

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический**  
**ИНСТИТУТ**



*имени*

*П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

С. А. ТЮЛЬБАШЕВ

12

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬШИХ МЕР  
ВРАЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СПЕКТРОГРАФОВ**

Москва 2012



# Определение больших мер вращения с помощью многоканальных спектрографов

С.А. Тюльбашев

*Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН  
Адрес: 142290, г.Пушино, Московской области, ПРАО АКЦ ФИАН,  
e-mail: [serg@prao.ru](mailto:serg@prao.ru)  
телефон: 8(4967)318051*

## Резюме

Предложен метод поиска больших мер вращения с использованием многоканальных спектрографов. Показано, что существующие на настоящий момент штатные спектрографы позволяют проводить поиск мер вращения до  $10^9$  рад/м<sup>2</sup>.

## The search technique of large rotation measures with using of multichannal spectrograph

S.A. Tyul'bashev

## Abstract

The method of searching of large rotation measures with using of multichannal spectrographs are suggested. The standard spectrographs give possibility to observe rotation measures before  $10^9$  rad/m<sup>2</sup>.

## Введение

Известно, что фарадеевское вращение плоскости поляризации излучения связано с наличием в среде тепловых электронов и магнитного поля. Чем больше количество тепловых электронов на луче зрения и чем больше величина магнитного поля, тем сильнее выражен эффект вращения плоскости поляризации. Количественной характеристикой, отражающей эффект фарадеевского вращения, является мера вращения (RM [рад/м<sup>2</sup>]).

Уже в первых обзорах с массовыми измерениями величины RM (Haves,1975; Tabara,1980; Normandin, 1981; Thomson, 1982; Conway, 1983), было

показано, что типичные RM внегалактических источников не превышают 100 рад/м<sup>2</sup>.

По-видимому, эти наблюдаемые RM связаны с прохождением излучения через плоскость Галактики, а не с самими внегалактическими источниками.

Удачные попытки наблюдений больших RM на телескопах с заполненной апертурой предпринимались японскими исследователями (Kato, 1987; Inoue, 1995). В ходе наблюдений 96 источников на частоте 10 ГГц с использованием четырехканального спектрографа ими было обнаружено, что пять источников имеют RM превышающие 1000 рад/м<sup>2</sup>. Столь большие RM проще объяснить предположив, что они продуцируются в особенных областях внегалактического источника.

Развитие РСДБ техники привело к тому, что стало возможным определять величину RM в отдельных частях источника. Оказалось, что отдельные детали источника могут иметь разные знаки RM. Абсолютное значение RM в разных частях источника может отличаться на порядки. Это совершенно однозначно свидетельствует в пользу того, что наблюдаемые RM непосредственно продуцируются в компактном источнике, а не в нашей Галактике.

В серии работ, посвященных исследованию больших (>1000 рад/м<sup>2</sup>) мер вращения у компактных источников методами РСДБ (Udomprasert, 1997; Cotton, 1997; Taylor, 1998; Taylor, 2000; Zavala, 2002; Mantovani, 2002; Zavala, 2003), показано, что величина RM может достигать до значения  $\sim 2.5 * 10^3$  рад/м<sup>2</sup> в системе отсчета, связанной с наблюдателем (и до 40000 рад/м<sup>2</sup> в системе отсчета, связанной с источником (Udomprasert, 1997)). В ходе этих работ удалось получить поляризационные карты более 10 компактных источников с RM, превышающими 1000 рад/м<sup>2</sup>. Большие значения RM оказались связаны с окооядерными областями и, в ранних работах, эти области считались неполяризованными.

Наблюдения еще больших RM очень проблематичны. Это связано с тем, что если источник имеет очень большие значения RM, то РСДБ наблюдения в широкой полосе приведут к полной или частичной деполяризации излучения. Если же в ходе наблюдений использовать узкие полосы для получения информации о возможной линейной поляризации в РСДБ картинке источника, то значительно понижается отношение сигнал к шуму.

Из-за возможной деполяризации вместо информации о большом магнитном поле в среде и/или большой плотности тепловых частиц, может быть получено значение  $RM=0$ , а вся полезная информация будет потеряна.

Из наблюдений известно, что наблюдаемая степень поляризации уменьшается по направлению к РСДБ ядру источника. При этом непосредственно в области РСДБ ядра поляризация не регистрируется. Можно предположить, что на самом деле степень линейной поляризации не меняется, а видимые низкие значения  $RM$  связаны с сильной деполяризацией излучения из-за больших значений магнитных полей в источнике.

Согласно теоретическим работам (Field, 1993; Kardashev, 1995) величина магнитного поля на масштабах аккреационного диска может быть  $\geq 10^4$  Гс. Согласно экспериментальным работам (Lobanov, 1998; Tyulbashev, 2002) магнитное поле действительно растет по направлению к ядру источника. Следовательно, если в исследуемой околоядерной области присутствуют тепловые электроны, можно ожидать большие значения  $RM$ . При вполне разумных предположениях о величине магнитного поля и плотности тепловых электронов легко получить оценки  $RM > 10^4 - 10^5$  рад/м<sup>2</sup>\$. Исследование больших  $RM$  может стать еще одним способом оценить физические параметры в околоядерных областях исследуемых источников.

Для поиска больших  $RM$  необходимо разработать особую методику наблюдений и обработки наблюдений, которая позволит выявлять большие меры вращения.

В данной работе рассматривается возможность определения больших ( $> 10^4$  рад/м<sup>2</sup>)  $RM$  при использовании спектрографов с большим количеством индивидуальных каналов и максимально большой общей полосой наблюдений. Предварительные результаты поиска больших  $RM$  докладывались в 2004г (Tyulbashev, 2004).

### **Способ обработки наблюдений**

Известно, что подавляющая часть излучения на частотах до 5 ГГц, является синхротронной. Синхротронное излучение линейно поляризовано. Из-за разных

причин, вызывающих деполяризацию, видимая доля этого линейно поляризованного излучения может уменьшиться. Наблюдения показывают, что линейно поляризованное излучение, интегральное по всему источнику, может составлять от нескольких до 15% (см., например, Conway, 1983). Следовательно, если наблюдения таких источников будут проведены на антеннах, которые принимают излучение только в одной линейной поляризации, то и наблюдаемая плотность потока, может отличаться от плотности потока принимаемой "полномощностной" антенной до 15%.

Фарадеевское вращение связано с линейно поляризованным излучением. Поэтому, если на спектрограф подать линейно поляризованный сигнал от источника, то в зависимости от наблюдаемой частоты, вектор поляризации будет виден в источнике под разными углами и наблюдаемая плотность потока будет меняться по "синусоидальному" закону вдоль спектральных каналов. Из известной формулы, связывающей угол  $\varphi$  с  $RM$ :

$$\varphi = \lambda^2 * RM \quad (1),$$

где  $\varphi$  - это угол под которым наблюдается вектор поляризации, а  $\lambda$  - длина волны, легко увидеть, что наша "синусоида" будет растянута к высоким частотам.

Если в полученной записи наблюдается синусоидальный сигнал, то самый простой способ найти его - применить Фурье преобразование и построить спектр мощности сигнала. При этом должна обнаружиться спектральная линия, максимум которой связан с величиной  $RM$ . Поиск меры вращения с использованием спектра мощности сигнала будет хорошо работать когда "растянутая синусоида" не слишком сильно отличается от классической синусоиды.

Рассмотрим степень растяжения "синусоиды" и возможность компенсации этого растяжения. Если предположить, что внутри полной полосы наблюдений вектор поляризации сделал полный оборот ( $\varphi = 2\pi$ ) и учитывать, что  $c = \lambda * \nu$  (где  $c$  - это скорость света, а  $\nu$  - частота наблюдений), из формулы (1) можно получить:

$$RM = (2\pi * \nu_1^3) / (c^2 * \Delta\nu) \quad (2),$$

где  $\nu_1$  - это центральная частота наблюдений, а  $\Delta\nu$  - полная полоса наблюдений.

На центральной частоте  $\nu_2$  при такой же полосе и при том же значении  $RM$  вектор поляризации повернется на угол  $\Delta\varphi$ , который отличается от  $2\pi$ . Переписывая формулу (2) для  $\nu_2$  и проводя почленное деление получим:

$$v_2 = (2\pi/\Delta\varphi)^{1/3} * v_1 \quad (3).$$

Предположим, что наблюдения проходят на частоте 1.6ГГц. Посчитаем когда синусоида растянется в 2 раза (т.е.  $2\pi/\Delta\varphi=2\pi/\pi=2$ ). Тогда  $v_2=2^{1/3} * 1.6 = 1.26 * 1.6 = 2$ ГГц. Следовательно, если в ходе поиска больших RM используются многоканальные спектрографы с широкой общей полосой наблюдений, необходима компенсация этого растяжения. После компенсации растяжения можно использовать обычное Фурье преобразование и получить спектр мощности сигнала. При этом получится максимальное отношение сигнал к шуму. Т.к. у нас есть возможность посчитать растяжение синусоиды между соседними каналами спектрографа, то можно добавить (интерполяцией) точки для компенсации этого растяжения. В результате данной процедуры в обработанной записи получится классическая синусоида.

Рассмотрим, чем отличается предлагаемый нами метод от "классического" метода, используемого в наблюдениях фарадеевского вращения. Как правило, наблюдения проводятся по следующей схеме. Берутся две разные частоты, например 5ГГц и 1.4ГГц. На более низкой частоте в наблюдениях используются несколько относительно узких каналов (обычно 4). На каждой частоте определяется направление вектора поляризации. Наблюдаемый угол вектора поляризации пропорционален RM и квадрату длины волны. Таким образом, если нарисовать график по одной из осей которого будет отложена наблюдаемая величина угла (позиционный угол) линейной поляризации, а на другой оси квадрат длины волны, то в полученные точки можно вписать прямую, угол наклона которой однозначно связан с мерой вращения. Данный метод будет чувствителен при наблюдениях малых (до нескольких тысяч) RM. При больших RM, возникающая деполаризация уничтожит информацию об исходной линейной поляризации и принимаемое излучение от источника будет выглядеть неполяризованным.

Т.о., "классический" метод хорошо работает до  $RM \sim 10^3-10^4$  рад/м<sup>2</sup>, а предлагаемый метод будет эффективен при больших значениях RM.

В ходе поиска, при заданном отношении сигнал к шуму, необходимо обнаруживать фарадеевское вращение. Оценку чувствительности наблюдений при поиске RM легко получить из самых общих соображений. Один из параметров в формуле по чувствительности наблюдений - это общая полоса наблюдений. В записи ищутся синусоидальные волны. Формально полный период синусоиды

можно определить пятью точками, но на практике лучше использовать порядка десяти точек. Следовательно, нужно провести сложение с периодом синусоиды (он определяется из спектра мощности) по всей записи. Далее усреднить данные между каналами спектрографа с тем, чтобы в конечной записи осталось порядка десяти точек. При этом за счет усреднения максимально вырастет отношение сигнал к шуму. В целом, работа по поиску больших RM очень похожа на работу по поиску новых пульсаров. Для удобства дальнейшего использования мы переписали классическую формулу по определению чувствительности наблюдений следующим образом:

$$S_{\min} = \alpha * (2^{1/2} * k * T_{\text{sys}}) / (A_{\text{eff}} (t * \Delta\nu / N))^{1/2} \quad (4),$$

где  $\alpha$  - это отношение сигнал к шуму, которое использовалось в ходе поиска,  $k$  - постоянная Больцмана,  $A_{\text{eff}}$  - эффективная площадь антенны,  $T_{\text{sys}}$  - температура системы,  $t$  - время накопления сигнала,  $\Delta\nu$  - общая полоса спектрографа,  $N$  - количество точек в полученном конечном периоде синусоиды. При этом  $S_{\min}$  - это минимально обнаружимый сигнал при заданном отношении сигнал к шуму.

### **Оценка мер вращения обнаружимых на стандартном спектрографе стометрового телескопа Грин-Бенк. обсуждение других методов поиска RM.**

На сегодняшний день ГБТ - это самый большой в мире полноповоротный телескоп (размер зеркала - 100\*110 метров), имеющий высокую чувствительность ([https://science.nrao.edu/science/capabilities/capabilities\\_gbt](https://science.nrao.edu/science/capabilities/capabilities_gbt)). Он также имеет самые широкополосные штатные цифровые спектрографы, которые можно использовать для поиска больших RM. Отдельный спектрограф имеет общую полосу в 800МГц и в зависимости от частоты наблюдений несколько таких спектрографов могут перекрывать полосу около 2ГГц. Каждый спектрограф имеет 1024 спектральных канала. Есть также возможность записывать очень большое (>250000) спектральных каналов, но общая входная полоса при этом узкая ~50МГц. Т.о., ширина отдельного спектрального канала может изменяться от  $\approx$  3кГц до  $\approx$  800кГц. Широкая общая полоса наблюдений и низкие частоты позволяют регистрировать малые меры вращения и обеспечивают вкуче с большой

эффективной площадью ГБТ, большую чувствительность. На высоких частотах и в узких полосах можно проводить поиск больших мер вращения.

Оценим возможные наблюдаемые  $RM$  на штатном спектрографе ГБТ. На частотах 2.3ГГц и 4.9ГГц можно использовать один и соответственно три спектрографа с частичным перекрытием (т.е. полосы порядка 0.8 и 2ГГц), а ширины спектрального канала может быть порядка 100кГц и 4МГц. Оказывается, что  $RM_{\min} \approx 450$ , а  $RM_{\max} \approx 2.5 \cdot 10^5$  рад/м<sup>2</sup> на частоте 2.3ГГц и  $RM_{\min} \approx 1900$  и  $RM_{\max} \approx 6 \cdot 10^5$  рад/м<sup>2</sup> на частоте 4.9ГГц. В целом штатный спектрограф может быть эффективным инструментом если наблюдаемые  $RM$  будут больше, чем 100 рад/м<sup>2</sup> (на частоте 1.4ГГц при общей полосе наблюдений 800МГц) и будут меньше, чем  $\sim 10^9$  рад/м<sup>2</sup> (на частоте 15ГГц при ширине спектрального канала 3кГц). Частота 15ГГц была выбрана крайней для оценок  $RM$  из тех соображений, что большая часть излучения из активных ядер галактик на этой частоте все еще является синхротронным и, следовательно, линейно поляризованным.

Сформулируем кратко критерии, которыми нужно руководствоваться при поиске  $RM$ : а) подтверждение закона  $\lambda^2$  по наблюдениям на разных частотах; б) повторяемость результатов поиска новых  $RM$  по независимым наблюдениям; в) подтверждение известных  $RM$  по опубликованным работам; г) совпадение фазы "синусоиды" между разными частотами (его можно подтвердить для сильных  $RM$  компонент).

Предлагаемый метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. Главными достоинствами являются: простота наблюдений, простота процедур обработки, можно реализовать высокую чувствительность наблюдений. Главными недостатками являются: потеря информации о знаке  $RM$ , неизвестно к какой части источника относятся наблюдаемые  $RM$ , неизвестен внутренний позиционный угол.

Рассмотрим также другие методы поиска больших  $RM$ . Ранние попытки поиска больших фарадеевских вращений на телескопах с заполненной апертурой предпринимались Рузмайкиным и Соколовым (Ruzmaikin, 1979) и Рудником и др. (Rudnick, 1983) примерно 30 лет назад.

Рузмайкин и Соколов предложили проводить поляризационные наблюдения на двух близких длинах волн, а возможную неоднозначность в позиционном угле вектора поляризации  $\pm k\pi$ ,  $k=0,1,2,\dots$  устранять соответствующими наблю-

дениями на специально выбранной длине волны. С использованием данной методики было обработано около 150 источников. При этом всего у четырех источников найдены  $RM$  превышающие  $200 \text{ рад/м}^2$  и ни у одного источника не найдено  $RM > 1000 \text{ рад/м}^2$ . Т.к. в статье не приведены полосы наблюдений приемников в ходе наблюдений, чувствительность наблюдений, то трудно судить, почему большие  $RM$  не были открыты еще в 1979 году. По-видимому, использование метода целесообразно лишь для источников, в которых наблюдается большая линейная поляризация и ошибки в определении направления позиционного угла небольшие. Чем большие  $RM$  пытаются обнаружить, тем уже должны быть полосы и тем ниже будет чувствительность. Поэтому данный метод неудобен при поиске больших  $RM$ .

В работе Рудника и др. применен другой подход. Наблюдения были на четырех близких частотах в полосах по 60 МГц. Они проводились таким образом, чтобы получить все Стоксовские параметры. Логика дальнейших рассуждений была очень простая. Все частоты наблюдений очень близкие (полная полоса 240 МГц на частоте 3.2 ГГц), поэтому линейная поляризация должна быть практически одинаковой. Если она сильно отличается, то это говорит о вращении плоскости поляризации и можно оценить  $RM$ . Проблема  $k\pi$  легко обходится, т.к. все частоты наблюдений разнесены ровно на 60 МГц, а эффект фарадеевского вращения зависит от квадрата длины волны. Поэтому, если окажется, что на двух соседних частотах наблюдений уложилось полное число оборотов плоскости поляризации, то уже на следующей частоте наблюдений это будет заметно по изменению степени линейной поляризации. Естественным ограничением данной методики является ширина полосы одного канала. Всего наблюдалось 24 источника. Большие  $RM$  не были обнаружены. Тем не менее, в последующих поляризационных РСДБ наблюдениях Тэйлора (Taylor, 2000) источника 3C 279, одного из источников выборки, было обнаружено  $RM \approx -1300 \text{ рад/м}^2$ . Причины, по которым большое фарадеевское вращение не было обнаружено в ранних наблюдениях Рудника неясны.

В последние годы появились новые методы оценки  $RM$  по РСДБ наблюдениям. Интересная методика по низкочастотному  $RM$  синтезу была предложена в 1996 году де Брайном (Brayn, 1996). Суть методики заключается в следующем. Если наблюдения проводились в нескольких полосах, то в ходе стандартной об-

работки РСДБ наблюдений для каждой из полос будет построена своя картинка. При этом чувствительность будет низкой, т.к. улучшение сигнал к шуму, которое можно будет получить при "сложении" таких картинок, будет небольшим, в силу того, что сложение было некогерентным. Однако, если с первичным сигналом произвести манипуляции, учитывающие поворот плоскости поляризации, то можно будет сделать когерентное сложение сигнала во всей полосе, что приведет к улучшению сигнал шум.

В приложении к поиску больших RM возможны два варианта событий. В первом нам известно RM и поэтому можно сразу получить максимальное отношение сигнал к шуму в соответствующей РСДБ картинке. Во втором варианте, который нам особенно интересен, можно перебирать разные RM и смотреть, когда отношение сигнал к шуму станет максимальным для данного "пикселя" картинки. При низкочастотных наблюдениях метод чувствителен даже к очень малым изменениям RM. Поэтому он предлагался к использованию при изучении слабополяризованных протяженных источников (Brentjens,2003). Однако с тем же успехом его можно применять и для определения больших RM. Главными проблемами в данной методике, на наш взгляд, является большое время обработки наблюдений, а также то, что в ходе обработки будет перебираться много значений RM и для каждого из них строится своя карта, а автоматический анализ карт не разработан.

Еще один метод оценки RM соответствующей обработкой РСДБ данных был предложен Вогтом (Vogt,2005). В этом методе оценивается с точностью до  $\kappa\lambda$  направление вектора поляризации в самом ярком пикселе на карте. Следующим шагом оценивается направление вектора поляризации в соседнем пикселе. Получается оценка RM точностью до  $\kappa\lambda$ . Вновь оценивается направление вектора поляризации в следующем пикселе. Затем сравниваются полученные RM и если они согласуются, то вновь берут соседний пиксель и ищут его RM. Когда RM не согласуется, то смотрят нельзя ли его объяснить введением дополнительного поворота вектора поляризации на  $\pi$  радиан и т.д.. В результате получается самосогласованная карта фарадеевских вращений. Суть метода схожа с методикой, предложенной Рузмайкиным и Соколовым, однако применяется она не к наблюдениям на телескопе с заполненной апертурой, а к РСДБ наблюдениям. Главным недостатком данного метода являются то, что в случае недостаточного

углового разрешения внутри одного пикселя могут оказаться области с сильно различающимися по величине и знаку  $RM$ , что приведет к ошибкам при оценке.

Все предложенные методы поиска больших  $RM$  имеют свои достоинства и недостатки. На наш взгляд, наилучшим способом исследования больших  $RM$  будет объединение способа, представленного в данной работе и способа с низкочастотным  $RM$  синтезом де Брайна (Bruyn, 1996). Использование предложенного нами метода даст набор возможных  $RM$  в источнике и грубые оценки плотности потока компонент. В результате при получении РСДБ картинки можно будет рассчитать длительность наблюдений для получения необходимой чувствительности и сделать перебор возможных  $RM$  лишь вблизи ожидаемых значений  $RM$ . Это приведет к сокращению процедур обработки, позволит получить карту источника и выявить место, где наблюдаются большие  $RM$ .

Наши оценки показывают, что самые большие наблюдаемые  $RM$  при использовании спектрографа на ГБТ могут быть до  $10^9$  рад/м<sup>2</sup>. При этом общая полоса наблюдений на штатном спектрографе будет всего лишь 12.5 МГц. Т.е., чувствительность наблюдений упадет приблизительно в 12 раз по сравнению с возможной максимальной полосой в 2 ГГц на 4.9 ГГц. Следовательно, использование штатного спектрографа ГБТ будет не столь эффективным как могло бы быть. По-видимому, для наблюдений фарадеевских вращений, которые больше  $10^7$ - $10^8$  рад/м<sup>2</sup> можно использовать штатные РСДБ приемники. Их полосы наблюдений могут достигать сотен мегагерц. Соответствующей обработкой исходных данных можно получить спектрограф ширина канала которого определяется лишь стабильностью генератора меток времени. При этом общая полоса такого "нештатного" спектрографа может быть сравнима с полосой штатного спектрографа ГБТ.

### **Заключение**

1) Предложен новый метод наблюдений больших  $>10^4$  рад/м<sup>2</sup>)  $RM$  с использованием многоканальных спектрографов.

2) Приведены оценки  $RM$ , которые можно получить при использовании штатных спектрографов.

## ССЫЛКИ

- Haves~P. "Polarization parameters of 183 extragalactic radio sources" //M.N.R.A.S. 1975. V.173. P.553--558.
- Tabara~H., Inoue~M. "A catalogue of linear polarization of radio sources" //A&A.Suppl.Ser. 1980. V.39. P.379--393.
- Simard-Normandin~M., Kronberg~P.P., Button~S. "The Faraday rotation measures of extragalactic radio sources" //Ap.J.Suppl. 1981. V.45. P.97--111.
- Thomson~R.C., Nelson~A.H. "Galactic and intergalactic Faraday rotation" //M.N.R.A.S. 1982. V.201. P.365--383.
- Conway~R.G., Birch~P., Davis~L.R., Jones~L.R., Kerr~A.J., Stannard~D. "Multifrequency observations of linear polarization in 94 sources from 3CR catalogue - I.Observations" //M.N.R.A.S. 1983. V.202. P.813--823.
- Kato~T., Tabara~H., Inoue~M., Aizu~K. "Extragalactic radio sources with very large Faraday rotation" //Nature. 1987. V.329. P.223--224.
- Inoue M., Tabara~H., Kato~T., Aizu K. "Search for high rotation measures in extragalactic radio sources. I. Multi-channel observations at 10~GHz" //PASJ. 1995. V.47. P.725--737.
- Udomprasert~P.S., Taylor~G.B., Pearson~T.J., Roberts~D.H. "Evidence for ordered magnetic fields in the quasar environments" //Ap.J.Lett. 1997. V.483. P.9--12.
- Cotton~W.D., Dallacasa~D., Fanti~C., Fanti~R., Foley~A.R., Schilizzi~R.T., Spencer~R.E. "Dual frequency VLBI polarimetric observations of 3C~138" //A&A. 1997. V.325. P.493--501.
- Taylor~G.B. "Magnetic fields in quasar cores" //Ap.J. 1998. V.506. P.637--646.
- Taylor~G.B. "Magnetic fields in quasar cores.II." //Ap.J. 2000. V.533. P.95--105.
- Zavala~R.T., Taylor~G.B. "Faraday rotation measures in the parsec scale jets of the radio galaxies M87, 3C111, and 3C120" //Ap.J. 2002. V.566. L.9--L.12.
- Mantovani~F., Junor~W., Ricci~R., Saikia~D.J., Salter~C., Bondi~M. "Milli-arcsecond scale rotation measure in the CSS quasars 0548+165 and 1524-136" //A&A. 2002. V.389. P.58--67.

Zavala~R.T., Taylor~G.B. "A view through Faraday's fog: Parsec scale rotation measures in AGN" //Ap.J. 2003. V.589. P.126--146.

Field~G.B., Rogers~R.D. "Radiation from magnetized accretion disks in active galactic nuclei" //Ap.J. 1993. V.403. P.94--109.

Kardashev~N.S. "Cosmic supercollider" //M.N.R.A.S. 1995. V.276. P.515--520.

Lobanov~A.P. "Ultracompact jets in active galactic nuclei" A&A. 1998. V.330. P.79--89.

Tyul'bashev~S.A. "Magnetic fields around AGNs at large and small scales" A&A. 2002. V.387. P.818--820.

Тюльбашев~С.А., Ковалев~Ю.Ю. "Поиск больших мер фарадеевского вращения методом широкополосной спектроскопии" //Труды ГАИШ. 2004. Т.LXXV. С.111--112.

Ruzmaikin~A.A., Sokoloff~D.D. "The calculation of Faraday rotation measures of cosmic radio sources" //A&A. 1979. V.78. P.1--6.

Rudnick~L., Zukowski~E., Kronberg~P.P. "Measurement of unambiguous rotation measures of extragalactic sources" //A&A.Suppl. 1983. V.52. P.317--321.

De Bruyn~A.G. "RM-synthesis via wide-band low-frequency polarimetry" //NFRA. 1996. Note 655. P.1--5.

Brentjens~M.A., de~Bruyn~A.G. "Polarized radio emission throughout the Perseus cluster" //Proc. of the Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies, 2003, Charlottesville, Virginia, USA, ed. T.H.Reiprich, J.C.Kempner, N.Soker

Vogt~C., Dolag~K., En~ss lin~T.A. "Pacman (I): A new algorithm to calculate Faraday rotation maps" //M.N.R.A.S. 2005. V.358. P.726--731.

Подписано в печать 24.05.2012 г.  
Формат 60x84/16. Заказ №38. Тираж 140 экз. П.л 1.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640