

氏 名 Nilam Balkrishna NIMAVAT

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2102 号

学位授与の日付 2019 年 9 月 27 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Polarization spectroscopy of Lyman- $\alpha$  for the study of  
anisotropic electron velocity distribution function in fusion  
plasma

論文審査委員 主 査 教授 村上 泉  
准教授 後藤 基志  
准教授 小林 政弘  
准教授 鹿野 良平  
准教授 四竈 泰一  
京都大学大学院工学研究科

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full: Nilam Balkrishna NIMAVAT

Title: Polarization spectroscopy of Lyman- $\alpha$  for the study of anisotropic electron velocity distribution function in fusion plasma

Measurement of anisotropy in the electron velocity distribution function (EVDF) can provide significant information for understanding transport phenomena, equilibria, and current drive in a fusion plasma. Although the anisotropic EVDF plays a key role in a magnetically confined fusion plasma, it has not been actively investigated in plasma experiments. Some diagnostics techniques, e.g., Thomson scattering, electrical probes, absorption of waves, a directional energy analyzer, and polarization in emission lines of atoms or ions, have been explored earlier to study the anisotropy in the EVDF. Among these techniques, the spectroscopy of polarized emission is non-perturbative. From the electron beam impact experiments and theoretical calculations, it is well known that anisotropic electron-impact excitation creates non-uniform population distribution over the magnetic sublevels in a state and the subsequent emission is polarized. Thus, plasma polarization spectroscopy can be a useful technique to obtain information regarding the anisotropy in the EVDF.

Polarization-resolved measurements of the hydrogen Lyman- $\alpha$  line at 121.56nm have been made in the Large Helical Device (LHD). In order to correlate the experimentally observed polarization degree with the anisotropy in the EVDF development of a theoretical model, known as the Population-Alignment Collisional-Radiative (PACR) model, is absolutely necessary. Owing to the simple energy level structure relating to the Lyman- $\alpha$  line, construction of an accurate theoretical model is possible and therefore this spectral line has been chosen for this study. In present study we deal with the polarization in Lyman- $\alpha$  line caused by anisotropic collisions with electrons. This thesis work is mainly divided into two parts:

1. Measurement of polarization in Lyman- $\alpha$  line from the LHD plasma
2. Development of the PACR model for Lyman- $\alpha$  line

### Part 1: Measurement of polarization in Lyman- $\alpha$ line from the LHD plasma

The polarization measurement system on LHD consists of a normal incidence VUV spectrometer (McPherson model 2253) with a CCD (Charge Coupled Device) detector, and additionally installed optical components provided by the CLASP

(Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter) team. These optical components are a high-reflectivity mirror, a polarization analyzer and a half-waveplate. The components are specially designed and developed to be used at the Lyman- $\alpha$  wavelength and their performance is strongly wavelength dependent. Therefore, the comprehensive testing programs of these components have been carried out by utilizing the UVSOR (Ultraviolet Synchrotron Orbital Radiation) facility at the Institute for Molecular Sciences in Okazaki, Japan.

The focal length of the spectrometer is 3m and the working wavelength range is from 30nm to 320nm. A back-illuminated CCD detector, Andor model DV435 with  $1024 \times 1024$  pixels, is placed at the exit slit of the spectrometer to record the spectra. The high-reflectivity mirror and the polarization analyzer have been installed before the CCD detector inside the spectrometer. The mirror works to direct the diffracted light coming from the diffraction grating to the analyzer and has a reflection efficiency of 80% at 121.56nm. The analyzer, based on Brewster's angle reflection, only reflects linearly polarized light in the vertical direction to the detector. The half-waveplate is placed just behind the entrance slit in the spectrometer and it is continuously rotated during the measurement. Although the detector always receives a linearly polarized light in the vertical direction as mentioned above, the direction of the corresponding linearly polarized light at the emission location changes depending on the optical axis angle of the rotating half-waveplate. During measurements the cycle time of the Lyman- $\alpha$  line spectral observation is 50ms with an exposure time of 16ms, and the period of the half-waveplate rotation is 0.8s. Under such conditions, linearly polarized light at every  $45^\circ$  angle is monitored.

The intensity in a background subtracted spectrum is integrated over a certain wavelength range for each time frame and the result is plotted as a function of time to obtain the temporal profile of Lyman- $\alpha$  line. In the present analysis, the integrated intensities of the hydrogen and deuterium lines are considered. Here, the angle of the observed linearly polarized light is defined as the "polarization angle" and it is measured in the clockwise direction seen from the grating with reference to the vertical axis. The intensity shows a modulation which is synchronized with the half-waveplate rotation period. This result clearly indicates that the Lyman- $\alpha$  line is polarized. The polarization degree is defined as

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

where  $I_{\max}$  and  $I_{\min}$  stand for maximum and minimum intensities in temporal profile, respectively. The least-squares fitting is performed on the temporal variation of the intensity,  $I(t)$ , with a function like

$$I(t) = f(t) [1 + P \sin(\omega t + \theta)],$$

where  $f(t)$  represents the global intensity variation, which is here expressed by a second order polynomial function,  $\omega$  is fixed at  $10\pi$  in the present case,  $P$  is the polarization degree, and  $\theta$  is the phase offset.

Following the above-mentioned procedure polarization degree has been evaluated for many LHD discharges with different plasma configurations. The previous studies done on LHD plasma indicate that the dominant hydrogen emissions can be approximated to be at  $r_{\text{eff}} = 0.67\text{m}$ , where  $r_{\text{eff}}$  is the effective minor radius of the plasma. The dependence of polarization degree on electron density at hydrogen emission location has been investigated. The decreasing behavior in polarization degree with increasing electron density is anticipated due to two possibilities: (i) with increasing electron density the anisotropy in the EVDF itself reduces and (ii) with increasing electron density polarization degree may reduce due to the collisional relaxation of imbalance of population among the magnetic sublevels. But the measured polarization degree does not show any clear dependence on electron density.

The synthetic intensity profiles for the Lyman- $\alpha$  emission at the inboard and outboard sides have been generated by using the magnetic field data at  $r_{\text{eff}} = \pm 0.67\text{m}$  on spectrometer line of sight, i.e., at  $Z = -0.4\text{m}$ , to understand variation of an experimental intensity with a polarization angle (phase analysis of intensity profile). From such investigation information regarding the dominant emission location and regarding the relation between the experimental intensity and the magnetic field direction can be inferred. These results suggest that the electron temperature in the direction perpendicular to the magnetic field ( $T_{\perp}$ ) is higher than that in the direction parallel to the magnetic field ( $T_{\parallel}$ ). The results also indicate that the dominant contribution in the polarized emission is from the plasma at the inboard side of the device.

### Part 2: Development of the PACR model for Lyman- $\alpha$ line

The Lyman- $\alpha$  line at  $121.56\text{nm}$  is emitted due to radiative transitions  $1^2\text{S}_{1/2} - 2^2\text{P}_{1/2}$  and  $1^2\text{S}_{1/2} - 2^2\text{P}_{3/2}$ . For developing the PACR model axisymmetric system with respect to the quantization axis has been assumed where there is no orientation among the magnetic sublevels, i.e., the populations of  $m_J$  and  $-m_J$  sublevels are the same. For this reason, the light emitted due to the transition  $1^2\text{S}_{1/2} - 2^2\text{P}_{1/2}$  is unpolarized and the transition  $1^2\text{S}_{1/2} - 2^2\text{P}_{3/2}$  is mainly responsible for observing polarization in the Lyman- $\alpha$  line. Here,  $m_J$  means the magnetic quantum number of the level having the total angular momentum quantum number  $J$ .

The information of dominant populating and depopulating processes concerning level  $2^2\text{P}_{3/2}$  is prerequisite for construction of the model and for this purpose,

collisional-radiative calculations have been carried out. The results show that for typical electron temperature ( $t_e$ ) and density ( $n_e$ ) values at the edge LHD plasma, i.e., for  $t_e$ : 10eV-30eV and  $n_e$ :  $10^{18}$ - $10^{19}$  m<sup>-3</sup>, the dominant populating and depopulating processes concerning level  $2^2P_{3/2}$  are the electron impact excitation from the ground state and the radiative decay to ground state, respectively. On the basis of this knowledge rate equations for the theoretical model have been constructed.

We have developed the PACR model for the Lyman- $\alpha$  line. In the model each energy level is assigned with two quantities: population and alignment. Alignment is a measure of the population imbalance among the magnetic sublevels. The rate equations for the population and the alignment have been solved under the quasi steady-state approximation. The present model treats anisotropic EVDF having different electron temperatures in the directions parallel and perpendicular to the magnetic field. The theoretical polarization degree has been evaluated by considering the actual geometry of measurements and the plasma parameters of the edge LHD plasma.

From the comparison of theoretical and measured polarization degree anisotropy in EVDF has been evaluated for many LHD discharges. The dependence of anisotropy on electron density and electron temperature has been investigated. The results show that the anisotropy increases with increasing electron temperature and it doesn't exhibit any clear dependence on electron density. The increase in anisotropy in EVDF with increase in electron temperature can be attributed to reduced collisionality with increasing electron temperature.

In conclusion, by incorporating optical components provided by the CLASP team, an optical system has been designed and developed to obtain the polarization-resolved spectra of Lyman- $\alpha$  line at 121.56nm. Polarization degree and anisotropy in EVDF have been evaluated for many LHD discharges with various plasma parameters and their dependence on electron density at hydrogen emission has been investigated. Synthetic intensity profiles have been generated for Lyman- $\alpha$  emission on the spectrometer line of sight for the phase analysis of the profile. From the results obtained through this phase analysis, it has been found that the dominant contribution to the polarized radiation in the experimental intensity is from the inboard side plasma. The results also show that  $T_{\perp}$  is higher than  $T_{\parallel}$ .

The results on polarization spectroscopy of Lyman- $\alpha$  line obtained through the present thesis work give valuable information regarding anisotropy in the electron velocity distribution function in the edge LHD plasma, which can be very useful in theoretical calculations for understanding plasma confinement in plasma.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 Nilam Balkrishna NIMAVATTitle  
論文題目 Polarization spectroscopy of Lyman- $\alpha$  for the study of anisotropic electron velocity distribution function in fusion plasma

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける電子の速度分布関数の非等方性は、プラズマの閉じ込め性能と密接に関係する。例えば、コア部において電子サイクロトロン共鳴加熱により磁場に垂直方向に選択的に加速された電子は磁場リップルに捕捉されやすく、結果として粒子損失の増大につながると理解されている。中性粒子ビーム加熱ではビームの入射方向により加速される粒子の運動方向が異なるため、やはり粒子損失特性にも違いが生じていると考えられている。一方、プラズマ周辺部の閉じた磁気面が形成されていない領域では、磁場方向に主な速度成分を持つ電子は直ちにダイバータ領域へと導かれるのに対し、主に磁場に垂直な方向の速度成分を持ち磁場リップルに捕捉される電子は、プラズマ中に比較的長い時間滞留するため、速度分布関数に非等方的歪みを生じる可能性がある。このように、閉じ込め領域内外にわたって、電子の速度分布の非等方性は、プラズマの閉じ込め特性理解のために不可欠な要素であるが、その計測方法はこれまで確立していない。

非等方的速度分布関数を持つ電子との衝突により励起される原子もしくはイオンからの発光線が偏光する性質を利用し、観測される発光線の偏光特性から電子の速度分布関数の非等方性について情報を得る手法が 20 年ほど前に提案され理論的定式化がなされた。当時計測も試みられたが、対象とした不純物イオンにおいて 1%程度と予想された小さな偏光度の検出は困難で有意な結果は得られなかった。

最近、国立天文台の太陽偏光観測プロジェクト CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter) が、水素原子ライマンアルファ線に対して 0.1%程度の偏光の計測に成功しており、出願者は同様の手法を用いた核融合プラズマに対する偏光計測の着想を得た。出願者は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD で稼働している真空紫外分光器に CLASP で開発された主要な光学素子を組み込む光学設計を行い、計測の実現可能性を確認したのち、LHD での水素原子ライマンアルファ線の偏光計測の実施と、シミュレーションモデルを用いた解析により、電子の非等方的速度分布関数について定量的理解を得ることを研究の目的とした。

計測原理は、ブリュースター反射を利用した直線偏光成分の抽出に基づくが、光軸上に設置される 1/2 波長板を回転させることで、異なる角度の直線偏光成分を時系列で取得することができる。発光線が偏光している場合、1/2 波長板の回転と同期して線強度が変調し、その変調振幅の大きさから偏光度が導出される。実験では、最大 4%程度の偏光度の検出に成功し、電子密度の上昇とともに偏光度が低下する傾向を示す結果が得られた。

偏光の原因となる電子の速度分布関数は磁場方向に対して軸対称性を持つと考えられるため、強度が最大となる直線偏光成分の角度、つまり偏光の特性角から発光位置の磁場

方向を予想することができる。ライマンアルファ線の発光位置は過去の研究から、最外殻磁気面よりも外側のプラズマ周辺部であることが知られている。計測視線は横長ポロイダル断面を大半径方向に横切るため、視線が原子発光の見込まれるプラズマ周辺部を通過する領域はトーラス内側と外側の2か所存在する。計測された直線偏光の特性角が示唆する磁場方向がトーラス内側の発光位置での磁場方向とよく一致するため、この結果は、観測される偏光が主にトーラス内側での発光に起因することを示している。

このように、電子密度依存性が確認できるような高い精度での偏光計測の成功、さらに、偏光の特性角の同定は、磁場閉じ込め核融合実験装置では初めてのことであり、結果の学術的意義は高く、成果は査読付き論文としてすでに出版されている。

出願者は、観測により得られたライマンアルファ線の偏光度から速度分布関数の非等方性について定量的理解を得るため、シミュレーションモデルによる解析を行った。衝突輻射モデルと呼ばれる一般の原子モデルは、与えられたプラズマ条件における各励起準位のポピュレーションを求めるものであるが、偏光度のシミュレーションのためには、ポピュレーションの他にアライメントと呼ばれる磁気副準位間のポピュレーションの不均一性を表すパラメータの導入が必要となる。出願者は、必要な原子データを文献等から収集し、ライマンアルファ線に対するシミュレーションモデルを構築した。電子の非等方的速度分布として、磁場方向および磁場に垂直方向で異なる温度を持つような関数を仮定した。シミュレーションに必要な電子温度および電子密度の値は、想定する発光位置でのトムソン散乱計測の結果を用いた。電子温度については、トムソン散乱計測による値を磁場に垂直方向の電子温度として固定し、磁場方向の温度を変化させながら偏光度との関係を調べた。低電子密度領域で観測されたある放電の偏光度は、磁場に垂直方向の温度が磁場方向温度の2倍程度である場合に再現された。本成果についても査読付き論文としてすでに発表されている。

電子密度の上昇に伴う偏光度低下の機構として二つの要因が検討された。ひとつは、速度分布関数自体の非等方性の緩和で、励起過程が等方的になるためである。もうひとつは、励起後の電子衝突により磁気副準位間のポピュレーションが均一化されることである。この機構により、電子の速度分布関数の非等方性に変化が生じなくとも、電子密度上昇により発光線の偏光度は原則として低下する。しかしながら、実際に観測されたデータから磁場方向と磁場に垂直方向の「電子温度差」を求めた結果、同じ電子密度でも「電子温度差」に大きな違いが見られる場合があるなど、明確な電子密度依存性は確認されなかった。

出願者は、このような「電子温度差」が大きく異なる放電の間では、トムソン散乱計測による電子温度、つまり磁場に垂直方向の電子温度に大きな違いがあることに注目して全データを整理し直した結果、トムソン散乱計測による電子温度が高いほど、「電子温度差」が大きくなるような顕著な傾向を見出した。このような結果を包括的に説明する物理機構の解明にはさらなる研究の深化が必要であるが、磁場閉じ込め核融合プラズマに対して、非等方的電子速度分布関数の電子温度依存性を実験的に示したのは初めてであり、これも本研究の主要な成果の一つとみなすことができる。

本研究の結果は、周辺プラズマの粒子輸送特性研究に新たな知見を与えるものであり、重要な成果である。また、本研究で用いた計測手法は、発光線の選択によりプラズマ周辺のみならずコア部の計測にも応用が可能であり、今後、粒子輸送研究の高精度化への貢献

が期待される。プラズマ分光学の観点からも、これまで困難であった発光線の微小な偏光の計測が実現したことは新たな研究分野開拓の契機となるものであり、本論文の内容は博士（理学）の授与に値すると結論した。