GKVコードの概要

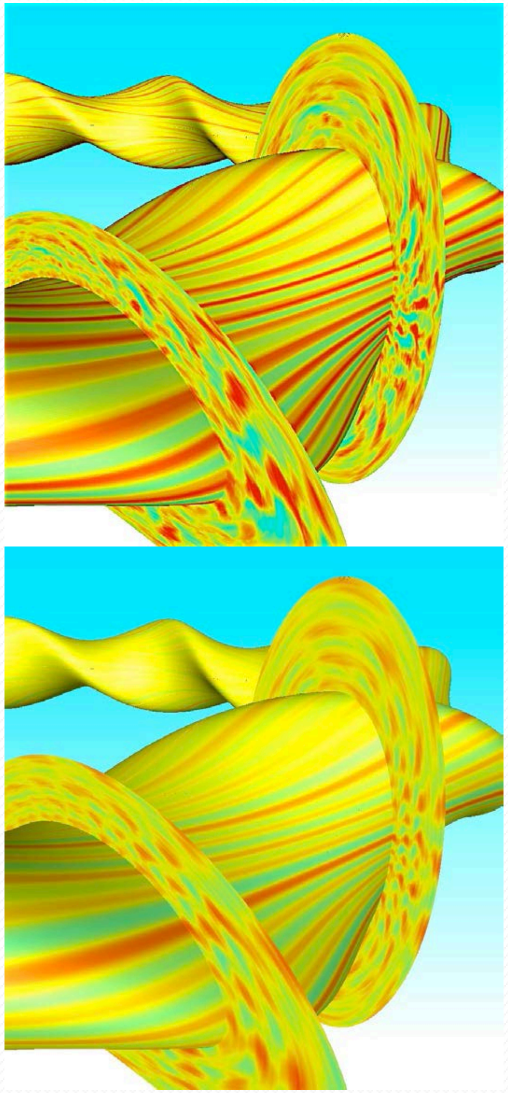
渡邉智彦(名大・理)
共同開発者:洲鎌英雄、沼波政倫、石澤明宏
仲田資季、前山伸也

GKVコード

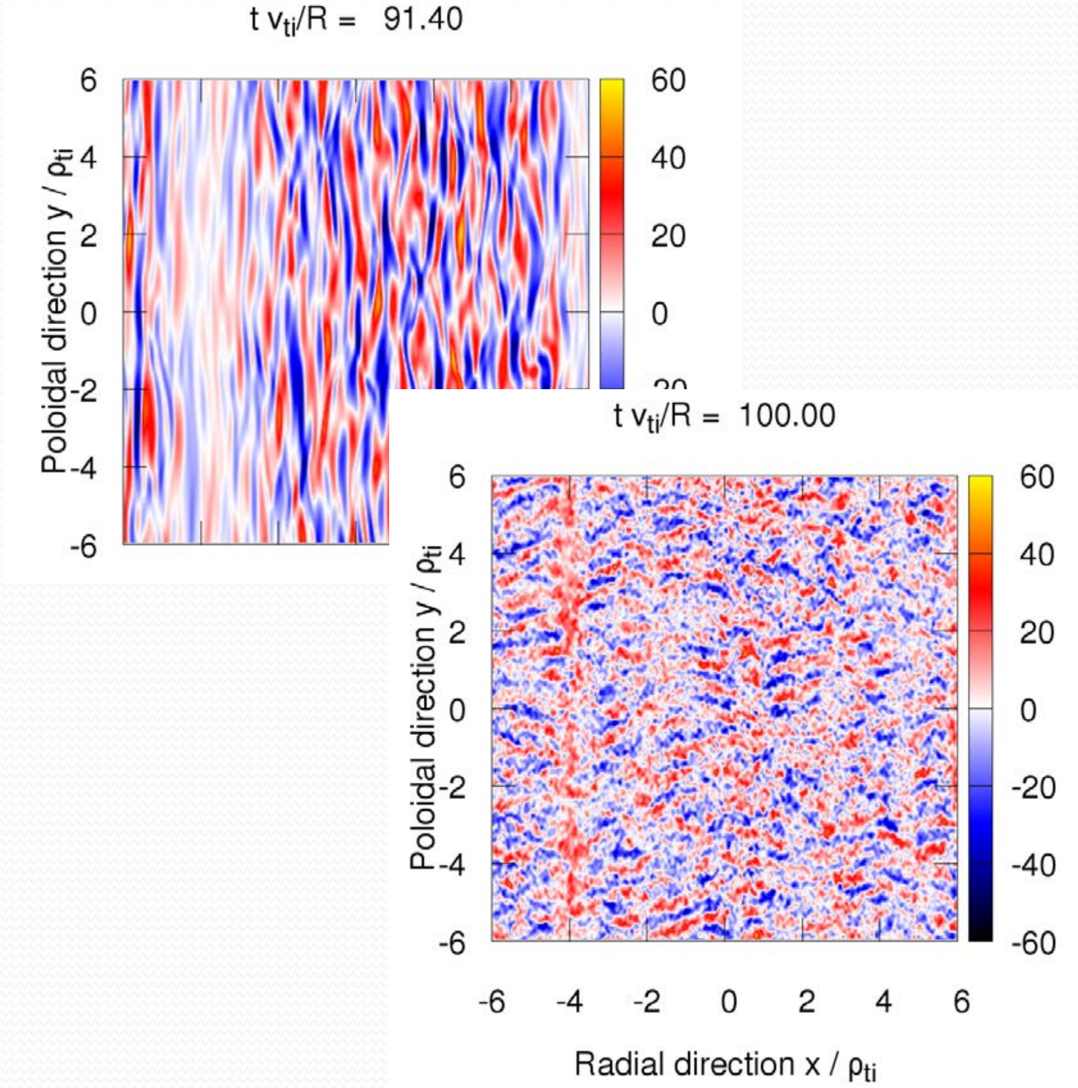
- ジャイロ運動論的シミュレーションコード
  - 磁場閉じ込めプラズマ中の乱流やゾーナルフローの時間発展を追跡
  - フラックスチューブを用いた局所モデル
  - 背景磁場、密度・温度勾配を固定し、揺動のみを扱う
  - 電磁場揺動および複数粒子種を導入
  - 同種・異種粒子間衝突
  - トカマクおよびヘリカル形状に対応
  - 実験に対応した磁場配位の導入
  - エントロピー・バランスによる精度チェックと相互作用解析

GKVコードの応用例

- 乱流輸送の同位体効果

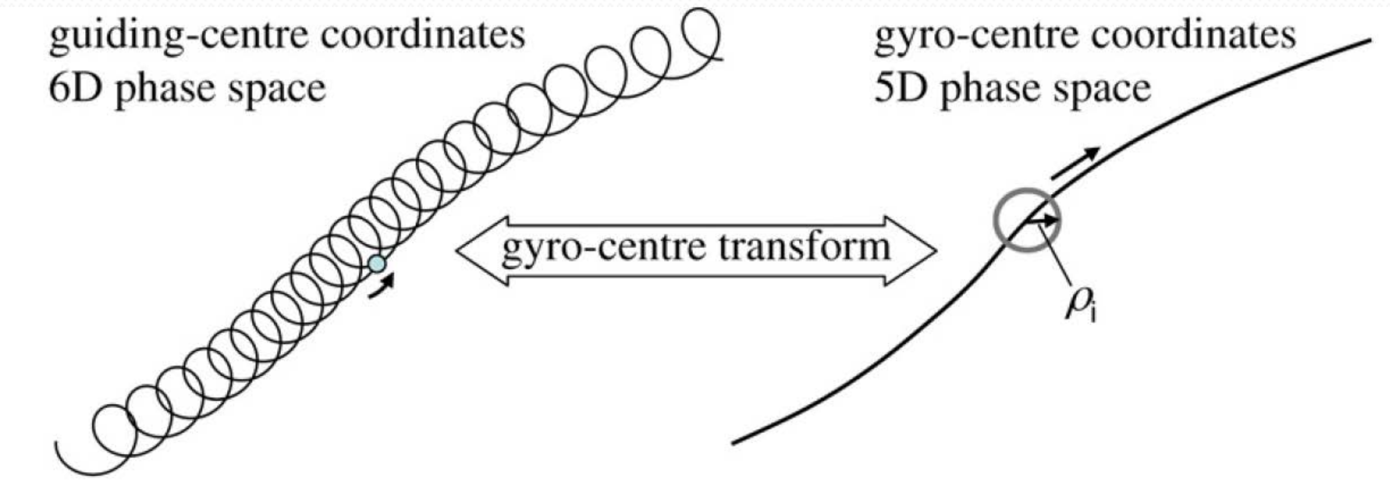


- マルチスケール乱流



ジャイロ運動論について

- 荷電粒子のジャイロ運動を平均し、速い振動成分を除去
- 位相空間座標は、6次元から5次元に低減



- 磁場に垂直方向にジャイロ半径程度、平行方向に装置サイズ程度の波長を持つ揺らぎ（バルーニング型）を精度よく扱う
- 捕捉粒子・非捕捉粒子、磁場ドリフト、ランダウ減衰、有限ジャイロ半径、などの運動論的効果を取り入れる

どのような現象に適用するか

- ドリフト波不安定性およびドリフト波乱流
  - イオン/電子温度勾配モード（ITG/ETG）
  - 捕捉電子モード（TEM）
  - 運動論的バルーニングモード（KBM）
  - 微視的ティアリングモード（MTM）
- ゾーナルフロー、測地的音波モード(GAM)
- 運動論的Alfven波
- 磁気リコネクション
- 減衰/駆動型運動論的乱流

現状のGKVコードではできないこと

- 平衡分布の緩和 => 輸送コードへ
- 低(m, n)モード => MHDコードへ
- 加熱、粒子供給 => 密度・温度分布固定
- 過渡応答 => 摂動部分なら可能?
- 磁気音波 => 拡張可能
- 背景ExB流シア、回転効果 => 拡張途中
- 多種粒子間衝突 => 拡張済み・整備中
- 平行電場による非線形効果 => GK ordering で消去

GKVで解いている方程式 (1)

波数空間(k)での表現

$$\frac{\partial f_{sk}}{\partial t} + v_{||}\nabla_{||} f_{sk} + i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{v}_{sD} f_{sk} + N_{sk} - \frac{\mu\nabla_{||}B}{m_s}\frac{\partial f_{sk}}{\partial v_{||}}$$

$$= -\frac{e_s F_{sM}}{T_s}\left[v_{||}\left(\nabla_{||}J_{0sk}\phi_k + \frac{\partial J_{0sk}A_{||k}}{\partial t}\right) + i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{v}_{sD}J_{0sk}\phi_k - i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{v}_{s*}J_{0sk}\left(\phi_k - v_{||}A_{||k}\right)\right]$$

$$+ \sum_{s,} C_{s,s'}(f_{sk}, f_{s'k})$$

$$\left[k_\perp^2 + \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_s \frac{e_s^2 n_s}{T_s}(1-\Gamma_{0sk})\right]\phi_k = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_s e_s \int J_{0sk} f_{sk}\, dv^3$$

$$k_\perp^2 A_{||k} = \mu_0 \sum_s e_s \int v_{||} J_{0sk} f_{sk}\, dv^3$$

(s: 粒子種)

GKVで解いている方程式 (2)

- Abbreviations

$$\nabla_{||} = \frac{1}{B\sqrt{g}}\frac{\partial}{\partial z}$$

$$\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{v}_{sD} = \frac{m_s v_{||}^2 + \mu B}{e_s}\left(K_x k_x + K_y k_y\right)$$

$$\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{v}_{s*} = -\frac{T_s}{e_s}\left[\frac{1}{L_{ns}} + \left(\frac{m_s v_{||}^2}{2T_s} + \frac{\mu \mathrm{B}}{T_s} - \frac{3}{2}\right)\frac{1}{L_{Ts}}\right]k_y$$

$$N_{sk} = -\sum_{\boldsymbol{k}'+\boldsymbol{k}''=\boldsymbol{k}}\left(k_x' k_y'' - k_y' k_x''\right)J_{0sk'}\left(\phi_{k'} - v_{||}A_{||k'}\right)\left(f_{sk''} + \frac{e_s F_{sM}}{T_s}J_{0sk''}\phi_{k''}\right)$$

$$F_{sM} = n_s\left(\frac{m_s}{2\pi T_s}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{m_s v_{||}^2}{2T_s} - \frac{\mu B}{T_s}\right)$$

GKVで解いている方程式 (3)

- Abbreviations (continued)

$$J_{0sk} = J_0(k_\perp \rho_s)$$

$$\Gamma_{0sk} = I_0(k_\perp^2 \rho_{ts}^2)\exp(-k_\perp^2 \rho_{ts}^2)$$

$$k_\perp^2 = g^{xx}k_x^2 + 2g^{xy}k_x k_y + g^{yy}k_y^2$$

$$K_x = -\frac{\partial \ln B}{\partial y} + \frac{g^{xz}g^{xy} - g^{xx}g^{yz}}{B^2/c_b^2}\frac{\partial \ln B}{\partial z}$$

$$K_y = \frac{\partial \ln B}{\partial x} + \frac{g^{xz}g^{yy} - g^{xy}g^{yz}}{B^2/c_b^2}\frac{\partial \ln B}{\partial z}$$

$$\frac{1}{L_{ns}} = -\frac{d \ln n_s}{dx}$$

$$\frac{1}{L_{Ts}} = -\frac{d \ln T_s}{dx}$$

フラックスチューブ座標

- 座標系
  - $x = c_x(\rho_F - \rho_0)$, $y = c_y[q(\rho_F)\theta_F - \zeta_F]$, $z = \theta_F$
  - $(\rho_F, \theta_F, \zeta_F)$: 平衡分布を表す任意の磁気座標
  - $x \in [-L_x, +L_x]$, $y \in [-L_y, +L_y]$, $z \in [-N_\theta \pi, +N_\theta \pi]$
  - $z = 0$ on the outward midplane
- 背景分布のパラメータを固定
  - 局所的な密度・温度勾配、磁気シアのもとでの解析; $\rho^* \rightarrow 0$極限
  - 動径方向に周期境界条件を適用可能
- 摂動量のFourier表現

$$A = A(x, y, z) = \sum_{k_\perp} \tilde{A}_{k_\perp}(z) e^{ik_x x + ik_y y}$$

$$= \sum_{k_\perp} \tilde{A}_{k_\perp}(\theta_F) e^{i\left(k_x + c_\theta \hat{s} \theta_F k_y\right) c_x (\rho_F - \rho_0) + ik_y c_y (q_0 \theta_F - \zeta_F)}$$

$$\hat{s} = \frac{\rho_0}{q_0} \frac{dq}{d\rho_F}, \quad c_\theta = \frac{c_y q_0}{\rho_0}$$

磁力線方向の境界条件

- トーラスにおける周期性
  - $A[x, y(\theta_F, \zeta_F), z(\theta_F)] = A[x, y(\theta_F + 2\pi, \zeta_F), z(\theta_F + 2\pi)]$
- よって、磁力線方向の境界条件は
  - $\tilde{A}_{\boldsymbol{k}_\perp}(z) = c_{k_y} \tilde{A}_{\boldsymbol{k}_\perp + \delta \boldsymbol{k}_\perp}(z + 2\pi)$
  - $\delta \boldsymbol{k}_\perp = -2\pi c_\theta \hat{s} k_y \nabla x$, $c_{k_y} = \exp\left(i 2\pi q_0 k_y c_y\right)$
- バルーニング表現との類似から、z空間を拡張すると
  - $\tilde{A}_{\boldsymbol{k}_\perp}(z) = c_{k_y} \tilde{A}_{\boldsymbol{k}_\perp + \delta \boldsymbol{k}_\perp}(z + 2N_\theta \pi)$
  - $\delta \boldsymbol{k}_\perp = -2N_\theta \pi c_\theta \hat{s} k_y \nabla x$, $c_{k_y} = \exp\left(i 2N_\theta \pi q_0 k_y c_y\right)$
- アスペクト比への制約（m: 整数）

$$\left|\frac{\delta k_x}{k_{x,min}}\right| = \left|\frac{k_y}{k_{y,min}}\right| N_\theta m , \qquad m = 2\pi c_\theta \hat{s} \frac{k_{y,min}}{k_{x,min}}$$

衝突項について

- Lenard-Bernstein モデル衝突項

$$C_{sk}^{LB} = \nu_s \left[\frac{\partial}{\partial v_{||}} \left(v_{||} h_{sk} + v_{ts}^2 \frac{\partial h_{sk}}{\partial v_{||}} \right) + \frac{1}{v_\perp} \frac{\partial}{\partial v_\perp} \left(v_\perp^2 h_{sk} + v_{ts}^2 v_\perp \frac{\partial h_{sk}}{\partial v_\perp} \right) - k_\perp^2 \rho_{ts}^2 h_{sk} \right]$$

$$h_{sk} = f_{sk} + e_s F_{sM} J_{0sk} \phi_k / T_s$$

  - [...]内の最後の項は、ジャイロ中心のBohm拡散項
  - 運動量 / エネルギーは保存しない
  - 速度空間格子幅に対し適切なν_sを設定すれば数値誤差抑制
  - 多種粒子衝突項 (Sugama+2009)も実装済み(公開コードでは陽解法のみ)

GKVコードでの無次元化

- 基準となる量
  - 平衡分布、磁力線方向の揺動長の単位 L_{ref} (=主半径 R_0)
  - 磁力線垂直方向の揺動長の単位 = ジャイロ半径 ρ_{ref}
  - 速度の単位 = 熱速度 v_{ref}，　時間の単位 = $L_{\mathrm{ref}}/\, v_{\mathrm{ref}}$
  - 質量 m_{ref} , 電荷 e , 数密度 n_{ref}, 温度 T_{ref}
    - 各成分ごとに $m_{\mathrm{e}}/m_{\mathrm{ref}}$, $m_{\mathrm{i}}/m_{\mathrm{ref}}$ や $T_{\mathrm{e}}/T_{\mathrm{ref}}$, $T_{\mathrm{i}}/T_{\mathrm{ref}}$ などを与える
    - $v_{\mathrm{ref}} = \sqrt{T_{\mathrm{ref}}/m_{\mathrm{ref}}}$
    - 磁場強度は磁気軸での値

通常、いずれかの成分をreferenceに

- 変動量の規格化 (ˇ付きは無次元量)

$$\check{f}_{sk} = \frac{L_{\mathrm{ref}} v_{ts}^3}{\rho_{\mathrm{ref}} n_s} f_{sk}\,,\quad \check{\phi}_k = \frac{L_{\mathrm{ref}} e_{\mathrm{ref}}}{\rho_{\mathrm{ref}} T_{\mathrm{ref}}} \phi_k\,,\quad \check{A}_{\parallel k} = \frac{L_{\mathrm{ref}} e_{\mathrm{ref}}\, v_{\mathrm{ref}}}{\rho_{\mathrm{ref}}\, T_{\mathrm{ref}}} A_{\parallel k}$$

- 輸送係数の規格化

$$\check{\chi} = \frac{L_{\mathrm{ref}}}{\rho_{\mathrm{ref}}^2 v_{\mathrm{ref}}} \chi = \chi/\chi^{GB}$$

局所モデルでは$\rho_*^{-1} = L_{\mathrm{ref}}/\,\rho_{\mathrm{ref}}$ の値は不定 ($\rho^* \to 0$)

無次元化された方程式

$$\frac{\partial \check{f}_{sk}}{\partial \check{t}} + \check{v}_{ts}\check{v}_{\parallel}\check{\nabla}_{\parallel}\check{f}_{sk} + i\check{\boldsymbol{k}}\cdot\check{\boldsymbol{v}}_{sD}\check{f}_{sk} + \check{N}_{sk} - \check{v}_{ts}\check{\mu}\check{\nabla}_{\parallel}\check{B}\frac{\partial \check{f}_{sk}}{\partial \check{v}_{\parallel}}$$

$$= -\frac{\check{e}_s\check{F}_{sM}}{\check{T}_s}\left[\check{v}_{ts}\check{v}_{\parallel}\left(\check{\nabla}_{\parallel}J_{0sk}\check{\phi}_k + \frac{\partial J_{0sk}\check{A}_{\parallel k}}{\partial \check{t}}\right) + i\check{\boldsymbol{k}}\cdot\check{\boldsymbol{v}}_{sD}J_{0sk}\check{\phi}_k - i\check{\boldsymbol{k}}\cdot\check{\boldsymbol{v}}_{s*}J_{0sk}(\check{\phi}_k - \check{v}_{ts}\check{v}_{\parallel}\check{A}_{\parallel k})\right]$$

$$\left[\check{\lambda}_D^2\check{k}_\perp^2 + \sum_s \frac{\check{e}_s^2\check{n}_s}{\check{T}_s}(1-\Gamma_{0sk})\right]\check{\phi}_k = \sum_s \check{e}_s\check{n}_s\int J_{0sk}\check{f}_{sk}d\check{v}^3$$

$$\check{k}_\perp^2\check{A}_{||k} = \check{\beta}\sum_s \check{e}_s\check{n}_s\int \check{v}_{ts}\check{v}_{\parallel}J_{0sk}\check{f}_{sk}d\check{v}^3$$

無次元化されたデバイ長とβ

$$\check{\lambda}_D^2 = \frac{\lambda_{D,\mathrm{ref}}^2}{\rho_{\mathrm{ref}}^2}, \qquad \beta = \frac{v_{\mathrm{ref}}^2}{V_{A,\mathrm{ref}}^2} = \frac{\rho_{\mathrm{ref}}^2}{c^2/\omega_{p,\mathrm{ref}}^2}$$

GKVの数値スキーム

- 時間積分
  - 4次精度Runge-Kutta-Gill (時間刻み幅調整機能付き)
- 空間微分
  - (x, y) : FFTを用いたスペクトル法（with 3/2-rule)
  - z : 4次中心差分 or 5次風上差分
  - $(v_{\parallel}, \mu)$: 4次中心差分, $v_{\perp}$についての等間隔格子
- 速度空間積分
  - 台形公式 + $v_{\perp} = 0$近傍での補正
- 使用する数値計算ライブラリ
  - FFTW は必須
  - 他は様々なライブラリ向けにインターフェースを用意

GKVでの並列化

- MPI領域分割と通信
  - 分布関数揺動の6次元複素配列$(k_x, k_y, z, v_\parallel, \mu, s)$を$(k_y, z, v_\parallel, \mu, s)$ の5次元領域分割
  - ポテンシャル揺動などは、(k_x, k_y, z) を(k_y, z) で分割
  - $(z, v_\parallel, \mu)$ では差分にともなう1対1通信
  - $(v_\parallel, \mu, s)$ で電荷・電流密度計算にともなうreduction通信
  - (k_x, k_y) ではFFTにともなう転置通信
  - binary データは分割されたまま出力される

- OpenMPを用いた共有並列
  - スレッドによる並列計算
  - master / slave スレッドを利用した通信と演算のoverlap

GKVのパラメータ設定

gkvp_f0.48_namelistのサンプル

補足：それぞれの詳しい説明は
README_for_namelist.txt にも記載。

&calct calc_type="linear",	計算種別：**linear / nonlinear**
z_bound="outflow",	磁力線方向境界条件：**outflow(**流入・流出境界**) / zerofixed (**固定境界**) / mixed**
z_filt="off",	磁力線方向フィルタ**: off / on**
z_calc = “up5”	磁力線方向差分スキーム**: cf4 (4**次中心差分 **w/ nzb=2) / up5 (5**次風上差分 **w/ nzb=3)**
art_diff = 0.d0,	磁力線方向数値粘性**(**の強度**) w/ cf4**
num_triad_diag=0 &end	エントロピー伝達解析用（本講習では割愛）
&triad mxt=0, myt = 0/	エントロピー伝達解析用（本講習では割愛）
&equib equib_type = "eqdsk", &end	平衡磁場タイプ

"analytic" - Analytic helical field with the metrics in cylinder
"s-alpha" - s-alpha model with alpha = 0 (cylindrical metrics)
"circ-MHD" - Concentric circular field with the consistent metrics
"vmec" - Stellarator field from the VMEC code via BZX code
"eqdsk" - Tokamak field (MEUDAS/TOPICS or G-EQDSK) via IGS code

GKVのパラメータ設定

gkvp_f0.48_namelistのサンプル（つづき）

補足：それぞれの詳しい説明は
README_for_namelist.txt にも記載。

&run_n inum=1,	ジョブ番号
ch_res = .false., &end	**(**ジョブ途中から**)**解像度変更 **(**本講習では割愛**)**
&files f_log="./Log/gkvp_f0.40.",	**name tag for output data**
f_hst="./gkvp_f0.40.",	
f_phi="./Phi/gkvp_f0.40.",	
f_fxv="./Fxv/gkvp_f0.40.",	
f_cnt="./Cnt/gkvp_f0.40.", &end	
&runlm e_limit =3500.d0, &end	経過時間制限 **[sec]**
&times tend = 150.d0,	シミュレーション時間制限 **[L_{ref}/v_{ref}]**
dtout_fxv = 150.d0,	分布関数出力間隔 **[L_{ref}/v_{ref}]**
dtout_ptn = 150.d0,	ポテンシャル**(&**モーメント量**)**出力間隔 **[L_{ref}/v_{ref}]**
dtout_eng = 5.d-3,	時間発展データ出力間隔 **[L_{ref}/v_{ref}]**
dtout_dtc = 500.d0, &end	**adaptive time-step change**の評価間隔 **[L_{ref}/v_{ref}]**
&deltt dt_max = 1.d0,	時間ステップの上限
adapt_dt = .true.,	**adaptive time-step** の有効/無効
courant_num = 0.6d0, &end	**CFL number**

※**L_{ref}/v_{ref}**は**GKV**における時間規格化因子。
ここでは、**$L_{ref}=R_{ax}$:**磁気軸主半径、
v_{ref} =sqrt(T_{ref}/m_{ref}) = sqrt(T_i/m_p): プロトン熱速度ととる。

GKVのパラメータ設定

gkvp_f0.48_namelistのサンプル（つづき）

並び：e, ion1, ion2, …

$L_{\rm ref} = R_{\rm ax}$, $m_{\rm ref} = m_{\rm p}$, $e_{\rm ref} = e$, $T_{\rm ref} = T_{\rm i(1st\ ion\ spc.)}$
$B_{\rm ref} = B_{\rm ax}$, $n_{\rm ref} = n_{\rm e}$ GKVにおけるreference値

&physp R0_Ln = 3.d0, 3.d0, 3.d0, … $L_{\rm ref}/L_{n_s}$, $L_{\rm ns}^{-1} = -d\ln n_s/d(a\rho)$

R0_Lt = 9.d0, 6.d0, 6.d0, … $L_{\rm ref}/L_{T_s}$, $L_{\rm Ts}^{-1} = -d\ln T_s/d(a\rho)$

nu = 1.d0, 1.d0, 1.d0, … 1.d0 (for finite collision), 0.d0 (for collisionless)

Anum = 5.446170221661534d-4, 2.d0, 4.d0, … A-number: $m_s/m_{\rm ref}$

Znum = 1.d0, 1.d0, 2.d0, … Z-number: $e_s/e_{\rm ref}$

fcs = 1.d0, 0.8d0, 0.1d0, … charge density: $n_s Z_s/n_{\rm ref}$ (note that $\sum_{s\neq e} n_s Z_s/n_e = 1$)

sgn = -1.d0, 1.d0, 1.d0, … sign of charge

tau = 1.2d0, 1.d0, 1.d0, … $T_s/T_{\rm ref}$

dns1 = 1.d-3, 1.d-3, 1.d-3, … initial amplitude of perturbations

tau_ad = 1.d0, Te/Ti(ETG) or Ti/Te(ITG) for nprocs=1, but is fixed to 1.d0 for nprocs > 1

lambda_i = 2.d-3, $\lambda_{\rm Dref}^2/\rho_{\rm ref}^2 = (\epsilon_0 T_{\rm ref}/e_{\rm ref}^2 n_{\rm ref})/\rho_{\rm ref}^2$, $\rho_{\rm ref} = m_{\rm ref} v_{\rm ref}/e_{\rm ref} B_{\rm ref}$

beta = 5.d-4, $\beta_{\rm ref} = \mu_0 n_{\rm ref} T_{\rm ref}/B_{\rm ref}^2$

ibprime = 0, ignore(0) or include(1) the grad-p part in the magnetic drift

vmax = 5.d0, maximum value of velocity space coordinate in $v_{\rm ref} = (T_{\rm ref}/m_{\rm ref})^{1/2}$

nx0 = 30, &end the radial wavenumber imposing initial perturbations

GKVのパラメータ設定

gkvp_f0.48_namelistのサンプル（つづき）

```
&nperi  n_tht =4,
       kymin = 0.4d0,
       m_j = 1
       del_c = 0.d0,  &end
&confp  eps_r     = 0.18d0,
        eps_rnew = 1.d0,
        q_0       = 1.5d0,
        s_hat     = 0.8d0,
        lprd      = 0.d0,
        mprd      = 0.d0,
        eps_hor   = 0.d0,
        eps_mor   = 0.d0,
        eps_por   = 0.d0,
        rdeps00   = 0.d0,
        rdeps1_0 = 1.d0,
        rdeps1_10= 0.d0,
        rdeps2_10= 0.d0,
        rdeps3_10= 0.d0,
        malpha    = 0.d0,    &end
```

磁力線方向ボックスサイズ(ポロイダル角で±n_tht*pi)

磁力線ラベル方向ボックスサイズ **ly = pi / kymin**

半径方向ボックスサイズ **lx= pi / kxmin,   kxmin = |2*pi*s_hat*kymin/m_j|**

磁力線方向境界条件の位相因子 (通常は**0.d0**)

epsilon(rho_0) (=a/R_{ax}*rho_0): eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

q(rho_0): eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

s_hat(rho_0): eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

$$\hat{s}(\rho) = (\rho/q)(dq/d\rho)$$

モデル磁場**:analytic, s-alpha, circ-MHD**での磁場形状パラメータ

GKVのパラメータ設定

gkvp_f0.48_namelistのサンプル（つづき）

&vmecp s_input = 0.65,	**radial position of interest: rho_0**
nss = 301,	**nrho in BZX**
ntheta = 1024, &end	**ntht in BZX (=2 * global_nz * n_tht)**
&bozxf f_bozx="%%DIR%%/vmec/", &end	**specify the directory of "metric_boozer.bin.dat"**
&igsp s_input = 0.50,	**radial position of interest: rho_0**
mc_type = 0,	**is fixed to 0 (**自然座標系を使用**)**
q_type = 1,	**is fixed to 1 (**実平衡の**q**で上書き**)**
nss = 2048,	**NPSI in IGS**
ntheta = 65, &end	**NCHI in IGS +1 (=2*global_nz/n_tht +1)**
&igsf f_igs="%%DIR%%/eqdsk/", &end	**specify the directory of "METRIC_axi.OUT"**
&nu_ref Nref = 1.d19,	n_{ref} **(=n_e) [m^{-3}]**
Lref = 3.5d0,	L_{ref} **(=R_{ax}) [m]**
Tref = 3.d0,	T_{ref} **= (T_i) [keV]**
col_type = "LB",	**is fixed to LB : Lenard-Bernstein col. operator**
iFLR = 1,	**with(1) and without(0) FLR terms in collision**
icheck = 0, &end	**is fixed to 0**

各粒子種の規格化衝突周波数はこれらを用いて計算され、**gkvp_f0.48.***.*.log.*****に出力される

おわりに

- 皆さんの研究に是非GKVコードをご活用ください
- 今後も継続的にメンテナンス / バージョンアップ予定
- ダウンロードサイトを準備予定（後日）
- 利用上の注意
  - コードの著作権は開発者に帰属します
  - 非営利研究には自由に使ってください
  - 結果の正しさは必ずしも保証しません
  - 配布されたコードから変更を加えて実行した結果を公表する場合は、変更点を論文などに明記してください
  - GKVを使用した論文では、以下の文献を引用してください
    - Watanabe, T-H., and H. Sugama. "Velocity–space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence." *Nuclear Fusion* 46.1 (2006): 24.