

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИХ ДОУСКОРЕНИИ НА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Филатов Л.В.¹, Мельников В.Ф.²

¹*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, filatovlv@yandex.ru*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

Известно, что нетепловые электроны в различных диапазонах энергии ответственны за микроволновое и жесткое рентгеновское излучение, наблюдаемое во вспышечных петлях активных областей солнца. Появление таких электронов обусловлено различного рода ускорительными процессами, в результате которых формируется импульс инжекции ускоренных электронов во вспышечную петлю. В петле с инжектированными электронами происходят разнонаправленные процессы – высыпание и удержание в магнитной ловушке петли, перераспределение по энергии и положению в петле при взаимодействии с частицами плазмы и волнами в ней, а также электромагнитное излучение.

Могут ли электроны доускоряться в петле со стационарным магнитным полем? Одним из эффективных механизмов ускорения является стохастическое ускорение на турбулентных пульсациях в плазме петли. В работе рассматривается турбулентность вистлеровских волн при резонансном взаимодействии с энергичными электронами по схеме волна – частица. Вистлеровские волны в своем диапазоне частот и масштабов легко возбуждаются в петле из-за пучковой неустойчивости при инжекции или путем трансформации других волн. В работах Мельникова и Филатова (G&A 2017) мы рассмотрели питч-угловое рассеяние и укрупнение степенного энергетического спектра электронов при заданной (стационарной) вистлеровской турбулентности. Однако (Филатов и Мельников, G&A 2022), если процесс укрупнения связан с потерей высокоэнергичных электронов при рассеянии на вистлерах, то процесс диффузии электронов разных энергий может вести к выравниванию энергетического спектра, то есть к его уплощению. Такая деформация спектра может интерпретироваться как доускорение электронов при взаимодействии с турбулентностью вистлеров. Целью этой нашей работы является определение влияния доускорения электронов на микроволновое излучение петли и формулировка особенностей излучения, связанных с доускорением в петле.

Используется модель вспышечной петли в виде магнитной ловушки, образованной в неоднородном по высоте магнитном поле активного солнца. Ловушка расположена вдоль магнитного поля, неоднородна по длине и нестационарна во времени. Нестационарность ловушки обусловлена импульсной инжекцией в нее нетепловых электронов из области вспышечного энерговыделения. Наполнение петли плазмой и вистлерами также неоднородно и задано стационарно, используются известные модели для плотности частиц плазмы и колмогоровский спектр турбулентности. В рамках квазилинейной теории для распределения нетепловых электронов используется приближение Фоккера-Планка с диффузионными членами для рассеяния по питч-углам и доускорения по энергии, связанными с взаимодействием с вистлеровской турбулентностью.

Анализируются процессы сохранения и высыпания электронов из ловушки, процессы их изотропизации и локализации, а так же динамики наклона их энергетического спектра в зависимости от параметров инжекции электронов и турбулентности в ловушке. Рассчитана интенсивность микроволнового (гироциклотронного) излучения как функции частоты, времени и положения в петле. Указаны особенности в поведении спектрального индекса, связанные с уплощением энергетического спектра электронов, которые могут идентифицировать процесс доускорения электронов при диагностике плазмы в петле.