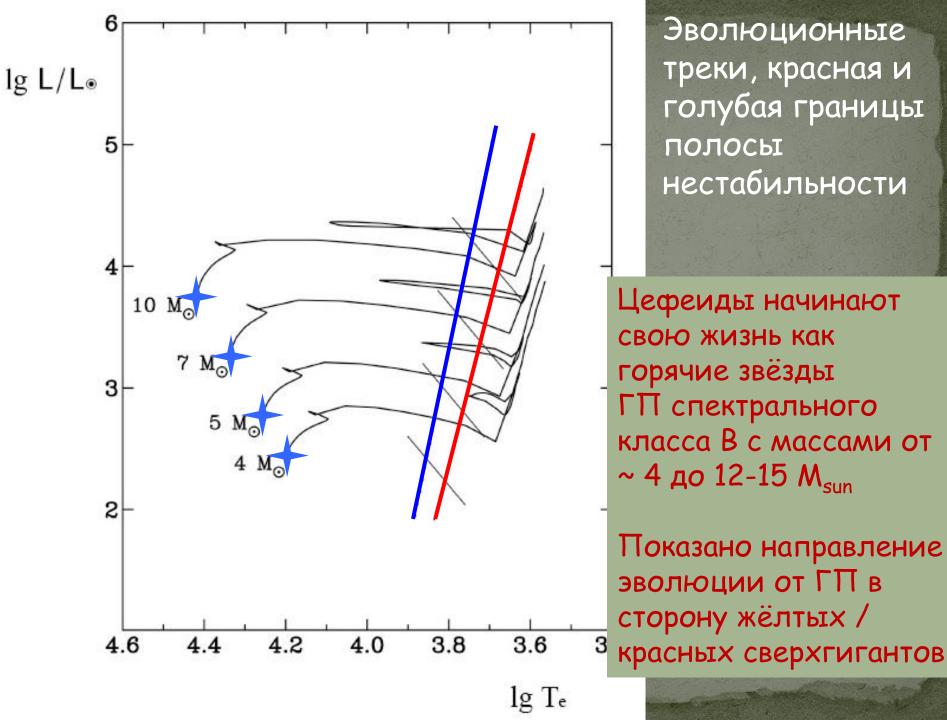
Светимости и избытки цвета цефеид Галактики по мультифазным данным об их эффективных температурах

Пульсационные радиусы, избытки цвета и калибровки эффективных температур сверхгигантов

A.C.Расторгуев 1,2 , $M.В.Заболотских<math>^{1}$, 9.A.Лазовик 2 , T.A.Сячина 2

1 - ГАИШ МГУ, 2 - Физфак МГУ

Июнь 14, 2017, Екатеринбург, УрФУ. "Современная звёздная астрономия - 2017"



- Использование цефеид в качестве "стандартных свечей: зависимость "период светимость" закон Ливитт (1912):
- Для цефеид Млечного Пути она калибруется:
 - По тригонометрическим параллаксам цефеид (HST, HIPPARCOS - пока очень немногочисленным)
 - По 9-10 цефеидам уверенным членам молодых рассеянных скоплений с расстояниями, определёнными методом совмещения ГП с теоретическими изохронами
 - По расчётам радиусов и светимостей цефеид методами BBW с цветовыми калибровками $T_{\rm eff}$ и BC
 - Существуют проблемы с учётом покраснения

Новая идея:

Использовать мультифазные спектроскопические измерения эффективных температур цефеид совместно с определениями их пульсационных радиусов методами BBWB для оценки оптической и болометрической светимости (закон Стефана-Больцмана):

 $L_{bol}(t) \sim 4\pi\sigma R(t)^2 T_{eff}(t)^4$

T_{eff} содержит важнейшую дополнительную информацию о цефеидах, впервые используемую в нашей работе

Спектральный наблюдательный материал

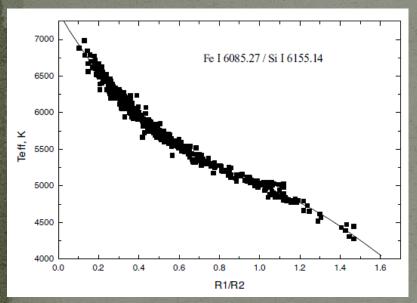
- Luck & Andrievsky (AJ, 128, 343, 2004); Kovtyukh et al. (AJ, 129, 433, 2005); Andrievsky et al. (AJ, 130, 1880, 2005); Luck et al. (AJ, 136, 98, 2008);
 - Эшельные спектры с 2.1-м рефлектора Struve обсерватории McDonald (R~60000, S/N > 100)
 - Спектры архивов ELODIE (Haute-Provence), CORALIE (ESO) (R ~ 42000)

• Дополнительно:

- Лучевые скорости из баз данных ИЛС (1987-2016) и Fernie (McMaster University, Canada 1995+) http://crocus.physics.mcmaster.ca/Cepheid/
- BV- фотометрия из базы данных Л.Н. Бердникова

Методика

- Определение температур:
 - LDR (Line Depth Ratio Kovtyukh & Gorlova, A&A, 358, 587, 2000; Kovtyukh, MNRAS, 378, 617, 2007) калибровки отношения глубин до 130 (!) пар линий



Пример: отношение I_{low} / I_{high} vs T_{eff}

Важно: эффекты уширения близких по частоте линий не влияют на отношения их глубин!

- Определение lg g, [Fe/H], Vt:
 - Модели атмосфер Kurucz (код WIDTH9 / сетка моделей ATLAS9)
 - 33 цефеиды с опубликованными измерениями T_{eff}

Определение пульсационных радиусов цефеид

- Метод моделирования кривой блеска (нелинейность калибровок Т_{еff} и ВС: Сачков, Расторгуев 1998; Сачков 2002; Осташова 2015)
- $V = -5 \lg \frac{\langle R \rangle + r(t)}{R_0} + \sum_{k=0}^{N} A_k (B V)^k, \quad N > 2$

К-ты $\{A_k\}$ содержат (неизвлекаемую) информацию о калибровках T_{eff} и BC (V) по нормальному цвету звёзд $(B-V)_0$ и избытке цвета E(B-V).

- Преимущества: в отличие от метода поверхностной яркости (Barnes & Evans 1976), никакие калибровки для определения *Р (T)* не требуются; только величина
- PF (P) = -dR/dt / V, (Projection Factor)

При вычислении r (t) SZ 3.1488555 Tau для перевода Vr в dR/dt RT 3.7282359 Aur SU 3.84562 Cyg использовалась зависимость 4.3237573 Vul 4.4354306 Projection Factor (PF) vs Ig P 4.470911 * FF Agl (Nardetto et al. 2007) Delta Cep 5.366247 5.7734014 Sgr PF(P) = 1.376 - 0.064 lg PVul 6.3195390 6.7453107 Sgr 7.176845 Agl eta W Sgr 7.595 CD Cyg (метод S&R, N=8) RX 7.9121815 Cam 7.9136042 W Gem σ_{Vr} = 1.14 $\sigma_{ci} = 0.0287$ Vul 7.99080 $V_{v} = -12.56$ $Vr-V_{\gamma}$ & dr/dt Color curve & approx. Sge 8.38205 50 V500 Sco 9.3168051 **Solor Index** YZ 9.5537719 VX 10.8856891 N = 8Lac 10.885712 Z 11.6240569 RX 13.75551 TT -50 Mon 15.234933 SV 0.2 0.4 0.6 8.0 0.2 0.4 0.6 8.0 <R>/R₀=89.36±1.6 X 16.38633 $\sigma_{v} = 0.035$ Radius change curve **BBWB** RW Cam 16.41726 20 Cyg 17.0737016 CD Sgr 21.85050 WZ R/R_{Sun} Magnitude 25.96529 Mon 27.0334456 -1035.564691 SV 44.969 -20 68.4765 0.2 0.4 0.6 0.8 0 0.2 0.4 0.6 0.8 0

SU

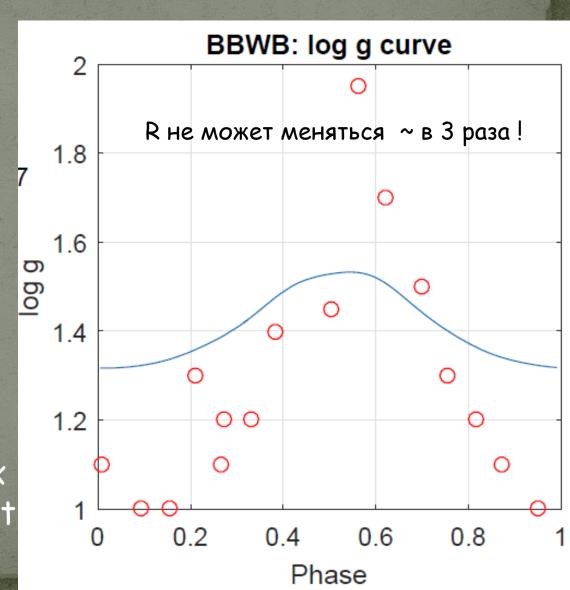
1.94951

CD Cyg

- Сравнение измеренных (о) и вычисленных нами по изменениям радиуса (линия)
- R: $79 99 R_0$ ($\Delta \log g \sim 0.2$)

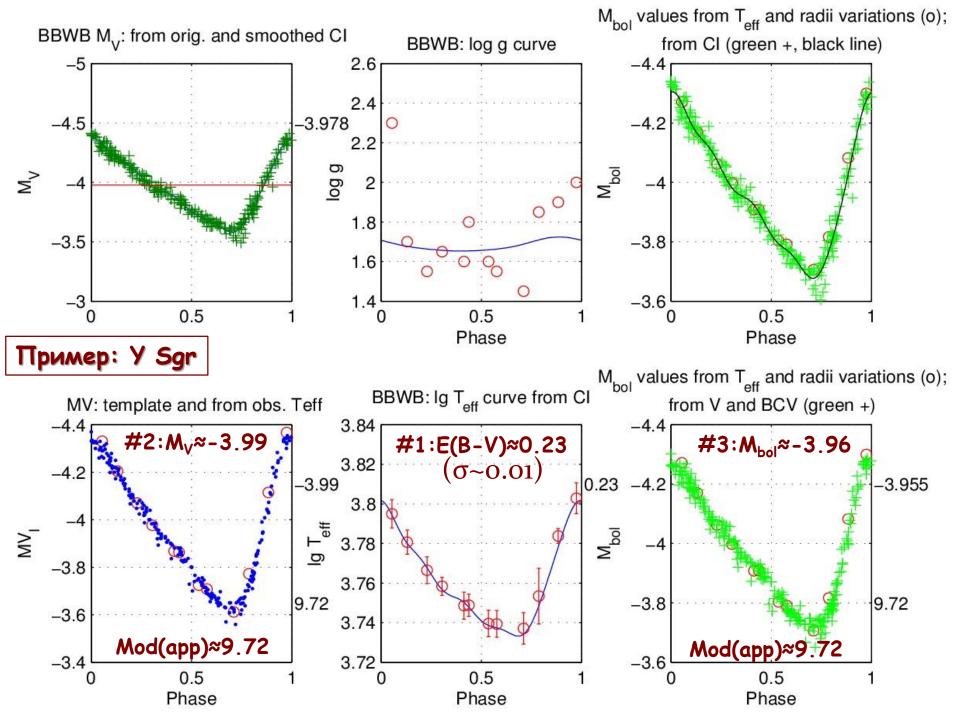
значений lg g

• Большие различия значений Ig g: не вполне корректная декомпозиция профиля Фойгта в оригинальных работах Andrievsky, Kovtyukh et al.



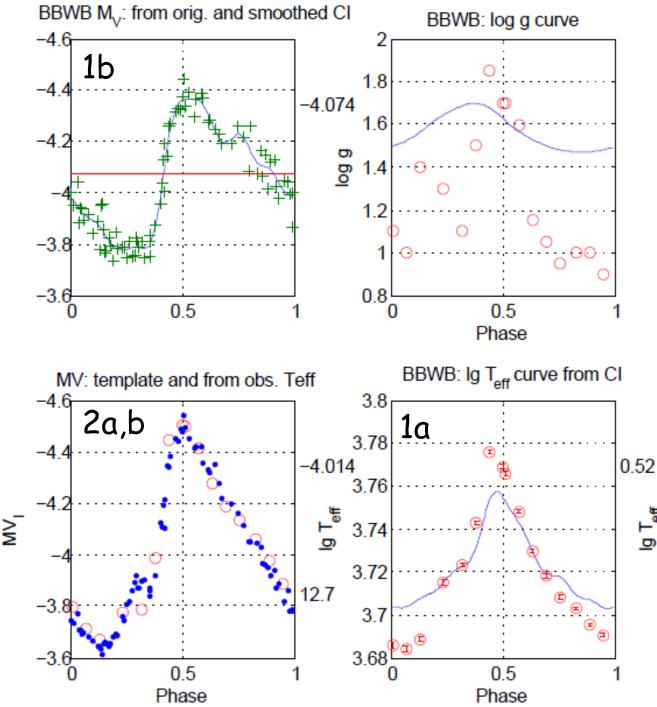
Алгоритм анализа данных

- 1) Находим избыток E(B-V), обеспечивающий наилучшее совпадение измеренных $T_{\rm eff}$ с кривой $T_{\rm eff}$, рассчитанной по нормальному цвету $(B-V)_0$ с калибровками Flower (1996) / Bessel et al. (1998)
- 2) По T_{eff} , BC(V) и R(t) рассчитываем кривую M_V и определяем среднюю светимость и Mod(app)
- 3) По измеренным значениям Т_{еff} и R(t) рассчитываем значения М_{ьог}. По E(B-V), кривой блеска V и BC(V) строим "шаблон" болометрической кривой блеска т_{ьог}, оцениваем Mod(app)
- Калибровки Teff, BC(V):
- Flower (1996); Bessel, Castelli, Plez (1998)

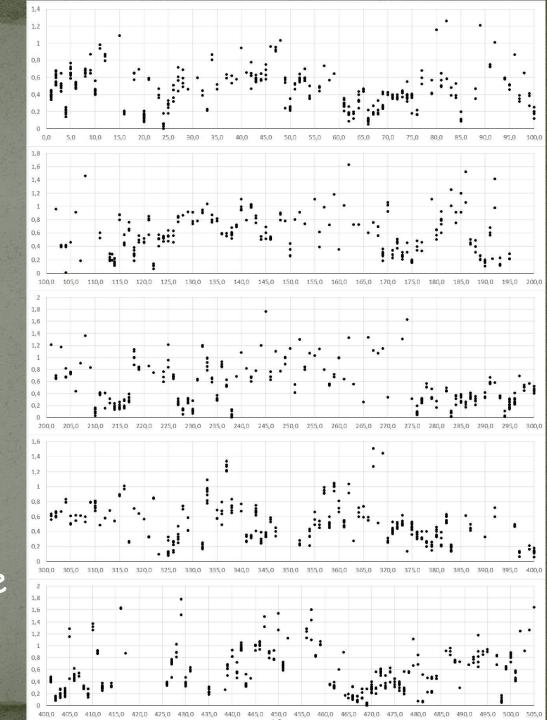


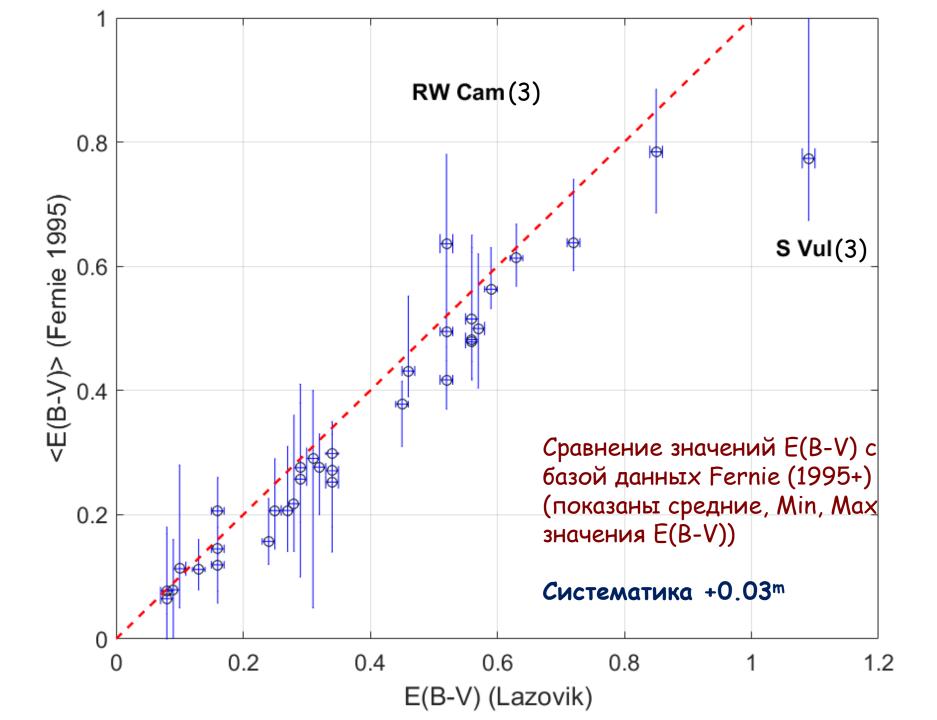
- RW Cam
- E(B-V) ?
- <Mv>_ 7
- 1а: Пример плохого согласия с Теff, определённой по цвету: малая амплитуда кривой цвета Причина:

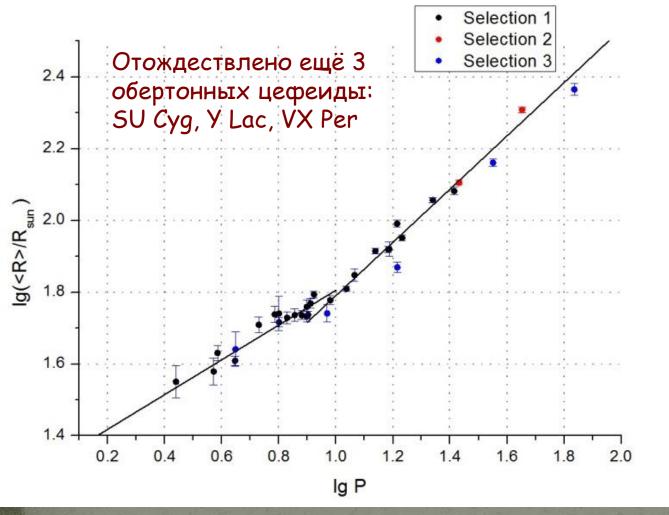
спектральная двойственность спутник (В8 III) ^{-3.}



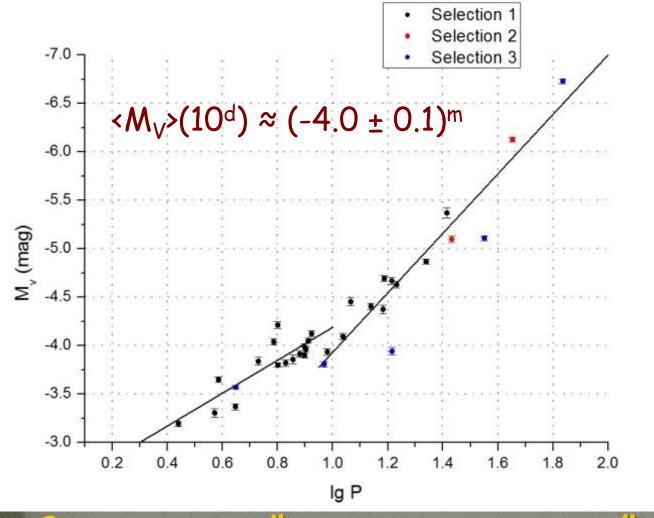
- Значения избытков цвета E(B-V) 505 цефеид Галактики (Fernie 1995+)
- Число источников данных - до 20
- Ошибка формальных "средних" значений ~0.01-0.03^m, типичное рассеяние до ~0.2-0.3^m







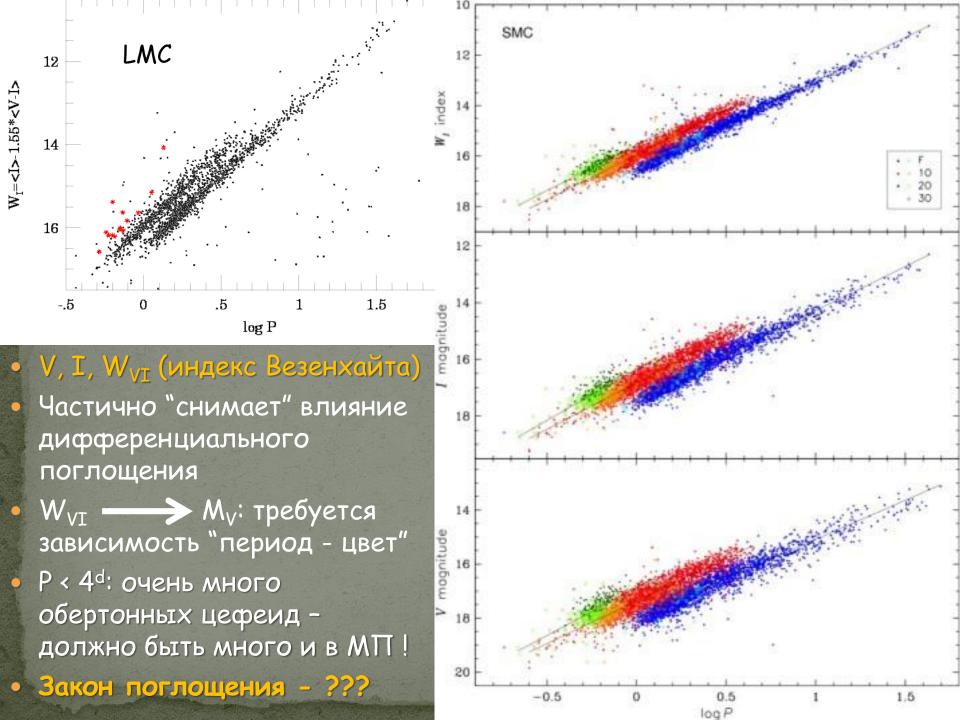
- Зависимость "период-радиус" с изломом:
- $\lg R = (0.49 \pm 0.05) \cdot \lg P + (1.32 \pm 0.04)$, $\lg P < 0.95$;
- $\lg R = (0.74 \pm 0.03) \cdot \lg P + (1.05 \pm 0.04)$, $\lg P > 0.95$;
- $\chi^2 \approx 136$ (по сравнению с $\chi^2 \approx 376$ без излома)

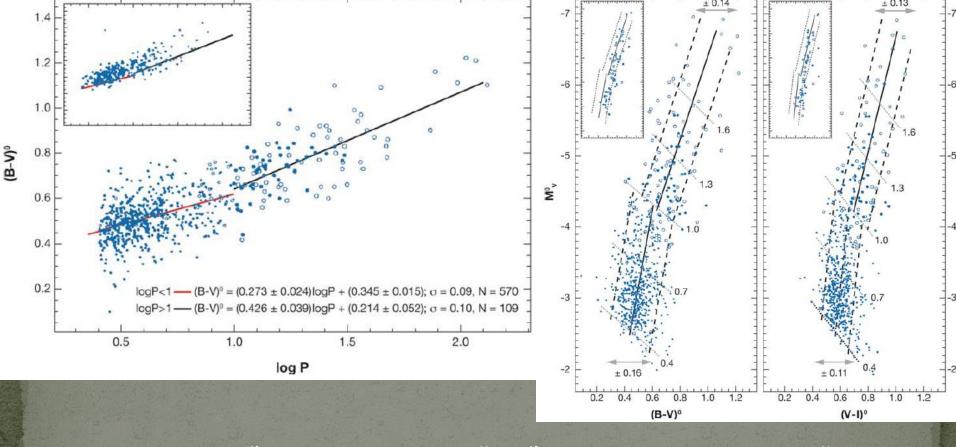


Мало звёзд!

Неидентифицированные обертонные с Р < 9^d ?

- Зависимость "период-светимость" с изломом:
- $M_V = -(3.06 \pm 0.25) \cdot \lg P (0.95 \pm 0.33), \lg P > 0.95;$
- $M_V = -(1.64 \pm 0.24) \cdot \lg P (2.61 \pm 0.19), \lg P < 0.95;$
- _{χ²} ≈ 513 (по сравнению с χ² ≈ 886 без излома)





- Зависимости "период цвет" и "цвет светимость" для цефеид БМО и Галактике (на врезках) с изломом вблизи P = 10^d (Sandage, Tammann 2006).
- Реальное указание на различия двух групп цефеид.

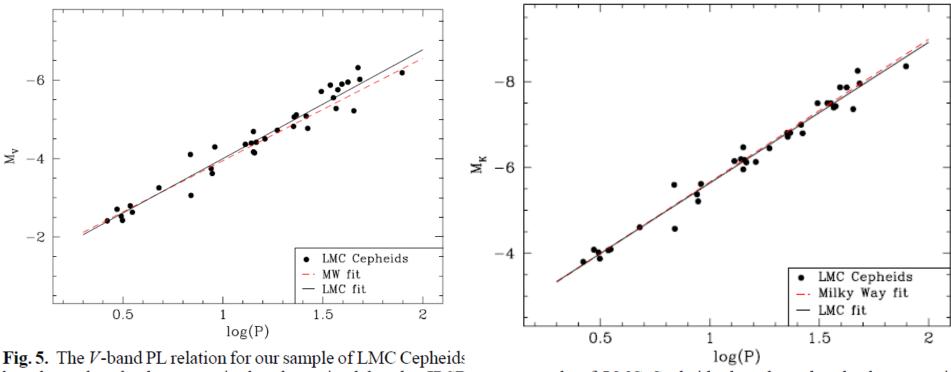
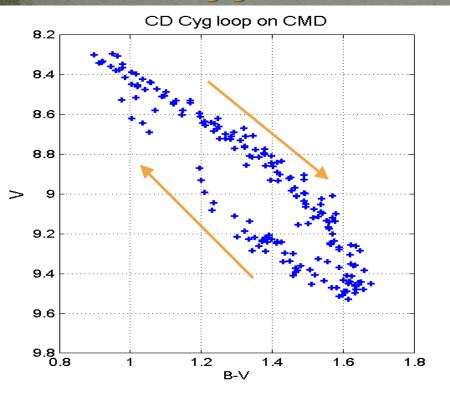


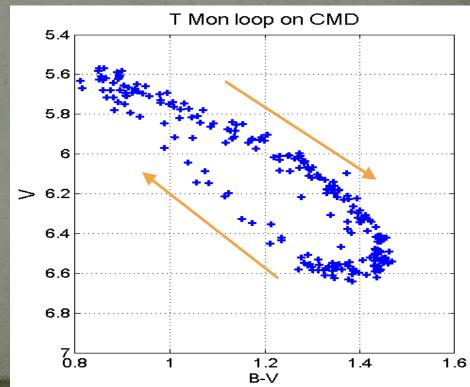
Fig. 5. The *V*-band PL relation for our sample of LMC Cepheids based on the absolute magnitudes determined by the IRSB method. Overplotted is the linear regression fit (solid line) as well as the corresponding Milky Way relation (dashed line).

our sample of LMC Cepheids, based on the absolute magnitudes determined by the IRSB method as calibrated in Paper I. Overplotted is the linear regression fit (solid line) as well as the corresponding Milky Way relation (dashed line).

- Storm et al. (2011): метод IR BBW (Barnes, Evans 1976)
- Стандартная некорректность: используется вариант
 метода BBW (IRSB поверхностной яркости в ИК), но при
 этом лучевые скорости берутся из оптической
 спектроскопии, 390 650 nm. Пульсации разных по
 радиусу слоёв !!!

- В чём ценность цефеид: даже единственная цефеида на диаграмме ГР ведёт себя как популяция звёзд с разными цветами, величинами, но с одинаковыми массами, избытками цвета, расстояниями и [Fe/H] и почти одинаковыми значениями lg g
- Попробуем на этой основе уточнить цветовые калибровки эффективной температуры, используя значения Теff во всех фазах 32 цефеид, вычисленные значения [Fe/H]





• Исходная калибровка - ВСР98

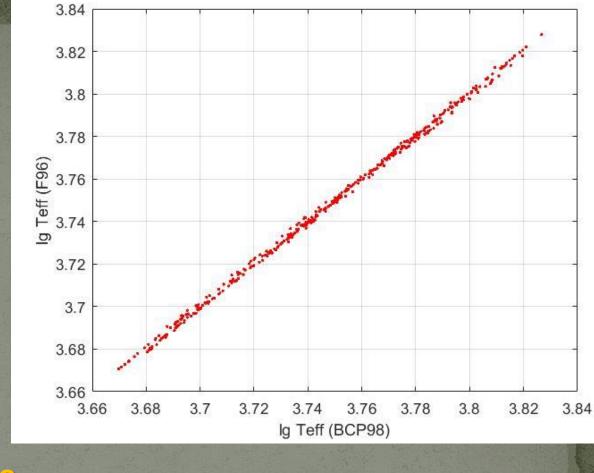
```
\begin{aligned} & \textbf{lg T}_{\text{eff}} = 3.88 \ (\pm 0.01) - 0.20 \ (\pm 0.0180)^* (B-V)_o \ + \\ & + 0.026 \ (\pm 0.008)^* (B-V)_o^2 + 0.009 \ (\pm 0.004)^* \\ & + 0.010 \ (\pm 0.006)^* (B-V)_o^* \\ & \textbf{lgg - 0.0051} \ (\pm 0.017)^* \\ & \textbf{Fe/H} \\ & + 0.051 \ (\pm 0.022)^* (B-V)_o^* \\ & \textbf{Fe/H} \\ \end{aligned}
```

Исходная калибровка - F96

```
• \lg T_{eff} = 3.87 (\pm 0.01) - 0.20 (\pm 0.018)*(B-V)_{o} + 0.026 (\pm 0.008)*(B-V)_{o}^{2} + 0.013 (\pm 0.004)*lgg - 0.010 (\pm 0.006)*(B-V)_{o}*lgg - 0.031 (\pm 0.017)*[Fe/H] + 0.030 (\pm 0.023)*(B-V)_{o}*[Fe/H]
• std = 0.0047 (\sigma_{T} / T \sim 1.1\%)
```

- Сравнение новых (уточнённых) калибровок Flower (1996) и Bessel, Castelli, Plez (1998)
- Новая калибровка
 Т_{eff} (B-V)₀ для
 цефеид открывает
 возможность оценки
 избытка цвета даже по

немногочисленным спектроскопическим измерениям $T_{\rm eff}$!



[Fe/H] - из наблюдений lg g - по трекам / изохронам

Выводы:

- 1) Найдены избытки цвета E(B-V) 32 цефеид со спектроско-пическими определениями Т_{еff}. Они примерно на 0.03^m выше формальных "средних" значений по базе данных Fernie (1995+)
- 2) Найдено 3 новых обертонных цефеиды,
- 3) Зависимости "период-радиус" и "период-светимость" в интервале периодов от 2.7 до 68 суток заметно лучше описываются двумя прямыми с изломом вблизи Р = 9-10^d
- 4) Светимость цефеид Галактики с Р < 9-10^d, возможно, относительно выше, чем по единой "линейной" зависимости, что согласуется с результатами метода статистических параллаксов (Заболотских и др. 2002, 2017) о необходимости относительного удлинения шкалы расстояний короткопериодической группы цефеид на ~5-15%.

- 5) Цефеиды короткопериодической группы: преимущественно 1-е пересечение ПН, долгопериодической 2-е и 3-е пересечение ПН.
- Разная физика? Влияние слоя ионизации водорода? Теоретические нелинейные расчёты пульсаций показывают, что цефеиды с периодами менее 5-6 сут. не могут пульсировать в основном тоне (Фокин 2012)!
- 6) В проблемах Галактичемких цефеид пока что вопросов больше, чем надёжных результатов. Особенно серьёзен вопрос о вариациях закона поглощения.
- 7) Нужно определять лучевые скорости цефеид в тех же фотометрических диапазонах спектра
- 8) GAIA всё решит?

Благодарим за внимание!

