

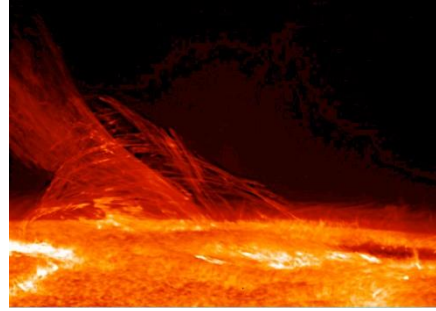
Plazma Fiziğinde Kinetik Teori ve Manyetize Füzyon Plazmasında Türbülans

Özgür Gültekin

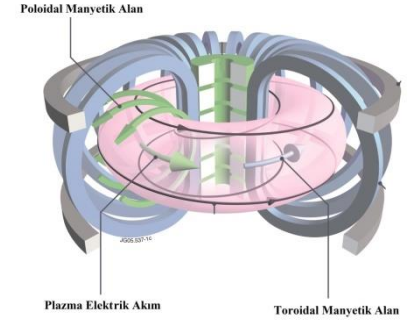
Giriş ve Motivasyon

Plazma nedir?

- Astrofiziksel Plazmalar
- Füzyon Plazması
- Diğer Plazmalar



Hinode JAXA/NASA, 12 Ocak 2007



Plazmanın Betimlenmesinde Üç Temel Yaklaşım

- Parçacık Yörünge Kuramı $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$
- Akışkan Betimlemesi
İki-Akışkan Modeller, Tek-Akışkan Betimlemesi (MHD yaklaşımı)
- Kinetik Kuram

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	Kök İntegralleri	Kök Plazma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Parçacık Yörünge Kuramı

Temel Plazma Olayları

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{E} = 0 \quad \mathbf{B} = B\hat{\mathbf{z}}$$

$$m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -qv_x B$$

$$m \frac{dv_z}{dt} = 0$$

$$\omega_c \equiv \frac{qB}{m} \quad r_L \equiv \frac{v_\perp}{\omega_c} = \frac{mv_\perp}{|q|B}$$

$$x - x_0 = r_L \sin(\omega_c t + \phi)$$

$$y - y_0 = r_L \cos(\omega_c t + \phi)$$

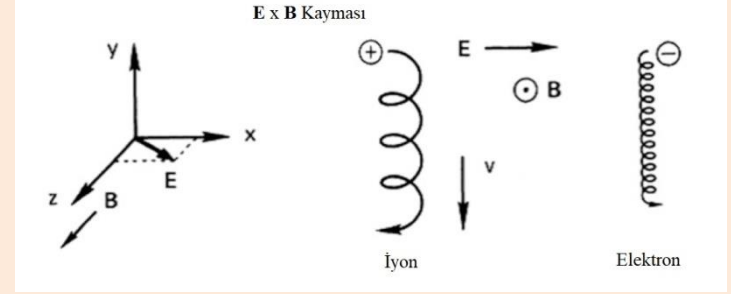
$$z - z_0 = v_\parallel t$$

$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ Kayması

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{B} = \mathbf{B} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = vB^2 \hat{\mathbf{z}} - \mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})$$

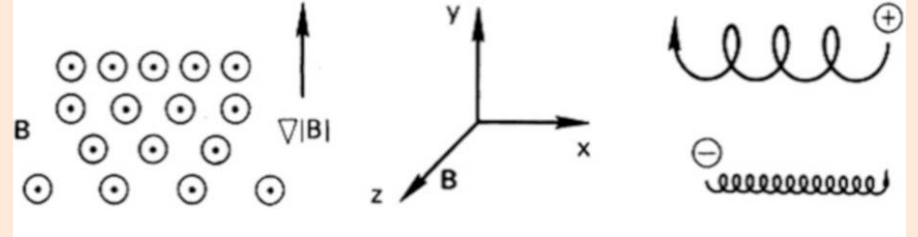
$$\mathbf{v}_{\perp} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$



Grad-B Kayması

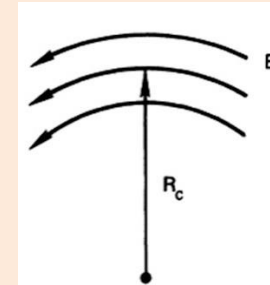
$$\nabla B \perp \mathbf{B}$$

$$\mathbf{v}_{\nabla B} = \pm \frac{1}{2} v_\perp r_L \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{B^2}$$



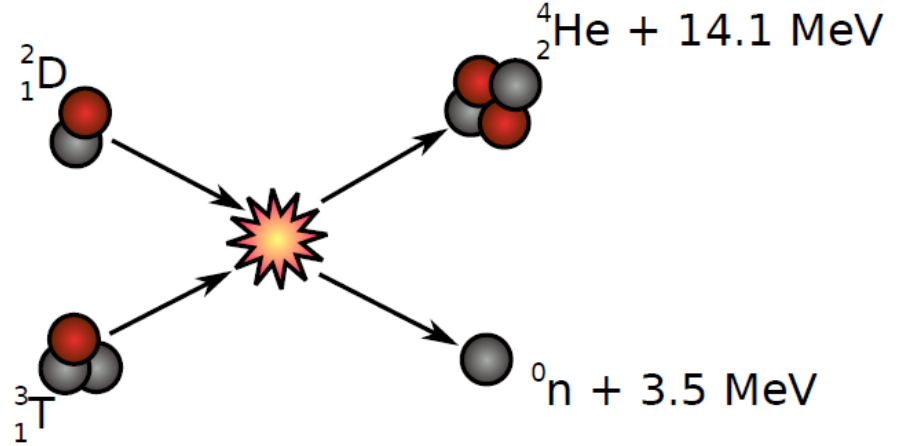
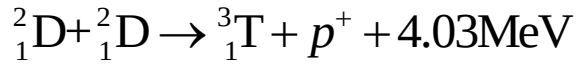
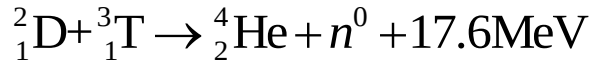
Eğrilik Sürüklenmesi

$$\mathbf{v}_{\nabla B} + \mathbf{v}_R = \frac{m}{q} \frac{\mathbf{R}_c \times \mathbf{B}}{R_c^2 B^2} \left(v_\parallel^2 + \frac{v_\perp^2}{2} \right)$$

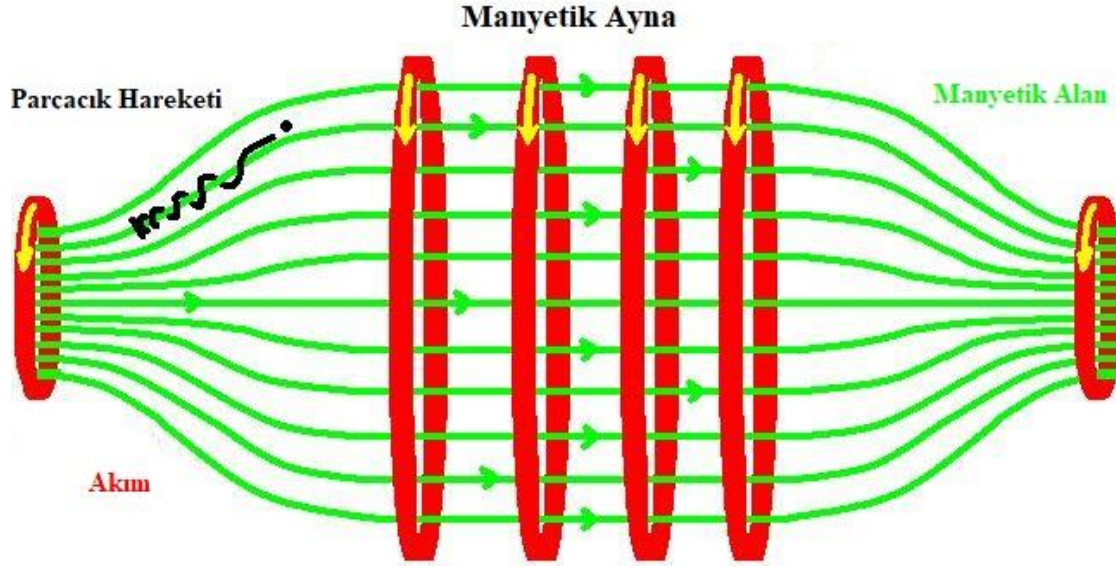


Termonükleer Füzyon

Füzyon reaktörleri için araştırmaların yoğunlaştığı hidrojenin döteryum ve trityum izotopları arasında gerçekleşen füzyon reaksiyonları



Plazmanın Hapsedilmesi: Manyetik Ayna

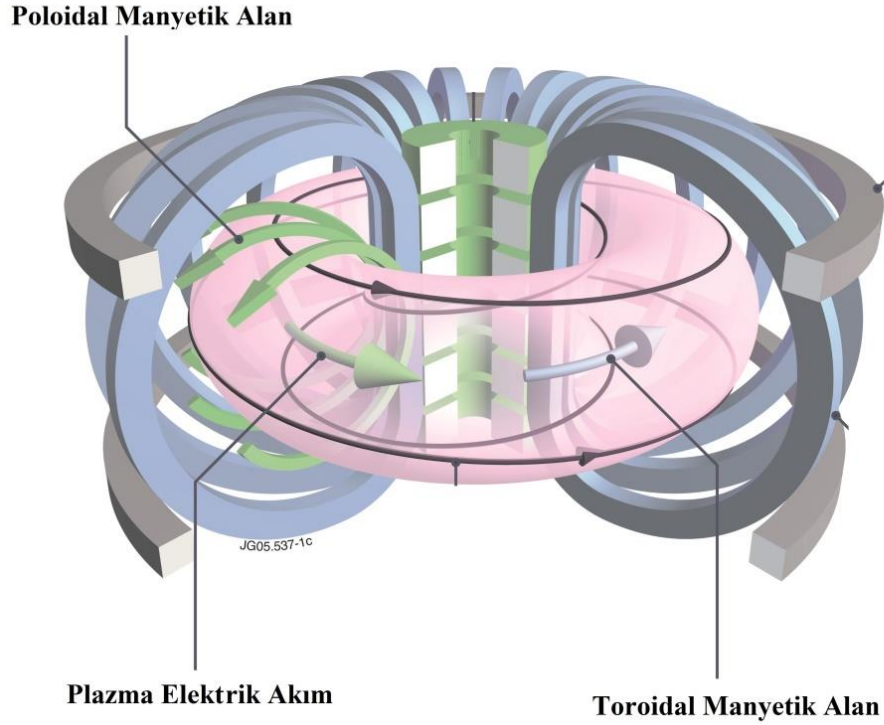


$$\mu = \frac{\frac{1}{2}mv_{\perp}^2}{B}$$

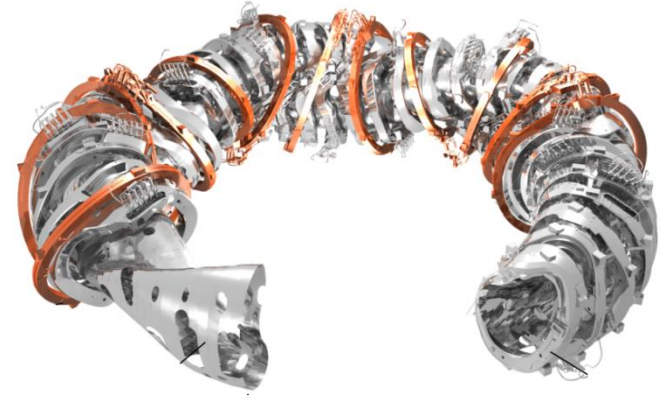
Manyetik moment korunur.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Plazmanın Hapsedilmesi: Tokamak



toroid-hazne-mıknatıs-bobin



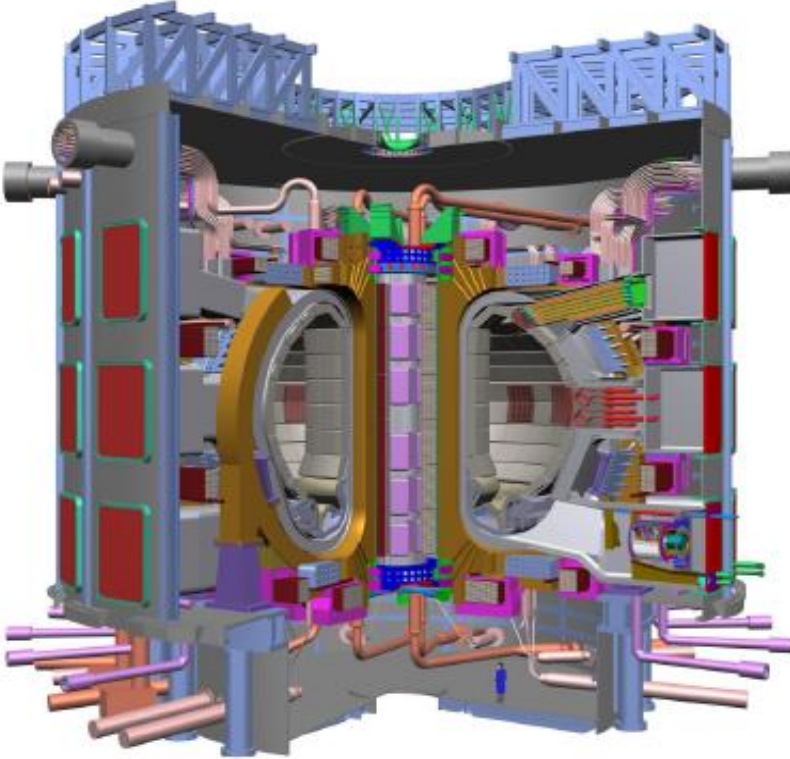
Tokamak



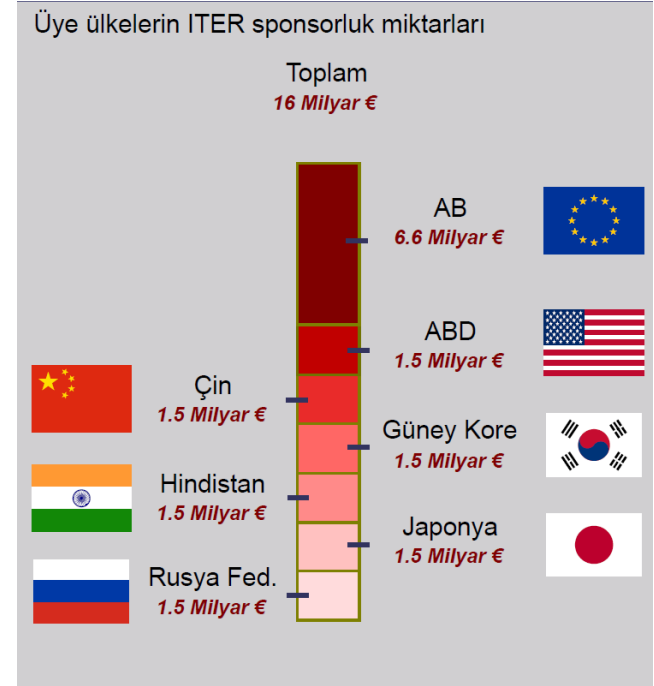
Stellarator

wendelstein 7-x (2015)

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

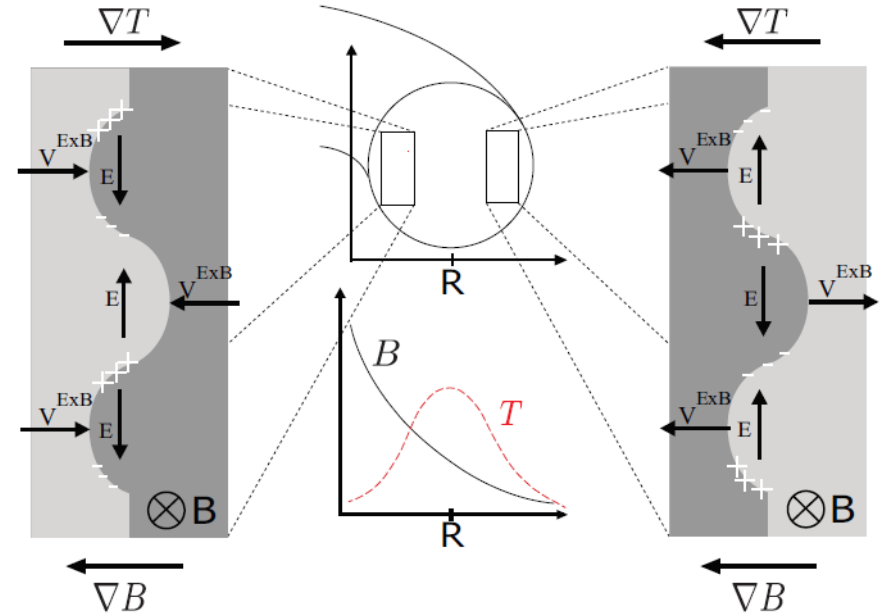
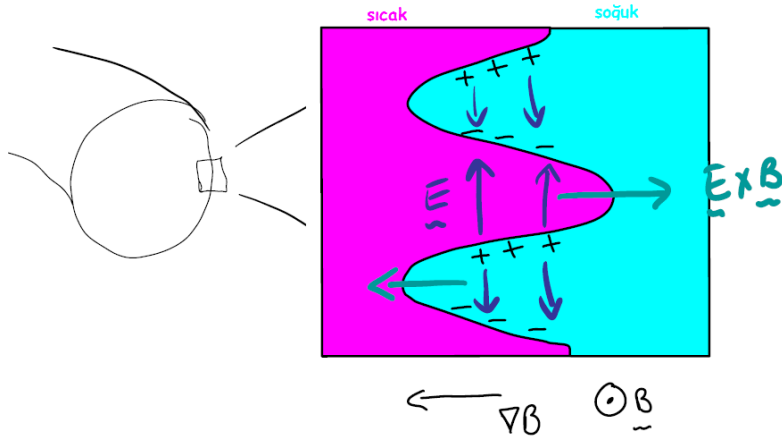


$Q= 10$, Hacmi 830 m^3



ITG kararsızlıklar Rayleigh–Bénard konveksiyonunun 2 boyutlu özelliklerini paylaşır. (Horton ve diğ., 1981; Hu ve Horton, 1997)

ITG (İyon Sıcaklık Gradyenti) Türbülans



Giriş ve Motivasyon	İTG Türlülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Klimontovich Sistemi

$$F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) = \sum_{k=1}^{N_s} \delta[\mathbf{x} - \mathbf{x}_k(t)] \delta[\mathbf{v} - \mathbf{v}_k(t)]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) = \sum_{k=1}^{N_s} \left(\frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{x}_k} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_k}{\partial t} + \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{v}_k} \cdot \frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) &= \sum_{k=1}^{N_s} \left[\frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{x}_k} \cdot \mathbf{v}_k + \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{v}_k} \cdot \frac{q_s}{m_s} [\mathbf{E}(\mathbf{x}_k, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{x}_k, t)] \right] \\ &= \sum_{k=1}^{N_s} \left[\frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{x}_k} \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{v}_k} \cdot \frac{q_s}{m_s} [\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)] \right] \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^{N_s} \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{v}_k} = - \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{v}}$$

$$\sum_{k=1}^{N_s} \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{x}_k} = - \frac{\partial F_s}{\partial \mathbf{x}}$$

Klimontovich Denklemi

$$\frac{\partial F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)}{\partial \mathbf{x}} + \frac{q_s}{m_s} [\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)] \cdot \frac{\partial F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\epsilon_0} \hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \times \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mu_0 \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, t)$$

$$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, t) = \sum_s q_s \int \mathbf{v} F_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3v$$

$$\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t) = \sum_s q_s \int F_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3v$$

$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, t)$ Akım Yoğunluğu

$\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)$ Yük Yoğunluğu

Bunlar yörüngeleri boyunca hareket eden taneciklerin yarattığı büyüklükler.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Vlasov Denklemi

$$f_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) = \langle F_s(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) \rangle$$

Vlasov Denklemi

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\epsilon_0} \hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \times \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mu_0 \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, t)$$

$$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, t) = \sum_s q_s \int \mathbf{v} F_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3v$$

$$\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t) = \sum_s q_s \int F_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d^3v$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Gyrokinetik Denklem

Güçlü bir manyetik alanın varlığında ivme içindeki baskın terim Lorentz kuvvetinden gelir.

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Bu dönme hareketi manyetik füzyon çalışmaları açısından önemsizdir. Bu nedenle dönme hareketini boşlayacak bir dönüşüm yapılır.

$$\rho_L = -\frac{\mathbf{v}_\perp \times \hat{\mathbf{b}}}{\Omega_L} \quad \mathbf{R} = \mathbf{r} - \rho_L = \mathbf{r} + \frac{\mathbf{v}_\perp \times \hat{\mathbf{b}}}{\Omega_L}$$

$$\{\mathbf{r}, \mathbf{v}\} \rightarrow \{\mathbf{R}, E, \mu, \phi\} \quad E = \frac{v^2}{2} \quad \mu = \frac{v_\perp^2}{2B}$$

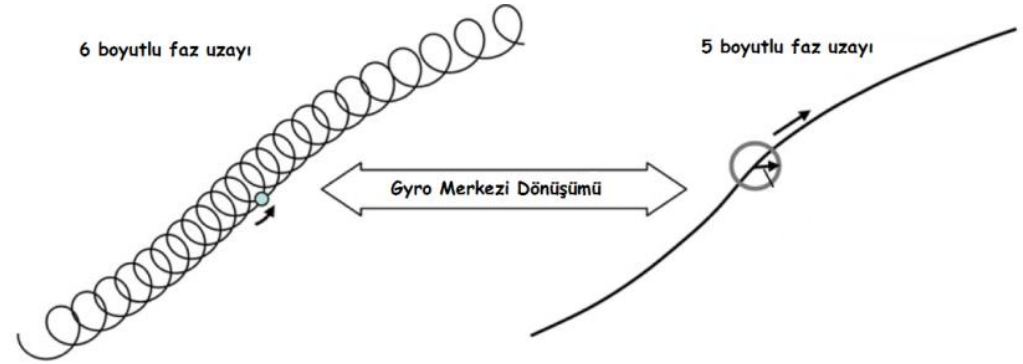
$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} + \frac{\partial v_\parallel}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial v_\parallel} + \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mu} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{v}} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} + \hat{\mathbf{b}} \frac{\partial}{\partial v_\parallel} + \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{v}} \cdot \frac{\partial}{\partial \mu} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{v}} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \left\{ \left[\mathbf{I} - \nabla \left(\frac{\hat{\mathbf{b}}}{c} \right) \times \mathbf{v} \right] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{R}} + (\nabla \hat{\mathbf{b}}) \cdot \mathbf{v}_\perp \frac{\partial f}{\partial v_\parallel} + \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial f}{\partial \mu} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial f}{\partial \phi} \right\} \\ + \frac{e}{m c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot \left\{ \frac{\mathbf{I} \times \hat{\mathbf{b}}}{\Omega_L} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{R}} + \hat{\mathbf{b}} \frac{\partial f}{\partial v_\parallel} + \frac{\mathbf{v}_\perp}{B} \frac{\partial f}{\partial \mu} + \frac{\hat{\phi}}{v_\perp} \frac{\partial f}{\partial \phi} \right\} = 0 \end{aligned}$$

$$\mathbf{K} = \frac{e}{m c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{K} + \delta \mathbf{K} \quad f = F_0 + \delta f$$

$$\delta f = \delta g - \frac{e \delta \Phi}{T} F_0 \quad F_0 = \frac{n(\mathbf{R}_\perp) e^{-\frac{m}{2T(\mathbf{R}_\perp)}(v_\parallel^2 + 2\mu B)}}{(2\pi T(\mathbf{R}_\perp)/m)^{3/2}}$$



Alanlar faz ortalamalarıyla yer değiştirir:

$$\langle \delta \phi(R) \rangle = \sum_k J_0 \left(\frac{v_\perp k_\perp}{\Omega_L} \right) \delta \phi_k e^{ik \cdot R}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Lineer Gyrokinetik Denklem ve Dağınım Bağıntısı

ITG mod için

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta g + \left[v_{\parallel} \frac{\mathbf{B}^*}{B} + \frac{\mu}{eB} \hat{\mathbf{b}} \times \nabla B \right] \cdot \nabla \delta g = \frac{e}{T_i} F_0 \frac{\partial}{\partial t} \langle \delta \phi \rangle - F_0 \frac{\hat{\mathbf{b}}}{B} \times \nabla \langle \delta \phi \rangle \cdot \left[\frac{1}{n} \nabla n + \left(\frac{E}{T} - \frac{3}{2} \right) \frac{1}{T} \nabla T \right]$$

Fourier-Laplace dönüşümü yaparak $\delta g_k(\omega)$ çözülür.

$\delta n_e = \delta n_i$ **Yük nötrlüğü varsayımı**

$\frac{\delta n_e}{n_0} = \frac{e\phi}{T_e}$ **Adyabatik elektron**

$$\delta n_i = \frac{-e\phi n_0}{T_i} + \int \delta g_k J_0 v_{\perp} dv_{\perp} dv_{\parallel}$$

Toroidal ITG mod için dağınım bağıntısı

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{1}{\tau} - \int \frac{\omega - \omega_{*k}^{T_i}(\mathbf{v})}{\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - \omega_D(\mathbf{v})} \frac{e^{-\frac{(v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2)}{2v_{Ti}^2}}}{\sqrt{2\pi} v_{Ti}^3} J_0^2 \left(\frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\Omega_i} \right) v_{\perp} dv_{\perp} dv_{\parallel} = 0$$

$$\frac{T_i}{T_e} = \frac{1}{\tau} \quad v_{Ti} = \left(\frac{2T_i}{m_i} \right)^{1/2} \quad \omega_D = \frac{\hat{\omega}_D}{v_{Ti}^2} \left(\frac{v_{\perp}^2}{2} + v_{\parallel}^2 \right) \quad \omega_{*k}^{T_i} = \omega_{*i} \left[1 + \left(\frac{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}{2v_{Ti}^2} - \frac{3}{2} \right) \eta_i \right] \quad \eta_i = d(\ln T_i)/d(\ln n_0)$$

$$x_{\parallel} = \frac{v_{\parallel}}{\sqrt{2}v_{ti}} \quad x_{\perp} = \frac{v_{\perp}}{\sqrt{2}v_{ti}}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	Inm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

I_{nm} İntegralleri

$$\varepsilon\left(k,\omega\right)=1+\frac{1}{\tau}+\frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{1}{\omega_{\text{Di}}}\int\frac{\omega-\omega_{*i}\left[1+\left(x_{\perp}^2+x_{\parallel}^2-\frac{3}{2}\right)\eta_i\right]}{\left(x_{\parallel}^2+\frac{x_{\perp}^2}{2}-\frac{\omega}{\omega_{\text{Di}}}+\frac{\sqrt{2}k_{\parallel}v_{ti}}{\omega_{\text{Di}}}x_{\parallel}\right)}e^{-x^2}J_0^2\left(\sqrt{2b}x_{\perp}\right)x_{\perp}dx_{\perp}dx_{\parallel}$$

$$I_{nm}\left(\zeta_{\alpha},\zeta_{\beta},b\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\infty}dx_{\perp}\int_{-\infty}^{\infty}dx_{\parallel}\frac{x_{\perp}^nx_{\parallel}^mJ_0^2\left(\sqrt{2b}x_{\perp}\right)e^{-x^2}}{\left(x_{\parallel}^2+\frac{x_{\perp}^2}{2}+\zeta_{\alpha}-\zeta_{\beta}x_{\parallel}\right)}$$

$$I_{nm}\left(\zeta_{\alpha},\zeta_{\beta},b\right)=2\int_0^{\infty}dx_{\perp}\left[x_{\perp}^ng_m\left(x_{\perp}\right)J_0\left(\sqrt{2b}x_{\perp}\right)^2e^{-x_{\perp}^2}\right]$$

$$g_m\left(x_{\perp}\right)=G_m\left(z_1\left(x_{\perp}\right),z_2\left(x_{\perp}\right)\right)$$

$$G_m\left(z_1,z_2,...,z_n\right)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x_{\parallel}^me^{-x_{\parallel}^2}}{\Pi_{i=1}^n\left(x_{\parallel}-z_i\right)}dx_{\parallel}$$

$$z_{1,2}\left(x_{\perp}\right)=\frac{1}{2}\left(\zeta_{\beta}\pm\sqrt{\zeta_{\beta}^2-2\left(x_{\perp}^2+2\zeta_{\alpha}\right)}\right)$$

$$\delta I_{nm}(\zeta_a,\zeta_b,b)=-i\sqrt{\pi}2^{\frac{n+3}{2}}w^{\frac{n}{2}}\int\limits_{-1}^1d\mu\left[\left(1-\mu^2\right)^{\frac{n-1}{2}}\left(\mu\sqrt{w}+\frac{\zeta_b}{2}\right)^mJ_0^2\left(2\sqrt{bw\left(1-\mu^2\right)}\right)e^{-2\left(1-\mu^2\right)w-\left(\mu\sqrt{w}-\frac{\zeta_b}{2}\right)^2}\right]$$

$$\Delta I_{nm}\left(\zeta_b,\zeta_c,b\right)=\left\{\begin{array}{cc}0&\text{Im}\left[\zeta_c\right]>0\\ \delta I_{nm}\times\frac{1}{2}&\text{Im}\left[\zeta_c\right]=0\\ 1&\text{Im}\left[\zeta_c\right]<0\end{array}\right\}$$

$$\varepsilon\left(\omega,\mathbf{k}\right)=1+\frac{1}{\tau}+\frac{1}{\omega_{\text{Di}}}\left(I_{10}\left[\omega+\left(1-\frac{3}{2}\eta_i\right)\right]+\left(I_{30}+I_{12}\right)\eta_i\right)=0$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Sayısal Yaklaşım

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{1}{\tau} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\omega_{Di}} \int \frac{\omega - \omega_{*i} \left[1 + \left(x_{\perp}^2 + x_{\parallel}^2 - \frac{3}{2} \right) \eta_i \right]}{\left(x_{\parallel}^2 + \frac{x_{\perp}^2}{2} - \frac{\omega}{\omega_{Di}} + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti}}{\omega_{Di}} x_{\parallel} \right)} e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}$$

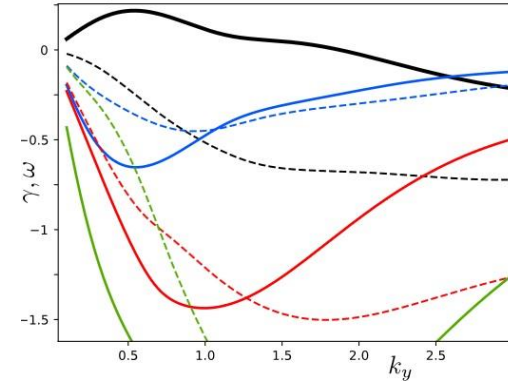
$$\frac{\partial}{\partial \omega} \varepsilon(\omega, \mathbf{k}) \equiv \frac{1}{\omega_{Di}} I_{10} + \frac{1}{\omega_{Di}^2} \left(J_{10} \left[\omega + \left(1 - \frac{3}{2} \eta_i \right) \right] + (I_{30} + I_{12}) \eta_i \right)$$

$$J_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, b) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx_{\perp} \int_{-\infty}^{\infty} dx_{\parallel} \frac{x_{\perp}^n x_{\parallel}^m J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) e^{-x^2}}{\left(x_{\parallel}^2 + \frac{x_{\perp}^2}{2} + \zeta_a - \zeta_b x_{\parallel} \right)^2}$$

$$\frac{\partial I_{nm}}{\partial \omega} = -\frac{1}{\omega_{Di}} J_{nm}$$

$$\frac{\partial I_{nm}}{\partial \zeta_a} = -J_{nm}$$

$$\oint_C \frac{\partial}{\partial \omega} \frac{\varepsilon(\omega, \mathbf{k})}{\varepsilon(\omega, \mathbf{k})} d\omega = 2\pi i (N - P)$$



$$G_m(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_{\parallel}^m e^{-x_{\parallel}^2}}{\prod_{i=1}^n (x_{\parallel} - z_i)} dx_{\parallel}$$

$$J_{nm}(\zeta_{\alpha}, \zeta_{\beta}, b) = 2 \int_0^{\infty} dx_{\perp} \left[x_{\perp}^n G_m(z_1, z_2, z_3, z_4) J_0(\sqrt{2b} x_{\perp})^2 e^{-x_{\perp}^2} \right]$$

$$J_{nm}(\zeta_{\alpha}, \zeta_{\beta}, b) = 2 \int_0^{\infty} dx_{\perp} \left[x_{\perp}^n G_m(z_1, z_2, z_1, z_2) J_0(\sqrt{2b} x_{\perp})^2 e^{-x_{\perp}^2} \right]$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knın için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knın İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knın İntegralleri	Sonuçlar

Dört Değişken için Plazma Dağılım Fonksiyonu

$$G_m(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{\prod_{i=1}^n (x - z_i)} dx$$

$$z_{1,2} = z_{1,2}(x, \zeta_\alpha, \zeta_\beta) = \frac{1}{2} \left(\zeta_\beta \pm \sqrt{\zeta_\beta^2 - 4\zeta_\alpha - 2x^2} \right)$$

$$\frac{d}{d\zeta_\alpha} = \frac{dz_1}{d\zeta_\alpha} \frac{d}{dz_1} + \frac{dz_2}{d\zeta_\alpha} \frac{d}{dz_2}$$

$$\frac{dz_{1,2}}{d\zeta_\alpha} = \mp \frac{1}{\sqrt{\zeta_\beta^2 - 4\zeta_\alpha - 2x^2}} = \frac{\mp 1}{z_1 - z_2}$$

$$\frac{d}{d\zeta_\alpha} = \frac{1}{(z_1 - z_2)} \left(\frac{d}{dz_2} - \frac{d}{dz_1} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\zeta_\alpha} G_m(z_1, z_2) &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(z_1 - z_2)} \left[\frac{d}{dz_2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{(x - z_1)(x - z_2)} dx - \frac{d}{dz_1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{(x - z_1)(x - z_2)} dx \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(z_1 - z_2)} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{(x - z_1)(x - z_2)^2} dx - \frac{d}{dz_1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{(x - z_1)^2 (x - z_2)} dx \right] \\ &= -\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^m e^{-x^2}}{(x - z_1)^2 (x - z_2)^2} dx \end{aligned}$$

$$G(z_1, z_2, z_1, z_2) = -\frac{d}{d\zeta_a} G_m(z_1, z_2)$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Dört Değişken İçin Plazma Dağılım Fonksiyonu

$$G_m(z_1, z_2) = \frac{Z_m(z_1) - Z_m(z_2)}{z_1 - z_2} \quad Z_m(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=1}^m z^{k-1} \Gamma\left(\frac{m-k+1}{2}\right) + z^m Z_0(z)$$

Fried ve Conte (1972)

$$G_m(z_1, z_2) = \frac{\frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=2}^m \left(z_1^{k-1} \Gamma\left(\frac{m-k+1}{2}\right) - z_2^{k-1} \Gamma\left(\frac{m-k+1}{2}\right) \right) + z_1^m Z_0(z_1) - z_2^m Z_0(z_2)}{(z_1 - z_2)}$$

$$G(z_1, z_2, z_1, z_2) = -\frac{d}{d\zeta_a} G_m(z_1, z_2)$$

$$\frac{d}{d\zeta_a} G_m(z_1, z_2) = \frac{1}{(z_1 - z_2)^2} \left\{ \begin{aligned} & Z_0(z_1) \left[-mz_1^{m-1} + 2z_1^{m+1} + \frac{2z_1^m}{(z_1 - z_2)} \right] + Z_0(z_2) \left[-mz_2^{m-1} + 2z_2^{m+1} - \frac{2z_2^m}{(z_1 - z_2)} \right] 2(z_1^m + z_2^m) \\ & + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=2}^m \left[\frac{2(z_1^{k-1} - z_2^{k-1})}{(z_1 - z_2)} - (k-1)(z_1^{k-2} - z_2^{k-2}) \right] \Gamma\left(\frac{m-k+1}{2}\right) \end{aligned} \right\}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Dört Değişken İçin Plazma Dağılım Fonksiyonu

$$G(z_1, z_2, z_1, z_2) = \frac{1}{(z_1 - z_2)^2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=2}^m \left[\frac{(k-1)(z_1^{k-2} - z_2^{k-2})}{(z_1 - z_2)} \right] \Gamma\left(\frac{m-k+1}{2}\right) - 2(z_1^m - z_2^m) + Z_0(z_1) z_1^{m-1} \left(m - 2z_1^2 - \frac{2z_1}{(z_1 - z_2)} \right) \right. \\ \left. + Z_0(z_2) z_2^{m-1} \left(m - 2z_2^2 + \frac{2z_2}{(z_1 - z_2)} \right) \right\}$$

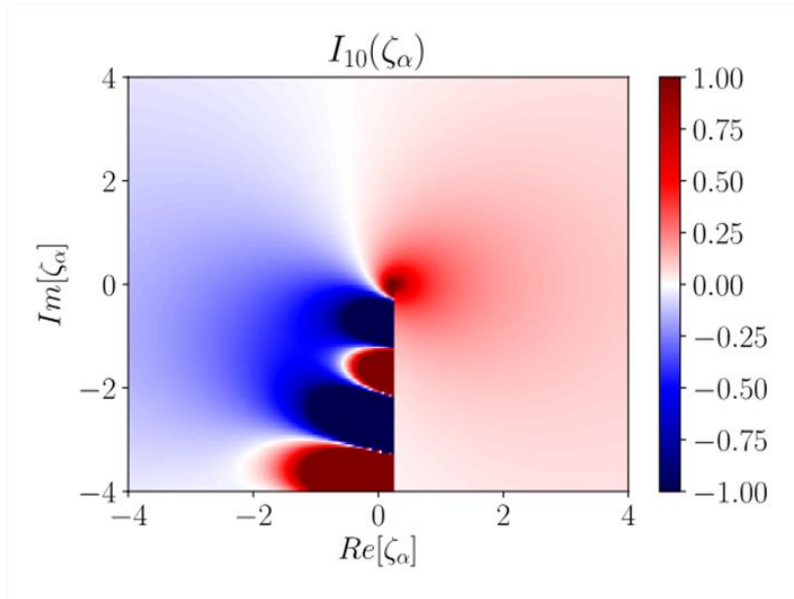
Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

J_{nm} için Analitik Süreklilik

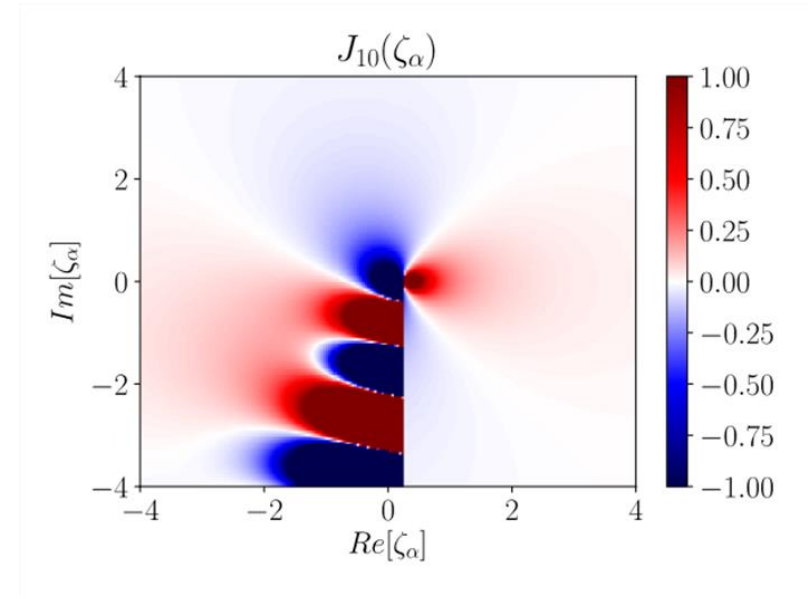
$$\Delta J_{nm} = -\frac{d}{d\zeta_a} \Delta I_{nm} = \frac{d}{dw} \Delta I_{nm}$$

$$\Delta J_{nm} = -i\sqrt{\pi}2^{\frac{n+3}{2}}\int_{-1}^1\left\{\begin{aligned}&\left(\frac{n}{2w}+\frac{\mu m}{2\mu w+\sqrt{w}\zeta_b}-2+\mu^2-\frac{\zeta_b}{2}\frac{\mu}{\sqrt{w}}\right)J_0^2\left(2\sqrt{bw(1-\mu^2)}\right)\\&-2\sqrt{\frac{b(1-\mu^2)}{w}}J_0\left(2\sqrt{bw(1-\mu^2)}\right)J_1\left(2\sqrt{bw(1-\mu^2)}\right)\end{aligned}\right\}w^{n/2}\left(1-\mu^2\right)^{\frac{n-1}{2}}\left(\mu\sqrt{w}+\frac{\zeta_b}{2}\right)^me^{-2(1-\mu^2)w-\left(\mu\sqrt{w}+\frac{\zeta_b}{2}\right)^2}d\mu\times\begin{cases}0&\text{Im}[\zeta_a]>0\\ \frac{1}{2}&\text{Im}[\zeta_a]=0\\ 1&\text{Im}[\zeta_a]<0\end{cases}$$

J_{nm} Fonksiyonlarının Grafikleri

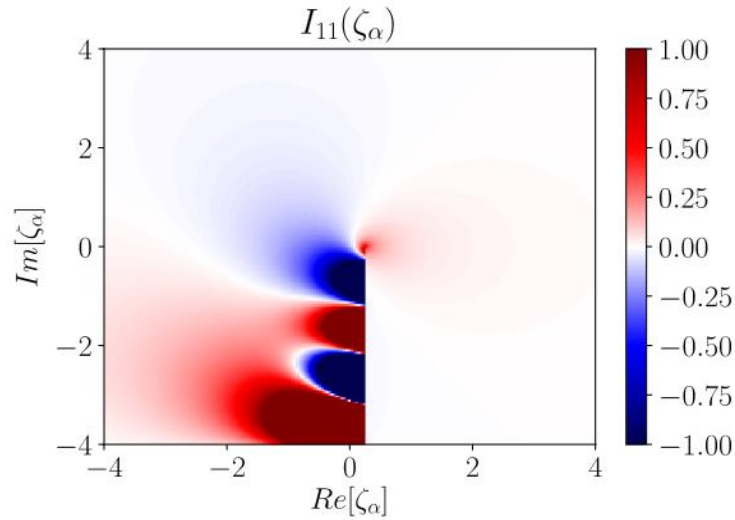


$\zeta_b = 1.0, \zeta_c = 0.0, \zeta_d = 0.0, b = 1.0$ Parametreleri için $I_{10}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$.

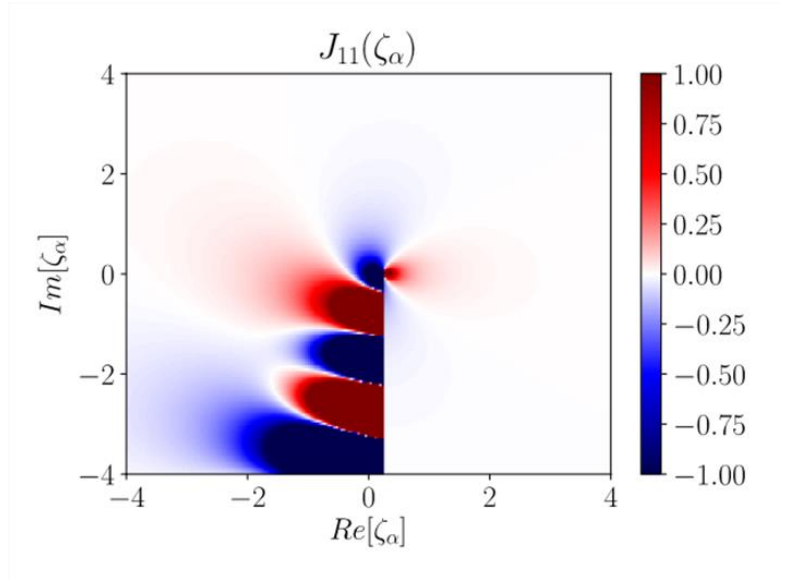


$\zeta_b = 1.0, \zeta_c = 0.0, \zeta_d = 0.0, b = 1.0$ Parametreleri için $J_{10}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$.

J_{nm} Fonksiyonlarının Grafikleri



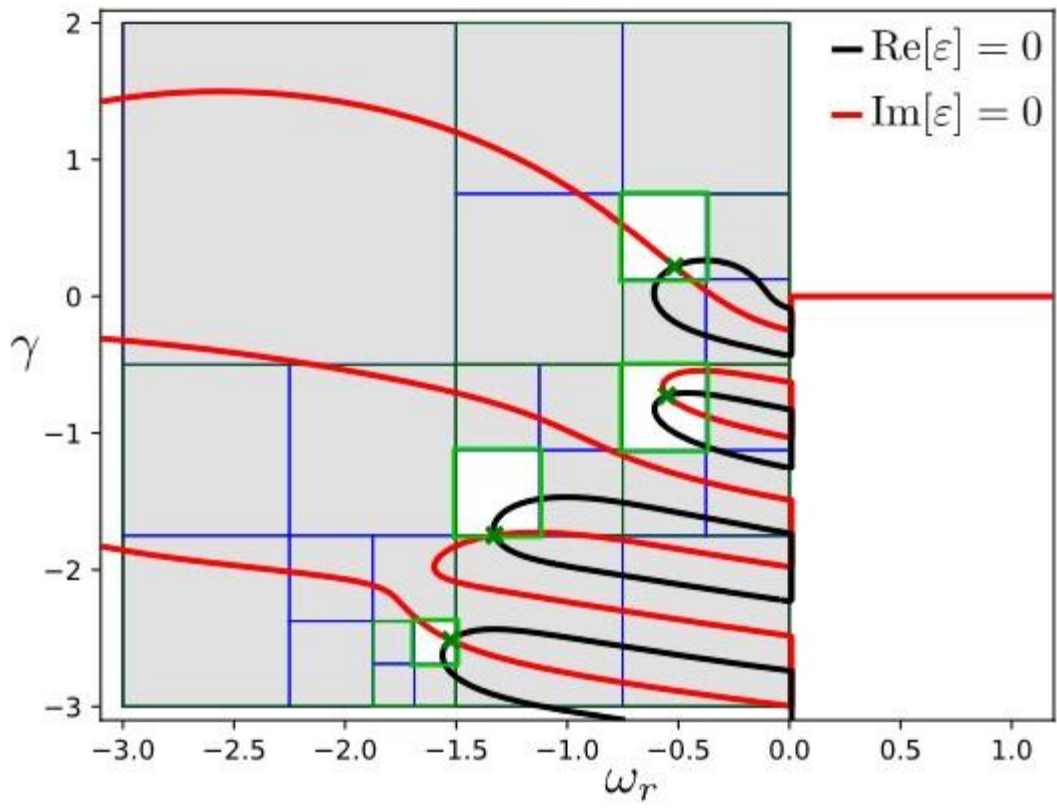
$\zeta_b = 1.0, \zeta_c = 0.0, \zeta_d = 0.0$ $b = 1.0$ Parametreleri İçin $I_{11}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$.



$\zeta_b = 1.0, \zeta_c = 0.0, \zeta_d = 0.0$ $b = 1.0$ Parametreleri İçin $J_{11}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$.

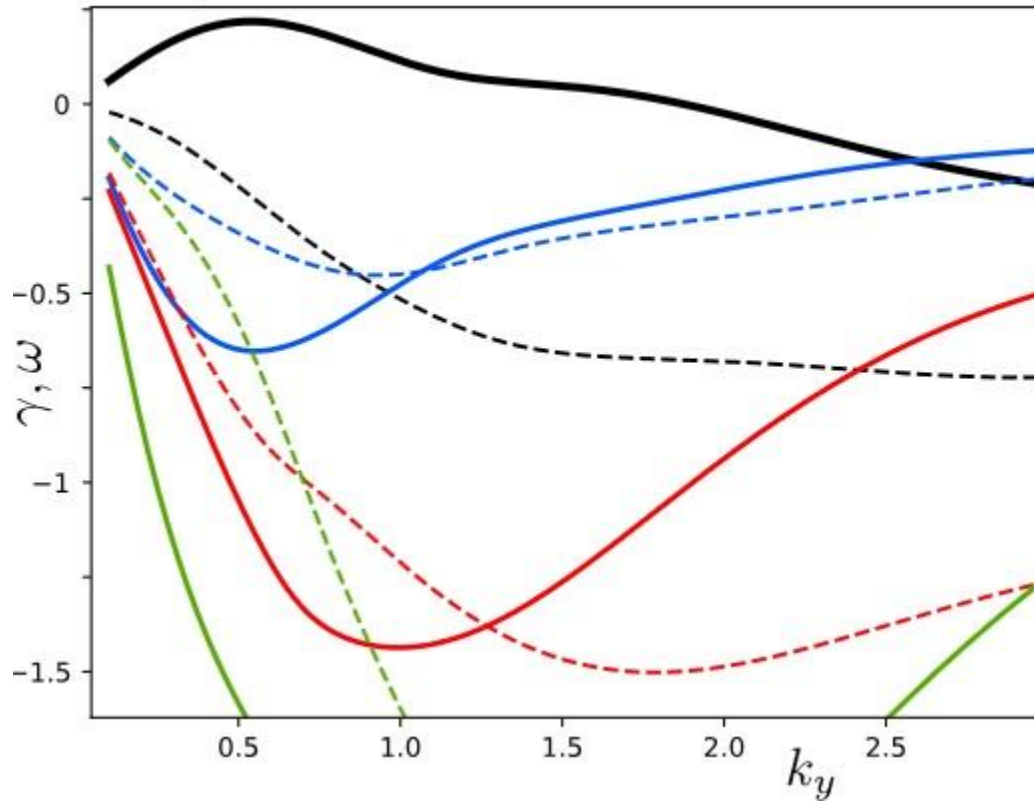
Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Kök Bulma Algoritması



$$\oint_C \frac{\partial}{\partial \omega} \varepsilon(\omega, \mathbf{k}) d\omega = 2\pi i (N - P)$$

Dağılım Bağıntısının Farklı Çözümleri



Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Gyrokinetik Denklemin Renormalizasyonu

$$-i(\omega - k_{\parallel}v_{\parallel})\delta f_k(\mathbf{v}, \omega) = -i\frac{e}{T}\left[k_{\parallel}v_{\parallel} - \omega_{*k}^T(\mathbf{v})\right]J_{0k}(\mathbf{v})F_M(\mathbf{v})\delta\phi_k(\omega)$$

$$G = -\frac{1}{i(\omega - k_{\parallel}v_{\parallel})} \quad \text{Balescu (2005)}$$

Propogatörün Reel Kısmı
Dupree (1967)

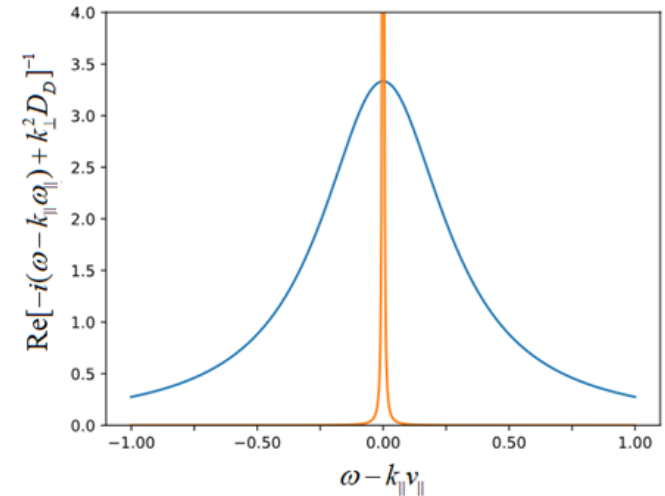
$$\frac{k_{\perp}^2 D_D}{(\omega - k_{\parallel}v_{\parallel})^2 + (k_{\perp}^2 D_D)^2}$$

Propogatör
Dupree (1967)

$$G(\mathbf{v}) = \frac{1}{-i(\omega - k_{\parallel}v_{\parallel}) + k_{\perp}^2 D_D(\mathbf{v})}$$

$$\omega \rightarrow \omega + ik_{\perp}^2 D_D$$

Türbülansın incelenmesinde kullanılan lineer kararsızlık teorisi kararsız dalgaların enerji yoğunluğunun üstel olarak sonsuza kadar büyüyeceğini verir. Bu fiziksel olarak olanaklı değil. Dupree'nin yaklaşımı bu sorunu çözüyor (**T.H. Dupree Phys. Fluids 9, 1773, yıl:1966**).



Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağıtım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Gyrokinetik Denklemin Renormalizasyonu

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{1}{\tau} - \int \frac{\left[\omega - \omega_{*k}^{T_i}(\mathbf{v}) + ik_{\perp}^2 D_D(\mathbf{v}) \right]}{\left[(\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - \omega_D(\mathbf{v})) + i D_D(\mathbf{v}) k_{\perp}^2 \right]} \frac{e^{-\frac{(v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2)}{2v_{ti}^2}}}{\sqrt{2\pi} v_{ti}^3} J_0^2 \left(\frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\Omega_i} \right) v_{\perp} dv_{\perp} dv_{\parallel}$$

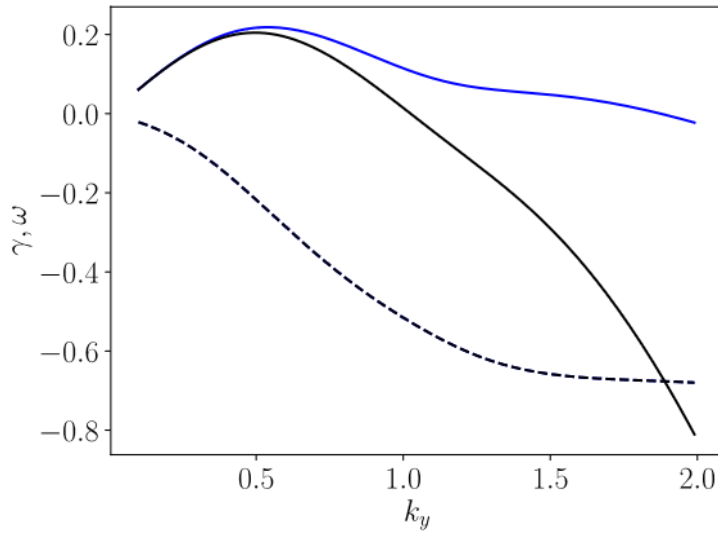
$$\omega \rightarrow \omega + ik_{\perp}^2 D_D$$

$$D_D(\mathbf{v}) = \frac{c^2}{B^2} \frac{1}{2\pi} \int dk d\omega \varepsilon_{\perp\kappa} \frac{\left[J_k(\mathbf{v}) \right]^2}{i(\omega - k_{\parallel} v_{\parallel}) + k_{\perp}^2 D_D(\mathbf{v})} \quad \text{Balescu (2005)}$$

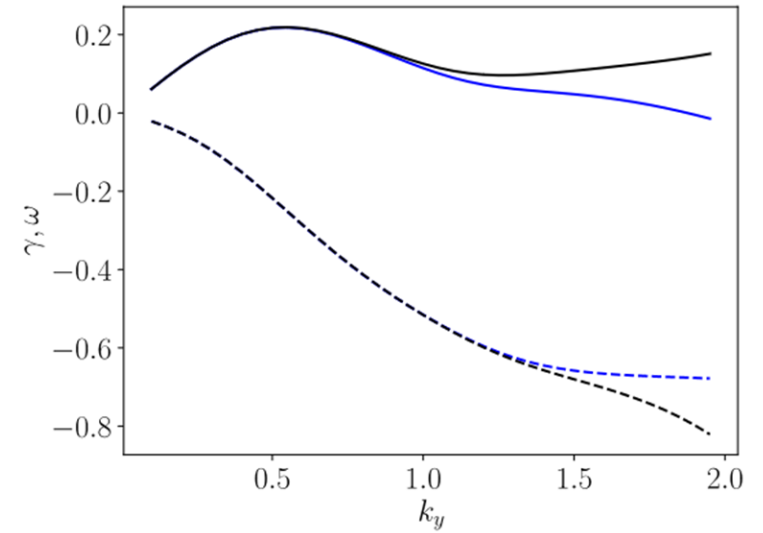
Varsayımımız: $D_D(\mathbf{v}) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$

Dupree Teriminde Katsayıların Etkisi

Renormalize Edilmiş Yerel ITG Dağılım Bağıntısının Çözümü



$$d_0 = 0.1, d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 0.0$$

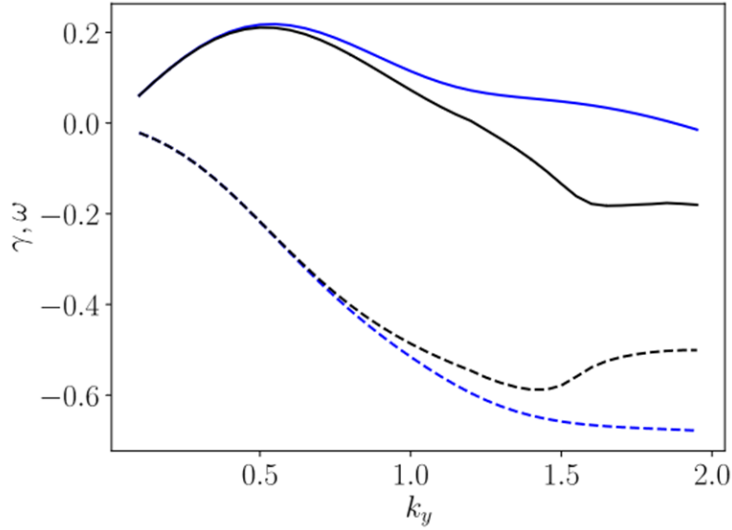


$$d_1 = 0.1, d_0 = d_2 = d_3 = d_4 = 0.0$$

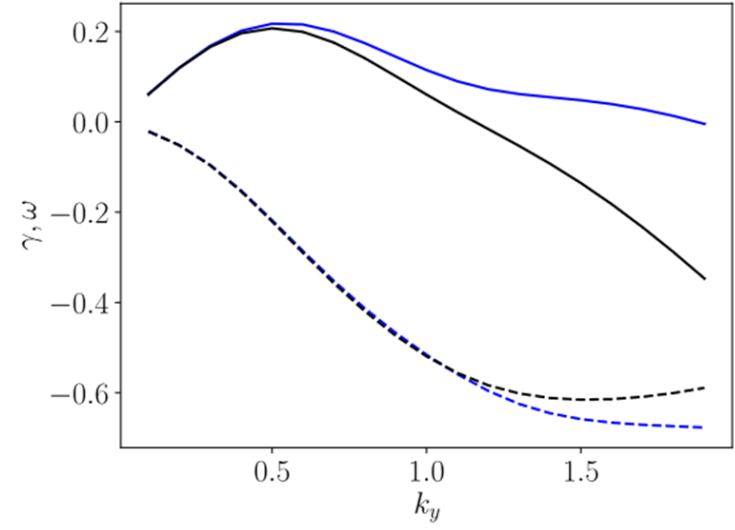
$$D_D(\mathbf{v}) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$$

Dupree Teriminde Katsayıların Etkisi

Renormalize Edilmiş Yerel ITG Dağılım Bağıntısının Çözümü



$$d_2 = 0.1, d_0 = d_1 = d_3 = d_4 = 0.0$$

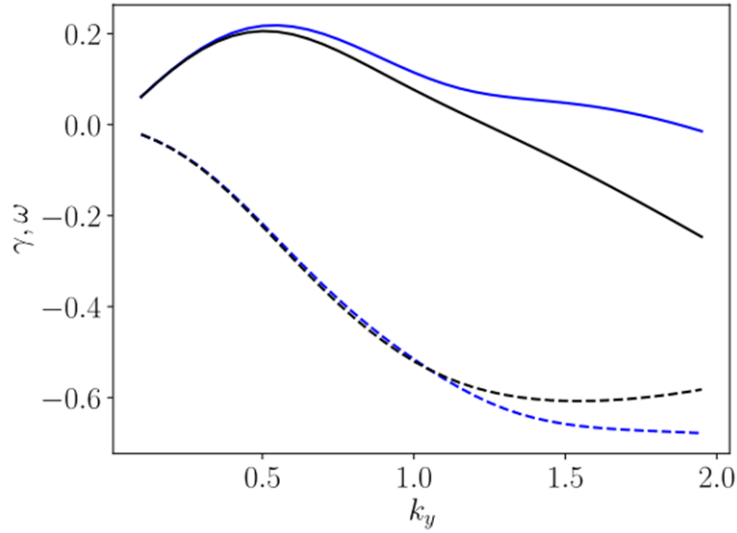


$$d_3 = 0.1, d_0 = d_1 = d_2 = d_4 = 0.0$$

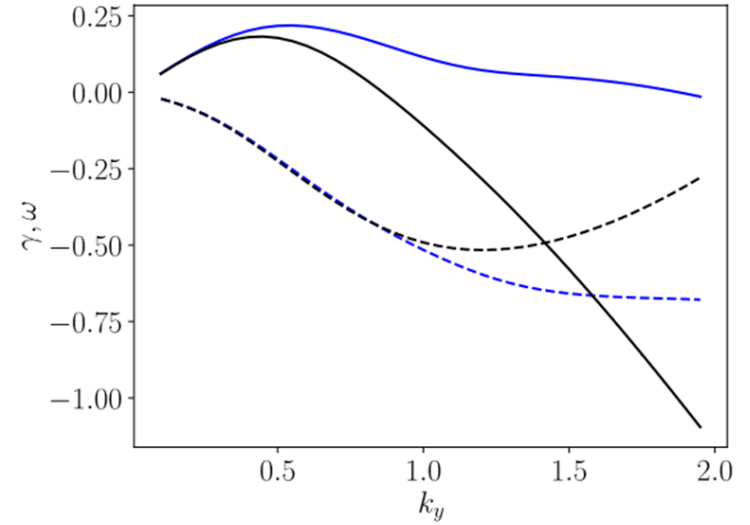
$$D_D(\mathbf{v}) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$$

Dupree Teriminde Katsayıların Etkisi

Renormalize Edilmiş Yerel ITG Dağılım Bağıntısının Çözümü



$$d_4 = 0.1, d_0 = d_1 = d_2 = d_3 = 0.0$$



$$d_0 = d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 0.1$$

$$D_D(\mathbf{v}) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Gyrokinetik Denklemin K_{nm} İntegralleri Cinsinden Yazılması

$$\varepsilon(k, \omega) = 1 + \frac{1}{\tau} - \int \frac{\left[\omega - \omega_{*k}^T(\mathbf{v}) + ik_{\perp}^2 D_D(\mathbf{v}) \right]}{\left[(\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - \omega_D(\mathbf{v})) + i D_D(\mathbf{v}) k_{\perp}^2 \right]} \frac{e^{-\frac{(v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2)}{2v_{ti}^2}}}{\sqrt{2\pi} v_{ti}^3} J_0^2\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp}}{\Omega_i}\right) v_{\perp} dv_{\perp} dv_{\parallel}$$

$$D_D(\mathbf{v}) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$$

$$K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx_{\perp} \int_{-\infty}^{\infty} dx_{\parallel} \frac{x_{\perp}^n x_{\parallel}^m J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) e^{-x^2}}{\left[x_{\parallel}^2 + \zeta_a + \zeta_b x_{\parallel} + \zeta_c x_{\perp} + \zeta_d x_{\perp}^2 \right]}$$

$$g_m(x_{\perp}) = G_m(z_1(x_{\perp}), z_2(x_{\perp})) \quad K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b) = 2 \int_0^{\infty} dx_{\perp} \left[x_{\perp}^n g_m(x_{\perp}) J_0(\sqrt{2b} x_{\perp})^2 e^{-x_{\perp}^2} \right]$$

$$G_m(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_{\parallel}^m e^{-x_{\parallel}^2}}{\prod_{i=1}^n (x_{\parallel} - z_i)} dx_{\parallel} \quad z_{1,2}(x_{\perp}) = \frac{1}{2} \left(-\zeta_b \mp \sqrt{\zeta_b^2 - 4(\zeta_c x_{\perp} + \zeta_d x_{\perp}^2 + \zeta_a)} \right)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(k, \omega) = & 1 + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\omega_{Di} - i d_2 2 v_{ti}^2 k_{\perp}^2} \left[\left(\omega - \omega_{*i} + \frac{3}{2} \omega_{*i} \eta_i + i k_{\perp}^2 d_0 \right) K_{10} \right. \\ & + \left(i k_{\perp}^2 d_3 \sqrt{2} v_{ti} \right) K_{20} + \left(i k_{\perp}^2 d_4 2 v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) K_{30} + \left(i k_{\perp}^2 d_2 2 v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) K_{12} \\ & \left. + \left(i k_{\perp}^2 d_1 \sqrt{2} v_{ti} \right) K_{11} \right] \end{aligned}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Peki Bu Nasıl Oldu?

$$\begin{aligned}
\varepsilon(k, \omega) = & 1 + \frac{1}{\tau} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Upsilon}{\omega_{Di}} \int \frac{\left[\omega - \omega_{*i} + \frac{3}{2} \omega_{*i} \eta_i + ik_{\perp}^2 d_0 \right] e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}}{x_{\parallel}^2 + \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp}^2 + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\parallel} - \frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp} - \frac{\omega + id_0 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}} \\
& + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Upsilon}{\omega_{Di}} \int \frac{\left(ik_{\perp}^2 d_3 \sqrt{2} v_{ti} \right) x_{\perp} e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}}{x_{\parallel}^2 + \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp}^2 + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\parallel} - \frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp} - \frac{\omega + id_0 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}} \\
& + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Upsilon}{\omega_{Di}} \int \frac{\left(ik_{\perp}^2 d_4 2v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) x_{\perp}^2 e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}}{x_{\parallel}^2 + \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp}^2 + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\parallel} - \frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp} - \frac{\omega + id_0 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}} \\
& + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Upsilon}{\omega_{Di}} \int \frac{\left(ik_{\perp}^2 d_2 2v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) x_{\parallel}^2 e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}}{x_{\parallel}^2 + \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp}^2 + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\parallel} - \frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp} - \frac{\omega + id_0 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}} \\
& + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Upsilon}{\omega_{Di}} \int \frac{\left(ik_{\perp}^2 d_1 \sqrt{2} v_{ti} \right) x_{\parallel} e^{-x^2} J_0^2(\sqrt{2b} x_{\perp}) x_{\perp} dx_{\perp} dx_{\parallel}}{x_{\parallel}^2 + \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp}^2 + \frac{\sqrt{2} k_{\parallel} v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\parallel} - \frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2} x_{\perp} - \frac{\omega + id_0 k_{\perp}^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}}
\end{aligned}$$

$$\Upsilon = \frac{\omega_{Di}}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_{\perp}^2}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Gyrokinetik Denklemin K_{nm} İntegralleri Cinsinden Yazılması

$$K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty dx_\perp \int_{-\infty}^\infty dx_\parallel \frac{x_\perp^n x_\parallel^m J_0^2(\sqrt{2b}x_\perp) e^{-x_\perp^2}}{\left[x_\parallel^2 + \zeta_a + \zeta_b x_\parallel + \zeta_c x_\perp + \zeta_d x_\perp^2 \right]}$$

$$K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b) = 2 \int_0^\infty dx_\perp \left[x_\perp^n g_m(x_\perp) J_0(\sqrt{2b}x_\perp)^2 e^{-x_\perp^2} \right]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(k, \omega) = & 1 + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_\perp^2} \left[\left(\omega - \omega_{*i} + \frac{3}{2} \omega_{*i} \eta_i + ik_\perp^2 d_0 \right) K_{10} \right. \\ & + \left(ik_\perp^2 d_3 \sqrt{2} v_{ti} \right) K_{20} + \left(ik_\perp^2 d_4 2v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) K_{30} + \left(ik_\perp^2 d_2 2v_{ti}^2 - \omega_{*i} \eta_i \right) K_{12} \\ & \left. + \left(ik_\perp^2 d_1 \sqrt{2} v_{ti} \right) K_{11} \right] \end{aligned}$$

$$\zeta_a = -\frac{\omega + id_0 k_\perp^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_\perp^2}$$

$$\zeta_b = \frac{\sqrt{2} k_\parallel v_{ti} - id_1 \sqrt{2} v_{ti} k_\perp^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_\perp^2}$$

$$\zeta_c = -\frac{id_3 \sqrt{2} v_{ti} k_\perp^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_\perp^2}$$

$$\zeta_d = \frac{\frac{1}{2} \omega_{Di} - id_4 2v_{ti}^2 k_\perp^2}{\omega_{Di} - id_2 2v_{ti}^2 k_\perp^2}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Tübürlans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Analitik Sürekliliğin Sağlanması

$$K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b) = K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)_{td} + \Delta K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$$

$$\left(x_{\parallel} + \frac{\zeta_{br}}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{\zeta_{dr}} x_{\perp}\right)^2 + \zeta_{cr} x_{\perp} + i\left(\zeta_{ci} x_{\perp} + \zeta_{di} x_{\perp}^2\right) + i\zeta_{bi} \left(x_{\parallel} + \frac{\zeta_{br}}{2}\right) - \frac{\zeta_{br}^2}{4} - i \frac{\zeta_{bi} \zeta_{br}}{2} + \zeta_a = 0 \quad w = \frac{\zeta_{br}^2}{4} + i \frac{\zeta_{bi} \zeta_{br}}{2} - \zeta_a$$

$$\rho = \sqrt{\left(x_{\parallel} + \frac{\zeta_{br}}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{\zeta_{dr}} x_{\perp}\right)^2} \quad \mu = \left(x_{\parallel} + \frac{\zeta_{br}}{2}\right) / \rho \quad x_{\perp} = \frac{\sqrt{(1-\mu^2)}}{\sqrt{\zeta_{dr}}} \rho$$

$$\rho^2 \left(1 + i \frac{\zeta_{di}(1-\mu^2)}{\zeta_{dr}}\right) + \rho \left(\zeta_c \frac{\sqrt{(1-\mu^2)}}{\sqrt{\zeta_{dr}}} + i\zeta_{bi}\mu\right) - \omega = 0 \quad a = \left(1 + i \frac{\zeta_{di}(1-\mu^2)}{\zeta_{dr}}\right) \quad b = \left(\zeta_c \frac{\sqrt{(1-\mu^2)}}{\sqrt{\zeta_{dr}}} + i\zeta_{bi}\mu\right)$$

$$\frac{\partial(x_{\parallel}, x_{\perp})}{\partial(\mu, r)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_{\parallel}}{\partial \mu} & \frac{\partial x_{\parallel}}{\partial r} \\ \frac{\partial x_{\perp}}{\partial \mu} & \frac{\partial x_{\perp}}{\partial r} \end{vmatrix} = \frac{\partial x_{\parallel}}{\partial \mu} \frac{\partial x_{\perp}}{\partial r} - \frac{\partial x_{\parallel}}{\partial r} \frac{\partial x_{\perp}}{\partial \mu} = \frac{\rho}{\sqrt{\zeta_{dr}(1-\mu^2)}} \quad dx_{\perp} dx_{\parallel} = \frac{\rho}{\sqrt{\zeta_{dr}(1-\mu^2)}} d\mu d\rho \quad \rho = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a} \sqrt{4aw + b^2}$$

$$K_{nm}(\zeta_a, \zeta_b, b) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{\infty} d\rho \frac{x_{\perp}(\rho, \mu)^n x_{\parallel}(\rho, \mu)^m J_0^2(\sqrt{2b}x_{\perp}(\rho, \mu)) e^{-x_{\perp}(\rho, \mu)^2 - x_{\parallel}(\rho, \mu)^2}}{a(\rho - \rho_+)(\rho - \rho_-)} \frac{\rho}{\sqrt{\zeta_{dr}(1-\mu^2)}}$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Kn_m için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Kn _m İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	J _{nm} için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	J _{nm} Fonksiyonlarının Grafikleri	Kn _m İntegralleri	Sonuçlar

Analitik Süreklilikten Gelen Katkı

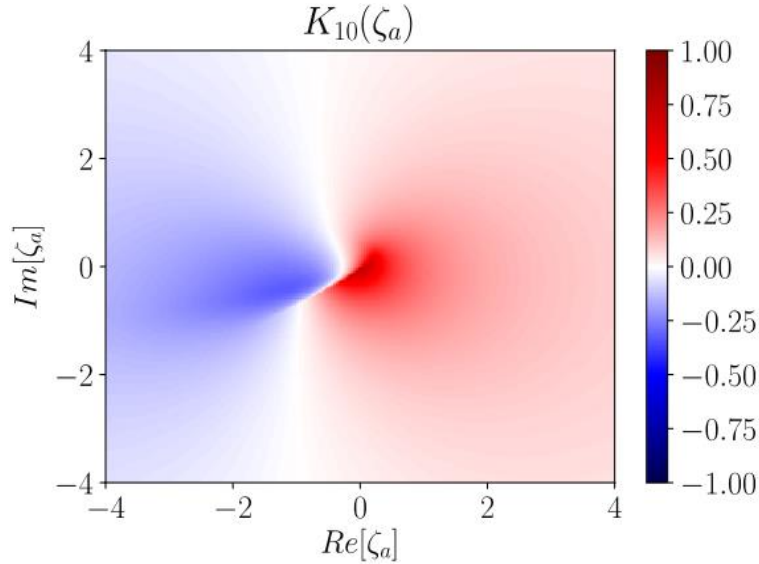
$$K_{nm}(\zeta_a,\zeta_b,b)\equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{-1}^1d\mu\int_0^\infty d\rho \frac{x_\perp(\rho,\mu)^n\,x_\parallel(\rho,\mu)^m\,J_0^2\left(\sqrt{2b}x_\perp(\rho,\mu)\right)e^{-x_\perp(\rho,\mu)^2-x_\parallel(\rho,\mu)^n}}{a(\rho-\rho_+)(\rho-\rho_-)}\frac{\rho}{\sqrt{\zeta_{dr}(1-\mu^2)}}$$

$$\delta K_{nm}=2\pi i\text{Res}\{K_{nm}\}$$

$$\text{Im}[\rho_+(\mu)]>0$$

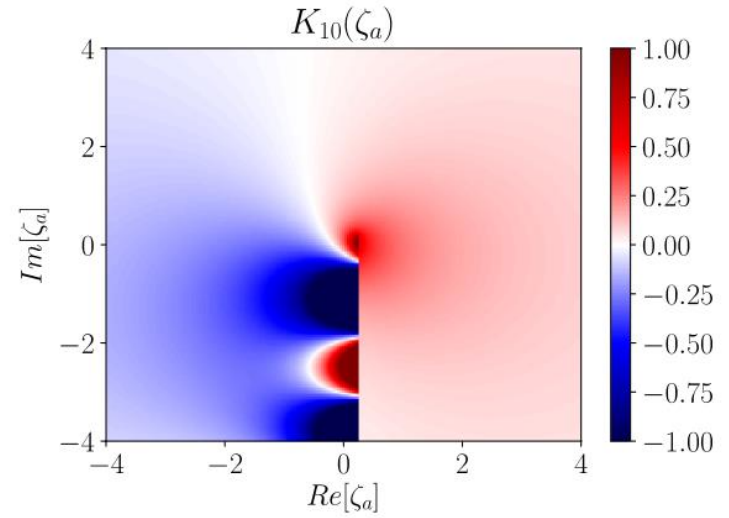
$$\delta K_{nm}(\zeta_a,\zeta_b,b)\equiv 4\sqrt{\pi}i\int_{-1}^1d\mu \frac{x_\perp(\rho,\mu)^n\,x_\parallel(\rho,\mu)^m\,J_0^2\left(\sqrt{2b}x_\perp(\rho,\mu)\right)e^{-x_\perp(\rho,\mu)^2-x_\parallel(\rho,\mu)^n}}{\sqrt{4aw+b^2}}\frac{\rho}{\sqrt{\zeta_{dr}(1-\mu^2)}}$$

K_{nm} İntegrallerinin Grafikleri ve Analitik Sürekliliğin Etkisi



$$\zeta_b = 1.0 + 0.5i \quad \zeta_c = 0.5 + 0.5i \quad \zeta_d = 0.5 + 0.2i \quad b = 1.0$$

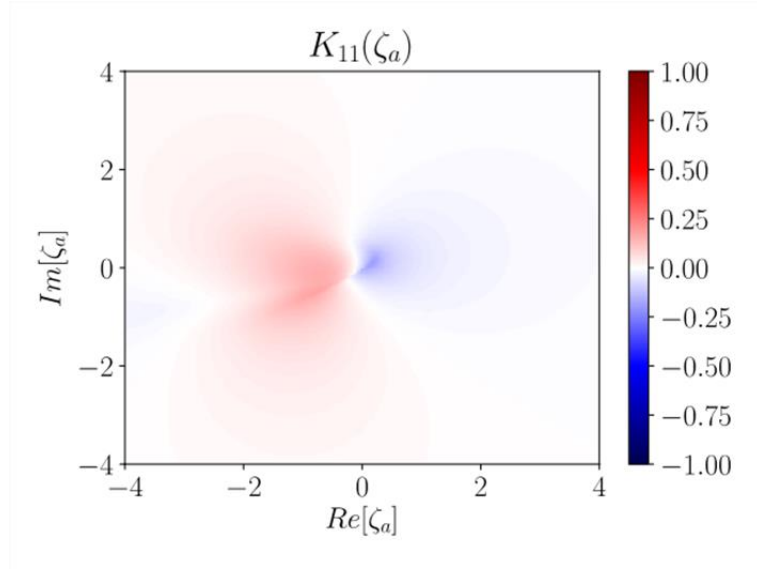
Parametreleri İçin Analitik Sürekliliğin Hesaplanmadığı Durumda $K_{10}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$



$$\zeta_b = 1.0 + 0.5i \quad \zeta_c = 0.5 + 0.5i \quad \zeta_d = 0.5 + 0.2i \quad b = 1.0$$

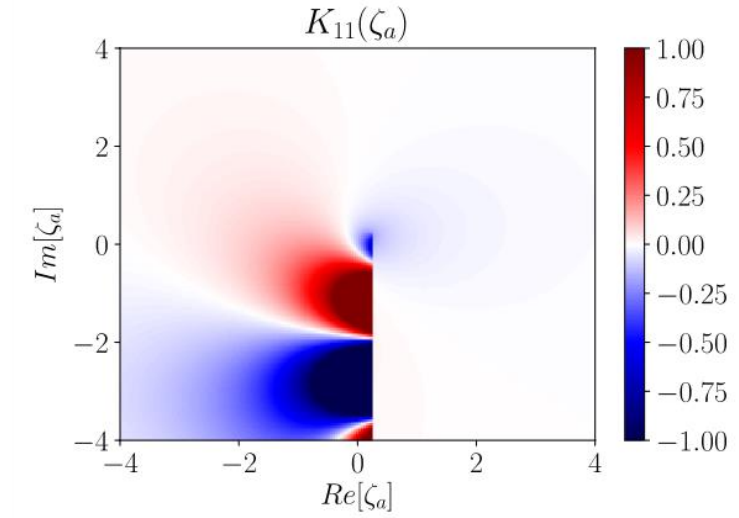
Parametreleri İçin Analitik Sürekliliğin Hesaplandığı Durumda $K_{10}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$

K_{nm} İntegrallerinin Grafikleri ve Analitik Sürekliliğin Etkisi



$$\zeta_b = 1.0 + 0.5i \quad \zeta_c = 0.5 + 0.5i \quad \zeta_d = 0.5 + 0.2i \quad b = 1.0$$

Parametreleri İçin Analitik Sürekliliğin Hesaplanmadığı Durumda $K_{11}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$



$$\zeta_b = 1.0 + 0.5i \quad \zeta_c = 0.5 + 0.5i \quad \zeta_d = 0.5 + 0.2i \quad b = 1.0$$

Parametreleri İçin Analitik Sürekliliğin Hesaplandığı Durumda $K_{11}(\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c, \zeta_d, b)$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Dupree Teriminin Biçimi

$$\varepsilon\left(\mathbf{k},\omega\right)=1+\frac{1}{\tau}-\int\frac{\left[\omega-\omega_{*k}^{\mathrm{T}_i}\left(\mathbf{v}\right)+ik_{\perp}^2D_{\mathrm{D}}\left(\mathbf{v}\right)\right]}{\left[\left(\omega-k_{\parallel}v_{\parallel}-\omega_{\mathrm{D}}\left(\mathbf{v}\right)\right)+iD_{\mathrm{D}}\left(\mathbf{v}\right)k_{\perp}^2\right]}\frac{e^{\frac{-(v_{\perp}^2+v_{\parallel}^2)}{2v_{ti}^2}}}{\sqrt{2\pi}v_{ti}^3}J_0^2\left(\frac{k_{\perp}v_{\perp}}{\Omega_i}\right)v_{\perp}dv_{\perp}dv_{\parallel}$$

$$D_D\left(v_{\perp},v_{\parallel}\right)=\sum_k\frac{k^2J_{0k}^2\left|\delta\phi_k\right|^2}{i\left(\omega_k^*-\omega_{Dk}\left(v\right)-k_{\parallel}v_{\parallel}\right)+D_D^*\left(v_{\perp},v_{\parallel}\right)k_{\perp}^2}\qquad\omega_k=\omega_{rk}\left(v\right)+i\gamma_k$$

$$D_D(\mathbf{v})=d_0+d_1v_{\parallel}+d_2v_{\parallel}^2+d_3v_{\perp}+d_4v_{\perp}^2$$

$$d_0=0.08760955+0.04306338i$$

$$d_1=0.00034246+0.02108074i$$

$$d_2=0.02101908-0.02903672i$$

$$d_3=0.08667974+0.04308331i$$

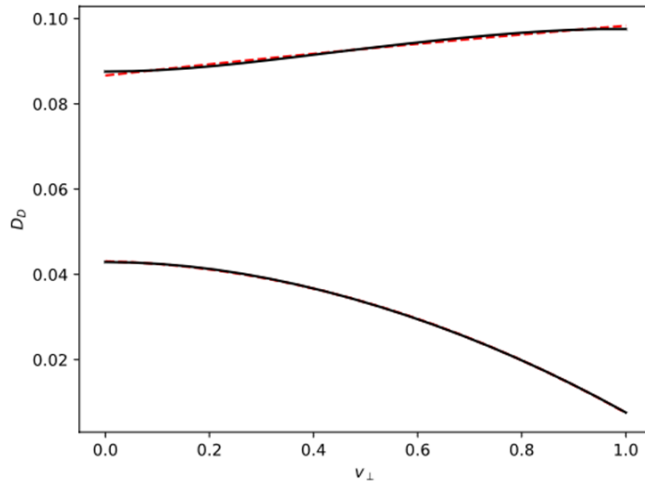
$$d_4=0.01342785-0.00293719i$$

$$d_4=-0.00176120-0.03260807i$$

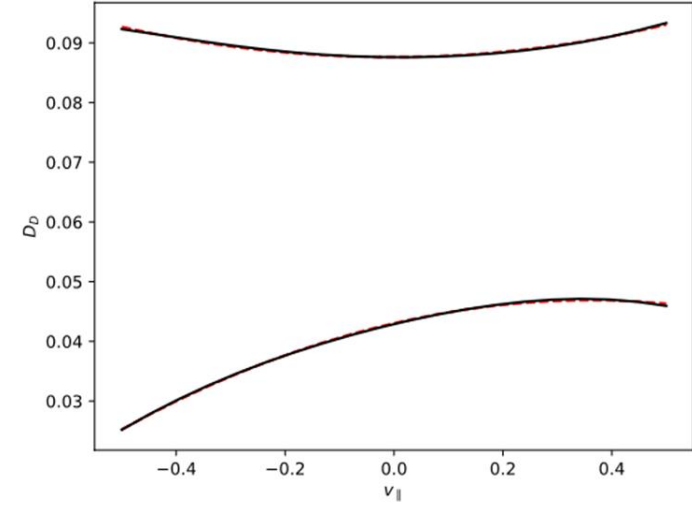
$$\varepsilon\left(\mathbf{k},\omega\right)=1+\frac{1}{\tau}+\frac{1}{\omega_{\mathrm{Di}}-id_22v_{ti}^2k_{\perp}^2}\left[\left(\omega-\omega_{*i}+\frac{3}{2}\omega_{*i}\eta_i+ik_{\perp}^2d_0\right)K_{10}+\left(ik_{\perp}^2d_3\sqrt{2}v_{ti}\right)K_{20}+\left(ik_{\perp}^2d_42v_{ti}^2-\omega_{*i}\eta_i\right)K_{30}+\left(ik_{\perp}^2d_22v_{ti}^2-\omega_{*i}\eta_i\right)K_{12}+\left(ik_{\perp}^2d_1\sqrt{2}v_{ti}\right)K_{11}\right]$$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağılım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Dupree Terimi için Eğri Uydurma

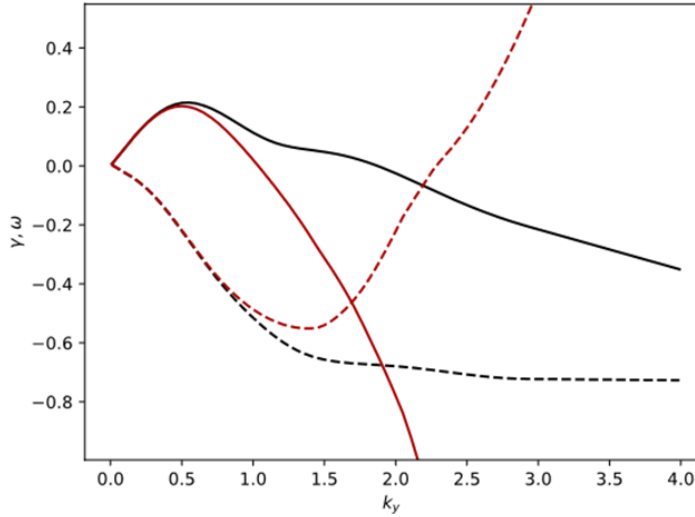


$v_{\perp}$ için Dupree Difüzyon Katsayısı Polinom Fit.

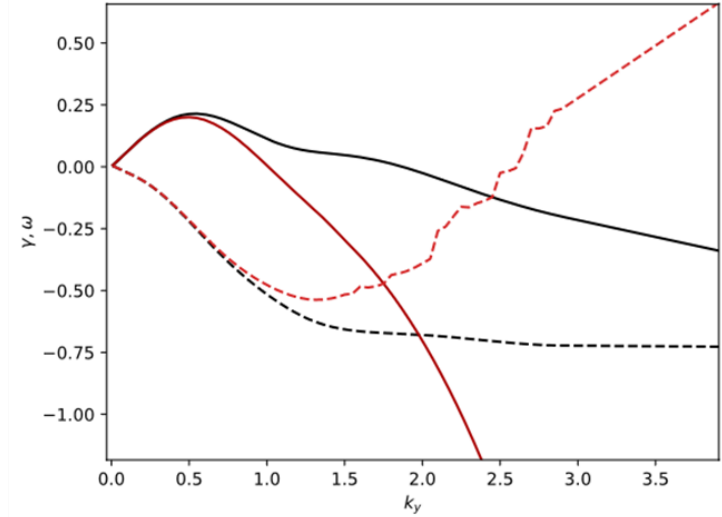


$v_{\parallel}$ için Dupree Difüzyon Katsayısı Polinom Fit.

Dupree Teriminin Etkisi



$v_{\perp}$ için Yapılan Polinom Fit Kullanılarak $k_y - \gamma$ ve $k_y - \omega$



$v_{\parallel}$ için Yapılan Polinom Fit Kullanılarak $k_y - \gamma$ ve $k_y - \omega$

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Sonuçlar

- Bir nümerik yöntem geliştirilerek dağınım bağıntısının yeni çözümleri elde edildi. Böylece dağınım bağıntısının daha önce göz önüne alınmayan bu yeni çözümlerinin fiziksel anlamı tartışıldı.
- ITG modda renormalize edilmiş Gyrokinetik denklemden elde edilen plazma dağılım fonksiyonları, bu çalışmada tanımlanan K_{nm} fonksiyonları cinsinden yazılmıştır. Bu yaklaşım, bilgisayar programlama ve sayısal analiz yöntemleri açısından oldukça hızlı bir yöntemdir. Bu yolla dağınım bağıntısının yarı lineer taşınım problemleri için kullanımı kolaylaşmış ve tercih edilebilirliği artmıştır.
- K_{nm} integrallerinin analitik sürekliliğini sağlamak, renormalizasyonun karmaşık doğası nedeniyle bilinen yöntemlerle mümkün değildir. Bu nedenle analitik sürekliliği sağlamak için özgün bir yöntem geliştirilmiştir.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Sonuçlar

- Dupree terimi, V bağımlılığı literatürde biliniyor olmasına rağmen uygulamadaki güçlükler ve sayısal analiz tekniklerinin sınırlamaları nedeniyle genellikle sabit alınmaktadır. Bu çalışmada Dupree terimi için $D_D(v) = d_0 + d_1 v_{\parallel} + d_2 v_{\parallel}^2 + d_3 v_{\perp} + d_4 v_{\perp}^2$ biçiminde kompleks katsayılı bir polinom elde edilmiştir.
- Parçacıklar tokamak geometrisinde manyetik alan çizgileri etrafında Larmor dönüşleri nedeniyle hapsediliyor olsa da zamanla önemli miktarda parçacık bu mekanizmadan kaçma eğilimi gösterir. Buna neden olan en önemli etken ITG kaynaklı kararsızlıklardır. Dupree terimi kaçan tanecikler için akı hesabında kullanılır. Bu nedenle farklı parametreler için farklı simülasyon ve sayısal analiz teknikleri kullanılması gerekir. Bu çalışmadaki Dupree terimi için önerilen polinomiye biçim analitik ve nümerik hesaplar için oldukça kullanışlıdır ve tokamak geometrisinden kaçan parçacıkların akısının hesaplanmasında kullanılabilir.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Teşekkür Ederim.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağıtım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Seçme Kaynaklar

- ❑ BALESCU, R., 2005, *Aspects of Anomalous Transport in Plasmas*, Taylor & Francis.
- ❑ BELLAN, P., M., 2008, *Fundamentals of Plasma Physics*, Cambridge University Press, ISBN-13: 978-0521528009.
- ❑ CHEN, F.F., 2006, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Springer.
- ❑ DIAMOND, P. H., ITOH, S.I., ITOH ,K., Modern Plasma Physics.
- ❑ DUPREE, T., H., 1966, A Perturbation Theory for Strong Plasma Turbulence, The Physics of Fluids, 9, 1773.
- ❑ DUPREE, T., H., 1967, *Nonlinear Theory of Drift-Wave Turbulence and Enhanced Diffusion*, The Physics of Fluids, Volume 10, Number5.
- ❑ FRIED, B. D., CONTE, S.D., 1972, *The Plasma Dispersion Function: The Hilbert Transform of Gaussian*, Academic Press, London-New York, 26, 119, 814.
- ❑ FRIEMAN, E., A., CHEN, L., 1982, *Phys. Fluids*, 25, 502.
- ❑ GÜRCAN, Ö., D., 2014, Numerical Computation of the Modified Plasma Dispersion Function with Curvature, *Journal of Computational Physics*, 269, 156-167. GUZDAR, P.N., CHEN, L., TANG, W.M., Rutherford, P.H., 1983, *Phys. Fluids*, 26, 673.
- ❑ HAHM, T.S., 1988, Nonlinear Gyrokinetic Equations for Tokamak Microturbulence, *Phys. Fluids*, 31, 2670.
- ❑ HAHM, T.S., TANG, W.M., 1990, Weak Turbulence Theory of Ion Temperature Gradient Modes for Inverted Density Plasmas, *Physics of Plasmas*, 2, 1815.

Giriş ve Motivasyon	ITG Türbülans	İnm İntegralleri	Kök Bulma Algoritması	Knm için Analitik Süreklilik
Parçacık Yörünge Kuramı	Klimontovich Sistemi	Sayısal Yaklaşım	Dağınım Bağıntısı Çözümü	Knm İntegrallerinin Grafikleri
Termonükleer Füzyon	Vlasov Denklemi	Plazma Dağılım Fonksiyonu	Renormalizasyon	Dupree Teriminin Biçimi
Plazmanın Hapsedilmesi	Gyrokinetik Denklem	Jnm için Analitik Süreklilik	Katsayıların Etkisi	Dupree Teriminin Etkisi
ITER	Lineer Gyrokinetik Denklem	Jnm Fonksiyonlarının Grafikleri	Knm İntegralleri	Sonuçlar

Seçme Kaynaklar

- HORTON, W., CHOİ, D.I., TANG, W. M., 1981, Toroidal Drift Modes Driven by Ion Pressure Gradient, *Physics of Fluids*, 24, 1077.
- HU, G., HORTON, W., 1997, Minimal Model for Transport Barrier Dynamics Based on Ion-Temperature-Gradient Turbulence, *Physics of Plasmas*, 4, 3262.
- JOHNSON, T., TUCKER, W., 2009, Enclosing All Zeros of an Analytic Function-A Rigorous Approach, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 228, 418.
- KIM, J.,Y., KISHIMOTO, Y., HORTON, W., TAJIMA, 1994, Kinetic Resonance Damping Rate of the Toroidal Ion Temperature Gradient Mode, *Phys. Plasmas* 1(4), 927-936.
- KURODA, T., SUGAMA, H., KANNO, R., OKAMOTO, M., HORTON, W., 1998, Initial Value Problem of the Toroidal Ion Temperature Gradient Mode, *Journal of the Physical Society of Japan*, 67(11), 3787-3793.
- NISHIKAWA, K., WAKATANİ, M., 2000, *Plasma Physics: Basic Theory with Fusion Applications (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics)*, Springer, ISBN-13: 978-3540652854.
- MATTOR, N., 1992, *Phys. Fluids B* 4, 3952.
- MATTOR, N., DIAMOND, P. H. 1989, *Phys. Fluids B* 1, 1980.