

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.016

ХОЛЛОВСКИЕ ЭФФЕКТЫ И КОЛЛАПС ДИАМАГНИТНОЙ КАВЕРНЫ ПРИ РАЗЛЕТЕ ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННЫЙ ФОН

А.А. Чибранов *, И.Ф. Шайхисламов, В.Г. Посух, А.Г. Березуцкий, Ю.П. Захаров,
И.Б. Мирошниченко, М.С. Руменских, А.Е. Иванов, М.В. Логинов

*Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090,
Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, Россия*

*E-mail: chibrnov2013@yandex.ru

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты лабораторного эксперимента по разлету плазменного облака во внешнее магнитное поле, впервые демонстрирующего подавление характерных Холловских эффектов присутствием фоновой плазмы. Показано, что увеличение концентрации фоновой плазмы приводит к снижению величины Холловских магнитных полей и соответствующих токов, что, в свою очередь, изменяет характер протекания коллапса диамагнитной каверны. При подавлении Холловских эффектов динамика каверны протекает более плавным образом и задерживается по времени. Полученные данные не только обнаруживают влияние фоновой плазмы, но и подчеркивают взаимосвязь между Холловскими эффектами и аномально быстрой динамикой магнитного поля на фазе коллапса диамагнитной каверны.

Введение

Задача разлета облака плазмы в магнитное поле с разреженной фоновой средой в режиме слабо-замагниченных ионов стала отдельной областью исследований после проведения ряда активных испытаний в околоземном космическом пространстве в 60–80-х годах прошлого века, таких как Tordo [1], AMPTE [2,3], CRRES [4]. Эксперименты по выбросам плазмы планируются в будущих миссиях, например, SMART [5], в связи с возможностью передавать энергию на большие расстояния и генерировать различные возмущения, способные влиять на спутниковые системы (связь, навигация и прочее). Несмотря на то, что натурные эксперименты с плазменными выбросами и последовавшие многочисленные лабораторные модельные опыты с лазерной плазмой на ряде установок в Японии, США, СССР и России [6] позволили обнаружить новые явления и значительно продвинуться в их понимании, некоторые фундаментальные вопросы так и остались нерешенными [7]. Одним из таких процессов является коллапс диамагнитной каверны, который происходит с аномально высокой скоростью и не может быть объяснен диффузией магнитного поля, рассчитанной из кулоновских столкновений электронов с ионами [8], или даже аномальным рассеянием на турбулентных пульсациях нижнегибридной дрейфовой неустойчивости (LHDI) [9].

В предыдущих экспериментах авторов [10], выполненных на крупномасштабном лазерно-плазменном стенде КИ-1 (ИЛФ СО РАН) было показано, что при суб-Альфвеновском разлете облака лазерной плазмы (ОЛП) во внешнее магнитное поле B_0 в режиме слабо-замагниченных ионов ($M_A = V_0/V_a \ll 1$; $R_{Li}/R_b \approx 1$; здесь V_0 – скорость разлета облака, V_a – скорость Альфвена в окружающей плазме, R_{Li} – Ларморовский радиус ионов облака, $R_b = \sqrt[3]{3E_0/B_0^2}$ – радиус торможения облака с энергией E_0), коллапс диамагнитной каверны происходит не просто аномально быстро, а в виде переноса со скоростью $V_c \sim V_0$ с поддержанием высокого градиента магнитного поля. В работе [11] было обнаружено, что при разлете сферически-симметричного ОЛП в однородное магнитное поле в токовом слое диамагнитной каверны генерируется крупномасштабное азимутальное магнитное поле, имеющее квадрупольную пространственную конфигурацию в меридиональной плоскости. Это поле является проявлением трехмерного эффекта Холла (членом $\mathbf{J} \times \mathbf{B}/ne$ в законе Ома), вызванного различием в траекториях движения и скоростях ионов и электронов плазменного облака. В случае $R_{Li}/R_b \approx 1$ ионно-плазменная длина c/ω_{pi} оказывается сравнимой с радиусом облака при его расширении до R_b , что является достаточным условием для проявления холловских эффектов. В экспериментах также было обнаружено, что именно электронные токи, связанные с холловским магнитным полем ответственны за

аномально быстрый коллапс диамагнитной каверны. Результаты экспериментов нашли качественное и количественное подтверждение в численных расчетах гибридным кодом [12]. Отметим, что обнаруженное явление имеет прямую физическую аналогию с известной задачей магнитного пересоединения в окрестности Х-точки на масштабе ионной плазменной длины [13,14], где эффект Холла также приводит к быстрой динамике магнитного поля в отрыве от движения ионов.

Эксперименты [10,11] были реализованы в вакуумном магнитном поле, т.е. фоновая плазма, связанная с ионизацией остаточного газа, была очень низкой концентрации. В настоящей работе впервые исследуется коллапс диамагнитной каверны при разлете сферического ОЛП в разреженную замагниченную плазму (фон), что является следующим важным шагом в построении полной картины холловских эффектов в данной проблеме. Результаты работы необходимы для совершенствования уже имеющихся и построения новых адекватных теоретических и численных прогнозных моделей выбросов плазмы в магнитосфере Земли.

Схема и параметры эксперимента

Опыты проводились на стенде КИ-1 с вакуумной камерой диаметром 1.2 м. и длиной 5 м с остаточным давлением не хуже $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Внутри камеры создавалось однородное магнитное поле $\mathbf{B}_0 = 45 \div 100$ Гс. Индукционный тета-пинч заполнял весь объем фоновой плазмой из протонов с варьируемой концентрацией в диапазоне $n_p = 10^{10} \div 10^{13}$ см $^{-3}$ с характерным временем 100 мкс. После этого создавалось облако плазмы с использованием излучения CO $_2$ лазера с длительностью импульса ≈ 100 нс и энергией ≈ 300 Дж, разделенное на четыре луча для облучения по схеме тетраэдра шарообразной мишени диаметром 4 мм. Лазерные пучки фокусировались в пятна диаметром 12 мм и полностью покрывали мишень, расположенную в центре камеры. В качестве материала мишени использовался полиэтилен (C $_2$ H $_4$), и ОЛП состояла из протонов H $^+$, и ионов углерода с разной степенью ионизации, преимущественно C $^{+3}$.

Для регистрации магнитных возмущений использовались 3-х компонентные магнитные зонды с эффективной площадью $S \approx 1$ см 2 каждая, экранированные от электростатических наводок и защищенные от воздействия энергичных заряженных частиц плазмы. Для прямого измерения электрических токов в плазме использовался пояс Роговского. Концентрация плазмы измерялась зондами Ленгмюра. Геометрия полей и расположение диагностики показано на рис. 1. Более подробное описание установки КИ-1 можно найти в [11,12].

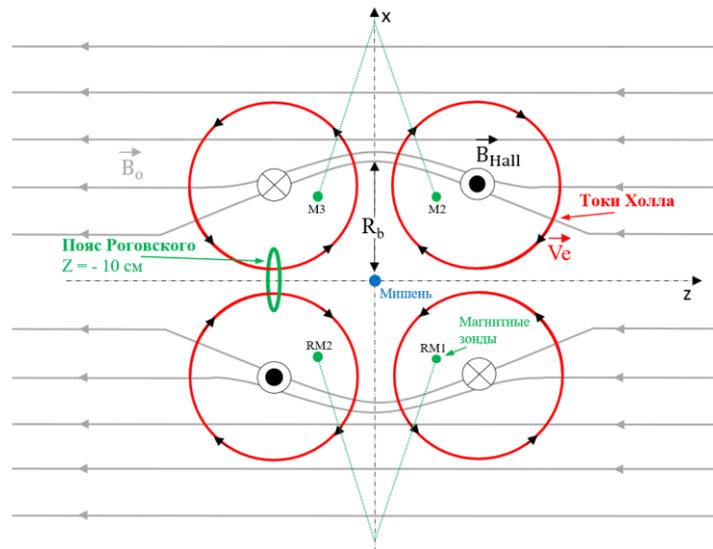


Рисунок 1. Положение лазерной мишени (синим) и диамагнитная каверна с силовыми линиями внешнего магнитного поля \mathbf{B}_0 при разлете плазменного облака. Также схематично изображена геометрия холловских магнитных полей \mathbf{B}_{Hall} (черным) и соответствующих токов электронов со скоростью \mathbf{V}_e (красным), расположение магнитных зондов и пояса Роговского (зеленым). R_b - максимальный радиус диамагнитной каверны, в данных опытах примерно равный 15 см.

Результаты эксперимента

С помощью системы из четырех магнитных зондов M3, M2, RM1, RM2, помещенных симметрично относительно экваториальной плоскости в четырех различных квадрантах, была измерена пространственная конфигурация магнитных полей при разной концентрации фоновой плазмы, создаваемой тета-пинчем.

Рисунок 2 демонстрирует, как примерно в момент времени 1-2 мкс формируется диамагнитная каверна, а в 7-8 мкс происходит ее обратный внос. Холловское магнитное поле наблюдается на фазе коллапса и достигает величины до 40% от B_0 . При этом оно меняет знак от одного квадранта к другому, а также при пересечении фронта диамагнитной каверны. Хорошая корреляция времени прохождения обратного фронта каверны с максимальной величиной азимутальной компоненты и ее резким изменением знака дополнительно подтверждает связность этих физических процессов. Этот процесс протекает, с некоторыми вариациями, примерно одинаково для 4-х зондов, расположенных в разных квадрантах относительно мишени.

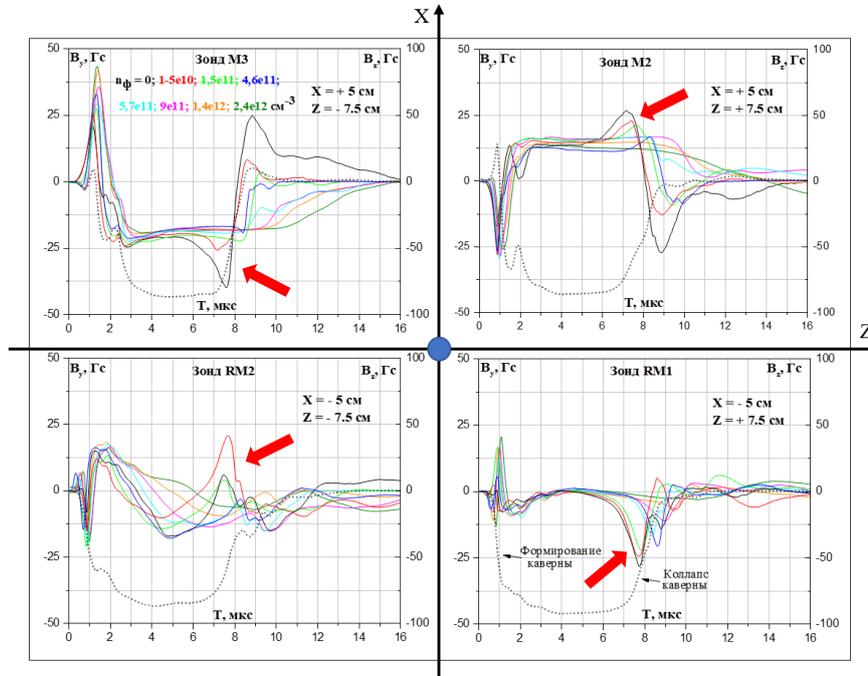


Рисунок 2. Динамика азимутальной компоненты магнитного поля B_y при разлете ОЛП в поле 100 Гс и фоновую плазму различной концентрации (показано разным цветом) в разных квадрантах симметрично относительно мишени (синий круг в центре, точное положение зондов указано на рисунках). Пунктирная линия демонстрирует динамику возмущения основной компоненты поля B_z , с указанной черной стрелкой фазой формирования диамагнитной каверны и ее коллапса. Красные стрелки указывают на азимутальные возмущения, соответствующие холловским магнитным полям, ответственным за коллапс диамагнитной каверны. Нулевой момент времени соответствует созданию ОЛП импульсом лазера.

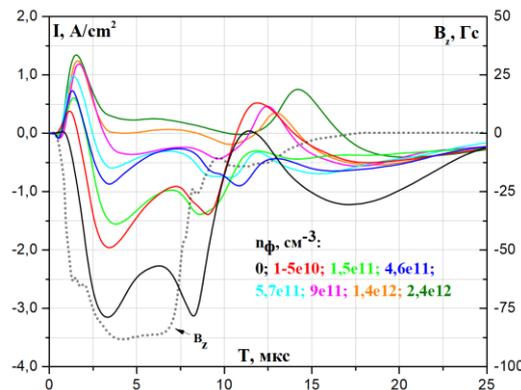


Рисунок 3. Осциллограммы плотности тока, измеренные поясом Роговского на полюсе относительно лазерной мишени ($Z = -12$ см) при разлете ОЛП во внешнее магнитное поле $B_0 = 100$ Гс и фоновую плазму разной концентрации. При отрицательном сигнале с пояса Роговского ток направлен в сторону мишени. Серыми точками показана динамика возмущения основной B_z компоненты.

Предварительное заполнение вакуумной камеры фоновой плазмой с различной концентрацией приводило не только к уменьшению холловских полей, но и к уменьшению величины соответствующих токов (рисунок 3), которые измерялись поясом Роговского на одном из полюсов (на оси Z) (см. рисунок 1). Отметим, что токи были направлены в сторону лазерной мишени, в соответствии с теоретическим анализом и численными расчетами (рис.1, [11]).

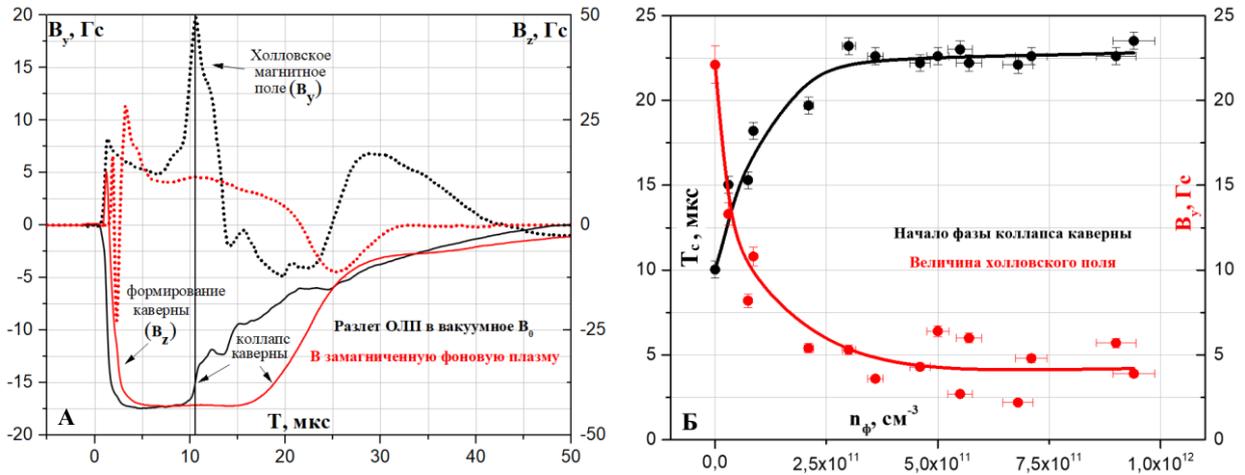


Рисунок 4. А - Возмущения основной B_z компоненты (сплошные кривые), демонстрирующей динамику диамагнитной каверны и азимутального магнитного поля B_y (точками) при разлете ОЛП в вакуумное магнитное поле $B_0 = 45$ Гс (черным) и замагниченную фоновую плазму с концентрацией $n_\phi = 5.5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ (красным), измеренные на расстоянии $R = 10$ см от лазерной мишени. Б - Зависимость времени начала коллапса каверны T_c (черным) и величины азимутального поля B_y (красным) от концентрации фоновой плазмы.

На рисунке 4А отчетливо видно, как присутствие фоновой плазмы не только значительно уменьшает холловское магнитное поле, но и влияет на характер протекания коллапса диамагнитной каверны, который происходит теперь значительно позже, медленнее и без заметных фаз вноса магнитного поля с крутым градиентом. При повышении концентрации фоновой плазмы с 0 до $3 \cdot 10^{11}$ см⁻³ наблюдается пропорциональное уменьшение амплитуды холловского магнитного поля и задерживание начала фазы коллапса диамагнитной каверны. Дальнейшее повышение концентрации фона вплоть до $n_\phi = 9.5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ практически не оказывает влияния на данные величины. Отметим, что скорость Альфвена падает до величины 100 км/с при концентрации фона 10^{12} см⁻³, и таким образом, взаимодействие было во всех рассмотренных условиях до-Альфвеновским $M_A \ll 1$.

Заключение

В ходе проведенного лабораторного эксперимента впервые был продемонстрирован эффект подавления фоновой плазмой холловских эффектов при разлете облака плазмы в магнитное поле в режиме слабо-замагниченных ионов. Увеличение концентрации фоновой плазмы приводит к постепенному уменьшению азимутальных магнитных полей и соответствующих токов электронов, вносящих основное магнитное поле на фазе коллапса диамагнитной каверны. Уменьшение холловских токов также сопровождается кардинальным изменением характера коллапса каверны. Возвращение каверны в присутствии фоновой плазмы протекает более плавно и заметно позже по времени. Это дополнительно подтверждает связь anomalously быстрого коллапса каверны с холловскими магнитными полями. Физический механизм подавления эффекта Холла в задаче разлета сферического ОЛП в замагниченную среду присутствием фоновой плазмы, по-видимому, связан с влиянием фоновых электронов на процесс формирования азимутальных магнитных полей и требует дальнейшего исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-62-00032, <https://rscf.ru/project/24-62-00032/>.

Список литературы

1. *Wescott E.M., Stenbaek-Nielsen H.C., Davis T.N., Jeffries R.A., Roach W.H.* The TORDO 1 polar cusp barium plasma injection experiment // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* – 1978. – V. 83. – №. A4. – P. 1565-1575.
2. *Krimigis S.M., Haerendel G., McEntire R.W., Paschmann G., Bryant D.A.* The active magnetospheric particle tracer explorers (AMPTE) program // *Eos, Transactions American Geophysical Union.* – 1982. – V. 63. – №. 45. – P. 843-850.
3. *Bernhardt P.A. et al.* Observations and theory of the AMPTE magnetotail barium releases // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* – 1987. – V. 92. – №. A6. – P. 5777-5794.
4. *Bernhardt P.A.* Probing the magnetosphere using chemical releases from the Combined Release and Radiation Effects Satellite // *Physics of Fluids B: Plasma Physics.* – 1992. – V. 4. – №. 7. – P. 2249-2256.
5. *Fletcher A.C., Crabtree C., Ganguli G., Siefring C., Soto-Chavez A.R., Netwall C.* Rocket-Released Neutral Clouds in the Ionosphere: Formation, Evolution, and Detection // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* – 2023. – V. 128. – №. 3. – P. e2022JA031039.
6. *Zakharov Y.P.* Collisionless laboratory astrophysics with lasers // *IEEE transactions on plasma science.* – 2003. – V. 31. – №. 6. – P. 1243-1251.
7. *Winske D. et al.* Recalling and updating research on diamagnetic cavities: Experiments, theory, simulations // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* – 2019. – V. 5. – P. 51.
8. *Dimonte G., Wiley L.G.* Dynamics of exploding plasmas in a magnetic field // *Physical Review Letters.* – 1991. – V. 67. – №. 13. – P. 1755.
9. *Davidson R.C. et al.* Effects of finite plasma beta on the lower-hybrid-drift instability // *The Physics of Fluids.* – 1977. – V. 20. – №. 2. – P. 301-310.
10. *Berezutsky A.G., Chibrarov A.A., Efimov M.A., Posukh V.G., Rumenskikh M.S., Trushin P.A., Miroshnichenko I.B., Zakharov Yu.P., Terekhin V.A., Shaikhislamov I.F.* Sub-Alfvénic Expansion of Spherical Laser-Produced Plasma: Flutes, Cavity Collapse and Field-Aligned Jets // *Plasma Physics Reports.* – 2023. – V. 49. – №. 3. – P. 351-361.
11. *Chibrarov A.A., Shaikhislamov I.F., Berezutskiy A.G., Posukh V.G., Trushin P.A., Zakharov Y.P., Miroshnichenko I.B., Rumenskikh M.S., Terekhin V.A.* Hall Effects and Diamagnetic Cavity Collapse during a Laser Plasma Cloud Expansion into a Vacuum Magnetic Field // *Astronomy Reports.* – 2024. – V. 68. – №. 4. – P. 418-428.
12. *Парамоник И.П., Дивин А.В., Чибранов А.А., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф., Семенов В.С.* Трассирование магнитного поля для анализа моделирования диамагнитной полости с учетом и без учета Холловского члена в законе Ома // *Материалы Девятнадцатой ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, Москва, 5-9 февраля 2024.* – С.180.
13. *Biskamp D.* Magnetic reconnection in plasmas // *Astrophysics and Space Science.* – 1996. – Т. 242. – С. 165-207.
14. *Divin A. et al.* Inner and outer electron diffusion region of antiparallel collisionless reconnection: Density dependence // *Physics of Plasmas.* – 2019. – V. 26. – №. 10.