

1 wesson

Plazma je sice primárně složeno z vodíku popřípadě helia jako pracovních plynů, ale obsahuje také řadu příměsí, iontů prvků z limiteru a okraje tokamaku. Běžnými prvky jsou berilium, kyslík, uhlík v případě prvků s nízkým Z a železo a nikl s velkým Z . Prvky s velkým Z přitom nejsou často plně ionizované ani při vysokých teplotách plazmatu. Cizí prvky jednak ředí pracovní plyn. Nečistoty také stojí za velkými ztrátami dodané energie, což probíhá pomocí záření. Sledování tohoto procesu je důležité pro zlepšování celkové energetické bilance. Rozdělení záření na čárové a spojitě! Vyzařování v čárovém spektru má hlavní podíl na energetických ztrátách [Wesson -Tokamaks]. Vzniká většinou na okraji plazmatu, kde je nečistot nejvíce. Energetické přechody elektronů z různých stavů plně neionizovaných iontech vyzařují s konkrétními energiemi danými součinem frekvence ν a planckovi konstanty h jako $E = \nu h$. Z charakteristických frekvencí tak lze zjistit složení nečistot. Spojité spektrum vzniká při srážkách elektronů a iontů, při nichž vzniká brzdné záření, spojitě je i vyzařování při rekombinaci, kdy dochází k zachycení elektronu iontem.

wesson: radiation losses Čisté vodíkové plazma vyzařuje díky zrychlování nabitých částic. Přitom elektrony jsou mnohem lehčí než protony a proto zrychlují více a vyzařují více. V takovém případě lze vyzařování protonů zanedbat. Elektrony mění rychlost ve dvou základních případech. Prvním z nich jsou srážky. Dominantním zářením při srážkách je brzdné záření a jeho energie odpovídá ztrátě pohybové energie elektronu. Elektrony zároveň konají v magnetickém poli pohyb po kružnici o Larmorově poloměru, čemuž odpovídá cyklotronní záření. V přítomnosti nečistot se podíl brzdného záření zvyšuje. Čárové záření a záření vzniklé rekombinací je zapříčeno především nečistotami v plazmatu. Pod rekombinací se myslí přechod z vázaného do volného stavu a naopak, či z vázaného do vázaného stavu. Čili změna energetické hladiny.

2 Hutchinson

3 plasma analysis

4 Weston M.Stacey

Úvod: Záření je hlavní příčinou energetických ztrát plazmatu. Zároveň poskytuje dobrý diagnostický nástroj. Rozsah vlnových délek se pohybuje v rozmezí od milimetrových vln po záření gamma. Kvůli vysokým energiím záření se proto klade důraz i na bezpečnost zařízení. Plazma ztrácí energii jak klasickým brzdným zářením, kdy je spektrum spojitě, tak rekombinačními procesy s čárovým spektrem. Zároveň dochází k vyzařování cyklotronního díky pohybu elektronů a iontů v magnetickém poli. Brzdné záření vzniká primárně změnou rychlosti elektronů při pružných srážkách s ionty. Přitom je vyzařen foton o úměrné energii. Uvažujeme-li neralativistické srážky, pak se pro stejné částice vyzařovaná pole přesně zruší a brzdné záření tak vzniká pouze pro reakce elektronů s ionty. Výkon brzdného záření můžeme popsat vztahem, jenž lze nalézt např. zde [Diplomka Martin Imrištk, klasické odvození nekvantov. We-

ston M.Stacey Plasma fusion physics]

$$P_B = \frac{e^6}{24\pi\epsilon_0^3 c^3 m_e h} n^2 Z^2 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} g_{ff} \left(\frac{Z^2}{T_e} \right), \quad (1)$$

kde g_{ff} je tzv. Gauntův faktor představující korekci na kvantové efekty [Imrisek]. Jelikož obsahuje plazma i příměsi, musíme Z nahradit efektivním nábojem

$$Z_{eff} \equiv \sum_{j \neq e} \frac{n_j Z_j^2}{n_e} \quad (2)$$

Plazma je sice primárně složeno z vodíku popřípadě helia jakožto pracovních plynů, ale obsahuje také řadu příměsí pocházejících z limiteru, stěn nádoby a dalších součástí. Za velkých teplot je pracovní plyn plně ionizován, a proto ke ztrátám zářením vzniklého rekombinací dochází převážně u nečistot. Ty mohou mít malá Z jako v případě uhlíku, berilia či kyslíku, nebo velká Z z nichž se v tokamacích vyskytují prvky jako železo či nikl. Ačkoliv za velkých teplot ubývá ztrát z rekombinace prvků s malým Z , pro velká Z není zatím možné tento faktor eliminovat [Wesson Tokamaks 2004] a koncept elektrárny s tím musí počítat. Ztráty zářením nečistot je možno vyjádřit aproximativním vztahem

$$P_R = (1 + 0,3T_e) \times 10^{-43} n_e n_z t^{3,7-0,33 \ln T} [W/m^3], \quad (3)$$

kde elektronová teplota T_e je v keV. Celé odvození společně s jinými odhady viz [Weston M.Stacey]

Cyklotronní záření je způsobeno pohybem nabitých částic po spirálách v magnetickém poli. Dle teorie je poloměr oběhu silokřivky dán intenzitou magnetického pole, ta se však napříč plazmatem liší a zároveň se mění i s časem. Frekvence záření je úměrná frekvenci oběhu a je z velké části pohlcováno plazmatem. Tyto frekvence je tedy možné využít i při ohřevu plazmatu. Stanovit celkový vyzářený výkon cyklotronního záření je značně obtížné. Musí se přitom počítat s odrazem záření od stěn tokamaku a jeho pohlcování plazmatem. Celkový výkon cyklotronního záření lze přibližně vyjádřit jako

$$P_C = 6,2 \times 10^{-17} B^2 n_e T_e (1 + T_e/204 + \dots) [W/m^3], \quad (4)$$

kde elektronová teplota T_e je v keV.