BLUE BOOK

학 과	원자핵공학과	
이 름	조 종갑	~~98~~
학 번	2007-11978	
과 목	핵융합기초	96
날 짜	10. 18 (월)	

※ 학칙을 위반하거나 학생의 본분에 어긋난 행위를 하였을 때에는 징계될 수 있습니다.

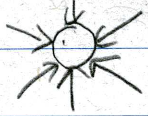
7 Pages

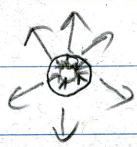
College of Engineering
Seoul National University

1. a) pp (proton-proton) chain, CNO cycle

b) 우선 연료중 하나인 중수소의 경우 많은 양을 쉽게 구할 수 있다. 그리고 핵융합 반응 단면적이 낮은 온도에서 가장 높기 때문에 1st generation 으로 기대되고 있다.

c) 산란반응 단면적이 핵융합 반응단면적보다 약 100배 이상 크기 때문에 beam-target 충돌로는 핵융합을 일으키기도 어렵고, 얻을 수 있는 에너지 이득도 적기 때문이다.

2. a) 1)  레이저나 이온빔으로 핵연료가 들어있는 작은 pellet을 고른 방향에서 에너지를 가한다.

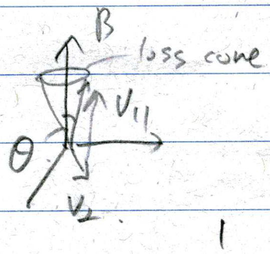
2)  연료 바깥쪽이 가열되고 팽창하면서 관성력에 의해 내부 연료들이 압축된다.

3) 바른 시간에 압축이 되고 반응을 일으키기 충분한 온도로 가열되면 핵융합 반응이 일어나게 된다.

b) 압축과 가열의 과정을 나눈 방법.

3. a) $E = \frac{1}{2} m \underset{(max)}{v_\parallel^2} + \frac{1}{2} m \underset{min}{v_\perp^2} \leq 0 + \mu B$ $\qquad \frac{1}{2} \quad v_\perp^2$

$$\frac{V_{\parallel,max}^2}{V_{\perp,min}^2} \leq \frac{V_{\perp,max}^2}{V_{\perp,min}^2} - 1 = \frac{B_{max}}{B_{min}} - 1$$



$$\frac{V_\perp}{V_\parallel} = \tan\theta$$

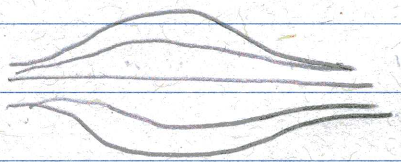
$$\frac{V_\parallel^2}{V_\perp^2} = \frac{\cos^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{1-\sin^2\theta}{\sin^2\theta} = \frac{1}{\sin^2\theta} - 1$$

$$\frac{1}{\sin^2\theta} \leq \frac{B_{max}}{B_{min}} \qquad \sin\theta \geq \sqrt{\frac{B_{min}}{B_{max}}} = A$$

B_{max} = mirror 가장자리의 가장 큰 자기장

B_{min} = mid-plane 에서의 가장 약한 자기장

b). i) flute-type instability.

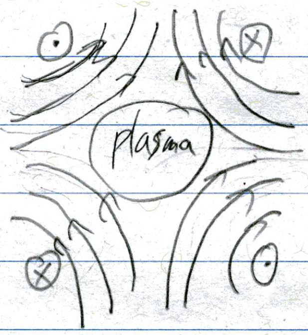


mirror 에서 자기장 분포를 보면 가운데 부분이 오목한 부분이 있다. 이곳에서 이온과 전자들이 curvature drift 에 의해 전기장을 형성하고 $\vec{E}\times\vec{B}$ drift 를 일으켜 바깥쪽으로 밀려나게 된다.

ii) velocity space (loss cone) instability

입자들이 충돌에 의해 loss cone 영역으로 들어가 손실되면서 Maxwellian 분포에서 점점 벗어나게 된다.

이러한 불안정성을 완화하기 위한 방법 (minimum B) 으로 다음과 같은 것이 있다.



cusp

u_i

4. (1) $$Mn\frac{d\vec{u_i}}{dt} + mn\frac{d\vec{u_e}}{dt} = en(\vec{u_i}\times\vec{B} - \vec{u_e}\times\vec{B}) - \nabla(P_i+P_e)$$

($n_e \simeq n_i = n$, $\vec{R_{ie}}+\vec{R_{ei}} = 0$ momentum 주고 받으므로 합이 0)

우변 ⇒ $-en(\vec{u_e}-\vec{u_i})\times\vec{B} = \vec{J}\times\vec{B}$

$-\nabla(P_i+P_e) = -\nabla P$

$$\vec{V} = \frac{n_iM\vec{u_i}+n_em\vec{u_e}}{\rho} = \frac{M\vec{u_i}+m\vec{u_e}}{m+M} \simeq \vec{u_i}+\frac{m}{M}\vec{u_e}$$

$(M \gg m)$

$\rho \simeq (m+M)n \simeq Mn$

좌변 ⇒ $Mn\left(\frac{d\vec{u_i}}{dt}+\frac{m}{M}\frac{d\vec{u_e}}{dt}\right) = Mn\frac{d}{dt}\left(\vec{u_i}+\frac{m}{M}\vec{u_e}\right) = \rho\frac{d\vec{V}}{dt}$

$$\therefore \rho\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{J}\times\vec{B} - \nabla P$$

$$m n_e \frac{d\vec{u_e}}{dt} = -e n_e(\vec{E} + \vec{u_e} \times \vec{B}) - \nabla P_e + \vec{R_{ei}}$$

$\searrow 0$

slow variation 조건하에서 전자의 inertia term 무시

$$\left(\nabla \sim \frac{1}{L} \ll \frac{1}{r_L},\ \frac{\partial}{\partial t} \sim \omega \ll \Omega_i\right)$$

$$\vec{R_{ei}} = -\cancel{m_e} n_e \cdot \frac{n_e e^2}{\cancel{m_e}} \eta (\vec{u_e} - \vec{u_i}) = n_e e \eta \vec{J}$$

$$\vec{u_e} \simeq \vec{V} - \frac{\vec{J}}{n_e e}$$

$$0 = -e n_e\left(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} - \frac{\vec{J}}{n_e e} \times \vec{B}\right) - \nabla P_e + n_e e \eta \vec{J}$$

$$\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} = \eta \vec{J} + \frac{\vec{J} \times \vec{B} - \nabla P}{n e}$$

이온은 전자보다 질량이 매우 커서 짧은 시간동안 전자에 비해 거의 움직이지 못한다.

전자의 inertia term 을 무시하면 $\frac{d\vec{V}}{dt} \to 0$ $\left(\vec{V} = \vec{u_i} + \frac{m}{M}\vec{u_e}\right)$

eqs of motion 에서 $0 = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla P$

$$\vec{J} \times \vec{B} = \nabla P$$

$$\therefore \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} = \eta \vec{J}$$

ideal MHD model 에서는 플라즈마가 $\eta = 0$ 인 이상적인 도체로 생각하므로 $\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} = 0$

(2)
$$\begin{cases} \vec{J} \times \vec{B} = \nabla P \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \end{cases}$$

$$\nabla \times \vec{A} = \frac{1}{r}\begin{vmatrix} a_r & a_\phi r & a_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & A_\phi r & A_z \end{vmatrix}$$

(3) $\vec{B} = B(r)\hat{\theta}$. $\vec{J} = j_z \hat{z}$

$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \longrightarrow \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r B(r)) = \mu_0 j_z$$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \frac{r^2}{r^2 + r_0^2}\right) = \mu_0 j_z r \qquad (r \leq r_0)$$

$2r^3 - 2r^3$

$2 r r_0^2$

$$\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \frac{2r(r^2+r_0^2) - r^2 \cdot 2r}{(r^2+r_0^2)^2} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \frac{2 r_0^2 r}{(r^2+r_0^2)^2} = \mu_0 j_z r$$

$r_0^2 \quad 2r_0^2$

$4r_0^4 \quad \cancel{\frac{I_0}{4\pi r_0^2}}$

$$\therefore J_z = \frac{I_0 r_0^2}{\pi} \cdot \frac{1}{(r^2+r_0^2)^2} \qquad (r \le r_0)$$

$$\vec{J} \times \vec{B} = \nabla p \qquad J_z B_\theta = -\frac{\partial p}{\partial r}$$

$r \ \theta \ z$

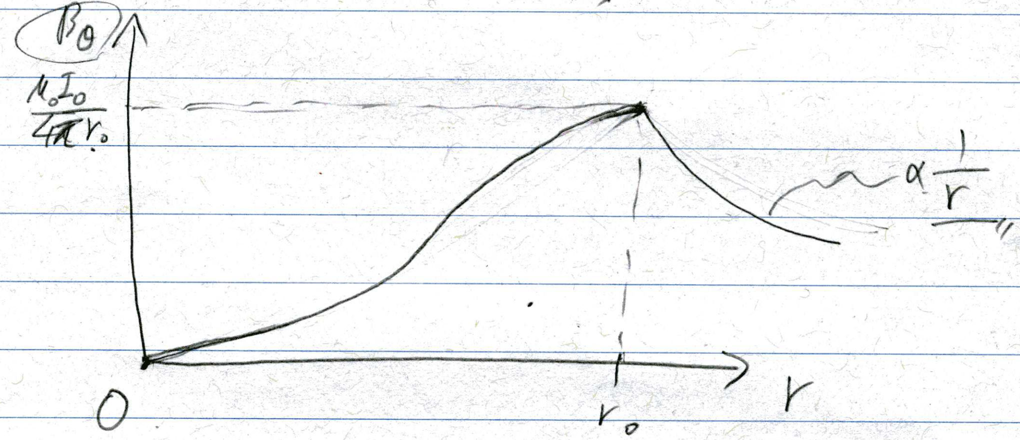
$$\frac{1}{(r^2+r_0^2)^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\mu_0 I_0^2 r_0^2}{2\pi^2} \frac{r}{(r^2+r_0^2)^3}$$

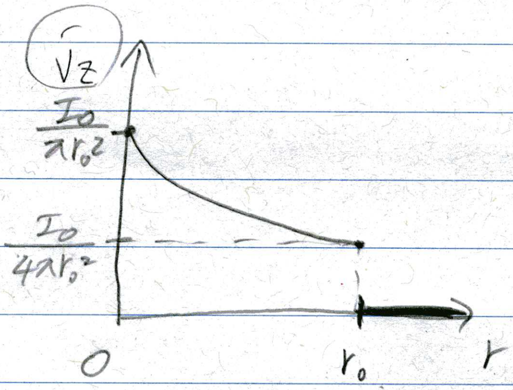
$4r$

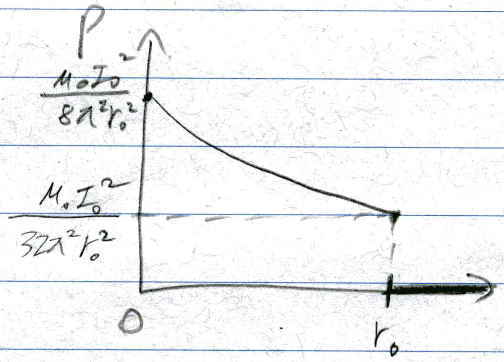
$$\frac{2(r^2+r_0^2)\cdot 2r}{(r^2+r_0^2)^{4\,3}}$$

$$p = \frac{\mu_0 I_0^2 r_0^2}{8\pi^2} \cdot \frac{1}{(r^2+r_0^2)^2} \qquad (r \le r_0)$$



$\cancel{\frac{I_0}{8\pi r_0^2}}$





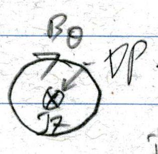
$4r_0^4$

(4) $$\frac{1}{\mu_0}(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = \frac{1}{\mu_0}\left(\cancel{\vec{B}\cdot\nabla\vec{B}}^{\,0} - \nabla\left(\frac{B^2}{2}\right)\right) = \nabla p$$

assuming straight and parellel magnetic field line.

$$\nabla\left(\frac{B^2}{2\mu_0} + p\right) = 0$$

magnetic pressure 가 플라즈마의 kinetic pressure 를 억제한다.



$J_z \times B_\theta \rightarrow -\uparrow$ 방향 force

$-\nabla p \rightarrow \uparrow$ 방향 force