ФОРМА И ДИНАМИКА СПЕКТРА ГИРОСИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШКИ В МИКРОВОЛНОВОМ И СУБ-ТГц ДИАПАЗОНАХ

Мельников В.Ф.¹, Филатов Л.В.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

THE SHAPE AND DYNAMICS OF THE SPECTRUM OF GYROSYNCHROTRON FLARE EMISSION IN MICROWAVE AND SUB-THZ RANGE

Melnikov V.F.¹, Filatov L.V.²

¹Pulkovo Observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

The factors which influence the shape and dynamics of the gyrosynchrotron spectrum emission in solar flaring loops are considered. A special attention is paid to kinetic effects based on the interaction between nonthermal electrons and whistler turbulence. In particular, it is shown that the reverse action of the whistler turbulence generated by electrons changes the energy spectrum of energetic electrons propagating in a flare loop. As a consequence, this leads to significant changes in the slope of the high frequency (optically thin) part of the gyrosynchrotron spectrum, revealing steepening at lower frequencies and flattening at higher frequencies.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-193-196

Развитие методов радиодиагностики солнечных вспышек стало чрезвычайно актуальной темой в последнее время. Особенно важным является способность этих методов получать детальную информацию о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий, что недостижимо в других областях электромагнитного спектра [1–3].

Актуальность этих исследований связана с созданием многочастотных радиогелиографов, которые приходят на смену знаменитому радиогелиографу Нобеяма (NoRH), до 2019 г. проводившему пространственно разрешенные наблюдения вспышек на двух частотах, 17 и 34 ГГц. К настоящему времени начаты наблюдения на Сибирском многочастотном радиогелиографе (СРГ, 3–6 ГГц, 6–12 ГГц) в 2022 г. планируется запуск наблюдений на 12–24 ГГц. Построен и ведётся отладка Китайского спектрогелиографа (MUSER, 0.4–2 ГГц; 2–15 ГГц). Начиная с 2017 г. ведутся наблюдения на 13-элементном американском солнечном интерферометре-спектрометре (EOVSA, 1–18 ГГц), являющимся прототипом планируемого крупного спектро-радиогелиографа FASR, близким по характеристикам к СРГ

и MUSER. Получены первые результаты солнечных наблюдений в суб-ТГц диапазоне на недавно пущенном в строй интерферометре ALMA (100–900 ГГц) с очень высоким угловым разрешением – лучше, чем $0.1''$. Характеристики этих новых радиогелиографов позволяют использовать их данные при решении фундаментальных задач физики солнечных вспышек и СМЕ.

Всё вышеперечисленное открывает богатейшие возможности для диагностики физических условий во вспышечной плазме по характеристикам частотного спектра в выделенных участках микроволнового источника. Однако надёжность такой диагностики до сих пор строится на ряде упрощающих предположений, например, об изотропности излучающих электронов, о простом степенном спектре электронов в радиоисточнике, и т.д. Для того, чтобы сделать результаты диагностики относительно точными, надо понимать какие факторы влияют на спектр излучения. К настоящему времени достаточно хорошо выяснено, что на формирование частотного спектра гиротронного (ГС) излучения при определенных условиях во вспышечной петле существенное влияние оказывают: (1) эффект Разина [4]; (2) питч-угловая анизотропия (поперечная и продольная) излучающих электронов [5]; (3) кинетические эффекты, связанные с кулоновскими столкновениями [6] и взаимодействием с различными типами плазменной турбулентности.

Эффекты кинетики нетепловых электронов на спектр ГС излучения

Кинетика может влиять на форму энергетического спектра электронов, на их питч-угловое и пространственное распределения во вспышечной петле и, наконец, на временные профили их концентрации в разных участках петли [7–9]. Разные типы плазменной турбулентности, такие как ленгмюровские волны, ионный звук, вистлеры, быстрые магнитозвуковые (БМЗ) волны резонансно взаимодействуют с электронами разных энергий: ленгмюровские волны и ионный звук – с электронами низких (порядка 10 кэВ), а БМЗ волны – с электронами релятивистских энергий ($E > 10$ МэВ). Для физики микроволнового (гиротронного) излучения вспышек наиболее интересны вистлеры, так как в специфических условиях солнечных вспышечных петель они способны резонировать со среднерелятивистскими ($E = 100$ кэВ – 10 МэВ) электронами, которые ответственны за наблюдаемое микроволновое излучение. Вистлеры способны рассеивать среднерелятивистские электроны по питч-углам, что может приводить к их эффективному высыпанию в конус потерь в режимах слабой и умеренной диффузии и, наоборот, удерживать электроны в ловушке, увеличивая их поперечную скорость и питч-углы в режиме сильной диффузии [10–11]. Последнее может благоприятствовать стохастическому ускорению электронов на турбулентности вистлеров [12], а также повышать эффектив-

ность других ускорительных механизмов, например, механизма Ферми, действующего в токовых слоях [13].

Причиной появления турбулентности вистлеров во вспышечной петле может быть либо внешний источник (область вспышечного энерговыделения, где происходит процесс конверсии БМЗ и ионно-звуковых волн в вистеры), либо генерация вистлеров в самой петле распространяющимися в ней ускоренными нетепловыми электронами с анизотропным распределением.

Влияние «внешней» турбулентности вистлеров со спектром колмогоровского типа на формировании энергетического спектра и питч-углового распределения электронов и, соответственно, на форму и динамику частотного спектра гиросинхротронного излучения в различных частях вспышечной петли рассмотрено нами в работе [9]. Было показано, что при плотности волновой энергии, выше определенной, вистлеры могут оказывать значительное влияние на распределение быстрых электронов и их излучение во вспышечной петле. Особенность влияния вистлеров состоит в «укручении» энергетического спектра электронов на высоких энергиях и в изотропизации их питч-углового распределения. Гиросинхротронное излучение быстрых электронов при наличии вистлеров характеризуется «укручением» частотного спектра и отсутствием временных задержек излучения на разнесенных частотах. Это поведение противоположно тому, что должно наблюдаться при доминировании эффектов кулоновских столкновений.

Влияние турбулентности вистлеров, которая генерируется нетепловыми электронами в самой петле, значительно отличается от влияния внешней турбулентности, кулоновских столкновений и эффекта Разины. В данном докладе мы показали, что наклон частотного спектра ГС излучения в высокочастотной области ($f > f_{peak}$), где радиоисточник оптически тонкий, претерпевает существенные изменения с течением времени. Это проиллюстрировано на рис. 1, где показаны графики частотных спектров ГС излучения (верхняя панель) и локальных спектральных индексов (нижняя панель) в различные моменты времени. В начале импульсной инжекции электронов ($t = 1$ с, пунктирная линия) наклон спектра во всей частотной области $f > f_{peak}$ практически такой же, как и в модели без учета взаимодействия с вистлерами. Однако, уже на фазе, близкой к максимуму инжекции ($t = 2.4$ с, штриховая линия) и позднее, на фазе спада, одновременно происходят два процесса: 1) быстрое укручение спектра в области, близкой к f_{peak} , и 2) уплощение спектра на частотах $f \gg f_{peak}$.

Причиной такого поведения частотного спектра, очевидно, является обратное воздействие сформировавшегося спектра турбулентности вистлеров на энергетический спектр электронов. Самосогласованное решение кинетического уравнения Фоккера-Планка и квазилинейного уравнения для вистлеров [11] позволило получить следующие свойства спектра элек-

тронов (см. рис. 2). На рис. 2 (верхняя панель) видно, что спектр электронов на интервале 30 кэВ – 10 МэВ испытывает переходы от более пологого ($\delta = 2.5$) к более крутому ($\delta = 8$) и опять к более пологому ($\delta = 1$) пока не достигает исходного наклона спектра инжектированных электронов ($\delta = 3.6$). Показано, что такой характер спектра электронов связан с одновременной реализацией во вспышечной петле сразу всех трех режимов диффузии на турбулентности вистлеров: 1) сильной на низких энергиях,

Рис. 1.

Рис. 2.

при которой длина свободного пробега электронов L_f существенно меньше длины петли L , $L_f \ll L$; 2) умеренной на средних энергиях, при $L < L_f < L\sigma$, $\sigma = B_{max}/B_{min}$; 3) слабой на высоких энергиях, при которой $L_f > L\sigma$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта № 20-52-26006.

Литература

1. Fleishman, G.D., Nita, G.M., and Gary, D.E. // *ApJL*, 2009, pp. 183–187.
2. Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. // *Ge&Ae*, 2014, V.54, No.7, pp. 933–942.
3. Fleishman G.D. et al. // *Science*, 2020, V.367, P. 278–280.
4. Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. // *Ge&Ae*, 2012, V.52, No.7, P. 883–891.
5. Fleishman, G.D. and Melnikov, V.F. // *ApJ*, 2003, V.587, P. 823–835.
6. Melnikov, V.F. and Magun, A. // *Sol. Phys.*, 1998, V.178, P. 153–171.
7. Melnikov, V.F., Gorbikov, S.P., Reznikova, V.E., et al. // *Izv. RAN, Ser. Fiz.*, 2006, V.70, No.10, P. 1472–1474.
8. Reznikova, V.E., Melnikov, V.F., Shibasaki, K., et al. // *ApJ*, 2009, V.697, P. 735–746.
9. Filatov L.V., Melnikov V.F. // *Ge&Ae*, 2017, V.57, No.8, P.1001–1008.
10. Filatov L.V., Melnikov V.F. // *Ge&Ae*, 2020, V.60, No.8, P. 1137.
11. Melnikov V.F., Filatov L.V. // *Ge&Ae*, 2021, V.61, No.8.
12. Filatov L.V., Melnikov V.F. // *Ge&Ae*, 2021, V.61, No.8.
13. Arnold H., Drake J.F., and Swisdak M. et al. // *Phys.Rev.Letters*, 2021, V.126, No.13.