



## Seriál: Stabilizujeme

Základním předpokladem dosažení inerciální fúze je rovnoměrná komprese paliva, což v praxi znamená, že potřebujeme téměř dokonale sférickou symetrii imploze. Ve skutečnosti bohužel tato ideální situace nikdy nenastane. Důsledkem je, že konverze kinetické energie implodující slupky do vnitřní (tepelné) energie paliva je nedokonalá, a tak se snižuje účinnost komprese. Poruchy sférické symetrie imploze mohou způsobit turbulence, které někdy vedou i k rozpadnutí palivové peletky. Tyto nehomogenity také zvětšují povrch horké skvrny, takže dochází k jejímu rychlejšímu chladnutí, přičemž se v lepším případě hoření paliva nerozšíří dále do vnějších oblastí stlačené peletky, v horším dokonce nedojde ani k zapálení paliva. Maximální přijatelná vada symetrie povrchu stlačeného paliva je 33 %, pokud je větší, k fúzi vůbec nedojde. Ačkoli se toto číslo může zdát veliké, klade náročné požadavky na homogenitu rychlostí kompresních rázových vln, která musí být lepší než 1 %. Největší nehomogenity paliva, se kterými se potýkáme prakticky od počátku výzkumu inerciální fúze, můžeme zahrnout mezi tzv. hydrodynamické nestability. O nich si více povíme v dnešním dílu seriálu.

### Hydrodynamické nestability

Mezi nejvýznamnější hydrodynamické nestability patří tzv. Rayleighova-Taylorova nestabilita, které se budeme více věnovat. Mezi další patří Richtmyerova-Meškovova nestabilita, která se může objevit při průchodu rázové vlny rozhraním dvou prostředí, a Kelvinova-Helmholtzova nestabilita, která se v našem případě může vyvinout na hranici předchozích dvou nestabilit. Poruchy vytvořené v plazmatu se mohou rozpadnout či opětovně zmenšit, takže se plazma po čase vrátí do stabilní rovnováhy. Tohle ale není případ Rayleighovy-Taylorovy nestability (ani dalších jmenovaných), která se v prvních fázích svého vývoje exponenciálně rozrůstá, takže na kompresi paliva má naprosto devastující účinek.

Kvůli exponenciálnímu růstu i zcela zdánlivě nepatrné narušení symetrie může zcela ohrozit celý proces stlačení a zapálení paliva. Proto je naprosto zásadní minimalizovat jakékoli asymetrie, které v podstatě mají dvě příčiny: nerovnoměrné osvětlení povrchu peletky a kvalita výroby palivové peletky. Splnění první podmínky vedlo k rozvoji tzv. nepřímého zapálení fúze, kdy se palivová peletka umístí do dutinky vyrobené z těžkého kovu. Laserový svazek dopadající na vnitřní povrch dutinky generuje intenzivní rentgenové záření, které má více homogenní rozložení intenzity než samotný laserový svazek. Splnění druhé podmínky je ale obtížnější. Během výrobního procesu palivové peletky a jejího plnění směsí deuteria s tritiem zůstává v místě plnění dírka jako po vpichu jehlou, která narušuje dokonalou symetrii.

Původní koncept Rayleighovy-Taylorovy nestability vychází z popisu jevu, ve kterém je v gravitačním poli umístěn systém dvou tekutin, z nichž těžší kapalina se nachází nad lehčí kapalinou. Během inerciální fúze je situace podobná, jen máme pouze jedinou kapalinu - plazma. Roli dvou tekutin o různých hustotách hraje plazma horké (s nižší hustotou) a chladné (s vyšší hustotou) a místo gravitace, která je v tomto případě zanedbatelná, vystupuje ablační tlak, který stlačuje peletku ke svému středu. Ablační tlak  $P$ , který závisí na intenzitě laserového

záření  $I$ , můžeme vyjádřit vzorcem

$$P[\text{Mbar}] = 8,6 \left( \frac{I}{10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}} \right)^{2/3} \left( \frac{\lambda}{1 \mu\text{m}} \right)^{-2/3},$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka laseru.

Růst Rayleighovy-Taylorovy nestability lze vyjádřit pomocí veličiny  $\gamma_{RT}$ , kde

$$\gamma_{RT}^2 = \frac{ka}{1 + kL},$$

kde  $L$  je délka hustotního gradientu na rozhraní dvou prostředí (ta může být v našem případě i velmi malá),  $a$  je zrychlení implodující slupky a  $k$  je velikost tzv. vlnového vektoru poruchy povrchu rozhraní ( $k = 2\pi/\lambda_p$ , kde  $\lambda_p$  je vlnová délka této poruchy, kterou si můžeme představit jako zvlnění popsatelné harmonickou funkcí). Amplituda vlny rozhraní se pak v čase vyvíjí jako  $A \propto \exp(\gamma t)$ , nestabilita tedy exponenciálně narůstá, jestliže je  $\gamma_{RT}^2 > 0$ . Pro  $\gamma_{RT}^2 \leq 0$  sa amplituda vlny jenom periodicky mění, dostáváme vlnu s konstantní amplitudou pohybující se po povrchu peletky.

Ablace má kromě urychlení povrchu peletky a spuštění imploze ještě jeden zajímavý účinek. Povrch peletky sa postupně vypařuje, aby nestabilita pretrvala, musí sa nestabilita šířit rychleji, než ablačný povrch. Pre tuto situaci tedy platí vztah

$$\gamma_{RT} = \sqrt{\frac{ka}{1 + kL}} - kv_{abl},$$

kde  $v_{abl}$  je rychlost ablace, přičem k nestabilite dojde jestli  $\gamma_{RT} > 0$ . Vplyvem ablace může dojít ke snížení růstu nestability či dokonce ke stabilizaci podmínek.

Podobný efekt na rychlost růstu nestability má i magnetické pole. To může alespoň ve směru magnetické indukce  $B$  rychlost růstu nestability snížit. Tuto skutečnost můžeme zapsat pomocí vztahu

$$\gamma_{RT} = \sqrt{\frac{ka}{1 + kL} - \frac{2B^2 k^2 \cos^2 \theta}{\mu_0(\rho_2 - \rho_1)}} - kv_{abl},$$

kde  $\theta$  je úhel mezi magnetickým polem a vlnovým vektorem,  $\mu_0$  je permeabilita vakua a  $\rho_{1,2}$  jsou hustoty jednotlivých prostředí (například ablátor a DT led). V současné době se vážně uvažuje o aplikaci silného magnetického pole (až "1 kT") na palivovou peletku, nejen z důvodu stabilizace hydrodynamických nestabilit, ale také proto, že se zvýší přenos energie z laseru do paliva a také transport energie z vnějších oblastí peletky do vnitřních. Celkově se tak zvýší účinnost inerciálního stlačení, takže bude možné dosáhnout vyššího zisku fúzní energie.

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.