

Contemporary concept of the Galaxy structure: 2. The Galaxy disk

José Concejó¹, Orlin Stanchev², Tsvetan B. Georgiev³

¹ Institute of Astronomy and NAO, BG-1784 Sofia

² Department of Astronomy, University of Sofia, BG-1164 Sofia

³ New Bulgarian University, BG-1618 Sofia
jconcejó@astro.bas.bg

(Submitted on 15.11.2012; Accepted on 19.12.2012.)

Abstract. In this survey we present for Bulgarian readers the classic and recent disk formation and evolution concepts, as well as their probe by the orbital eccentricities of stellar populations. The evolutionary scenarios are included in two different frames, namely violent origin and secular evolution, and they are classified in four main models: accretion, heating, gas-rich merger and stellar migration. Various contemporary numerical simulations aim to explain the observational data about the disk stars: chemical properties (abundances gradients) and kinematic properties (rotational velocities, velocity dispersions). However, they can reproduce only some aspects of the Galaxy's disk. The reason is the simulations are limited by the numerous assumptions that are made, inevitable numerical artifacts, etc. Therefore we focus on the contemporary models of stellar migration (radial and vertical), which plays an essential role for the understanding of the Galaxy's thick disk formation. The stellar migration gives an interpretation about the structure of the disk as a complicated, but single component of the Galaxy.

Key words: galaxies: Milky Way

Съвременна представа относно структурата на Галактиката: 2. Галактичният диск

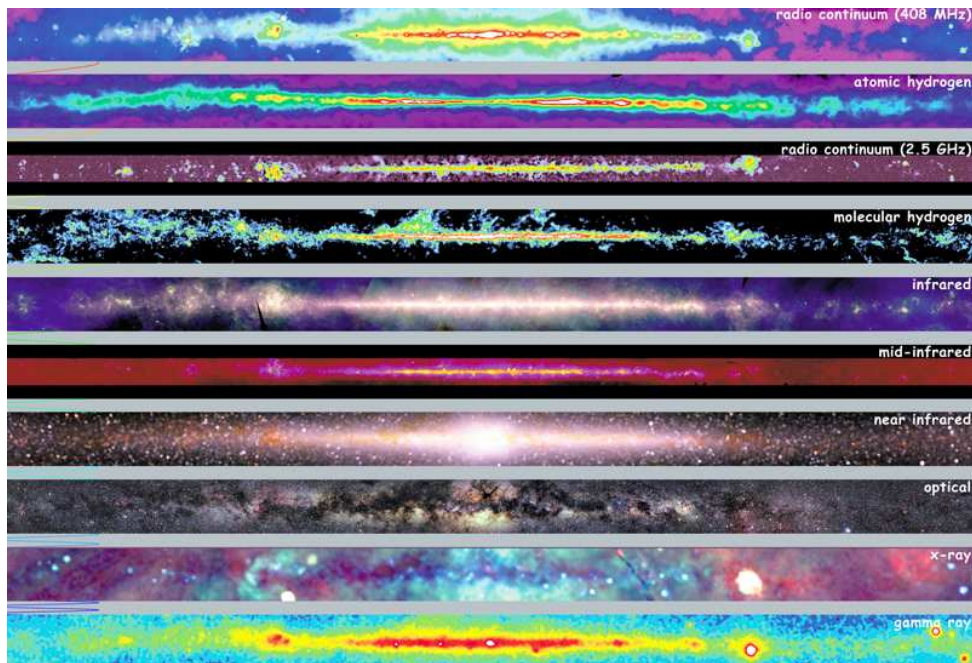
Хосе Консехо, Орлин Станчев, Цветан Б. Георгиев

В този обзор ние представяме за българския читател класическите и съвременните концепции за формирането на галактичния диск, както и тяхната проверка чрез орбиталните ексцентриситети на звездните населения. Еволюционните сценарии са включени в две различни рамки, наречени бурно начало и спокойно развитие и са класифицирани в четири главни модели: акреция, динамично разгриване, сливане с други, богати на газ, звездни системи и звездна миграция. Различни съвременни числени симулации целят да обяснят наблюдателните данни относно дисковите звезди: химични особености (градиенти на обилието) и кинематични особености (ротационни скорости, дисперсии на скоростите). Обаче компютърното моделиране може да възпроизведе само някои аспекти на галактичния диск. Причината е, че симулациите са ограничени от множеството направени допускания, от неизбежните числени артефакти и т.н. Затова ние се фокусираме върху съвременните модели за звездна миграция (радиална и вертикална), които играят съществена роля в разбирането на формирането на галактичния дебел диск. Звездната миграция дава интерпретация на структурата на диска като сложен, но единичен компонент на Галактиката.

Увод

Когато се представят за широка публика, спиралните структури на галактиките се онагледяват многоцветно и впечатляващо (вж. напр. нашата

предходна статия: Georgiev et al., 2012, по-нататък - Рарег 1). Обаче, ярки и сравнително правилни спирални структури, наричани “гранд дизайн“, се наблюдават рядко. Обикновено спиралните структури са неправилни, а понякога и съвсем разпокъсани, флокулентни. При това фотометрията показва, че добре изявените звездни комплекси в спиралните ръкави, в лъчението на които доминират млади горещи звезди, излъкват над околността си с повишена яркост във визуални лъчи едва на 10-15%. Изобщо, спиралните структури не са толкова фундаментални образувания, колкото изглеждат. Фундаментални са дисковете, в които се образуват спирални структури.



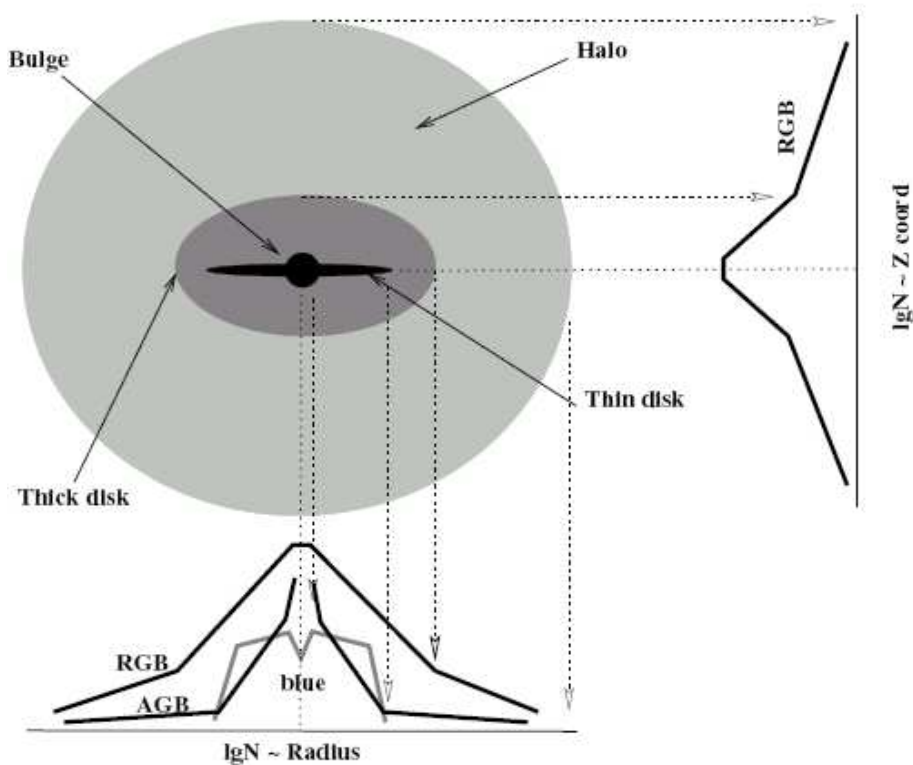
Фиг. 1. Панорами на лъчението от Млечния път от нашата гледна точка, разположена вътре в Млечния път. Отгоре надолу: радио-континуум на 408 MHz (73.5 cm), атомарен водород, радио-континуум на 2.5 GHz (12 cm), молекулярен водород, инфра-червени лъчи - далечни, средни и близки, оптическо, рентгеново и гама лъчение (<http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/MW.html>).

Преди средата на XX век е станало ясно, че независимо от морфологията (т.е. от видимата структура), големите спирални галактики имат компоненти с дисковидни форми, съдържащи повишена концентрация на млади звезди, газ и прах. Но галактичните дискове не приличат съвсем на спортния уред “диск“, защото към периферията си те стават по-дебели и по-разредени. Освен това, дисковете на галактики с мощни балджове, като M 31 и M 104 имат пръстеновидна форма (вж. Рарег 1).

С отдалечаване от центъра на галактиката в равнината на диска и перпендикулярно на тази равнина плътността на диска намалява приб-

лизително експоненциално, т.е. галактичните дискове нямат ясно очертани граници. Приема се, че диаметърът и дебелината на диска на Нашата галактика - Млечния път (МП) са съответно около 30 крс (100 000 св.г.) и около 0.3 крс (1000 св.г.). Днес има детайлни данни относно лъчението на диска на МП в множество диапазони на електро-магнитния спектър (Фиг.1)

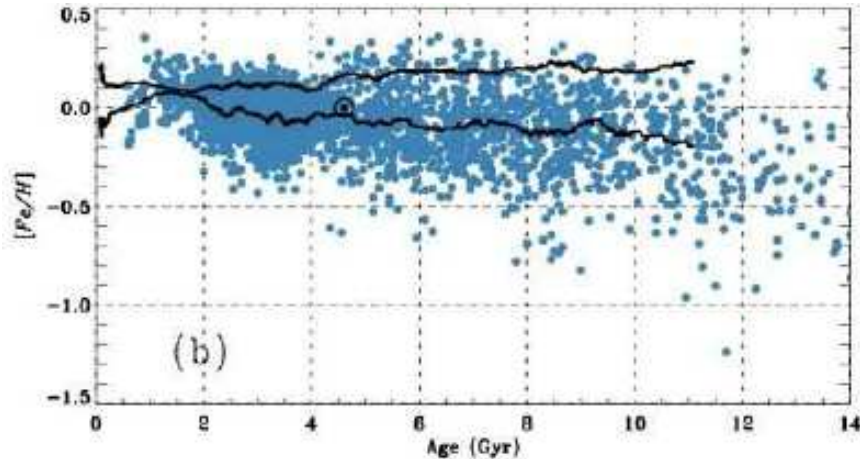
В предходната наша статия (Рарег 1) ние описваме МП като цяло. В тази статия ние представяме основните схващания относно строежа и еволюцията на звездния диск на МП. По тази тема има обширна информация в учебници, монографии и научни публикации (вж. напр. Binney & Merrifield 1998, Schneider 2006 и цитираните тук други източници, както и Интернет). Токъв обем информация не може да бъде обхванат тук дори бегло, затова ние акцентираме само върху основните нови факти и тяхното съвременно разбиране.



Фиг. 2. Машабирано представяне на звездните компоненти в типична спирална галактика и на проекциите на техните звездни плътности при вид анфас (долу) и в профил (горе). RGB и AGB са типове стари (проеволуирали) звезди от клон на червените гиганти (Red Giant Branch) и от асимптотичния клон на червените гиганти (Asymptotic Giant Branch). (Tikhonov et al. 2005, Fig.13)

1. Строеж на диска

Млечният път е сложно устроена спирална галактика, която, обаче, се вписва добре в съвременната обща схема (Фиг.2). Отбелязваме, че за разлика от други подобни схеми, дебелият диск на Фиг.2 е представен като много дебел, но това следва от звездната фотометрия в периферните области на редица близки галактики, допълнена и обобщена от Tikhonov et al. (2005).



Фиг. 3. Корелация възраст - металичност за звездите от слънчевата околност. Долната крива показва тенденция към намаляване на металичността, а горната - тенденция на увеличаване на дисперсията на металичностите с увеличаване на възрастта. Положението на Слънцето е обозначено с кръгче. Интерпретацията е, че в слънчевата околност са мигрирали радиално множество звезди - както от вътрешните части на диска, така и от външните. (Haywood 2008, Fig.1b).

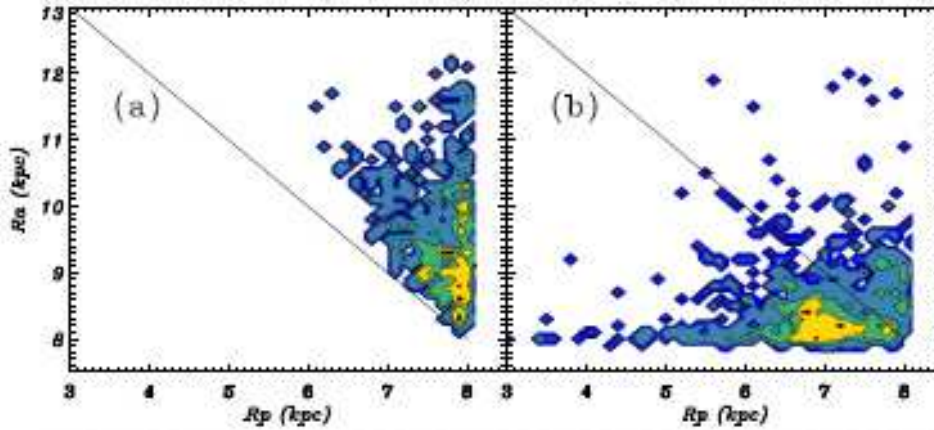
Дискът на МП е също сложно образувание. Неговите звезди показват корелации възраст-металичност, възраст – дисперсия на скоростите и др. Освен това, старите и младите звезди, имащи съответно по-ниска и по-висока металичност, се отличават и по орбитите си (Фиг.3). Обаче, всички такива корелации са слабо изразени.

През последните десетилетия изследователите различават в диска на МП поне четири компоненти: (i) тънък диск с характерна дебелина около 500 св.г., състоящ се от газ, прах и висока концентрация на екстремално младо, богато на метали звездно население; (ii) дебел диск с характерна дебелина 2000 св.г., състоящ се от младо и богато на метали звездно население, газ и прах, но средно взето по-разреден и по-беден на метали от тънкия диск, (iii) дебел диск от бедно на метали звездно население и (iv) тъмен, несветещ масивен диск с неизвестна природа (Carollo et al. 2010, Read et al. 2008).

Уточняването тази структура, както и обясняването на произхода, еволюцията и зависимостите (химически, кинематически и динамически) при звездното население в дебелия диск продължават да са сериозна

научна задача. Така например според Turon et al. (2008) физическата реалност на разликата между тънкия и дебелия диск днес се дебатира горещо, но дебатът е объркан поради липсата на аргументирани дефиниции на тези структури. А в работата на Dierickx et al. (2010) се заключава, че няма консенсус относно произхода на дебелия диск.

Разглеждайки еволюцията, химията и кинематиката на диска на МП, Just et al. (2011) представят един нов опит за построяване на напълно съгласуван модел, който да предсказва детайлно особеностите на диска, т.е. разпределенията на плътността, възрастта, кинематиката и металичността на всички типове звезди.



Фиг. 4. Разпределения на звезди от слънчевата околност по пери-центрични (абсциса) и апо-центрични (ордината) разстояния: (a) с ниска металичност ($[Fe/H] < -0.4$ dex) и (b) с висока металичност ($[Fe/H] > 0.1$ dex). Първите имат главно сплескани орбити с далечни апо-центрични разстояния, а вторите - всякакви орбити, но най-често почти кръгови. Интерпретацията е същата, както при Фиг.3 (Haywood 2008, Fig.6a,6b).

В този аспект, на базата на съвременни данни за радиалните скорости на звездите в диска, Shen et al. (2010) показват, че галактическият балдж не е отделен фундаментален компонент, а е част от диска, установила се още при формирането на МП. Те пишат: “Псевдо-балджът с вид на сандък (boxy shaped pseudobulge) е най-вече бар, видим в профил“.

И така, основният въпрос е защо дискът е дебел. Всички съвременни сценарии на формирането и еволюцията на диска на МП се съобразяват с най-новите и най-пълни обзори на звездното население в околослънчевата част от диска на МП, като например SDSS DR7 (Abazajian et al. 2009). При това, сценариите попадат в две категории – бурно начало (violent origin) и спокоен развитие (secular evolution), като могат да бъдат съчетани с различни механизми за формирането на дебелия диск (Di Matteo et al., 2011; Loebman et al. 2011). Най-важните концепции и модели по проблема с дебелия диск са систематизирани в нашата предходна работа (Consejo et al. 2012) и са представени накратко по-долу.

2. Възможни Механизми за формирането на дебел диск

2.1. По сценария с бурно начало

(1) Дебелият диск се формира чрез разрушаване на галактики-спътници и акреция на тяхното звездно население през цялата еволюция на галактиката. Имат се предвид неголеми звездни системи, претърпяващи собствена еволюция. При това акрецията на звездите става по почти копланарни орбити (Abadi et al. 2003).

(2) Дебелият диск се формира чрез динамично разгриване на звездното население, т.е. чрез увеличаване на скоростите и дисперсията на скоростите на звездите на първичния тънък диск за сметка на допълнително, второстепенно сливане с друга, немалка звездна система. При това части от първичния диск се запазват непроменени (Di Matteo et al. 2011).

(3) Дебелият диск е естествен, макар и не напълно разбираем, продукт на ситуацията (in situ) в бурната ранна епоха на Вселената (Bournaud et al. 2009)

(4) Дебелият диск е формиран със съществено участие на избухвания на свръхнови звезди от II тип, обогатяващи междузвездната среда с т.н. α -елементи (главно Mg, Si, Ca, Ti). Съответните компютърни симулации на галактичната еволюция описват много добре наблюдаваните химични и кинематични особености на балджа, диска и халото на МП (Kobayashi & Nakasato 2011)

2.2. По сценария със спокойно развитие

(1) Дискът се удебелява в резултат от случайни срещи и взаимодействия с молекулярни облаци, отговорни (поне частично) за разгриването на диска (Spitzer & Schwarzschild 1953).

(2) Дискът се удебелява поради динамично разгриване на старото му звездно население при взаимодействието с галактичната спирална структура (Barbanis & Woltjer 1967).

(3) Дискът търпи естествено динамично разгриване на звездното си население чрез дифузия на скоростите, водещо в частност до увеличаване на вертикалната дисперсия на скоростите на звездите (Wielen et al. 1996)

(4) В диска работи радиална миграция на звездите поради резонансно разсейване. В един от вариантите на това предположение се смята, че звездите от дебелия диск може да са били “заловени“ в миналото си от областта на коротация (където скоростите на въртене на населението на диска и на спиралната структура съвпадат) и след това да са мигрирали радиално и вертикално. Обаче, днес е ясно, че този процес не може да предизвика значително разгриване на диска (Hauwood 2008).

(5) Дискът се удебелява поради радиална миграция на звездите, предизвикана от приливно смущение на галактика-спътник. Такова събитие по принцип може да предизвика изкривяване на диска, както и поява

на спирална структура във външната част на диска (Schönrich & Binney 2009).

(6) Дискът се удебелява поради радиална миграция на звездите, дължаща се на действието на бара и спиралната структура (Minchev & Famaey 2010).

(7) Дискът се удебелява поради вертикална еволюция, в резултат на разсейване от взаимодействието с преминаващите спирални ръкави, разглеждани като спирални вълни на плътността (Loebman et al. 2011).

(8) Дискът се удебелява поради самосъгласувана еволюция на вертикалната структура на диска, съответна на процесите в слънчевата околност и потвърдена от звездната статистика в посока на северния галактичен полюс (Just et al, 2011).

(9) Дискът се удебелява поради разпадане на дискови звездни купове, явяващи се градивни тухли на диска. Този модел обяснява наблюдаемата структура без каквито и да било сливания (Assmann et al. 2011).

2.3. Възможности за тестване на механизмите чрез орбиталните ексцентрицитети на звездите

Винаги е било трудно да се тестват множеството различни механизми за произхода, строежа и еволюцията на дебелия диск на МП от единна гледна точка. Обаче неодавна се появи една нова и многообещаваща възможност. Тя се базира на изучаване на разпределението на орбиталните ексцентриситети на звездното население (Sales et al. 2009). За целите на изследването на тези автори ексцентриситетът на звездната орбита се дефинира като $e = (r_2 - r_1)/(r_1 + r_2)$, където r_1 и r_2 са пери-центричното и апо-центричното разстояние на звездата до галактичния център. Теоретичните очаквания са следните:

(1) Моделите, включващи радиална миграция, водят до сравнително тясно и симетрично разпределение на звездните ексцентриситети;

(2) Моделите, включващи сливане с други, богати на газ звездни системи водят до широко и асиметрично разпределение на ексцентрицитетите, наклонено (с асиметрично отместен център) към високите ексцентрицитети.

(3) Моделите, включващи продължителна акреция, водят до много широки разпределения на ексцентрицитетите.

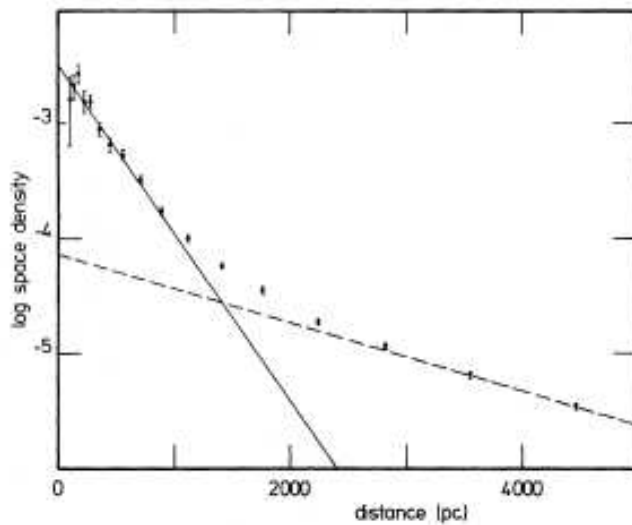
(4) Моделите, включващи разгриване на диска, дават разпределение, подобно на това при сливане от типа (2) за екстрентрицитети $e \leq 0.6$, но с втори пик при $e \approx 0.8$.

Наскоро бяха публикувани резултатите от няколко изследвания, базирани на наблюдаемото разпределение на екстрентрицитетите в дебелия диск от слънчевата околност. Те дават възможност да се съпоставят ясно класическата и съвременната интерпретация на съществуването на дебелия диск. Освен това те позволяват отделни механизми да бъдат фаворизирани и изявени като най-възможни решения на проблема.

3. Интерпретации на формирането на дебел диск

3.1. Класическа интерпретация

При моделирането на вертикалната структура на диска ходът на звездната плътност традиционно се декомпозира на тънък диск с младо звездно население и дебел диск с промеждутъчно и старо звездно население. Това изглежда общоприето при спиралните галактики (вж. Yoachim & Dalcanton 2006). За целта радиалното $I(R)$ и вертикалното $I(Z)$ разпределения на плътността в диска на МП (или яркостният профил на диска на галактиката) се представят в първо приближение като експоненциално намаляващи: $I(R) = I(R_0)\exp[-R/H_R]$ и $I(Z) = I(Z_0)\exp[-Z/H_Z]$ Тук $I(R_0)$ и $I(Z_0)$ са съответните максимални стойности (амплитуди), а H_R и H_Z са радиалният и вертикалният мащабни размери, съответстващи на разстоянията, на които плътността намалява e -пъти. На Фиг.5 е показан пример от класическата работа на Gilmore & Reid (1983).



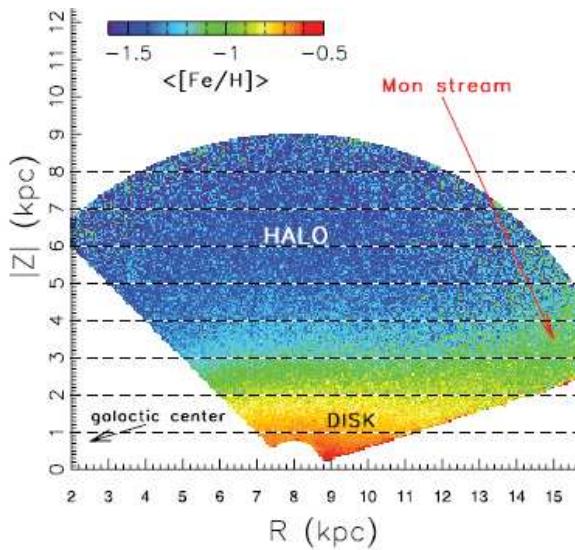
Фиг. 5. Пример за хода на пространствената плътност на звездите от слънчевата околност (с абсолютни звездни величини между 4 mag и 5 mag) в зависимост от разстоянието до галактичната равнина (точки) и декомпозиция на този ход на две експоненциално намаляващи компоненти (прави линии, съответни за тънък и дебел диск с мащабни размери 300 и 1350 pc) (Gilmore & Reid 1983, Fig.6a)

Характеристиките на двата типа звездно население на диска – дисково и смесено, са били предмет на множество изследвания през последните 20 г. (Vensby et al. 2005, Vochanski et al. 2007). Сега атрибутите на тънкия (1) и дебелия (2) диск могат да бъдат съпоставени, както следва.

(1) Структурно, по мащабни размери: $H_1(R) \leq H_2(R)$ и $H_1(X) \leq H_2(X)$, т.е. в сравнение с тънкия диск, дебелият диск е средно взето по-протяжен по радиус и дебелина и по-малко концентриран към центъра на галактиката и към равнината на диска.

(2) Кинематично, по дисперсии на скоростите в цилиндрични координати: $(\sigma_R, \sigma_\phi, \sigma_Z)_1 \leq (\sigma_R, \sigma_\phi, \sigma_Z)_2$, т.е. в сравнение с тънкия диск, в дебелния диск дисперсиите на скоростите са по-големи. При това, звездите от дебелния диск, средно взето, изостават от съвместното въртене на звездите от тънкия диск (Smith et al. 2011).

(3) Химически, по обилие на тежки елементи: звездите от дебелния диск са, средно взето, по-стари и по-бедни на тежки метали в сравнение със звездите от тънкия диск, като при дадено обилие на желязо звездите от дебелния диск са в по-голяма степен α -обогатени. Това е важен извод, защото по-голямото обилие на α -елементите свидетелства, че междузвездната среда е била предварително обогатена от избухвания на свръхнови звезди, и то в рамките на само няколко милиона години. Тук се имат предвид избухвания на първични свръхнови звезди с маси десетки пъти по-големи от слънчевата. Стойности на различните характеристики на звездното население на тънкия и дебелния диск са публикувани например от Chang et al. (2011).



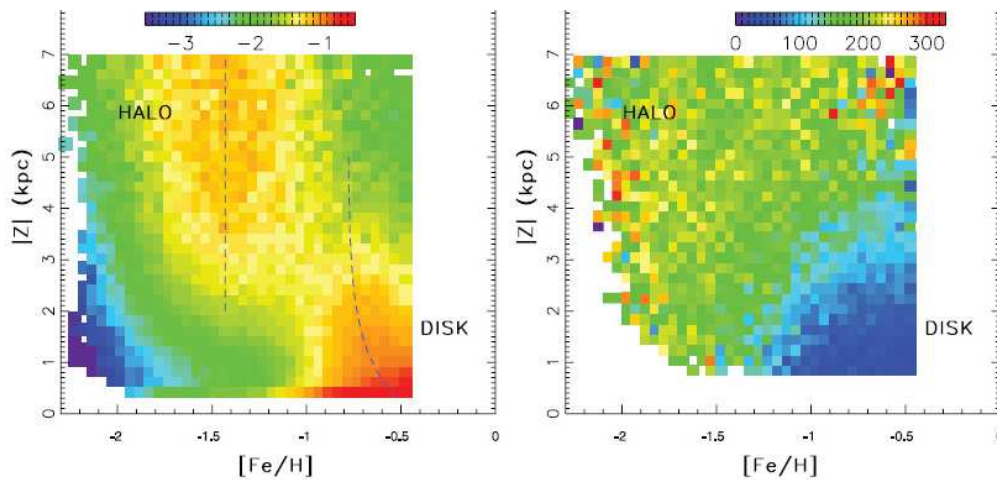
Фиг. 6. Разпределение на металичностите (относително Слънчевата металичност, от -1.5 dex до -0.5 dex) радиално и вертикално спрямо равнината на диска за 2.5 млн. звезди от слънчевата околност. Поведението на металичността показва плавно преминаване от диск през дебел диск към хало. Нарушението на този ход в дясната част на картината съответства на звездния поток Монасерос (Единогор) (Ivezić et al. 2008, Fig.8).

3.2. Съвременна интерпретация

Може да се смята, че съвременната концепция за дебелния диск започва от работата на Ivezić et al. (2008). Анализирайки данните за ефективни

температури и металичности на около 60 000 нормални звезди от спектрални класове F и G от обзора SDSS II, тези автори дават алтернативна интерпретация на структурата на диска на МП, различна от идеята “тънък диск – дебел диск”. Ето преразказ на тяхната гледна точка.

Възможността за описване на разпределенията на металичността и дисперсията на скоростите чрез универсална функция, с независима от Z форма, е изначално подразбираща се: вместо чрез две различни компоненти, данните могат да бъдат интерпретирани чрез единствен диск, макар и с разпределение на металичностите и скоростите по-сложно от гаусиан. (Но данните налагат не-гаусови разпределения даже в традиционните интерпретации.) Обаче, докато разделянето на диска на тънък и дебел все още може да бъде полезно за описването на рязкото изменение на плътността около $Z \approx 1$ кпс, то дисковият профил може просто да се разглежда като единствена, но сложна структура. Ако това е коректно, то следва, че разпределенията на металичностите и скоростите на дисковите звезди (по радиус и височина) са резултат на повече от един процес. Това всъщност е отказ от много-компонентния модел на диска (Фиг.6,7).



Фиг. 7. Разпределение на параметри на звезди от слънчевата околност по металичност и разстояние от галактичната равнина. В ляво - по наблюдаем брой звезди, като броят на използваните звезди е нормиран към единица. Двата максимума извяват халото и диска по металичност на звездното население. В дясно - по орбитални скорости спрямо Слънцето, като скоростта на Слънцето е приета за 220 km/s. Синият максимум съответства на звездите от диска в слънчевата околност. (Ivezić et al. 2008, Fig.9)

В същия аспект Loebman et al. (2011) симулират числено формирането на галактичен диск чрез N -тела и заключват, подобно на резултатите на Schönrich & Binney (2009), че вертикалното изменение на параметрите на звездното население е резултат от миграция. Освен това, те изследват детайлно разпределенията на възрастта, звездната маса, ротационната скорост и металичността като функции на Z за цилиндъричен пръстен от дебелия диска, съответен на отстоянието на Слънцето от центъра на

МП ($7 \text{ кпс} < R < 10 \text{ кпс}$). Тяхната забележителна Фиг.7 (възпроизведена тук като фиг.8) показва как приносът на по-старо и по-бедно на метали звездно население в диска расте с отдалечаване от равнината на диска. Всъщност, тези автори показват, че голяма фракция от звездите в дебелия диск биха могли да са формирани по стечение на обстоятелства другаде и да са заели сегашните си места чрез радиална миграция и това не представя нищо друго, освен вътрешна еволюция на МП.

На базата на своите Фигури 2 и 7 Loebman et al. (2011) заключават още, че радиалната миграция на звездите може да увеличи вертикалните осцилации на звездите спрямо дисковата плоскост, както и да повлияе на техните ротационни скорости. Това съвпада с изводите на Schönrich & Binney (2009) относно химическа еволюция и радиално размесване на звездното население.

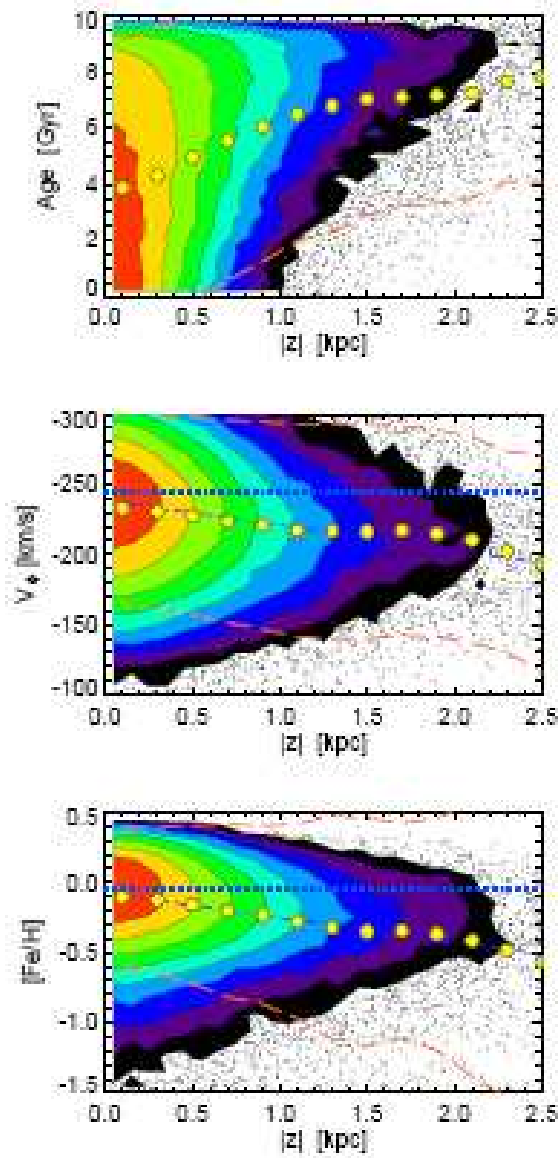
Друг критичен фактор, изследван от Loebman et al. (2011) е радиусът на формиране на звездата в диска. По-старите, бедни на метали, но α -обогатени звезди (приемани за сегашни членове на дебелия диск) се разглеждат като формирани отдавна във вътрешните части на диска, където междузвездната среда е имала ниска металичност. По-късно тези звезди са мигрирали във радиални и вертикални направления, което е довело до наблюдавания в слънчевата околност вертикален градиент на металичността.

По-нататък на фиг.8. тези автори съпоставят възрастта на звездното население с три други величини – радиус на формиране, ротационна скорост и металичност. Те правят това за регион от диска, аналогичен на преходната зона между тънък и дебел диск, разглеждани от Ivezić et al. (2008) и установяват, че “във всички случаи разпределенията не говорят за различни популации”. Тези автори показват, че всички наблюдаеми трендове могат да бъдат обяснени по-скоро чрез направъснатото разпределение на звездното население, отколкото чрез две отделни звездни населения.

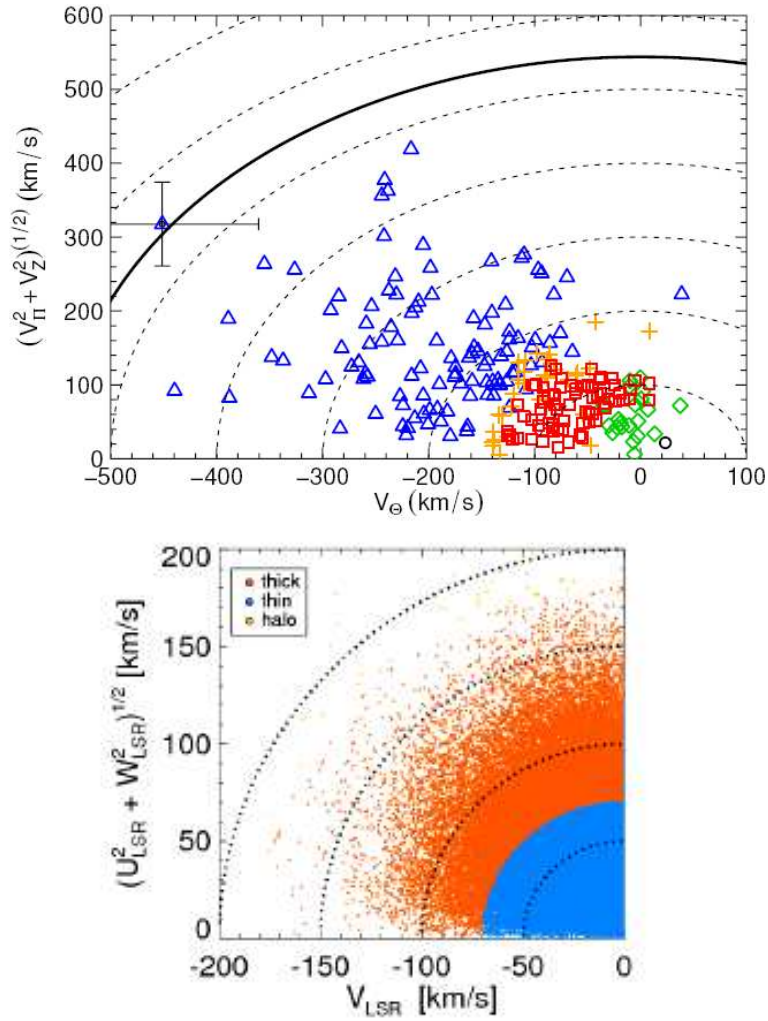
Това обяснение се отличава драстично от типичното и широко прието декомпозиране на диска на Млечния път на две не подобни по между си образувания (показано на фиг.9) и дава съществен и нов поглед върху наблюдателните данни. В този аспект преди това се изказват и Schönrich & Binney (2009): “Моделите на химична еволюция следва да третираат диска като цяло, а не негови индивидуални части”.

За да подсили този възглед, Loebman et al. (2011) представят декомпозиции на ротационната скорост и металичността спрямо възрастта и сравняват теоретичните резултати с наблюдателна извадка за слънчевата околност, взета от обзора “Женева-Копенхаген“ (Holmberg et al 2009). Така те изясняват, че няма корелация между ротационната скорост и металичността, когато извадката е декомпозирана по възраст, както и че няма развитие или нарастване на диска отвътре-навън.

Последната особеност е характерна за модела на Schönrich & Binney (2009), които представят диск, в който звездообразуването започва на всички радиуси едновременно, без развитие отвътре-навън. Нека отбележим антагонизма с мнозинството публикувани модели, където нарастването на диска отвътре-навън е главен параметър. Например, Marston



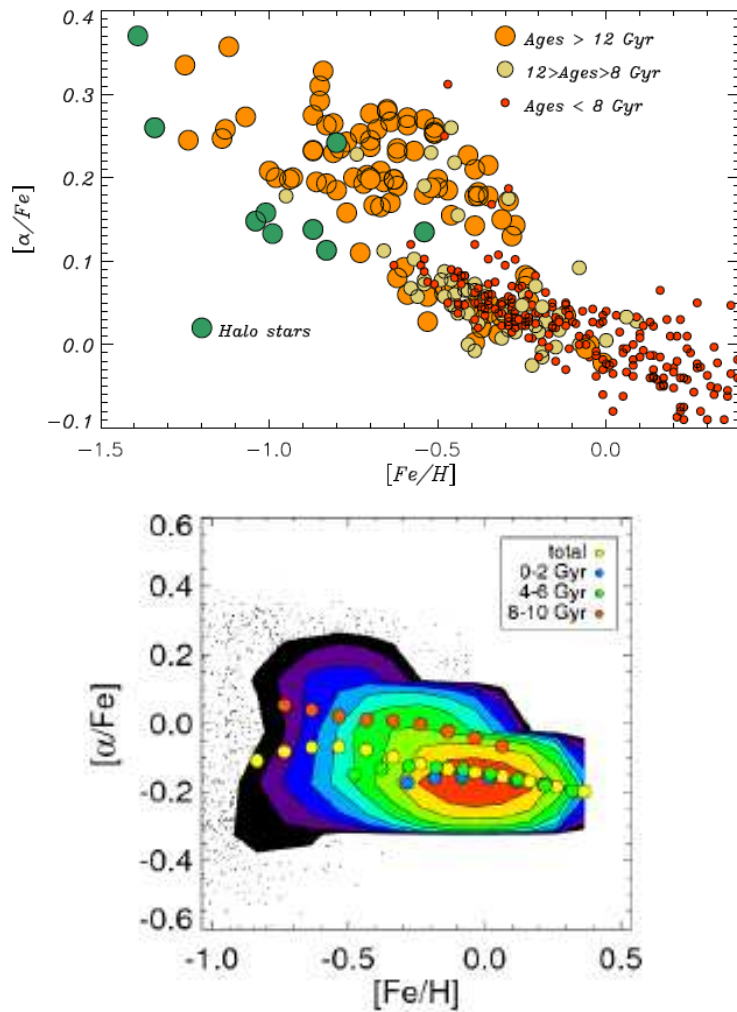
Фиг. 8. Разпределение на моделирано звездно население с различно отстояние от равнината на диска по възраст, орбитална скорост спрямо Слънцето и металичност. Жълтите точки и червените пунктирни линии показват тенденциите и техните 2σ стандартни отклонения. Сините пунктирни линии съответстват на данните за Слънцето (Loebman et al. 2011 Fig.8).



Фиг. 9. Разпределение на звездите от слънчевата околност по орбитални скорости и радиални плюс вертикални скорости (диаграми на Туумре): Горе - по наблюдения, данни на Ruchti et al. (2010). Долу - според моделите на Loebman et al. (2011). Забележителното съгласие на двете диаграми свидетелства за правилността на съвременната еднокомпонентна концепция за диска.

Uchida et al. (2010), както и Vovv et al. (2011) изтъкват пряко-наблюдаеми свидетелства за формиране на галактичните дискове отвътре-навън.

Loebman et al. (2011) показват също така, че приписването на членство в тънкия или дебел диск на базата на кинематика или металичност, както се прави обикновено в изследванията на диска на МП, води до сериозни изкривявания на извадките. Техните Фиг.10 и Фиг.11 демонстрират,



Фиг. 10. Разпределение на звездите по металичност $[Fe/H]$ и обилие на α -елементи $[\alpha/Fe]$. Горне - по наблюдателни данни, компилирани от Hauwood (2008); Долу - според моделите на Loebman et al. (2011). Въпреки доброто качествено съответствие, любопитно е, че в горната картина се наблюдава известна дихотомия (раздвояване) на разпределението.

че при отделяне на звезди по кинематика, извадката се изкривява с надценяване на приноса на по-стари и α -обогатени звезди, а при отделяне, базирано на отношението на обилията $[\alpha/Fe]$, в извадката се оказват две популации – стари звезди и звезди с промеждутъчна възраст. (Вж. Края на Секция 6 за коментар на този специфичен пункт.)

Друг проблем, дискутиран в литературата, касае зависимостта възраст – металичност. И тук звездната миграция изяснява защо тази зависимост се оказва неясна, размита и не може да бъде установена за старите звезди. Тя обяснява и резултата от преразглеждането на разпределението възраст-металичност на Nordström et al. (2004), направено от Haywood (2008), който заключава, че данните са в съгласие само за звезди по-млади от 3 млрд.г. Този резултат съвпада с резултатите от симулациите на Loebman et al. (2011) и силно потвърждава съществеността на радиалното смесване на звездите в околността на Слънцето. Ето още нагледности.

Фигура 11 представя сравнение чрез диаграма на Туумре (Toomre) между това, което предсказва моделът на Loebman et al. (2011) и това, което намират Ruchti et al. (2010): съгласието между теоретичното предвиждане и наблюдателния резултат е много добро. Фигура 12 съпоставя възрастовите разпределения на звездите на диаграмата $[\alpha/Fe] - [Fe/H]$. Симулациите на Loebman et al. (2011) пак съответстват много добре на наблюдателните данни, събрани от Haywood (2008).

Симулациите на Loebman et al. (2011) могат да бъдат характеризирани, както следва. Никакви априорни допускания не са включени в модела – все още той възпроизвежда главните наблюдателни резултати чрез обоснована декомпозиция на диска на два компонента при предполагаеми различни компоненти. Отсъствието в този модел на сливания с други звездни системи означава че те не са необходими за обяснението на цялостната структура на диска. Все пак, докато остатъци от сливания се детектират в диска на МП, тяхното влияние изглежда добре локализирано. Но в замяна на това дискът на Млечния път може да бъде разглеждан като единна сложна структура с разпределение на възрастите зависещо от позицията в Галактиката, което е резултат от радиална миграция на звездите. Така, даже ако първичният дебел диск се е оформил посредством акреция и/или външно динамично разгриване, той изглежда е съществено “замърсен” от мигриращи дискови звезди.

И така, дебел диск със звездна маса около 10 % от масата на тънкия диск се вижда във всички спирални галактики, вкл. МП. В дебелия диск звездите са промеждутъчни по възраст и металичност между звездите от тънкия диск и халото, като повечето от тях изостават по орбитална скорост спрямо звездите от тънкия диск.

Съвременните данни показват, че дебелият и тънкият диск са всъщност единен диск.

4. Бележки

Ета и няколко акцента по цялостната ситуация относно разбирането на строежа и еволюцията на диска на МП.

(1) Моделите, приемащи бурно начало на формирането на диска изглеждат неадекватни. Неотдавна Schönrich & Binney (2009) писаха: “Читателите които искат да вярват в бурния произход на дебелия диск, могат да продължат да правят това. Но те трябва да осъзнаят, че най-простият модел на химико-динамичната еволюция на диска, който съдържа цялата

свързана с него физика, възпроизвежда диска. Следователно, няма абсолютно никакви свидетелства за бурно, насилствено начало“. По-късно Lee et al. (2011) отбелязаха: “Чисто акреционните модели, като този на Abadi et al. (2003), се оказват изключени от наблюдаваните екстрентрицитети на звездите от дебелия диск.“ Аналогичен е изводът на Ruchti et al (2010). Трябва да се има предвид, че според изследването на Cheng et al. (2011) изявеният слаб радиален градиент на металичност в дебелия диск е в съгласие с множество различни сценарии на формиране.

(2) За да възпроизвежда (и предсказва) наблюдаемите характеристики на галактичния диск, един модел трябва да включва връзка между кинематика/динамика, химия, миграция на звезди и звездни купове и параметри на спиралните ръкави.

(3) Химичното маркиране (Bland-Hawthorn et al. 2010) може да се окаже полезен метод за установяване на произхода на галактичния диск. Идеята е да се използва детайлна карта на пространственото разпространение на звезди с различно химично съдържание, която да се асоциира с общи древни звездни агрегати, в които има подобни разпределения на обилията.

(4) Присъствието на допълнителен компонент в диска на МП е идентифицирано като беден на метали дебел диск (Chiba & Beers 2000; Carollo et al. 2010; Ruchti et al. 2011). Обаче, не е ясно дали това е структура, различна от каноничния дебел диск, разглеждан като следствие от акреционен сценарий

(5) Все повече се разпространява ревизирането на предишни изследвания и това позволява подобряване на изводите по специфични въпроси. По отношение на произхода на дебелия диск на МП това се вижда ясно напр в изследването на Gómez et al. (2011).

(6) Звездната миграция не се вписва в класическата (за последните две десетилетия) картина на диска на МП като сложна система от дискове. Това е потвърдено и от Vovv et al. (2011). На базата на спектроскопичен обзор те заключават: “... МП има непрекъснато и монотонно разпределение на дисковите дебелини. Няма дебел диск като чувствително отличаващ се отделен компонент“. Уместно е да се припомни, че централното образуване “бар“ или “балдж“ може да бъде част от еволюцията на диска (Sheng et al. 2010).

(7) Би било много интересно да се направят симулации извън общоприетия космологичен модел. Тази предизвикателна задача би могла да се реши с помощта на една нова концепция за формиране на структури, както внушава Miedema (2011). Като пример може да послужи и работата на Gallo & Feng (2010), където се описва въртенето на Галактиката без привличане на тъмна материя.

(8) Един напълно представителен модел на диска на МП би трябвало да е в съгласие и със съществуването и еволюцията на атомарен водород извън диска, облаци йонизиран водород, спирална структура и бар, диск от тъмна материя, едромасабни деформации на диска (вж. Moni Bidin et al. 2010 и цит. там). Такъв модел би трябвало да е в съгласие и с резултатите от числените симулации.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на Института по астрономия за подкрепата на работата по този обзор.

Литература

- Abadi M. G. et al., 2003, *Astrophys. J.* 597, 21
 Abazajian K. N. et al., 2009, *Astrophys. J. Suppl.* 182, 543
 Assmann P. et al., 2011, arXiv/1103.5459v1
 Barbani B., Woltjer L., 1967, *Astrophys. J.* 150 461
 Bensby T. et al., 2005, *Astron. Astrophys.* 433, 185
 Binney J., Merrifield M., 1998, *Galactic Astronomy*, Princeton Series in Astrophysics
 Bland-Hawthorn J., Krumholz M. R., Freeman K., 2010, *Astrophys. J.* 713, 166
 Bochanski J. J. et al., 2007, *Astron. J.* 134, 2418
 Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M., 2009, *Astrophys. J.* 707, L1
 Bovy J., Rix H.-W., Hogg, D.W., 2011, arXiv:1111.6585v1
 Carollo D. et al., 2010, *Astrophys. J.* 712, 692
 Cheng J.Y. et al., 2011, arXiv:1110.5933v1
 Chiba M., Beers T.C. 2000, *Astron. J.* 119, 2843
 Concejo J., Stanchev O., Georgiev Ts., 2013, AIP Confer.Proc., in print
 Dierickx M., Klement R. J., Rix H., & Liu C. 2010, *Astrophys. J.*, 725, L186
 Di Matteo P., Lehnert M. D., Qu Y., & van Driel W., 2011, *Astron. Astrophys.*, 525, L3
 Gallo C. F., Feng, J. Q., 2010, *J. of Cosmology*, 6, 1373
 Georgiev Ts., Stanchev O., Concejo J., 2012, *Bulg. Astron. J. Suppl.* V.1,
<http://www.astro.bas.bg/AIJ/issues.html> (Paper 1)
 Gilmore G., & Reid N., 1983, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 202, 1025
 Gómez F.A. et al., 2011, arXiv:1105.4231v1
 Haywood M., 2008, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 388, 1175
 Holmberg J., Nordström B., Andersen J., 2009, *Astron. Astrophys.* 501, 941
 Ivezić Ž. et al.: 2008, *Astrophys. J.*, 684, 287
 Just A., Gao S., Vidrih S. 2011, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 411, 2586
 Kobayashi C., Nakasato N., 2011, *Astrophys. J.* 729, 16
 Lee Y. S. et al., 2011, *Astron. J.* 141, 90
 Loebman S.R. et al., 2011, *Astrophys. J.* 737, 8L
 Marcon-Uchida M. M., Matteucci F., Costa R. D. D., 2010, *Astron. Astrophys.* 520, id.A35
 Miedema P.G., 2011, arXiv:1106.0627v1
 Minchev I., Famaey B., 2010, *Astrophys. J.* 722, 112
 Moni Bidin C. et al., 2010, *Astrophys. J.* 724, L122
 Nordström B. et al., 2004, *Astron. Astrophys.* 418, 989
 Read J. I. et al., 2008, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 389, 1041
 Ruchti G.R. et al. 2010, *Astrophys. J.* 721, L92
 Sales L. V. et al., 2009, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 400, L61
 Schneider P., 2006, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, Springer
 Schönrich R., Binney J., 2009, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 399, 1145
 Sheng J. et al., 2010, *Astrophys. J. Let.*, 720, L72
 Smith M.C., Whiteoak S.H., Evans, N.W., 2011, arXiv:1111.6920v2
 Spitzer L., Schwarzschild M., 1953, *Astrophys. J.* 118, 106
 Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A., Drozdovsky I.O., 2005, *Astron. Astrophys.* 431, 127
 Turon C., Primas F., Binney J., Chiappini C., Drew J., Helmi A., Robin A. C., Ryan S. G., 2008, Technical report, Galactic Populations, Chemistry and Dynamics
 Yoachim P., Dalcanton J. J., 2006, *Astron. J.*, 131, 226
 Wielen R., Fuchs B., Dettbarn C., 1996, *Astron. Astrophys.* 314, 438