

Работа на конкурс научных работ ИКИ РАН 2017 года

Авторы:

1. Кузичев Илья Валерьевич, научный сотрудник отд. 54, лаб. 541, ИКИ РАН.
2. Васько Иван Юрьевич, научный сотрудник отд. 54, лаб. 541, ИКИ РАН; Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA
3. Артемьев Антон Владимирович, старший научный сотрудник отд. 54, лаб. 541, ИКИ РАН; Department of Earth, Planetary, and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, California, USA
4. Oleksiy Agapitov, Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA
5. Forrest Mozer, Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA

Публикация:

Evolution of electron phase space holes in inhomogeneous magnetic fields, Kuzichev, I. V., I. Y. Vasko, O. V. Agapitov, F. S. Mozer, and A. V. Artemyev (2017), *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2105–2112, doi:10.1002/2017GL072536. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL072536/abstract>

Общая формулировка научной проблемы и её актуальность.

Электронные дырки (ЭД) – электростатические стационарные нелинейные структуры в фазовом пространстве. Они были впервые обнаружены в магнитосфере Земли с помощью спутниковой миссии Geotail [1] и оказались достаточно типичным явлением в разных областях магнитосферы. Так, электронные дырки наблюдались в области пересоединения [2], на фронтах инжекции во внешнем радиационном поясе [3], в авроральной области [4], и во многих других. Эти структуры обычно распространяются вдоль силовых линий магнитного поля со скоростями порядка тепловой скорости электронов, имеют ширину до нескольких десятков дебаевских радиусов, и амплитуды до сотен мВ/м [5]. Генерация ЭД, их эволюция и роль в диссипации энергии, ускорении частиц, генерации крупномасштабных перепадов потенциала и аномального сопротивления сейчас весьма активно исследуются, как теоретически, с помощью численного моделирования, так и экспериментально. До недавнего времени основное внимание при численном моделировании уделялось генерации электронных дырок при развитии различных неустойчивостей в плазме. Одной из немногих работ, где исследовалось непосредственно распространение электронной дырки в неоднородной плазме, является работы [6] и [7], где с помощью PIC-моделирования [6] и Vlasov-Maxwell моделирования [7] показано, что неоднородность плотности оказывает существенное влияние на эволюцию ЭД. В магнитосфере электронные дырки распространяются в неоднородном магнитном поле Земли, и детального изучения влияния неоднородности магнитного поля на эволюцию электронных дырок ещё не было проведено.

Конкретная решаемая в работе задача и её значение.

В данной работе было проведено исследование влияния неоднородности магнитного поля на эволюцию электронных дырок. Помимо значения для теории ЭД, эта задача важна для объяснения наблюдающихся с помощью спутниковых миссий характеристик ЭД, поскольку они могут наблюдаться не только в непосредственной близости от области генерации, но и достаточно далеко от неё, распространяясь, таким образом, к области наблюдения в неоднородном магнитном поле.

Используемый подход, его новизна и оригинальность.

Для решения задачи мы использовали численное Vlasov-Maxwell моделирование. Точная система уравнений Власова-Максвелла была упрощена с учётом имеющихся в задаче интегралов движения, и получено 1.5D гирокинетическое уравнение, которое решалось численно. Размерность 1.5D обусловлена тем, что хотя гирокинетическое уравнение сохраняет магнитные моменты частиц, в уравнениях Максвелла производится интегрирование по всем магнитным моментам, поэтому магнитный момент нельзя рассматривать, как внешний параметр. При дискретизации уравнений магнитный момент можно считать индексом, нумерующим соответствующие электронные популяции. Насколько нам известно, подобное моделирование распространения электронных дырок в неоднородном магнитном поле ещё не проводилось.

Полученные результаты и их значимость.

Наши расчёты показывают, что неоднородность магнитного поля значительно влияет на динамику ЭД. Так, дырки, распространяющиеся в область более сильного (слабого) поля, замедляются (ускоряются). Для определённых параметров системы замедляющиеся дырки могут остановиться и развернуться, при этом оказывается, что положение точки поворота по магнитному полю не зависит от среднего градиента поля, а зависит только от параметров дырки. Это достаточно интересный результат с точки зрения интерпретации спутниковых данных, в которых наблюдаются медленные ЭД. Обычно предполагается, что они генерируются за счёт бунемановской неустойчивости, однако в соответствующих областях магнитосферы далеко не всегда выполняются критерии развития этой неустойчивости. Наши результаты дают альтернативное объяснение этих наблюдений: медленные дырки могут возникать за счёт эффектов распространения в неоднородном магнитном поле, а именно, за счёт замедления быстрых ЭД. Кроме того, расчёты показывают, что вдоль ЭД генерируется перепад потенциала, то есть двойной слой. Это важно как с точки зрения анализа экспериментальных данных, так и для более глобальных численных PIC-моделей динамики ЭД: этот результат показывает, что в них нельзя ставить периодические граничные условия на потенциал. Проведённые расчёты также демонстрируют существенное различие между реальной эволюцией дырки и её динамикой в приближении квазичастицы, в котором захваченные частицы описываются, как единая квазичастица во внешнем магнитном поле. Это указывает на то, что имеется интенсивный энергообмен между захваченными и резонансными пролётными частицами.

1. Matsumoto, H., H. Kojima, T. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, and M. Tsutsui, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2915–2918, doi:10.1029/94GL01284, 1994.
2. Norgren, C., M. Andr e, A. Vaivads, and Y. V. Khotyaintsev, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1654–1661, doi:10.1002/2015GL063218, 2015.
3. Malaspina, D. M., et al., *J Geophys Res* 120, 4246–4263, doi:10.1002/2015JA021137, 2015.
4. Franz, J. R., P. M. Kintner, J. S. Pickett, and L.-J. Chen, *J Geophys Res*, 110, A09212, doi:10.1029/2005JA011095, 2005.
5. Cattell, C., et al., (2003), *Nonlinear Processes Geophys.*, 10, 13–26.
6. Mandrake, L., P. L. Pritchett, and F. V. Coroniti, (2000), *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2869–2872, doi:10.1029/2000GL003785.
7. Briand, C., A. Mangeney, and F. Califano (2008), *J. Geophys. Res.*, 113, A07219, doi:10.1029/2007JA012992