

## **Авторы**

*Камалетдинов С. Р.*, Хатчинсон И., Васько И. Ю., Артемьев А.В., Лотекар Э., Форрест М.

## **Название**

**Spacecraft observations and theoretical understanding of slow electron holes**

## **Ссылки на публикацию**

S. R. Kamaletdinov, I. H. Hutchinson, I. Y. Vasko, A. V. Artemyev, A. Lotekar, F. Mozer, 2021 Spacecraft observations and theoretical understanding of slow electron holes, accepted for publication in Physical Review Letters, <https://journals.aps.org/prl/accepted/07072YbaR5a10a7219f86570217c2d7f68a24cecd>

## **Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность**

Электронные фазовые дырами (сокращенно электронные дырки) представляют собой один из самых распространённых типов нелинейной плазменных волн и часто возникают на нелинейном этапе развития различных двухпоточковых неустойчивостей. Интерес к таким структурам обусловлен их ролью в генерации аномального сопротивления в бесстолкновительной плазме, за счёт рассеяния и захвата электронов. Благодаря многочисленным спутниковым наблюдениям, за последние 20 лет было показано присутствие электронных дырок в различных областях земной магнитосферы, а собранные статистики данных плазменных структур позволили установить распределения основных их параметров. Одним из важных результатов стало обнаружения представительного подкласса данных структур, так называемых медленных электронных дырок, движущихся со скоростью сопоставимой с тепловой скоростью ионов. Наблюдение таких медленных дырок на сегодняшний день — это надёжно установленный экспериментальный факт, который, однако, находится в явном противоречии как с существующей теорией электронных дырок, так и с результатами численных моделирований, предсказывающими отсутствие стабильных (устойчивых) электронных дырок со скоростями сопоставимы с тепловыми скоростями ионов. Разрешению данного противоречия эксперимента и теории и посвящена эта работа.

## **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение**

Основной задачей работы является поиск медленных электронных дырок в данных спутниковой миссии ММС, с последующем установлением их скоростей на основе метода многоспутниковой интерферометрии и исследованием измерений ионов в моменты времени отвечающие наблюдению медленных электронных дырок. Предполагается, что такое сопоставление «быстрых» (спутники ММС позволяют получить данные по ионам с разрешением в 150 мили секунд) измерений функций распределения ионов и параметров медленных электронных дырок позволит установить свойства данных распределений, не учтённые в существующих моделях, но принципиально важные для существования устойчивых медленных дырок.

## **Используемый подход, его новизна и оригинальность**

Основным подходом является метод многоспутниковой интерферометрии, в рамках которого анализируются одновременные измерения электрического поля на всех 4 спутниках миссии MMS. Смещение волновых профилей во времени позволяет вычислить время распространения

наблюдаемых структур от одного аппарата к другому и, как следствие, позволят с высокой точностью определять скорость распространения структур. Комбинируя данные по скорости структур и одномерные измерения ионных функций распределения, удаётся показать, что медленные дырки наблюдаются вместе с функциями распределения ионов, имеющими локальный минимум фазовой плотности в определённом диапазоне продольных скоростей. Более того, удаётся получить надёжную корреляцию между скоростью электронных дырок и положением локального минимума функции распределения. Данные наблюдения являются основой для построения новой теоретической модели устойчивости медленных электронных дырок.

#### **Полученные результаты и их значимость.**

В рамках данной работы показано, что медленные электронные дырки существуют в условиях наличия локального (в терминах продольной скорости) минимума функции распределения ионов. Этот экспериментальный результат в работе подтверждается новой теорией устойчивости электронных дырок, которая показывает возможность существования медленных дырок в случае, когда их скорости совпадают с положением локального минимума фазовой плотности ионов. Данный результат разрешает проблему существования медленных электронных дырок, устанавливая связь между скоростями последних и особенностями ионной функции распределения