

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.854

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ\*)

Т. А. Т. Спулстра

*Радиоизлучение.— Оптическая поляризация.— Внегалактические радиоисточники.— Поляризационные данные пульсаров.— Галактическое непрерывное радиоизлучение.— Поляризация света звезд.— Галактическое магнитное поле.*

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение из космоса наблюдается в широком диапазоне длин волн от метров в радиообласти до  $10^{-10}$  м в области рентгеновского излучения. Нам известно несколько механизмов излучения. Кроме того, принято различать излучение в линиях и непрерывное излучение, которое может быть неполяризованным или поляризованным.

Информацию о масштабе, геометрии и напряженности галактического магнитного поля можно получить, исследуя поляризационные свойства радиоизлучения Галактики, внегалактических радиоисточников и пульсаров и поляризацию света звезд. Понадобилось тридцать лет экстенсивного изучения этих свойств, чтобы понять в рамках простой реалистической модели, как выглядит магнитное поле Галактики.

## РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Рассматриваемое радиоизлучение имеет синхротронную природу<sup>1</sup> и испускается релятивистскими электронами, движущимися по спирали вокруг силовых линий магнитного поля. Интенсивность излучения на определенной длине волны определяется напряженностью магнитного поля и энергетическим распределением космических релятивистских электронов. Мы ожидаем, что в случае межзвездной среды это излучение должно быть линейно поляризовано, т. е. плоскость его колебания имеет предпочтительную ориентацию в пространстве (под прямыми углами к направлению магнитного поля) и степень поляризации, т. е. отношение поляризованной части интенсивности к полной составляет около 72%. Однако в действительности наблюдаемое излучение имеет иные характеристики. Это связано со свойствами магнитного поля и некоторыми эффектами, которые имеют место в межзвездной среде и самом радиоисточнике. При распространении поляризованного сигнала через среду, содержащую

\*) Т. А. Th. Spoelstra, The Galactic Magnetic Field. Перевод с рукописи выполнен А. А. Рузмайкин.

Т. А. Т. Спулстра работает в Гюйгенсовской лаборатории Нидерландского радиоастрономического института (Netherlands Foundation for Radioastronomy) в Стеррвахте (Sterrewacht), Лейден, Нидерланды.

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1977 г.

© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1977 г.

магнитное поле и (медленные) тепловые электроны, направление его поляризации поворачивается на угол  $\psi$ , этот эффект называют фарадеевским вращением.

Фарадеевское вращение  $\psi$  пропорционально произведению плотности тепловых электронов  $N$ , компоненте магнитного поля вдоль луча зрения  $B_{\parallel}$ , размерам вдоль луча зрения  $L$  области, в которой происходит фарадеевское вращение, и квадрату длины волны  $\lambda$ . Иными словами,

$$\psi = KNB_{\parallel}L\lambda^2, \quad (1)$$

где  $K$  — постоянная. Произведение  $KNB_{\parallel}L$  обычно называют мерой вращения поляризованного излучения. Поскольку фарадеевское вращение пропорционально  $\lambda^2$ , то для получения меры вращения необходимо провести наблюдения на различных длинах волн. Если меры вращения известны, в наблюдаемое направление поляризации можно внести поправку на влияние межзвездной среды и найти собственное направление поляризации источника, т. е. то направление, которое можно было бы наблюдать в эмиссионной области. В случае синхротронного излучения это направление перпендикулярно направлению компоненты магнитного поля, расположенной под прямым углом к лучу зрения  $B_{\perp}$ .

Когда наблюдатель смотрит почти под прямым углом к магнитному полю, то ясно, что компонента поля вдоль луча зрения  $B_{\parallel}$  мала. Это означает, что в таком случае малы меры вращения, и в излучении должен наблюдаться относительный максимум. С другой стороны, когда наблюдатель смотрит вдоль магнитного поля, компонента  $B_{\parallel}$  и мера вращения велики. Дополнительную информацию о направлении поля можно получить, зная знак меры вращения. Если мера вращения отрицательна (вращение плоскости поляризации происходит в направлении часовой стрелки), то, как принято считать, магнитное поле направлено от наблюдателя, в то время как в случае положительной меры вращения оно направлено к наблюдателю. Таким образом, мера вращения содержит важную информацию о геометрии магнитного поля.

Мы уже упоминали, что в идеальном случае, в отсутствие фарадеевского вращения, синхротронное излучение линейно поляризовано приблизительно на 72%. Если имеется фарадеевское вращение, то степень поляризации уменьшается, причем эффект зависит от длины волны. Степень поляризации уменьшается также, когда магнитное поле в источнике неоднородно, например, на регулярную компоненту поля накладывается случайная компонента. Следовательно, степень поляризации на различных длинах волн несет информацию о регулярности магнитного поля. И, если поле можно разделить на две компоненты, то можно найти относительные напряженности этих компонент<sup>2</sup>.

Если расстояние до источника излучения и плотность тепловых электронов известны, то, как легко видеть из равенства (1), по мере вращения можно получить напряженность магнитного поля. Поскольку синхротронное излучение не содержит информации о расстоянии, последнее следует находить другим способом. То же можно сказать и о плотности тепловых электронов.

### ОПТИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

В случае оптической поляризации предполагается, что свет звезд рассеивается на межзвездных пылевых частицах. В присутствии межзвездных магнитных полей пылинки ориентируются перпендикулярно силовым линиям<sup>3а</sup>. Свет звезд, проходя через ориентированные таким образом пылинки, оказывается поляризованным в направлении параллельном силовым линиям поля. Поэтому наблюдаемое направление поляризации

на небе тождественно с направлением магнитного поля, спроектированным на небо.

Важно отметить, что если оптическая и радиополяризация возникают в одном и том же объеме пространства, то их поляризационные углы перпендикулярны друг другу: т. е. направление радиополяризации перпендикулярно к  $B_{\perp}$ , а направление оптической поляризации параллельно  $B_{\perp}$ . Это справедливо, если наблюдатель смотрит под некоторым углом к направлению поля и поле состоит из регулярной и случайной компонент, регулярная компонента показывает малые значения  $B_{\perp}$ , а случайная компонента доминирует. Это приведет к тому, что перпендикулярность друг другу оптического и радиополяризационного направлений будет менее выражена.

### ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ РАДИОИСТОЧНИКИ

Поляризационные исследования внегалактических радиоисточников были выполнены большим числом наблюдателей <sup>36, 4-8</sup>. Рассматриваемые источники, например, квазары, меньше размеров лепестка диаграммы направленности телескопа, поэтому из наблюдения на определенной длине волны можно получить лишь полную яркость, степень поляризации

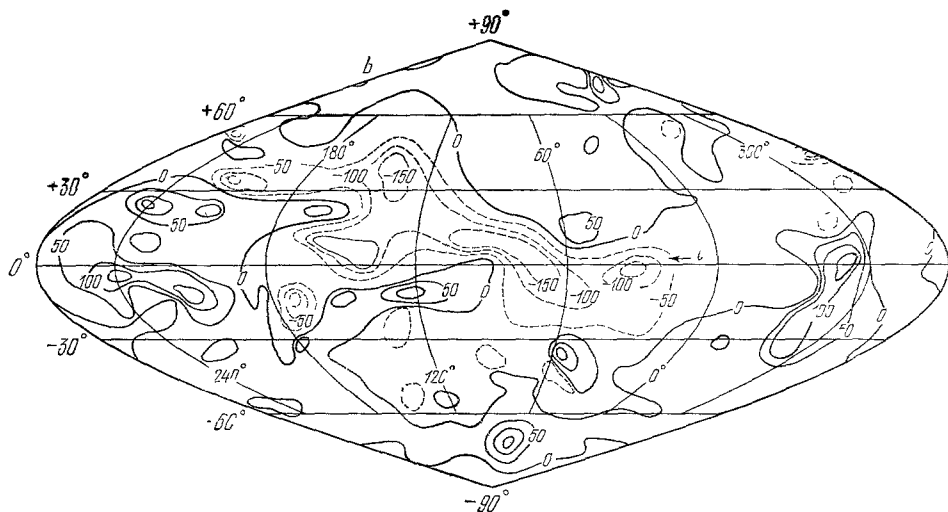


Рис. 1. Меры вращения внегалактических радиоисточников.

Нанесены контуры с шагом  $50 \text{ рад/м}^2$ . Штриховыми контурами отмечены отрицательные значения. Координатами служат галактическая долгота  $l$  и галактическая широта  $b$ . Галактическая плоскость расположена на  $b = 0^\circ$ , центр Галактики:  $l = 0^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ .

и направление поляризации, проинтегрированные по всему источнику: наблюдаемые поляризационные характеристики содержат вклады от источника, от нашей Галактики и, возможно, от межгалактической среды, поскольку радиосигнал распространяется к наблюдателю от излучающих областей внегалактического объекта через межгалактическую среду и Галактику. Вкладом межгалактической среды, по сравнению с вкладами радиоисточника и Галактики, можно пренебречь, поскольку плотность электронов и магнитные поля межгалактического пространства, приводящие к фарадеевскому вращению и деполяризации (см. раздел «Радиоизлучение»), здесь слабее на несколько порядков величины. Поляризационные характеристики испускаемого излучения модифицируются, в основном, благодаря влиянию Галактики. Наблюдения на различных длинах волн обнаруживают влияние межзвездной среды на поляриза-

ционные углы (фарадеевское вращение). В принципе меры вращения есть суммы всех вкладов вдоль луча зрения, но систематическое распределение их величин по галактическим координатам дает представление о свойствах галактического магнитного поля.

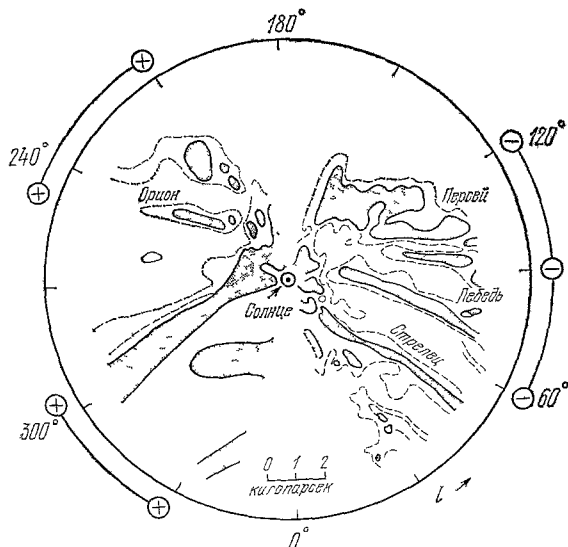


Рис. 2. Часть картины галактической спиральной структуры.

Знаки  $+$  и  $-$  вдоль окаймляющей окружности отмечают области положительных и отрицательных мер вращения, наблюдаемых от Солнца.

направлении созвездия Киля (рис. 2). Если расстояния, вдоль которых генерируются меры вращения, составляют порядка несколько килопарсек (см. ниже), среднее магнитное поле направлено от спиральных рукавов Ориона и Киля к рукавам Лебедя и Персея. Галактическое магнитное поле, следовательно, направлено вдоль спиральных рукавов, если оно наблюдается в большом масштабе.

Меры вращения наибольшей величины наблюдаются на низких широтах, где луч зрения, проходящий через Галактику, достигает наибольших величин. Если типичное значение меры вращения  $50 \text{ рад/м}^2$  при  $N = 0,03 \text{ см}^{-3}$  и  $B = 2 \cdot 10^{-6} \text{ гс}$  (см. раздел «Радиоизлучение»), тогда среднее расстояние вдоль луча зрения составляет 1 кп. парсек.

### ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ ПУЛЬСАРОВ

Поляризационные характеристики пульсаров экстенсивно изучались Манчестером <sup>10, 11</sup>. Пульсары представляют собой галактические объекты, испускающие излучение в виде импульсов, разделенных регулярными интервалами. Они наблюдаются как в радио-, так и в оптическом диапазоне. При распространении пульсирующего сигнала через межзвездную среду его профиль уширяется пропорционально плотности тепловых электронов и расстоянию. Этот эффект характеризуется с помощью меры дисперсии. Если оценить электронную плотность, то по мере дисперсии можно найти расстояние до пульсара. Найденные таким образом расстояния заключены в интервале от нескольких сотен до нескольких тысяч парсек. Поляризационные свойства испускаемого излучения модифицируются под влиянием межзвездной среды. Поэтому можно провести

Контурная карта этих мер вращения показана на рис. 1 и дает представление о распределении величины  $NB_{\parallel}$  (для полного луча зрения в Галактике). Большие меры вращения наблюдаются в направлении  $l \approx 80^\circ$ ,  $b \approx 0^\circ$ . Меры вращения здесь отрицательны, это означает, что усредненное магнитное поле направлено от наблюдателя. Другие максимумы имеются на  $l \approx 240$  и  $310^\circ$ . Поскольку эти значения положительны, то магнитное поле здесь направлено к наблюдателю. Экстремальные значения мер вращения на  $l \approx 80, 240$  и  $310^\circ$  расположены как раз в направлении спиральных комплексов Лебедя и Персея, орионова спирального рукава и спирального рукава в на-

по существу тот же анализ, который был выполнен для внегалактических радиоисточников. Хотя число пульсаров, для которых имеются поляризационные данные, значительно меньше, распределение знаков мер вращения на небе хорошо согласуется с распределением, полученным для внегалактических радиоисточников (см. рис. 1). Меры вращения для пульсаров на высоких широтах приблизительно в два раза меньше, чем меры вращения внегалактических радиоисточников. Поляризационные данные пульсаров показывают, что галактическое магнитное поле направлено грубо от  $l \approx 270^\circ$  к  $l \approx 90^\circ$ . Это согласуется с результатами для внегалактических радиоисточников.

### ГАЛАКТИЧЕСКОЕ НЕПРЕРЫВНОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Непрерывное радиоизлучение Галактики испускается межзвездной средой и не связано с дискретными источниками. На рис. 3 представлена контурная карта распределения яркости на длине волны  $2\text{ м}^{12}$ . Помимо широкой полосы испускания, связанной с галактической плоскостью (галактическая широта  $b = 0^\circ$ ), имеются крупные особенности, простирающиеся к высоким широтам. Эти особенности частично связаны с близлежащими большими остатками очень старых сверхновых (т. е. взорвавшихся звезд). Такие остатки сверхновых представляют собой оболочки, расширяющиеся вместе со своим веществом и полями в межзвездную среду<sup>13</sup>. Некоторые из этих оболочек, имеющих вид бесформенных петель, показаны на рис. 3. Оказывается, что наблюдаемое распределение яркости для этих оболочек зависит от ориентации усредненного магнитного поля, окружающего оболочку, по отношению к лучу зрения<sup>13, 14</sup>. Хотя число этих объектов очень мало, их анализ показывает, что магнитное поле направлено приблизительно к  $l = 36^\circ$ . Однако в данном случае речь идет о поле, расположенном значительно ближе к Солнцу, чем магнитные поля, исследуемые с помощью пульсаров и внегалактических источников. Соответствующие расстояния не превышают нескольких сотен парсек от Солнца.

Более детальное исследование галактического магнитного поля можно провести, используя наблюдения линейной поляризации на пяти длинах волн, покрывающие почти половину неба, видимого в северных широтах<sup>15</sup>. Вот эти длины волн: 73,5, 65, 49, 37,5 и 21,2 см. Небольшие участки небесной сферы наблюдались на еще большем числе длин волн. Из полученных данных были рассчитаны меры вращения, которые показаны для части неба на рис. 4. Распределение наблюдаемых мер вращения имеет сложный вид: кажется, что не существует связи с особенностями, показанными на рис. 3, для распределения полной интенсивности. Величины этих мер вращения ниже найденных мер для внегалактических радиоисточников и пульсаров. Если типичное значение меры вращения равно  $8\text{ рад/м}^2$  при  $N = 0,03\text{ см}^{-3}$  и  $B = 2 \cdot 10^{-6}\text{ гс}$ , то магнитное поле, с которым связаны поляризационные наблюдения, расположено приблизительно на расстоянии 30 парсек от Солнца. Таким образом, сложная картина распределения мер вращения указывает на локальные вариации произведения  $B_{\parallel}$  и  $N$ . Если типичный масштаб вариаций на рис. 4 равен  $5^\circ$ , то отсюда следует, что характерный размер ячейки для вариации магнитного поля и электронной плотности в межзвездной среде составляет 30 парсек.

Если известны меры вращения, то можно найти собственный поляризационный угол области излучения. Отсюда, используя известные свойства синхротронного излучения (см. раздел «Радиоизлучение»), можно получить распределение спроектированного на небо магнитного поля  $B_{\perp}$ .

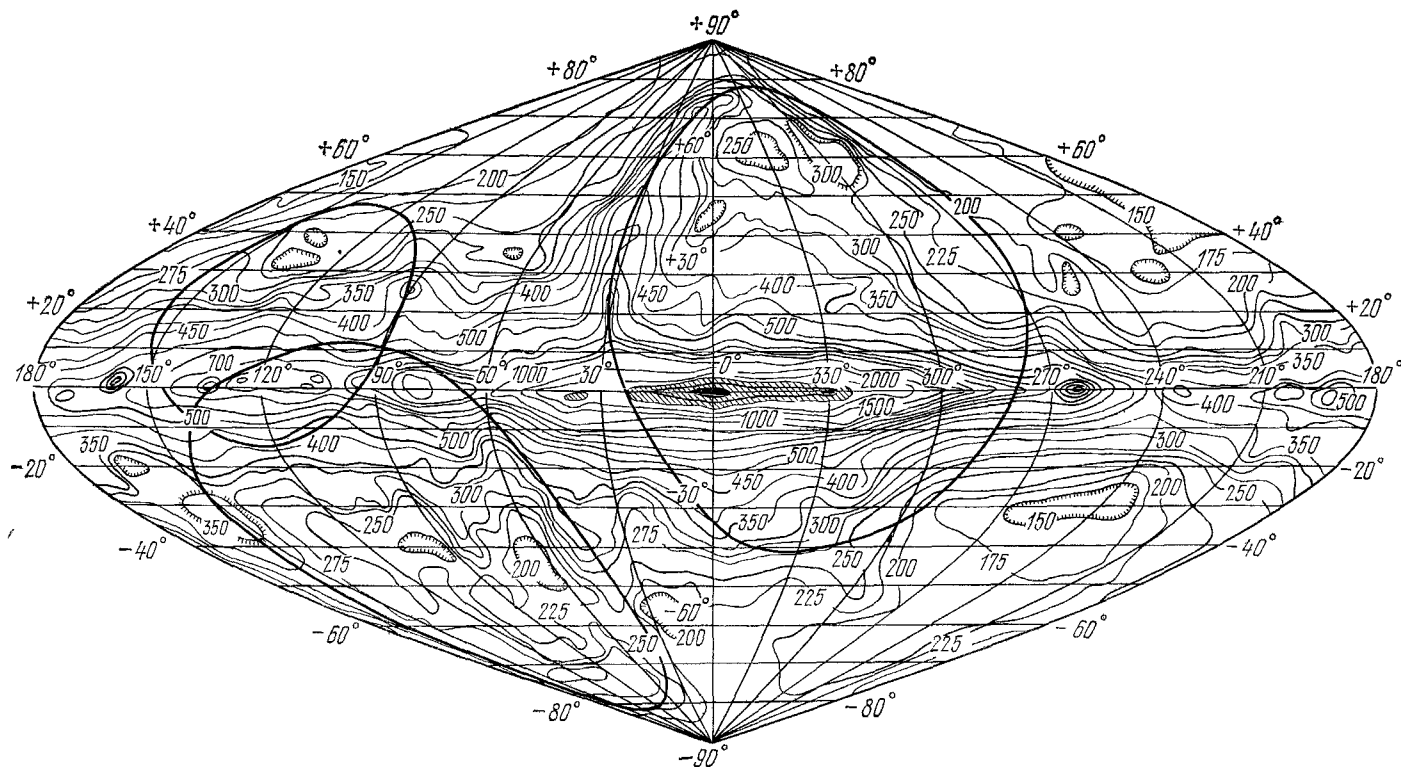


Рис. 3. Яркостное распределение полной интенсивности галактического непрерывного излучения по длине волны 2 м. Цетли неправильной формы отмечают контуры оболочечноподобных особенностей. Интенсивности даны в единицах яркостной температуры ( $^{\circ}\text{K}$ ).

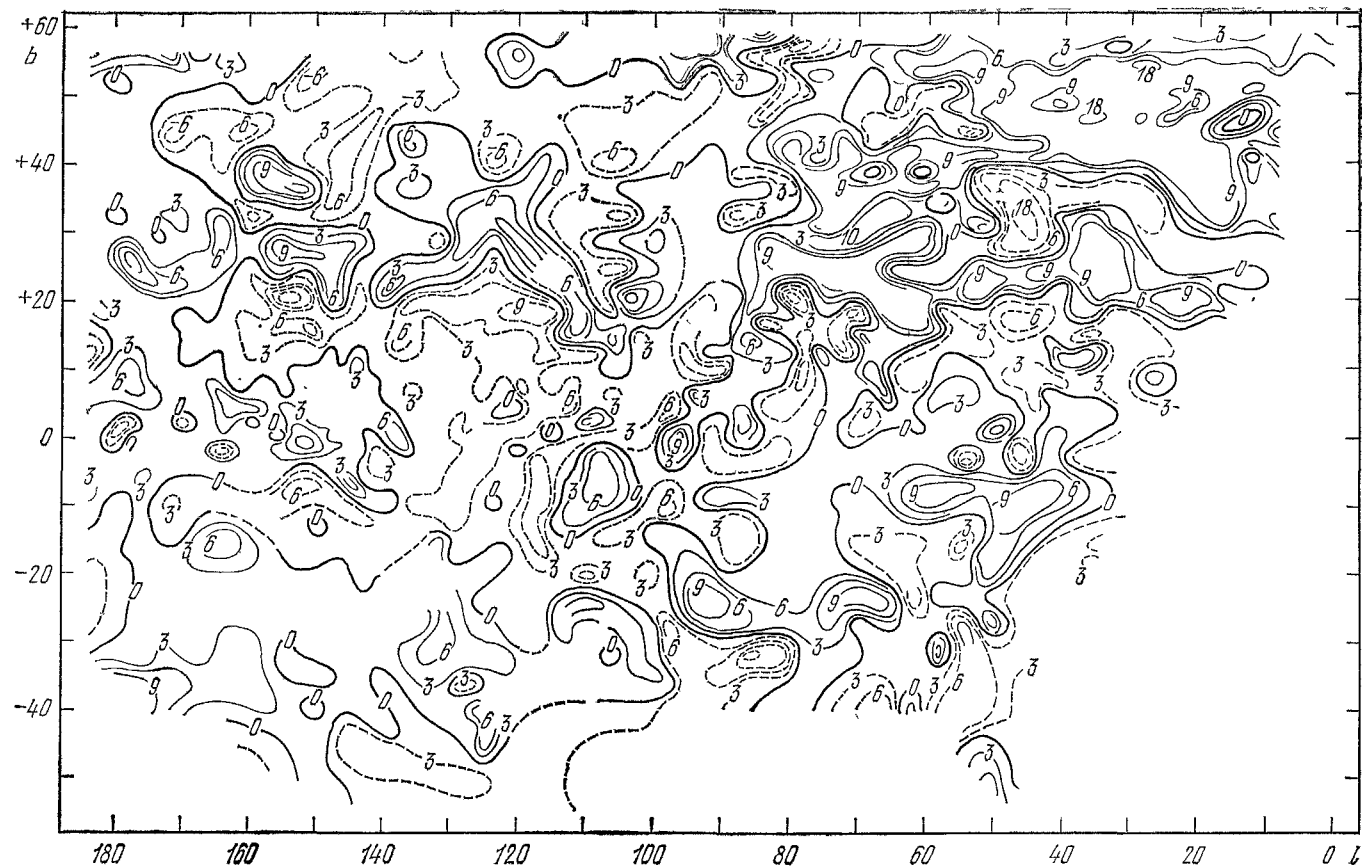


Рис. 4. Меры вращения для галактического непрерывного радиоизлучения.  
Нанесены контуры с шагом  $3 \text{ рад/м}^2$ . Штриховыми контурами отмечены отрицательные значения.

Это показано на рис. 5. Контуры показывают распределение полной интенсивности на длине волны 37,5 см<sup>16</sup>.

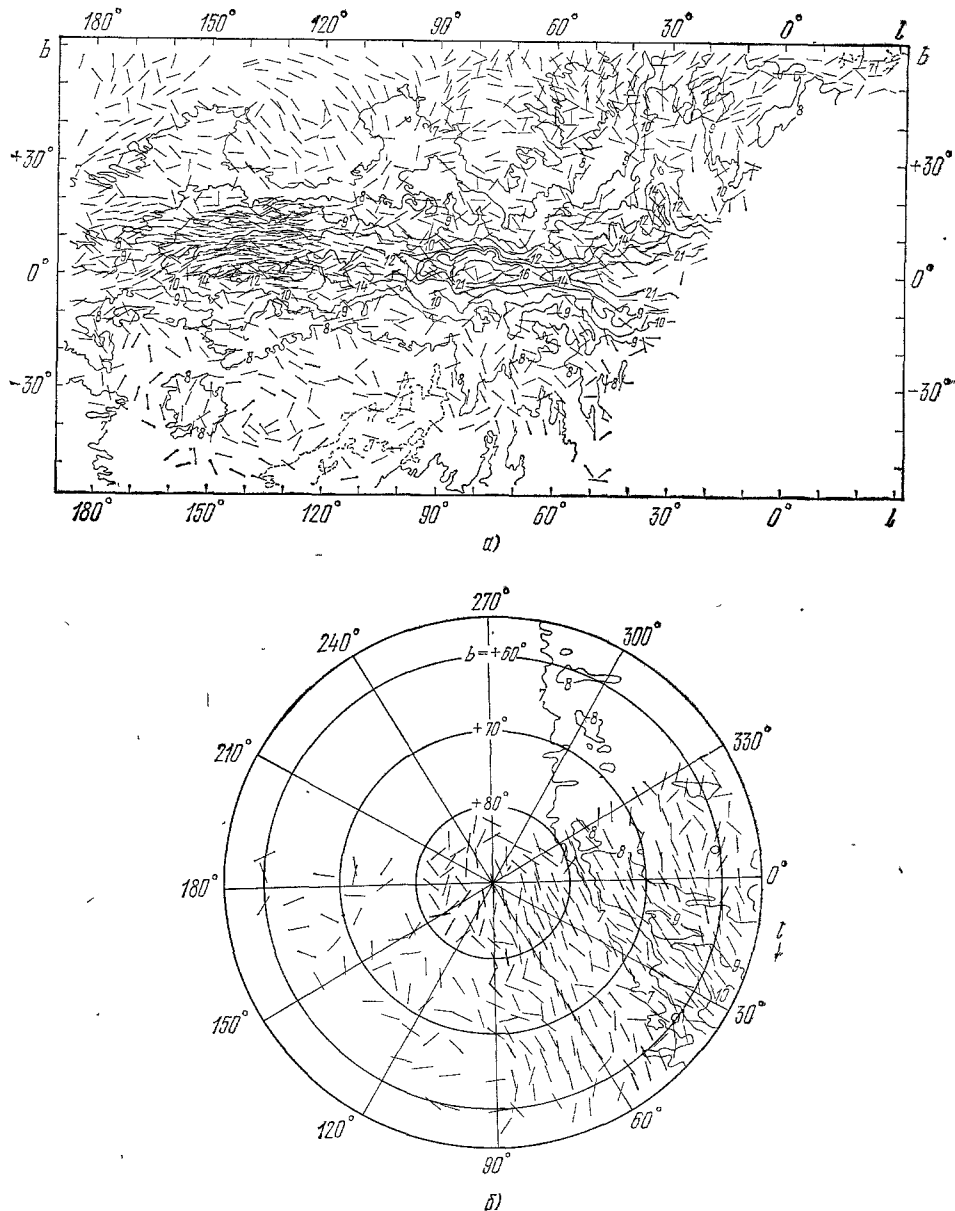


Рис. 5. а) Направление  $B_{\perp}$  как функция координат (контуры показывают яркостное распределение полной интенсивности на длине волны 37,5 см в °К; ср. рис. 3); б) то же, что и на рис. а), но для  $b \geq 60^\circ$ .

Наиболее примечательными на рис. 5 являются области  $b \geq +60^\circ$  и  $l \approx 140^\circ$ ,  $b = +8^\circ$ , в которых направление  $B_{\perp}$  очень регулярно. В области  $90^\circ \leq l \leq 180^\circ$ ,  $b \geq 60^\circ$ , где картина более нерегулярна, поляризационная интенсивность низка (см. ниже). В замечательной области  $l \approx 140^\circ$ ,  $b = +8^\circ$  меры вращения очень малы (см. рис. 4), что указывает на низкие значения  $B_{\perp}$  компоненты магнитного поля вдоль луча зрения. Это озна-



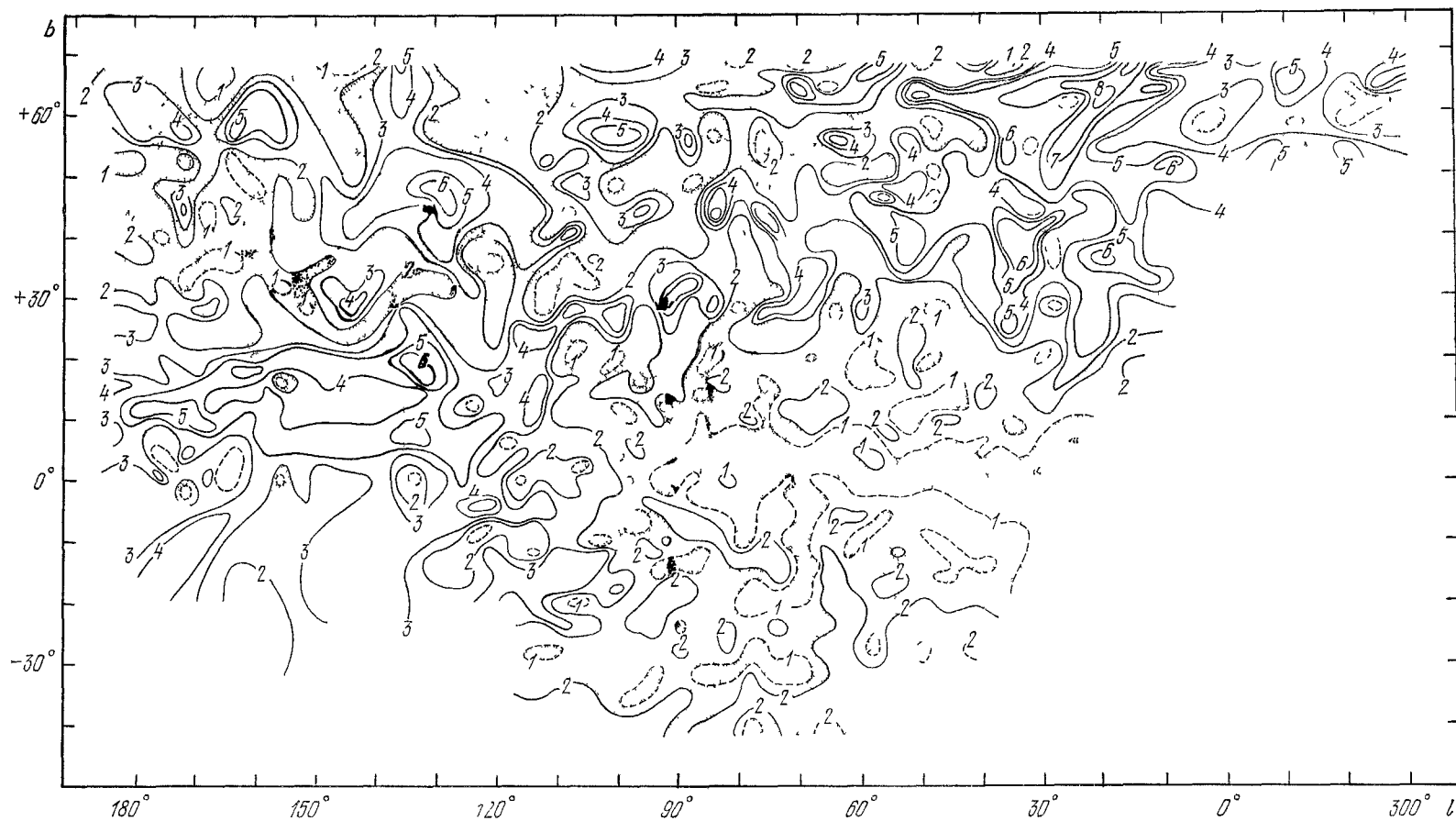


Рис. 6. Степень поляризации на длине волны 21,2 см.

Изображены контуры с шагом 6%. Заштрихованы области, в которых интенсивность линейно поляризованного излучения была на пределе регистрации.

чает, что в направлении  $l \approx 140^\circ$  мы смотрим перпендикулярно локальному галактическому магнитному полю<sup>17</sup>. Кроме того, отсюда следует, что магнитное поле ориентировано вдоль Млечного Пути, проекции,

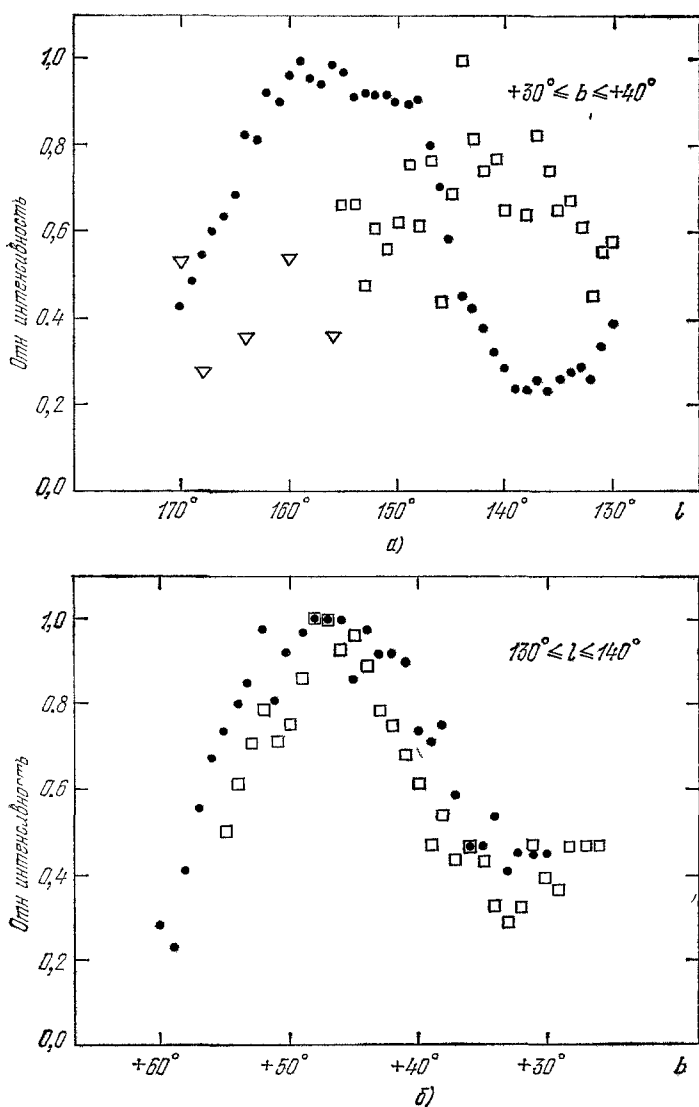


Рис. 7. Соотношение между полной интенсивностью на длине волны 37,5 см (кружки) и поляризованной интенсивностью на длине волны 21,2 см как функция галактических координат.

Вертикальный масштаб (квадратики и треугольники) произволен: максимум дает единичную интенсивность. Треугольниками показаны данные, для которых неопределенность приблизительно в 3 раза больше, чем для квадратов. На рис. а) данные для каждой долготы были усреднены по указанному широтному интервалу.

галактической плоскости на небо, т.е. магнитное поле направлено параллельно плоскости Галактики. Регулярное распределение  $B_{\perp}$  при  $b \gtrsim +60^\circ$  также подтверждает этот результат. Однако на высоких широтах влияние больших особенностей (старых остатков сверхновых), указанных на рис. 3, еще играет важную роль. Это создает трудности при попытках непосред-

ственного определения численных значений на основании имеющихся наблюдательных данных и теоретических соображений. Следует отметить, что направление магнитного поля согласуется с результатами, полученными для галактических оболочек (см. ниже): оба метода дают направление  $l \approx 45^\circ$ .

Большую информацию можно извлечь из знания вариации степени поляризации с длиной волны. Хотя в идеальном случае она составляет около 72%, даже на самой короткой длине волны (21,2 см), для которой проведены наблюдения, поляризация мала (см. формулу (1)). На больших длинах волн степень поляризации еще ниже (а фарадеевское вращение, связанное с деполяризацией, выше). На рис. 6 представлена степень поляризации на длине волны 21,2 см для части неба. Сложное распределение процентной поляризации выглядит в сильной степени несвязанным со структурами в полном излучении (см. рис. 3). Самые низкие значения достигаются вблизи галактической плоскости. Это совершенно естественно, поскольку межзвездная среда сильнее всего влияет на излучение в галактическом диске. Тем самым здесь следует ожидать наибольшей деполяризации. Самая высокая степень поляризации ожидается там, где наблюдатель смотрит перпендикулярно локальному магнитному полю, т. е. там, где оно минимально. Вблизи галактической плоскости это происходит на  $l \approx 140^\circ$ , где достигаются значения до 20%. Детальный анализ показывает, что на высоких широтах распределение степени поляризации тесно связано с крупномасштабными оболочками, упомянутыми на рис. 3<sup>13, 18</sup>. В направлении на эти оболочки наблюдаются максимумы в распределении степени поляризации. Иногда эти максимумы показывают несколько различные профили, если рассмотреть интенсивность как функцию галактических координат, но это можно легко объяснить в терминах деполяризации внутри оболочки (рис. 7)<sup>13</sup>.

Наблюдаемое излучение исходит из среды, в которой происходит как испускание, так и деполяризация. Наблюдаемая степень поляризации всегда ниже, чем теоретически возможная максимальная степень поляризации. Это различие означает, что на регулярное поле накладывается случайное поле той же или несколько большей величины или что распределение электронов неоднородно, или оба эти фактора. Из анализа зависимости поляризации от длины волны найдено, что масштаб изменений случайной компоненты магнитного поля заключен в интервале от 10 до 100 парсек. Это согласуется с приведенной выше оценкой 30 парсек. В качестве разумной оценки можно принять в таком случае величину 50 парсек<sup>19, 20</sup>.

### ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ЗВЕЗД

Поляризация света звезд была исследована в связи с результатами, которые обсуждались в предыдущем параграфе. Для интервалов  $30^\circ \times 30^\circ$  в галактических координатах изучалась разность между собственными оптическими и радиополяризационными углами<sup>19, 20</sup> (см. раздел «Оптическая поляризация»). Результаты схематически представлены на рис. 8. Здесь область неба, для которой имеются наблюдения, обсуждавшиеся в разделе «Внегалактические радиоисточники», разделена на квадраты  $30^\circ \times 30^\circ$  по  $l$  и  $b$ . В каждом квадрате дано соотношение между направлениями радио- и оптической поляризации (светлые квадратики означают, что в этой области нет достаточного числа наблюдений). Знак  $\perp$  указывает, что предпочтительная разность углов близка к  $90^\circ$ , знак  $\parallel$  — что оба направления параллельны, и знак  $\bigcirc$  говорит об отсутствии предпочтительной разности. Комбинация двух знаков показывает,

что существует тенденция к перпендикулярности или параллельности. Жирным знаком отмечена область, где это соотношение определено экстремально хорошо.

Из рис. 8 видно, что в области  $120^\circ < l < 150^\circ$ ,  $-30^\circ < b < 30^\circ$  оптические и радиополяризационные углы с хорошей точностью перпендикулярны друг другу. Это и есть та область, где мы смотрим перпендикулярно локальному галактическому магнитному полю (см. предыдущий раздел). В соседних областях перпендикулярность несколько меньше

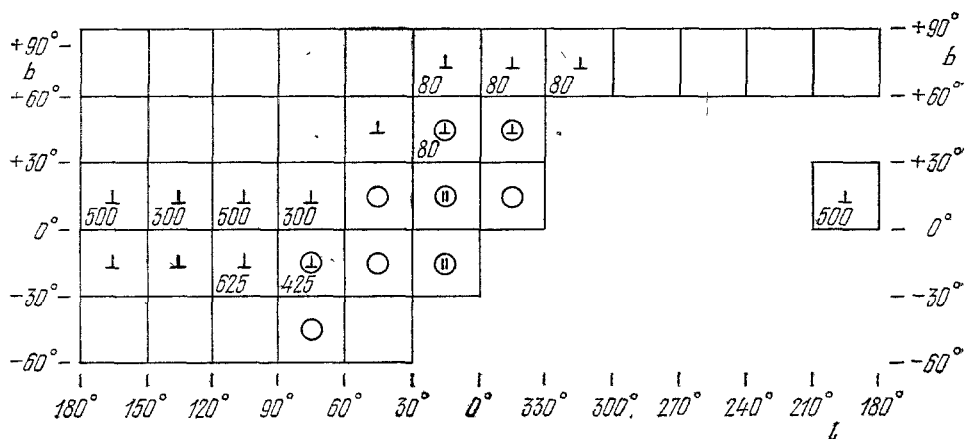


Рис. 8. Соотношение между направлениями оптической поляризации и линейной поляризации галактического радиоизлучения.

Объяснения обозначений см. в тексте. Числа в квадратах указывают расстояние, в пределах которого галактическое магнитное поле в основном определено данными результатами.

выражена. Иные результаты получались для области  $330^\circ < l < 90^\circ$ ,  $-60^\circ < b < +60^\circ$ , где резко заметно отсутствие определенного соотношения. Это может указывать на то, что луч зрения здесь составляет малый угол с локальным регулярным магнитным полем и доминирует случайная компонента поля.

Как уже упоминалось, оценки расстояний до галактического магнитного поля довольно неопределенны и трудны. Однако, если поляризация возникает в одном и том же месте, направления оптической и радиополяризации должны быть перпендикулярны друг к другу. Для большого числа используемых здесь источников имеется информация о расстояниях. В таком случае разность между направлениями оптической и радиополяризации как функция расстояния дает некоторое указание о пространственных параметрах локального галактического магнитного поля. Эти оценки расстояния представлены в соответствующих квадратах рис. 8.

### ГАЛАКТИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Описанные наблюдения говорят в пользу продольного магнитного поля, хотя к регулярной компоненте следует добавить случайную компоненту (см. раздел «Внегалактические радиоисточники»). При наблюдении в большом масштабе (порядка нескольких килопарсек) это поле направлено вдоль галактических спиральных рукавов. Вблизи Солнца наблюдаемое поле направлено грубо от  $l = 270^\circ$  к  $90^\circ$  и параллельно галактической плоскости. Этот результат основан на наблюдательных данных, полученных для нескольких десятков пульсаров (которые расположены значительно ближе к наблюдателю). Изучение галактического непрерывного

радиоизлучения и оптической поляризации показывает, что поле направлено к  $l \approx 40^\circ$ . Это поле ясно отражено в распределении оптических поляризационных углов, приведенном на рис. 9<sup>20</sup>, где также дана картина, спроектированная на небо. Направление поля на рис. 9, как показывает

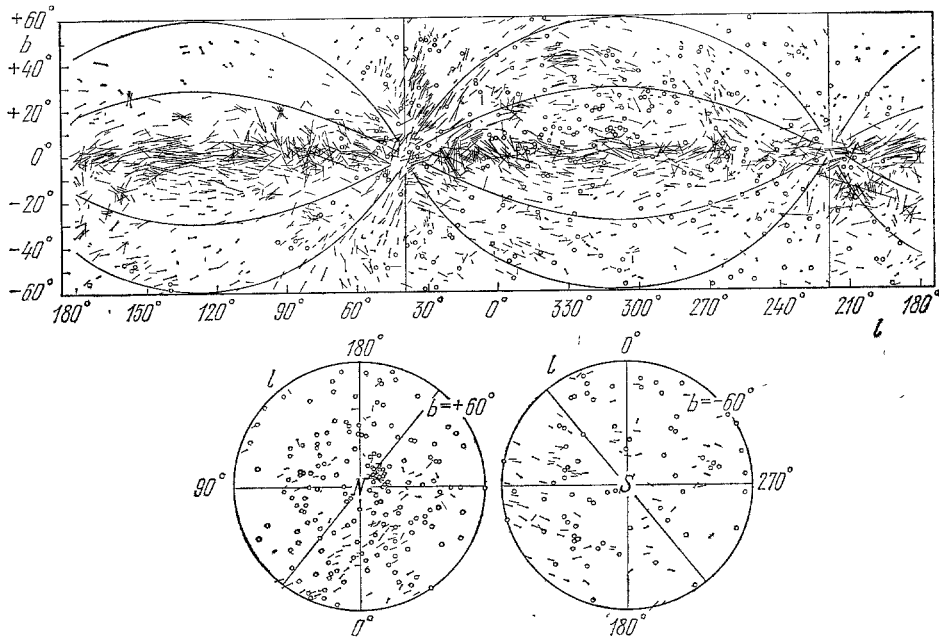


Рис. 9. Картина продольного магнитного поля, направленного к  $l = 39,1^\circ$ , в проекции на небо, полученная из оптических поляризационных данных. Направление каждого «вектора» указывает поляризационный угол, тогда как его длина показывает степень оптической поляризации.

расчет, использующий картину оптических поляризационных углов<sup>19</sup>, совпадает с  $l = 39,1^\circ$ . Это поле погружено в межзвездную среду вплоть до расстояний приблизительно 500 парсек от Солнца и тем самым расположено ближе к нам, чем поле, найденное с помощью внегалактических источников и пульсаров. Переход между двумя областями и детали галактической структуры для этой части Галактики, которая так близка

Параметры галактического магнитного поля

Метод	Направление поля	Расстояние от Солнца
Поляризация галактического радиоизлучения Поляризация света звезд Ориентация очень старых близких остатков сверхновых	50° 39,1° 36°	500 парсек
Меры вращения внегалактических радиоисточников Меры вращения пульсаров	94° 94°	Килопарсеки
Напряженность регулярной компоненты $2 \cdot 10^{-6}$ гс, напряженность случайной компоненты $2 \cdot 10^{-6}$ гс, масштаб вариации случайной компоненты 50 парсек.		

к Солнцу, неясны. Однако пространственное распределение пульсаров вне локальной области 500 *парсек* и внутри Галактики оправдывает точку зрения, согласно которой увеличение наблюдательной информации поможет обнаружить детальную связь между галактической структурой и галактическим магнитным полем. Сводка результатов современных исследований представлена в таблице.

### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Очевидно, что описанная в этой статье продольная модель магнитного поля Галактики не является окончательно завершенной. По мере роста количества и качества наблюдательного материала параметры модели могут изменяться. Мы постарались собрать все наблюдательные данные, которые содержат достаточно информации, с помощью которой можно получить сведения об общем магнитном поле Галактики. Для небольших частей неба имеются дополнительные данные, например, поляризация эмиссионных линий в плотных облаках (эффект Зеемана). Но этих данных пока недостаточно для изучения крупномасштабных свойств. С другой стороны, существующие продольные модели подтверждаются представленными результатами, в то время как модели спирального типа (с магнитными силовыми линиями, накрученными вдоль спиральных рукавов) противоречат различным наблюдениям<sup>10, 11, 13, 19</sup> и потому могут быть исключены из дальнейшего анализа.

Различие в направлении галактического магнитного поля в локальной области и более удаленных областях будет изучаться дальше. Не исключено, что галактическое магнитное поле, направленное вдоль спиральных рукавов, искажается в локальной окрестности, например, взрывами сверхновых, остатки которых наблюдаются в виде больших петель (см. раздел «Внегалактические радиоисточники» и рис. 3)<sup>21</sup>.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **3**, 297 (1965); то же: *УФН* **87**, 65 (1965).
2. B. J. Burn, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **133**, 67 (1966).
3. а) L. Davis, Jr., T. L. Greenstein, *Astrophys. J.* **114**, 206 (1951).  
б) R. C. Bignell, *Astron. J.* **78**, 1058 (1973).
4. F. F. Gardner, D. Morris, J. B. Whiteoak, *Austr. J. Phys.* **22**, 843 (1969).
5. S. Mitton, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **155**, 373 (1972).
6. D. Morris, H. Tabara, *Publ. Astron. Soc. Japan* **25**, 295 (1973).
7. J. P. Valée, P. P. Kronberg, *Astron. and Astrophys.* **43**, 233 (1975).
8. W. E. Wright, Ph. D. Thesis (California Institute of Technology, 1973).
9. G. Gómez-González, M. Guélin, *Astron. and Astrophys.* **32**, 441 (1974).
10. R. N. Manchester, *Astrophys. J.* **172**, 43 (1972).
11. R. N. Manchester, *ibid.* **188**, 637 (1974).
12. T. L. Landecker, R. Wielebinski, *Austr. J. Phys., Suppl.* **16** (1970).
13. T. A. Th. Spoelstra, *Astron. and Astrophys.* **21**, 61 (1972).
14. T. A. Th. Spoelstra, *ibid.* **24**, 149 (1973).
15. W. N. Brouw, T. A. Th. Spoelstra, *Astron. and Astrophys., Suppl. Ser.* (1976) (в печати).
16. E. M. Berkhuijsen, *Astron. and Astrophys.* **14**, 359 (1971).
17. E. M. Berkhuijsen, W. N. Brouw, C. A. Muller, J. Tinbergen, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **17**, 465 (1965).
18. T. A. Th. Spoelstra, *Astron. and Astrophys.* **13**, 237 (1971).
19. T. A. Th. Spoelstra, W. N. Brouw, *ibid.* (1976) (послано в редакцию).
20. T. A. Th. Spoelstra, доклад на симпозиуме «Проблемы магнитных полей в космосе» (Крым, 6—11 апреля 1976 г.).
21. J. P. Vallée, P. P. Kronberg, *Nature* **246**, 49 (1973).

## ДОПОЛНЕНИЕ К ПЕРЕВОДУ

Магнитное поле, несомненно, играет важнейшую роль в явлениях, происходящих в Галактике. Достаточно указать на проблему удержания космических лучей<sup>1</sup> и звездообразование<sup>2</sup>. И хотя сам факт существования магнитного поля Галактики общепризнан, реальные наблюдательные доказательства, позволяющие судить о величине и геометрии поля, появились лишь 10—15 лет назад. В последние годы объем и интенсивность наблюдений, связанных с исследованием магнитного поля Галактики, резко возросли в связи с бурным развитием радиоастрономии. Это прежде всего поляризацционные исследования нетеплового (синхротронного) радиоизлучения Галактики, в понимание природы которого большой вклад внесли советские ученые<sup>3,4</sup>. Ценнейшая информация о магнитном поле извлекается из изучения фарадеевского вращения радиоизлучения внегалактических радиоисточников и квазаров. И, наконец, превосходным магнитометрическим инструментом оказались пульсары. Отношение меры фарадеевского вращения пульсара, которая пропорциональна интегралу  $\int B_{\parallel} n_e dl$ ,

к его мере дисперсии  $\int n_e dl$  прямо дает напряженность усредненного магнитного поля среды, лежащей на пути от пульсара в наблюдателю. Анализ этих методов и следующих из них результатов относительно величины и геометрии крупномасштабного магнитного поля Галактики и посвящен обзор голландского радиоастронома Т. Спультри, активно работающего в этой области.

Следует подчеркнуть, прежде всего, что рассматривается крупномасштабное магнитное поле. Изучение полей, связанных с отдельными галактическими объектами: звездами или облаками газа, к которым можно применять иные методы (например, эффект Зеемана), лежит вне рамок представленного обзора. С другой стороны, понятие «крупномасштабный» требует количественной характеристики. Наблюдения показывают (см. статью Спультри), что поле достаточно регулярно при усреднении по масштабам  $\gtrsim 50$  парсек. В меньших масштабах заметны существенные отклонения от регулярности — относительная амплитуда флуктуаций поля  $\delta B/B \gtrsim 1$ .

Важно провести сравнительную оценку методов определения магнитного поля Галактики по пульсарам и внегалактическим радиоисточникам. Хотя в обоих случаях используется мера фарадеевского вращения, интерпретация результатов может быть совершенно различной. Во-первых, внегалактические источники, в отличие от пульсаров, часто имеют большие собственные меры вращения (до нескольких сотен  $\text{рад/м}^2$ ). Во-вторых, пульсары расположены в Галактике, а излучение от внегалактических источников продельывает длинный путь через межгалактическое пространство, в котором может присутствовать магнитное поле. При правильной интерпретации вклада внегалактических радиоисточников оказывается необходимым учитывать также их эволюцию. Пульсары, тем самым, оказываются удобными во всех отношениях. К сожалению, однако, меры вращения получены пока лишь примерно для трех десятков пульсаров. Материал по внегалактическим источникам несравненно богаче (несколько сотен). Простой и удобный метод интерпретации фарадеевского вращения внегалактических радиоисточников предложен в работе<sup>5</sup>.

Поскольку в обзоре использованы данные и оптической астрономии, то следует упомянуть интересный метод исследования геометрии магнитного поля Галактики, основанный на изучении форм галактических туманностей и предложенный основателем Крымской астрофизической обсерватории Г. А. Шайном<sup>6</sup>. Шайн показал, что почти все большие диффузные туманности и множество пылевых туманностей имеют очень удлинённую форму, ориентированную параллельно плоскости Галактики вдоль крупномасштабного магнитного поля. Кроме того, он обращал внимание на флуктуации магнитного поля в масштабах около сотни парсек.

Итак, данные наблюдений с полной определенностью доказывают существование в Галактике крупномасштабного магнитного поля с напряженностью порядка  $3 \cdot 10^{-6}$  эс, ориентированного преимущественно вдоль спиральных рукавов. И потому встает вопрос о происхождении такого поля, который совершенно не рассматривается в вышеприведенном обзоре, посвященном анализу данных наблюдений. Понять, откуда взялось магнитное поле такого огромного масштаба (несколько килопарсек), — непростая задача.

Наивный подход, при котором предполагается, что наблюдаемое поле Галактики есть сжатая часть очень большого (или даже неограниченного) по масштабу общего метагалактического поля, существовавшего изначально, встречается с очень серьезными трудностями. Турбулентные движения ионизованного газа, наблюдаемые в настоящее время и существовавшие на ранней стадии эволюции Галактики, с неизбежностью ведут к запутыванию и диссипации магнитного поля за характерные времена, меньшие времени жизни Галактики. С другой стороны, кажется, что мелкомасш-

табные турбулентные движения не способны генерировать магнитное поле очень большого масштаба. Однако турбулентность в неоднородном вращающемся галактическом диске не является однородной и изотропной, а приобретает отличную от нуля спиральность (преобладание вихрей с определенным знаком вращения). А при такой турбулентности, как это впервые показали в своих работах немецкие исследователи М. Штейнбек, Ф. Краузе и К. Редлер, должен работать механизм гидромагнитного динамо крупномасштабных магнитных полей. Большую роль играет также дифференциальное вращение. Эффективность работы гидромагнитного динамо в применении к Галактике показана в работах <sup>7,8</sup>. Общий обзор проблемы магнитного динамо в применении к астрофизике см. <sup>9</sup>.

*А. А. Рузмайкин*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, В. С. Птускин, УФН **117**, 585 (1975).
2. S. A. Kaplan, S. B. Pikelner, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **12**, 113 (1974).
3. В. Л. Гинзбург, УФН **51**, 343 (1953).
4. И. С. Шкловский, Космическое радиоизлучение, М., Гостехиздат, 1956.
5. А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, Препринт ИПМ АН СССР № 91, Москва, 1976.
6. Г. А. Шайн, Астрон. ж. **32**, 110, 381 (1955).
7. E. N. Parker, Astrophys. J. **163**, 255 (1971).
8. С. И. Вайнштейн, А. А. Рузмайкин, Астрон. ж. **48**, 918 (1971).
9. С. И. Вайнштейн, Я. Б. Зельдович, УФН **106**, 431 (1972).