ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 29 за 2019 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф.,
Михайлова Л.И., Четкин В.М.

О взаимодействии
встречных релятивистских
потоков нейтральной
плотной плазмы

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: О взаимодействии встречных релятивистских потоков нейтральной плотной плазмы / С.Л.Гинзбург [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 29. 27 с. doi:[10.20948/prepr-2019-29](https://doi.org/10.20948/prepr-2019-29)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-29>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, Л.И. Михайлова,
В.М. Чечёткин

О взаимодействии
встречных релятивистских потоков
нейтральной плотной плазмы

Москва — 2019

*С.Л. Гинзбург, **В.Ф. Дьяченко**, Л.И. Михайлова, В.М. Чечёткин*

О взаимодействии встречных релятивистских потоков нейтральной плотной плазмы

Трёхмерная компьютерная модель взаимодействия плазмы с электромагнитным полем в рамках уравнений Власова–Максвелла применена для расчета движения в вакууме встречных релятивистских электронейтральных потоков плотной плазмы, состоящей из электронов и протонов. Исследуется влияние начальной скорости частиц плазмы и их концентрации на процесс взаимодействия потоков.

Ключевые слова: Власов, Максвелл, плазма, электромагнитное поле, релятивистские электроны и протоны

*Sarra Lazarevna Ginzburg, **Vladimir Fedorovich Dyachenko**, Liubov Ivanovna Mikhaylova, Valery Mikhaylovich Chechetkin*

On the interaction of opposed relativistic flows of neutral dense plasma

A three-dimensional computer model that describes the interaction of plasma with consist from electrons and protons with electromagnetic field in the framework of Vlasov–Maxwell equations is used for simulating the interaction of opposing flows of relativistic neutralized dense plasma in vacuum. The influence of the initial velocity and the concentration of the plasma particles on the process of the interaction of flows are studied.

Key words: Vlasov, Maxwell, plasma, electromagnetic field, relativistic electrons and protons.

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Постановка задачи	3
3. Результаты расчетов.....	4
4. Заключение.....	26
Литература	27

1. Введение

Метод встречных пучков на ускорителях заряженных частиц (коллайдерах) на долгие десятилетия стал одним из основных инструментов изучения фундаментальных свойств материи, обеспечив колоссальный прогресс в экспериментальных исследованиях физики элементарных частиц и в физике высоких энергий для получения сверхвысоких энергий. Наибольшее распространение получили ускорители на встречных электрон–электронных, электрон–позитронных и протон–протонных пучках [1].

Публикуемая работа является продолжением [2–5] и содержит описание полученных на 3D–модели результатов расчета встречного однопролетного движения в вакууме с релятивистской скоростью двух нейтрализованных потоков плотной плазмы (плазмOIDов), состоящих из электронов и протонов равной концентрации. На конкретных примерах проиллюстрирована зависимость процесса взаимодействия частиц плазмOIDов через электромагнитное поле от начальной скорости частиц и их концентрации. Полученные результаты, возможно, могут служить грубой моделью для иллюстрации различных типов взаимодействия сталкивающихся галактик.

2. Постановка задачи

Взаимодействие бесстолкновительной плазмы с электромагнитным полем описывается 3D системой уравнений Власова–Максвелла. При указанном ниже выборе единиц измерения эта система имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_{e,p}}{\partial t} + \mathbf{v}_{e,p} \cdot \frac{\partial f_{e,p}}{\partial \mathbf{x}} + q_{e,p} \left(\mathbf{E} + \mathbf{v}_{e,p} \times \mathbf{H} \right) \cdot \frac{\partial f_{e,p}}{\partial \mathbf{p}} &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{H} + \mathbf{j} &= \mathbf{0}, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho, \\ \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{0}, \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0,\end{aligned}$$

где $\mathbf{E}(t, \mathbf{x})$, $\mathbf{H}(t, \mathbf{x})$ – соответственно вектора электрической и магнитной напряженности самосогласованного электромагнитного поля; $f_{e,p}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p})$ – функции распределения; $\mathbf{v}_{e,p} = \partial w_{e,p} / \partial \mathbf{p}_{e,p}$ – скорости; $w_{e,p} = \left[(m_{e,p})^2 + (\mathbf{p}_{e,p})^2 \right]^{1/2} - m_{e,p}$ – кинетические энергии; $m_{e,p}$ – массы покоя и $q_{e,p}$ – заряды, соответственно, электронов и протонов плазмы.

Плотности заряда и тока: $\rho = \sum q_{e,p} \int f_{e,p} d^3 p$, $\mathbf{j} = \sum q_{e,p} \int \mathbf{v}_{e,p} f_{e,p} d^3 p$

с суммированием по сортам частиц.

Здесь и далее используется следующая система единиц:

длина – L – произвольный размер; скорость – c – скорость света; время – L/c ; масса частицы – m – масса покоя электрона; импульс и энергия частицы – mc и mc^2 соответственно; поле – mc^2/eL , где e – элементарный заряд; концентрация частиц – $mc^2/4\pi e^2 L^2$; функция распределения по энергии – $L/4\pi e^2$. В этих единицах масса электрона $m_e = 1$, протона $m_p = 1836$ и $q_{e,p}$ – заряды, соответственно, электронов $q_e = -1$ и протонов $q_p = 1$.

Задача решалась численным методом, основные принципы алгоритма которого (метод макрочастиц для уравнения Власова и разностная схема для уравнений Максвелла с учетом запаздывающих потенциалов) изложены в [6–8].

Область расчета определяется параметрами $0 < x < X$, $0 < y < Y$, $0 < z < Z$. По осям x и y заданы периодические граничные условия для компонент электромагнитного поля и координат частиц. Внешние границы закрыты для входа извне частиц и любых видов энергии.

В лабораторной системе координат использована следующая стандартная модель. В начальный момент $t = 0$ электромагнитное поле отсутствует. Электронейтральная плазма, состоящая из электронов и протонов равной концентрации $n_e = n_p$ частиц каждого типа, равномерно заполняет два прямоугольных параллелепипеда (плазмоида) единичной длины вдоль оси z и на расстоянии единица друг от друга вдоль той же оси z , движущихся вдоль этой оси в противоположных направлениях с заданной скоростью $|v_z|$: $0 < x < 0.3$, $0 < y < 0.3$, $3 < z < 4$ и $0 < x < 0.3$, $0 < y < 0.3$, $5 < z < 6$ (граничные значения $X = Y = 0.3$, $Z = 9$). Шаг по пространственным переменным равен 0.005. В расчетах движения любого плазмоида участвуют по 5760000 частиц каждого типа, если не оговорено иное, (по 8 частиц электронов и протонов в расчетной ячейке).

Вдоль оси z задана начальная релятивистская скорость частиц. Длительность рассчитываемого процесса ограничена по времени, как правило, пятью единицами.

3. Результаты расчетов

Далее приводятся результаты моделирования встречного движения потоков плотной плазмы для трех вариантов начальной скорости электронов и протонов: $|\mathbf{v}_z| = 0.99999$, 0.999 или 0.95 с концентрацией частиц $n_e = n_p = 2 \cdot 10^8$ и варианта $|\mathbf{v}_z| = 0.999$ с концентрацией частиц $n_e = n_p = 2 \cdot 10^7$.

Вариант 1. Начальная скорость всех частиц плазмоида 1 вдоль оси $z - \mathbf{v}_{z1} = 0.99999$, плазмоида 2 – $\mathbf{v}_{z2} = (-0.99999)$. Кинетическая энергия электрона в этом случае равна 222.6 ($\gamma_e = 223.6$), протона – 408707.

На рис. 1а представлено поведение во времени суммарной кинетической энергии электронов и протонов обоих плазмоедов W , кинетической энергии электронов W_{e1} и протонов W_{p1} первого плазмоида и энергии возникающего электромагнитного поля U . Энергии поля и частиц, ушедших из расчетной области через границы $z = 0$ и $z = Z$, по величине на несколько порядков меньше значений, изображенных на этом графике. На рис. 1б дается сравнение кинетических энергий электронов и протонов обоих плазмоедов как функций времени.

Симметричность начальных данных для плазмоедов 1 и 2 приводит практически к совпадению в поведении кинетических энергий их однотипных частиц (см. рис. 1б). Похожая ситуация наблюдается и в других, рассмотренных ниже, вариантах расчета.

Рис. 1а. W – суммарная кинетическая энергия всех частиц в расчетной области, W_{e1} и W_{p1} – кинетическая энергия электронов и протонов первого плазмоида, U – энергия электромагнитного поля.

Рис. 1б. Кинетические энергии W_{ei} и W_{pi} электронов и протонов каждого из плазмоедов как функции времени (здесь $i = 1, 2$ – номера плазмоедов).

К моменту времени $t_0 \approx 0.54$ первоначальная суммарная кинетическая энергия протонов обоих плазмоедов распределилась между протонами, электронами и электромагнитным полем таким образом, что все суммарные энергии как электронов, так и протонов каждого из плазмоедов равны между собой. Энергия электромагнитного поля U близка к сумме кинетических энергий электронов и

протонов плазмоида.

На рис. 2 показаны функции распределения по кинетической энергии всего ансамбля электронов F_{e1} и протонов F_{p1} плазмоида 1 на три момента времени. Для каждого типа частиц эти функции заметно отличаются от первоначальных дельта-функций. Очевидно наличие двух процессов: заметное торможение протонов и столь же заметное ускорение электронов. Появляются значительно «убегающие» вперед по энергии частицы обоих типов. Аналогичная картина наблюдается в поведении функций распределения по энергии и для частиц второго плазмоида.

На рис. 3 изображены функции распределения электронов F_{ei} и протонов F_{pi} плазмоедов 1 и 2 по кинетической энергии w при $t = 5$. Практически распределения по энергии однотипных частиц разных плазмоедов совпадают.

Рис. 2 Функции распределения электронов F_{e1} и протонов F_{p1} плазмоида 1 по энергии w на моменты времени 1 – $t = 0.3$, 2 – $t = 0.5$, 3 – $t = 1$ (в логарифмическом масштабе).

Рис. 3. Функции распределения по энергии w электронов F_{ei} и протонов F_{pi} плазмоедов 1 и 2 при $t = 5$.

Далее на рис. 4–10 показана эволюция во времени проекций фазовых портретов (p_x, z) (аналогичных (p_y, z)) и (p_z, z) электронов и протонов обоих плазмоедов ($t = 0, 1, 3, 5$), просчитанная при участии 720000 частиц каждого типа в любом плазмоеде (по одной частице электрона и протона на расчетную ячейку). На рис. 4 даны проекции фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов обоих плазмоедов при $t = 0$ ($(p_x, z) = (p_y, z) = 0$).

Рис. 4. Проекция фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов при $t = 0$.

На рис. 5 а,б показаны проекции фазовых портретов (p_x, z) всех частиц обоих плазмоедов на момент времени $t = 1$.

Рис. 5а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоеда 1.

Рис. 5б. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоида 2.

На рис. 6 а,б представлены проекции фазовых портретов (p_z, z) всех частиц обоих плазмоедов на момент времени $t=1$.

Рис. 6а. Проекция фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов плазмоида 1.

Рис. 6б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов плазмоида 2.

На рис. 7 а,б даны проекции фазовых портретов (p_x, z) всех частиц обоих плазмоедов на момент времени $t=3$.

Рис. 7а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоида 1.

Рис. 7б. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоида 2.

На рис. 8 а,б изображены проекции фазовых портретов (p_z, z) всех частиц обоих плазмоедов на время $t = 3$.

Рис. 8а. Проекция фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов плазмоида 1.

Рис. 8б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов плазмоида 2.

На рис. 9 а,б показаны проекции фазовых портретов (p_x, z) всех частиц обоих плазмоедов на момент времени $t = 5$.

Рис. 9а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоида 1.

Рис. 9б. Проекция фазовых портретов (p_x, z) электронов и протонов плазмоида 2.

На рис. 10 а,б представлены проекции фазовых портретов (p_z, z) электронов и протонов обоих плазмоедов на время $t = 5$.

Рис. 10а. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1.

Рис. 10б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 2.

Проекция фазовых портретов на рисунках 11 а,б–13 а,б для первого плазмоида и погонные концентрации на рис. 14 и 14а получены при расчетах с 5760000 частиц каждого типа в плазмоиде (т.е. частиц в 8 раз больше, чем для получения рисунков 4–10, так как в расчетной ячейке по 8 частиц каждого типа вместо одной).

Рис. 11а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 116. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 12а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 12б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 13а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

Рис. 13б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

Как показывает сравнение приведенных выше графиков проекций фазовых портретов частиц первого плазмоида на один и тот же момент времени, просчитанных с разным количеством частиц в расчетной ячейке, их качественные отличия несущественны, что не очевидно для других вариантов расчета.

На рис. 14 представлена погонная концентрация электронов f_{ei} (где $i = 1, 2$ – номера плазмоедов) и протонов f_{pi} обоих плазмоедов, на рис. 14а – погонная концентрация электронов и протонов плазмоида 1 вдоль оси z на момент времени $t = 5$.

Рис. 14. Распределения f_{ei}, f_{pi} погонной концентрации макрочастиц обоих плазмоедов.

Рис. 14а. Распределения погонной концентрации f_{el} , f_{p1} электронов и протонов первого плазмоида при $t = 5$.

Рисунки проекций фазовых портретов и рис. 14 демонстрируют взаимопроникновение и смешение частиц обоих плазмоидов. Электроны и протоны плазмы заполняют практически всю расчетную область, причем если электроны со сравнительно близкой концентрацией частиц разных плазмоидов вдоль оси z , то у протонов при одной и той же координате z погонные концентрации частиц разных плазмоидов заметно различаются и примерно симметричны относительно $z = 4.5$. Нечто похожее на симметрию концентраций, имеет место и для электронов разных плазмоидов относительно того же $z = 4.5$.

Минимальное время до столкновения пучков в данном варианте расчета и всех следующих можно считать равным $0.5/|v_z|$.

Изменение начальной скорости движения частиц, при прочих равных условиях основного варианта расчета, заметно влияет на картину их поведения в расчетной области, что демонстрируют варианты расчета 2 с $|V_z| = 0.999$ ($\gamma_e = 22.37$) и 3 с $|V_z| = 0.95$ ($\gamma_e = 3.2$). Полная кинетическая энергия системы в начальный момент $t = 0$ существенно уменьшается (примерно в 10 и 100 раз, соответственно) по сравнению с аналогичной энергией первого варианта расчета.

Вариант 2. Начальная скорость частиц плазмоидов $|V_z| = 0.999$ (кинетическая энергия электронов 21.37 и протонов – 39228), начальная концентрация частиц $n_e = n_p = 2 \cdot 10^8$.

В любом из двух плазмоидов по 5760000 частиц каждого типа, т.е. по 8 частиц электронов и протонов в расчетной ячейке. На рис. 15 дана зависимость от времени суммарной кинетической энергии электронов и протонов обоих плазмоидов, кинетической энергии электронов и протонов первого плазмоида и энергии возникающего электромагнитного поля. Аналогично первому варианту расчёта к моменту времени $t_0 \sim 0.14$ первоначальная кинетическая энергия протонов перераспределяется между протонами, электронами и электромагнитным полем. Все суммарные энергии протонов или электронов каждого из плазмоидов равны между собой и примерно на 10% меньше энергии электромагнитного поля U .

Однако затем электроны в общей сложности получают от протонов небольшую дополнительную кинетическую энергию.

Как показывают дальнейшие расчеты, с уменьшением начальной скорости частиц плазмы это отличие суммарной энергии всех электронов от суммарной энергии всех протонов для $t > t_0$ увеличивается.

На рис. 16 изображены функции распределения по кинетической энергии w электронов F_{e1} и протонов F_{p1} плазмоида 1 на три момента времени, на рис. 17 – эти же функции распределения по энергии w для частиц плазмоедов 1 и 2 при $t = 5$. В этом варианте также наблюдается процесс заметного ускорения электронов и торможения протонов, и есть «убегающие» вперед по энергии частицы обоих типов, как электроны, так и протоны.

Рис. 15. W – суммарная кинетическая энергия всех частиц в расчетной области, W_{e1} и W_{p1} – кинетическая энергия электронов и протонов первого плазмоида, U – энергия электромагнитного поля.

Рис. 16. Функции распределения электронов F_{e1} и протонов F_{p1} плазмоида 1 по кинетической энергии w на моменты времени 1 – $t = 0.075$, 2 – $t = 0.1$, 3 – $t = 0.125$ (в логарифмическом масштабе).

Рис. 17. Функции распределения электронов F_{ei} и протонов F_{pi} плазмoids 1 и 2 по кинетической энергии w при $t = 5$.

На рис. 18 а,б–20 а,б представлены на три момента времени проекции фазовых портретов (p_x, z) и (p_z, z) электронов и протонов первого плазмoида. Эволюцию проекций фазовых портретов частиц второго плазмoида можно представить как симметричное отражение относительно $z = 4,5$ соответствующих портретов частиц первого плазмoида.

Рис. 18а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмoида 1 при $t = 1$.

Рис. 18б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмoида 1 при $t = 1$.

Рис. 19а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 19б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 20а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

Рис. 20б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

На рис. 21 представлена погонная концентрация электронов f_{ei} и протонов f_{pi} обоих плазмоедов вдоль оси z , на рис. 21а – погонные концентрации f_{e1} и f_{p1} – оба рисунка на время $t = 5$.

При внешнем сходстве проекций фазовых портретов однотипных частиц на один и тот же момент времени в вариантах расчета 2 и 1 (например, рис. 20а,б и рис. 13а,б) это лишь качественная характеристика распределения частиц, но не количественная, так как распределения погонных концентраций частиц вдоль оси z на один и тот же момент времени заметно различаются (рис. 21 и рис. 14). К моменту времени $t = 5$ основная масса частиц обоих плазмоедов сосредоточена на интервале $1.5 \leq z \leq 7.5$ (см. рис. 21). Кривые погонных концентраций однотипных частиц разных плазмоедов симметричны относительно $z \approx 4.5$. Замечен выход частиц из расчетной области в направлении, обратном изначально заданному направлению скорости частиц, но в этом направлении граница по z для частиц заметно ближе.

В варианте 2 электроны и протоны любого плазмоида в расчетной области вдоль оси z распределены примерно одинаково (рис. 21а).

Рис. 21. Распределения f_{ei} , f_{pi} погонной концентрации частиц обоих плазмоедов при $t = 5$.

Рис. 21а. Распределения погонной концентрации f_{e1}, f_{p1} частиц первого (аналогично второго) плазмоида при $t = 5$.

Вариант 3. Далее представлен стандартный для данной работы набор графиков по результатам расчета варианта при тех же, что и в варианте 1, значениях основных параметров задачи, включая по 8 электронов и протонов в расчетной ячейке, но с начальной скоростью частиц $|V_z| = 0.95$ и конечным временем расчета $t = 7$. При $t = 0$ кинетическая энергия электронов равна 2.2, протонов – 4039.

Рис. 22. W – суммарная кинетическая энергия всех частиц в расчетной области, W_{e1} и W_{p1} – кинетическая энергия электронов и протонов первого плазмоида, U – энергия электромагнитного поля.

К $t_0 \approx 0.08$ (см. рис. 22) суммарные кинетические энергии как электронов так и протонов каждого из плазмоидов сравнивались между собой, а энергия электромагнитного поля U равна примерно половине этой энергии. В дальнейшем электроны приобрели заметно большую суммарную кинетическую энергию, чем осталась у протонов (см. рис. 22). Как и в других вариантах расчета, электроны заметно ускоряются, протоны заметно тормозятся (см. рис. 23). На рис. 24 представлены функции распределения электронов и протонов каждого из плазмоидов по энергии w на момент времени $t = 5$.

Рис. 23. Функции распределения электронов F_{e1} и протонов F_{p1} плазмоида 1 по кинетической энергии w на моменты времени 1 – $t = 0.0375$, 2 – $t = 0.05$, 3 – $t = 0.0625$ в логарифмическом масштабе.

Рис. 24. Функции распределения электронов f_{ei} и протонов f_{pi} плазмоедов 1 и 2 по кинетической энергии на $t = 5$.

На рис. 25а,б–27а,б представлена эволюция во времени проекций фазовых портретов (p_x, z) (аналогичных (p_y, z)) и (p_z, z) электронов и протонов первого плазмоида.

Рис. 25а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 256. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 26а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 26б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 3$.

Рис. 27а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

Рис. 27б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

На рис. 28а,б представлено распределение погонной концентрации частиц обоих плазмоидов при $t = 5$ и $t = 7$. Они существенно отличаются от аналогичных распределений в предыдущих вариантах расчета с 8 частицами каждого типа в расчетной ячейке. Основная масса частиц сконцентрирована в ограниченной области, довольно близкой к области их первоначального распределения. Важную роль играет взаимодействие частиц через электромагнитное поле, которое определяет структуру распределении заряженных частиц.

Рис.28а

Рис.28б

Рис. 28а,б. Распределения погонной концентрации частиц обоих плазмоедов при $t = 5$ (а) и $t = 7$ (б).

Вариант 4. Последним в этой серии расчетов является вариант с концентрацией частиц $n_e = n_p = 2 \cdot 10^7$ и их начальной скоростью $|V_z| = 0.999$ (при прочих равных условиях основного варианта 1 включая по 8 электронов и протонов в расчетной ячейке). Сравнение графиков этого варианта расчета с графиками расчета первого варианта демонстрирует их большое внешнее сходство (рисунки 29–30) при совершенно различных масштабах значений энергий (начальная кинетическая энергия электронов равна 21.37, протонов – 39228). Выравнивание между собой суммарных кинетических энергий электронов и протонов разных плазмоедов имеет место при $t_0 \approx 0.54$. Энергия возникающего при этом электромагнитного поля также примерно в два раза больше отмеченной выше энергии.

На рис. 32а,б–33а,б представлена эволюция во времени проекций фазовых портретов (p_x, z) (аналогичных (p_y, z)) и (p_z, z) протонов и электронов первого плазмоеда.

Рис. 29. W – суммарная кинетическая энергия всех частиц в расчетной области, W_{e1} и W_{p1} – кинетическая энергия электронов и протонов первого плазмоеда, U – энергия электромагнитного поля.

Рис. 30. Функции распределения электронов F_{el} и протонов F_{pl} плазмоида 1 по кинетической энергии на моменты времени 1 – $t = 0.3$, 2 – $t = 0.5$, 3 – $t = 0.7$ в логарифмическом масштабе.

Рис. 31. Функции распределения электронов F_{ei} и протонов F_{pi} плазмоидов 1 и 2 по кинетической энергии w при $t = 0.7$.

Рис. 32а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 326. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 1$.

Рис. 33а. Проекция фазовых портретов (p_x, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

Рис. 33б. Проекция фазовых портретов (p_z, z) частиц плазмоида 1 при $t = 5$.

На рисунках 34а,б показано распределение вдоль оси z погонной концентрации частиц на два момента времени $t = 3$ и $t = 5$.

Рис. 34а. Распределения погонной концентрации частиц обоих плазмOIDов при $t=3$.

Рис. 34б. Распределения погонной концентрации частиц обоих плазмOIDов при $t=5$.

На рис. 35 представлены распределения погонной концентрации электронов и протонов первого плазмOIDа при $t=5$.

Рис. 35. Распределения погонной концентрации частиц первого плазмOIDа при $t=5$.

Еще раз отметим: сравнение рисунков 29–35 с соответствующими рисунками из набора рисунков 1–14а первого варианта позволяет прийти к выводу о похожести результатов в этих вариантах расчета, но при разном масштабе значений кинетической энергии системы.

4. Заключение

В работе приведены результаты моделирования встречного движения в вакууме электронейтральных потоков плотной ($n_e = n_p = 2 \cdot 10^8$) плазмы, состоящей из электронов и протонов равной концентрации, с релятивистскими скоростями $|V_z| = 0.99999$, 0.999 и 0.95 и варианта с $|V_z| = 0.999$ и концентрацией частиц $n_e = n_p = 2 \cdot 10^7$.

Для всех вариантов расчета характерно: 1 – практическое отсутствие различия в поведении кинетических энергий однотипных частиц (электронов и протонов) обоих плазмоедов в силу симметричности начальных данных; 2 – перераспределение ко времени t_0 начальной суммарной кинетической энергии протонов между протонами, электронами и возникающим электромагнитным полем, суммарные энергии как протонов, так и электронов разных плазмоедов практически совпадают между собой; 3 – чем меньше начальная скорость частиц $|V_z|$, при одной и той же начальной концентрации частиц, тем меньше время t_0 и тем большую по сравнению с протонами суммарную кинетическую энергию приобретают электроны в дальнейшем; 4 – с уменьшением начальной скорости частиц уменьшается по сравнению с энергией частиц максимальная энергия электромагнитного поля; 5 – во всех просчитанных до момента времени $t = 5$ вариантах имеет место различная степень взаимопроникновения потоков.

В первом, втором и в четвертом вариантах расчета частицы обоих плазмоедов ко времени $t = 5$ практически заполнили всю расчетную область; в третьем за то же время $t = 5$ частицы занимают некую ограниченную область в окрестности первоначального распределения частиц и к $t = 7$ почти заполнили расчетную область.

В силу симметричности начальных данных часть графиков построена по информации только для одного первого плазмоеда.

Отметим, что во всех расчетах закон сохранения энергии выполняется с большой точностью (погрешность заметно менее 1%).

Литература

- [1] Боронина М.А. Трехмерная численная модель динамики ультрарелятивистских пучков заряженных частиц. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Новосибирск, 2010 г.
- [2] Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф. Численное исследование неустойчивости релятивистского потока плазмы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2009, № 20, 8 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-20>
- Дьяченко В.Ф., Гинзбург С.Л. Численное исследование неустойчивости потока плазмы. // Математическое моделирование 2011, Т. 23, № 12, с. 151-155.

- [3] Чечеткин В.М., Дьяченко В.Ф., Гинзбург С.Л., Палейчик В.В., Фимин Н.Н., Судариков А.Л. К вопросу о механизме возникновения жесткого космического гамма – излучения джетов активных ядер галактик // *Астрономический журнал*. 2009, Т. 86, № 6, с. 546- 554.
- [4] Vereshchagin Gregory, Chechetkin V.M., Dyachenko V.F., Ginzburg S.L., Fimin N.N., Ruffini Remo, Siutsou Ivav. On kinetic instabilities in collisionless ultra – relativistic streaming cold electron – proton plasma. American Physical Society, 2009, APS April Meeting, May 2-5.
- [5] Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф., Чечеткин В.М. Численное исследование неустойчивости нейтрального потока плотной плазмы // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2014, № 87, 13 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-87>
- [6] Дьяченко В.Ф. О расчетах задач бесстолкновительной плазмы // *ЖВМ и МФ* 1985, № 4, с. 611-627.
- [7] Дьяченко В.Ф. Десять лекций по физической математике. Москва: Издательство «Факториал», 1997.
- [8] Чечеткин В.М., Дьяченко В.Ф., Гинзбург С.Л., Орлов Ю.Н., Фимин Н.Н. Моделирование динамики бесстолкновительной ультрарелятивистской электрон–протонной плазмы в самосогласованном электромагнитном поле // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2016, №87, 13 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-87>
ЖВМ и МФ, 2016, т.56, №9, с. 93-102.