

炉壁への中性子入射スペクトルと その高速イオン診断への応用

九大院工

杉山翔太、松浦秀明

Email: s-sugi@nucl.kyushu-u.ac.jp

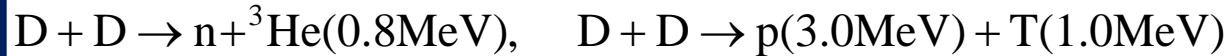
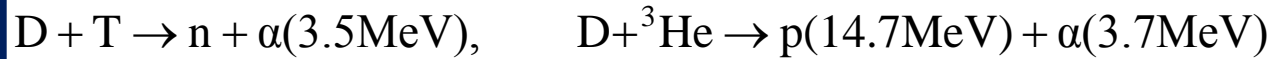
2016年3月14日 第19回 若手科学者によるプラズマ研究会



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

プラズマ中の高速イオン

➤ 核融合反応生成



➤ 外部加熱

- NBI加熱 …… 高速中性粒子を特定の方向に入射
 - ICRF加熱 …… イオンを磁力線に垂直な方向に加速
- } 高速イオンが
非等方的に分布

➤ 核弾性散乱

一回当りのエネルギー輸送量が大きい大角度散乱

Devaney et al., Nucl. Sci. Eng. **46** (1971) 323. 松浦 他, プラ核学会誌 **91** (2015) 449.

高速イオン診断

加熱特性や粒子閉じ込め等、高速イオンの物理の理解のために重要

- イオンを直接測定 …… CTS、NPA Bindslev et al., PRL **83** (1999) 3206.
Medley et al., RSI **79** (2008) 011101.
- 間接的に測定 …… 中性子計測 Hellesen et al., NF **50** (2010) 022001.



バルクイオンに比べて高速イオンが少ない場合
測定の精度を高める工夫が必要

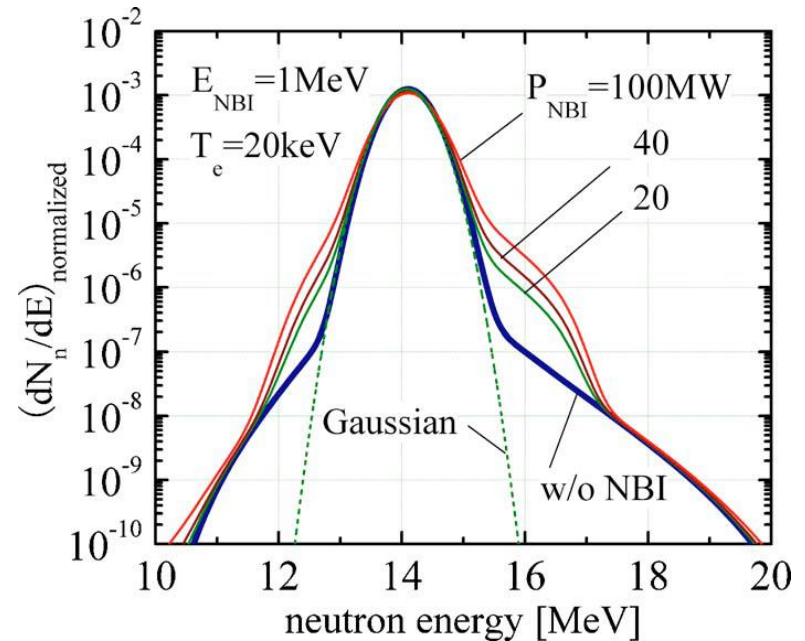
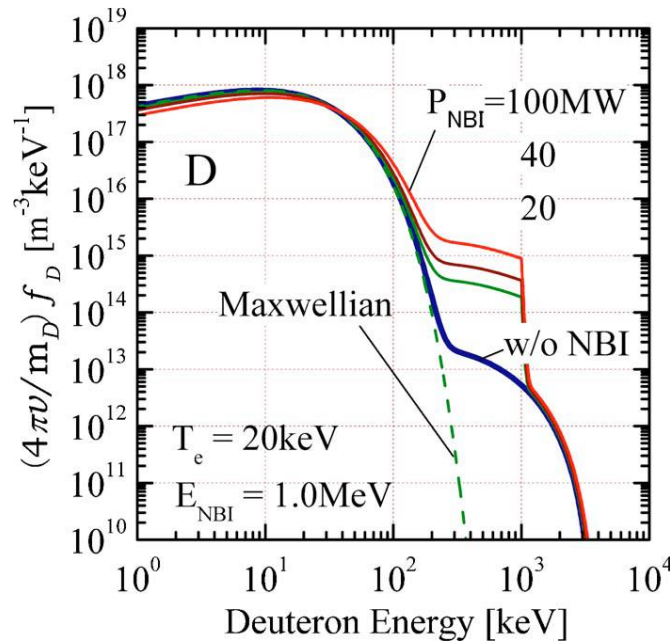
高速イオンテイルと中性子放出スペクトル

➤ 高速イオンテイルの形成

- 高速イオンがイオン速度分布関数上に非Maxwellianテイルを形成
- 中性子放出スペクトルはガウス分布から歪む

中性子スペクトルの非ガウス成分を計測 → 高速イオンの挙動を理解

C. Hellesen et al., Nucl. Fusion **50** (2010) 022001.



H. Matsuura et al., Phys. Plasmas **16** (2009) 042507.

➤ 非等方的なテイルの形成

- 中性子放出スペクトルの非ガウス成分も非等方性を持つ

→ 壁面への入射時にも影響

炉壁に入射する中性子

(1)中性子束分布

等方的な中性子放出の場合に
対して評価されている

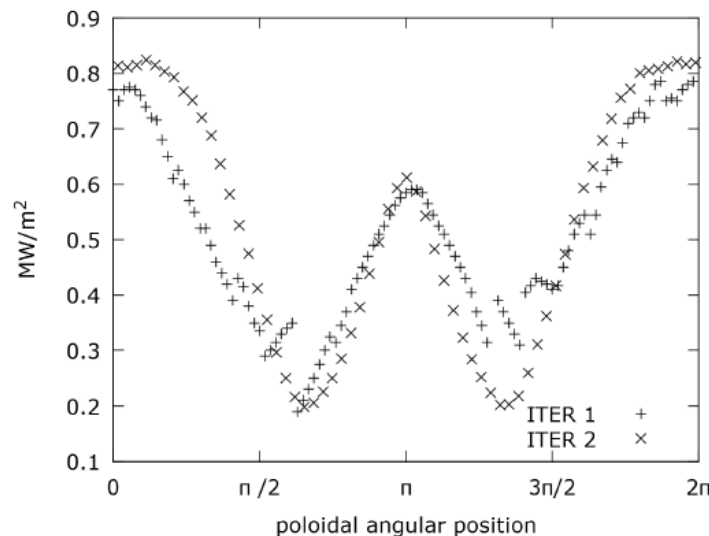
(2)エネルギースペクトル

炉壁位置・入射角によりエネルギー
スペクトルが異なる

非等方高速イオンテイルも影響

S. Sugiyama et al., PFR **10** (2015)3403055.

S. Sugiyama et al., to be published in PFR (2016).



J. C. Rivas et al., Fusion Sci. Eng. **64** (2013) 687.

高速テイルと粒子軌道を考慮の上、非等方的な中性子放出に対して
炉壁位置・入射方向毎の中性子エネルギースペクトルを把握

➡ 高速イオン診断に適した計測器位置・角度を特定

目的

- 非等方高速イオンテイルを考慮し、炉壁位置・入射角毎の中性子入射スペクトルを評価
- 高速イオン診断への応用方法の検討

ITER DTプラズマにNBI加熱を行った場合を想定

解析モデル

軌道計算

- 荷電粒子軌道計算コードORBIT R. B. White, et al., Phys. Fluids **27**, 2455 (1984).
- プラズマ中の高速イオンの軌道を計算
- 核融合反応時の高速イオンの位置・運動方向・エネルギーを生成

中性子放出方向・エネルギー

中性子の放出エネルギーは放出方向に依存 H. Brysk, Plasma Phys. **15** (1973) 611.

$$E_n = \frac{1}{2} m_n v_0^2 + \frac{m_\alpha}{m_n + m_\alpha} (Q + E_r) + v_0 \cos \zeta \sqrt{\frac{2m_n m_\alpha}{m_n + m_\alpha} (Q + E_r)}$$

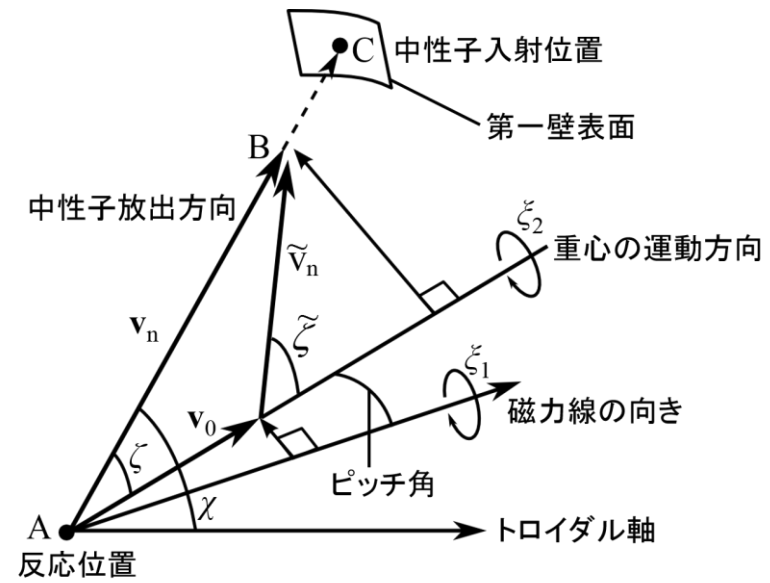
v_0 : 反応粒子の重心速度、 $m_{n(^3\text{He})}$: 中性子(^3He)の質量、 E_r : 反応粒子の相対エネルギー、 Q : 反応の Q 値(3.3MeV)、 ζ : 重心系における中性子放出角度

反応粒子の重心速度に対する放出角度

→ トロイダル軸を基準とした放出方向に統一

トロイダル軸に対する中性子放出角度 χ

- 重心速度に対する実験室系の中性子放出角度 ζ をトロイダル軸に対する角度 χ に変換
- 中性子放出ベクトル \overrightarrow{AB} を求める



炉壁への中性子入射位置及び入射角度

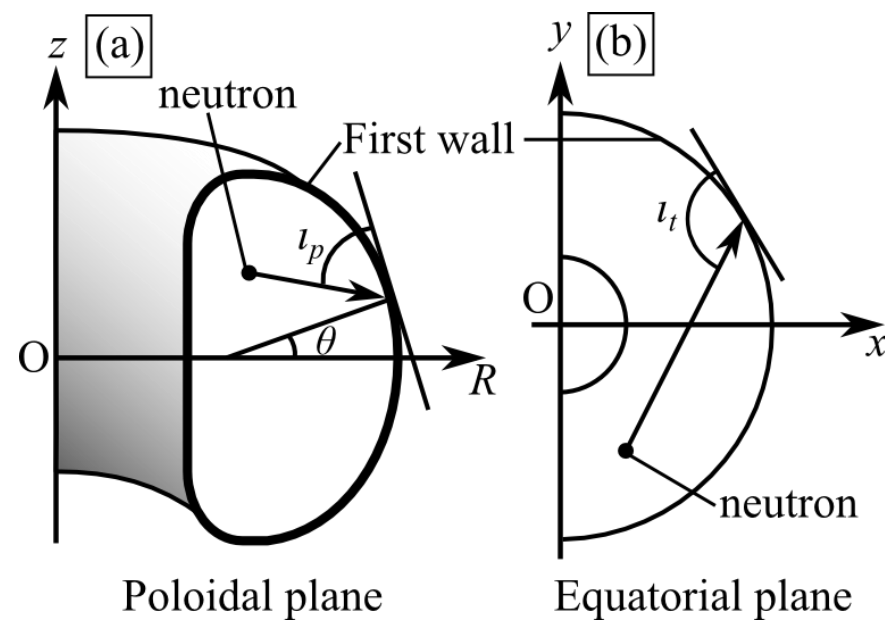
- 壁面形状関数と \overrightarrow{AB} を連立して解く
- 壁面形状 Yavorskij, PPCF 43 (2001) 249.

$$x = (R_{maj} + a \cos \theta - \delta a \sin^2 \theta) \cos \varphi$$

$$y = (R_{maj} + a \cos \theta - \delta a \sin^2 \theta) \sin \varphi$$

$$z = \kappa a \sin \theta$$

- 入射角の定義
 水平面内 → トロイダル入射角 l_t
 子午面内 → ポロイダル入射角 l_p



計算条件

B. J. Green, PPCF 45 (2003) 687.

- ITER DTプラズマを想定 (Inductive operation scenario 2)
- プラズマ中心に重水素ビームを接線入射

仮定

$$\langle n_{d(t)} \rangle = 5.05 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

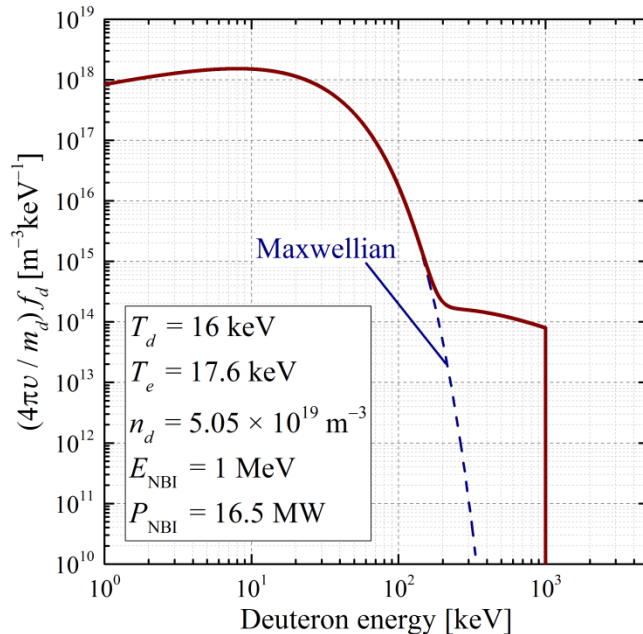
$$\langle T_i \rangle = 8 \text{ keV}, \langle T_e \rangle = 8.8 \text{ keV}$$

$$E_{\text{NBI}} = 1 \text{ MeV}$$

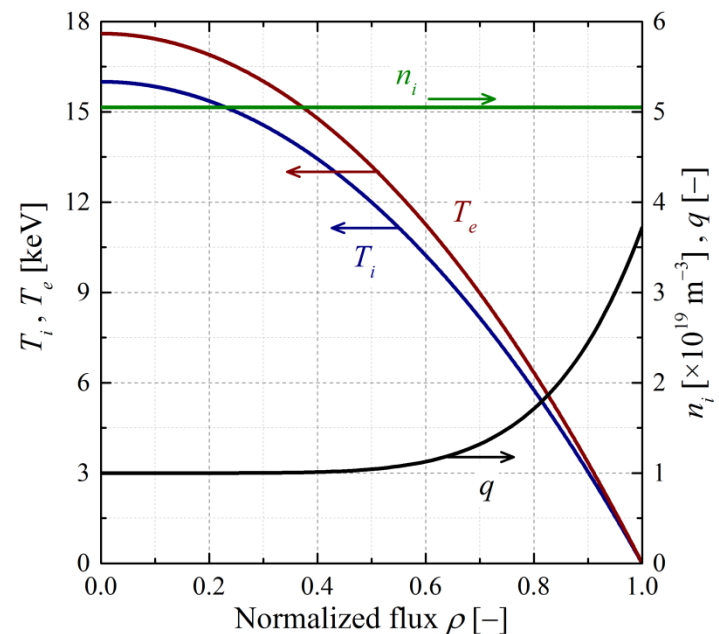
$$P_{\text{NBI}} = 16.5 \text{ MW}$$

- ✓ バルクイオンはマクスウェル分布に従う (等方的に運動)
- ✓ NBIはプラズマ中心でのみ電離
- ✓ テイルはビーム粒子軌道上にのみ形成
- ✓ 散乱による軌道の変化を無視

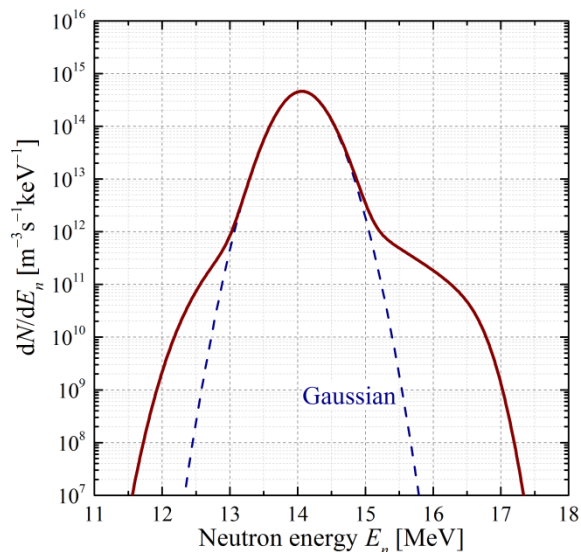
重陽子速度分布関数(中心)



バルクイオン空間分布

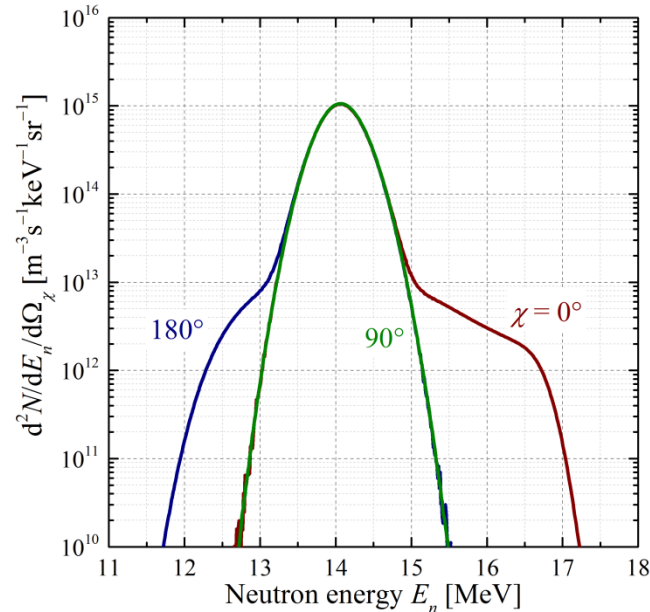
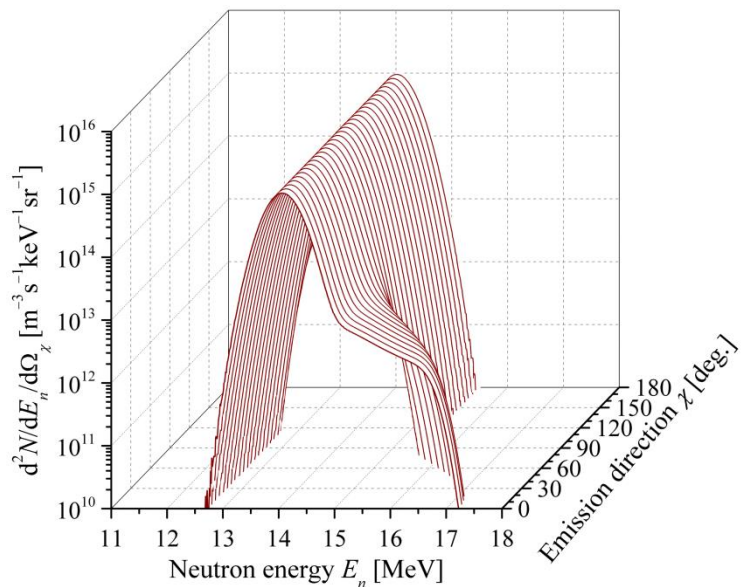


中性子放出スペクトル

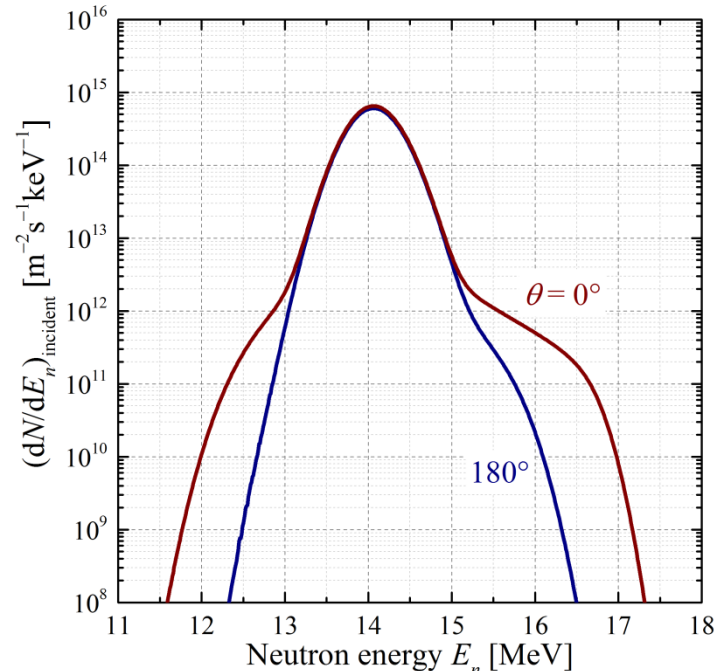
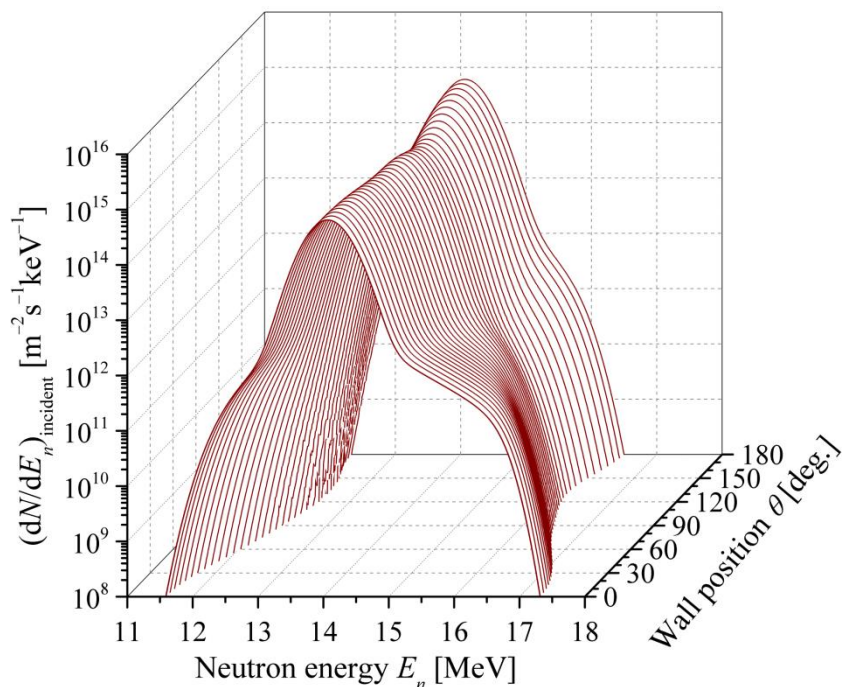


- テイル形成により非ガウス成分が現れる
- ガウス成分は等方的に分散される
- 非ガウス成分は放出方向に依存する

放出方向に分解したスペクトル



壁面への中性子入射エネルギースペクトル



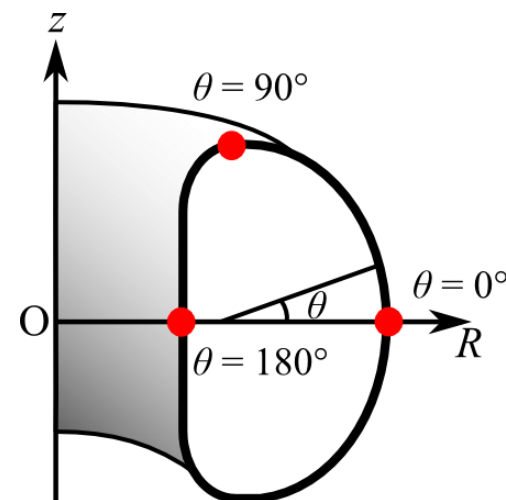
(トロイダル方向の積分値)

壁面位置によって観測されるスペクトルが異なる

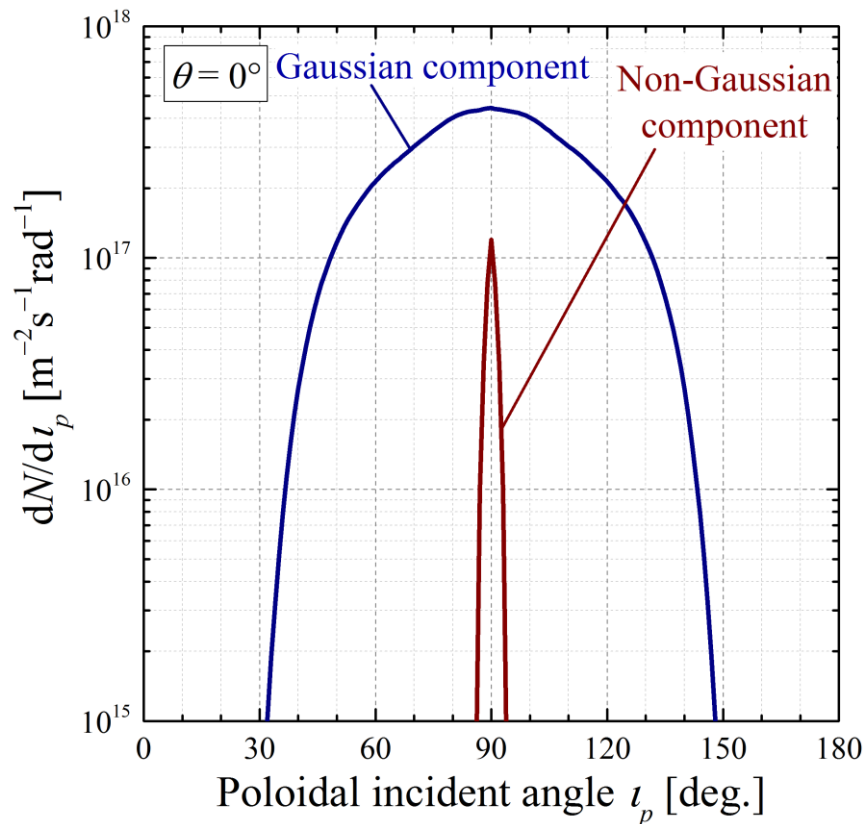
- ・放出方向とエネルギーとの関係
- ・放出方向と装置形状の幾何学的な関係

$\theta = 0^\circ$ (トーラス外側)

全エネルギー範囲で最も多くの非ガウス成分
中性子が入射

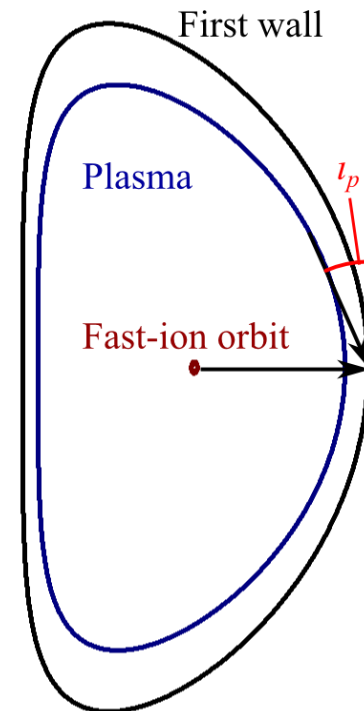


壁面への中性子ポロイダル入射角分布



$\theta = 0^\circ$
(赤道面、外側)

(トロイダル方向積分値)



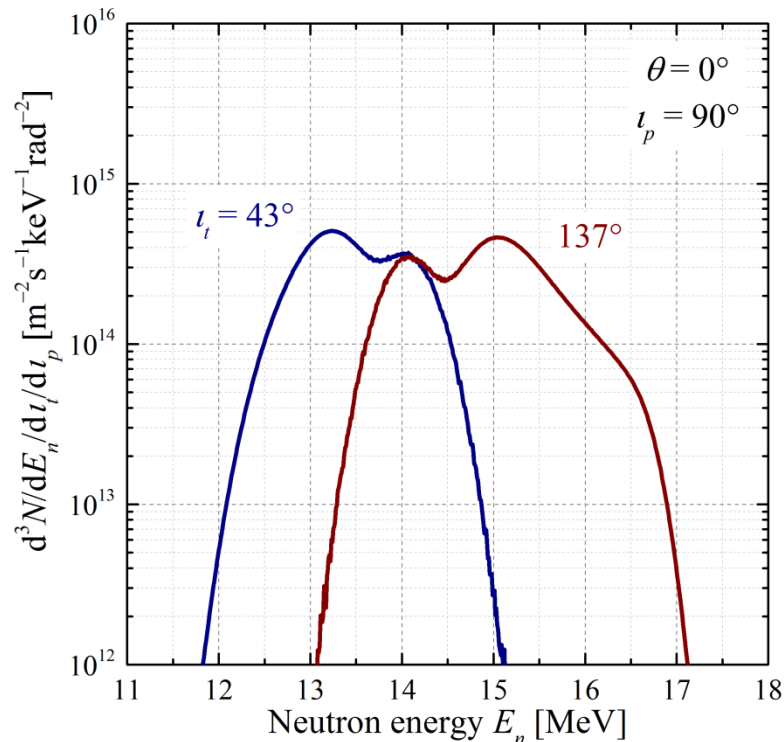
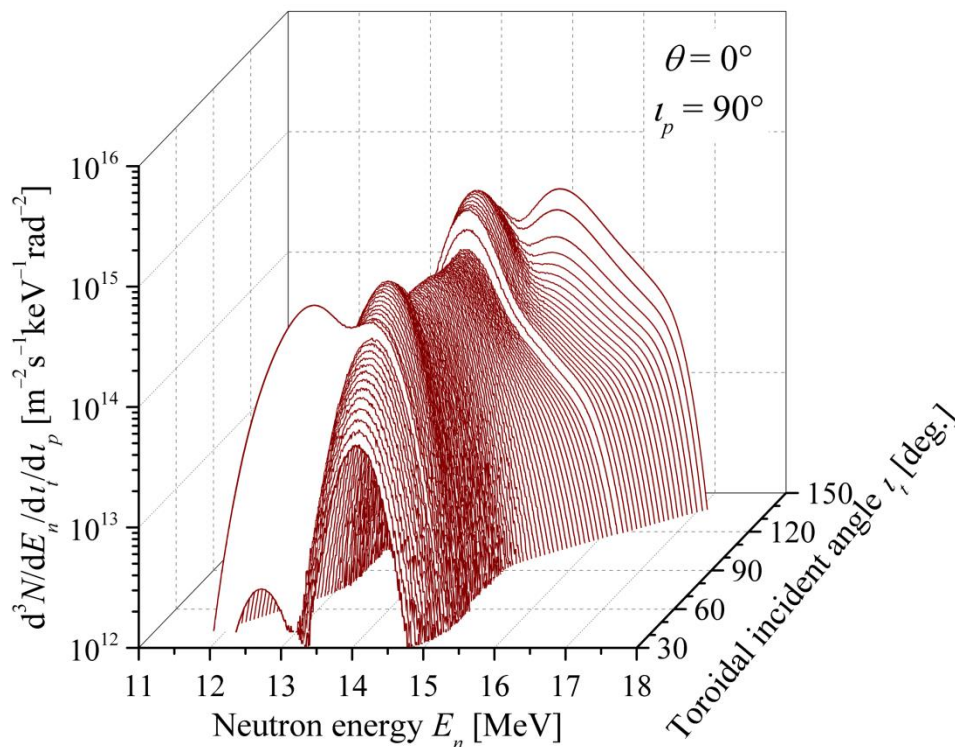
ガウス成分 ... $30^\circ \leq l_p \leq 150^\circ$ で入射
非ガウス成分 ... ほとんど $l_p = 90^\circ$ で入射

発生領域の影響

ガウス成分 ... プラズマ全体から発生
非ガウス成分 ... ほとんど中心でのみ発生

壁面への中性子入射角分布

$\theta = 0^\circ$ (赤道面、外側)

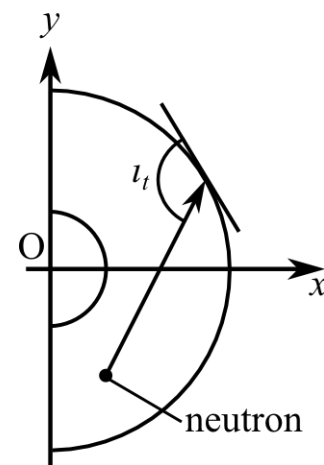


(トロイダル方向の積分値)

入射角度によって観測されるスペクトルが異なる

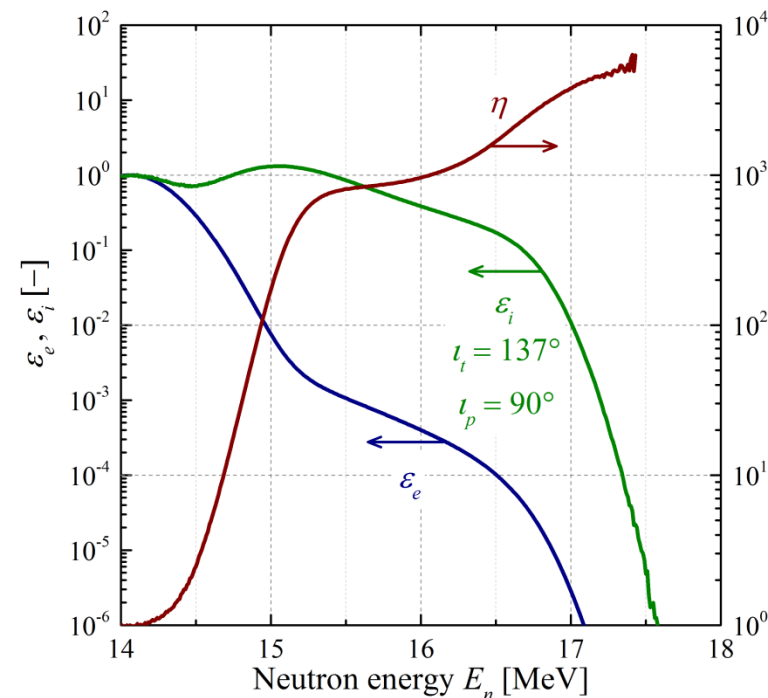
最大エネルギーを持つ中性子はNBIと同方向に放出

→ 外側 (0°) に約 137° でのみ入射する



高速イオン診断への応用

- 中性子スペクトルの計測によるイオン温度計測
 - ガウス分布の半値幅を十分な精度で測定
- 14 MeV中性子の量を基準とする



ε : 14.1 MeVの値で規格化したスペクトル
 η : 規格化入射スペクトルと放出スペクトルとの比 (非ガウス成分の割合の向上度)

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{dN}{dE_n}}{\left. \frac{dN}{dE_n} \right|_{\text{peak}}} \quad \varepsilon_i = \frac{\frac{d^3 N}{dE_n d\ell_t d\ell_p}}{\left. \frac{d^3 N}{dE_n d\ell_t d\ell_p} \right|_{\text{peak}}}$$

$$\eta \equiv \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e}$$

中性子スペクトルを壁面位置・入射角度で分解することで、
 14 MeVピークに対する非ガウス成分の比率を
 16 MeV以上で**3桁以上**高められる
 17 MeVで**約3800倍**

高速イオン診断の測定精度を高めるのに有効

まとめ

- ITER DTプラズマにNBIを接線方向入射した場合を想定
- 炉壁位置・入射角毎の中性子入射スペクトルを評価
- 適当な炉壁位置と入射方向を選択することで、高速イオン診断に有利になる
 - 本計算条件では非ガウス成分とガウス成分ピークとの比を
16 MeV以上で3桁以上高められる
- 中性子放出の非等方性を利用した高速イオン診断法を提示

今後の検討

- 解析結果を確認するための実験の提案・結果の比較
- 解析モデルの厳密化(イオン分布関数評価法の検討等)
- 中性子輸送計算コードと組み合わせた解析(ノイズ評価)