Ниже приводятся краткие аннотации основных документов из папки

https://github.com/radiasoft/rsfriction/examples/eidelyur/MCOOL/all\_docs/my\_docs.

Документы (упорядочены по алфавиту):

1. analyticMapElectronIonScattering.docx;
2. Comparison of Two Approaches.docx;
3. Description\_threeApproachesComparison\_v6.docx;
4. frictionForce.docx;
5. frictionForceReferences.docx;
6. kinematicOfMagnetizedElectron.docx;
7. mapOfMaximalImpactParameter.docx;
8. mcool2Approach\_1.docx;
9. mcool2Code.docx;
10. notesToChoiceCodeParameters.docx;
11. problems.docx;
12. synopsis\_NewApproch.docx;
13. twoApproachesComparison.docx.

Естественно, что некоторые документы частично дублируют и часто дополняют друг друга.

Документ **№5** – краткая библиография основных источников по электронному охлаждению.

Документ **№6** - обсуждение замагниченности движения электронов. Показано, что при начальных параметрах моделирования (поперечные скорости электронов и значение магнитного поля) условие



гарантирует выполнение соотношения , что как раз и означает замагниченность движения электронов. Поэтому в моделировании для минимального прицельного параметра  используется величина .

Следующий документ – **№7**. В нем обсуждается важный момент выбора начального максимального прицельного параметра  траектории электрона. Его значение есть некая непростая конструкция из дебаевского радиуса , радиуса «нейтрализации» , «пролетного» радиуса  и радиального размера пучка :



Существенным результатом оказывается тот факт, что в дальнейшем моделировании размер пучка, как правило, не играет особой роли, а диапазон возможных прицельных параметров  замагниченных электронов будет каждый раз определяться численным соотношением параметров задачи.

Далее идут **№11** и вслед за ним **№10**. Они важны в связи с проводившимся в ранних версиях скрипта сравнением получающихся результатов с результатами из [1,2]. В последних основным было сравнение передаваемого импульса при разных подходах для его вычисления. Результат представлялся в виде «карты» отношения передаваемых импульсов в разных подходах, построенной на сетке координат  и

,

вообще говоря, связанных друг с другом значением расстояния  между электроном и ионом. В №11 описан прием, позволяющий «плотно» заполнить плоскость  найденными значениями передаваемого импульса, а в №10 анализируются траектории замагниченного движения электронов.

Очень важным является **№4**, т.к. в нем приводятся как выражения для основных первичных численных параметрах моделирования (типа ), так и основные соотношения для кулоновского логарифма, передаваемых импульсов и сил трения, Все соотношения приведены в соответствии с работами [3,4] и в дальнейшем предполагается сравнивать результаты моделирования именно с ними. Кроме того, построена «карта» в координатах скорости иона и прицельного параметра электрона, описывающая разный характер взаимодействия между электроном и ионом (слабое, быстрое, адиабатическое, магнетизированное). В последующем моделированиии рассматривается только та область этой «карты», для которой электроны являются замагниченными.

Далее два «теоретических» документа. Документ **№1** содержит краткий вывод выражений для передаваемого импульса при столкновении электрона и иона, приведенных в [1,2] и основанный на свойствах канонических преобразований для гамильтониана. В качестве «бонуса» приводятся выражения для смещения каждой из частиц при их взаимодействии (такие выражения отсутствуют в [1,2]). Документ **№2** посвящен обсуждению главного результата, приведенного в [1,2] – сравнению передаваемого импульса при вычислении его в системе «ведущего ларморовского центра» (GC) и при использовании Magnus “Expansion”-подхода (ME). Важным результатом является то, что для набора исходных параметров, при которых проводится моделирование, можно показать аналитически совпадение выражений для передаваемых импульсов в обоих подходах. В то же время численное моделирование подтверждает этот результат только для х-компоненты передаваемого импульса.

Документ **№3** описывает последнюю версию скрипта threeApproachComparison\_v6.py и полученные с его помощью результаты. Поскольку документ содержит графическое представление результатов, полученных в не вполне отлаженном скрипте, то имеет смысл привести перечень всех графиков, построенных уже в обновленной версии скрипта с пояснением, для чего каждый из них был построен и какие выводы следуют из этого. Цель скрипта – сравнение обмена ипульсами между электроном и ионом при описании их взаимодействия в 3-х разных подходах:

A1 – «Протаскивание» электронов мимо иона с шагом, позволяющим «видеть» их ларморовское вращение вдоль траектории (т.н. «классический» подход);

A2 – «Протаскивание» электронов в системе «ведущего центра» ларморовского кружка, при котором лаарморовское вращение электрона усредняется (GC подход «ведущего центра»);

A3 – “Magnus Expansion” подход (ME), в котором движение электронов также рассматривается в системе «ведущего центра», но для обмен импульсами между электроном и ионом описывается в рамках подхода ME.

Все построенные графики можно условно разделить на три группы:

1. Кинематика движения частиц в каждом из подходов.

3D траектории «первого» электрона в А1-А3 подходах и их сравнение. Видно ларморовское вращение электрона (в первом и четвертом рисунках); движение по z проискодит снизу вверх (от больших значений z-координат к меньшим):

firstTrack3D-A1\_v6-fig40.jpg,

firstTrack3D-A2\_v6-fig140.jpg,

firstTrack3D-A3\_v6-fig640.jpg,

firstTrack3D-A1andA2\_v6-fig440.jpg.

3D траектории, электрона, которому был передан максимальный поперечный импульс в А1-А3 подходах и их сравнение:

trackWithMaxDpx-3D-A1\_v6-fig45.jpg,

trackWithMaxDpx3D-A1andA2\_v6-fig445.jpg,

trackWithMaxDpx3d-A2\_v6-fig145.jpg,

trackWithMaxDpx3D-A3\_v6-fig645.jpg.

В координатах  3D-поверхность, характеризующая половину продольной длины участка траектории, на котором происходит обмен имульсами между электроном и ионом:

HalfLengthTrack\_v6-fig20.jpg.

В координатах  3D-поверхность, характеризующая количество ларморовских оборотов, совершенных электроном при пролете мимо иона на участке траектории, на котором происходит обмен имульсами:

larmorNumbers\_v6-fig30.jpg.

Расстояние между электроном и ионом в момент пролета первого мимо второго:

distanceToIon-A1\_v6-fig50.jpg,

distanceToIon-A1andA2\_v6-fig450.jpg,

differenceDistancetoIon-A1andA2\_v6-fig325.jpg,

distanceToIon-A1andA3\_v6-fig650.jpg,

distanceToIon-A2andA3\_v6-fig660.jpg.

Видно, что в А1 подходе оно осциллирует в соответствии с ларморовским вращением электрона, а в подходах А2 м А3 оно совпадает друг с другом и соответствует усредненному ларморовскому движению.

Изменение действия  вдоль траектории в А2 и А3 подходах:

actionJalongFirstTrack-A2\_v6-fig160.jpg,

actionJalongFirstTrack-A3\_v6-fig460.jpg.

Вроде бы с хорошей точностью действие (оно рассчитывается только для А2 и А3 подходов) сохраняется.

Область величин , при которых электроны являются замагниченными и далее рассатривается их обмен импульсами с ионом:

areaInitialImpactParameter\_v6-fig10.jpg.

В координатах  карта расстояний между электронами и ионом в процессе их взаимодействи с ионом:

mapParametersAandB-A1\_v6-fig110.jpg

mapParametersAandB-A2\_v6-fig115.jpg.

Левый нижний угол карты является пустым – это означает, что при соответствующих значениях величин  начальный прицельный параметр электронов превышал размер области экранирования поля иона (другими электронами) и поэтому такие электроны не использовались в моделировании. Карты построены для А1 и А2 подходов.

1. Переданные иону импульсы (каждая из компонент) для рассматриваемых подходов, представленные в виде 3D-поверхностей или соответствующих им «карт».

Передача импульса в «классическом» подходе А1:

dpxSurf-A1\_v6-fig240.jpg,

dpxMap-A1\_v6-fig245.jpg,

dpySurf-A1\_v6-fig250.jpg,

dpyMap-A1\_v6-fig255.jpg,

dpzSurf-A1\_v6-fig260.jpg,

dpzMap-A1\_v6-fig265.jpg.

Передача импульса в подходе А2 – «ведущего центра»:

dpxSurf-A2\_v6-fig340.jpg,

dpxMap-A2\_v6-fig345.jpg,

dpzSurf-A2\_v6-fig360.jpg,

dpzMap-A2\_v6-fig365.jpg.

Передача импульса в подходе А3 – «Magnus Expansion»:

dpxSurf-A3\_v6-fig540.jpg,

dpxMap-A3\_v6-fig845.jpg,

dpzSurf-A3\_v6-fig860.jpg,

dpzMap-A3\_v6-fig865.jpg.

1. Сравнения переданных импульсов (для продольной и поперечной компонент) для пар рассматриваемых подходов, представленные в виде «карт» относительной разности  в %, либо просто отношения .

Сравнение подходов А2 и А1:

dpxMap-A2minusA1\_v6-fig545.jpg,

dpxMap-A2divideA1\_v6-fig546.jpg,

dpzMap-A2minusA1\_v6-fig555.jpg,

dpzMap-A2divideA1\_v6-fig556.jpg.

Сравнение подходов А3 и А1:

dpxMap-A3minusA1\_v6-fig745.jpg,

dpxMap-A3divideA1\_v6-fig746.jpg,

dpzMap-A3minusA1\_v6-fig755.jpg.

Сравнение подходов А3 и А2:

dpxMap-A3minusA2\_v6-fig1745.jpg,

dpzMap-A3minusA2\_v6-fig1755.jpg.

References

1. D.L. Bruhwiler, S.D. Webb*. New Algorithm for Dynamical Friction of Ions in a Magnetized Electron Beam.* AIP Conf. Proc. **1812**, 050006 (2017).
2. D.L. Bruhwiler, S.D. Webb, D.T. Abell*. A New Approach to Calculating Dynamical Friction for Magnetized Electron Cooling.* Presentation at “Hadron Synchrotron Collective Effects” Meeting, CERN, April 2017.
3. I.N. Meshkov*. Electron Cooling: Status and Perspectives*. Phys. Part. Nucl. **25 (6)** (1994) 631-661. (In Russian: Fiz. Elem. Chastits and Atom. Yadra **25** (1994) 1487).
4. I. Meshkov, A. Sidorin, A. Smirnov, G. Trubnikov., A. Fedotov. *Physics Guide of BETACOOL Code. Version 1.1.* C-A/AP/#262, November 2006, Brookhaven National Laboratory, Upton.