

Постановка и результаты модельных экспериментов нового типа с джетами лазерной плазмы в поперечном магнитном поле в вакууме

Захаров Юрий Петрович, кандидат физико-математических наук
Институт Лазерной Физики СО РАН (Новосибирск)

DOI: 10.5281/zenodo.3474957

Несмотря на большое количество экспериментов в последние годы (см. в [1]), по генерации и распространению джетов Лазерной Плазмы (ЛП) в поперечном магнитном поле в вакууме, физика определяющих эти явления процессов, остается практически неисследованной. Это связано, в первую очередь, с типичными близкими условиями их постановки, в очень сильных полях $B_0 \geq 10$ кГс и при небольшой энергии как лазеров ($Q \leq 10$ Дж), так и кинетической энергии самой плазмы $E_k \sim 1$ Дж. В результате, характерный масштаб взаимодействия [2] квази-сферических сгустков ЛП с полем (на котором их давления сравниваются и ЛП может вытеснять поле, создавая диамагнитную каверну радиусом $R_c \sim R_b$):

$$R_b \sim (3E_k/B_0^2)^{1/3} \quad (1)$$

оказывается весьма малым ≤ 1 мм. Именно поэтому, в таких условиях невозможности применения важнейших зондовых методов [1, 3] (для исследования структуры и динамики плазмы и полей), вплоть до настоящего времени не было еще разработано надежных физических моделей формирования джетов, возникающих также в различных космических и астрофизических условиях [4-6].

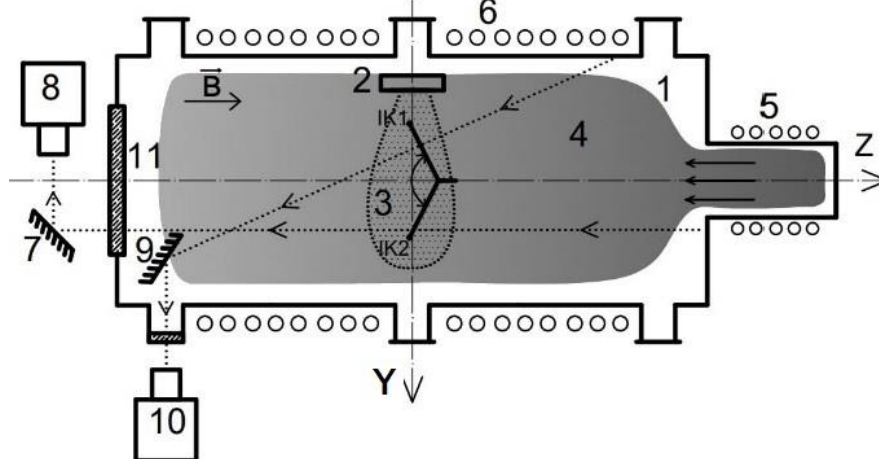


Рис.1.Общая схема экспериментов с лазерной плазмой на стенде **КИ-1** ИЛФ:

1–высоковакуумная камера ($\varnothing 1,2\text{м} \times 5\text{м}$); **2**–узел лазерной мишени (с экраном); **3**- сгусток лазерной плазмы; **4**-поток фоновой плазмы (из тэта-пинча **5**); **6**- система витков соленоида для создания однородного магнитного поля **B** до **500** Гс; **7** (и **9**) – зеркала для оптической диагностики; **8** – МДР(с ФЭУ для спектров); **10** – ЭОП для кадровых съемок; **11** – оптические окна; **ИК1/2** – система зондов «Циркуль» из 2^x пар (Ленгмюровский вместе с 3^x -компл. магнитным), перемещаемыми по **Y** и **X**(вверх-вниз, а схема приведена в горизонтальном сечении)

В данной работе анализируются основные достижения современных лабораторных исследований джетов, в первую очередь, с учетом результатов нового типа наших модельных экспериментов [1] с ЛП большой энергии $E_k \geq 100$ Дж, на стенде КИ-1 ИЛФ [7] с размерами вакуумной камеры ≥ 1 м, снабженной системами передвижных ленгмюровских и магнитных зондов [8], а также Электронно-Оптическим Преобразователем (ЭОПом). Общая схема серии таких опытов «**КИ-Jet**», приведенная на Рис. 1, включает в себя источник фоновой плазмы (**5**) для исследования ее возможного влияния [4] на процессы формирования и распространения джетов ЛП.

Генерация сгустков ЛП (с разлетом в характерном телесном угле $\Delta\Omega \approx 1$ ср) осуществлялась при облучении CO_2 -лазером **ЗГ-2** ($\lambda = 10,6$ мкм, с энергией Q до 200 Дж в импульсе с $\tau \sim 0,1 \div 0,5$ мкс) плоской полиэтиленовой мишени двумя пучками с совмещенными пятнами излучения с поперечным размером $d \approx 1,5 \div 2$ см (и площадью $S \approx 2,5 \div 4$ см²). В таком оптимальном режиме облучения [9,10], в условиях $\tau \cdot V_0 > d$ при малой скорости ЛП-фронта $V_0 \approx 140$ км/с (из-за низкой интенсивности $q = Q\lambda^2/\tau S \sim 3 \cdot 10^{10}$ Вт*мкм²/см², т. е. на пороге [11] плазмообразования), удастся достигнуть генерация сгустков ЛП с большим К.П.Д. [12] до $E_k/Q \sim 50\%$. Таким образом, реальная кинетическая энергия ЛП-сгустков в экспериментах «**КИ-Jet**» могла достигать уровня до $E_k \sim 100$ Дж, что соответствует данным прямых измерений потоков плазмы $j_i = enV_i$ ленгмюровскими зондами [12]. Кроме того, как нами было ранее показано [13], что такого типа ЛП-сгустки (с $\Delta\Omega \geq 1$ ср [14]) могут так же

www.esa-conference.ru

эффективно взаимодействовать с однородным магнитным полем V_0 , как и сферические облака ЛП, если для расчета R_b в (1) вместо реальной E_K использовать эффективную энергию E_0 :

$$E_0 \sim (4\pi/\Delta\Omega) * E_K \approx K * E_K \approx 250 \div 300 \text{ Дж} \quad (2)$$

для геометрического фактора ЛП-сгустка $K \approx 5 \div 6$ [1]. Откуда следует ожидаемый радиус каверны $R_c \approx R_b \approx 46$ см, на котором действительно регистрируется [1] существенное вытеснение поля ΔV на 50 Гс, при его начальном значении $V_0 = 300$ Гс в основном режиме экспериментов «*KI-Jet*». Отметим, что в данном случае заведомо выполняется самое главное условие [15,16] замагниченности ионов ЛП с массой m_i и Ларморовским радиусом $R_L = m_i c V_0 / e z_i V_0$ на МГД-масштабе R_b торможения ЛП полем, а именно:

$$\epsilon_b = R_L / R_b \approx 0,3 \leq 1 \quad (3)$$

при выполнении которого ЛП действительно вытесняет поле и тормозится им на масштабе R_b , несмотря на развитие не-МГД желобковой неустойчивости [16].

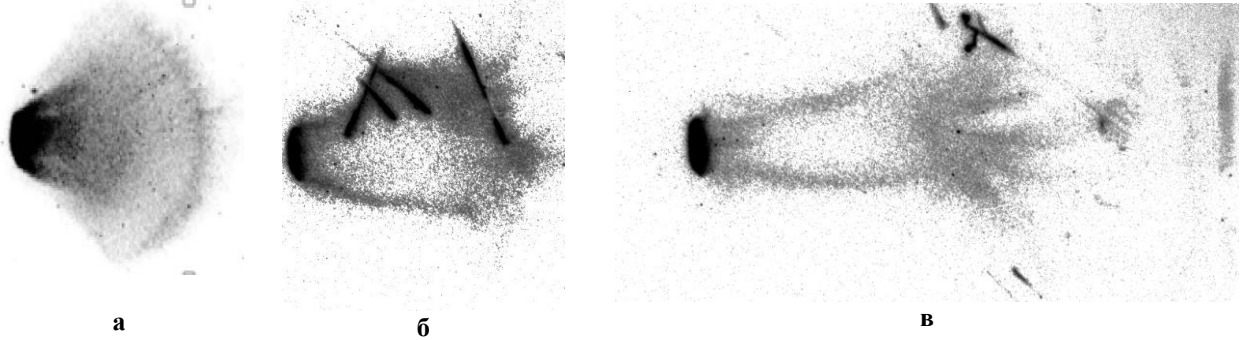


Рис. 2. Фото ЭОПом разлета сгустка Лазерной Плазмы поперек магнитного поля $V_0 = 300$ Гс (в плоскости X-Y, мишень слева) в различные моменты времени: **а** – 4 мкс, **б** – 6,5 мкс и **в** – 8,5 мкс, в близких масштабах (и в различных лазерных «выстрелах» лазера)

На Рис. 2 представлены типичные данные съемок ЭОПом 3^х стадий разлета ЛП-сгустков поперек магнитного поля $V_0 = 300$ Гс: на начальной стадии торможения (**а** – 4 мкс, разлет ЛП в широком угле и развитие мелких желобков на фронте ЛП, на R_b), переходной (**б** – 6,5 мкс, при максимальных размерах каверны) и финальной стадии – старта распространения джета-струи на $R \geq 2R_b$ (**в** – 8,5 мкс) вне каверны со скоростью $V \leq V_0/2$ (Рис. 3) и началом стадии ее схлопывания (по вертикали, на Рис. 4).

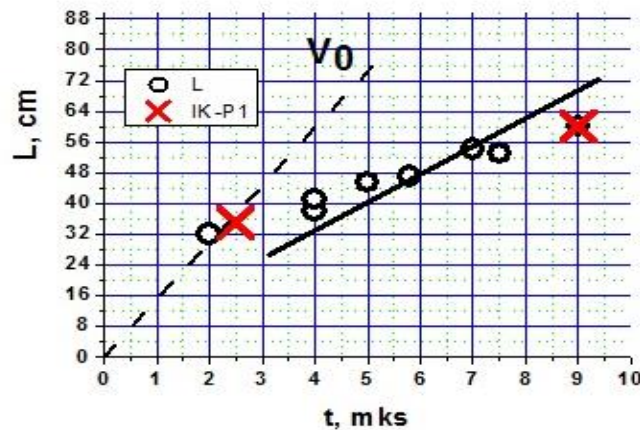


Рис. 3. Данные по 2^х-кратному торможению фронта плазмы в магнитном поле $V_0 = 300$ Гс (**L** от мишени по оси Y, на Рис. 1): **а**) **кружки** – L по снимкам ЭОПа; **б**) **кресты** – по зондам Ленгмюра **IK2** и **P1**.

На Рис. 2 мишень слева, вблизи левого края темного пятна, которое представляет собой конусообразный экран из черной бумаги (для уменьшения засветки фотоприборов от свечения плазмы на мишени). Максимальный диаметр экрана 11,5 см с правой стороны пятна и определяет его размер в вертикальном направлении. Магнитное поле ориентировано перпендикулярно плоскости фото, а темные линии образуются на поверхности стеклянных трубок зондов (при попадании на них плазмы). Ориентировочные расстояния фронта плазмы от мишени составляют: **33**, **53** и **65** см, которые близки к набору полных данных соответствующей (**R-t**) диаграммы фронта ЛП на Рис. 3.

Основными результатами эксперимента «*KI-Jet*» (в т.ч. предварительными, впервые полученными в 2018 г. [17]) является обнаружение диамагнитной каверны (светлая область, вытянутая вдоль джета, внутри него на Рис. 2в), а также ее вертикальное схлопывание внутрь вместе с периферийными слоями плазмы, как это представлено на фото Рис. 2в и показано на графике Рис. 4б (по данным примера на Рис. 4а, для динамики плазмы – сплошная линия и магнитного поля ΔV_z – пунктир).

www.esa-conference.ru

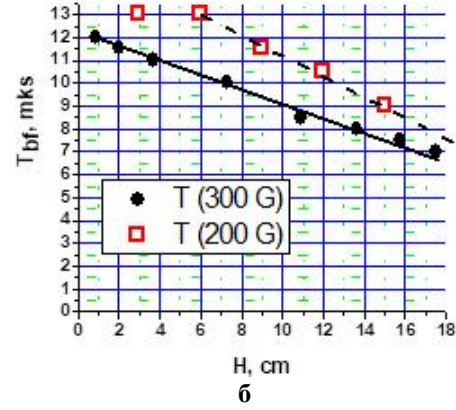
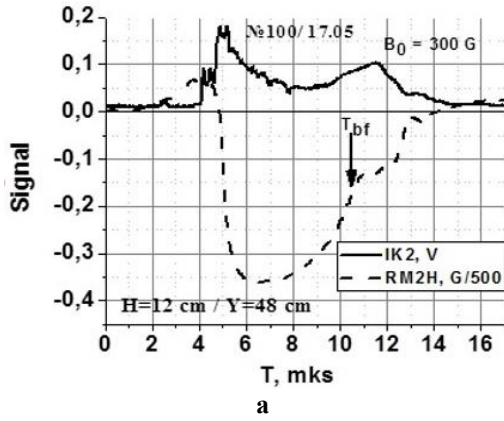


Рис. 4. R-t диаграмма фронта обратного проникновения магнитного поля (по уровню $0,5B_0$) внутрь плазмы в вертикальном направлении H (это по X на Рис. 1, т.е. поперек поля B_0) для двух значений поля $B_0 = 200$ Гс и 300 Гс.

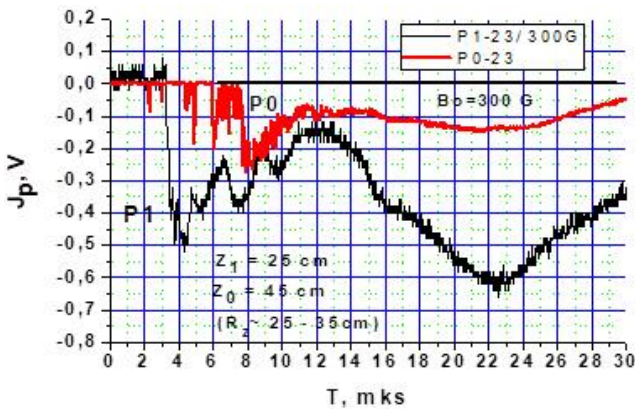


Рис. 5. Экспериментальные данные (зондов $P1$ и $P0$) о распространении плазмы вдоль магнитного поля B_0 (по оси Z , при начальной инъекции ее сгустка поперек поля по Y) со скоростью $V_z \approx 40$ км/с и заметной плотностью потока ионов $J_p = K \cdot U_p(V) \sim 35$ А/см² (для коэффициентов передачи $K_1 \approx 72,5$ и $K_0 \approx 167$ А/В*см² схем этих зондов), примерно соответствующей уровню концентрации $n_z \sim 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³ (электронов). Зонд $P0$ на $Z_0 = 45$ см (от X - Y плоскости расположения ЛПП-мишени, на Рис. 1), а $P1$ ближе к плоскости.

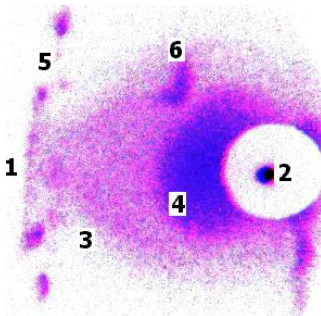


Рис. 6. Разлет Лазерной Плазмы (ЛПП) в квазидипольном магнитном поле ($B_d \geq 1$ кГс)*:

1 – катушка с кА-током (и магнитным моментом ≈ 106 Гс*см³); 2 – область облучения мишени (прикрытая кружком-маской); 3 – граница быстрой части ЛПП; 4 – медленная часть ЛПП ($t = 0,8$ мкс); 5 – наружная изоляция катушки; 6 – магнитный зонд. Расстояние между 1 и 2 равно 10 см (вдоль направления поля B_d).

*В настоящее время, на стенде КИ-1 запланированы эксперименты с джетом ЛПП в сильных полях (> 1 кГс, сравнимых с условиями наших предшествующих опытов [13]), но с существенно большей энергией ЛПП (≥ 100 Дж).

По данным Рис. 4, скорости проникновения поля составляют величины $V_B = dH/dT = 22,5$ и 33 км/с (для 200 и 300 Гс), которые, как по величине так и, главное, по зависимости от поля ($V_B \propto B_0$), удовлетворительно согласуются с предполагаемыми эффектами Холла [18, 19] в процессе проникновения поля, вследствие которых эта скорость V_B может быть сравнима с альфвеновской скоростью $C_A (\propto B_0)$, для характерных параметров задачи (ионного состава и концентрации плазмы на стадии ее торможения и самого поля B_0). Качественно близкая зависимость была получена и исходя из данных по размерам и динамике каверны вдоль поля, хотя вдоль него значительная часть плазмы распространялась на $Z > 2R_b$ (Рис. 5). Приведенные на Рис.5 данные по скорости V_z и концентрации n_z потока плазмы вдоль магнитного поля на расстояниях больше ожидаемого размера каверны по Z ($\sim R_b/2 \sim 23$ см) позволяют приблизительно оценить полное количество частиц «захваченных» полем в силовой трубке радиусом $R_z \sim 30$ см (исходя из области регистрации интенсивных потоков, подобных данным Рис. 5). Это можно сделать, исходя из определения регистрируемой зондами плотности потока ионов $J_p \approx n_z V_z$, откуда полное число частиц N , вылетевших по Z через площадь S_z (в обе стороны по Z) в течение времени Δt (~ 2 мкс, по полу-высоте для P_0 , на Рис. 5) составит (с точностью до размеров R_z области, коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии на зондах, до $\gamma \approx 0,7$, а также среднего $\langle m_i/z_i \rangle \approx 2,5$ а.е.м. ионов ЛПП):

$$N_{eZ} \approx 2J_p * S_z * \Delta t / e \sim 3 * 10^{18} \quad (4)$$

что близко к начальному полному реальному числу электронов в ЛПП-сгустке $N_{eK} \approx 2 * 10^{18}$, определяемому исходя из реальной (2) кинетической энергии ЛПП:

$$E_K \approx E_0/5 \approx 60 \text{ Дж} \sim 0,3 \langle m_i/z_i \rangle N_{eK} * V_0^2 \quad (5)$$

В заключение отметим, что ранее, подобные нашим (Рис. 2) данные ЭОП были получены только недавно [20] в «классической» постановке (фото ЛП на мм-масштабах в поле до 5700 Гс) и без количественных данных зондов о структуре и динамике поля и концентрации. Поэтому в настоящее время, только данные об этом именно эксперимента «*KI-Jet*» могут послужить базой для проверки многочисленных теоретических и численных моделей [21] джетов, в частности, для проверки роли эффекта Холла (Рис. 4) в процессах проникновения магнитного поля внутрь джетов.

Данные эксперименты были проведены в рамках Проекта ИЛФ 0307-2018/2019-0015 Программы СО РАН по Фундаментальным Исследованиям, а дополнительные (с магнитным полем [22] до 10 кГс) – по Проекту 0307-2018-022 ИЛФ Программы №6 Фундаментальных Исследований Президиума РАН на 2019 год.

Литература:

1. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Терехин В.А. и др. Новый тип крупномасштабных экспериментов для лабораторной астрофизики с коллимированными струями лазерной плазмы в поперечном магнитном поле // Квантовая Электроника.- 2019. - Т. 49. -№2.-С. 181-186.
2. Райзер Ю.П. О торможении и превращениях энергии плазмы, расширяющейся в пустом пространстве, в котором имеется магнитное поле // Журнал Прикладной Механики и Технической Физики. -1963, №6.-С. 19-28.
3. Захаров Ю.П., Энциклопедия низкотемпературной плазмы, Вводный Т. II, ред. В. Е. Фортов, Наука, М. - 2000, - СС. 463-466; 474-476; 483-490.
4. Zakharov Yu.P., Eremin A. V., Orishich A. M., et al., Laboratory simulation of plasma jet propagation across geomagnetic field at presence of plasma background // Advances in Space Research.- 2002. – V.29.-№9 – P. 1351-1356.
5. Mishin E.V., Interaction of substorm injections with sub-auroral geospace: 1. Multispacecraft observations of SAID //J. Geophys. Res. A.-2013.-V.118. P. 5782-5796.
6. Higginson D.P., Revet G., Khiar B., et al, Detailed characterization of Laser-Produced astrophysically-relevant jets formed via poloidal magnetic nozzle // High Energy Density Physics. -2017. – V.23.-P.48-59.
7. Zakharov Yu.P. Collisionless Laboratory Astrophysics with Lasers // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2003.-V. 31.-№6 – P. 1243-1251.
8. Захаров Ю.П. Особенности зондовых методов исследования взаимодействия потоков лазерной плазмы с замагниченной фоновой средой // В Сб. «Мощные СО2-лазеры для плазменных экспериментов и технологии», с. 125-132 , ИТПМ СО АН , Новосибирск (1986).
9. Mora P. Theoretical model of absorption of laser-light by a plasma // Physics of Fluids. – 1982.-V. 25.-№6 – P. 1051-1056.
10. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН.- 2002. – Т.172.- №3. - С.301–333.
11. Захаров Ю.П., Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Лазерная плазма и моделирование нестационарных космических процессов. Под ред. Н.Г.Преображенского (Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1988) 220 С.
12. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., и др. Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования бесстолкновительных ударных волн в замагниченной космической плазме // Квантовая Электроника.- 2016. – Т. 46.-№5.- С. 399-405.
13. Zakharov Yu.P., Pisarczyk T., Andrzej Kasperczuk, et al, Investigation of dynamic and stability of laser-produced plasma in strong external magnetic field // Optika Applicata.-2000.-V. XXX.- n.1.-P. 41-59.
14. Ахсахалиян А. Д., Талонов С. В., Лучин В. И. и др., Угловое распределение разлетающейся в вакуум эрозивной лазерной плазмы // ЖТФ.- 1988.- Т. 58 .-№10.- С. 1885-1892.
15. Захаров Ю.П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г. и др., Экспериментальное исследование эффективности торможения магнитным полем расширяющихся облаков диамагнитной плазмы // Физика Плазмы. –1986.- Т. 12.-№10.-С.1170-1176.
16. Захаров Ю.П., Антонов В. М., Бояринцев Э. Л. и др., Роль желобковой неустойчивости Холловского типа при взаимодействии лазерной и космической плазмы магнитным полем // Там же.- 2006.- Т. 32.-№3.-С. 207-229.
17. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A. G., Terekhin V. A., et al., New type of large scale laser plasma experiments for laboratory astrophysics // Proc. VIII Int. Symp. On Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2018), Novosibirsk, С. 228–229.
18. Swanekamp S.B., Grossman J.M., Fruchtman A., et al., Particle-in-cell simulations of fast magnetic field penetration into plasmas due to the Hall electric field // Physics of Plasmas, V. 3, P. 3556 (1996).
19. Fruchtman A., Fast magnetic field penetration into low resistivity plasma // J. Plasma Phys., V. 83, n1, #595830104 (2017).
20. Behera N., et al, Two directional fast imaging of plasma plume in variable magnetic field: Structure and dynamics of the plume in diamagnetic and non-diamagnetic limits // Phys. Plasmas, V. 24, #033511 (2017).
21. Moritaka T., et al, Spontaneous focusing of plasma flow in a weak perpendicular magnetic field // Phys. Plasmas, V. 23, # 032110 (2016).
22. Zakharov Y., Ponomarenko A., Vshivkov K., Posukh V., Boyarintsev E., Melekhov A., Berezutsky A., Chibrarov A., Rumenskikh M. et al., Generation of Quasi-Perpendicular Collisionless Shocks by Laser-Produced Plasma with Ions of Different Masses for Experimental Study of the Effects of Super-Compression of Earth's Magnetosphere by Giant Coronal Mass Ejections // AIP Conference Proceed.-2019.- V. 2098.-#020018.(12p.). doi.org/10.1063/1.5098162.