

на правах рукописи

УДК 524.7-36

АЧАРОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДИСКОВ СПИРАЛЬНЫХ
ГАЛАКТИК

(01.03.02 - астрофизика, радиоастрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз 2006

Работа выполнена в Ростовском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор **Мишуров Юрий Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
вед.н.с. **Вибе Дмитрий Зигфридович**
кандидат физико-математических наук
ст.н.с. **Моисеев Алексей Валерьевич**

Ведущая организация: **государственный астрономический
институт имени Штернберга МГУ**

Защита диссертации состоится 12 октября 2006 г. в 11 часов 30 минут
на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 в Специальной
Астрофизической Обсерватории РАН (369167, Карачаево-Черкессия, пос.
Нижний Архыз, САО РАН)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Специальной
Астрофизической Обсерватории РАН

Автореферат разослан 29 августа 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Майорова Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В течение длительного времени распределение обилия тяжелых элементов по радиусу диска Галактики (в логарифмической шкале) моделировалось простой линейной функцией. Однако, за последние 10 - 15 лет накопились данные, которые демонстрируют наличие различных особенностей на таком распределении: провалы, изломы, плато.

Первыми, кто явно сделали утверждение, что радиальное распределение тяжелых элементов не может описываться простой линейной функцией с единым для всего галактического диска градиентом, по-видимому, были Тварог Б. и др. (1997). В этой работе приведен список более ранних исследований в пользу немонотонного характера такого распределения.

В нашей работе показано, что усредненные по радиусу галактического диска распределения наблюдаемых обилий, полученные по цефеидам и планетарным туманностям, не описываются простой линейной функцией с единым градиентом. Напротив, эти распределения подтверждают бимодальный закон радиального распределения обилия тяжелых элементов, предложенный в серии работ Андриевского С. с соавторами (2002-2004), который состоит в том, что в области внутри солнечного круга имеет место достаточно крутой градиент, а в средней части галактического диска - плато.

Разумеется, исследования крупномасштабного распределения обилия элементов еще далеки от своего завершения, и мы находимся лишь в начале пути. Возможно, последующие наблюдательные данные расставят все по местам, однако уже сейчас есть достаточно серьезные основания строить более рафинированную модель химической эволюции

галактического диска, объясняющую наличие особенностей на радиальном распределении содержания химических элементов. Поиск и объяснение таких особенностей чрезвычайно важен, т.к. изломы, плато и т.д. играют исключительную роль в понимании процессов, происходящих в галактическом диске. Они позволяют сузить допустимый класс его моделей. Однако расшифровка этих особенностей оказывается чрезвычайно сложной. И конечно, вряд ли можно понять особенности «химического узора» Галактики, не включая в рассмотрение спиральных рукавов.

Цель работы

Изучение влияния спиральных рукавов на формирование особенностей радиального распределения тяжелых элементов в галактическом диске.

Научная новизна

Основные результаты, содержащиеся в диссертации, получены впервые.

- Предложены и исследованы два канала влияния спиральных рукавов на формирование особенностей распределения содержания тяжелых элементов по радиусу диска Галактики:

- 1) на скорость обогащения тяжелыми элементами данной области диска Галактики, через частоту их впрыскивания в среду при пересечении некоторым объемом межзвездного газа спиральных рукавов;

- 2) через гравитационное влияние на звездные орбиты, приводящее к большим перемещениям звезд по радиусу диска за очень короткий промежуток времени, в результате чего происходит трансформация начального распределения обилия.

- Показано, что кислород оказывается наиболее чувствительным индикатором влияния спиральных рукавов на «химический узор» галактического диска, если его обилие определяется по молодым объектам.
- Получен современный вид и эволюция радиального распределения обилия кислорода в галактическом диске для разных моделей спиральных рукавов.
- Исследовано движение звезд, возмущенное гравитационным влиянием спиральных рукавов. В результате выявлен механизм очень быстрых перемещений звезд по радиусу диска галактики на 2-3 кпк.

Научная и практическая значимость работы

- Дана критика традиционно используемого линейного закона радиального распределения содержания (в логарифмической шкале) тяжелых элементов в диске Галактики. Приведены примеры наблюдательных данных в пользу того, что такое распределение не описывается единым градиентом по всему радиусу диска.
- Предложены и исследованы механизмы, приводящие к формированию немонотонного градиента обилия элементов в диске спиральной галактики: совместное влияние коротации и диффузии химических элементов. Разработана теория химической эволюции с учетом их воздействия.
- Получен современный вид и эволюция распределений обилия кислорода, получающихся для различных моделей спирального узора. На основании этих данных сделан вывод об эволюции структуры диска Галактики, в пользу квазистационарного спирального узора, с радиусом коротации в средней части диска, вблизи Солнца, а также узора с медленно

меняющейся скоростью вращения, при этом коротационный резонанс дрейфует вблизи солнечного круга.

- Показано, что под влиянием коротационного резонанса происходят очень быстрые перемещения звезд по радиусу диска галактики. Траектории возмущенного движения оказываются очень сложными, зависящими не только от собственных кинематических параметров звезд и от параметров волнового узора, но и от начального положения звезды относительно рукавов. Следствием этого результата является то, что методика расчета орбит звезд, находящихся в пределах 1-2 кпк от Солнца, основанная на представлении о квазикруговом их движении вокруг центра Галактики, не может быть признана удовлетворительной.

- Предложенный механизм радиальных перемещений оказывается существенно более быстрый, нежели диффузия звездных орбит, к которой приходят Вилен и др. (1996).

- Предложена программа наблюдений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что конкуренция двух процессов – коротационного резонанса и турбулентной диффузии – приводит к формированию бимодального радиального распределения обилия кислорода: крутого градиента внутри солнечного круга и плато в средней части галактического диска, если спиральная структура квазистационарная и радиус коротации располагается вблизи Солнца.

2. Показано, что модели спиральной структуры с коротационным резонансом, расположенным либо на краю Галактики, либо во внутренней ее области, не приводят к формированию бимодального радиального распределения обилия.

3. Показано, что хаотический цуг транзитных спиральных волн не приводит к формированию бимодального радиального распределения обилия.

4. Показано, что спиральная структура с дрейфующим положением коротационного резонанса может приводить к формированию бимодального радиального распределения обилия, если область дрейфа невелика и располагается в средней части галактического диска.

5. Показано, что звездные блуждания по радиусу диска Галактики на 2-3 кпк за 1 млрд лет, вызванные резонансным воздействием спиральной волны плотности в коротации, меняют наши представления о квазикруговом движении звезд, находящихся вблизи Солнца.

6. Показано, что в коротационной окрестности в течение 3 – 5 млрд лет формируется плато в радиальном распределении тяжелых элементов. Если коротация располагается вблизи Солнца, то со временем распределение трансформируется в бимодальное, даже если первоначально оно было линейным.

Апробация результатов

Результаты исследования были представлены

- на астрофизических семинарах кафедры физики космоса Ростовского государственного университета и САО РАН.

- на всероссийских астрономических конференциях:

1. ВАК - 2004: Горизонты Вселенной (Москва, 2004).

- на международных конференциях:

1. Milky Way Surveys: The structure and evolution of Our Galaxy (Boston, MA, USA, 2003).

2. From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution (IAU Symposium No 228, Paris, France, 2005).

Личный вклад автора

Постановка задачи и большая часть работ, на основе которых написана диссертация, выполнены автором совместно с профессорами Ю.Н. Мищуровым и Ж.Р.Д. Липине. При этом автору принадлежит изучение теоретических исследований и анализ наблюдательных данных по теме диссертации, написание алгоритмов и программ численных расчетов, проведение расчетов, анализ результатов.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 123 наименований, 27 рисунков. Общий объем диссертации 112 страниц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, кратко изложено содержание глав.

В первой главе исследуется один из возможных каналов влияния спиральных рукавов на производство и формирование радиального распределения содержания тяжелых элементов в галактическом диске: их влияние на процесс нуклеосинтеза.

Приводятся и обсуждаются наблюдательные данные. Обращается внимание на такую особенность в современном радиальном распределении тяжелых элементов как его бимодальность, т.е. достаточно крутой его градиент во внутренней области диска и плато в окрестности Солнца.

Формулируются и обсуждаются основные уравнения эволюционного нуклеосинтеза, учитывающие влияние спиральных рукавов и особой

резонансной области в галактическом диске - т.н. коротации, а также диффузии химических элементов.

Демонстрируется возникновение особенностей на простейшем примере формирования асимптотического распределения содержания тяжелых элементов в модельной стационарной галактике на больших временах. Показано, что ключевым в формировании радиального распределения содержания тяжелых элементов является конкуренция двух процессов: с одной стороны, оно зависит от пространственного распределения источников, с другой - от перераспределения вследствие макроскопических течений среды, а также диффузии.

Результаты рассмотренного воздействия спиральных рукавов должны обнаруживаться при исследовании радиального распределения обилия кислорода по межзвездному газу и молодым объектам диска. Для этой цели можно использовать области H II, цефеиды, O-B звезды, и, в какой-то степени, самые молодые планетарные туманности и рассеянные скопления.

Во второй главе решалась задача химической эволюции диска Галактики для различных моделей спиральной структуры. По результатам исследования можно сделать вывод, что различные модели волновых узоров приводят к существенно отличающимся картинам радиального распределения обилия кислорода и его эволюции. Таким образом, установлен дополнительный источник информации, позволяющий сделать выбор между различными моделями волнового узора.

В моделях с долгоживущей (т.е. квазистационарной) спиральной структурой положение коротационного резонанса является критическим для формирования картины радиального распределения обилия кислорода. Только для случая с радиусом коротации в средней части галактического

диска (близко к положению Солнца) получается бимодальная структура распределения обилия кислорода или минимум на ней в окрестности Солнца. Модели с коротационным резонансом на краю галактического диска или близко к его центру не демонстрируют каких-либо особенностей на радиальном распределении обилия в областях, доступных для наблюдений, оно монотонно.

Характер распределений обилия кислорода, полученных для моделей с непрерывно изменяющейся скоростью вращения спирального узора, зависит от направления и размеров области дрейфа коротационного резонанса. В случае, когда область дрейфа располагается в средней части диска Галактики, вблизи Солнца, формируется аналог бимодальной структуры. Однако положение излома, а также эволюция распределения зависят от направления дрейфа. Названные отличия позволят сделать выбор между ситуациями, в которых центральный бар ускоряет либо замедляет свое вращение. Для этого необходимы как можно более точные наблюдения «тонкой структуры» радиального распределения обилия кислорода и его эволюции.

Если область дрейфа простирается от центра до внешнего края диска, при любом направлении движения резонанса особенности на распределении обилия не формируются.

«Химический» подход также не поддерживает транзитную модель спиральной структуры галактик.

В третьей главе исследуется влияние динамических процессов, вызванных спиральными рукавами, на эволюцию распределения обилия элементов по радиусу Галактики.

Проводится аналитическое и численное решение задачи о движении звезд в диске, с учетом влияния спиральных рукавов. Показано, что звезда,

оказавшаяся в некоторый момент времени возле радиуса коротации, под воздействием гравитационного поля спиральной волны будет блуждать на большие расстояния по галактическому радиусу $\sim 2 - 3$ кпк за время ~ 1 млрд лет, или даже быстрее. В результате, даже если начальное радиальное распределение обилия тяжелых элементов было линейным, под действием возмущений от спиральных рукавов оно трансформируется в более сложное, которое не описывается единым градиентом. Наиболее сильной деформации распределение будет подвержено в окрестности коротации, где звезды резонансно взаимодействуют с гравитационным полем спиральной волны плотности, в этой области на нем формируется плато. Иными словами, со временем монотонное распределение трансформируется в аналогичное бимодальному, которое уже не может описываться одним градиентом. Этот вывод получен для квазистационарной спиральной структуры.

Если спиральный узор представляет собой цуг транзитных волн, то сложной структуры не будет: как показано Селлвудом и Бинни (2002), эффект рукавов сведется лишь к сглаживанию общего градиента и нарушению зависимости возраст-металличность.

Для любой модели спирального узора, из-за того, что в окрестность Солнца попадают звезды из разных и довольно далеких областей Галактики, можно ожидать, что корреляция металличность – возраст здесь будет замываться.

Представление, согласно которому звезды движутся по квазикруговым орбитам вокруг центра Галактики, не применимо для звезд, оказавшихся вблизи коротационного резонанса. В последнем случае они движутся по очень сложной траектории, зависящей не только от их собственных кинематических параметров и от параметров волнового узора, но и от начального положения относительно рукавов.

Основное содержание диссертации изложено в 7 работах, общим объемом 37 страниц, 6 работ написано совместно с другими авторами:

1. Ачарова И.А. *Компьютерное моделирование химической эволюции Галактики* // Сборник научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых РГУ. 2001. С. 121-124.

2. Mishurov Yu.N., Lepine J.R.D., Acharova I.A. *Corotation: its influence on the chemical abundance pattern of the Galaxy* // *Astrophys. J. Letters*. 2002. Vol. 571. L113 - L115.

3. Lepine J.R.D., Acharova I.A., Mishurov Yu.N. *Corotation, stellar wandering, and fine structure of the galactic abundance pattern* // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 589. P. 210-216.

4. Mishurov Yu.N., Acharova I.A., Lepine J.R.D. *Corotation: its influence on the chemical abundance pattern of the Galaxy* // *Publications Astronomical Society of Pacific*. 2003. Vol. 115. P. 78 - 81.

5. Ачарова И.А., Липине Ж.Р.Д., Мишуров Ю.Н. *Коротационный резонанс и особенности радиального распределения кислорода в спиральной галактике* // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. № 5. С. 398 - 406.

6. Acharova I.A., Lepine J.R.D., Mishurov Yu.N. *Imprints of spiral arms in the oxygen distribution over the galactic disc* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2005. Vol. 359. P. 819 - 826.

7. Lepine J.R.D., Mishurov Yu. N., Acharova I.A. *The role of spiral arms in the chemical evolution of galactic disks* // In *IAU Symposium No. 228*, 2005. P. 595 - 596.

Цитируемая литература

Andrievsky S., Kovtyukh V., Luck R., Lépine J., Bersier D., Maciel W., Barbuy B., Klochkova V., Panchuk V., Karpishek R. *Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. I. The solar neighbourhood* // Astron. and Astrophys. 2002. Vol. 381. P. 32-50.

Andrievsky S., Bersier D., Kovtyukh V., Luck R., Maciel W., Lépine J., Beletsky Yu. *Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. II. Towards the galactic center* // Astron. and Astrophys. 2002. Vol. 384. P.140-144.

Andrievsky S., Kovtyukh V., Luck R., Lépine J., Maciel W., Beletsky Yu. *Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. III. First results for the outer disc* // Astron. and Astrophys. 2002. Vol.392. P.491-499.

Andrievsky S., Luck R., Martin P., Lépine J. *The Galactic abundance gradient from Cepheids. V. Transition zone between 10 and 11 kpc* // Astron. and Astrophys. 2004. Vol. 413. P.159-172.

Sellwood J., Binney J. *Radial mixing in galactic discs* // Monthly Notice Roy. Astron. Soc. 2002. Vol. 336. P. 785-796.

Twarog B., Ashman K., Anthony-Twarog B. *Some Revised Observational Constraints on the Formation and Evolution of the Galactic Disk* // Astron. J. 1997. Vol. 114. P. 2556-2585.

Wielen R., Fuchs B., Dettbarn C. *On the birth-place of the Sun and the places of formation of other nearby stars* // Astron. and Astrophys. 1996. Vol. 314. P.438-447.