

В.И. Крауз, В.С. Бескин\*, В.В. Мялтон, А.М. Харрасов, И.В. Ильичев, С.С. Ананьев, К.Н. Митрофанов\*\*, М. Paduh, \*\*\*, K. Tomaszewski\*\*\*\*,Д.А Войтенко\*\*\*\*\*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

\*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

\*\* ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва, Россия

\*\*\*Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland

\*\*\*\*ACS Ltd. Warsaw. Poland

\*\*\*\*ГНПО СФТИ, Сухум, Абхазия

# Моделирование формирования головной ударной волны

## нерелятивистских джетов на установках типа «Плазменный Фокус»

#### Ввеление

Лабораторное моделирование струйных выбросов молодых звездных объектов является одним из интенсивно развиваемых направлений. Хорошо известны работы по моделированию этих выбросов с помощью быстрых Z пинчей [1], мощных лазеров [2], плазменных пушек [3] и других устройств. Значительный прогресс в последнее время достигнут на установках типа «плазменный фокус» (ПФ) [4, 5]. Было показано, что на этих установках выполняются основные законы подобия, необходимые для моделировани астрофизических джетов, что обуславливает правомочность их использования в подобнь экспериментах. Одним из достоинств моделирования с использованием ПФ систем является возможность исследования динамики параметров плазменных потоков при распространении на значительные расстояния в среде, заполненной газом. Это позволяе моделировать динамический процесс формирования ударной волны в зависимости контраста, скорости джета, распределения магнитных полей и др.

### Плазменный фокус



#### Масштабирование

Важнейшим условием успешного моделирования является, безусловно, соответствие лабораторного эксперимента реальным астрофизическим источникам. Это становится возможным благодаря отсутствию внутренних масштабов в уравнениях идеальной магнитной гидродинамики, что позволяет исследовать идентичные процессы на совершенно различных временных и пространственных масштабах.

1	Таблица	а 1: Осно	вные сво	йства эк	сперимента	льных у	станово		YSO		PF-3		
	техн.	длина	радиус	время	V	В	Ι	n	Т				(35 см над анодом)
		(см)	(см)	$(\mu c)$	(км с <sup>-1</sup> )	$(\Gamma c)$	(MA)	$({\rm CM}^{-3})$	(эB)	Число Маха	10 - 50	> 1, сверхзвуковое	> 10
VSO		$10^{17}$	10 <sup>15</sup>	10 <sup>9</sup> c	$\sim 100$	$10^{-4}$	( )	104	1	$\mathcal{M}=v_{ m jet}/c_{ m s}$		течение	(для Ne и Ar)
		100	10	10 0	100	104	0.2	1016	1 5	Альфвеновское число Маха	$\sim 10 - 40$		> 1
ΠΨ-3	ПИНЧ	100	10	$\sim 10$	$\sim 100$	101	2-3	1010	1-0	$\mathcal{M}_{ m A} = v_{ m jet}/V_{ m A}$			
PF-1000	ПИНЧ									β	≪ 1 около источника		$\sim 0.35$
Феникс	ПИНЧ									$(4\pi P/B^2)$	$\sim 1$ при 100 AU		(для Ne и Ar)
Caltech		10	1	5		$10^{3}$		$10^{16}$	2-4	число Рейнольдса	$10^{6} - 10^{8}$	$\gg 1$ , вязкость	$10^4 - 10^5$
MAGPIE	ПИНЧ	0,5	$0,\!1$	$0,\!1$	200	$\sim 10^5$		$10^{18}$	3-5	${\cal R}{ m e}=LV/\eta$		не важна	
LabJet	пинч	100	2-10	$\sim 10$	30-80	$\sim 10^4$		$\sim 10^{15}$	1-20	магнтный Рейнольдс	$\sim 10^{15}$	> 1, вмороженное	$\sim 100$
LULI	лазер	0,2	0,01	0,001	90-200			$\sim 10^{18}$	$1,\!5$	${\cal R} { m e}_{ m m} = L V / \eta_{ m m}$		поле	
ЦНИИМаш	лазер	1	0,1	0,1	$\sim 100$	$\sim 10^8$		$\sim 10^9$	1	число Пекле	$\sim 10^6$	> 1, конвективный	$> 10^{7}$
									]	$\mathcal{P}e = LV/\chi$		перенос тепла	
$a_{\rm r} =$	L <sub>lab</sub>		a –	$\rho_{lab}$		a. <sub>n</sub>	$=\frac{P_{la}}{P_{la}}$	<u>b</u>		число Лундквсита	$\sim 10^{13}$	> 1, диффузия	$\sim 10$
$\alpha_L$	${}^{\boldsymbol{\alpha}_{L}}{}^{-}L_{ast}$		$a_{\rho} = \rho_{ast}$			υp	$P_{ast}$			$\mathcal{L}\mathrm{u}=LV_\mathrm{A}/\eta_\mathrm{m}$		поля мала	
										контраст плотности	> 1		1 - 10
$a_L \sim 10^{-1}$	$a_L \sim 10^{-14} - 10^{-15}$			$a_{ ho} \sim 10^{12} - 10^{13}$			$_{P} \sim 10^{1}$	12 - 10	$0^{13}$	$(n_{ m jet}/n_{ m amb})$			
	YSO ПФ-3 РF-1000 Феникс Саltесh MAGPIE LabJet LULI ЦНИИМаш $a_L =$	Таблица Техн. Техн. YSO ПФ-3 ПФ-3 Пинч Феникс Пинч Саltесh МАСРІЕ ЦНИИ лазер ЦНИИ Маш лазер $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$	Таблица 1: Осно $ \begin{array}{c c}  & \text{техн.} & \text{длина} \\ \hline  & (см) \\ \hline  & YSO & 10^{17} \\ \hline  & \Pi\Phi-3 & пинч & 100 \\ \hline  & PF-1000 & пинч & \\ \hline  & \Phiеникс & пинч & \\ \hline  & \Phiеникс & пинч & \\ \hline  & Caltech & 10 \\ \hline  & MAGPIE & пинч & 0,5 \\ \hline  & LabJet & пинч & 100 \\ \hline  & LULI & лазер & 0,2 \\ \hline  & ЦНИИМаш & лазер & 1 \\ \hline  & a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}} \\ \hline  & a_L \sim 10^{-14} - 10^{-15} \\ \end{array} $	Таблица 1: Основные сво         техн.       длина       радиус         (см)       (см)         YSO $10^{17}$ $10^{15}$ ПФ-3       пинч $100$ $10$ PF-1000       пинч $00$ $10$ Феникс       пинч $00$ $10$ Саltech $10$ $1$ MAGPIE       пинч $0,5$ $0,1$ LabJet       пинч $100$ $2-10$ LULI       лазер $0,2$ $0,01$ $d_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = a_{\rho}$	Таблица 1: Основные свойства эктехн.длинарадиусвремя(см)(см)( $\mu$ с)YSO10 <sup>17</sup> 10 <sup>15</sup> 10 <sup>9</sup> сПФ-3пинч10010~ 10PF-1000пинчФеникспинчCaltech1015MAGPIEпинч0,50,10,1LabJetпинч1002-10~ 10LULIлазер0,20,010,001ЦНИИМашлазер10,10,1 $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_L \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ $a_\rho \sim 10^{12}$	Таблица 1: Основные свойства экспериментатехн.длинарадиусвремяV(см)(см)( $\mu$ с)(кмс^{-1})YSO10 <sup>17</sup> 10 <sup>15</sup> 10 <sup>9</sup> с~ 100ПФ-3пинч10010~ 10~ 100PF-1000пинчФеникспинчCaltech1015-MAGPIEпинч0,50,10,1200LabJetпинч1002-10~ 1030-80LULIлазер0,20,010,00190-200ЦНИИМашлазер10,1~ 100 $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_L \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ $a_\rho \sim 10^{12} - 10^{13}$	Таблица 1: Основные свойства экспериментальных утехн.длинарадиусвремяVB(см)(см)( $\mu$ c)(кмс^{-1})(Гс)YSO10 <sup>17</sup> 10 <sup>15</sup> 10 <sup>9</sup> с~ 10010 <sup>-4</sup> ПФ-3пинч10010~ 10~ 10010 <sup>4</sup> PF-1000пинч10010 <sup>4</sup> Феникспинч10010 <sup>4</sup> Caltech101510 <sup>3</sup> -10 <sup>3</sup> MAGPIEпинч0,50,10,1200~ 10 <sup>5</sup> LabJetпинч1002-10~ 1030-80~ 10 <sup>4</sup> LULIлазер0,20,010,00190-200-ЦНИИМашлазер10,10,1~ 100~ 10 <sup>8</sup> $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_P$	Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установотехн.длина радиусвремяVBI(см)(см)( $\mu$ с)(кмс <sup>-1</sup> )(Гс)(МА)YSO10 <sup>17</sup> 10 <sup>15</sup> 10 <sup>9</sup> с~ 10010 <sup>-4</sup> ПФ-3пинч10010~ 10~ 10010 <sup>4</sup> PF-1000пинч00~ 10~ 10010 <sup>4</sup> Феникспинч101510 <sup>3</sup> MAGPIEпинч0,50,10,1200~ 10 <sup>5</sup> LabJetпинч1002-10~ 1030-80~ 10 <sup>4</sup> LULIлазер0,20,010,00190-20010 <sup>4</sup> ЦНИИМашлазер10,10,1~ 100~ 10 <sup>8</sup> $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_P = \frac{P_{la}}{P_{ast}}$	Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установок $\square$ техн.длина раднус время $V$ $B$ $I$ $n$ $(см)$ $(см)$ $(\mu c)$ $(\kappa_M c^{-1})$ $(\Gamma c)$ $(MA)$ $(cm^{-3})$ YSO $10^{17}$ $10^{15}$ $10^9$ c $\sim 100$ $10^{-4}$ $10^4$ $\Pi \Phi$ -3 $\Piинч$ $100$ $10$ $\sim 10$ $\sim 100$ $10^4$ $2.3$ $10^{16}$ PF-1000 $\Piинч$ $10$ $1$ $5$ $10^3$ $10^{16}$ PF-1000 $\Piинч$ $0.5$ $0.1$ $0.1$ $200$ $\sim 10^5$ $10^{18}$ LabJet $\Piинч$ $100$ $2-10$ $\sim 10$ $30-80$ $\sim 10^4$ $\sim 10^{15}$ LuLI $_{Ja3ep}$ $0.2$ $0.01$ $0.001$ $90-200$ $\sim 10^{18}$ LHИИМаш $_{Ja3ep}$ $1$ $0.1$ $0.1$ $\sim 100$ $\sim 10^8$ $\sim 10^9$ $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}$	Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установоктехн.длина радиусвремяVBInT(см)(см)( $\mu$ с)(кмс <sup>-1</sup> )(Гс)(МА)(см <sup>-3</sup> )(9B)YSO10 <sup>17</sup> 10 <sup>15</sup> 10 <sup>9</sup> с~10010 <sup>-4</sup> 10 <sup>4</sup> 1ПФ-3пинч10010~10~10010 <sup>4</sup> 2-310 <sup>16</sup> 1-5PF-1000пинч10 <sup>3</sup> 10 <sup>16</sup> 2-4MAGPIEпинч0,50,10,1200~10 <sup>5</sup> 10 <sup>18</sup> 3-5LabJetпинч1002-10~1030-80~10 <sup>4</sup> ~10 <sup>15</sup> 1-20LULIлазер0,20,010,00190-200~10 <sup>18</sup> 1,5ЦНИИМашлазер10,1~100~10 <sup>8</sup> ~10 <sup>9</sup> 1 $a_L = \frac{L_{lab}}{L_{ast}}$ $a_\rho = \frac{\rho_{lab}}{\rho_{ast}}$ $a_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}$	Таблина 1: Основные свойства экспериментальных установок </th <th>Таблипа 1: Основные свойства экспериментальных установокYSOYSO<math>(x_{M})</math><math>(x_{M})</math><math>(\mu)</math><math>(\kappa_{M} c^{-1})</math><math>(\Gamma c)</math><math>(MA)</math><math>(c_{M}^{-3})</math><math>(sB)</math>YSO<math>10^{17}</math><math>10^{15}</math><math>10^{9}</math> c<math>100</math><math>10^{-4}</math><math>10^{4}</math><math>1</math><math>\Pi \Phi</math>-3<math>mmu</math><math>100</math><math>10</math><math>\sim 100</math><math>10^{-4}</math><math>10^{4}</math><math>1</math>PF-1000<math>mmu</math><math>mmu</math><math>mmu</math><math>(\kappa_{M} c^{-1})</math><math>(\Gamma c)</math><math>(MA)</math><math>(c_{M}^{-3})</math><math>(sB)</math><math>(Caltech)</math><math>10</math><math>1</math><math>5</math><math>10^{3}</math><math>10^{16}</math><math>2^{-4}</math>MAGPIE<math>mmu</math><math>0,5</math><math>0,1</math><math>0,1</math><math>200</math><math>\sim 10^{4}</math><math>10^{15}</math><math>2^{-2}</math><math>(LULI)</math><math>naxep</math><math>0,2</math><math>0,01</math><math>0,01</math><math>90\cdot200</math><math>\sim 10^{18}</math><math>1,5</math><math>(IHHMMam)</math><math>naxep</math><math>1</math><math>0,1</math><math>0,01</math><math>90\cdot200</math><math>\sim 10^{19}</math><math>1</math><math>a_{L} = \frac{L_{1ab}}{L_{ast}}</math><math>a_{\rho} = \frac{\rho_{1ab}}{\rho_{ast}}</math><math>a_{P} = \frac{P_{1ab}}{P_{ast}}</math><math>\alpha_{P} = \frac{P_{1ab}}{P_{ast}}</math><math>\alpha_{IO}^{-1} - 10^{-15}</math><math>a_{L} \sim 10^{-14} - 10^{-15}</math><math>a_{\rho} \sim 10^{12} - 10^{13}</math><math>a_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}</math><math>a_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}</math><math>\alpha_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}</math></th> <th>Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установок<math>rexn.длиша раднус времяVBInT(са)(са)(ск)(кк)(кк)(гс)(MA)(са-3)(9B)YSO10171016109 c~ 10010-41041ПФ-3типч10010~ 10<math>\sim</math>10010<sup>4</sup>2-310<sup>16</sup>1-4ФениксшичЧисло Маха<math>\sim</math>10 - 40ФениксшичCaltech101510<sup>3</sup>10<sup>16</sup>2-4MAGPIEипч0,50,10,1200~ 10<sup>5</sup>10<sup>18</sup>3-5LuLLласер0,20,010,01090-200~ 10<sup>18</sup>1,5ЦННИМатласер10,10,1~ 100<math>\sim</math><math>a_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}</math>YSOa<sub>L</sub><math>\frac{Luab}{Last}</math><math>a_P = \frac{P_{lab}}{\rho_{ast}}</math><math>a_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}</math><math>a_P = 10^{12} - 10^{13}</math><math>a_P \sim 10^{12} - 10^{13}</math><math>a_P \sim 10^{12} - 10^{13}</math><math>a_P \sim 10^{12} - 10^{13}</math></math></th>	Таблипа 1: Основные свойства экспериментальных установокYSOYSO $(x_{M})$ $(x_{M})$ $(\mu)$ $(\kappa_{M} c^{-1})$ $(\Gamma c)$ $(MA)$ $(c_{M}^{-3})$ $(sB)$ YSO $10^{17}$ $10^{15}$ $10^{9}$ c $100$ $10^{-4}$ $10^{4}$ $1$ $\Pi \Phi$ -3 $mmu$ $100$ $10$ $\sim 100$ $10^{-4}$ $10^{4}$ $1$ PF-1000 $mmu$ $mmu$ $mmu$ $(\kappa_{M} c^{-1})$ $(\Gamma c)$ $(MA)$ $(c_{M}^{-3})$ $(sB)$ $(Caltech)$ $10$ $1$ $5$ $10^{3}$ $10^{16}$ $2^{-4}$ MAGPIE $mmu$ $0,5$ $0,1$ $0,1$ $200$ $\sim 10^{4}$ $10^{15}$ $2^{-2}$ $(LULI)$ $naxep$ $0,2$ $0,01$ $0,01$ $90\cdot200$ $\sim 10^{18}$ $1,5$ $(IHHMMam)$ $naxep$ $1$ $0,1$ $0,01$ $90\cdot200$ $\sim 10^{19}$ $1$ $a_{L} = \frac{L_{1ab}}{L_{ast}}$ $a_{\rho} = \frac{\rho_{1ab}}{\rho_{ast}}$ $a_{P} = \frac{P_{1ab}}{P_{ast}}$ $\alpha_{P} = \frac{P_{1ab}}{P_{ast}}$ $\alpha_{IO}^{-1} - 10^{-15}$ $a_{L} \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ $a_{\rho} \sim 10^{12} - 10^{13}$ $a_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}$ $a_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}$ $\alpha_{P} \sim 10^{12} - 10^{13}$	Таблица 1: Основные свойства экспериментальных установок $rexn.длиша раднус времяVBInT(са)(са)(ск)(кк)(кк)(гс)(MA)(са-3)(9B)YSO10171016109 c~ 10010-41041ПФ-3типч10010~ 10\sim1001042-310161-4ФениксшичЧисло Маха\sim10 - 40ФениксшичCaltech101510310162-4MAGPIEипч0,50,10,1200~ 10510183-5LuLLласер0,20,010,01090-200~ 10181,5ЦННИМатласер10,10,1~ 100\sima_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}YSOaL\frac{Luab}{Last}a_P = \frac{P_{lab}}{\rho_{ast}}a_P = \frac{P_{lab}}{P_{ast}}a_P = 10^{12} - 10^{13}a_P \sim 10^{12} - 10^{13}a_P \sim 10^{12} - 10^{13}a_P \sim 10^{12} - 10^{13}$

Таблица 2: Основные безразмерные параметры

изолятор, 4 – вакуумна камера, С – источник питания, L – внешняя индуктивность, S – разрядник. І – фаза про II – фаза ускорения; III фаза плотного плазменного фокуса

I — анод, 2 — катод, 3 -

Конфигурация Филиппова

Конфигурация Мейзера

После предварительной откачки камера заполнялась рабочим газом (H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, He, Ne, Ar и смеси) под давлением в несколько Торр. После подачи напряжения конденсаторной батаре на электроды разрядной системы в области изолятора формируется токонесуща плазменная оболочка (ТПО), которая под действием сил Ампера движется к торцу анода и затем сжимается к оси с образованием пинча. Формирование пинча сопровождается диссипацией накопленной в цепи магнитной энергии и появлением пика на производной разрядного тока. На рисунке показаны последовательные положения ТПО и область формирования пинча. Пинч является источником различных излучений, в том числе плазменных потоков, распространяющихся со сверхзвуковой скоростью вдоль оси системы и являющихся основным объектом наших исследований. Существенного расширения диапазона экспериментальных условий можно добиться путем создания профилированных газовых распределений с помощью импульсного напуска газа. При этом начальное газовое распределение будет определяться областью дополнительной инжекции.

#### Экспериментальная база

Лабораторное моделирование струйных выбросов молодых звездных объектов было инициировано в НИЦ «Курчатовский институт» Е.П. Велиховым. Эксперименты проводятся на установке ПФ-3 (плазменный фокус типа Филиппова), крупнейшей в мире установке этого класса. В последнее время в рамках проектов РФФИ развивается широкое международное сотрудничество. Эксперименты проводятся также на установках PF-1000U (Институт физики Формирование потока в прианодной плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава) и КПФ-4 «Феникс» (ГНПО СФТИ, Сухум).







#### Результаты экспериментального моделирования

Плазменный поток в ПФ-разряде формируется во время пинчевания токонесущей плазменной оболочки на оси системы на стадии развала пинча и далее движется в фоновой плазме со скоростью примерно 10<sup>7</sup> см/с. В отличие от разряда в водороде, при разряде в неоне и аргоне сохраняется компактность головной части плазменного потока при его распространении на значительные расстояния, что свидетельствует о важной роли радиационного охлаждения



области установки ПФ-3. Масштаб 1 см

Фотографии головной части потока на различных расстояниях в различных газах на установке ПФ-3. Масштаб 1 см



Щелевые развертки плазменного потока при разряде в водороде (слева) и в аргоне (справа) на установке КПФ-4 [6]. Длительность развертки 6 мкс

5 cm

Фотографии головной части плазменного потока на расстоянии 40 см от анода. Установка PF-1000U

Сценарий формирования и динамики потока Модель головной части в режиме импульсной инжекции неона. плазменного потока







ПΦ-3 НИЦ «Курчатовский институт»

КПФ-4 «Феникс» СФТИ, Сухум

Схема эксперимента







**PF-1000U** IPPLM, Warsaw

Установка ПФ-3 Для исследования потоков применена трехсекционная пролетная камера диагностическими патрубками, позволило ЧТО исследовать динамику плазменного потока при его распространении на расстояния ≥ 100 см



**КПФ-4**: 1 - вакуумная камера; 2 - анод; 3 - катод; 4 - изолятор; 5 – диагностические окна; 6 - патрубок вакуумной откачки;



Стационарной напуск дейтерия (а), неона (б) и стационарный напуск D<sub>2</sub> и импульсная инжекция Ne На рис. (а) виден магнитный зонд

#### Измерения магнитных полей



Результаты измерений тороидального магнитного поля в плазменной струе на расстояниях  $z_1$ =40 см,  $z_2$ =60 см и  $z_3$ =74 см от поверхности анода установки PF-1000U на радиусах 3 см, 4.5 см и 6 см. Спад магнитного поля с увеличением радиуса соответствует протеканию продольного тока в приосевой зоне. Наблюдается также диссипация магнитного поля по мере удаления от анода.







Последовательные фотографии области пинчевания в рентгеновском диапазоне (а), и области генерации потока в увеличенном масштабе (б); Фотография потока в видимом спектре на расстоянии 40 см от анода (в) и его распределения тока в потоке ядра в увеличенном масштабе (г), а также фотография интегральная BO времени плазменного потока в видимом спектре (д). Стрелками показаны направление осевого тока и токов замыкания. [7].

Фотография плазменного потока потока (движение потока справа налево) и модельная схема





**PF-1000U** : используется осевая инжекция газа в область формирования пинча

7 - разрядники; С - батарея установки; *RC* – пояс Роговского; 8 - магнитный зонд; 9 - вакуумный ввод для магнитного зонда, 10 - оптический коллиматор.

внешним

полем

В

области

Эксперименты с внешним полоидальным полем



Зависимость величины азимутального магнитного поля от расстояния от анода без внешнего полоидального поля (🗘) и с внешним наложенным полем (Д)

#### Выводы

- Установки типа «плазменный фокус» могут быть успешно использованы при моделировании динамики джетов молодых звездных объектов.
- При распространении плазменного потока в фоновом газе формируется ударная волна, близкая по форме к головным ударным волнам реальных астрофизических объектов.
- Исследована структура головной построена части потока И феноменологическая модель плазменного выброса с токами замыкания.
- Показано, что изменением условий эксперимента можно воздействовать на форму и структуру потока, что открывает возможность исследования влияния различных факторов (радиационное охлаждение, магнитные поля, плотность распределение окружающего газа и др.) при моделировании И астрофизических джетов.

#### Литература

1. S. V. Lebedev, A. Frank, D.D. Rutov. Rev. Mod. Phys. 91 (2019), 025002 2. B. Albertazzi et al, Science 17 October (2014): 325 3. P. M. Bellan, J. Plasma Phys. 84, 755840501 4. V. Krauz et al., Physica Scripta. **T161** (2014) 014036 5. V. I. Krauz, V. S. Beskin and E. P. Velikhov., IJMPD, 27 (2018) 1844009 6. D. A. Voitenko et al. Plasma Physics Reports,, **43**, (2017) 1132 7. V.I. Krauz et al., EPL, 129 (2020) to be published

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-29-21006 мки № 17-02-01184-а).