

Разделение изотопов тяжелых элементов  
в атмосферах СР звезд  
вследствие свето-индуцированного дрейфа  
Доклад на конференции  
"Методы спектроскопии в современной астрофизике"

А.А. Сапар, А.В. Арет, Л.Ю. Сапар, Р.И. Пооламяэ

Москва, 14.09.2006

## Общие соображения о сегрегации химических элементов в атмосферах CP звезд

- ▶ Наблюдается сильное аномальное содержание тяжелых элементов, особенно ртути и марганца
- ▶ Содержание изотопов некоторых элементов аномально, отличаясь от солнечно-земельного на несколько порядков.
- ▶ Механизм свето-индуцированного дрейфа для объяснения аномального изотопического содержания был впервые предложен Атутовым и Шалагином (эксперимент и оценки).
- ▶ Более последовательная теория с выводом формулы для эквивалентного ускорения предложена нами

## Изменение концентрации изотопов вследствие свето-индуцированного дрейфа

- ▶ **Формула изменения концентрации**  $C_i$  изотопа  $i$  изучаемого элемента (выведена из уравнения непрерывности)

$$\frac{d \ln C_i}{dt} = \nu_i + \left( \frac{d \ln \mu}{dn} \right)^{-1} \left( \frac{d\nu_i}{dn} + \nu_i \frac{d \ln C_i}{dn} \right). \quad (1)$$

- ▶ В этой формуле введена **величина размерностью частоты**, именно

$$\nu_i = \rho V_i / \mu \quad (2)$$

где  $\rho$  – **полная плотность**,  $\mu$  – **полная столбцевая плотность** звездной атмосферы и  $V_i$  – **скорость диффузии**. Производные взяты относительно номера слоя  $n$  звездной атмосферы. Все производные вычислены используя полиномы 4го порядка интерполяции Лагранжа при постоянном шаге аргумента.

## Скорость диффузии с учетом свето-индуцированного дрейфа.

- ▶ **Диффузионный коэффициент**  $\Delta_i$  в спокойной звездной атмосфере в его простейшей форме (игнорируя тепловую диффузию) введен формулой

$$V_i = a_i t_i - \Delta_i \frac{d \ln \rho C_i}{dr}, \quad (3)$$

где  $t_i$  – **время свободного пробега** между столкновениями и  $a_i$  – **эффективное ускорение** под действием гравитации, светового давления и LID:

$$a_i = \sum_j a_i^j X_j, \quad (4)$$

где  $X_j$  – степень ионизации иона  $j$ .

- ▶ Время свободного пробега  $t_i$  для изотопа  $i$  оценивалось следующей формулой, где  $\Delta_i$  – **диффузионный коэффициент**

$$\Delta_i = kT t_i / M_i. \quad (5)$$

## Формула градиента концентрации при свето-индуцированном дрейфе.

- ▶ **Формулы диффузионного коэффициента  $\Delta_i$**  были взяты из статьи (J.-F. Conzalez et al., 1995)) и усреднены нужным образом по ионизационным стадиям. Так получаем

$$\frac{d \ln \rho C_i}{dn} = - \frac{M_i a_i \mu}{kT \rho} \frac{d \ln \mu}{dn}. \quad (6)$$

Ускорение  $a_i$  зависит от концентрации  $C_i$  вследствие чего **это уравнение решается только итеративно.**

## Основные формулы для расчета свето-индуцированного дрейфа.

- ▶ Единственный пока известный эффективный физический процесс, приводящий к эволюционной сегрегации изотопов в атмосферах спокойных звезд – LID.
- ▶ В асимметричных спектральных линиях степень радиативного возбуждения, а следовательно и свободный пробег изучаемых атомарных частиц зависит от их радиальной тепловой скорости. В результате такой асимметрии свободных пробегов появляется СИД.
- ▶ Дрейф LID можно описывать в терминах эквивалентного ускорения, которое прибавляется к радиативному и гравитационному ускорениям.

## Эффективное ускорение свето-индуцированного дрейфа I

- ▶ Для переходов из нижнего квантового состояния l в верхнее квантовое состояние u соответствующее ускорение LID выражается в виде

$$a_{ul}^d = qD \frac{\pi}{c} \int_0^{\infty} \sigma_{ul}^0 \frac{\partial W(u\nu, a)}{\partial u\nu} F_\nu d\nu. \quad (7)$$

- ▶ в этой формуле  $\sigma_{ul}^0$  – полное поперечное сечение на грамм изучаемого изотопа, множитель q – отношение среднего теплового импульса частиц к импульсу поглощаемого фотона  $q = Mv_{TC}/2h\nu$ , и эффективность LID определяется соотношением

$$D = (C_u - C_v)/(A_u + C_u), \quad (8)$$

где величина C является частотой столкновений частиц в квантовом состоянии описываемом индексом и  $A_u$  – частота спонтанных переходов с высшего состояния.

## Эффективное ускорение свето-индуцированного дрейфа и диффузионный коэффициент

- ▶ Далее,  $W$  – функция Фойгта с безразмерным аргументом  $u_\nu = (\nu - \nu_0)/(\Delta\nu_D)$  и параметр функции Фойгта  $a = \Gamma/(4\pi\Delta\nu_D)$ . Итак, **основная проблема – найти частоты столкновений  $S$** .
- ▶ Для нейтральных атомов мы использовали диффузионные коэффициенты, соответствующие модели столкновений твердых сферических частиц следуя работе Gonzales et al. (1995). То же самое относится к дальнедействующему взаимодействию Кулона между ионами.
- ▶ Вдобавок мы приняли, что атомарная поляризуемость связана с силой взаимодействия пропорциональностью  $r^{-5}$  и следовательно интегральный вклад в сфере Дебая пропорционален  $r^{-4}$ .

## Диффузионный коэффициент для расчета свето-индуцированного дрейфа.

- ▶ Мы считали, что вклад ядра в диффузионный коэффициент ионов снижается на множитель

$$\phi_j = (1 - \delta_{0j})D_0^2/D_j^2, \quad (9)$$

где  $D_j$  – коэффициент диффузии, причем индексом определена степень ионизации. Радиус жесткого ядра мы взяли соответствующим основному квантовому числу в водородоподобном приближении. Получаемый общий диффузионный коэффициент  $LID$  по всем ионам  $j$

$$\Delta_i = \sum_j (D_0 \phi_j + D_j) X_j. \quad (10)$$

где  $X_j$  степень ионизации, соответствующая индексу.

## Скорость диффузии при наличии микротурбуленции.



- ▶ Турбуленция влияет сильно на диффузию.

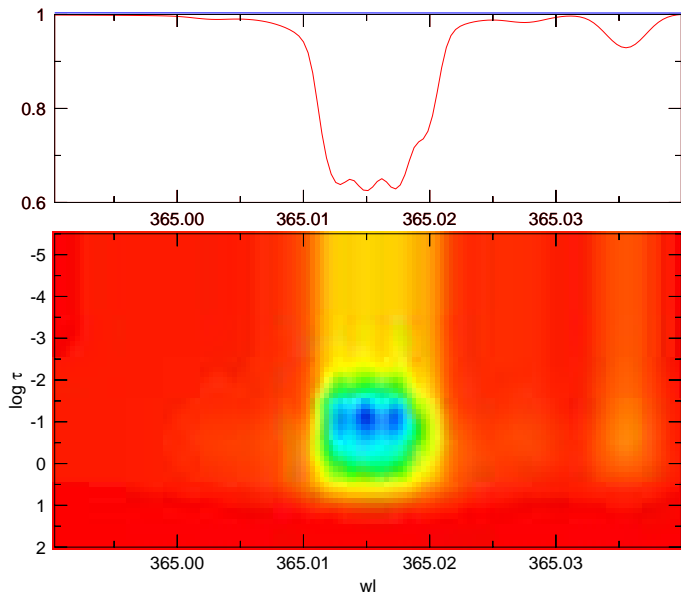
Макротурбуленция исключает диффузию вообще. Как показал E. Schatzmann (1969), влияние микротурбуленции на диффузию **учитывается добавочным диффузионным коэффициентом**, именно

$$V_i = a_i t_i - (\Delta_i + D_T) \frac{d \ln \rho C_i}{dr}, \quad (11)$$

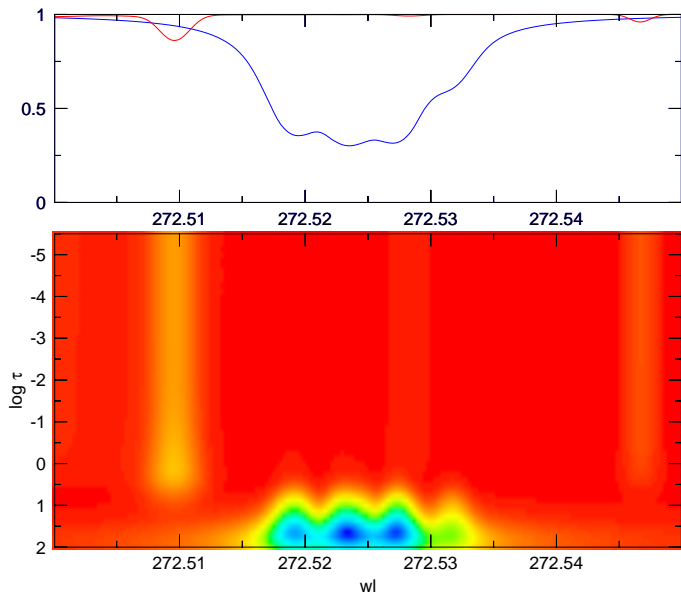
где  $D_T$  является коэффициентом турбулентной диффузии. К сожалению, у нас нет реалистического физического представления о цифровом значении  $D_T$ . По-видимому,  $D_T \gg \Delta_i$ , и в результате этого равновесный градиент  $|\ln C_i|$  существенно меньше чем в случае идеально спокойной звездной атмосферы. **Итак, эволюция в микротурбулентной атмосфере может быть на несколько порядков величины медленнее чем в случае полностью спокойной атмосферы**

## Особенности диффузии под действием СИД.

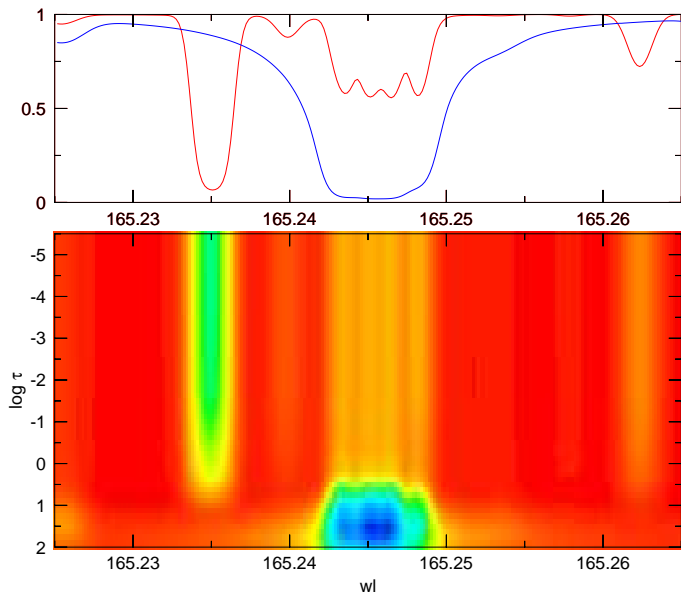
- ▶ **Спектральный шаг** в расчетах должен быть очень маленький, у нас шаг соответствует доплеровскому смещению  $60 \text{ m/s}$ , (разрешение  $5\,000\,000$ )
- ▶ **Необходимо детальное вычисление лучистого давления и свето-индуцированного дрейфа** как можно в большем количестве спектральных линий (и в континууме)
- ▶ закономерность изотопического смещения спектральных линий тяжелых элементов: чем больше атомный вес, тем в более длиноволновую сторону смещены спектральные линии,
- ▶ спектральные линии изотопов частично перекрываются, вследствие этого появляется СИД
- ▶ в результате СИД происходит поочередное оседание изотопов начиная с самого легкого
- ▶ **нужны очень точные длины волн спектральных линий и точные поперечные сечения** физических процессов, участвующих в образовании дрейфа



Спектральная линия HgI с изотопическим расщеплением в атмосфере звезды с  $T_{\text{eff}}=10\ 750$  K



Спектральная линия HgIII с изотопическим расщеплением в атмосфере звезды с  $T_{\text{eff}}=10\ 750$  K



Изотопическое расщепление линий HgIII в атмосфере звезды  
с  $T_{\text{eff}} = 10\,750\text{ K}$

## Эволюционные видеоклипы

- ▶ О результатах моделирования эволюционной сегрегации изотопов ртути взяты с собой:
  - копии постера конференция 2005 г.(замок Монс, Франция), на А4 странице
  - видеоклипы эволюционного изменения линий ртути в звездной атмосфере
  - видеоклипы сегрегации при разных исходных концентрациях с солнечной исходной смесью изотопов, но при различных концентрациях (solar, solar + 3 dex, solar + 6 dex), а также когда смесь изотопов соответствует РС звезде HR 7775

## Основные выводы

- ▶ СИД – основной механизм сегрегации изотопов тяжелых элементов.
- ▶ Концепция спокойных атмосфер объясняет процесс диффузионной стратификации изотопов тяжелых элементов в атмосферах CP звезд.
- ▶ Для более адекватного описания процесса диффузионной стратификации нужно привлечь микротурбуленцию и также охватывать всю оболочку звезды с учетом звездного ветра.
- ▶ Для ртути и других тяжелых элементов LID приводит к левитации (подъему) самого тяжелого изотопа и поочередной седиментации (оседанию) легких изотопов.
- ▶ Явление седиментации осложняется вследствие сверхтонкого расщепления спектральных линий изотопов с нечетным числом барионов. По-видимому вследствие этого появляются нетривиальные изотопические аномалии в атмосферах многих ртутно-марганцевых звезд.