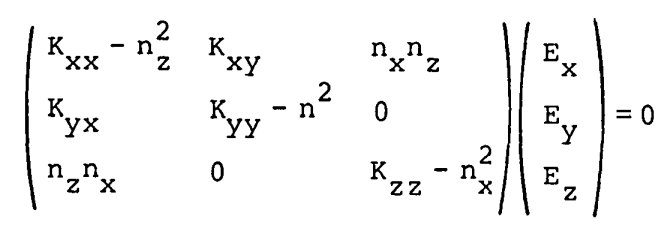
：Fast-wave heating of a two-component plasma（stix. 1975 Nucl. Fusion 15 737）

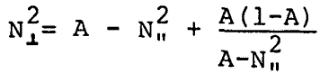
T(D)D少数离子回旋吸收，选择性氘吸收可用于仅通过射频激发产生离子尾，作为中性注入的替代方案。f(v) 包含Chandrasekhar-Spitzer drag coefficient（碰撞）和Kennel-Engelmann quasi-linear diffusion coefficient（少数离子分布函数，包含射频波加热和与离子电子的碰撞）

离子回旋波用于离子电子加热，离子尾产生，和离子尾增强，加热很容易地给束离子增加垂直能量，增加聚变反应速率（离子回旋波的作用1、加热离子电子，2、加热束离子，增加聚变反应率）。

2.快波模

均匀冷等离子体中，低频高传导近似，ky=0，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\`_L044BRKPT[QX5{IN5$]{B.png忽略位移电流



对用本文D回旋共振，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\(X3]`Q]5TEED%K8SM]BI@E1.png为快波

3．电场极化

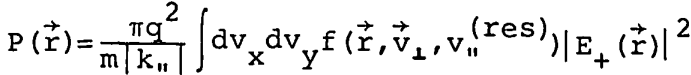
回旋加速依赖左旋电场，有限拉莫尔半径理论，右旋谐频加热也有小量影响，

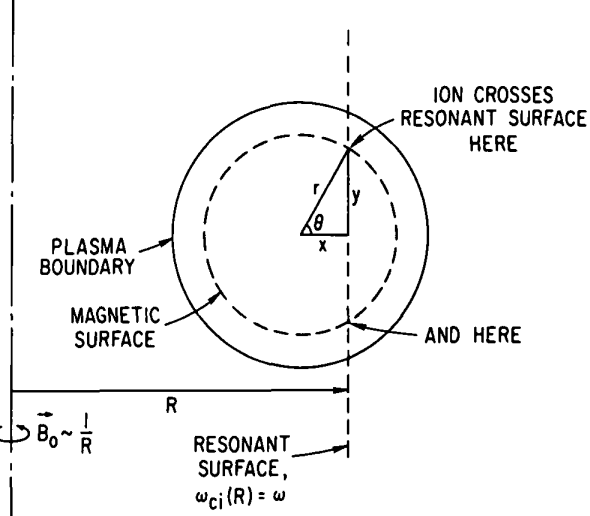
从色散关系里解出左旋和右旋关系

4.离子回旋阻尼

离子沿磁力线运动通过共振面两次，每次通过垂直动量增加

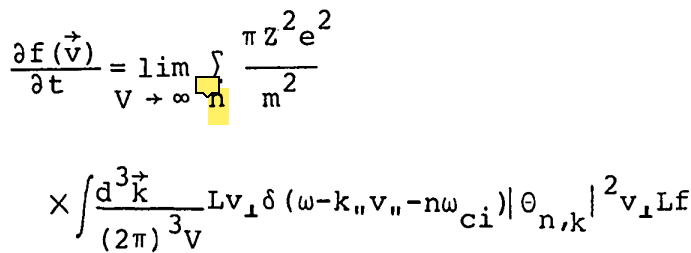
复数形式的运动方程C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\UGXRJ]J9V4LE6[)925VYC92.png

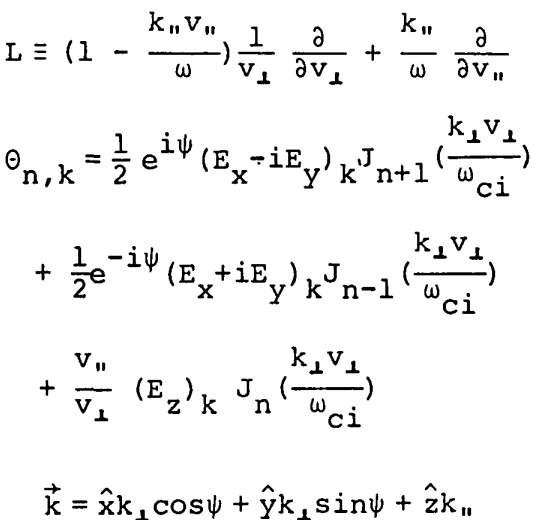
功率：（由分布函数和左旋电场计算功率，后面用功率来表示扩散项）



10.准线性扩散系数

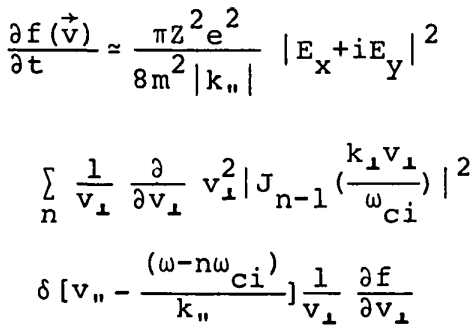
Kennel and Engelmann [27]n为谐频数（n=1对应了基频），贝塞尔函数中体现，扩散项能否去掉积分，变成求和项



V取无穷大是否表示均匀，丢掉L

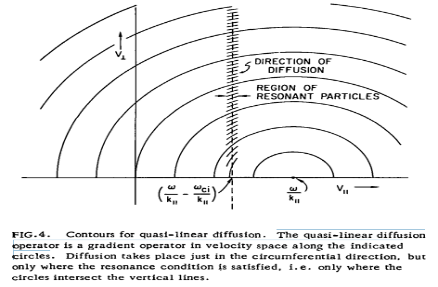
中的平行速度效应，忽略C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\[47BU9@K%3)]%G(422U1DCU.png中的平行电场和右旋电场，k没有有Y分量，单色谱，k和n取单一值，没有分布

对k积分，

（考虑谐频，贝塞尔函数保留J1和J2

若只考虑基频共振，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\5V0~3956YFREG]XF~)_O]AU.png（扩散项的简化形式，能否update到谐频）

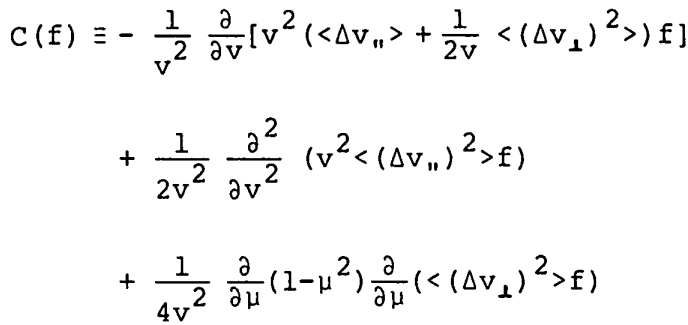
（近似物理说明）两个点：1.频率和波数的单色谱，主要问题是波粒子的相位关系，困难在加热过程中被避免，每一次共振加速都是随机相位（谱和相位之间是什么关系？）2、L中去掉平行速度效应：一般认为波扩散只和垂直速度有关，但是扩散项包含了平行速度的色散，平行速度和垂直速度有圆关系，但是扩散之作用在C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\C`T8}``5]@CQIA~F7ZIK573.png平行速度为定值的线上。

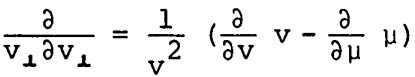


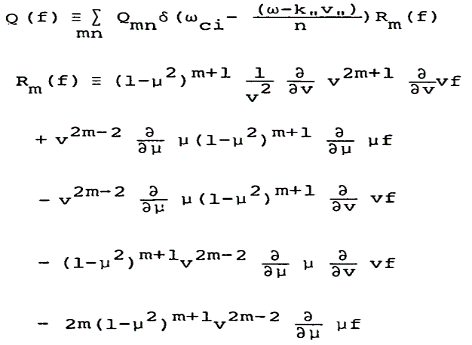
11.Fokker-Planck方程（之前的扩散系数用的v平行和垂直，现在改成pitch angle）

只要求测试粒子（少数离子）在离子和电子的各向同性麦克斯韦等离子体中扩散的 Fokker-Planck 系数。，库伦系数用的Chandrasekhar and Spitzer

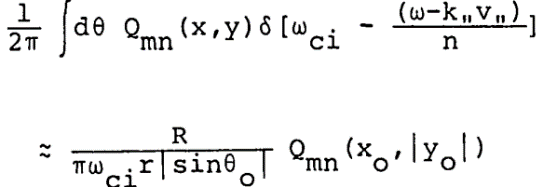
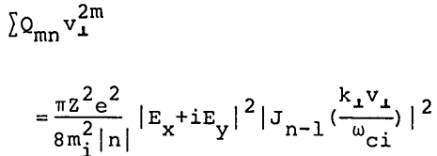
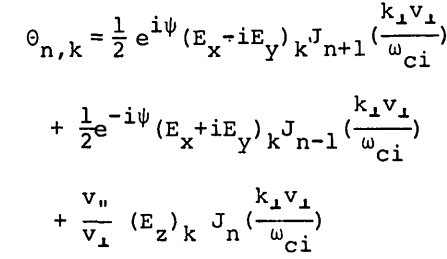
C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\_3C97ITJ~{SN8E22RLSJS$J.png

（碰撞中的符号意思?）扩散项中的C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\X_8INZ`Y3ZA47O8WS}T`$%A.png，为什么不直接用它，不就是一维了

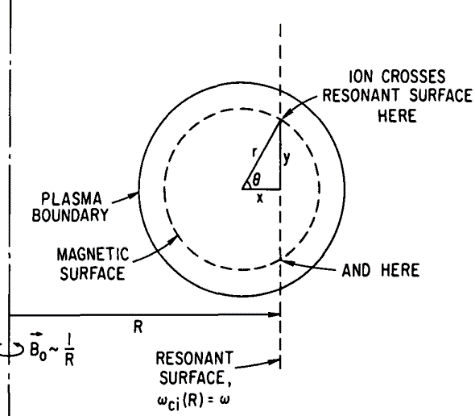




Delta函数在小半径r的磁面上求平均，对SITA积分除以2π

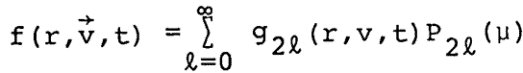
（m是波数？可取0，）

假设磁面是个正圆，xy坐标，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\700HWEEQWRNII2XTKZIF4V0.png磁面和共振面相交的XY



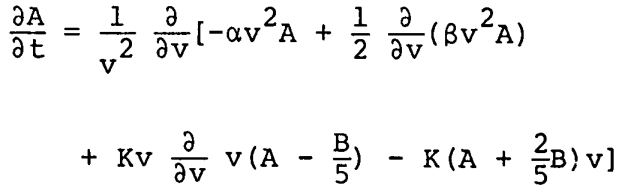
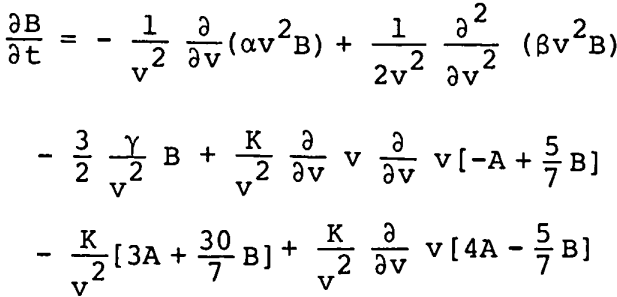
12.对Fokker-Planck方程做勒让德展开（）

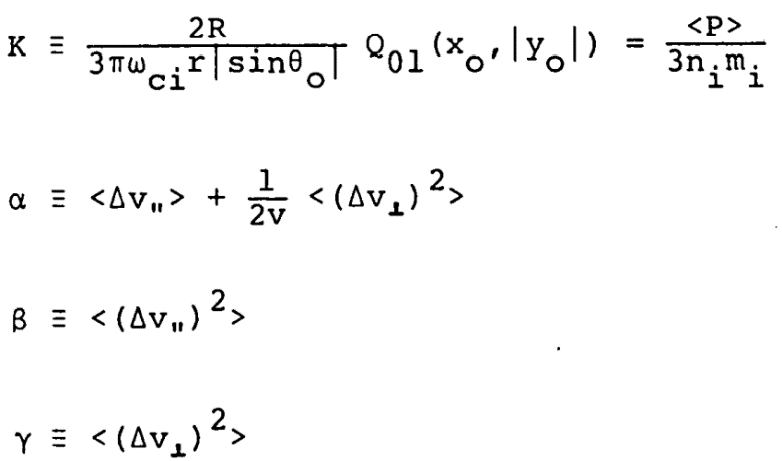
C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\_3C97ITJ~{SN8E22RLSJS$J.png偏微分方程，f在pitch angle做勒让德展开，

不同的P函数，因为pitch angle积分简单，展开还是有用的，降为一系列耦合的线性微分方程关于（v,t），r为什么没有（某一径向点r）了？可以考虑谐频

基频，pitch角展开的开始两项

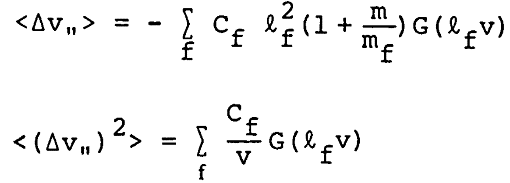
C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\KK_$6N$E88F$V%9BBNO@H@L.png 0阶和2阶关于μ的阶数

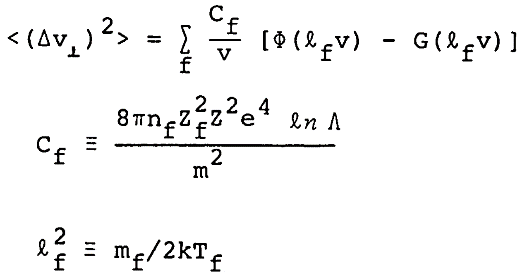
（包含了碰撞和扩散K的线性微分方程）

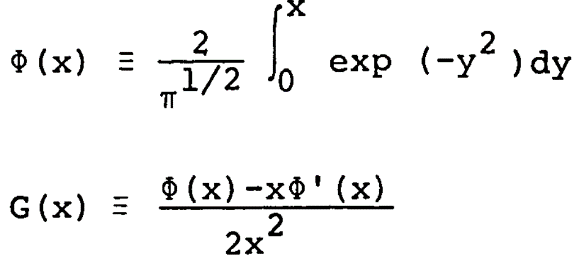
某一个r，扩散项转换为功率，不对pitch angle积分的话可以update成二维

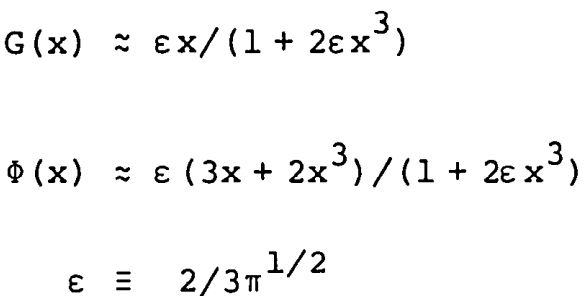
13.库伦扩散系数

f背景场粒子，测试离子

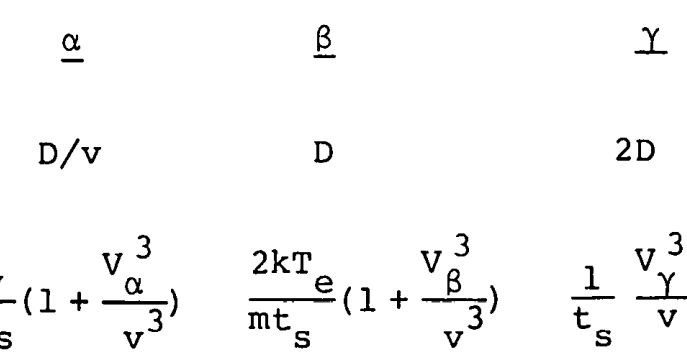








些特殊形式的使用允许通过初等积分完全解一维 Fokker-Planck 方程。

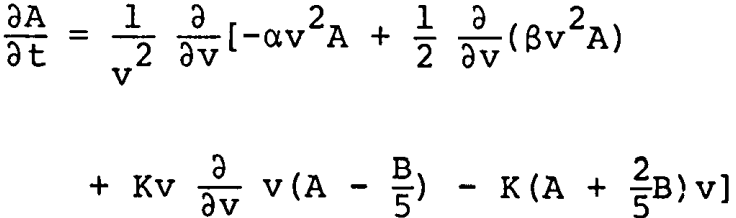
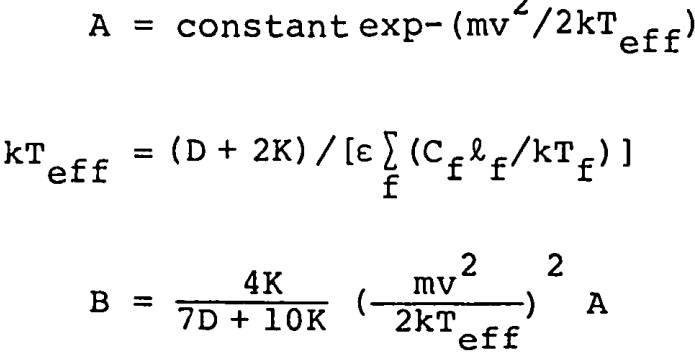
都变成系数

李林交流，一维偏微分方程求解，matlab有限差分，边界条件

14. C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\9HDC8G$2B[T8FSV$QGFZ%W5.png的稳态解

稳态解对应基频，n次谐频在33式中K替代为C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\Q)]0GQV`}GNGST[XF3_K%HB.png成比例的量，谐波加热优先作用于更高能量、更大拉莫尔半径的粒子，如果不检查，则会导致

时间依赖的能量损失。

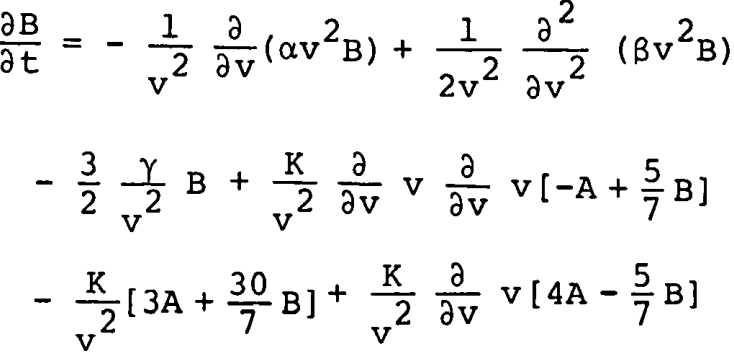
C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\O4ST(W_G~HX0RC@@EA][WHE.png热能量，需要计算分析，对低能量范围，扩散系数很简单（库伦碰撞的扩散系数）（25）（26）A,B式很容易求解，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\O2F4A`B7F65JQPWXY5T$)$9.png对（25）积分一次，AB解出来，

低能量二维FP方程的解析解

低能范围共振离子速度分布函数（又是少数离子分布函数）接近麦克斯韦分布，有效温度高于背景离子和电子，

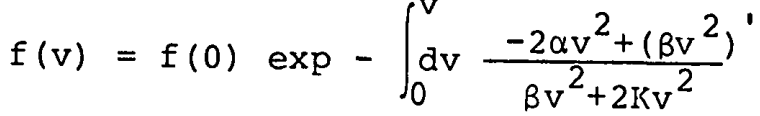
高能量二维应该也能做

分布函数需要计算机分析，因为扩散系数复杂，有用的估算，



C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\Q6@QZ5M}H[2YQP]~RVCZVS0.pngC:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\B$S1C[_`NBQ087EMY4%BLAK.png积分，当 K 很大时，在 P(M) 展开式中仅使用两项来表示（0,2项） f(v) 的角度相关性是不令人满意的方式，需要再加项，用C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\BSWU7T3NITLW0UF~B_ZEB`E.png替代。16

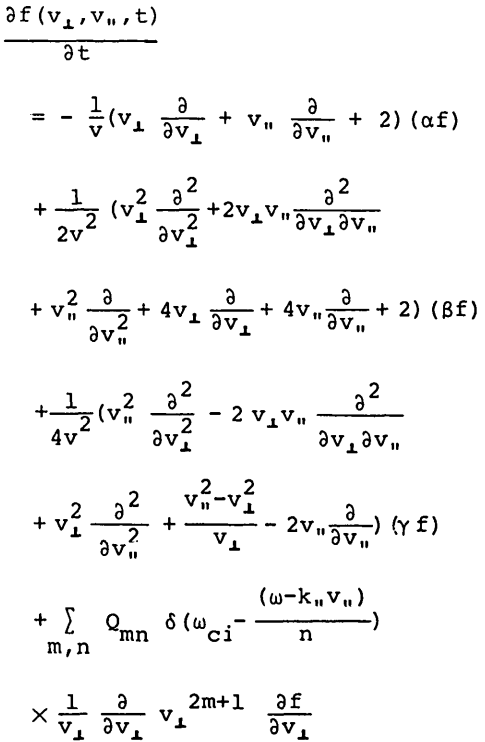
15，一维f（v）的解析稳态解（已完成工作）

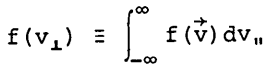
去掉角度，共振粒子速度分布函数计算被简化，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\43VV}OMDHL`CIEBJ)$LV`0B.png方程25积分得到

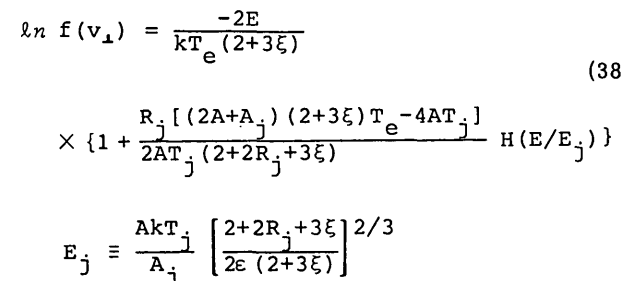
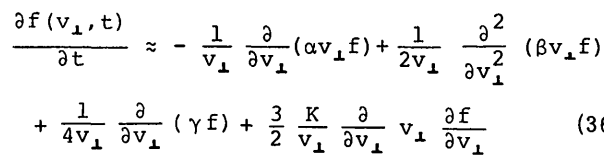
单一的背景离子，密度温度，库伦扩散系数，代数计算得到f（v）的显式，

16f（v垂直）的稳态解

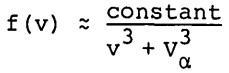
前文提到热能量或以上的估算，但是高能尾，主要的库伦过程是电子拖拽，不会引起明显的pitch角散射，从回旋加热获得的垂直能量不与平行自由度共享，能量增加50%，（只考虑v），v垂直远大于v平行，描述强各向异性速度高能量下的预期分布，库伦项更复杂，扩散项更简单，从C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\9HDC8G$2B[T8FSV$QGFZ%W5.png变为C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\BSWU7T3NITLW0UF~B_ZEB`E.png测试离子的FP方程变为



v平行积分，

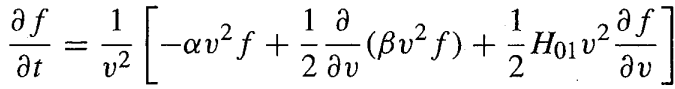
（可以写个小程序,针对高能）

17. f(v) 用于稳态各向同性离子注入

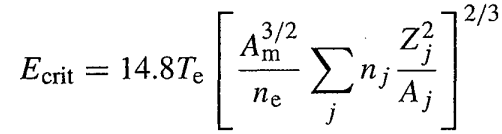
高能中性束作为测试离子的库伦慢化和扩散，我们假设注入的束速度各向同性，C:\Users\lenovo\AppData\Local\Temp\1653214481(1).pngC:\Users\lenovo\AppData\Local\Temp\1653214521(1).png，加入一个源项C:\Users\lenovo\AppData\Local\Temp\1653214652(1).png，和sink 项C:\Users\lenovo\AppData\Local\Temp\1653214677(1).png，一次积分，delta函数积分成step函数，背景离子和电子具有相同温度，得到简化，

…

Tokamaks

the quasi-linear term，低阶非线性项，空间和时间上的波周期平均得到非线性项的平均，分布函数的时间尺度长于波周期，扰动的分布和电磁场来自线性理论，模耦合和高阶非线性效应被忽略，FP方程球坐标C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\YF]4G$J4`N%QT@7XRBR3DWP.png，勒让德函数![C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\})LQJ](D{PEDC[[]TNPQY{A.png](data:image/png;base64,)是C(f)的本征函数,把f展开成勒让德函数的求和，即使不是Q(f)本征函数，展开也可以降偏微分方程C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\B)7E14ZPZBY$%5}ZG83D(A7.pngto 耦合的微分方程组C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\%4S)E)A`YOXY}WBO4O5KM%M.png，两种离子基频加热的少数离子分布函

系数解析表达，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\SM7$3N0Y}$X4]20DK2KFOFM.png，功率和左旋电场成正比，忽略了右旋和平行电场，平行速度效应，稳态，得到解析解。

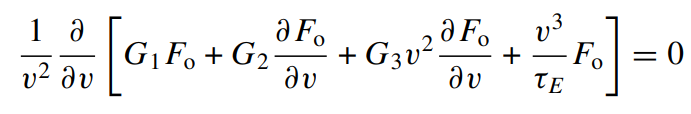
有效温度，C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\[0C5ES)LQN)$82SU5{E_$YS.png，高于临界温度

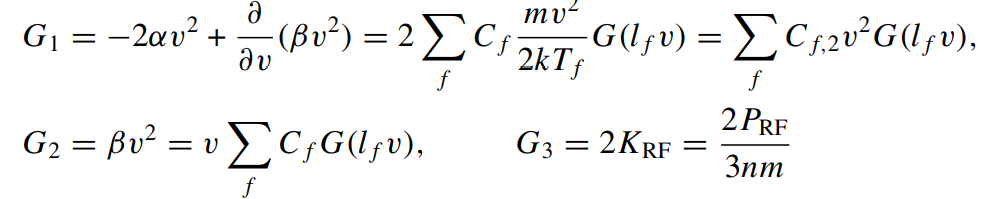
，电子吸收，低于临界温度离子吸收，少数离子浓度控制（离子加热优化）

非均匀场，有更多的离子进入共振，均匀场通行离子，然而强的离子回旋阻尼把离子推入捕获区，文献给出托卡马克磁场，包含通行和捕获区，本底离子的二次谐频：Kerbel, G.D. and McCoy, M.G., Physics offluids 28, 3269 (1985)（该文献详细，考虑通行捕获感觉较复杂）

一维文献2：Simple 1D Fokker–Planck modelling of ion cyclotron resonance frequency heating at arbitrary cyclotron harmonics accounting for Coulomb relaxation on non-Maxwellian populations

多数离子谐频的离子尾形成，能量守恒允许我们定性结合局部损失，stix不太高能的少📕离子尾，

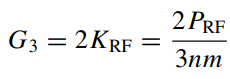
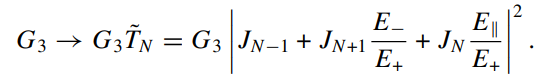
首先给出STIX FP方程



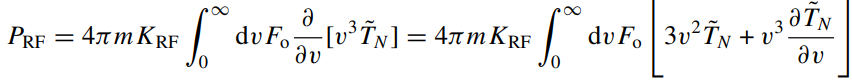
描述 ICRF 在任何谐频下大量少数离子和多数离子的加热，通过求解一系列耦合的FP方程考虑库伦碰撞作用，任何等离子体成分都没有被假定为初始麦克斯韦分布

忽略碰撞项的各向异性，区别v和v垂直，考虑极化，KRF不是简单的和吸收功率成比例，谐频显著依赖 E−/E+

3、把STIX模型发展向谐频加热 ，stix TN中N=1，贝塞尔函数J=1，只保留C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\(_ORB45`0$T@F3}$MJ)SPPX.png



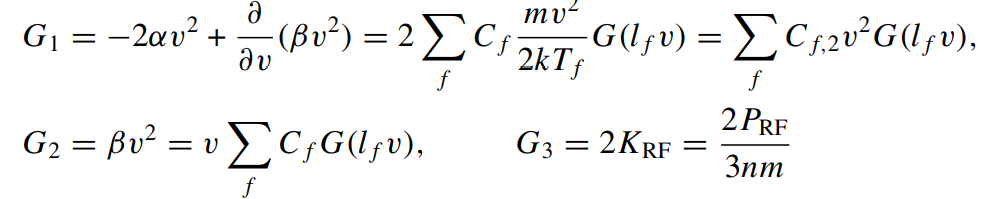
加入了极化，不再是简单的比例关系和PRF有关，，因为扩散系数和速度有关，为了进行计算，有必要从对 KRF 的猜测开始（对于给定的相对极化，这又相当于指定 E+），找到分布，然后评估 RF 功率密度（不太理解，由功率密度反推Krf）：

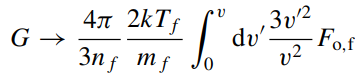
（stix文献741）

并设置一个迭代循环（例如，依靠 Newton-Raphson 求根方法）来

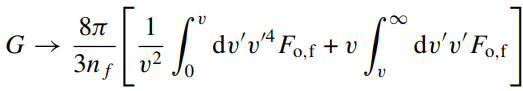
确定所需射频功率密度的 KRF 和 Fo。Fo是分布函数

4、非麦氏分布背景离子的碰撞项（[10] KarneyCFF 1986 Comput. Phys. Rep. 4 183–244））

虽然离子回旋加热针对某种离子，但是其他等离子体成分也会被直接和间接的加热，除了为每种成分写下具有适当 RF 加热项的 Fokker-Planck 方程外，Stix 采用的库仑碰撞算子应该升级为描述与远离热平衡的物质的碰撞相互作用的算子，当研究粒子不是少数而是等离子体的不可忽略的部分时，必须另外考虑同类粒子的自碰撞（重新写出本底离子的FP方程），

G in G1, ,f是粒子种类，v’是?

G in G2



升级系数中的积分在相同网格上进行数值计算，评估寻找各种f的 Fo

不如通过设置迭代方案在此处找到方程的解：在每次迭代中，使用在前一次迭代中找到的分布来计算自碰撞以计算碰撞 自碰撞算子。 如果这个过程收敛，就可以找到非线性问题的解。 这种迭代方案是由 Louche [11] 提出的，他求解了 Fokker-Planck 方程，同样考虑了分布的取决于俯仰角。

迭代方案也可以用于模拟所有等离子体成分的库仑碰撞相互作用：在每个迭代循环中，求解各种等离子体成分的 Fokker-Planck 方程，将前一个时间步的分布设为 计算碰撞算子。 在对分布函数的一系列 Fokker-Planck 评估结束时，进行收敛性检查。 如果新发现的分布与前一次迭代中发现的分布还不够接近，则启动下一个迭代步骤。 当分布不再显着变化时，计算停止。

二维FP博士论文

V平行和V垂直，或者是V和pitch angle

5月25号讨论

先做一维f（v）物理模型,具体表达（一周时间），离散差分，迭代数值求解（李林）

基频一维F-P方程详细表达：

*稳态解*

=*.随时间演化*

其中*，*

,其中，是由全波得到，n是测试离子的密度，m是质量。

其中，；

其中，，其为常数；，G(x)为误差函数；；

积分去掉后，简化得到

*表示能量损失包含于G函数中；*

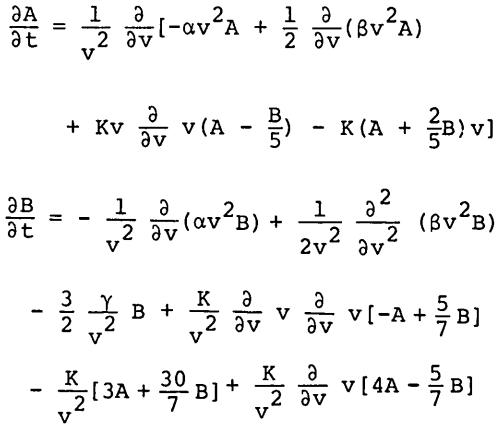
Tokamak书上，能量项没有。

加谐频（多数离子）（文献一维简单的方法迭代），Fo初始求KRF,

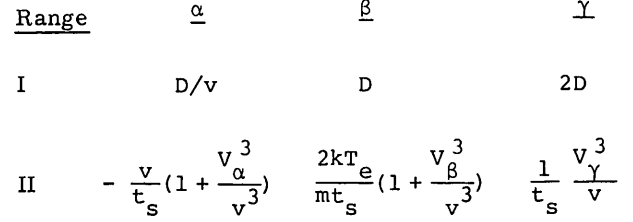
再求F直到收敛。

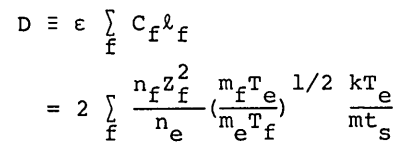
二维，加Pitch angle

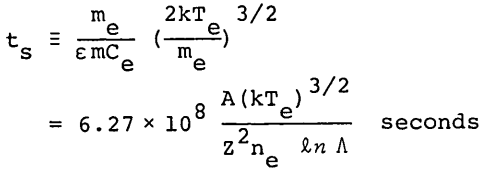
C:\Users\lenovo\AppData\Roaming\Tencent\Users\49423151\QQ\WinTemp\RichOle\(JB6%7H7$ZN}@FGHIK)54)U.png

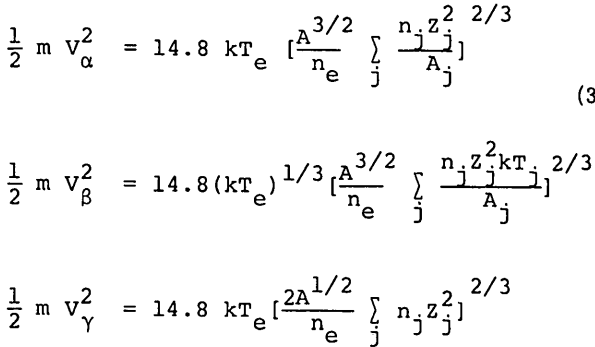


低能范围，高能范围



低能：

高能：



做高能量范围，二维（李林数值求解）

V做离散，偏微分的表达，

少数离子分布函数推广向本底离子分布函数FP求解。

中性束源项

6.9

一维表达式准备好，准备离散