

## Поляризация синхротронного излучения галактических джетов

Анализ электромагнитного излучения является основным методом исследования окружающей нас Вселенной. Основные причины генерации электромагнитных волн заряженными частицами можно условно разделить на связанно-связанные переходы (атомарные и молекулярные), связанно-свободные (рекомбинация ионов) и свободно-свободные переходы (тормозное радио-излучение электронов, пролетающих вблизи ионов), см., например, [1]. Вместе с тем в радио-диапазоне существуют и другие, когерентные и некогерентные, механизмы излучения, причем как в плотной плазме (например, спорадическое солнечное излучение), так и в вакууме (например, синхротронное излучение). Последнее играет в радиоастрономии поистине колоссальную роль, собственно о нем и пойдет речь в докладе.

Не погружаясь в вопрос, что такое синхротронное излучение, для постановки задачи, важно вспомнить только то, что, во-первых, источником этого излучения служат релятивистские электроны, а, во-вторых, это излучение является поляризованным, см., например, [2]. Такое поляризованное излучение, распространяющееся в среде с замороженным магнитным полем, испытывает на себе эффект Фарадея – эффект поворота плоскости поляризации, пропорциональный продольной вдоль луча зрения компоненте магнитного поля и длине пройденного пути. Огромные астрофизические масштабы, такие как, например, толщины галактик и туманностей компенсируют сравнительно малые магнитные поля и даже там, где малость полей не позволяет уловить такие эффекты, как расщепление Зеемана или доплеровское уширение – эффект Фарадея позволяет просунуть астрофизический “магнитометр” человечества внутрь далеких-далеких галактик и туманностей. Конечно, измерение космического фарадеевского вращения – очень сложная и трудоемкая процедура и, в частности, требует измерения поворота плоскости поляризации не на одной, а на многих длинах волн, однако астрофизики с помощью современных радиотелескопов научились справляться со многими техническими проблемами в наблюдениях такого нетеплового радиоизлучения [3].

В рамках доклада речь пойдет об известной формуле Берна [4], полученной в 1966 году для зависимости поляризации синхротронного излучения плоской галактики от длины волны. В этом случае и источники излучения, и магнитное поле находятся в одной области, поэтому расчет поворота плоскости поляризации из-за фарадеевского вращения несколько сложнее нежели чем для классического фарадеевского экрана, через который проходит свет далекого источника, расположенного за ним. Однако простота получаемых формул, подробный математический вывод которых можно найти, например, в [5], обеспечила широкую применимость результатов Берна для оценки астрофизических магнитных полей вплоть до сегодняшних дней. Невозможно перечислить все работы в данной области, но при этом нельзя не упомянуть работы таких замечательных ученых как Рихард Велибинский, Элли Беркхаузен, Райнер Бек, Марита Краузе. Эти ученые, используя формулу Берна, внесли большой вклад в современное понимание формирования магнитных полей Вселенной [6], однако в повсеместной применимости формулы Берна есть и серьезная проблема. Дело в том, что во Вселенной не все магнитные структуры похожи на тонкий плоский диск постоянной толщины, поэтому применять по умолчанию при анализе синхротронного излучения ко всем объектам формулу Берна кажется весьма спорным решением.

Основная цель настоящего доклада заключается в том чтобы показать, насколько формула Берна применима (точнее даже неприменима) к объектам, существенно непохожим на плоский диск, в частности, к галактическим джетам. Такие джеты представляют из себя цилиндрические структуры выходящие перпендикулярно или под углом к плоским дисковым и спиральным галактикам. Согласно современным представлениям эти области также насыщены магнитным полем, как и галактические диски, и также содержат релятивистские электроны, соответственно, в них также происходит фарадеевское вращение плоскости поляризации синхротронного излучения. Однако геометрия джетовых областей, их азимутальная симметрия и завихренность поля заставляет сомневаться о применимости формулы Берна даже в качестве нулевого приближения. В докладе, следуя идеям Берна и других авторов, мы продемонстрируем вывод зависимостей степеней поляризации от длины волны для синхротронного излучения таких цилиндрических областей. Мы надеемся, что данное исследование будет представлять интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения для приложений не только к галактическим джетам, но и к другим объектам аналогичной структуры. Работа была поддержана грантом фонда БАЗИС № 21-1-3-63-1.

### Литература

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. // Космическое магнитотормозное (синхротронное) излучение // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 87. – №. 9. – С. 65-111.

2. Schott G.A. // Electromagnetic radiation and the mechanical reactions arising from it: being an Adams Prize Essay in the University of Cambridge. – University Press, 1912.
3. Соколов Д.Д. // Как измеряют магнитные поля галактик От книги ВЛ Гинзбурга до фарадеевского синтеза // Природа. – 2017. – №. 10. – С. 30-36.
4. Burn B.J. // On the depolarization of discrete radio sources by Faraday dispersion // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1966. – Т. 133. – №. 1. – С. 67-83.
5. Sokoloff D.D. et al. // Depolarization and Faraday effects in galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1998. – Т. 299. – №. 1. – С. 189-206.
6. Beck R. et al. // Galactic magnetism: recent developments and perspectives // Annual review of astronomy and astrophysics. – 1996. – Т. 34. – №. 1. – С. 155-206.

## Секция

Межпланетная среда: солнечный ветер и межпланетное магнитное поле

**Primary authors:** ЮШКОВ, Егор Владиславович (ИКИ РАН, Физический факультет МГУ); СОКОЛОВ, Дмитрий Дмитриевич (Физический факультет МГУ); ЧУМАРИН, Григорий Анатольевич (Физический факультет МГУ)

**Presenter:** ЧУМАРИН, Григорий Анатольевич (Физический факультет МГУ)