

Черников Владислав Б23-107.

Разработана программа симуляции движения пробной заряженной частицы в плоскости в окружении заряженных частиц меньшей массы и модуля заряда.

Программа позволяет проводить эксперименты по движению пробной частицы с различными характеристиками (масса, заряд, начальная скорость) в области присутствия других одинаковых заряженных частиц (далее «частиц плазмы») с определенными характеристиками (масса, заряд, начальные скорости, начальные положения). Результатом работы программы является отображение движения частиц в реальном времени или после предварительных расчетов.

Сначала в программе задаются описанные выше характеристики частиц, а также параметры симуляции (максимальное время, временной шаг, количество и процентное соотношение отрицательно положительно и отрицательно заряженных частиц). По умолчанию положения частиц плазмы задаются случайным образом (без самопересечений). После начала симуляции частицы приходят в движение в связи с действием кулоновской силы со стороны других частиц. Для каждой частицы рассчитывается действие Кулоновской силы со стороны всех остальных частиц. По 2 закону Ньютона определяются горизонтальная и вертикальные составляющие ускорения. Горизонтальная и вертикальная составляющие скорости частицы определяются как:

$$V = V_0 + a * dt$$

Где  $V$ - новая проекция скорости на соответствующую ось,  $V_0$ - Проекция скорости на соответствующую ось до обновления,  $a$ - ускорение,  $dt$ -временной шаг. Координаты обновляются в соответствии с соотношением:

$$x = x_0 + V * dt$$

Где  $x$  и  $x_0$ - координаты после и до обновления соответственно. Стоит отметить, что в связи с тем, что такое движение частиц не является прямолинейным, такой метод расчета при долговременной симуляции будет

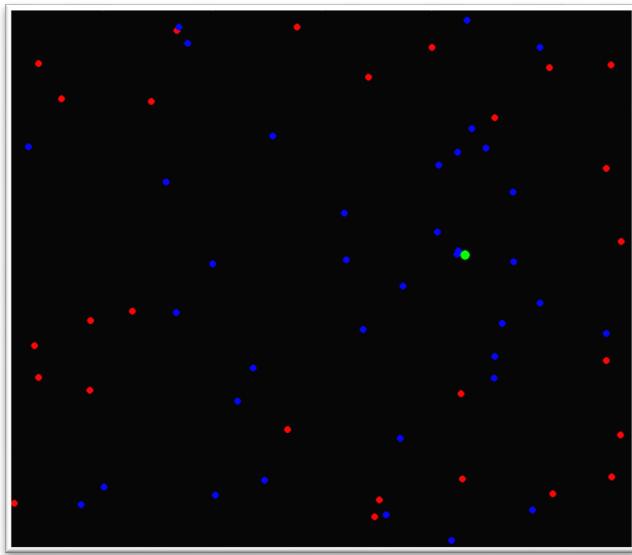
приводит к накоплению ошибки и, соответственно, погрешностям (подробнее это описано в разделе описания симуляции движения диона в первой задаче). Однако данный метод является самым простым, а поскольку длительные симуляции не предполагаются, именно он использован в программе. Важной особенностью симуляции является несколько допущений для корректной работы:

- Не исключены варианты движения частиц, когда одна движется точно на другую. В этом случае центры частиц могут находиться на бесконечно малом расстоянии в связи с чем частицы приобретают большие скорости, что приводит к ошибкам в работе программы. Для устранения такого эффекта считается, что между частицами всегда есть расстояние, пренебрежимо малое по сравнению со средним расстоянием между ними;
- Поскольку любая система стремится уменьшить свою потенциальную энергию, с течением времени разноименные частицы будут распределяться как можно дальше друг от друга (в предельном случае, они будут на бесконечно большом расстоянии). В таком случае проведение наблюдений становится не возможным. Для решения этой проблемы наблюдаемая область ограничена, при достижении частицей границы, она отскакивает от нее абсолютно упруго без потерь энергии. Справедливость данного ограничения следует из следующего: если рассмотреть бесконечно большую плоскость, по которой движутся разноименно заряженные частицы плазмы с постоянной плотностью, то в любой достаточно большой области пространства количество частиц постоянно; из этого следует, что в момент, когда какая-либо частица вылетает за пределы плоскости, другая, такая же, должна в эту область влететь. Это равносильно тому, что вылетающая частица отскочит от границы рассматриваемой области.

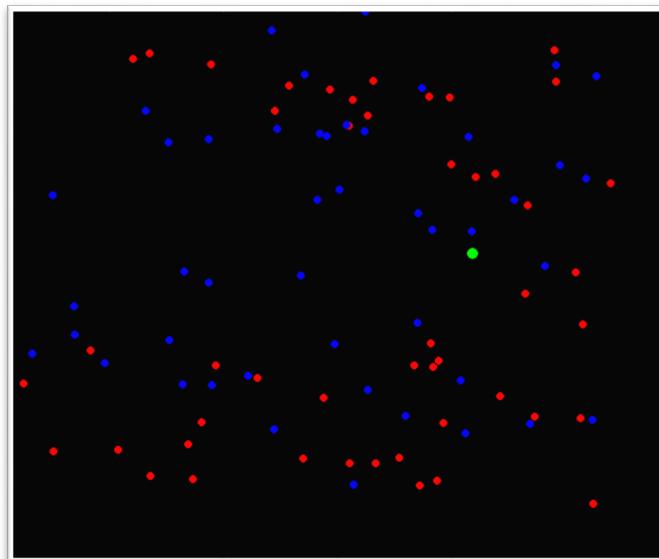
После написания программы была проведена проверка правильности работы программы, в том числе проверено сохранение полной энергии системы.

После отладки программы были проведены различные эксперименты, направленные на изучение характера движения пробной частицы. Изначально программа не была ориентирована на получение численных данных, поэтому проводимые исследования предполагали преимущественно визуальное наблюдение. Результаты следующие:

- При модуле заряда пробной частицы  $>>$  модуля заряда частицы плазмы вокруг нее собираются частицы плазмы с зарядом противоположного знака. При этом частицы того же заряда находятся на отдалении. При достаточно малых скоростях пробного заряда, одни и те же частицы плазмы долгое время «обращаются» вокруг него, и движутся с ним поступательно. При достаточно больших скоростях пробной частицы картина сохраняется с отличием в том, что в области вокруг пробного заряда частицы противоположного знака постоянно заменяют друг друга и, соответственно, не движутся поступательно за зарядом, а лишь изменяют начальную траекторию под действием поля пробной частицы. Схожее явление наблюдается и в реальной плазме, и в литературе называется Дебаевский радиус. На рисунке ниже представлена симуляция с наблюдаемым Дебаевским радиусом.



- Если пробная частица обладает модулем заряда  $>>$  модуля заряда частицы плазмы, но достаточно большой скоростью, то появление Дебаевского радиуса не происходит и противоположные по знаку частицы плазмы, проходя на некотором расстоянии от пробного заряда изменяют направление своего движения, но не движутся вокруг него. Одноименные частицы начинают двигаться от пробного заряда. Пример представлен на рисунке ниже:



На рисунке отчетливо видно, что за пробной частицей не остается одноименно заряженных частиц. При этом частицы с противоположным знаком не следуют за ней.