Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 294–297.

УДК 533.9
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-294
Orcid 0009-0005-5558-3666

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ SPERF

Г.Р. Кохан [1], С.В. Апатенков [1], А. Мао [2], Хэ С.[2]

[1] Санкт-Петербургский Государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия, g.r.kokhan@mail.ru
[2] Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

STUDYING MAGNETIC RECONNECTION IN LABORATORY PLASMA AT SPERF FACILITY

G. R. Kokhan[1], S.V. Apatenkov[1], A. Mao[2], X. He[2]

[1]Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, g.r.kokhan@mail.ru
[2]Harbin Institute of Technology, Harbin, China

Аннотация. В докладе представлены результаты реконструкции магнитного пересоединения на установке SPERF по данным 50 датчиков с RBF-интерполяцией (радиально-базисными функциями). Для определения X-точки применён метод индекса Пуанкаре, для построения X-линии — MDD-метод. Обсуждена точность реконструкции X-линии.

Ключевые слова: пересоединение, X-точка, Пуанкаре индекс.

Abstract. The report presents the results of reconstruction of the magnetic reconnection at the SPERF facility based on data from 50 sensors with RBF interpolation (Radial Basis Function). Poincare index method was used to determine the X-point, and the MDD method was used to construct the X-line. The accuracy of the X-line reconstruction is discussed.

Keywords: reconnection, X-point, Poincare index.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное пересоединение является важным процессом преобразования и переноса энергии в плазме. Реконструкция точки пересоединения и построение X-линии необходимы для идентификации области переноса энергии. Существует достаточно много современных методов определения X-линии на основе спутниковых данных. В частности, по данным спутников MMS [Denton et al., 2024] удавалось получить профиль X-точки. Однако главный недостаток спутниковых данных — их нерегулярность и случайность вследствие крайней неустойчивости области пересоединения. Ввиду этого, эффективным способом реконструкции X-линии является изучение пересоединения на лабораторных установках. В данной работе мы использовали данные с лабораторной установки SPERF в Харбине.

УСТАНОВКА SPERF

Комплекс SPERF (Space Plasma Environment Research Facility) предназначен для исследования свойств космической плазмы, включая динамику самой плазмы и топологию полей в токовых слоях — в частности, в областях пересоединения магнитных силовых линий (X-точках и X-линиях).

Для моделирования магнитного и токового фронта дневной стороны магнитосферы в установке SPERF (рис. 1) в установку помещены четыре MS катушки (MagnetoSheath coil (MS coil) - тороидальные катушки на схеме установки, обозначены желтым цветом), которые создают поле модельного солнечного ветра, направленное по оси Z, также в SPERF помещено кольцо, создающее модельное дипольное поле Земли [Mao et al., 2026].

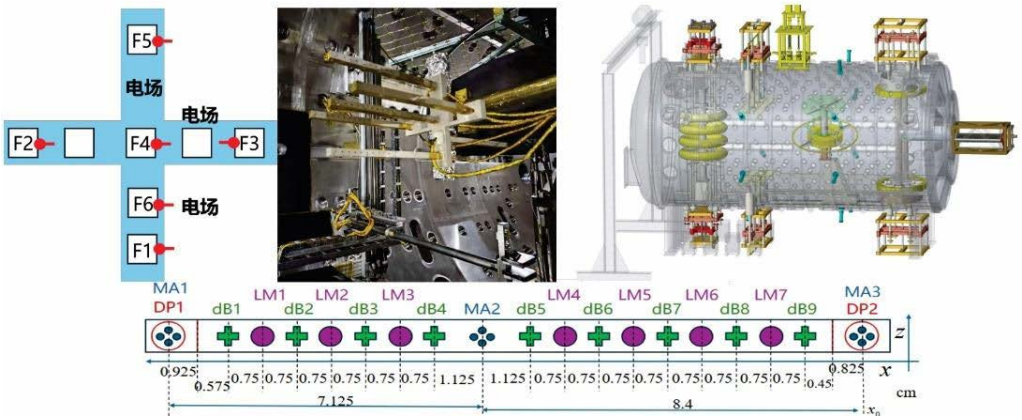

Рис. 1. Установка SPERF и схематическое расположение датчиков

Измерения магнитного поля проводятся индукционными датчиками с шагом 1,5 см, расположенными на вытянутых «пальцах» на расстоянии 10 см друг от друга. Каждый датчик содержит катушку с тремя взаимно перпендикулярными обмотками, что позволяет регистрировать разные компоненты поля. «Пальцы» образуют крест и зафиксированы относительно друг друга, однако вся крестовая конструкция может перемещаться внутри установки. Такая конфигурация датчиков и их регулярное расположение дают возможность восстанавливать поле в малом объёме пространства, а подвижность креста — измерять поле по всей рабочей области.

Каждое измерение происходит в импульсном режиме (“выстрелах”). Электрическая энергия накапливается в конденсаторах, а затем разряжается на катушках, создавая ударный фронт модельного солнечного ветра длительностью несколько миллисекунд. Кольцо с током, имитирующее земной диполь, в отличие от импульсного поля солнечного ветра, создаётся длительное время: оно постепенно нарастает до максимального значения, и именно в этот момент производится «выстрел» солнечного ветра.

На рисунке 2 приведён пример одного из выстрелов. Сам «выстрел» крайне короткий относительно времени включения земного диполя (рис. 2а). В интересующий нас момент, а именно во время выстрела (рис. 2б), поле диполя остаётся практически постоянным.

МЕТОД ПУАНКАРЕ

Исходя из описанной выше конфигурации поля благодаря симметрии в установке SPERF предполагалось отсутствие компоненты B_y. Было выполнено численное моделирование области пересоединения, и ожидалось увидеть X-точку в плоскости XZ (рис. 3а). Однако оказалось, что в установке SPERF поле генерируется не только в проекции XZ — значительной оказывается и компонента B_y в окрестности области пересоединения частично холловской природы. Её присутствие существенно усложняет топологию поля. Определение X-точки становится крайне трудной задачей, поскольку сепаратрисы точки пересоединения не лежат в плоскости XZ, а наклонены относительно неё. X-линия же представляет скорее не линию, а некоторую кривую.

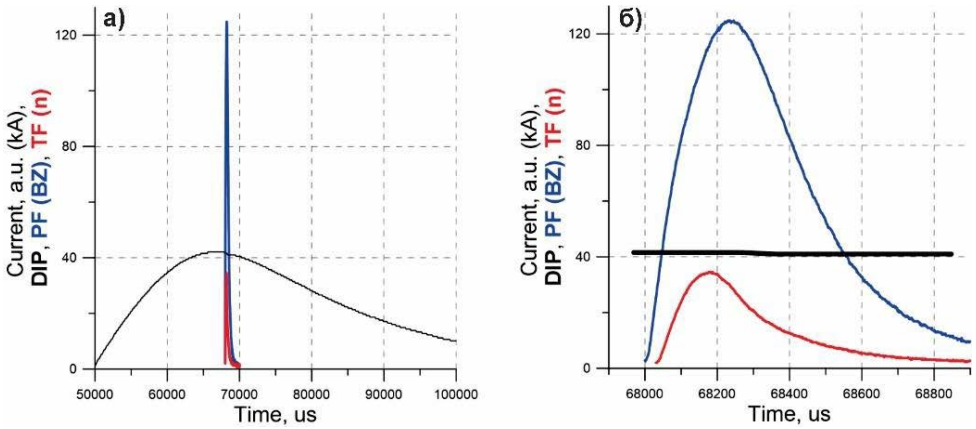

Рис. 2. Магнитное поле, создаваемое в установке SPERF. На левом рисунке показан черным цветом импульс земной дипольной катушки, красным цветом показано тороидальное поле, создающее плазму, а синим – B_z компонента солнечного ветра. На правом рисунке показан развернутый по времени импульс, представленный на левом рисунке

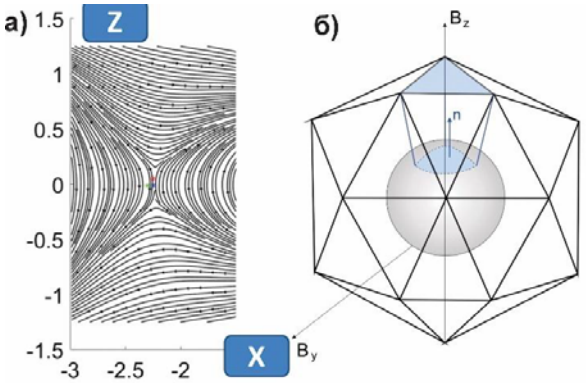

Рис. 3. Слева: численное моделирование пересоединения в установке SPERF (в предположении отсутствия B_y). Справа: метод индекса Пуанкаре: единичная сфера с центром в начале координат магнитного поля и икосаэдр, построенный по реальным данным в каждом бине, синим на сфере помечена проекция грани икосаэдра на единичную сферу, n — нормаль к проекции треугольника

Для поиска X-точки был применён метод индекса Пуанкаре [Greene, 1992]. Вместо работы в пространстве координат мы переходим в пространство магнитного поля. Геометрическое определение сепаратрис или поиск минимума поля сильно чувствительны к шумам и неоднозначны. Поиск абсолютного нуля поля с высокой точностью вычислительно очень затратен. Преимуществом метода индекса Пуанкаре является то, что он требует числа итераций порядка числа узлов сетки.

В каждом элементарном кубе сетки (бине), образованном четырьмя близко расположенными узлами, вычисляется магнитное поле B в вершинах. Куб делится на 12 треугольников с одинаковым направлением обхода. В пространстве магнитного поля векторы B образуют фигуру — икосаэдр (додекаэдр с треугольными гранями), где каждый треугольник является его гранью. Удобно также рассмотреть в пространстве поля единичную сферу с центром в начале координат. Начало координат в пространстве поля соответствует B = 0 — условию магнитного пересоединения. Если икосаэдр содержит единичную сферу (т.е. внутри него находится начало координат), то проекция всех двенадцати треугольников на сферу даст суммарную площадь, кратную 4π. Площадь проекции одной треугольной грани икосаэдра на единичную сферу является сферическим (криволинейным) треугольником и вычисляется по формуле [2] (со стороной треугольника, вычисленной по формуле [1]). Индекс Пуанкаре определяется выражением [3]. Если же икосаэдр не содержит единичную сферу (начало координат вне его), суммарная проекция равна нулю.

Индекс Пуанкаре — это суммарная площадь проекции икосаэдра, делённая на 4π. В зависимости от ориентации граней (знака нормали) индекс Пуанкаре для бина, содержащего X-точку, равен ± 1. Для бина, не содержащего X-точку, индекс равен нулю. Таким образом, при линейном переборе всех бинов сетки поля мы можем найти X-точку **A** = (x_0, y_0, z_0). Благодаря бездивергентности магнитного поля ($\nabla \cdot B = 0$) индекс Пуанкаре в численных расчётах отличается от 0 или ±1 не более чем на 10^{-15}, что позволяет надёжно определять наличие X-точки.

$$\theta_1 = arccos\ arccos\left(\frac{B_2 \cdot B_3}{|B_2|\,|B_3|}\right) \qquad [1]$$

$$tan\ tan\left(\frac{1}{2}A_i\right) = \frac{B_1 \cdot B_2 \times B_3}{B_1B_2B_3 + (B_1 \cdot B_2)B_3 + (B_1 \cdot B_3)B_2 + (B_2 \cdot B_3)B_1} \qquad [2]$$

$$D = \frac{1}{4\pi}\sum_{i=1}^{12} A_i \qquad [3]$$

ПОСТРОЕНИЕ X-ЛИНИИ МЕТОДОМ MDD

Для построения X-линии применяется метод MDD (Minimum Directional Derivative) [Denton et al., 2024]. В найденной точке A, благодаря регулярной сетке (равномерное расположение датчиков), можно рассчитать матрицу производных:

$$\nabla B = \left(\frac{\partial B_x}{\partial x}\ \frac{\partial B_x}{\partial y}\ \frac{\partial B_x}{\partial z}\ \frac{\partial B_y}{\partial x}\ \frac{\partial B_y}{\partial y}\ \frac{\partial B_y}{\partial z}\ \frac{\partial B_z}{\partial x}\ \frac{\partial B_z}{\partial y}\ \frac{\partial B_z}{\partial z}\right) \qquad [4]$$

Если детерминант матрицы $det(\nabla B) < \mathbf{0}$, то в бине находится X-точка. Собственный вектор матрицы производных, соответствующий наименьшему собственному значению λ_3, указывает направление наименьшего изменения поля. Это направление связывают с X-линией.

Согласно рекомендациям Дентона, направление X-линии считается надёжно определённым, если отношение среднего собственного значения λ_2 к минимальному λ_3 удовлетворяют условию:

$$\left|\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right| > 10 \qquad [5]$$

После вычисления собственного вектора $\boldsymbol{V_3}$, отвечающего λ_3, можно получить точку **B**, лежащую на X-линии и смещённую относительно точки **A** на расстоянии минимального шага сетки:

$$B = A + h_{min} \cdot V_3 \qquad [6]$$

где h_{min} – минимальное расстояние между узлами сетки вдоль осей X, Y и Z. Аналогичным образом мы можем получить следующую точку $C = B + h_{min} \cdot V'_3$, где V'_3 — собственный вектор, соответствующий наименьшему собственному значению λ_3 матрицы ∇B, вычисленной в точке **B**. Процедура повторяется, пока выполняется условие [5], таким образом удается реконструировать X-линию.

Восстановление X-линии по разным событиям показывает, что условие [5] нарушается, когда X-линия «заканчивается» — то есть магнитные линии перестают образовывать характерную конфигурацию X-точки, и их направления становятся произвольными.

Пример пошагового восстановления X-линии показан на рисунке 4. Видно, что на последнем шаге направление поля в X-точке уже сильно искажено, и дальнейшее построение X-линии теряет смысл.

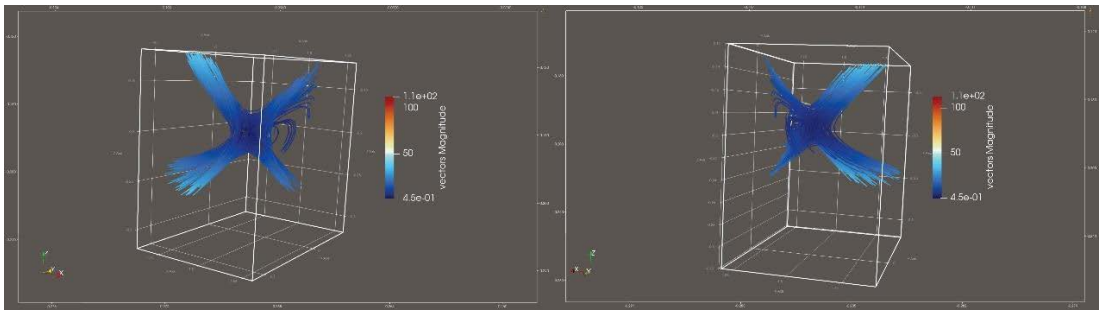

Рис. 4. Восстановление X-линии комбинацией методов индекса Пуанкаре и MDD

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В установке SPERF конфигурация магнитного поля характеризуется существенной компонентой B_y, что приводит к искажению топологии пересоединения и невозможности описания X-точки в рамках двумерной модели.

Метод индекса Пуанкаре в комбинации с методом MDD обеспечивает устойчивое, слабо подверженное шумам решение, поэтому их использование для восстановления X-линии является предпочтительным. Благодаря интерполяции поля RBF-функциями удаётся получить бездивергентное поле ($\nabla \cdot \mathbf{B}$)=0, что обеспечивает отсутствие потока через замкнутую поверхность и позволяет с высокой точностью применять метод индекса Пуанкаре. Однако существуют объективные ограничения (расстояние между датчиками), которые позволяют локализовать X-точку только с точностью до половины шага сетки.

Ранее похожий метод применялся к спутниковым данным Cluster [Xiao et al., 2006] и MMS [Denton et al., 2024], а также к установке SPERF [Mao et al., 2026]. Предыдущие работы были ограничены четырехточечными измерениями, мы обобщаем этот метод на любую регулярную сетку. Предложенная методика минимизирует число итераций и благодаря отсутствию ограничений, накладываемых на поле, является универсальной как для лабораторных установок, так и для спутниковых измерений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00441.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Denton R.E., Liu Y.-H., Agudelo Rueda J.A., Genestreti K.J., Hasegawa H., Hosner M., Torbert R.B., Burch J.L. Determining the orientation of a magnetic reconnection X line and implications for a 2D coordinate system // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2024. Vol. 129. e2023JA032167. DOI: 10.1029/2023JA032167.

Greene J.M. Locating three-dimensional roots by a bisection method // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 98, Issue 2. P. 194–198. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90137-N.

Mao A., Yang X., He X., Zhu Z., Song S., Apatenkov S., Wang Z., Zong J., Liu S., Xiao Q., Wang X. Three-dimensional properties of asymmetrically driven reconnection observed in SPERF-AREX experiments // Fundamental Research. 2026. Vol. 6, No. 4. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.fmre.2026.04.032.

Xiao C.J., Wang X.G., Pu Z.Y., Zhao H., Wang J.X., Ma Z.W., Fu S.Y., Kivelson M.G., Liu Z.X., Zong Q.G., Glassmeier K.H., Balogh A., Korth A., Reme H., Escoubet C.P. In situ evidence for the structure of the magnetic null in a 3D reconnection event in the Earth's magnetotail // Nature Physics. 2006. Vol. 2, No. 7. P. 478–483. DOI: 10.1038/nphys342.