

Parametrické nestability

Název vznikl od systémů s periodicky se měnícími parametry

Např. pružina s vertikálně kmitajícím bodem uchycení, pružina s periodickou změnou tuhosti, pokud X zaměníme za $\sin(X)$ bude to pro kyvadlo

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \Omega_0^2 [1 - 2\varepsilon \cos(\omega_0 t)] X = 0 \quad \text{rovnice Mathieu}$$

Amplituda X pro malé ε roste, když $\Omega_0 = n\omega_0/2$, nejjednodušší pro $n=1 \Rightarrow \omega_0 \rightarrow \Omega_0 + \Omega_0$, s růstem ε se zvětšuje rozsah nestabilních frekvencí

V dynamice plazmatu a v Maxwellových rovnicích jsou nelineární členy

$$\vec{j}_s = q_s n_s \vec{v}_s \quad \text{může být } n_s \text{ s frekvencí } \omega_1 \text{ a } v_s \text{ s frekvencí } \omega_2$$

$$\begin{aligned} \vec{j}_s &= q_s \frac{1}{2} \left(n_1 e^{-i\omega_1 t} + n_1^* e^{i\omega_1 t} \right) \frac{1}{2} \left(\vec{v}_2 e^{-i\omega_2 t} + \vec{v}_2^* e^{i\omega_2 t} \right) = \\ &= \frac{q_s}{4} \left(n_1 \vec{v}_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + n_1^* \vec{v}_2^* e^{i(\omega_1 + \omega_2)t} \right) + \frac{q_s}{4} \left(n_1 \vec{v}_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + n_1^* \vec{v}_2 e^{i(\omega_1 - \omega_2)t} \right) \end{aligned}$$

Doporučená literatura: Chen 8.5, Nicholson 7.17

Proud tedy obsahuje **součtovou a rozdílovou frekvenci**

Pokud je v plazmatu silná vlna E_0 s frekvencí ω_0 a vlnovým vektorem \vec{k}_0

n_1 slabá náhodná porucha s $\omega_1, \vec{k}_1 \Rightarrow$ zdroj proudu s $\omega_0 - \omega_1, \vec{k}_0 - \vec{k}_1$

pokud je v rezonanci s vlnou ω_2, \vec{k}_2 , budí ji $\omega_2 = \omega_0 - \omega_1, \vec{k}_2 = \vec{k}_0 - \vec{k}_1$

kombinace vln 0,2 zesiluje slabou poruchu 1 $\omega_1 = \omega_0 - \omega_2, \vec{k}_1 = \vec{k}_0 - \vec{k}_2$

parametrická nestabilita je obvykle stimulovaný rozpad – většina energie jde do vlny s vyšší frekvencí $\Rightarrow \hbar\omega_0 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$

Na parametrickém zesilování vln se podílí **ponderomotorická síla**

Síla je úměrná kvadrátu elektrického pole – obsahuje NL členy $\sim E_{\omega_1}^* E_{\omega_2}$

Budeme uvažovat laserovou vlnu $\vec{E}_d = \hat{x} E_0 \exp(-i\omega_0 t)$ ($\vec{k}_0 \parallel \hat{z}$ malé)

Nechť malá pomalu proměnná porucha n_p hustoty má $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$

$n = n_0 + n_p = n_0 + \Delta n \cos(kx)$ v důsledku kvazineutrality $n = n_e = Zn_i$

V důsledku oscilací elektronů v směru gradientu hustoty vzniká rychle proměnná porucha elektronové hustoty $\tilde{n}_l \sim \Delta n \cdot E_0$ - podélná vlna

Elektronová hustota $n = n_0 + n_p + \tilde{n}_l$, rychlost $u = u_0 + \tilde{u}_l$, el. pole $E = E_0 + \tilde{E}_l$

Rovnice kontinuity pro elektrony

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n\vec{u}) = 0 \quad \text{má tvar} \quad \frac{\partial \tilde{n}_l}{\partial t} + n_0 \frac{\partial \tilde{u}_l}{\partial x} + u_0 \frac{\partial n_p}{\partial x} = 0$$

pohybová rovnice

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}\nabla)\vec{u} = -\frac{\nabla p_e}{m_e n_e} - \frac{e\vec{E}}{m_e} \quad \text{přejde do tvaru} \quad \frac{\partial \tilde{u}_l}{\partial t} = -\frac{\nabla \tilde{p}_l}{m_e n_0} - \frac{e\tilde{E}_l}{m_e}$$

a Poissonova rovnice $\frac{\partial \tilde{E}_l}{\partial x} = -\frac{e}{\varepsilon_0} \tilde{n}_l$

$$\Rightarrow (\omega_0^2 - \omega_{pe}^2 - 3k^2 v_{Te}^2) \tilde{E}_l = \omega_{pe}^2 n_p E_0 / n_0 \quad \text{člen } \sim n_p E_0 \quad \text{zdrojem vlny } l$$

a odtud
$$\tilde{E}_l = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2 - \omega_{pe}^2 - 3k^2 v_{Te}^2} \frac{\Delta n}{n_0} E_0 \cos kx$$

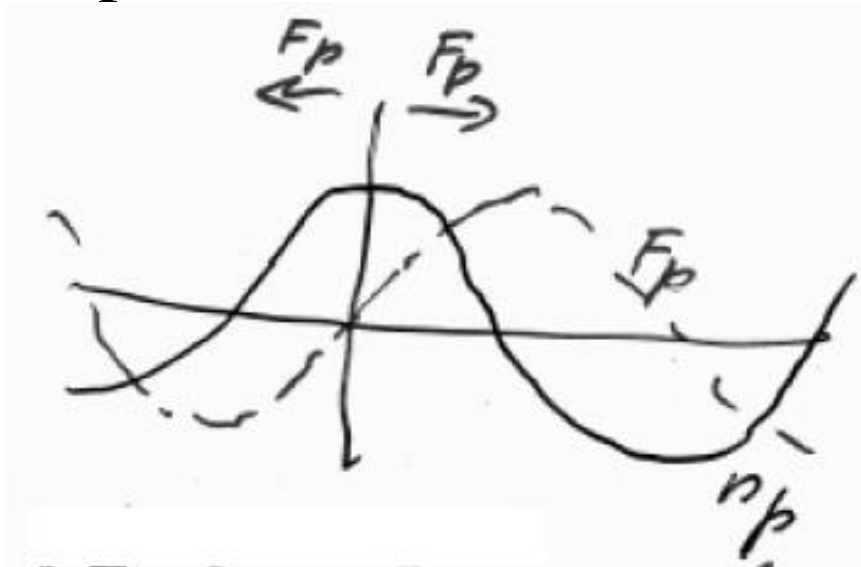
označíme $\omega_{ek}^2 = \omega_{pe}^2 + 3k^2 v_{Te}^2$

a ponderomotorická síla (s využitím $|\tilde{E}_l| \ll |E_0|$) je

$$f_p \sim -\nabla |E|^2 = -\nabla |E_0 + \tilde{E}_l|^2 = -\nabla (E_0^* \tilde{E}_l + E_0 \tilde{E}_l^*) = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2 - \omega_{ek}^2} \frac{\Delta n}{n_0} E_0^2 k \sin kx$$

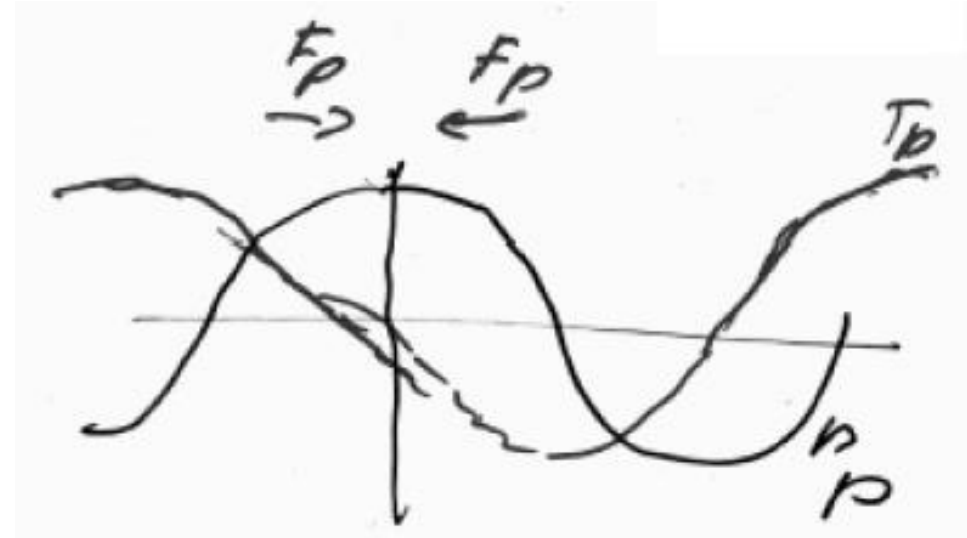
nízkofrekvenční ponderomotorická síla působí na elektrony a ionty a mění počáteční poruchu hustoty n_p

pro $\omega_0 > \omega_{ek}$



pond. síla (PF) zmenšuje poruchy hustoty - **stabilní** vůči exp.nárůstu

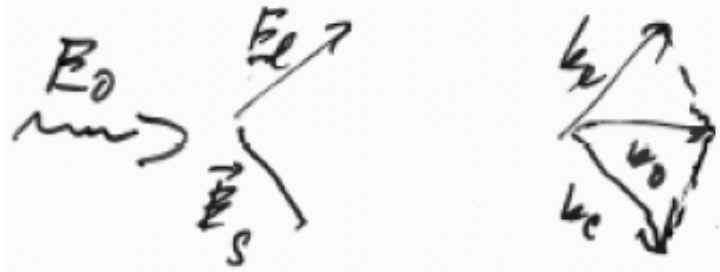
pro $\omega_0 < \omega_{ek}$



PF zvětšuje poruchy hustoty
nestabilita (aperiodická)

– **oscilující dvousvazková nestabilita**

poruchy hustoty \Rightarrow akustická vlna, rezonanční podmínka $\omega_s = k_s c_s$



$$\omega_0 = \omega_l + \omega_s$$

$$\vec{k}_0 = \vec{k}_l + \vec{k}_s$$

(parametrická rozpadová nestabilita)

Parametrické nestability v plazmatu

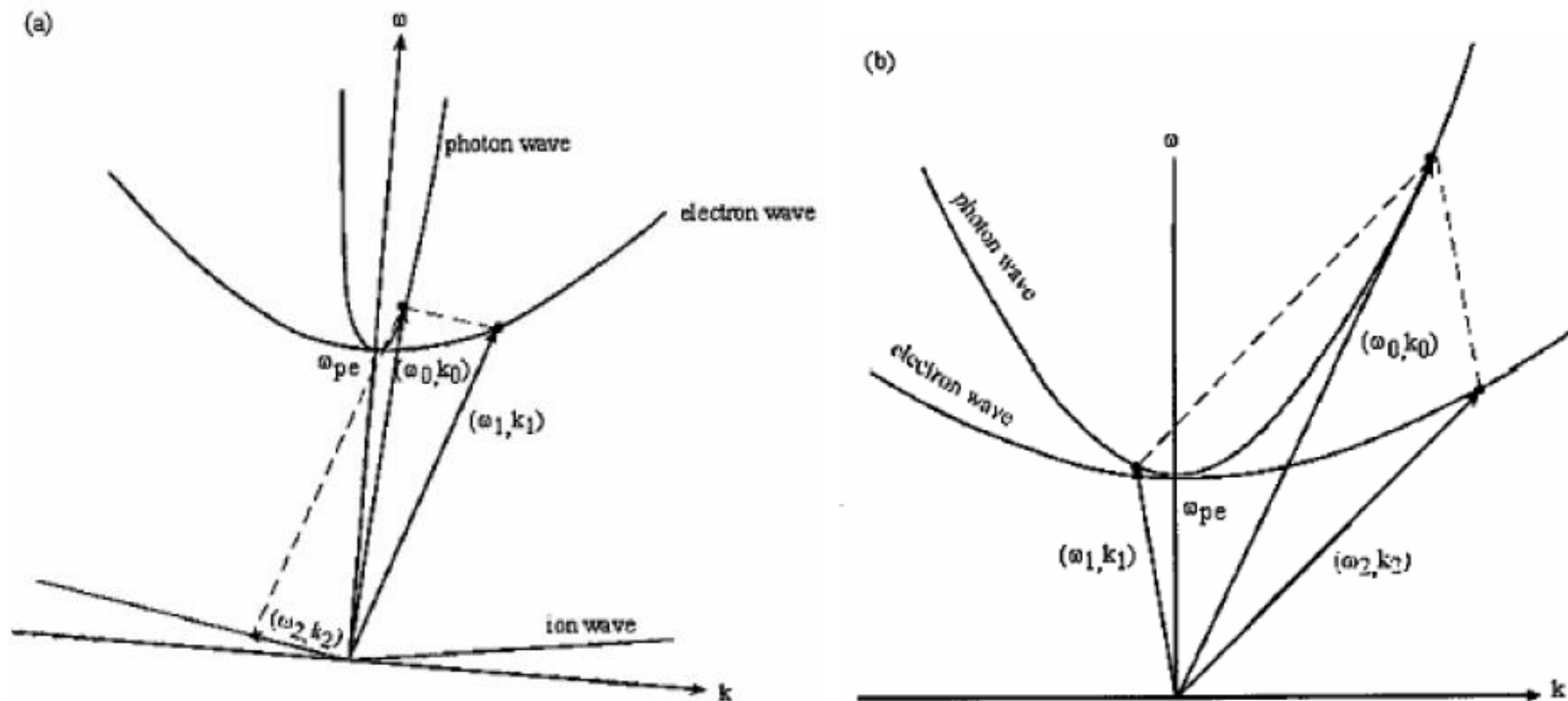
- a) $p \rightarrow p' + s$ rozpad plazmonu
- b) $l \rightarrow p + s$ rozpad fotonu – parametrická rozpadová nestabilita (PRN) a oscilující dvousvazková (aperiodická) nestabilita (ODN) -absorpce laserového záření
- c) $l \rightarrow l' + s$ SBS (stimulovaný Brillouinův rozptyl) - odraz
- d) $l \rightarrow l' + p$ SRS (stimulovaný Ramanův rozptyl) – odraz i absorpce
- e) $l \rightarrow p + p'$ TPD (dvouplazmonový rozpad DPRN) –absorpce

Budící vlna musí překonat útlum dceřiných vln. Pro každou nestabilitu existuje určitý práh, pod kterým je plazma stabilní.

Pro nestability stimulované laserovým zářením práh obvykle závisí na parametru $I\lambda^2$, tedy práh se zvyšuje při zkracování vlnové délky

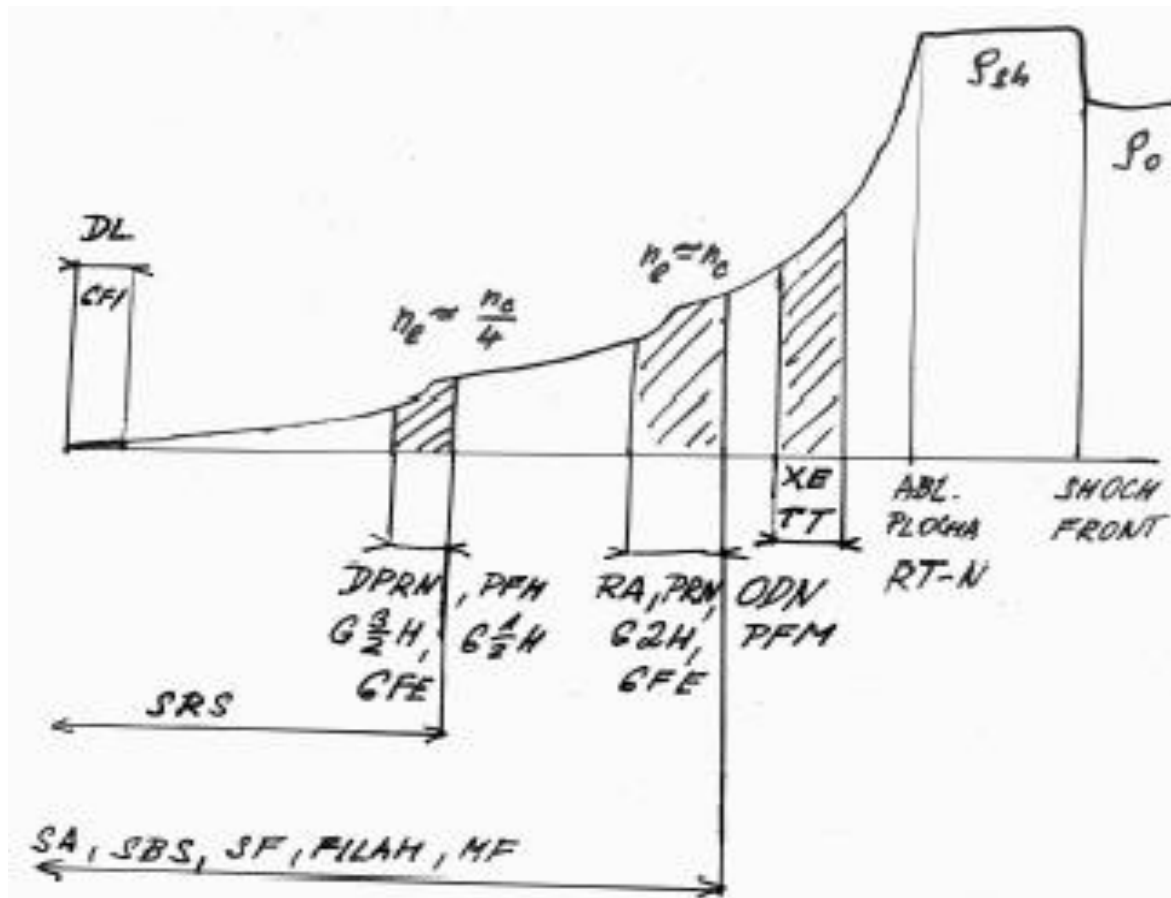
Pro Nd laser ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) je práh při interakci nanosekundových pulsů s pevnými terči typicky $\sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$. Kvůli parametrickým nestabilitám se ve fúzních experimentech se používá 3. harmonická Nd-laseru.

Podmínky synchronizace pro (a) parametrickou rozpadovou nestabilitu, (b) stimulovaný Ramanův rozptyl



Kromě splnění podmínek synchronizace musí mít budící vlna intenzitu převyšující práh (dán obvykle tlumením dceřiných vln)

Fyzika korony a interakce laserového záření s plazmou (terč o hustotě ρ_0)



- DL – dvojvrstva (sheath)
- GFI – urychlování iontů
- DPRN – dvouplaz. Rozpad
- SA – srážková absorpce (inverse bremsstrahlung)
- SF – samofokuzace
- FILAM – rozpad.laser.svazku
- GFE – urychlování elektronů
- PFM – modifikace profilu ponderomotorickou silou
- GxH – generace x harmonické
- RA – rezonanční absorpce
- XE – generace rentgenového záření
- PRN – parametrická rozpadová nestab.
- TT – tepelný transport
- RT-N – Rayleigh-Taylorova n.

Shock front – čelo rázové vlny, MF – generace spontánních magnetických polí

SBS – stimulovaný Brillouinův rozptyl, SRS - stimulovaný Ramanův rozptyl

Pro inerciální fúzi je podmínkou (1) účinnost absorpce a hydrodynamická účinnost, (2) minimum rychlých elektronů, (3) homogennost ablace na ablační ploše