

# Химически пекулярные Ar/Br звёзды на ранних стадиях эволюции.

И.С. Потравнов



ИСЗФ СО РАН  
ilya.astro@gmail.com

Конференция "Физика звёзд: теория и наблюдения",  
ГАИШ МГУ

27.06.2023

# Химически пекулярные звёзды

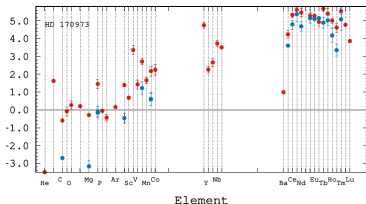
○ ~ 15% sp:A-B звёзд на ГП - с пекулярными спектрами.

- Аномалии хим.состава в области формирования линий
- В среднем по массе - нормальный состав!

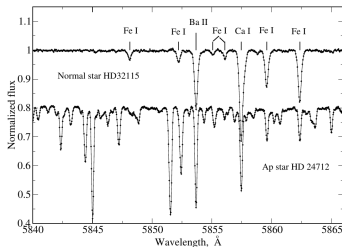
○ Ar/Vr, He-req. - звёзды:

- Избытки содержаний:  $\log(N_X/N_X^\odot) \lesssim 5$  dex тяжёлых элементов.

○ Магнитные поля до ~30 кГс.



Рябчикова, 2011



Рябчикова, 2014

Таблица 2: Классификация CP-звезд

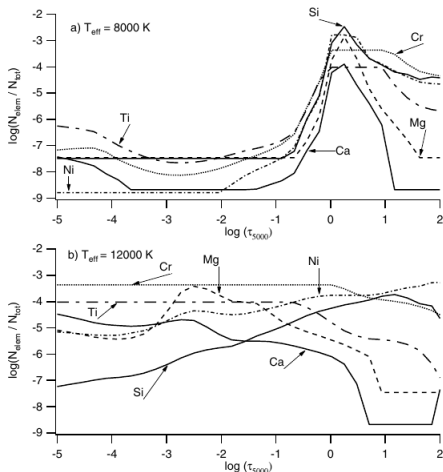
Интервал температур	Магнитные звезды	Немагнитные звезды
7000–10000	Ap, SrCrEu A3-F0	Am, $\lambda$ Boo A0-A1
10000–14000	Ap Si B8-A2	Ap Hg-Mn B6-B9
13000–18000	He-weak Si, SrTi B3-B7	He-weak P Ga B4-B5
18000–22000	He-strong B1-B2	

Романюк, 2007

# Химически пекулярные звёзды

Селективная диффузия элементов в атмосфере (Michaud, 1970):

- Градиенты содержаний: вертикальные + горизонтальные (пятна)
- Объяснение данных наблюдений:
  - Воспроизведение профилей линий
  - Разделение изотопов (He, Ca)
  - Зависимость эффекта от  $T_{eff}$
- Современные динамические модели (Stift & Alecian, 2016): предсказание 3D распределения элементов в замагниченной атмосфере звёзд.

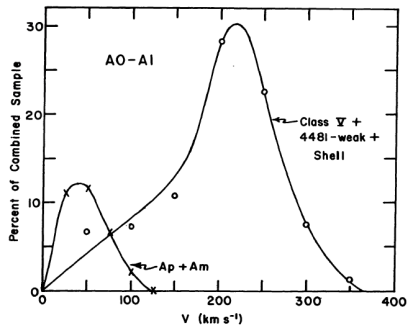


LeBlanc+ 2009

# Химически пекулярные звёзды

Условия для эффективной диффузии:

- Медленное осевое вращение
  - $\Rightarrow$  меридиональная циркуляция ослаблена
- Сильные магнитные поля
  - $\Rightarrow$  подавлена микротурбулентность



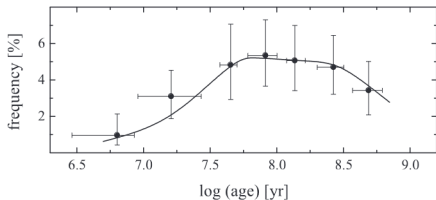
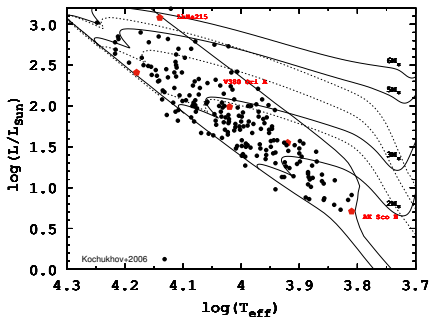
Abt&Morrell, 1995

Эволюционный момент проявления химической пекулярности?

- Механизмы потери углового момента
- Генерация и стабилизирующая роль магнитного поля
- Наблюдательные ограничения на времена диффузии
- Все ли PMS A-B звёзды проходят фазу HAeBe?

# Ar/Vr звёзды на фазе до ГП

- Большинство Ar/Vr звёзд - объекты поля.
- Статистическое наличие CP звёзд в молодых ( $\log t \approx 6$  Myr) скоплениях: Abt, 1979; Netopil+2015, Semenko+2022
- Известно небольшое число Pre-MS Ar/Vr звёзд:
  - Пекулярные Ae/Be звёзды Хербига (V380 Ori A, AK Sco B, LkH $\alpha$ 215)
  - Члены PЗС и областей звездообразования (Stock 16-12, NGC 224-334, BD+30<sup>0</sup>549, LkH $\alpha$ 324/B)
- $\Rightarrow$  Условия для формирования CP-паттерна могут закладываться ещё на PMS фазе.



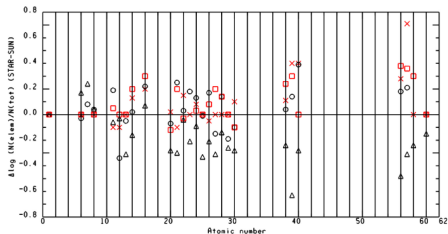
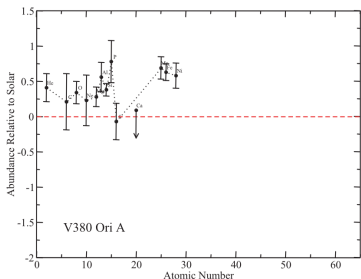
# Пекулярные Ae/Be звёзды Хербига

## V380 Ori A

- $T_{eff} = 12600$  K
- $V \sin(i) = 10$  км/с
- $B_z = 460$  Гс
- PMS звезда
- Эмиссии  $H\alpha + met. +$  диск

## AK Sco B

- $T_{eff} = 6500$  K
- $V \sin(i) = 21$  км/с
- $B_z \sim 80$  Гс
- PMS звезда
- Эмиссия  $H\alpha +$  диск



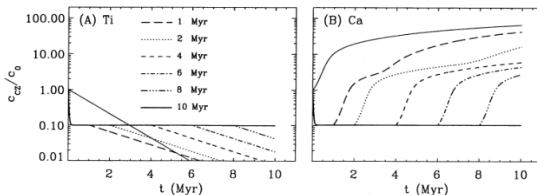
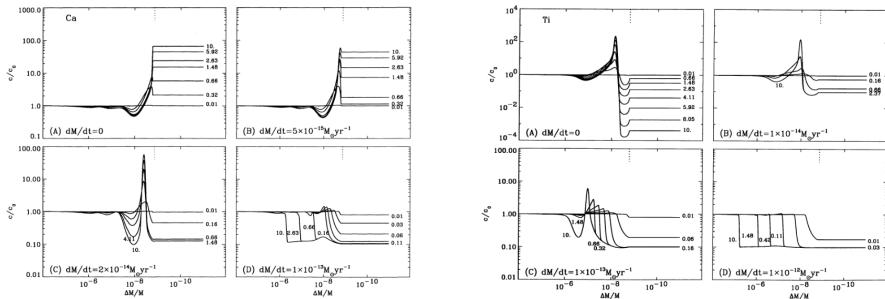
# Пекулярные Ae/Be звёзды Хербига

- АК Sco B - солнечное содержание, V380 Ori A - избыток лёгких элементов (He, C, N, O)
- Слабые ( $\sim 0.2-0.5$  dex) избытки элементов железного пика и лантаноидов (АК Sco B)

## Механизм?

- Диффузия конкурирует с аккрецией.
- Turcotte&Charbonneau, 1993 ( $T_{eff} = 8000K$ ):
  - При темпе  $\dot{M} \gtrsim 10^{-13} M_{\odot}/yr$ , поверхностный химический состав соответствует составу аккрецированного вещества.
  - В течении  $\sim 10^6$  лет сохраняется "память" об аккреционном эпизоде.
  - Сглаживание градиентов, формируемых диффузией.

# Пекулярные Ae/Be звёзды Хербига



Turcotte & Charbonneau, 1993



# Пекулярные Ae/Be звёзды Хербига

- Необходимы расчёты в большем диапазоне  $T_{eff}$  и учёт ветра.
- Реализация механизма возможна при эпизодической аккреции, наблюдаемой на поздних стадиях аккреционной эволюции.
- Альтернативные механизмы? Селективная аккреция ионов в присутствии сильного магнитного поля? (Havnes&Conti, 1971).

## PMS Ar/Vr звёзды в областях звездообразования

- Не аккрецирующие объекты.
- Расположены в активных областях звездообразования
- Подсвечивают отражательные туманности - связь с родительским материалом.

### BD+30°549

- Скопление+туманность NGC1333
- $\bar{t} \approx 1$  Myr (Luhman+2016)
- $D = 293 \pm 22$  pc (Ortiz-Leon+2018)
- sp:B8p (Hubble,1922; Herbig+2006)

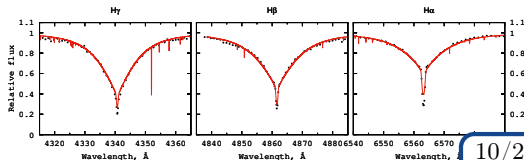
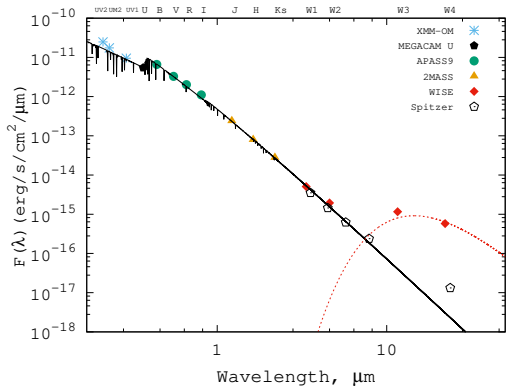
### LkH $\alpha$ 324/B

- L988 - "Pincushion cloud"
- $D \approx 600$ pc
- LkH $\alpha$ 324 cluster:  $\bar{t} \approx 0.6$  Myr (Herbig&Dahm, 2006)
- LkH $\alpha$ 324/B - Ar звезда? (Chavarria, 1984; Herbig&Dahm, 2006)

# BD+30°549: спектроскопия

- KeckI/HIRES спектр:  
02.02.2000 (PI: G. Herbig),  
 $R \approx 48000$
- Спектральный синтез + аппроксимация SED (Potravnov+2023a):

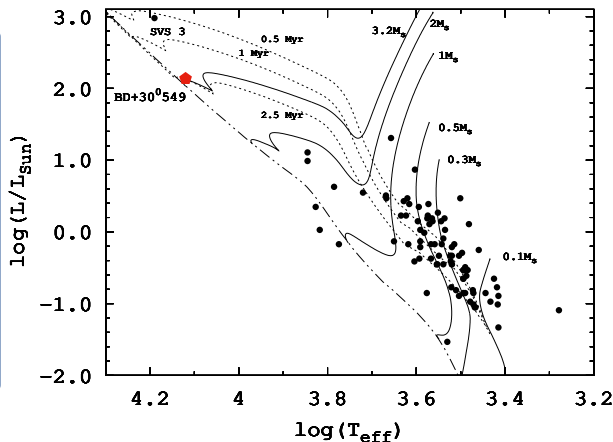
- $T_{eff} = 13100 \pm 100$  K
- $\log g = 4.2 \pm 0.1$
- $\xi_t = 0 \pm 1.5$  km/s
- $V \sin i \lesssim 2$  km/s
- $\langle B \rangle \lesssim 1$  kG
- ИК избыток:  $T_{bb} \approx 200$  K  $\Rightarrow$  диск



# Параметры и эволюционный статус

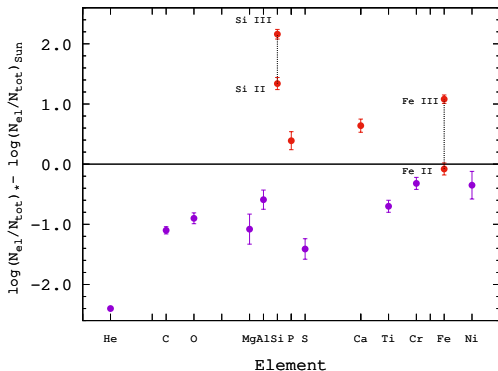
BD+30°549

- $M = 3.2M_{\odot}$
- $R = 2.2R_{\odot}$
- $\log L = 2.1L_{\odot}$
- $t \approx 2.7 \text{ Myr}$
- late-PMS или early-ZAMS звезда



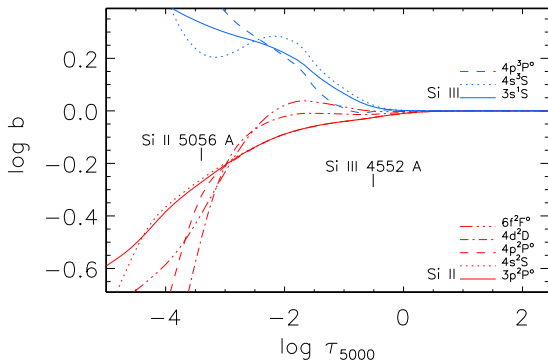
- ИК избыток: тепловое излучение transitional или debris диска
- Переменность  $F_{24\mu m}$ : 2003-2013 гг.
  - Столкновения планетозималей на расстоянии  $\sim 50$  а.е. от звезды?

# BD+30°549: ЛТР содержания



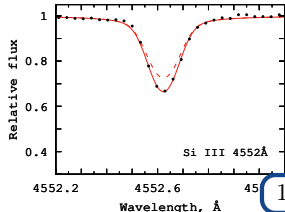
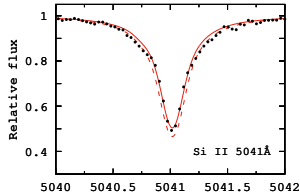
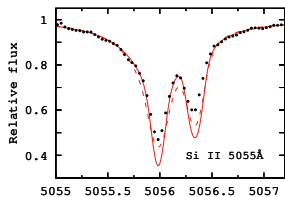
- He-weak:  $< 2.4$  dex по отношению к Солнцу.
- Умеренный дефицит металлов, исключая Si, Fe, P, Ca
- Si в избытке  $\sim 2.2$  dex
- Fe, Si: разница в содержаниях по двум ионам ("Si II/III anomaly").
- Различные содержания по ядрам и крыльям сильных линий (Si II, Mg II)
  - $\Rightarrow$  неЛТР эффекты? Градиенты содержаний в атмосфере?

# BD+30°549: неЛТР анализ



неЛТР для Mg II, Ca II, Si II/III:

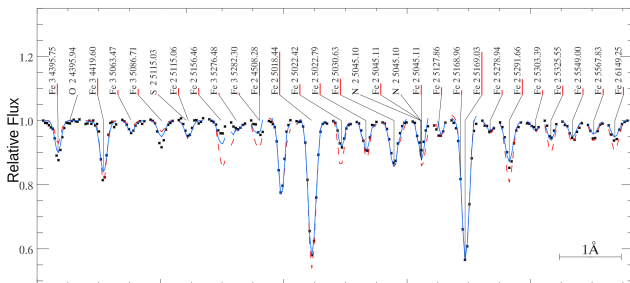
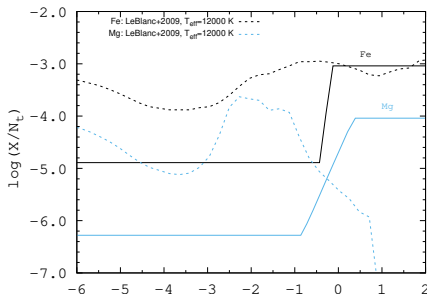
- Умеренные поправки  $\Delta_{NLTE}$  для Mg и Ca
- Гораздо лучшее воспроизведение линий Si на  $\log \tau_{5000} < -3$
- Различие Si II/III порядка 0.53 dex по прежнему сохраняется



# BD+30°549: стратификация содержаний

Ступенчатая функция:

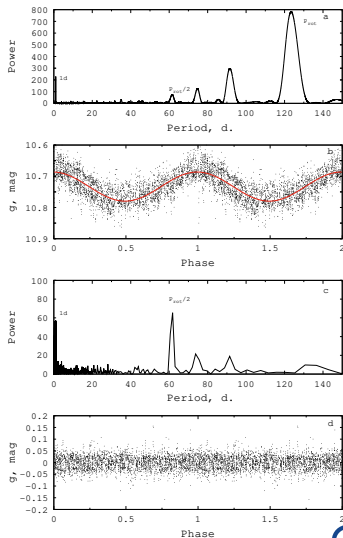
- Для Fe, Mg: падение содержаний в верхних слоях, рост вглубь атмосферы
- Качественное согласие с расчётами LeBlanc+2009, но градиенты содержаний более крутые - эвол. эффект?
- Распределение Si описывается плохо.



# BD+30°549: фотометрическая переменность, вращение

ASAS-SN: 2017-2022 *g*-band кривая блеска:

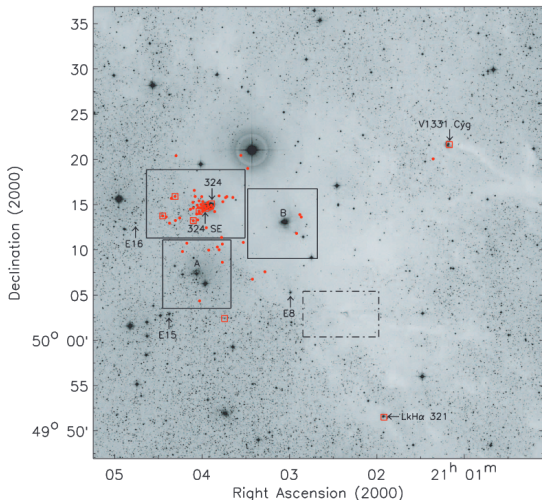
- Переменность  $\Delta V \approx 0.2^m$
- Период  $P=123.3^d$
- Вращательно-модулированная переменность  $\Rightarrow$  температурные пятна на поверхности (как у многих Si-звёзд). Необходимо учитывать при моделировании линий Si в спектре звезды.
- $V_* < 1$  km/s - хорошо согласуется со спектроскопическим  $V \sin i \Rightarrow$  звезда наблюдается с экватора.
- BD+30°549 потеряла (или не приобрела) угловой момент на PMS фазе





# LkH $\alpha$ 324/B и облако LDN988

- L988 -  
Активное звездообразование:  
эмиссионные звёзды  
(Herbig: 1950-е, 2006), мо-  
лек. истечения (Clark,  
1986), HH-объекты  
(Walawender+2013).
- LkH $\alpha$ 324 cluster:  $\bar{t} \approx 0.6$   
Myr (Herbig&Dahm, 2006)
- LkH $\alpha$ 324/B -  
Ар звезда? (Chavarria, 1984;  
Herbig&Dahm, 2006)
- LkH $\alpha$ 324/B - источник  
молекулярного истечения и  
оптического джета (Clark,  
1986; Walawender+2013)



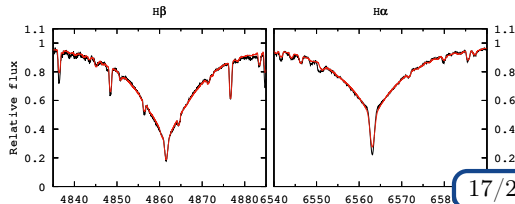
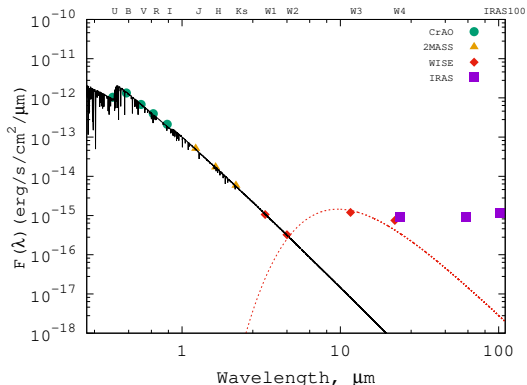
Herbig&Dahm, 2006

# LkH $\alpha$ 324/V: параметры атмосферы

KeckI/HIRES спектр:  
06.07.2003 (PI: G. Herbig),  
 $R \approx 48000$

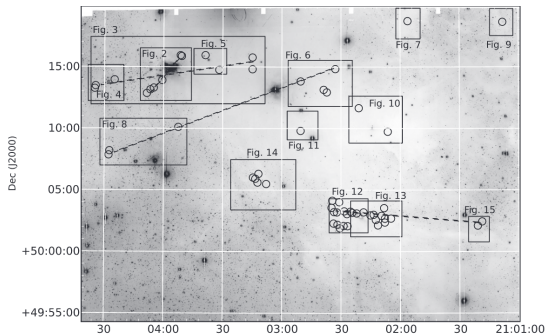
Спектральный  
синтез + аппроксимация  
SED (Potravnov+2023b):

- $T_{eff} = 11175 \pm 100$  K
- $\log g = 4.2 \pm 0.1$
- $\xi_t = 0 \pm 1.5$  km/s
- $V \sin i = 22 \pm 1.5$  km/s
- $A_V = 2.2^m$
- ИК избыток:  $T_{bb} \approx 300$  K  $\Rightarrow$  диск



# Магнитное поле

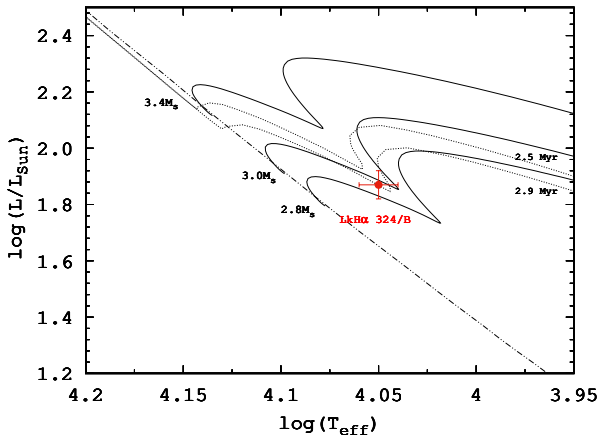
- Переменность блеска
- Наличие джета
- Магнитная интенсификация линий:  $\langle B \rangle \approx 3.5$  kG(:)  
(Спектрополяриметрия: см. доклад И. Якунина 27.06.2023 )
- $\Rightarrow$  LkH $\alpha$ 324/V недавно испытала период аккреционной активности, т.е. прошла фазу магнитной Ae звезды Хербига.



Walawender+2013

# Параметры и эволюционный статус

- $M = 3.0M_{\odot}$
- $R = 2.3R_{\odot}$
- $\log L = 1.9L_{\odot}$
- $t \approx 3.0 \text{ Myr}$

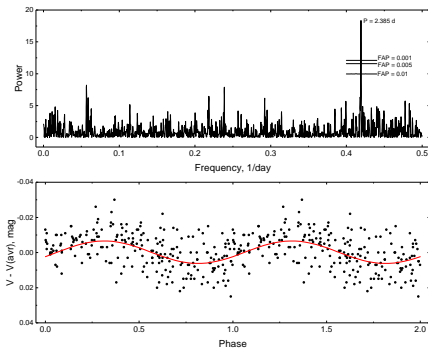


LkHa324/B находится в конце своего PMS трека (начало CNO-цикла)

# LkH $\alpha$ 324/B: вращение

ASAS-SN: 2016-2021 *g*-band кривая блеска:

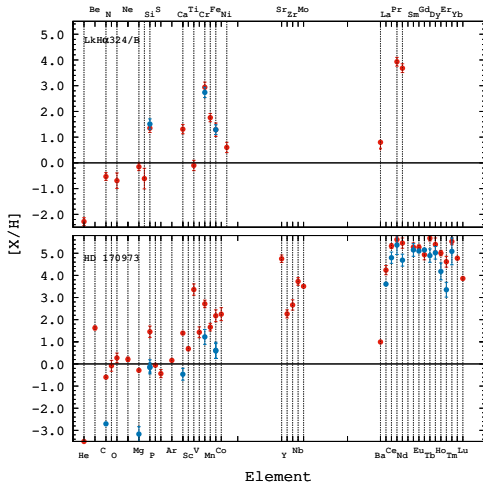
- $\Delta V \approx 0.04^m$
- Период  $P=2.39^d \Rightarrow V_{eq} = 49 \text{ km/s}$
- $V \sin i=22 \text{ km/s} \Rightarrow i \approx 27^\circ$



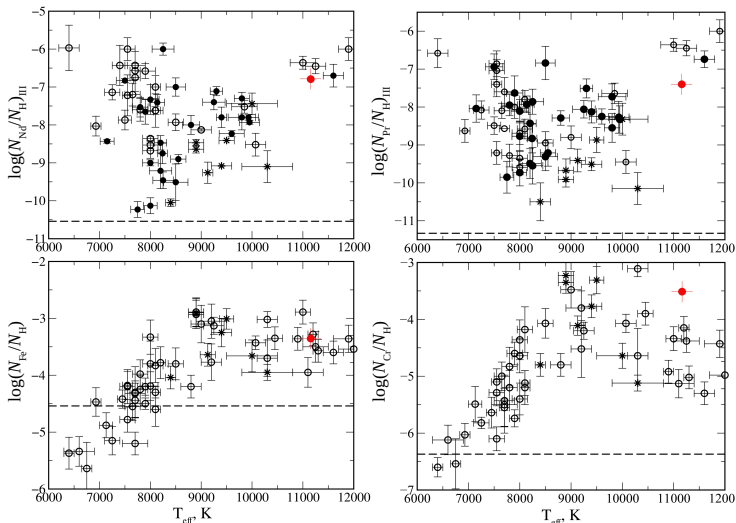
- Согласие с моделью наклонного ротатора
- $V_{eq}$  у LkH $\alpha$ 324/B меньше характерной скорости осевого вращения A-B звёзд на PMS фазе ( $V_{eq} \gtrsim 150 \text{ km/s}$ )

# LkH $\alpha$ 324/B: ЛТР содержания

- Дефицит лёгких элементов (He, C, O)
- Избыток эл-тов железного пика и РЗЭ (Pr, Nd)
- Пониженное содержание Ва:  $[Ba/H] < 0.9$  dex (по отн. к Солнцу)
- Для элементов в двух стадиях ионизации: Si, Fe, Cr соблюдается ионизационный баланс.
- Отсутствие выраженного вертикального градиента Fe, Cr при данной  $T_{eff}$  - в согласии с диффузионными расчётами (LeBlanc+2009).



# LkH $\alpha$ 324/V: ЛТР содержания



Рябчикова&Романовская, 2017

# Заключительные замечания

- ① Как Ae/Be звёзды Хербига, так и не аккрецирующие PMS A-B звёзды могут обладать аномалиями химического состава Ar/Vr типа.
- ② Механизмы формирования наблюдаемых паттернов могут быть различными. Селективная диффузия играет определяющую роль у неаккрецирующих объектов и обуславливает формирование вертикальных и горизонтальных градиентов содержаний на шкале  $\sim 10^6$  лет.
- ③ Условия, для эффективной диффузии: медленное вращение, стабилизация атмосферы закладываются на PMS фазе или ещё раньше.
- ④ Околзвёздные диски и взаимодействие звезды с ними играют значительную роль в характере и временной шкале эволюции поверхностных содержаний молодых Ar/Vr звёзд.
- ⑤ Необходимо дальнейшее расширение выборки для заполнения эволюционной последовательности Ar/Vr звёзд.