

С. А. Каплан

Межзвездная газодинамика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 52
ББК 22.6
С11

С. А. Каплан
С11 Межзвездная газодинамика / С. А. Каплан – М.: Книга по Требованию, 2012. – 194 с.

ISBN 978-5-458-36928-2

Предлагаемая книга, насколько автору известно, является первым в мировой литературе систематическим изложением основных идей и методов межзвездной газодинамики. Мы отнюдь не стремились к полноте охвата различных проблем изучения движений межзвездного газа — да это и невозможно в этой бурно развивающейся области астрономии. Цель этой книги — изложить основные методы межзвездной газодинамики, рассматриваемой как раздел таких научных дисциплин как гидродинамика и газодинамика, но специфической по своим применениям. Автор стремился помочь астрономам овладеть теоретическим аппаратом газодинамики, т.е. методами как специально приспособленными для решения астрофизических проблем, так и теми методами этой области физики, которые еще не нашли применения в астрономии, но которые, как можно надеяться, в будущем будут широко там использоваться.

ISBN 978-5-458-36928-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ГЛАВА I

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ДВИЖЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА

Изучение природы межзвездного газа и его движений проводится в настоящее время самыми различными методами. Сюда входят: наблюдения оптических линий поглощения и излучения межзвездного газа; наблюдения в радиодиапазоне (особенно ценные данные дало исследование радиолинии водорода 21 см); наблюдения межзвездного поглощения света звезд и его поляризации; наблюдения движения и структуры туманностей, а также поляризации их излучения; наблюдения межзвездной среды в других галактиках. Более или менее полное представление о распределении и движении межзвездного газа можно составить лишь при анализе всех данных, имеющихся в нашем распоряжении. К сожалению, эти данные не только разнородны, но и отрывочны. В линиях поглощения мы наблюдаем только мало обильные элементы: натрий, кальций, калий, железо и титан, а также молекулы CH и CN ; в линиях излучения: ионизованный водород, азот, углерод, сера. В туманностях наблюдаются также линии ряда других элементов, в радиолинии $\lambda = 21\text{ см}$ наблюдается нейтральный водород. Совсем не наблюдается второй по обилию элемент — гелий; нет никаких наблюдательных данных о наличии в межзвездном пространстве молекул H_2 , которые, вероятно, также встречаются в межзвездном пространстве в большом количестве.

Все данные, которые мы имеем, подвержены значительному влиянию наблюдательной селекции. Мы не можем наблюдать линий поглощения ни в слишком плотных, ни в очень разреженных областях межзвездного газа. В первом случае велико поглощение света звезды, на фоне спектра

которой наблюдается линия поглощения; во втором случае линия поглощения, даваемая газом, слишком слаба. Наблюдая линии поглощения двух облаков газа, находящихся на одном луче зрения, но движущихся с различными скоростями, мы можем разрешить их линии, смещенные друг относительно друга благодаря эффекту Доплера, только в том случае, если относительная скорость облаков больше некоторого предела. Этот предел в настоящее время зачастую больше средней скорости движения облаков. Например, лучшие наблюдения Адамса, могли разрешить облака с относительной скоростью 7—9 км/сек. Еще меньше разрешающая способность радиоспектроскопических наблюдений. Исследовать межзвездный газ в Галактике мы можем лишь на сравнительно небольших расстояниях от Солнца — порядка $2—3 \cdot 10^3$ пс (напомним, что диаметр Галактики $25 \cdot 10^3$ пс), причем чем более удаленные области мы наблюдаем, тем менее уверенны получаемые данные. Правда, последний недостаток отчасти компенсируется наблюдениями межзвездного газа в других галактиках. Радиоастрономические методы позволяют проникать дальше, но пока не могут дать наиболее интересных данных, например скоростей движения облаков межзвездного газа.

Ввиду этого наблюдательные данные о распределении межзвездного газа и об его движениях всегда требуют тщательного анализа, исправления за счет наблюдательной селекции и сопоставления между собой для получения более или менее согласованной картины, отвечающей действительности. Особенно осторожно следует подходить к количественным данным.

Несмотря на эти трудности, в настоящее время общие представления о распределении и движении межзвездного газа довольно уверенны и в дальнейшем вряд ли существенно изменятся. Количественные данные еще недостаточны, однако быстрое развитие техники наблюдений, появление новых наблюдательных методов, накопление данных, получаемых с помощью старых, уже проверенных методов наблюдений, безусловно, в скором будущем значительно увеличат объем тех уверенных количественных данных, которые так необходимы для развития теории.

В этой главе мы рассмотрим качественную картину распределения межзвездного газа, некоторые количественные

данные об его движениях и ряд вопросов динамики межзвездной среды. Изложение отнюдь не претендует на полноту; мы затронем только то, что нам понадобится для понимания цели и методов межзвездной газодинамики.

§ 1. Компоненты межзвездной среды

Пространство между звездами не является пустым — в нем находится газ, космическая пыль, релятивистские частицы космических лучей*), магнитные поля.

Главным компонентом межзвездной среды, определяющим ее основные свойства, является *межзвездный водород*.

Среднее число атомов межзвездного водорода вблизи галактической плоскости $n_H \approx 0,7 \text{ см}^{-3}$. Распределение межзвездного газа очень неоднородно — встречаются флуктуации числа атомов в единице объема от 10^{-2} до 10^{+4} см^{-3} . Вероятно, свыше 90% межзвездного водорода находится в неионизованном состоянии (области H I). Поэтому наиболее мощным методом исследования межзвездного водорода является наблюдение его в радиолинии $\lambda = 21 \text{ см}^{**})$. Остальные 10% межзвездного водорода ионизованы (области H II).

Остальные элементы входят в химический состав межзвездного газа в небольшом количестве. За исключением гелия, содержание которого неизвестно даже приблизительно (гипотетическая оценка 20%), все остальные элементы составляют по массе не более 3—5% от массы водорода. Число этих атомов в единице объема составляет $10^{-3} — 10^{-6} \text{ см}^{-3}$. Наиболее обилен из них кислород (10^{-3} см^{-3}).

С точки зрения газодинамики межзвездный газ можно рассматривать как чисто водородный, однако примесь других элементов, особенно кислорода, азота и углерода, существенна для теплового баланса межзвездного газа с излучением. Кроме того, многие сведения о межзвездном газе в

*) Здесь и дальше под «космическими лучами» понимаются «первичные космические лучи».

**) Здесь мы не приводим описаний радиоастрономических методов исследования межзвездной среды, так как они достаточно полно изложены в книге И. С. Шкловского «Космическое радиоизлучение» [1], к которой мы и отсылаем интересующегося читателя.

значительной мере обязаны наблюдениям именно этих небольших примесей: определение лучевых скоростей по линиям кальция и натрия, температуры по запрещенным линиям кислорода и азота, размеров и структуры различных скоплений газа.

Столь же невелика с газодинамической точки зрения и роль *космической пыли* — маленьких твердых частиц размером порядка 10^{-5} см, полная масса которых не превышает 0,3—1% от массы межзвездного водорода. Однако и исследование космической пыли существенно для анализа свойств межзвездной среды. По-видимому, межзвездная пыль более или менее перемешана с межзвездным газом, хотя относительная концентрация пыли меняется от 0,05 до 1,5%. Скоплению пыли в более плотные облака обычно соответствуют и скопления газа. Ориентировка темных пылевых туманностей свидетельствует об соответствующей ориентировке потоков газа. Наконец, исследование поляризации света звезд при рассеянии и поглощении его на частицах космической пыли, ориентированных магнитным полем, является одним из источников наших сведений о межзвездных магнитных полях. Некоторую роль, в основном косвенную, пылевые частицы играют и в тепловом балансе межзвездного газа. Космическая пыль является катализатором, значительно облегчающим образование молекул H_2 в областях H I [64]. Как мы увидим ниже, столкновение атомов водорода с молекулами является основным механизмом охлаждения газа в областях H I.

Много обсуждался вопрос о роли лучевого давления на частицы космической пыли. В самом деле, как показали расчеты, лучевое давление самых горячих звезд на частицы космической пыли в 10^4 раза больше их гравитационного притяжения. Учитывая, однако, что, во-первых, масса межзвездной пыли меньше 1% массы межзвездного газа; во-вторых, что гравитационное притяжение отдельных, даже массивных звезд мало существенно для межзвездной газодинамики; в-третьих, что, как мы увидим ниже (§ 5), тепловое действие излучения звезды гораздо существеннее ее лучевого давления, — мы можем в дальнейшем пренебречь эффектом лучевого давления на частицы космической пыли. Впрочем, в некоторых проблемах, главным образом космогонических, роль лучевого давления может оказаться и более

существенной — например, оно вызывает диффузию частиц космической пыли через газ.

Межзвездное излучение оказывает весьма существенное влияние на физические свойства межзвездного газа. В областях межзвездного пространства, расположенных недалеко от какой-либо яркой звезды, плотность энергии излучения подсчитывается по известной формуле:

$$\rho_\nu = W e^{-\tau_\nu} \rho_\nu^* = \frac{R_*^2}{4r^2} e^{-\tau_\nu} \rho_\nu^*. \quad (1.1)$$

Здесь W — коэффициент дилуции, R_* — радиус звезды, r — расстояние от звезды до рассматриваемой точки пространства, ρ_ν^* — плотность излучения вблизи поверхности звезды в частоте ν ; множитель $e^{-\tau_\nu}$ учитывает поглощение излучения звезды на пути r в этой же частоте. К сожалению, — и это одна из самых существенных трудностей астрофизики, — мы не знаем распределения энергии в ультрафиолетовой области спектра звезд, в то время как именно ультрафиолетовое излучение звезд, и только оно, определяет физические свойства межзвездного газа. Для самых грубых оценок предполагается, что излучение звезды — планковское, но что «температура» излучения в разных частях спектра различна. Так будем делать и мы, обозначая температуру излучения звезды в ультрафиолетовой области спектра через T_* .

Для определения плотности межзвездного излучения в тех областях пространства, где поблизости нет ярких звезд, следует просуммировать выражения типа (1.1) для всех звезд, видимых из данной точки пространства. Такие расчеты проделывались неоднократно; результаты последних расчетов [2], [3] приведены на рис. 1 (стр. 12). Для приближенных расчетов можно пользоваться для суммарной плотности излучения звезд в наиболее интересной для газодинамики области спектра $1000 < \lambda < 3000 \text{ \AA}$ формулой Планка для $T_* \approx 15\,000^\circ$ с коэффициентом дилуции $W \approx 3 \cdot 10^{-16}$. Проинтегрированная по всему спектру плотность излучения звезд, расположенных в окрестностях Солнца, равна примерно $3,5 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$.

Представление о наличии в межзвездном пространстве *магнитных полей* появилось в 1949 г. Поводом для этого

послужило открытие *поляризации* света звезд. Хотя с тех пор были высказаны и другие веские соображения, подтверждающие гипотезу о межзвездных магнитных полях, исследование поляризации света звезд при рассеянии его на частицах космической пыли по-прежнему является основным источником наших сведений о геометрии этих полей.

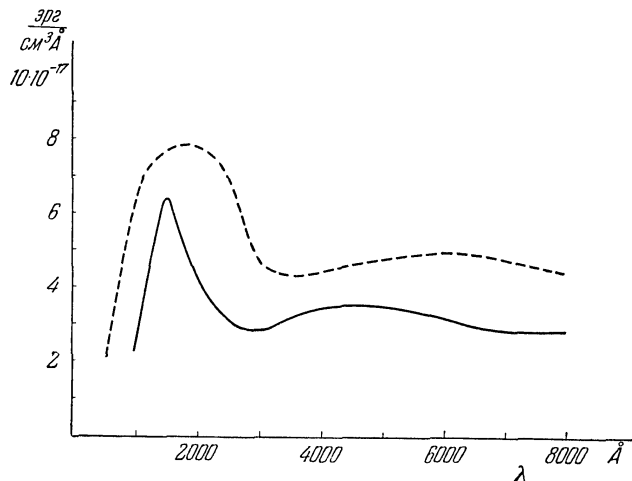


Рис. 1. Рассчитанное распределение энергии в спектре межзвездного излучения. Пунктирная кривая по Ламбрехту [3], сплошная кривая по Каплану [2]. Различие в основном объясняется различными предположениями об ультрафиолетовом излучении звезд и учетом поглощения света. Полная плотность межзвездного излучения по [3] — $4,1 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³, по [2] — $3,1 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³.

Подробное рассмотрение физических свойств космической пыли и механизма поляризации ею рассеиваемого света звезд выходит за рамки настоящей книги [4]. Отметим лишь, что наиболее вероятной является гипотеза о том, что поляризация света звезд создается рассеянием его на удлинённых парамагнитных частицах космической пыли, ориентированных межзвездным магнитным полем. В этом случае степень поляризации пропорциональна средней напряженности магнитного поля, а ее направление — параллельно магнитному полю. Неопределенность данных о свойствах частиц не позволяет нам получить надежные оценки абсолют-

ного значения напряженности магнитного поля, зато его направление определяется более уверенно. На рис. 2 (стр. 14), заимствованном из работы Г. А. Шайна [5], приводится распределение звезд по позиционным углам поляризации ϑ и по галактической долготе l (ϑ — угол между направлением на полюс Галактики и направлением преимущественных колебаний электрического вектора, а следовательно, и направлением магнитного поля). Неравномерное распределение по галактической долготе отчасти отражает влияние наблюдательной селекции — неравномерное распределение горячих звезд, в которых наблюдается поляризация, а также ряд других причин. Неоднородное распределение направления поляризации по углам ϑ отражает особенности геометрии межзвездных магнитных полей.

Более или менее равномерный разброс точек при $l \approx 345$ — 355° (Стрелец) и $l \approx 35$ — 65° (Лебедь) соответствует направлению луча зрения вдоль спиральных рукавов. Очевидно, здесь мы наблюдаем вдоль магнитного поля, и флуктуации его, которые, собственно, и вызывают поляризацию, должны иметь хаотический характер. В общем же значение ϑ концентрируется к 90° . Это значит, что магнитное поле Галактики лежит примерно в плоскости Галактики с дисперсией около 7 — 10° . Однако более тонкий анализ показывает отклонение от этой плоскости. В частности, на рис. 2 можно заметить синусоидальную волну с амплитудой 20° и с максимумом при $l \approx 190^\circ$. По-видимому, это местная большая (~ 1000 пс) флуктуация магнитного поля. Подобным образом можно качественно описать и другие локальные флуктуации межзвездного магнитного поля размерами порядка 10 — 30 пс. С теоретической точки зрения представлял бы большой интерес количественный анализ геометрии магнитного поля, который, в принципе, позволяют сделать данные о межзвездной поляризации, подобные приведенным на рис. 2. К сожалению, до сих пор не было даже попыток такого анализа. К вопросу о связи геометрии межзвездного магнитного поля с формой и структурой распределения межзвездного газа мы еще будем возвращаться неоднократно.

Если наблюдения межзвездной поляризации света звезд позволяют изучать геометрию магнитных полей, но не дают уверенной оценки абсолютных значений их напряженности, то исследования связи космических лучей с межзвездными

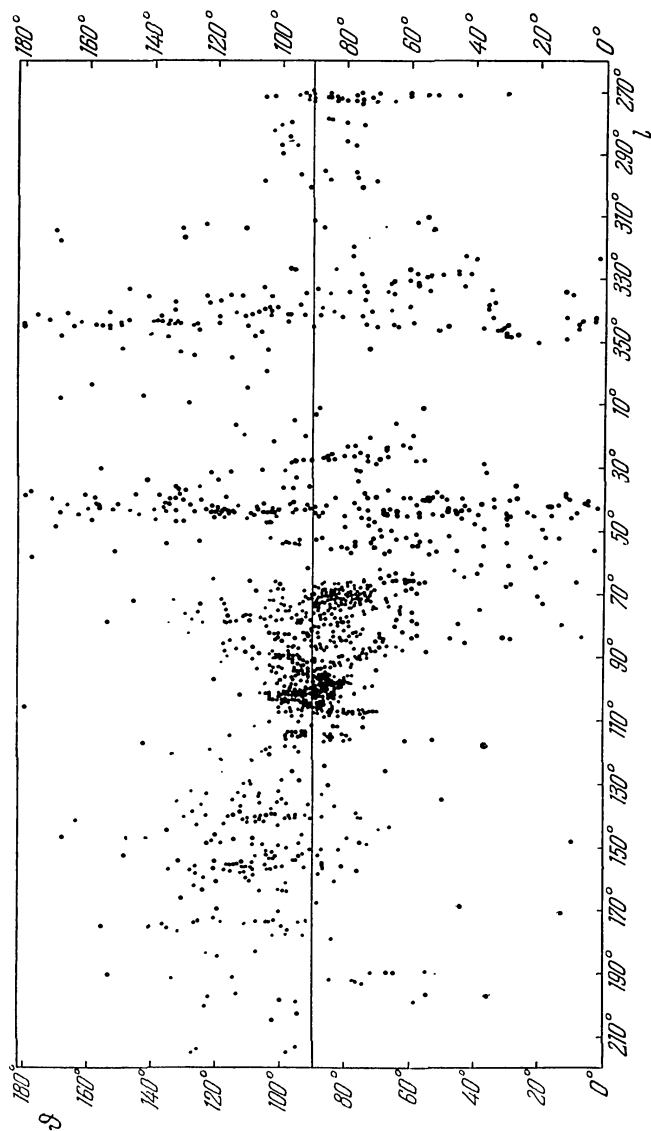


Рис. 2. Распределение позиционных углов ψ направления межзвездной поляризации в зависимости от галактической долготы l . (По Г. А. Шайну [5].)

магнитными полями позволяют надежнее определить напряженность H и менее уверенно — геометрию магнитных полей.

Известно, что полная плотность энергии космических лучей, наблюдаемых на Земле, составляет примерно 10^{-12} эрг/см³, т. е. порядка плотности энергии межзвездного излучения. Кроме того, космическое излучение имеет явно выраженный изотропный характер вплоть до самых больших энергий, по крайней мере до $E \approx 10^{16}$ эв. Отсюда следует, что космические частицы должны удерживаться в пределах Галактики достаточно сильным нерегулярным магнитным полем, ибо космические лучи не могут быть распределены по всей Метагалактике; в последнем случае источники космических лучей имели бы мощность, в 10^4 раз превышающую мощность излучения всех звезд Метагалактики, что невероятно. Так как радиус, описываемый заряженной релятивистской частицей с энергией E , движущейся в магнитном поле, определяется формулой

$$r = \frac{E(\text{эв})}{300H},$$

то для удержания самых жестких частиц в пределах $r \approx 100$ пс необходимо магнитное поле порядка 10^{-6} — 10^{-5} гс [6].

Более уверенные данные получаются из анализа радиоастрономических наблюдений.

Согласно общепринятым воззрениям, космическое радиоизлучение состоит из двух составляющих — *теплового излучения*, концентрирующегося к плоскости Галактики и обязанного своим существованием излучению ионизованного водорода в результате так называемых свободно-свободных переходов, и *сферической составляющей* радиоизлучения, возникающего при магнитнотормозном излучении релятивистских электронов космических лучей в межзвездных магнитных полях. Исследование спектра сферической составляющей космического радиоизлучения показало, что она создается магнитнотормозным излучением релятивистских электронов с энергией в пределах $1,5 \cdot 10^8 < E < 6 \cdot 10^9$ эв, движущихся в магнитных полях с напряженностью $H \approx 10^{-5}$ гс. Значение H здесь выбрано на основании оценки по формуле (2.4). Спектр этих частиц (т. е. их распределение по энергиям)

в среднем определяется формулой [1]

$$N(E) = \frac{K}{E^{\gamma}} = \frac{8,5}{E^{2,6}} \frac{(\text{эв})^{1,6}}{\text{см}^3}. \quad (1.2)$$

Полная интенсивность наблюдаемого на Земле космического радиоизлучения пропорциональна $rKH^{\frac{\gamma+1}{2}} = r \cdot 8,5 \cdot H^{1,8}$, где r — расстояние вдоль луча зрения. Поэтому, если известны распределение плотности космических лучей и размеры системы космических лучей, то анализ изофот космического радиоизлучения позволил бы выявить и флуктуации магнитного поля, причем с достаточной точностью, так как интенсивность радиоизлучения пропорциональна почти квадрату напряженности магнитного поля. К сожалению, такое исследование еще не сделано.

Следует особо отметить, что, как показали наблюдения, плотности энергии межзвездного излучения, межзвездных магнитных полей, космических лучей и, наконец, кинетической энергии движения межзвездного газа — величины одного порядка. Это свидетельствует о тесной взаимосвязи всех компонентов межзвездной среды и о необходимости учитывать их взаимодействие при теоретическом анализе газодинамических движений в межзвездном пространстве.

§ 2. Облачная структура межзвездного газа. Межоблачная среда

Неоднородная структура межзвездной среды проявляется яснее всего во флуктуациях поглощения света, отражающих неравномерность распределения космической пыли. Кроме того, исследование с большой дисперсией межзвездных линий поглощения показало, что они состоят из отдельных компонентов, принадлежащих облакам газа, расположенным на одном луче зрения, но движущихся с различными лучевыми скоростями. На снимках эмиссионных областей межзвездного газа также выявляется их клочковатая структура. Наконец, о том же свидетельствуют поляризационные и радиоастрономические наблюдения. Остановимся несколько подробнее на наблюдательных данных.

Анализ флуктуаций поглощения света звезд и галактик приводит к заключению, что межзвездная среда распределена