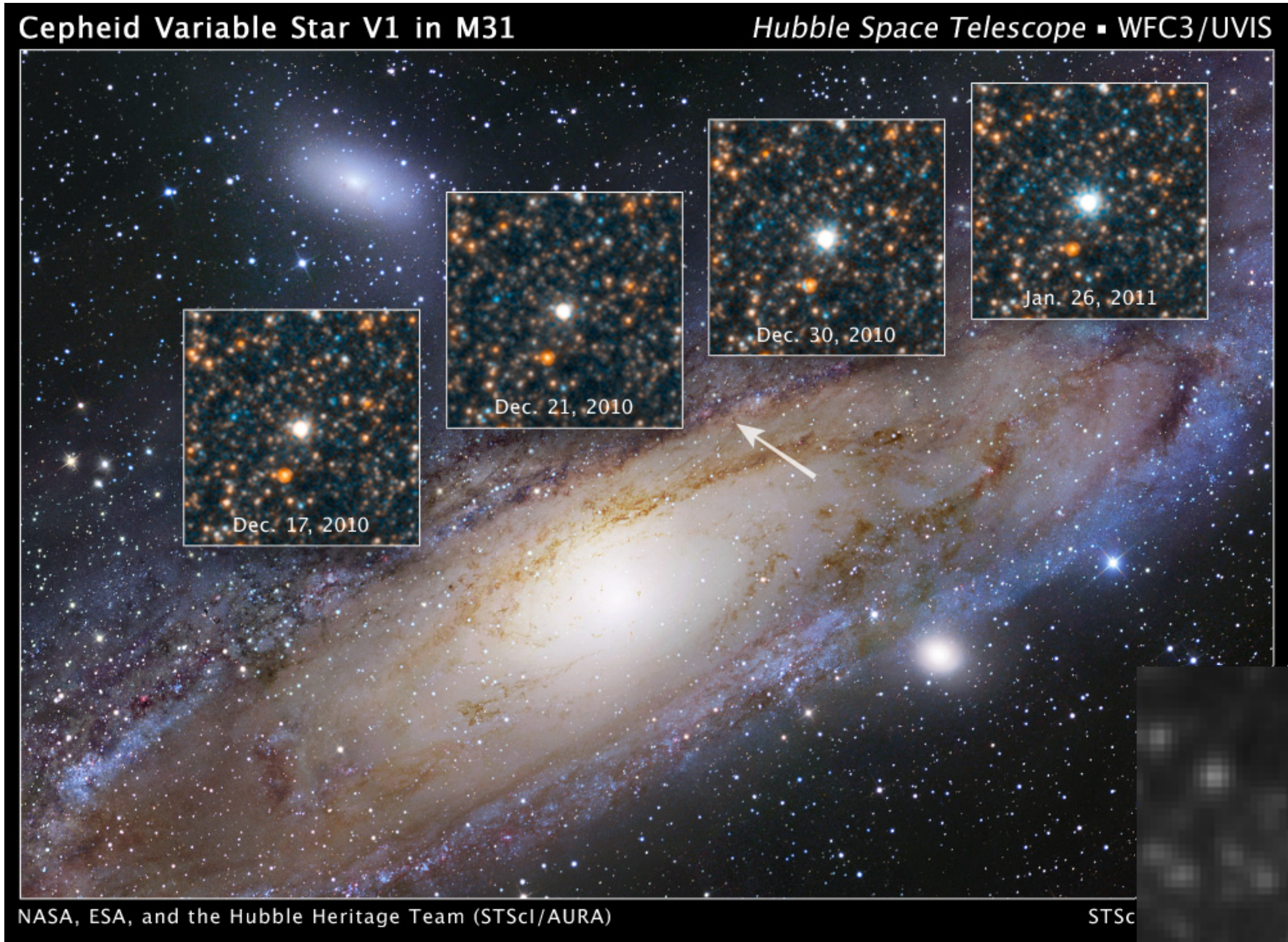
- Цефеиды в Туманности Андромеды (M 31)

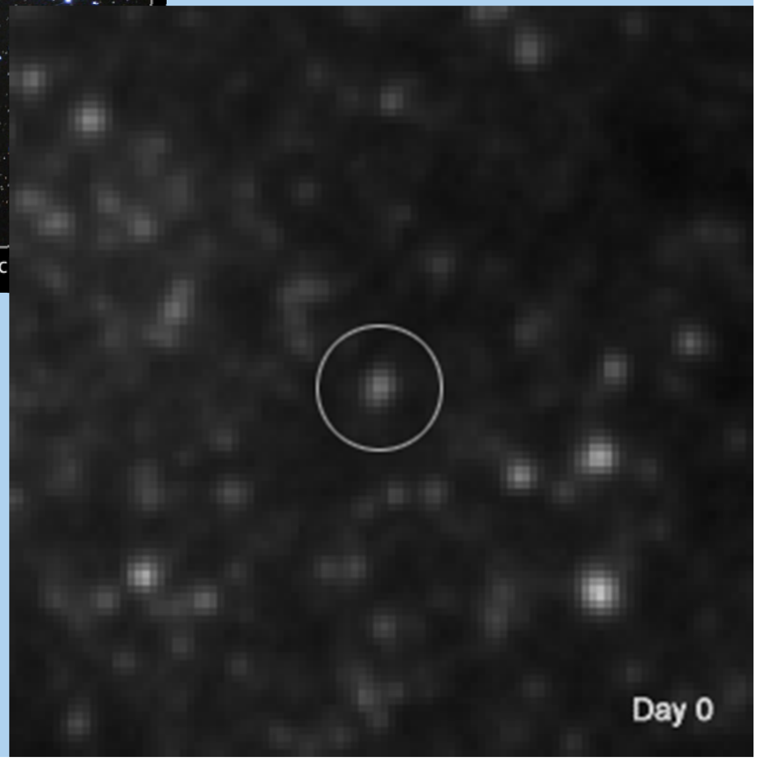
D ~ 0.79 Мпк



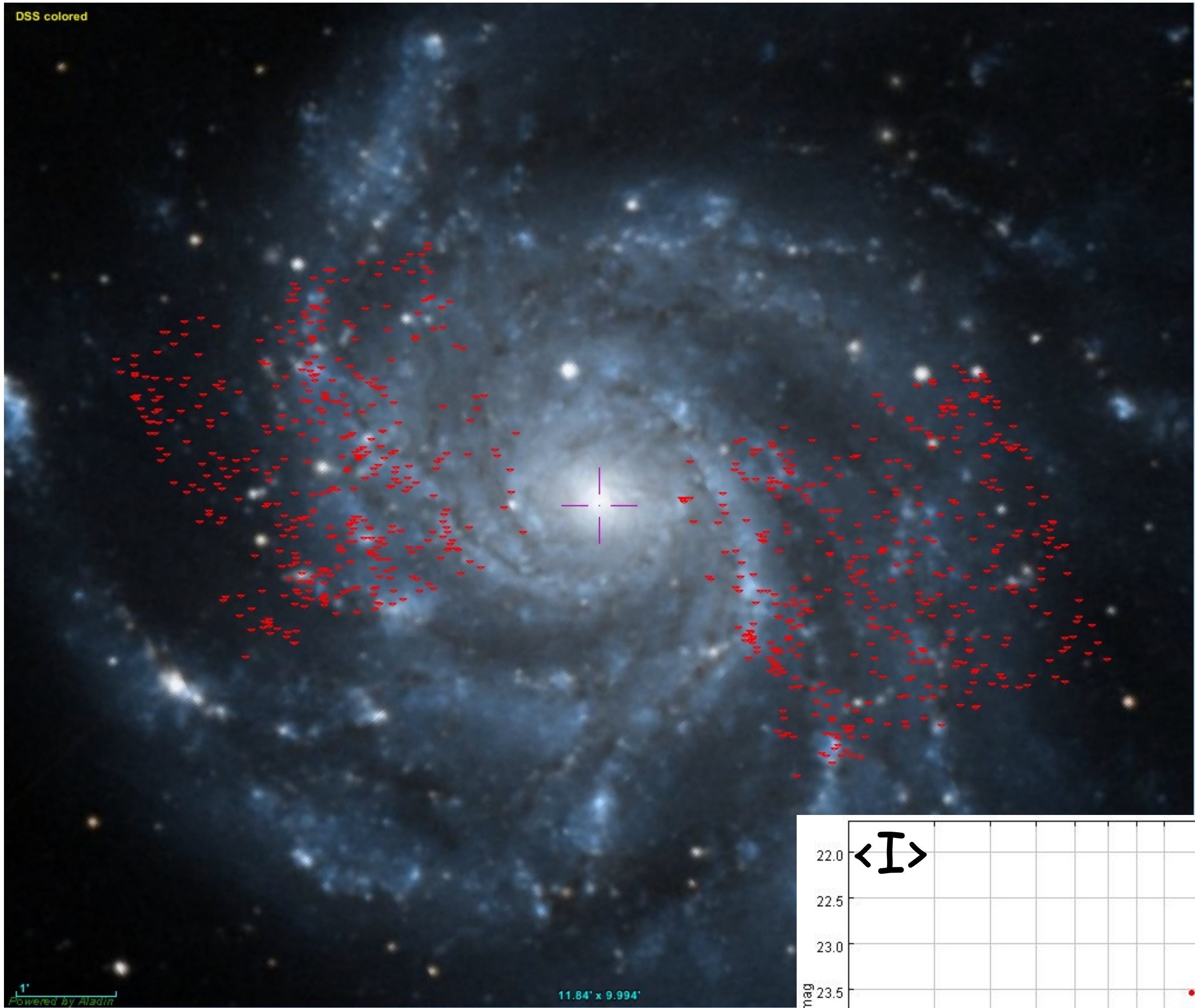


Концентрация цефеид к спиральным ветвям

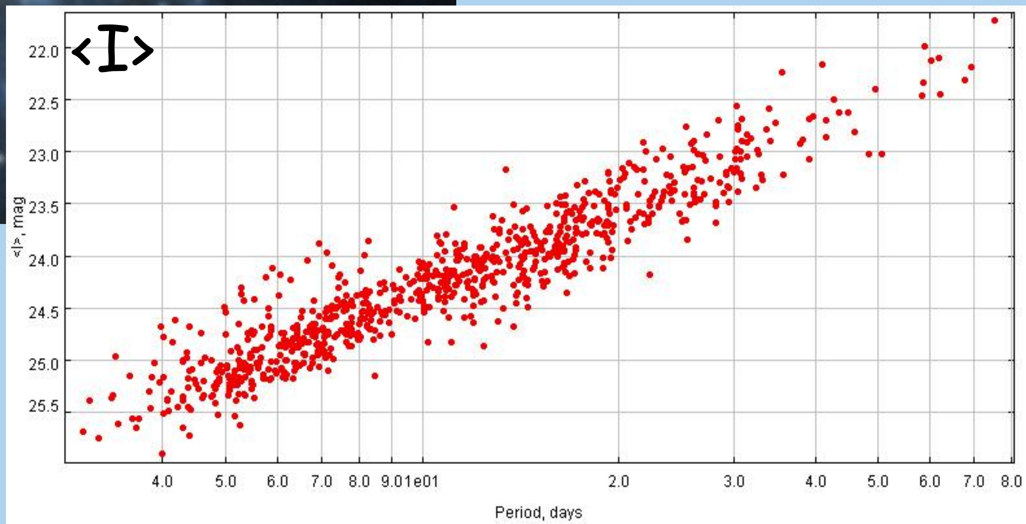




- Наблюдать цефеиды, устраняя вклад соседних звёзд на плотном и неоднородном звёздном фоне в других галактиках, крайне сложно
- А ещё – поглощение света…



- Цефеиды в M 101
- D ~ 6.8 Мпк



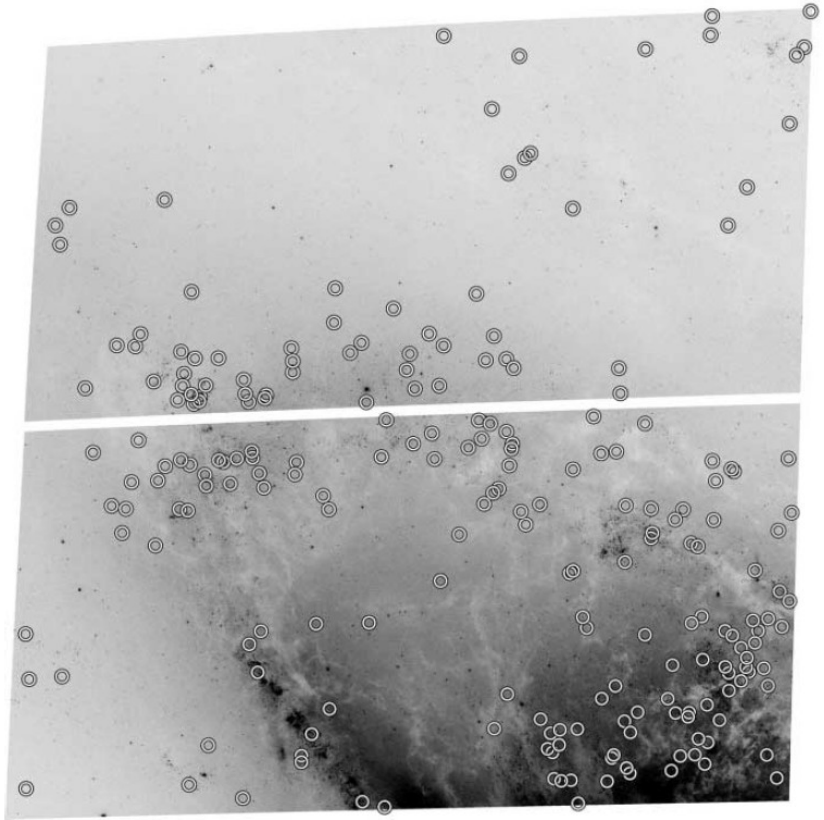
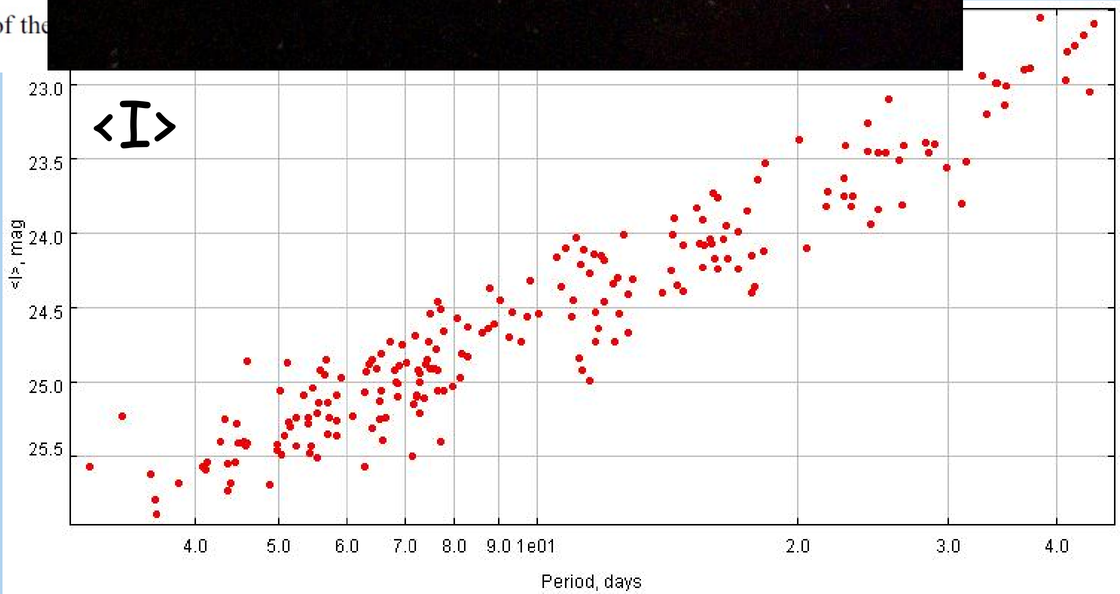
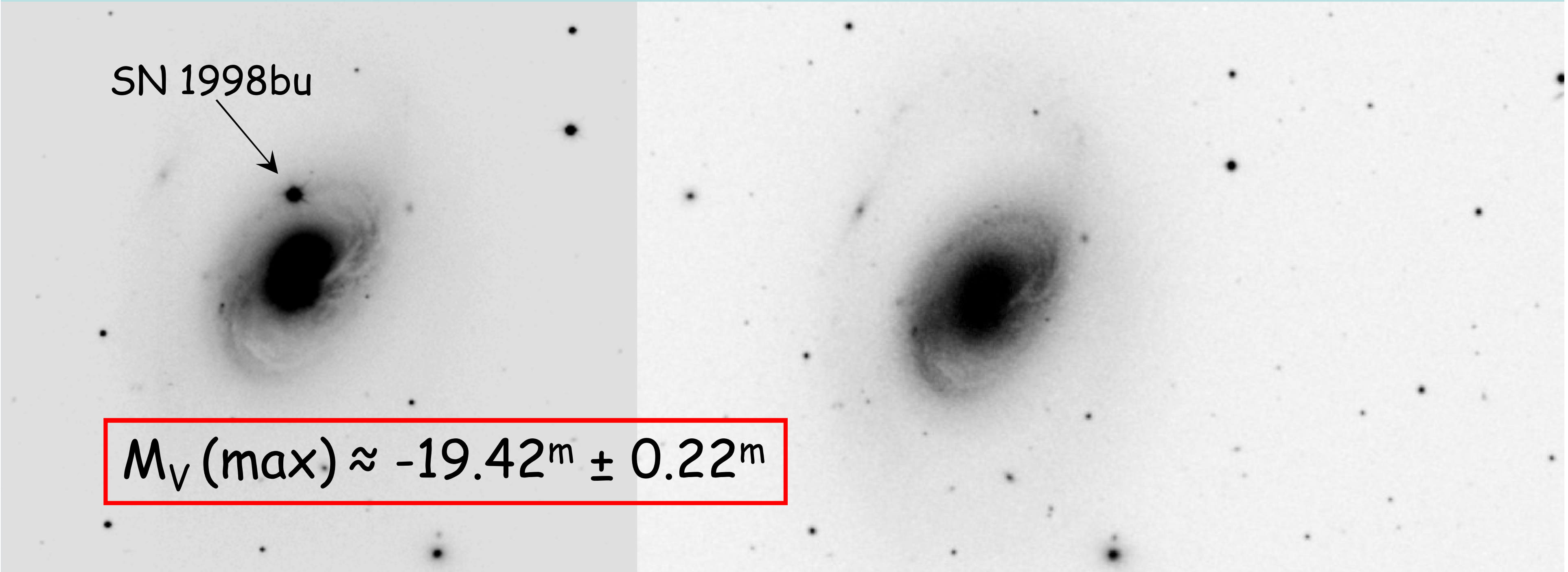


FIG. 7.—Master V-band image of the ACS inner field. The locations of the Cepheids listed in Table 4 are shown by open circles.

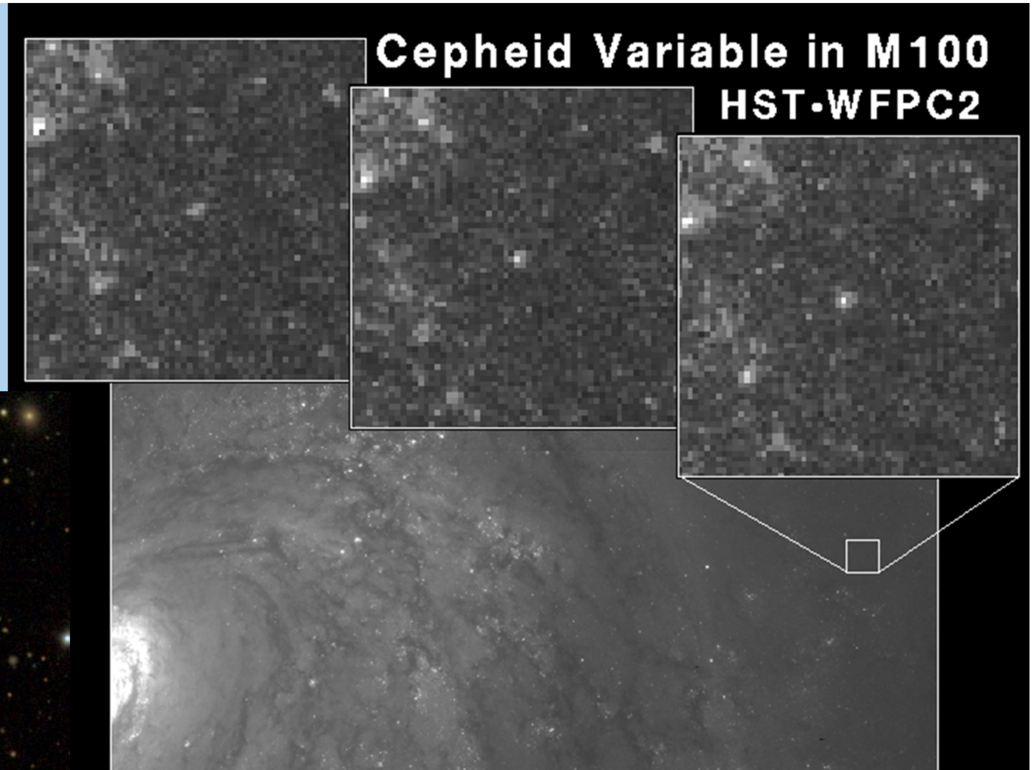


- Цефеиды в NGC 4258
- (ACS КТ Хаббл)
- D ~ 7.5 Мпк

- M 96
- D ~ 10.8 Мпк
- По 7 цефеидам, наблюдавшихся КТ Хаббл, определён максимальный блеск SN типа Ia, часто использующихся в качестве "стандартной свечи" на космологических расстояниях



- Цефеида в М 100 (Скопление Девы)
- D ~ 16.6 Мпк

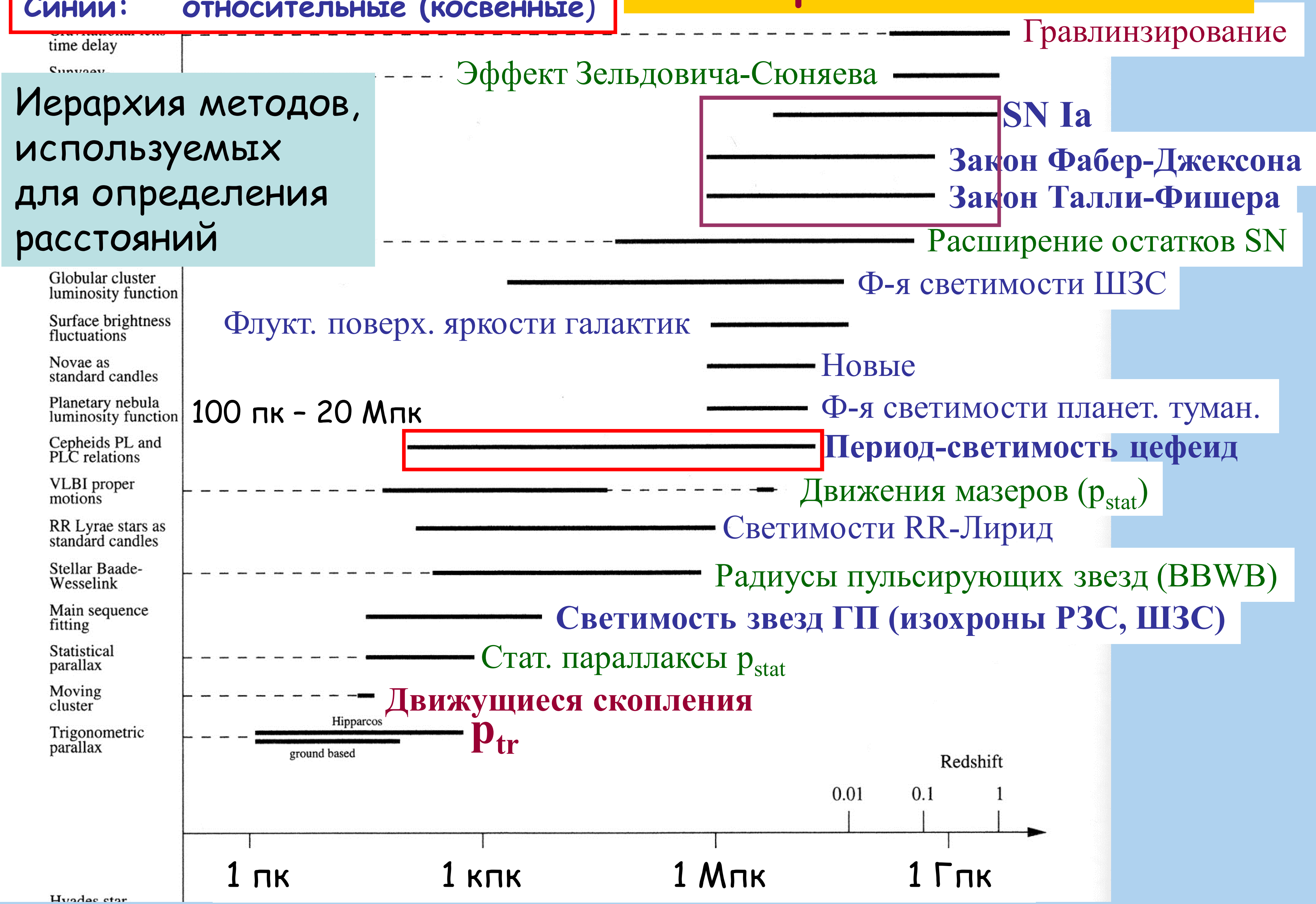


Одна из наиболее далёких галактик, где КТ Хаббл наблюдал цефеиды

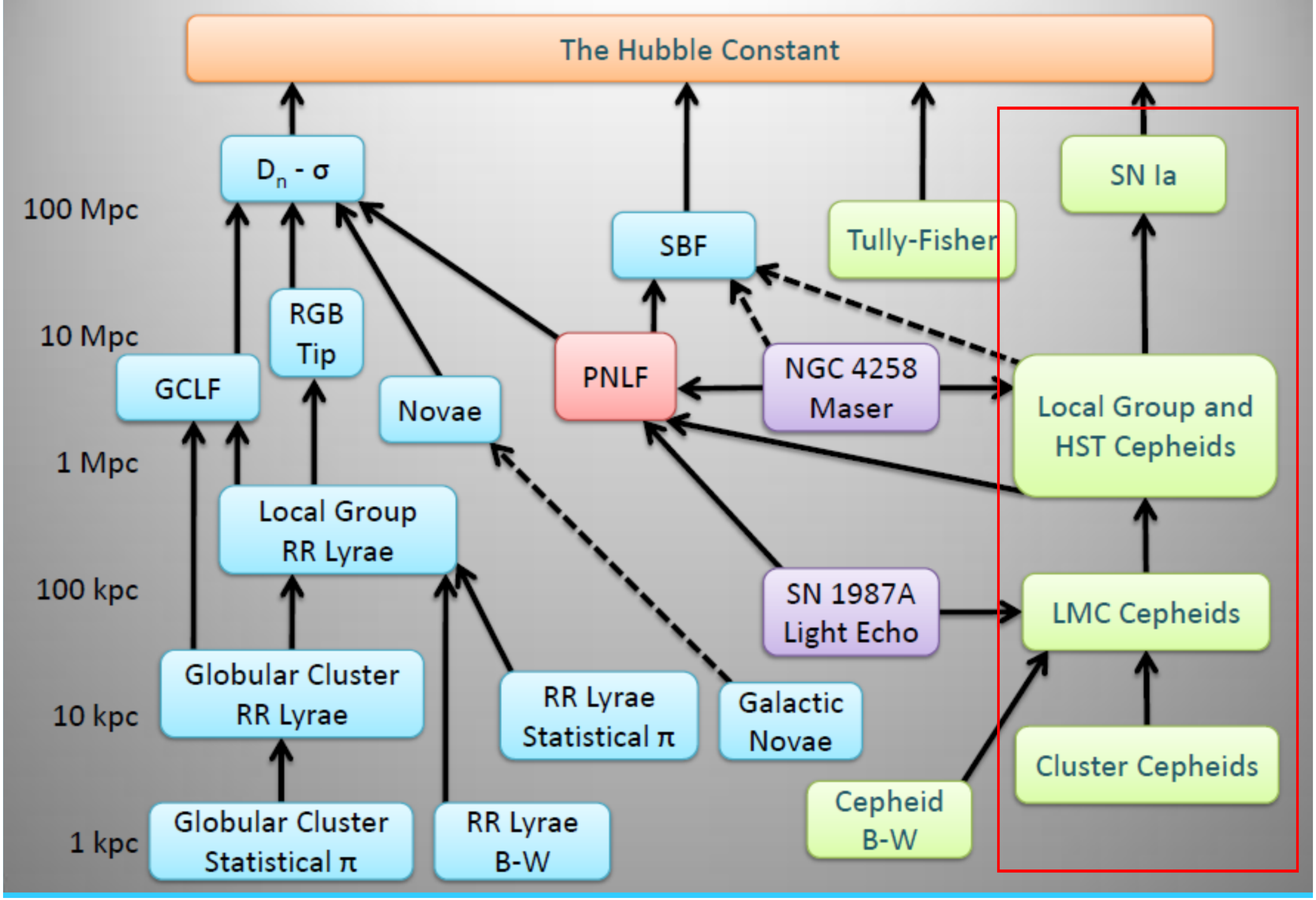
- **Классификация методов определения расстояний:**
  - **Абсолютные, или прямые** (опирающиеся только на простейшие геометрические построения – тригонометрические параллаксы)
  - **Промежуточные** (использующие некоторые дополнительные данные и калибровки, не связанные напрямую с расстояниями)
  - **Относительные, или косвенные** (в основном фотометрические), опирающиеся на физическую природу объектов, в т.ч. – методы "стандартных свечей"

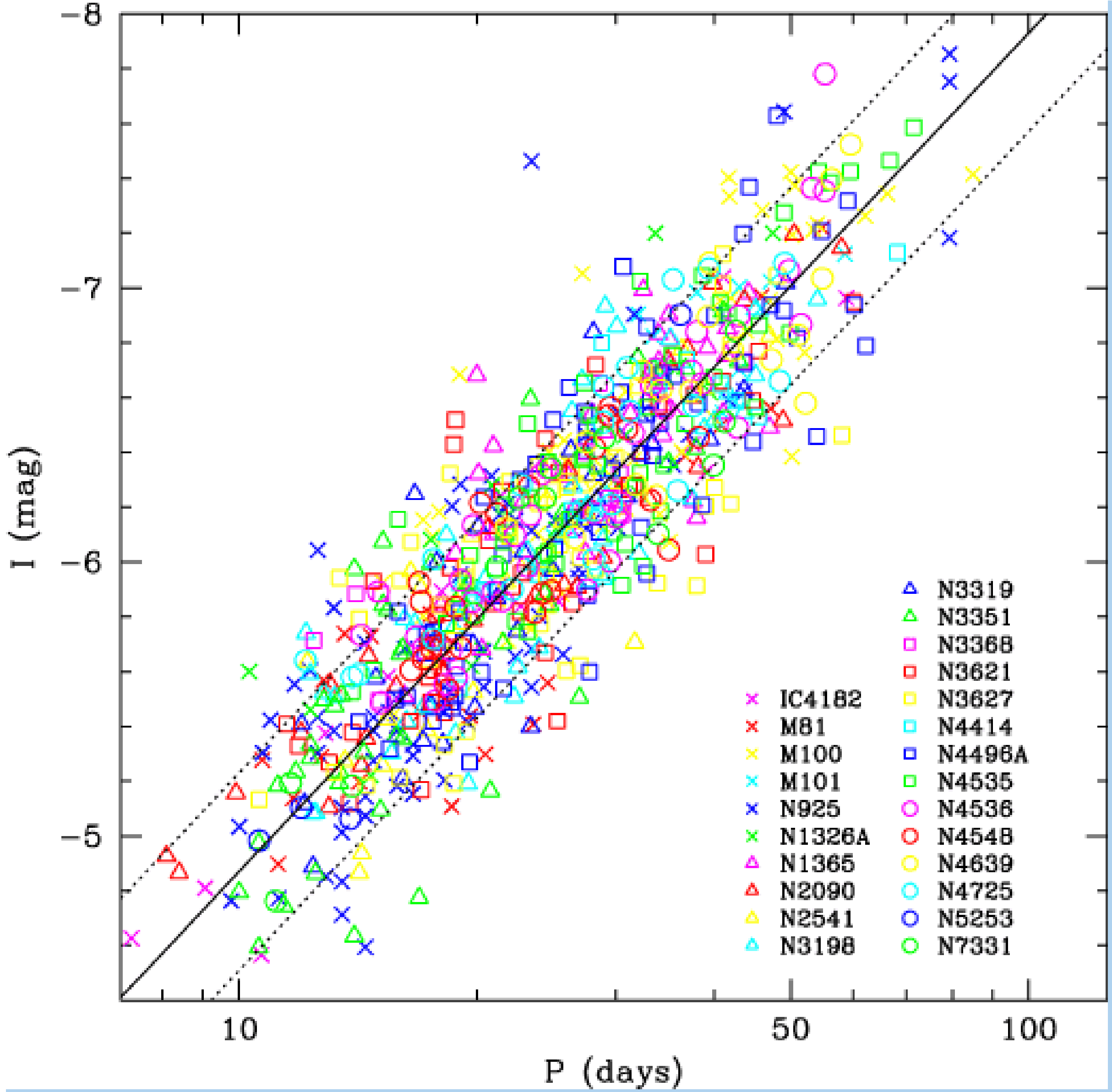
Цефеиды и универсальная шкала расстояний

Красный: абсолютные (прямые)
Зеленый: промежуточные
Синий: относительные (косвенные)



Связь разных методов определения расстояний





Зависимость "период - абсолютная величина" в ИК-полосе I (~900 nm) для цефеид в 24 галактиках, в которых найдены Сверхновые типа Ia

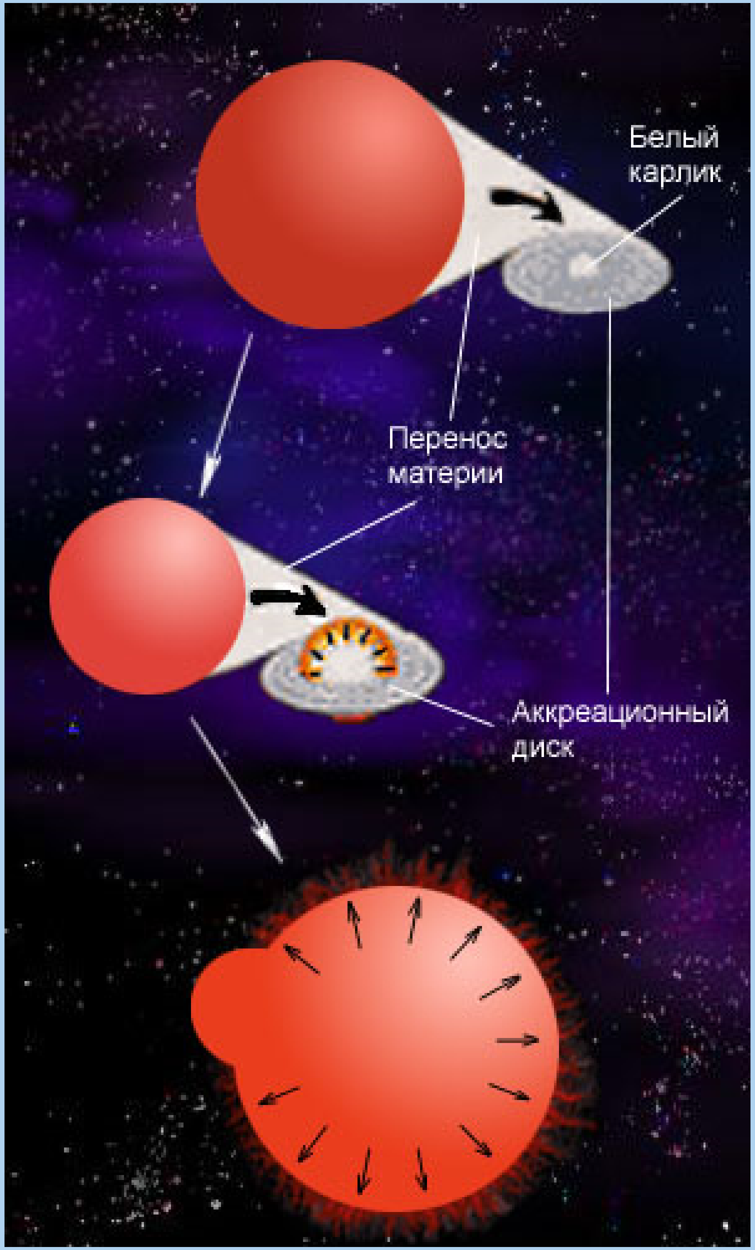
Рассеяние светимостей связано также и с различиями химического состава галактик

- **Цефеиды – одно из главных звеньев в цепочке универсальной шкалы расстояний**
- Цефеиды относятся к ярчайшим "нормальным" звёздам дисковых галактик и могут наблюдаться вплоть до расстояний ~ 30 Мпк, т.е. в пределах Местного Сверхскопления галактик
- По "цефеидным" расстояниям до галактик определяются светимости ещё более ярких "стандартных свечей" – Сверхновых типа Ia и самих галактик (эллиптических и спиральных, законы FJ - TF)

Природа Сверхновых типа Ia

- Тип Ia – термоядерный взрыв кислородно-углеродного белого карлика в результате слияния двух белых карликов или аккреции вещества от спутника, приводящей к росту массы до критического значения, ~1.4 M_{Sun}
- $M_B(max) \approx -19.5^m$

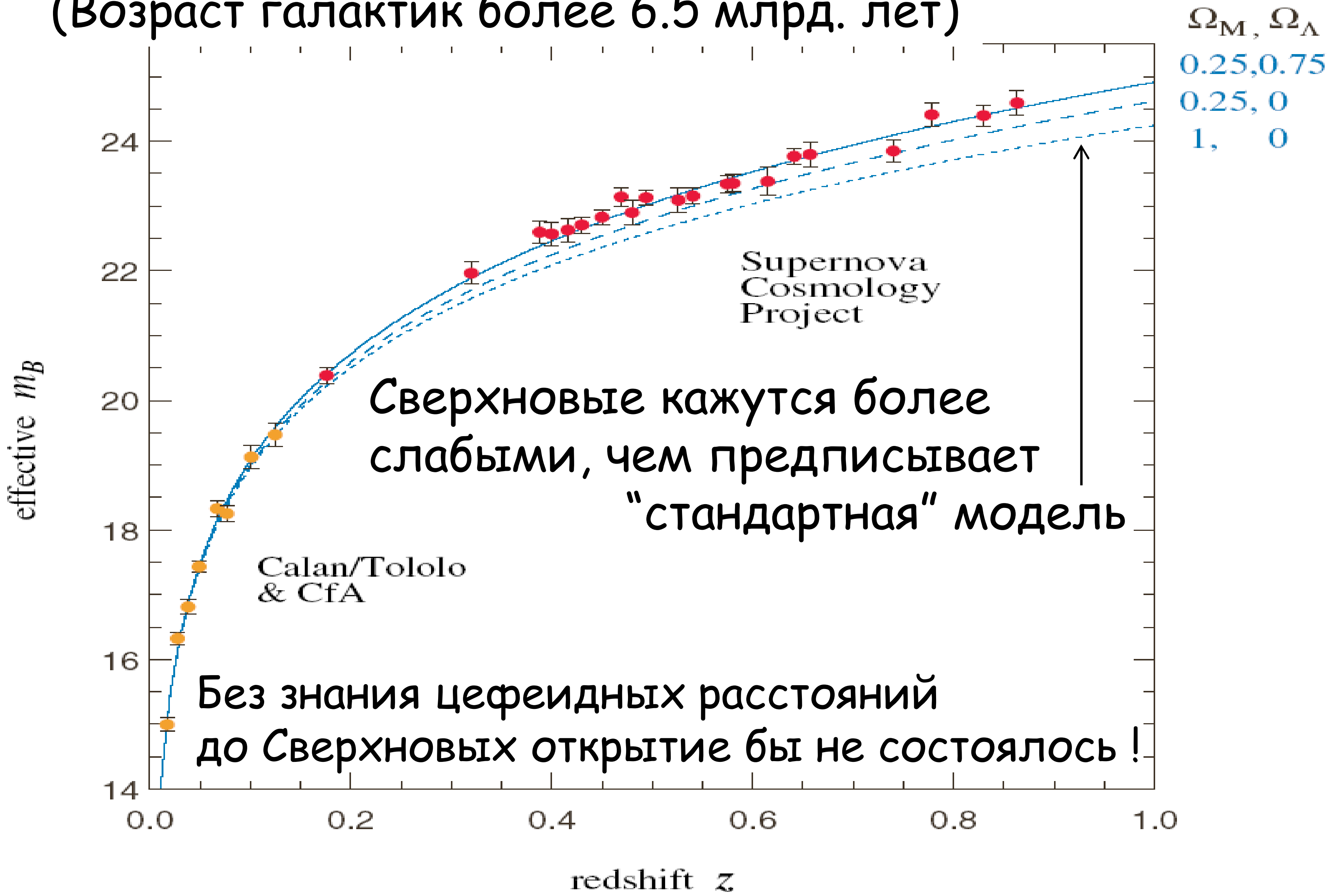
  – самые яркие “стандартные свечи” !



- Сверхновые типа Ia как средство исследования динамики Вселенной и проверки космологических моделей:
- Сопоставление фотометрических расстояний SN Ia со скоростями удаления их “родительских“ галактик привело к гипотезе ускоренного расширения Вселенной и существования “темной энергии“ (всемирного антитяготения)

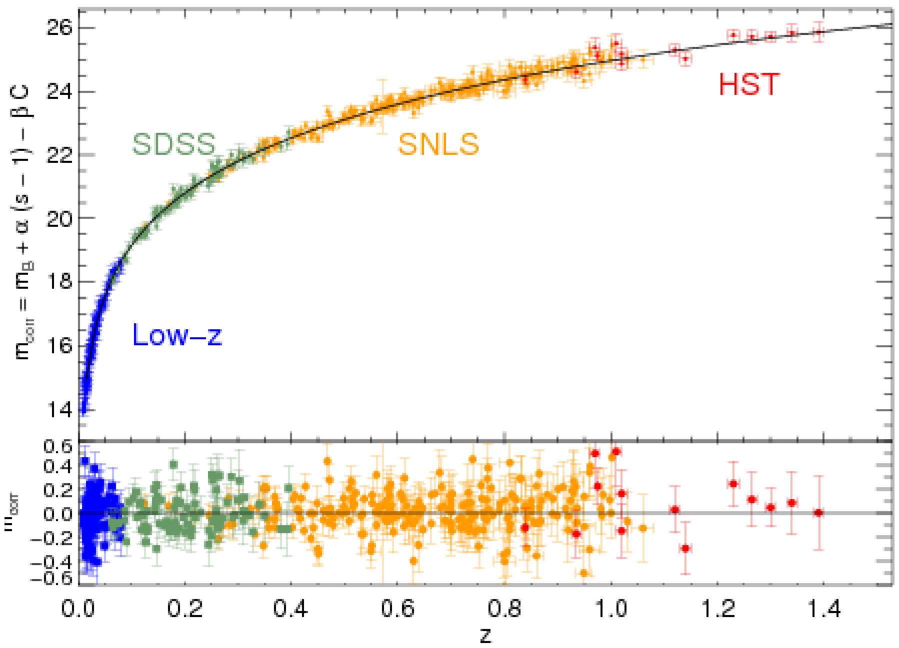
Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт, Адам Риесс (Нобелевская премия 2011 г. за открытие ускоренного расширения Вселенной)

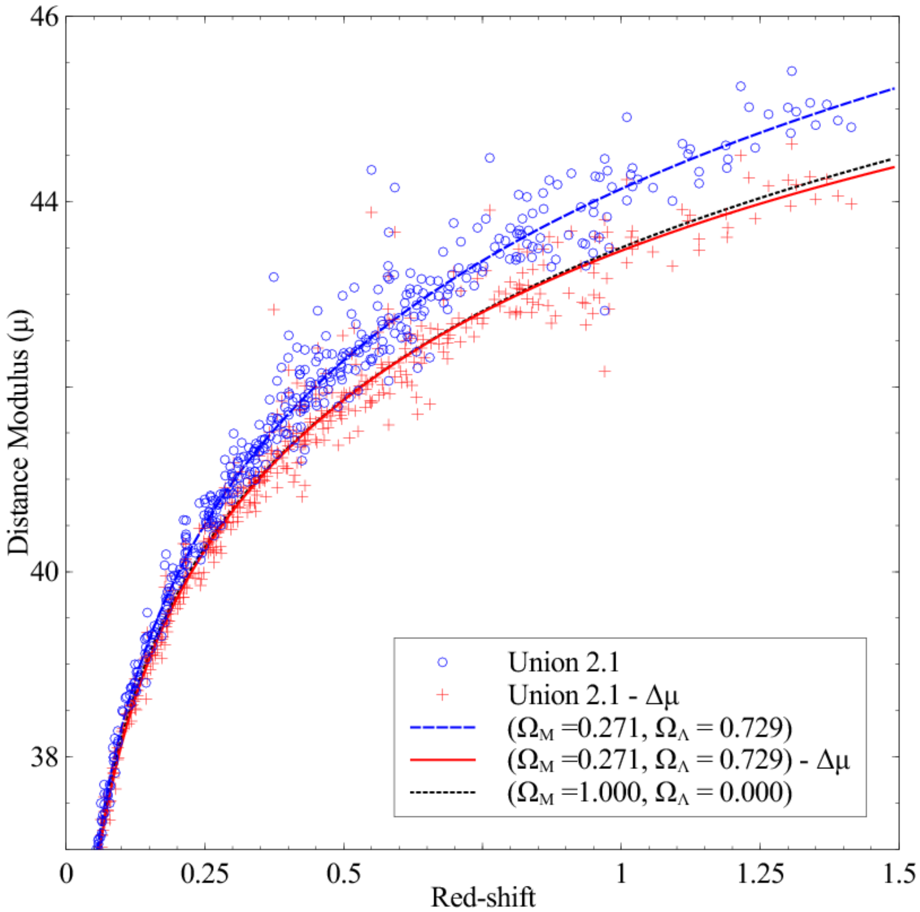
(Возраст галактик более 6.5 млрд. лет)



Сверхновые кажутся более слабыми, чем предписывает "стандартная" модель

Без знания цефеидных расстояний до Сверхновых открытие бы не состоялось !



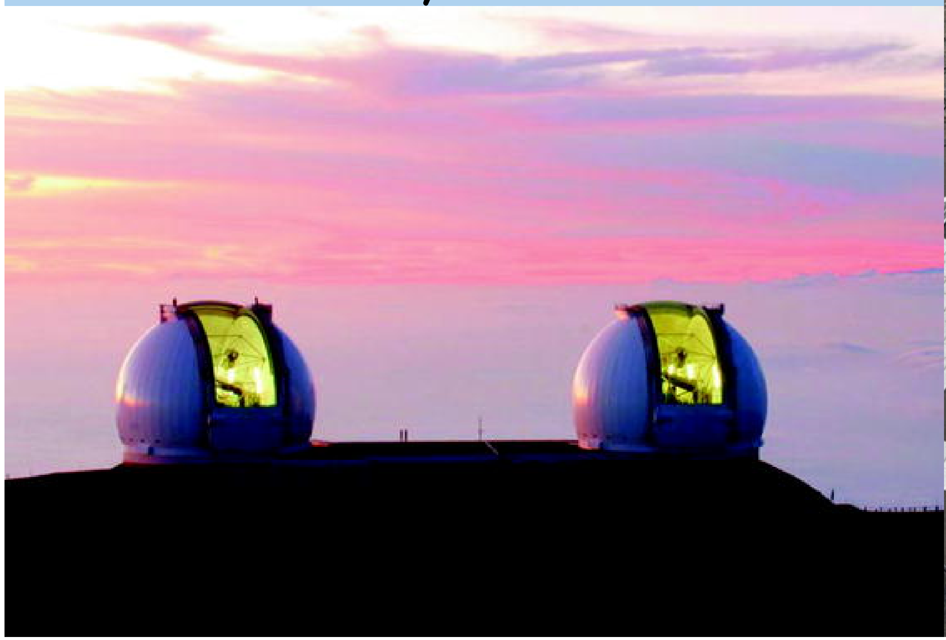


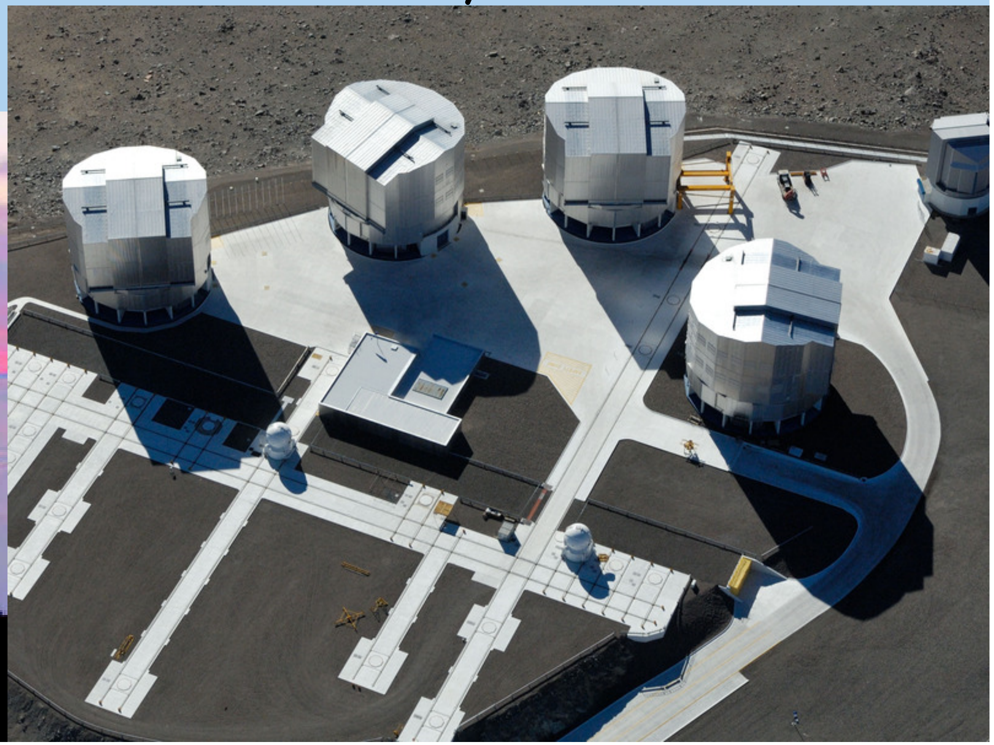
- Более современные данные о далеких Сверхновых (возраст галактик более 4.5 млрд. лет)

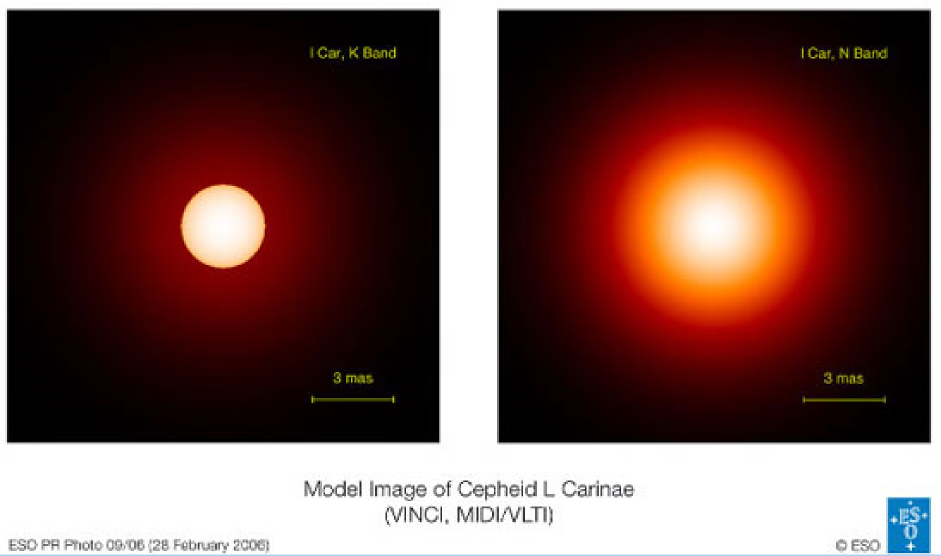
- **Интерферометрические наблюдения близких цефеид**
- Прямые измерения изменений радиуса при пульсациях !

VLT (Чили, г. Паранал):
4 x 8.2 м, L ~ 120 м

Keck (Гавайи):
2 x 10 м, L = 85 м





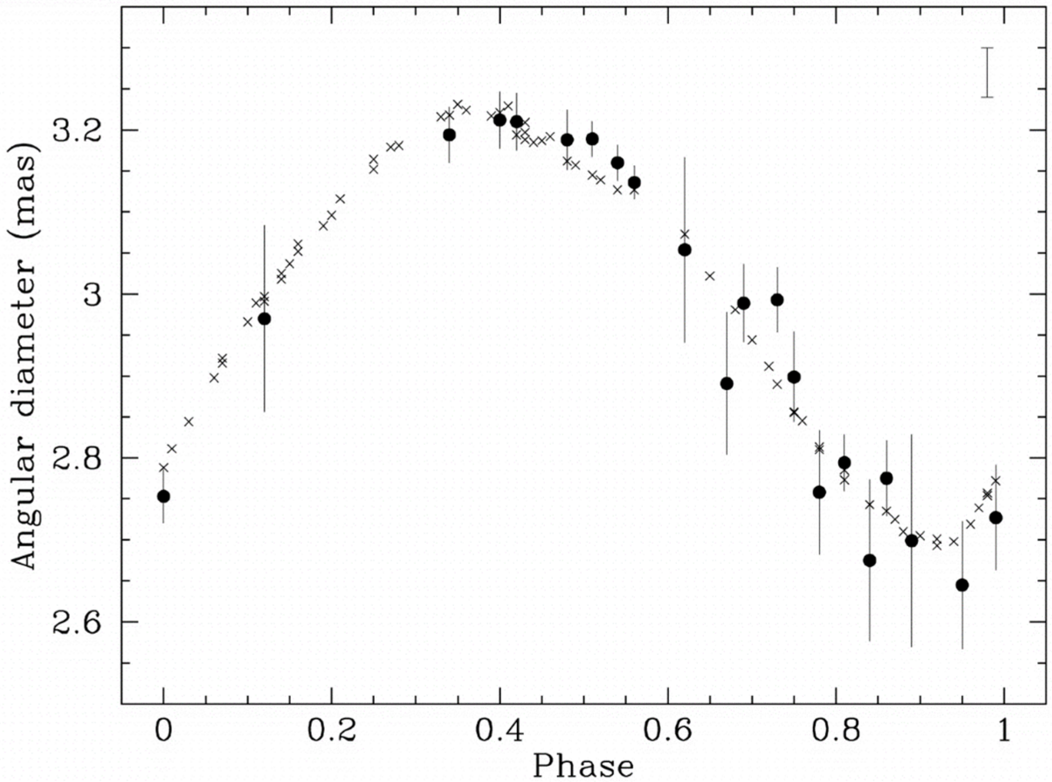


Интерферометрия цефеиды *l Киля* на VLT (Чили, 4 x 8 м)

D ≈ 566 ± 20 пк

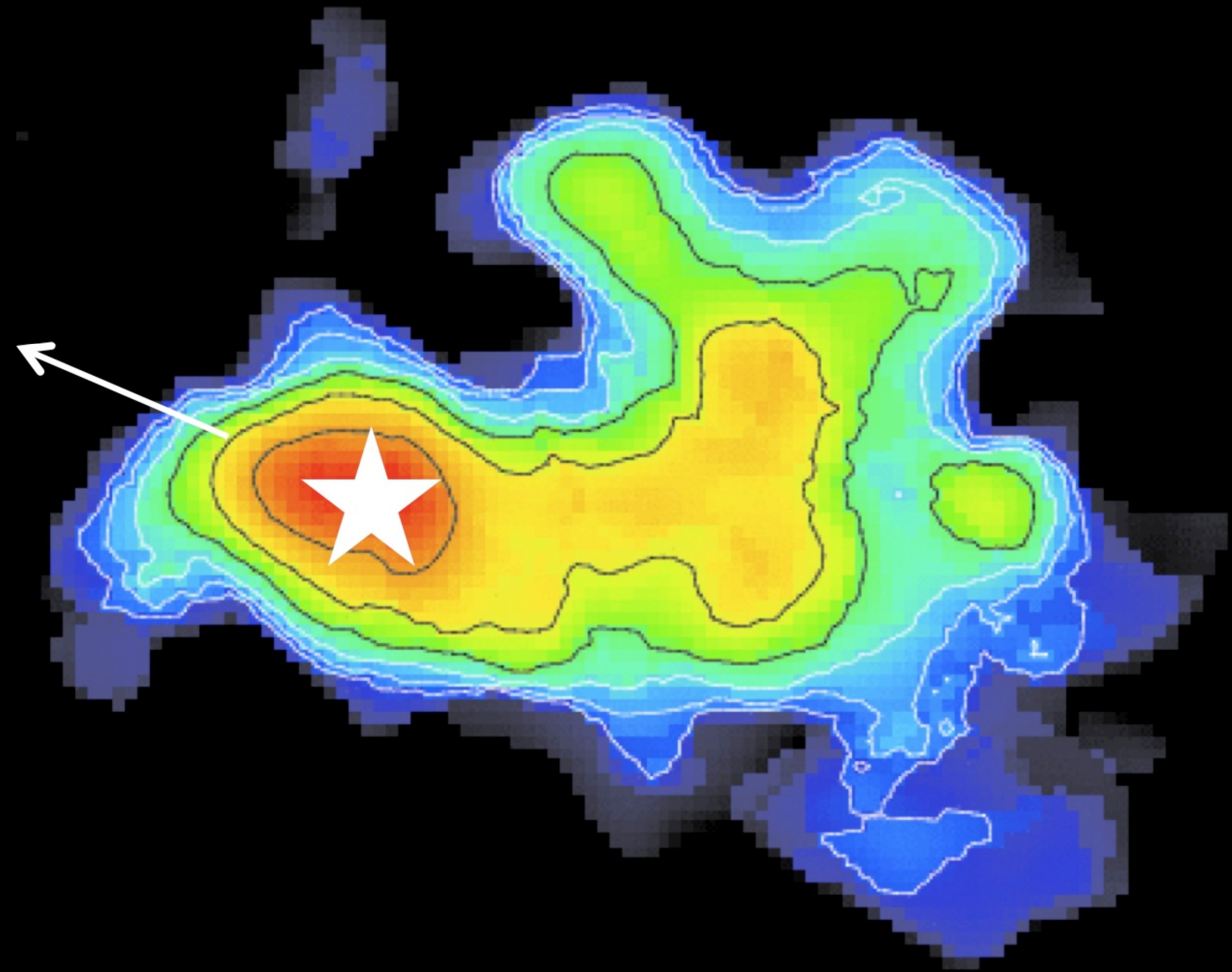
R ≈ 180 ± 10 R_0

- Изменения углового диаметра (мс дуги): прекрасное согласие с результатами вычисления методом ББВ !



- Вокруг цефеид больших периодов (> 10 суток) и радиусов (десятки и сотни солнечных !) обнаружены околозвёздные газовые оболочки, вклад которых в полную светимость (особенно ИК) ~ 10%

- Природа оболочек – звёздный “ветер“ и выброс газа в ходе пульсаций, при которых скорость оболочки достигает 50-60 км/с

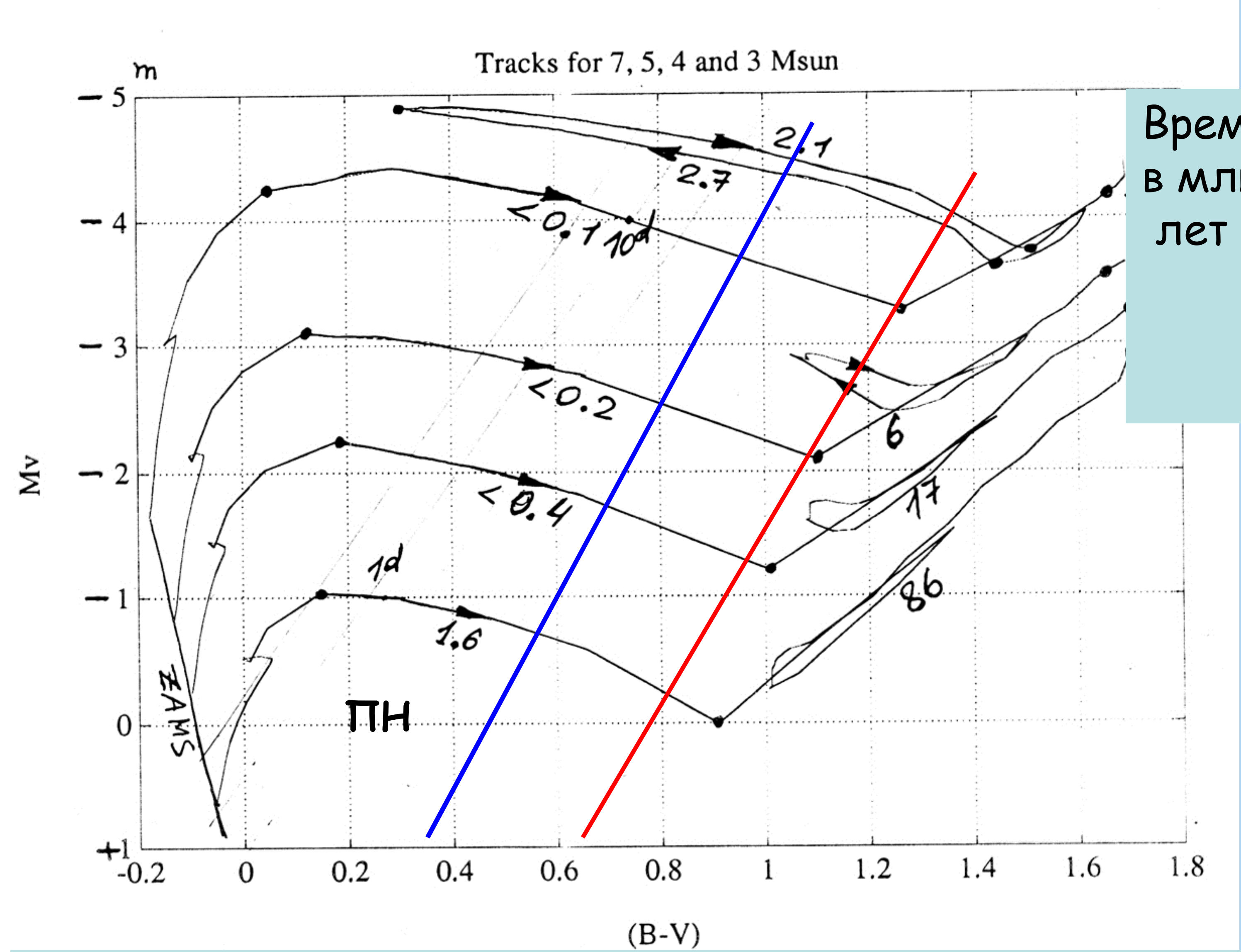


Оболочка вокруг δ Cep: ИК и радио
Обдувание встречным “ветром”

- **Цефеиды как тест теории эволюции массивных звёзд**

- Характерная продолжительность стадий цефеид - от сотен до десятков тыс. лет (в зависимости от массы звезды)
- Это очень короткий промежуток времени по сравнению с их временем жизни на ГП, поэтому их известно мало
- Эволюционируя, цефеида меняет свою структуру (радиус, температуру, плотность) и **ПЕРИОД ПУЛЬСАЦИЙ**

Быстрая эволюция В-звёзд после ГП



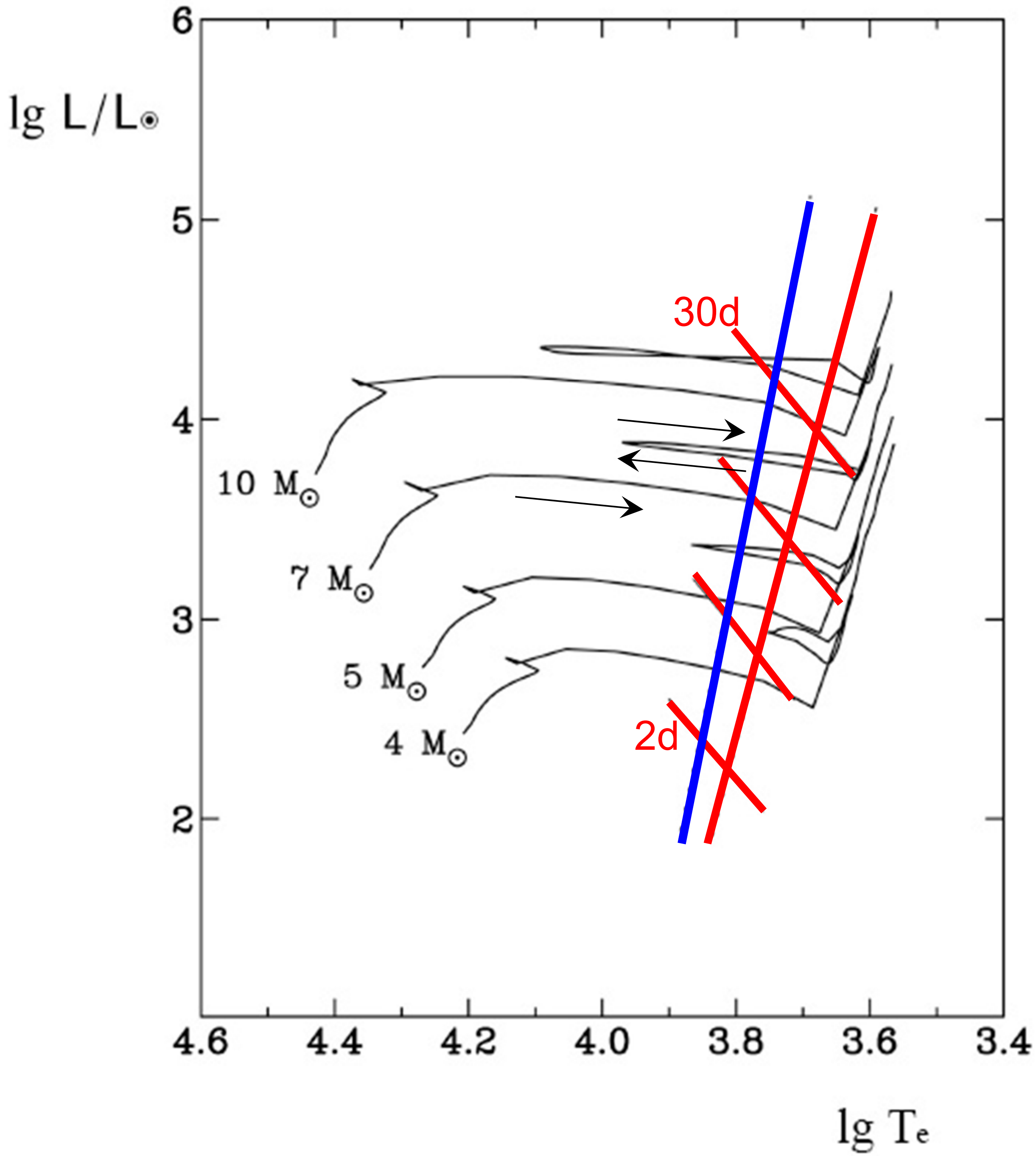
Время в млн. лет

Часть времени звезда проводит в ПН – цефеида !

- Полоса нестабильности, **линии постоянных периодов** и эволюционные треки на ГР

- При движении вправо период цефеиды растёт, влево – уменьшается

- Увеличения сменяются уменьшениями, и наоборот



- **Насколько хорош ход космического “хронометра” ?**

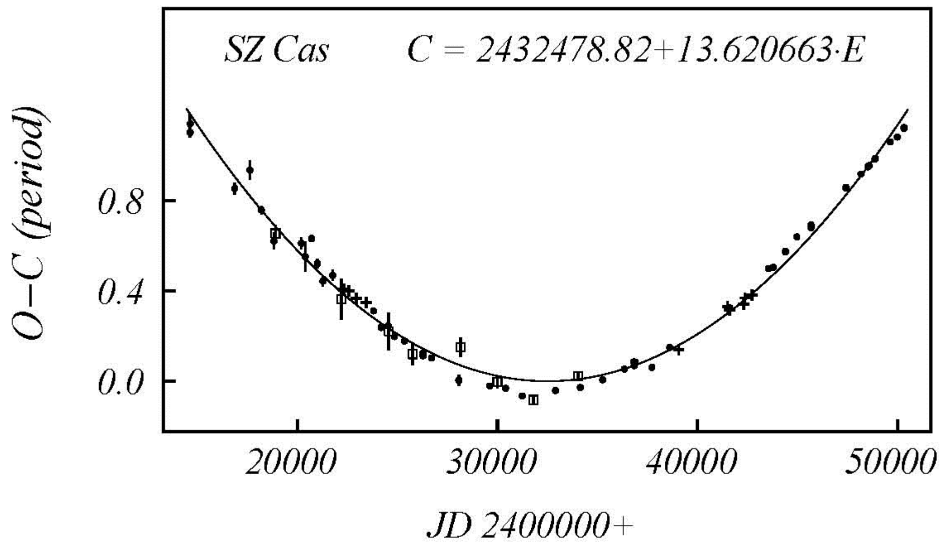
- Периоды цефеид зачастую известны с относительной точностью ±0.000001, но… они, как и часы, могут всё время отставать или торопиться

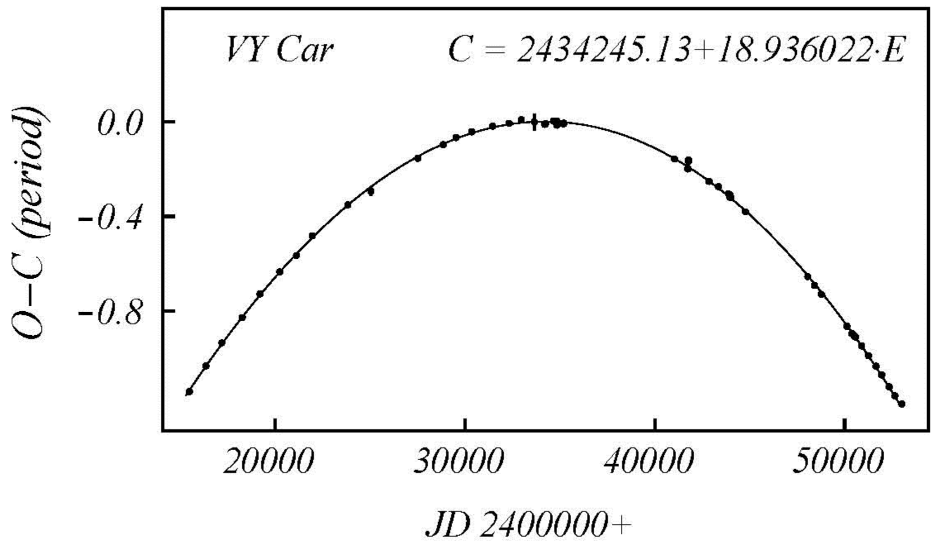
- Определяют ход “часов”, сравнивая наблюдаемые моменты максимума блеска **(O – observed)** с моментами **(C – calculated)**, предсказанными в предположении постоянства периода

- Линейный рост или уменьшение периода: параболическое поведение разностей **(O – C)**

Диаграмма O-C (разность между наблюдаемым и предвычисленным моментами максимума) позволяет оценивать скорость изменения периода

При многолетнем (от десятков до сотни лет) мониторинге удаётся выявить параболические O-C, свидетельствующие об эволюционном росте или уменьшении периода и направлении эволюции



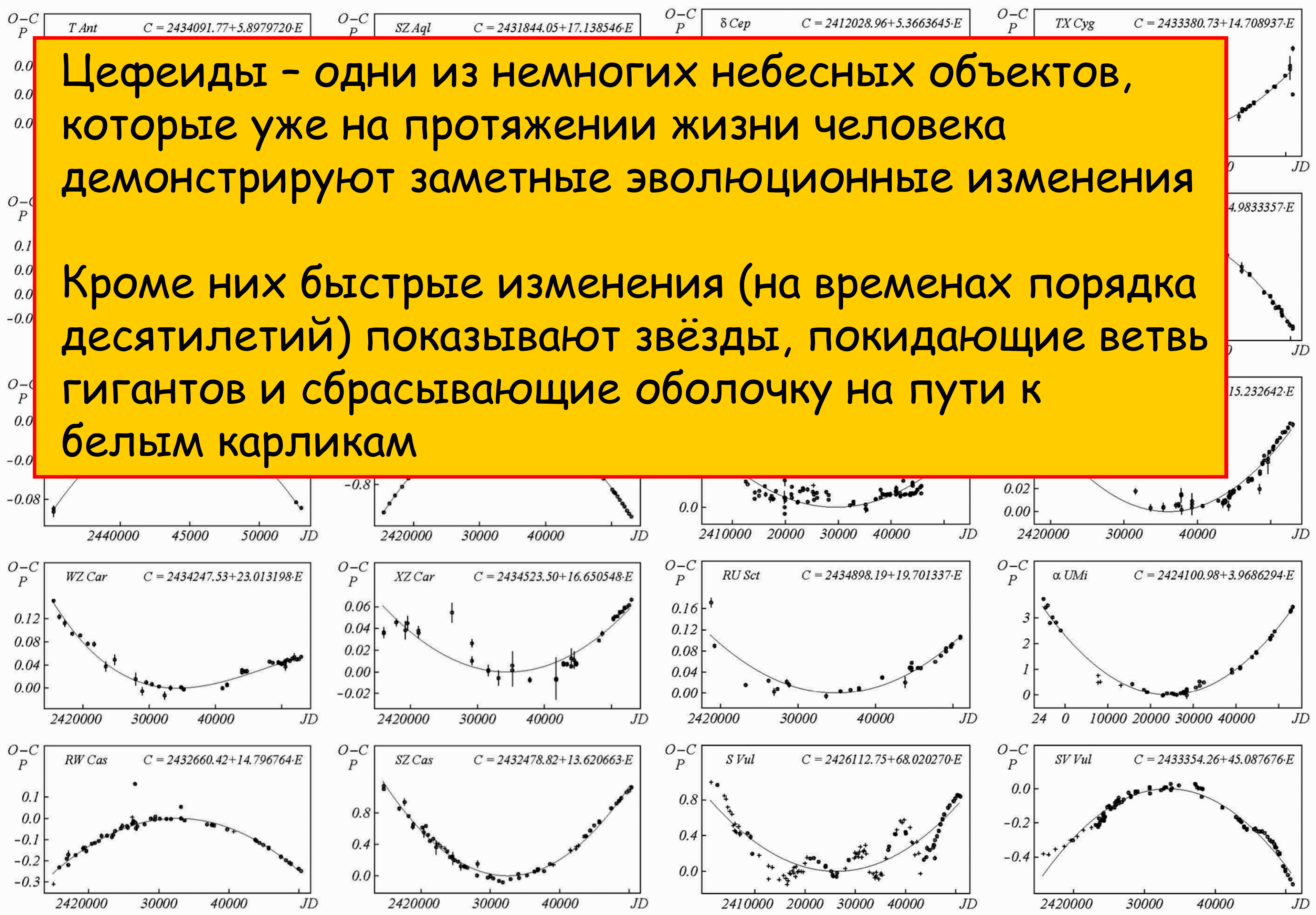


Нечётное пересечение ПН
Период растёт

Чётное пересечение ПН
Период убывает

Цефеиды – одни из немногих небесных объектов, которые уже на протяжении жизни человека демонстрируют заметные эволюционные изменения

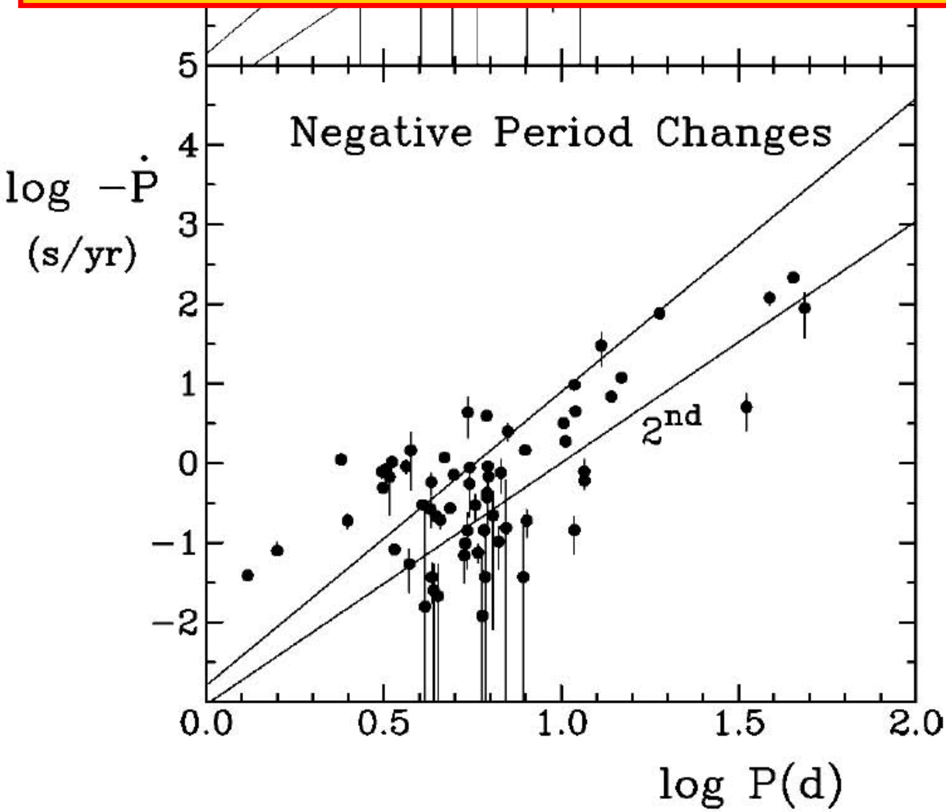
Кроме них быстрые изменения (на временах порядка десятилетий) показывают звёзды, покидающие ветвь гигантов и сбрасывающие оболочку на пути к белым карликам



- Кроме того, один и тот же период пульсаций могут иметь звёзды разных масс (и светимостей), находящиеся на разных пересечениях полосы нестабильности.
- Это, очевидно, дополнительный фактор рассеяния фундаментальной зависимости Период – Светимость – Цвет для классических цефеид.

Цефеиды – одни из немногих небесных объектов, которые на протяжении жизни человека демонстрируют эволюционные изменения

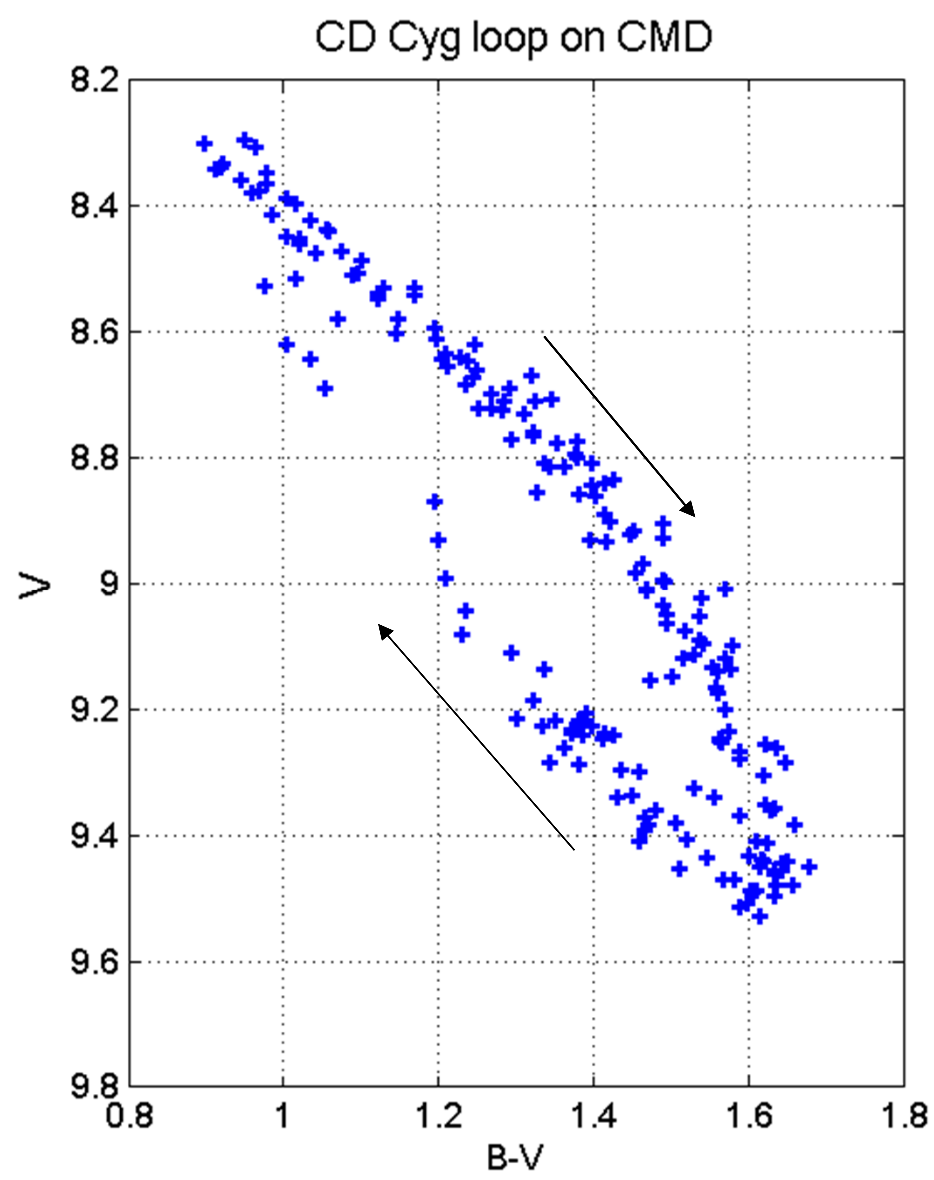
Кроме них быстрые изменения показывают звёзды, покидающие ветвь гигантов и сбрасывающие оболочку на пути к белым карликам



пересечения полосы нестабильности и её эволюционное положение

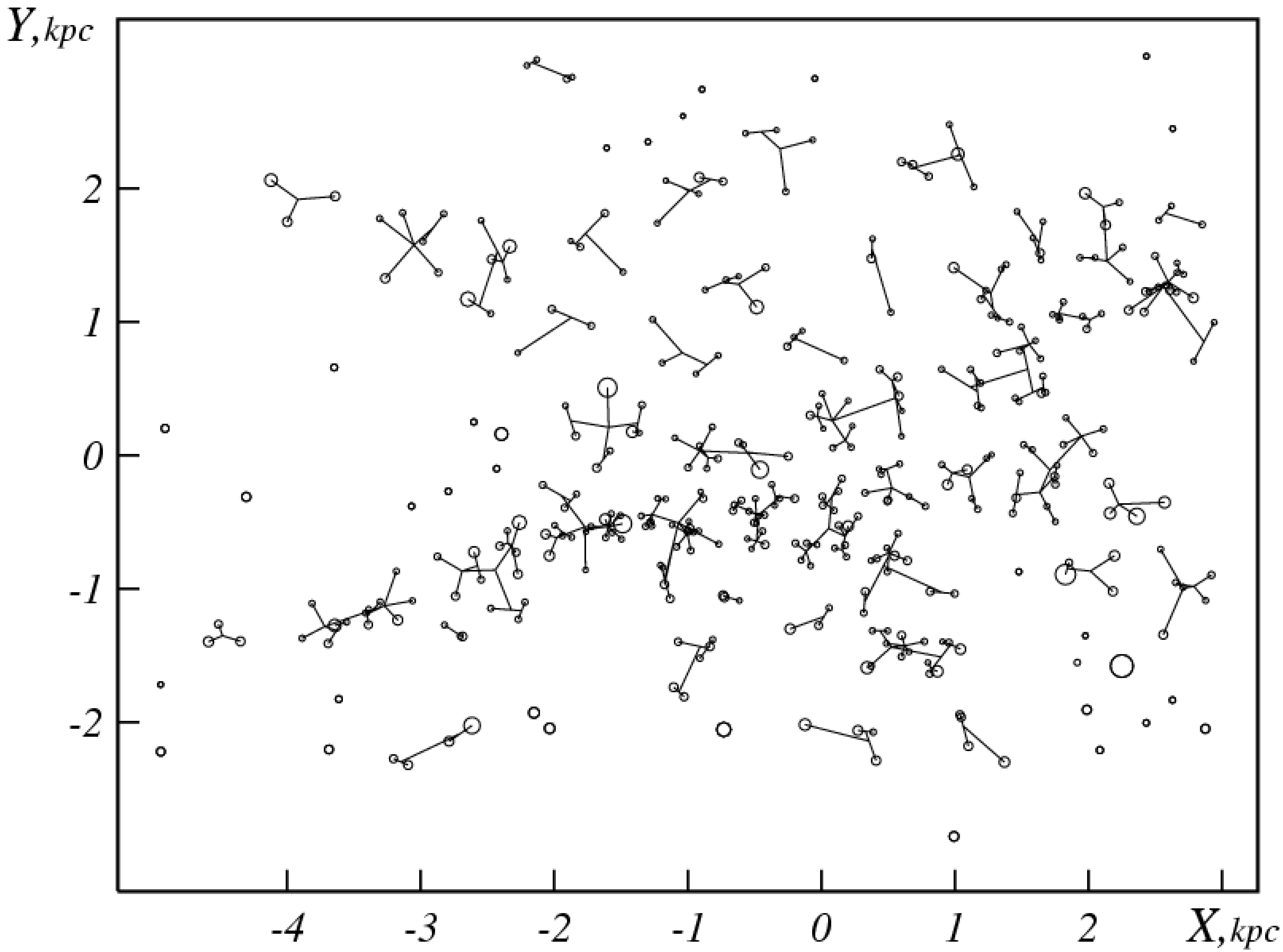
- Цефеида CD Лебедя на диаграмме ГР: петля

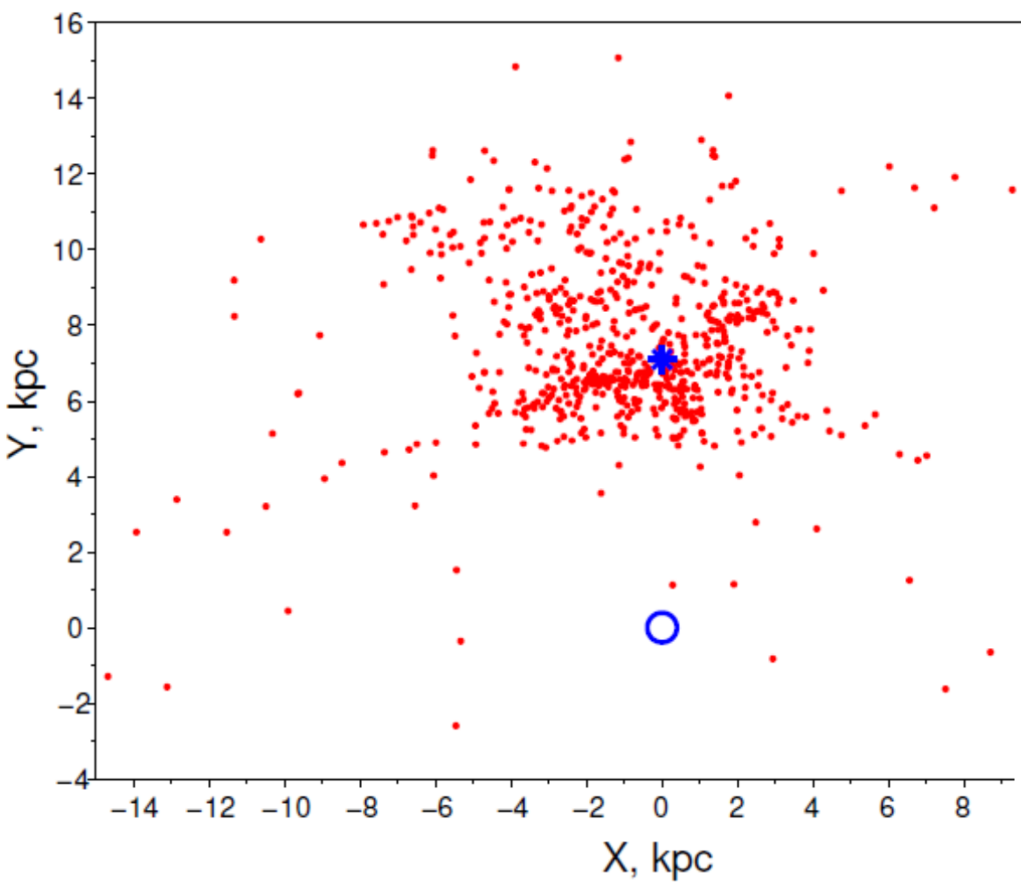
- Одна-единственная цефеида, наблюдаемая в разных фазах, пульсационного цикла “заменяет” **множество звёзд разного блеска и цвета**, но с одинаковым химсоставом и массой
- Идеальный объект для изучения населений галактик!

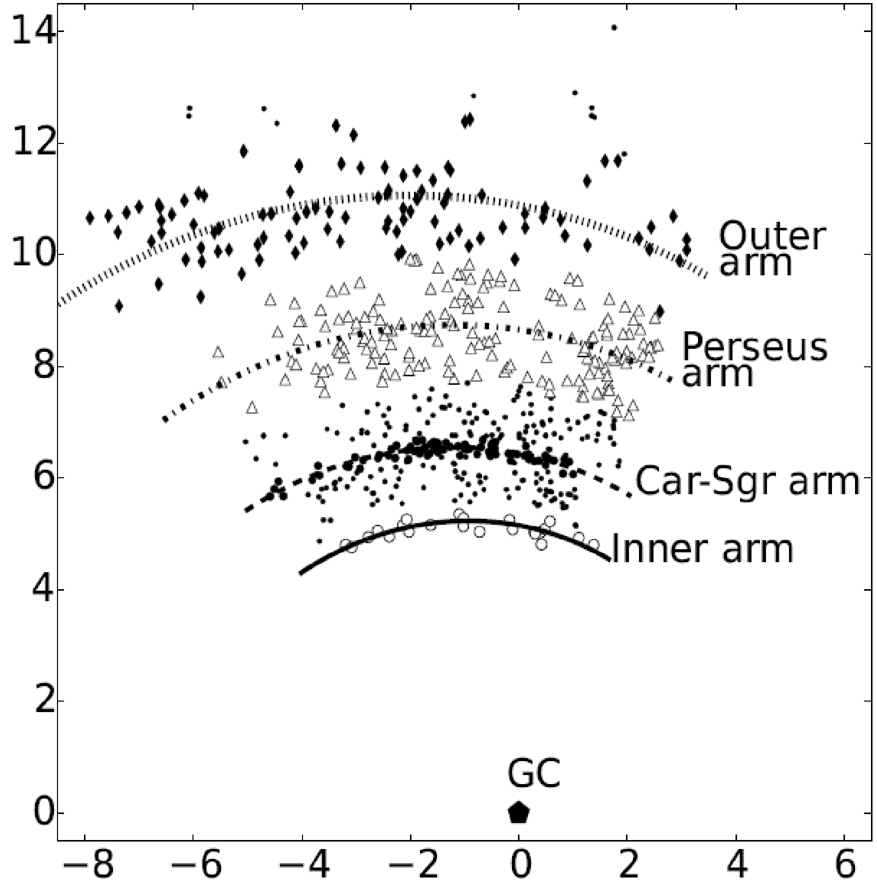


- **Распределение цефеид в Млечном Пути, вращение Галактики и её спиральный узор**
- Изучению строения диска Млечного Пути сильно мешает межзвёздное поглощение света (к центру Галактики – до 20-30^m, т.е. до 100 млн. раз !)

Группировки цефеид в Млечном Пути
0.7 - 1 кпк: характерный размер звёздных комплексов

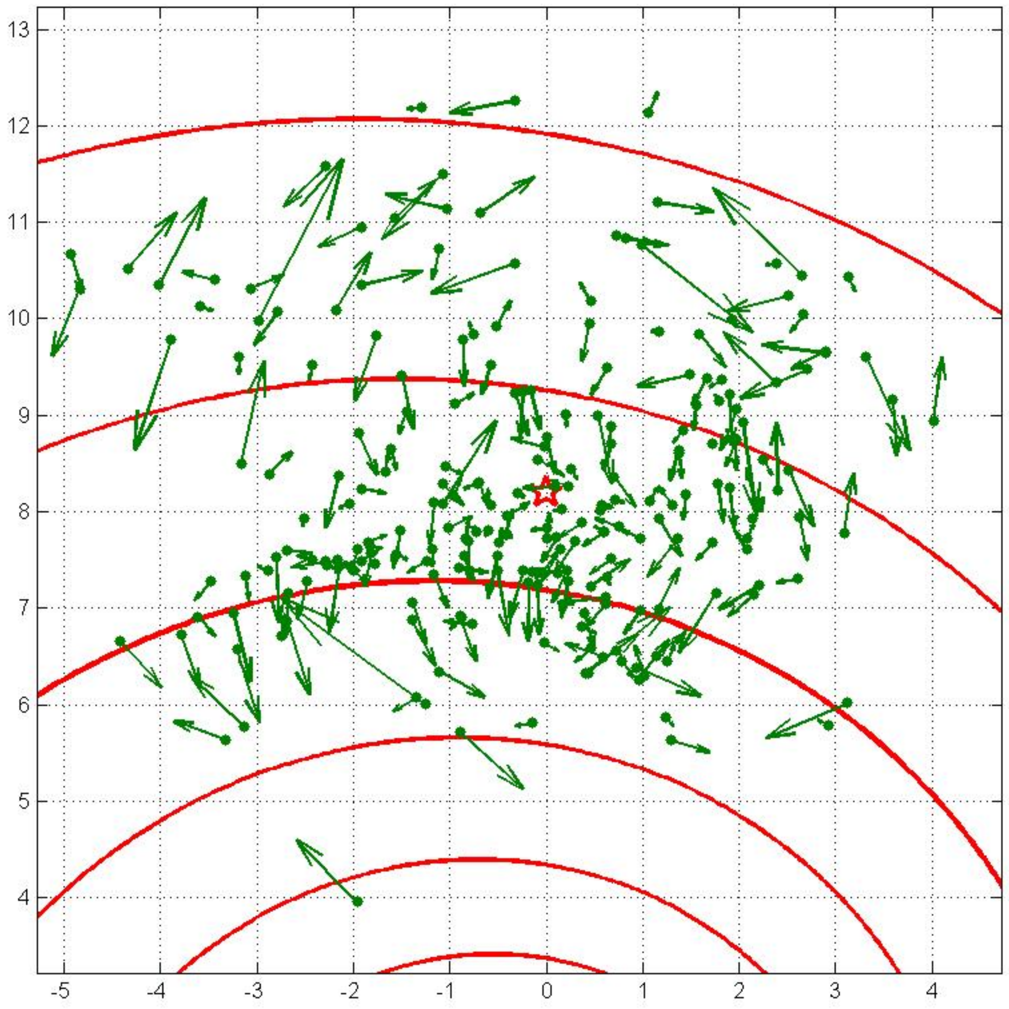






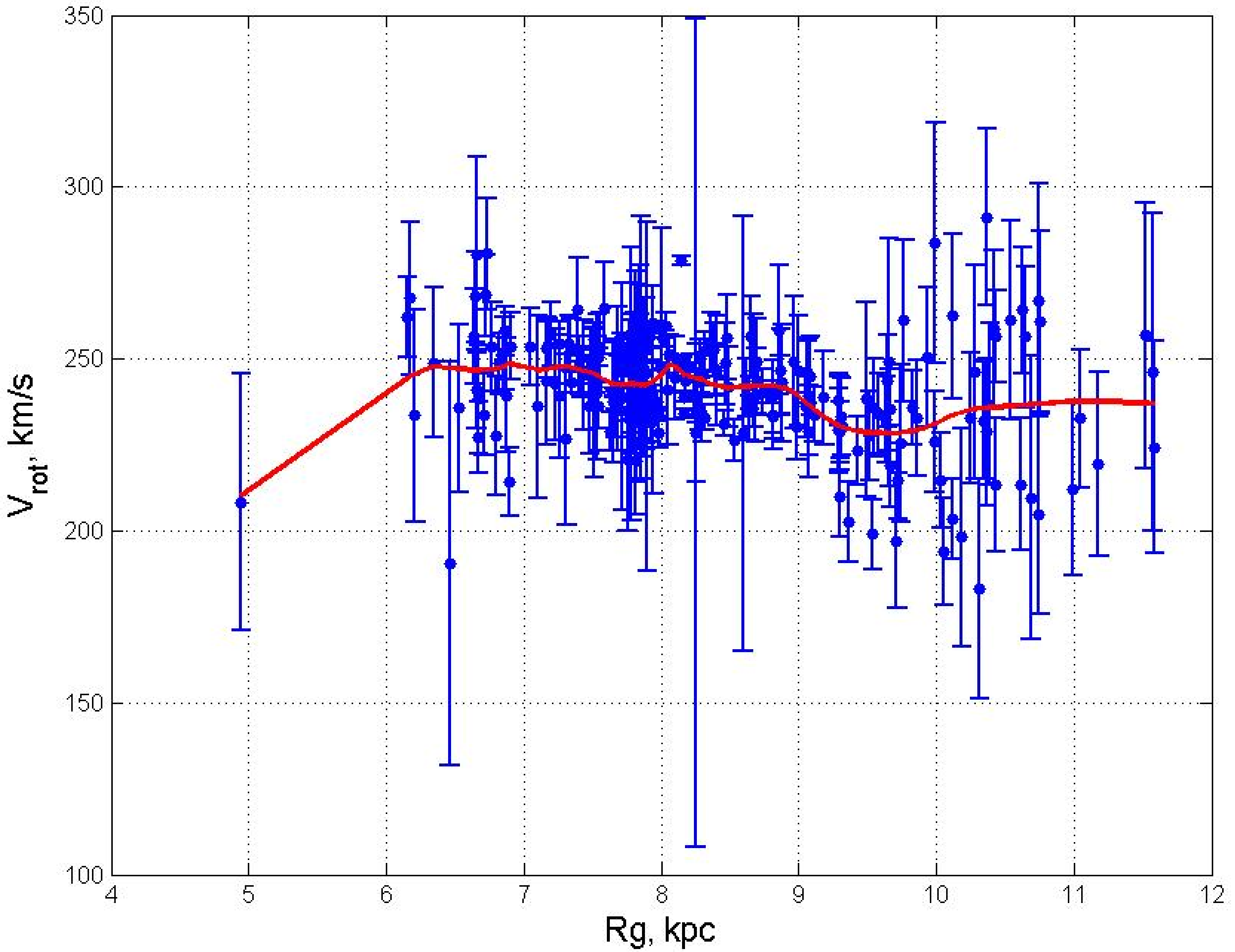
- 700 цефеид Млечного Пути и фрагмент 4-рукавного спирального узора
- (Дамбис и др., 2015)

- **Лучше изучать движение цефеид !**
- Спиральный 4-рукавный узор Млечного Пути, рассчитанный по скоростям цефеид
- Угол закрутки ~ 9°, Солнце между рукавами Киля-Стрельца и Персея



Возмущения радиальной скорости ~ 6 км/с

- Скорость вращения диска Млечного Пути по данным о цефеидам
- $V_{rot} \approx 242 \pm 10$ км/с



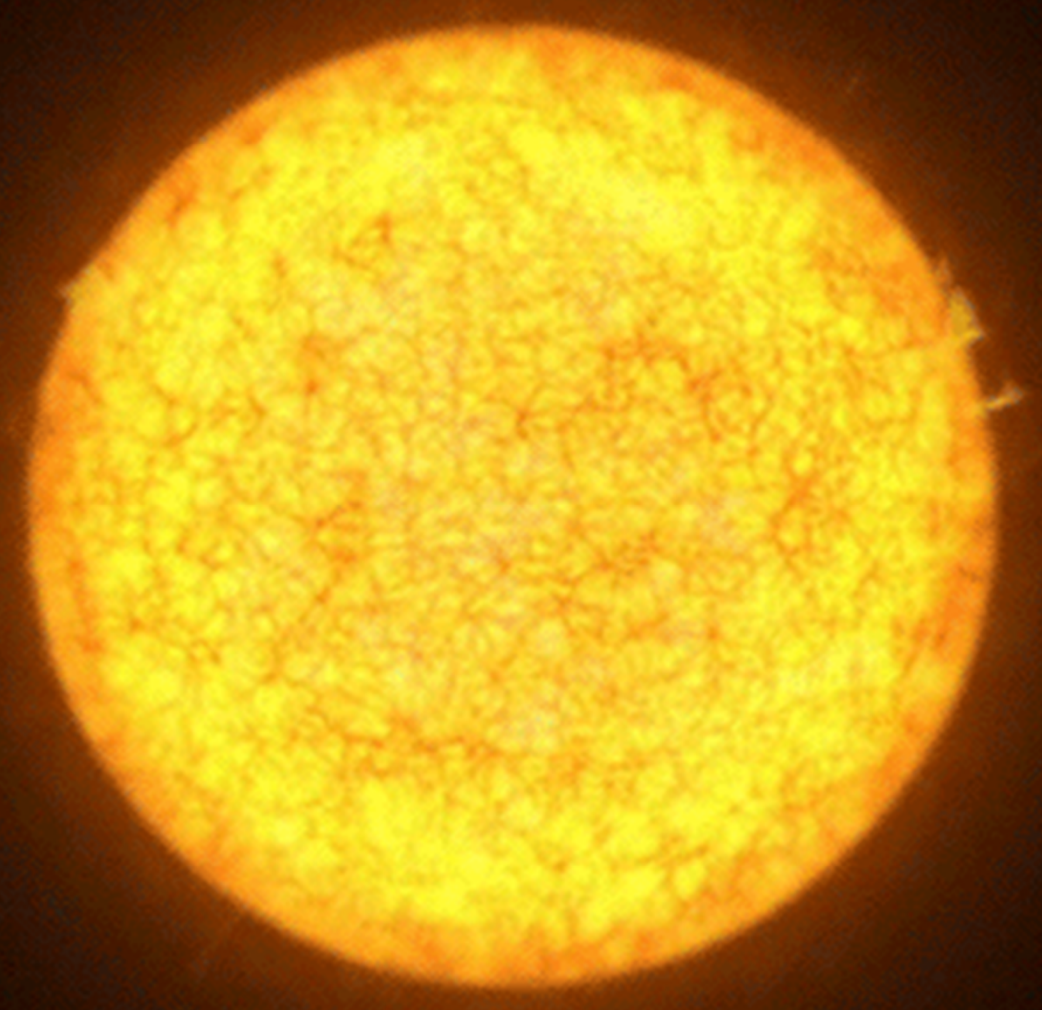
Масса Галактики в пределах 12 кпк от центра:

~150 млрд. масс Солнца

- **Проблемы:**
- Требует ли уточнения зависимость "период - светимость" для цефеид Млечного Пути (ошибки в моде пульсаций) ?
- Есть ли излом на этой зависимости ?
- Одинаковы ли цефеиды в разных галактиках - можно ли к ним применять единую зависимость "период - светимость" ? (Различия химсостава)
- Требует ли универсальная шкала расстояний сокращения или удлинения ?

Современная эволюционная теория глазами наблюдателя и теоретика

Спасибо за внимание !



WEB: http://lnfm1.sai.msu.ru/~rastor