

# 太陽大気偏光観測手法の LHDプラズマ計測への応用

後藤基志 核融合科学研究所

M03a

# **Lya**線 偏光分光観測ロケット **CLASP** が切り拓く太陽彩層磁場測定

鹿野良平(国立天文台)

常田佐久、坂東貴政(**NAOJ**)、成影典之(**ISAS**)、石川遼子、久保雅仁、  
勝川行雄、末松芳法、原 弘久(**NAOJ**)、久保雅稔(明星大)、  
**DONG UK SONG(SNU)**、一本 潔、渡邊皓子(京大)、  
坂尾太郎(**ISAS**)、**KEN KOBAYASHI(UAH)**、**JONATHAN**  
**CIRTAIN(NASA)**、**JAVIER TRUJILLO BUENO(IAC)**

2011/9/20

日本天文学会2011年秋季年会

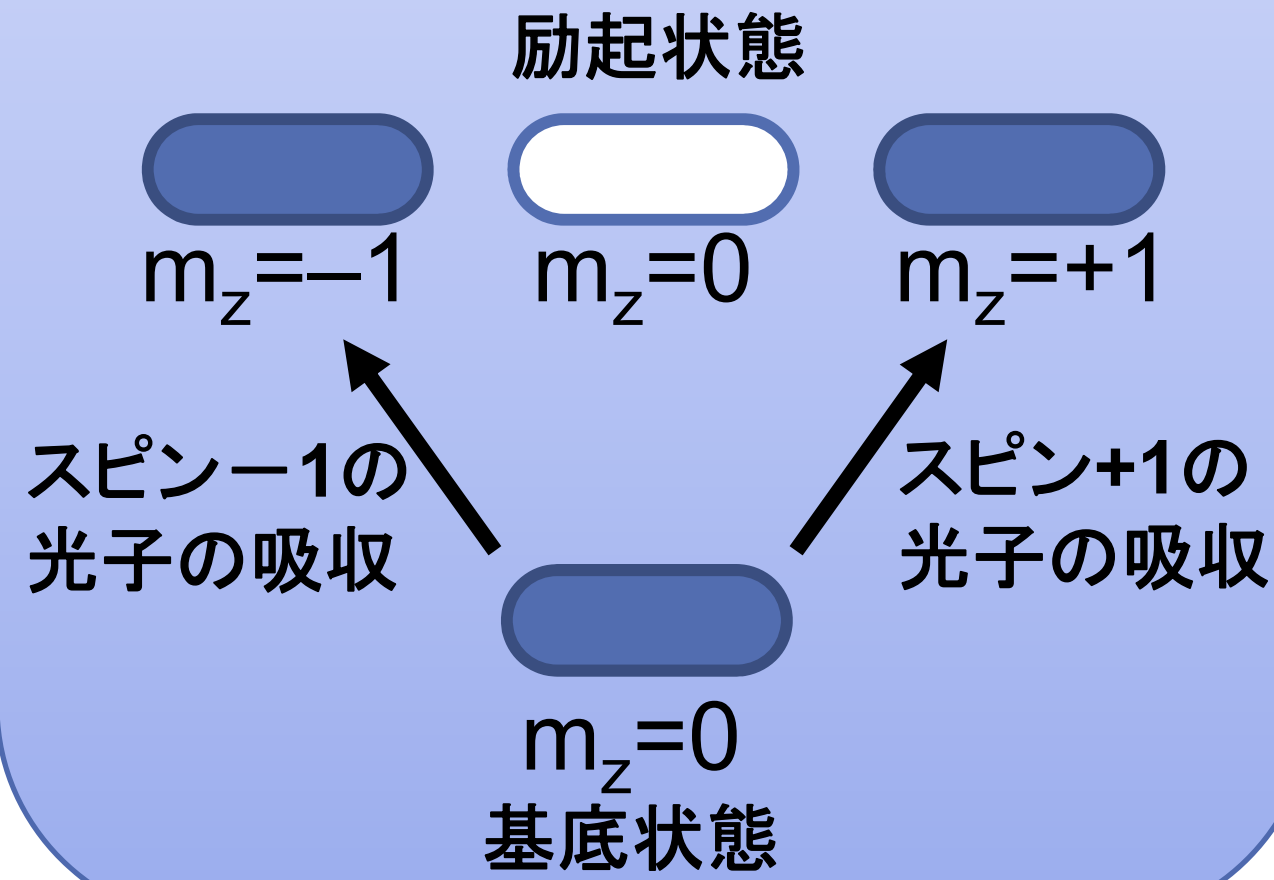
鉛直軸に対する量子化

量子化軸の変更

磁場の軸に対する量子化

### STEP1

非等方放射場による  
不均一な励起  
(**atomic polarization**)



### STEP2

量子化軸変更でatomic polarizationが混合し、  
副準位間が同位相化(**atomic coherence**)

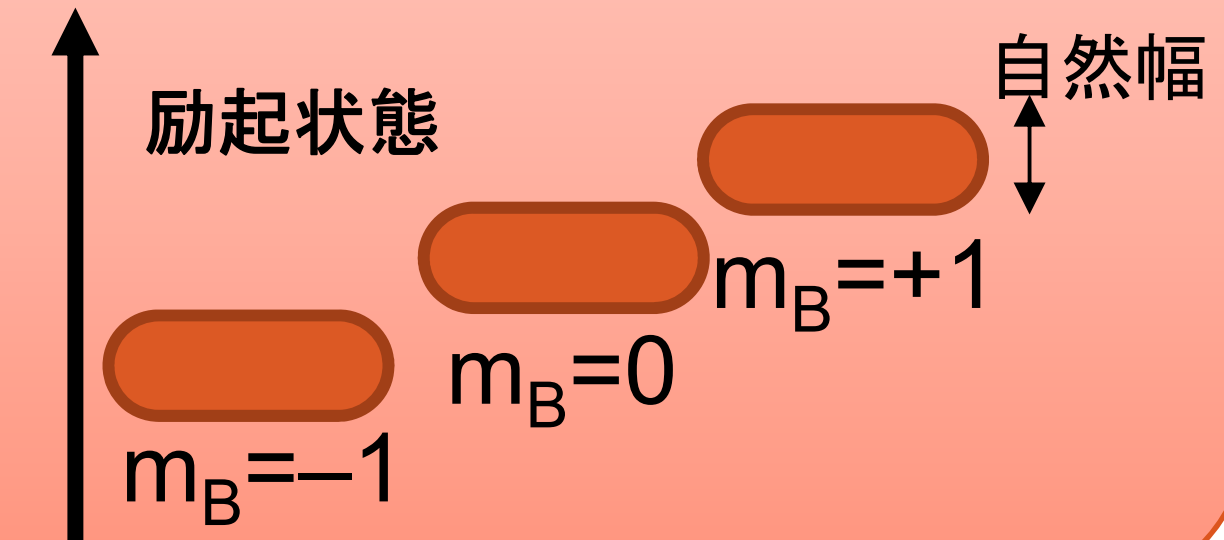
$$|B+\rangle = \frac{1+\cos\theta}{2}|z+\rangle + \frac{\sin\theta}{\sqrt{2}}|z0\rangle + \frac{1-\cos\theta}{2}|z-\rangle$$

$$|B0\rangle = \frac{-\sin\theta}{\sqrt{2}}|z+\rangle + \cos\theta|z0\rangle + \frac{\sin\theta}{\sqrt{2}}|z-\rangle$$

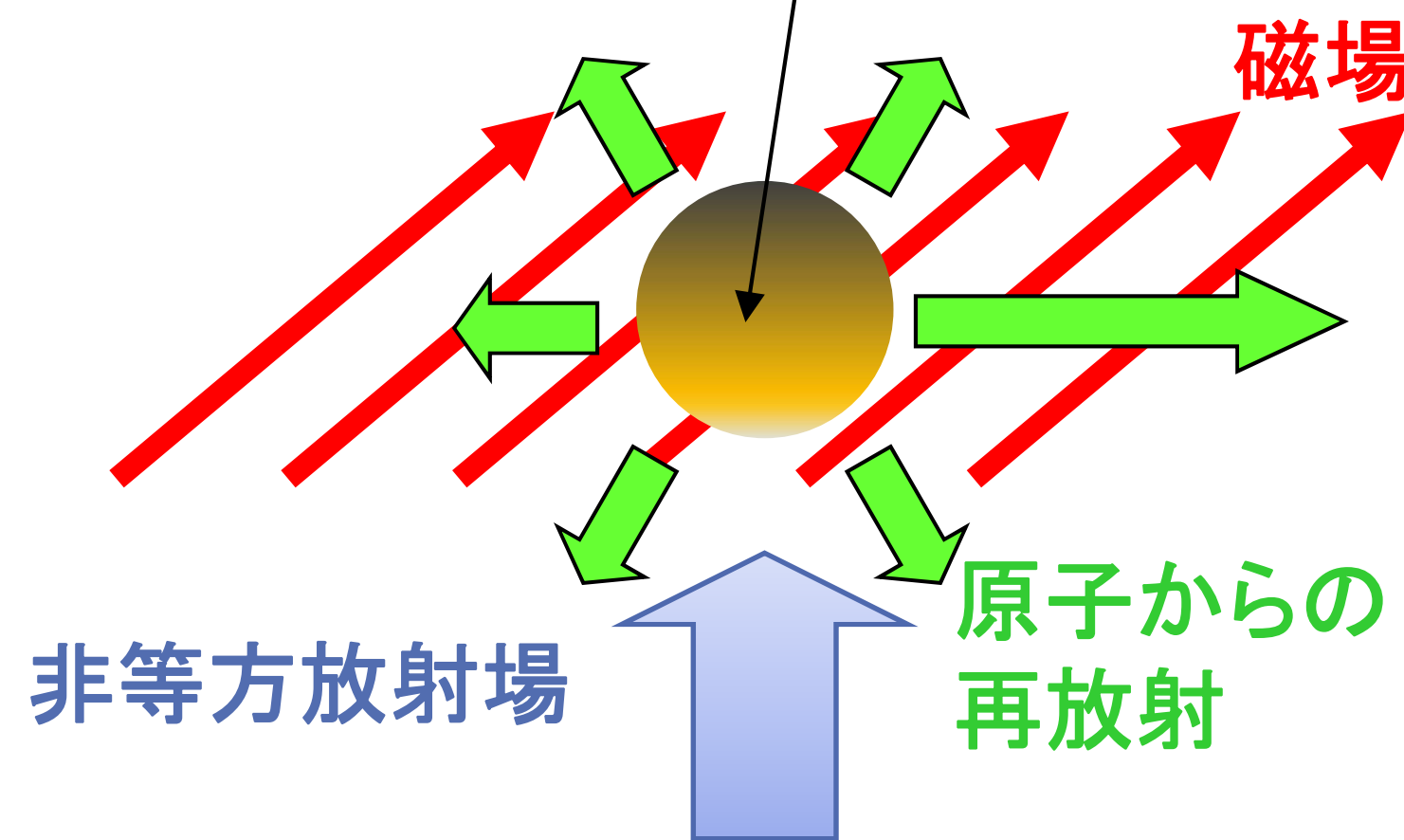
$$|B-\rangle = \frac{1-\cos\theta}{2}|z+\rangle + \frac{-\sin\theta}{\sqrt{2}}|z0\rangle + \frac{1+\cos\theta}{2}|z-\rangle$$

### STEP3

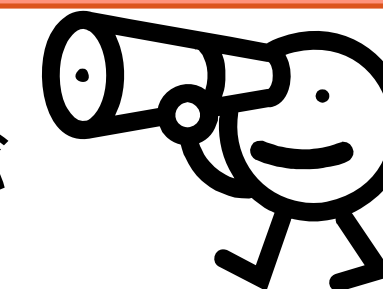
磁場により縮退が解かれ、  
atomic coherence度が変化



観測対象の  
水素原子



atomic coherenceが  
視線方向に対する  
量子化でも残り、  
**偏光**として観測される。



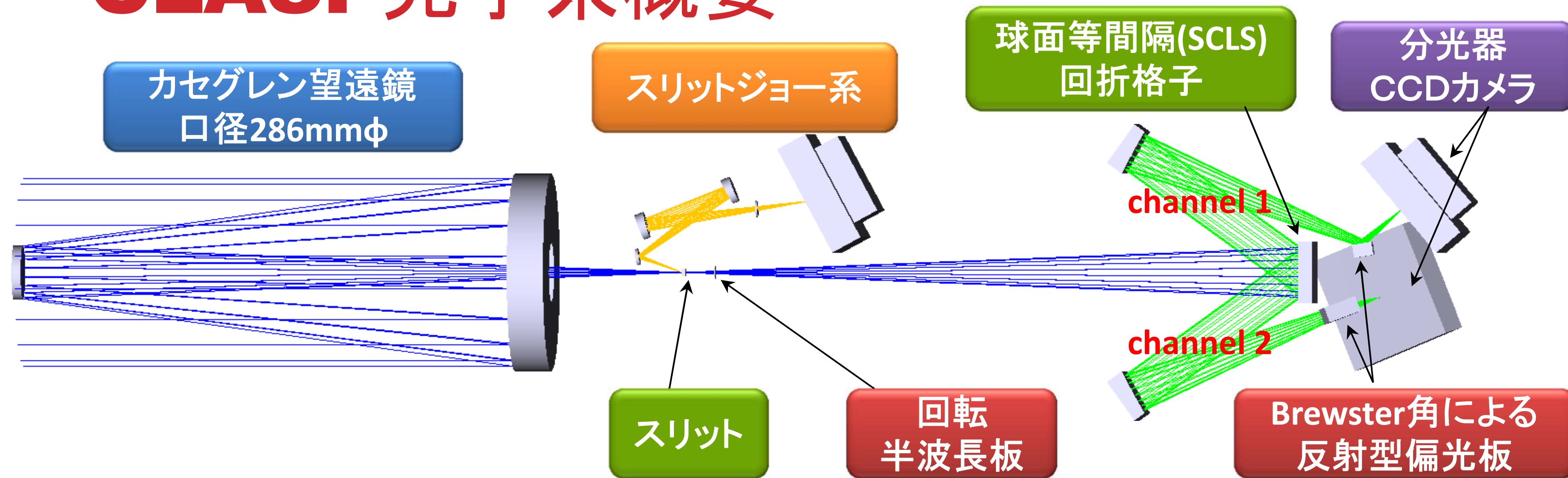
## Hanle 効果とは

2011/9/20

日本天文学会2011年秋季年会

光球面

# CLASP光学系概要



- カセグレン望遠鏡(口径286mmφ)
  - 主鏡は“Cold Mirror” coatingを施す。
  - 空間分解能～数秒角
- 偏光分光器
  - 等間隔球面回折格子をinverse Wadsworth mountingに配置。
  - **+1次光と-1次光の両方を使い、直交2成分の直線偏光の同時測定。**
  - 回転1/2波長板と反射型偏光板によるStokes-I,Q,Uの測定。
  - 波長分解能 0.1 Å (0.05 Å sampling)。
- 観測時間: ~ 300 sec

2011/9/20

日本天文学会2011年秋季年会

W21b:坂東貴政ほか CLASP観測装置全般  
W20b:久保雅仁ほか CLASP偏光解析装置の試験結果



# Discovery of Scattering Polarization in the Hydrogen Ly $\alpha$ Line of the Solar Disk Radiation

R. Kano<sup>1</sup>, J. Trujillo Bueno<sup>2,3,4</sup>, A. Winebarger<sup>5</sup>, F. Auchère<sup>6</sup>, N. Narukage<sup>1</sup>, R. Ishikawa<sup>1</sup>, K. Kobayashi<sup>5</sup>, T. Bando<sup>1</sup>, Y. Katsukawa<sup>1</sup>, M. Kubo<sup>1</sup>, S. Ishikawa<sup>7</sup>, G. Giono<sup>1,8</sup>, H. Hara<sup>1</sup>, Y. Suematsu<sup>1</sup>, T. Shimizu<sup>7</sup>, T. Sakao<sup>7</sup>, S. Tsuneta<sup>7</sup>, K. Ichimoto<sup>9</sup>, M. Goto<sup>10</sup>, L. Belluzzi<sup>11,12</sup>, J. Štěpán<sup>13</sup>, A. Asensio Ramos<sup>3</sup>, R. Manso Sainz<sup>14</sup>, P. Champey<sup>15</sup>, J. Cirtain<sup>16</sup>, B. De Pontieu<sup>17</sup>, R. Casini<sup>18</sup>, and M. Carlsson<sup>19</sup>

<sup>1</sup> National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan; [ryouhei.kano@nao.ac.jp](mailto:ryouhei.kano@nao.ac.jp)

<sup>2</sup> Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife, E-38205, Spain

<sup>3</sup> Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna, E-38206 La Laguna, Tenerife, Spain

<sup>4</sup> Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Spain

<sup>5</sup> Marshall Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Huntsville, AL 35812, USA

<sup>6</sup> Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris Sud, Batiment 121, F-91405 Orsay, France

<sup>7</sup> Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

<sup>8</sup> The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), Hayama, Kanagawa 240-0193, Japan

<sup>9</sup> Hida Observatory, Kyoto University, Takayama, Gifu 506-1314, Japan

<sup>10</sup> National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

<sup>11</sup> Istituto Ricerche Solari Locarno, CH-6605 Locarno Monti, Switzerland

<sup>12</sup> Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, D-79104 Freiburg, Germany

<sup>13</sup> Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, 25165 Ondřejov, Czech Republic

<sup>14</sup> Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3, D-37077 Göttingen, Germany

<sup>15</sup> University of Alabama in Huntsville, 301 Sparkman Drive, Huntsville, AL 35899, USA

<sup>16</sup> University of Virginia, Department of Astronomy, 530 McCormick Road, Charlottesville, VA 22904, USA

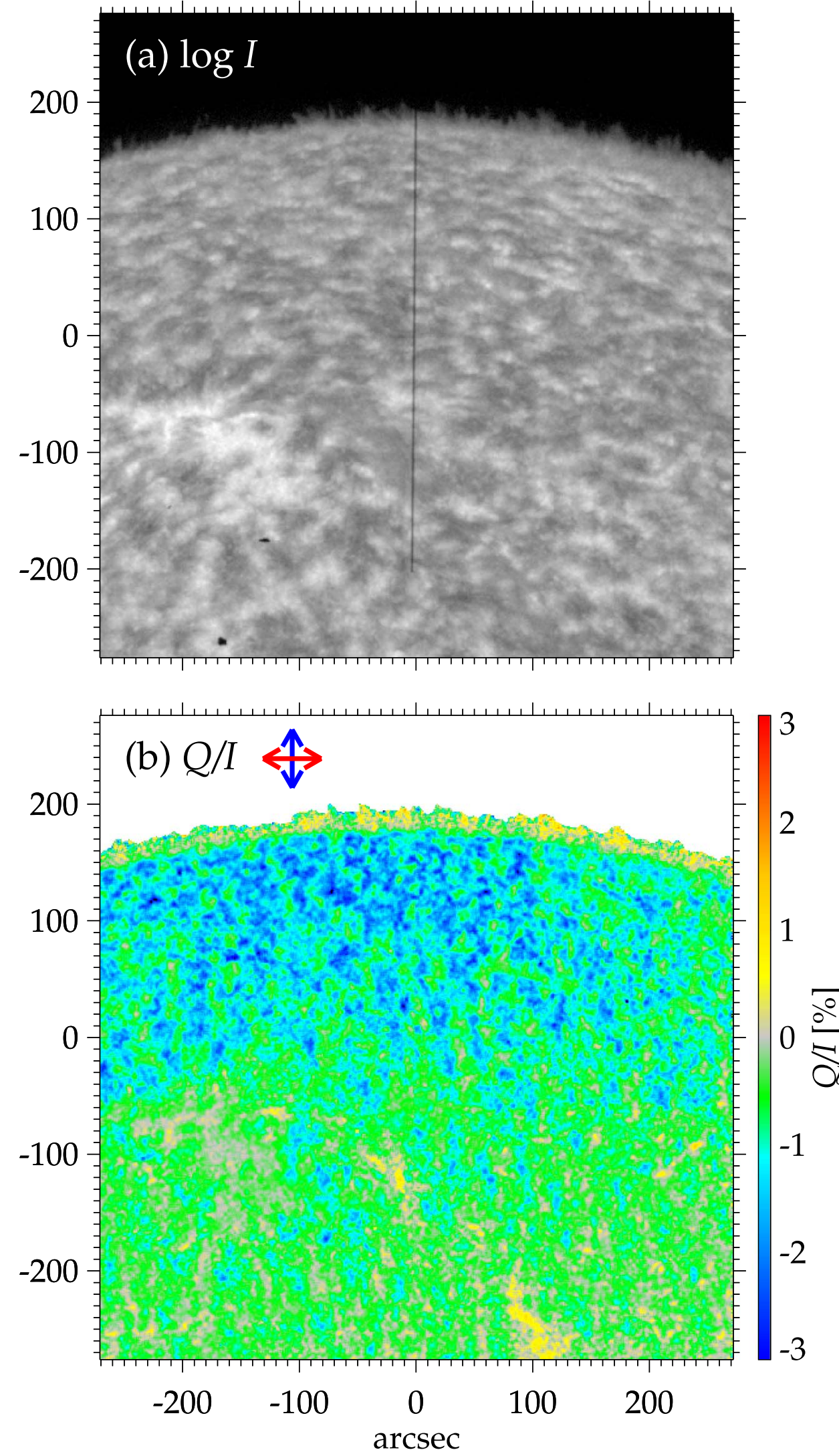
<sup>17</sup> Lockheed Martin Solar & Astrophysics Laboratory, Palo Alto, CA 94304, USA

<sup>18</sup> High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Post Office Box 3000, Boulder, CO 80307-3000, USA

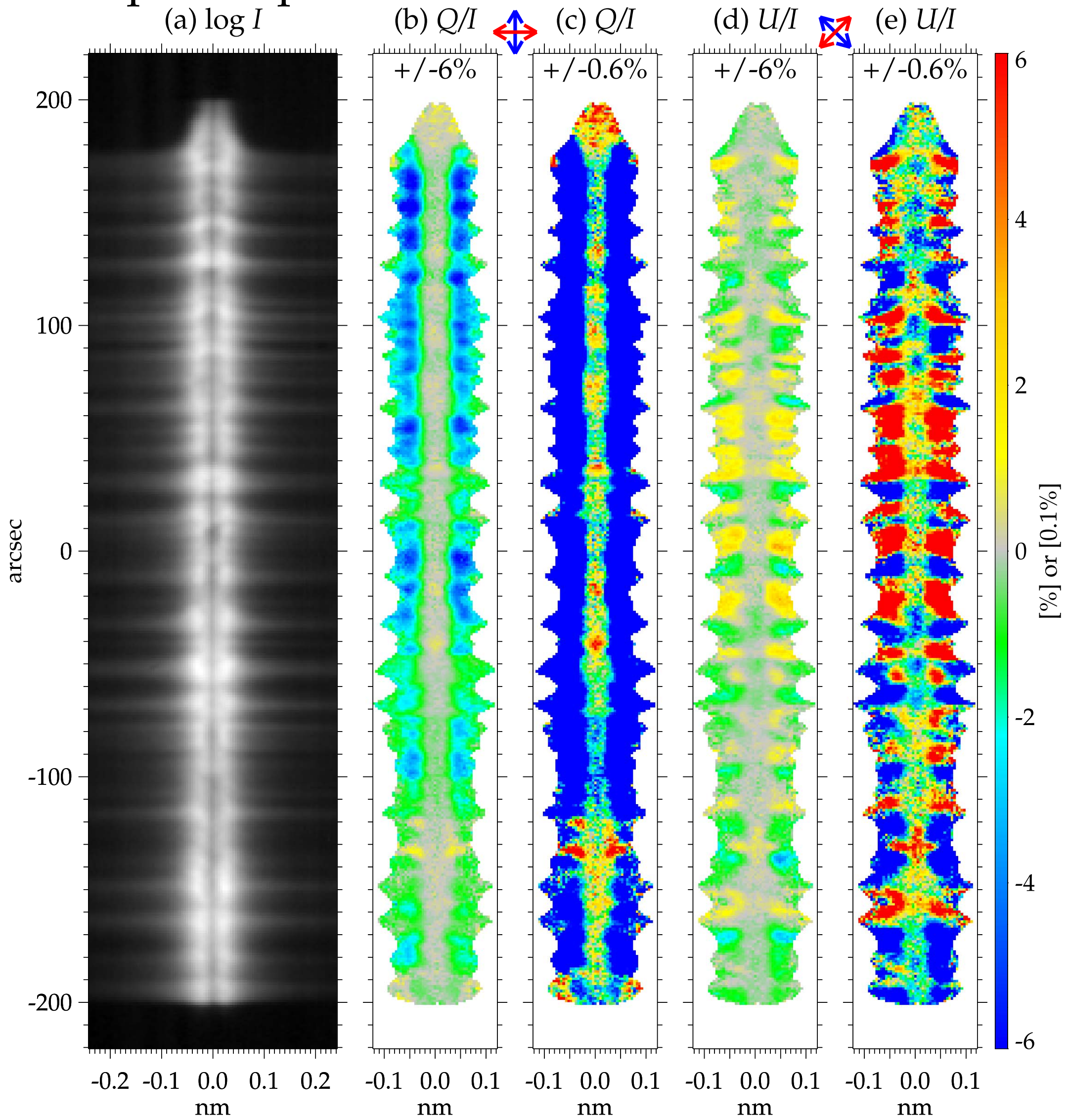
<sup>19</sup> University of Oslo, Postboks 1029 Blindern, NO-0315 Oslo, Norway

*Received 2017 March 24; accepted 2017 March 26; published 2017 April 10*

## A: slit-jaw data



## B: spectro-polarimeter data



**Figure 1.** CLASP data. (A) Broadband Ly $\alpha$  (a) intensity and (b)  $Q/I$  images taken by the CLASP slit-jaw camera. The black line in (a) indicates the spectrograph's slit, which covers 400 arcsec. (B) Variation along the slit of the intensity ( $I$ ) and fractional polarization ( $Q/I$  and  $U/I$ ) profiles of the hydrogen Ly $\alpha$  line observed by the CLASP spectropolarimeter. The solar limb is at +175 arcsec. (a) Stokes  $I$  in logarithmic scale, (b, c) Stokes  $Q/I$ , and (d, e) Stokes  $U/I$ . The fractional polarization is clipped between  $\pm 6\%$  in (b) and (d) for an optimal visualization of the wings and between  $\pm 0.6\%$  in (c) and (e) for the line core. The reference directions for positive Stokes  $Q$  and  $U$  are indicated by the red arrows in the corresponding (B) panels.

# 本研究実施体制

理論構築

装置開発

Javier  
Trujillo-Bueno  
(カナリア諸島  
天体物理学研究所)

国立天文台  
鹿野良平・成影典之  
Instrument Scientist

小林 研  
(アラバマ大学)

高精度偏光測定  
の  
観測装置開発

核融合研究所  
後藤基志

偏光線輪郭形成の  
理論的モデルの構築

分子科学研究所  
観測装置の性能評価

(分子研のシンクロトロン放射光施設  
UVSORは高輝度・高偏光のLy $\alpha$ 光源と  
して、CLASP装置性能評価に最適)

Takashi Fujimoto  
Atsushi Iwamae  
Editors

SPRINGER SERIES ON ATOMIC, OPTICAL AND PLASMA PHYSICS 44

# Plasma Polarization Spectroscopy

 Springer

---

## Contents

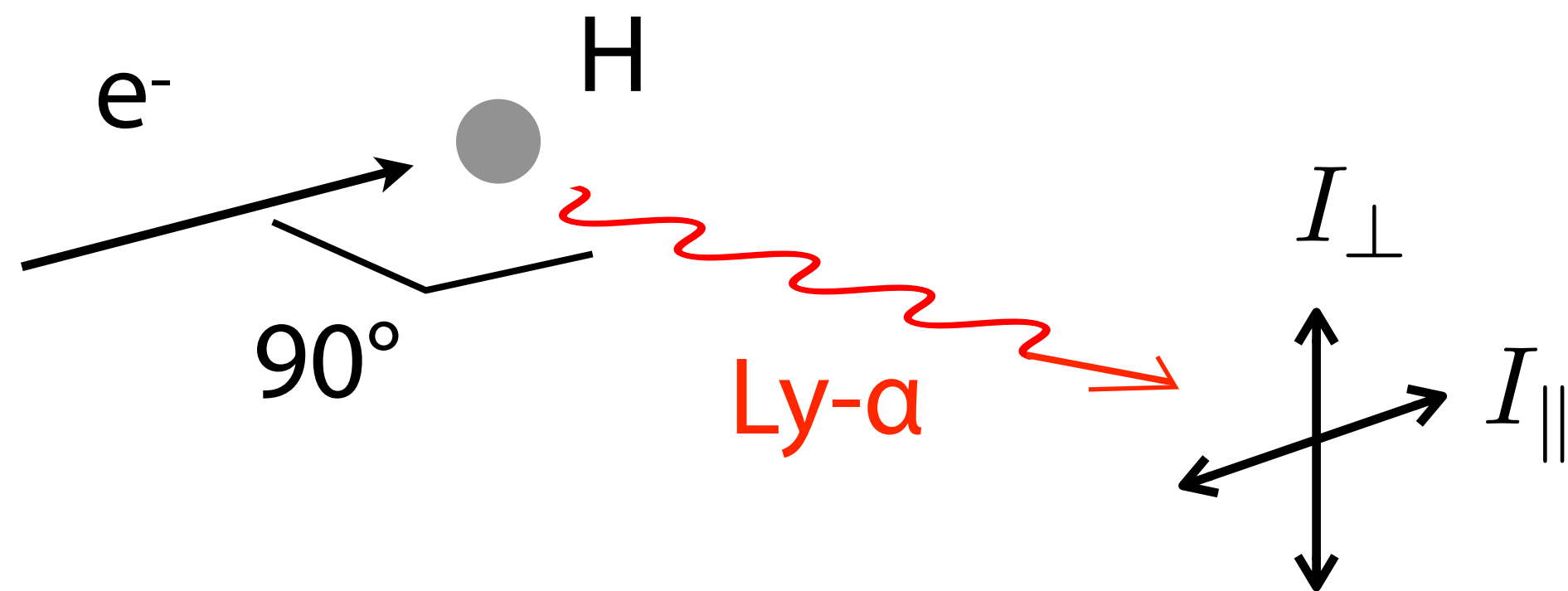
<b>1 Introduction</b>	
<i>T. Fujimoto</i> .....	1
1.1 What is Plasma Polarization Spectroscopy? .....	1
1.2 History of PPS .....	5
1.3 Classification of PPS Phenomena .....	7
1.4 Atomic Physics .....	8
References .....	10
<b>2 Zeeman and Stark Effects</b>	
<i>M. Goto</i> .....	13
2.1 General Theory .....	13
2.2 Zeeman Effect .....	17
2.3 Stark Effect .....	20
2.4 Combination of Electric and Magnetic Fields.....	25
References .....	27
<b>3 Plasma Spectroscopy</b>	
<i>T. Fujimoto</i> .....	29
3.1 Collisional-Radiative Model: Rate Equations for Population .....	29
3.2 Ionizing Plasma and Recombining Plasma .....	34
3.2.1 Ionizing Plasma Component.....	34
3.2.2 Recombining Plasma Component .....	39
3.2.3 Ionizing Plasma and Recombining Plasma.....	45
References .....	49
<b>4 Population-Alignment Collisional-Radiative Model</b>	
<i>T. Fujimoto</i> .....	51
4.1 Population and Alignment .....	51
4.2 Excitation, Deexcitation and Elastic Collisions: Semiclassical Approach.....	55
4.2.1 Monoenergetic Beam Perturbors and Cross Sections .....	56
4.2.2 Axially Symmetric Distribution.....	58



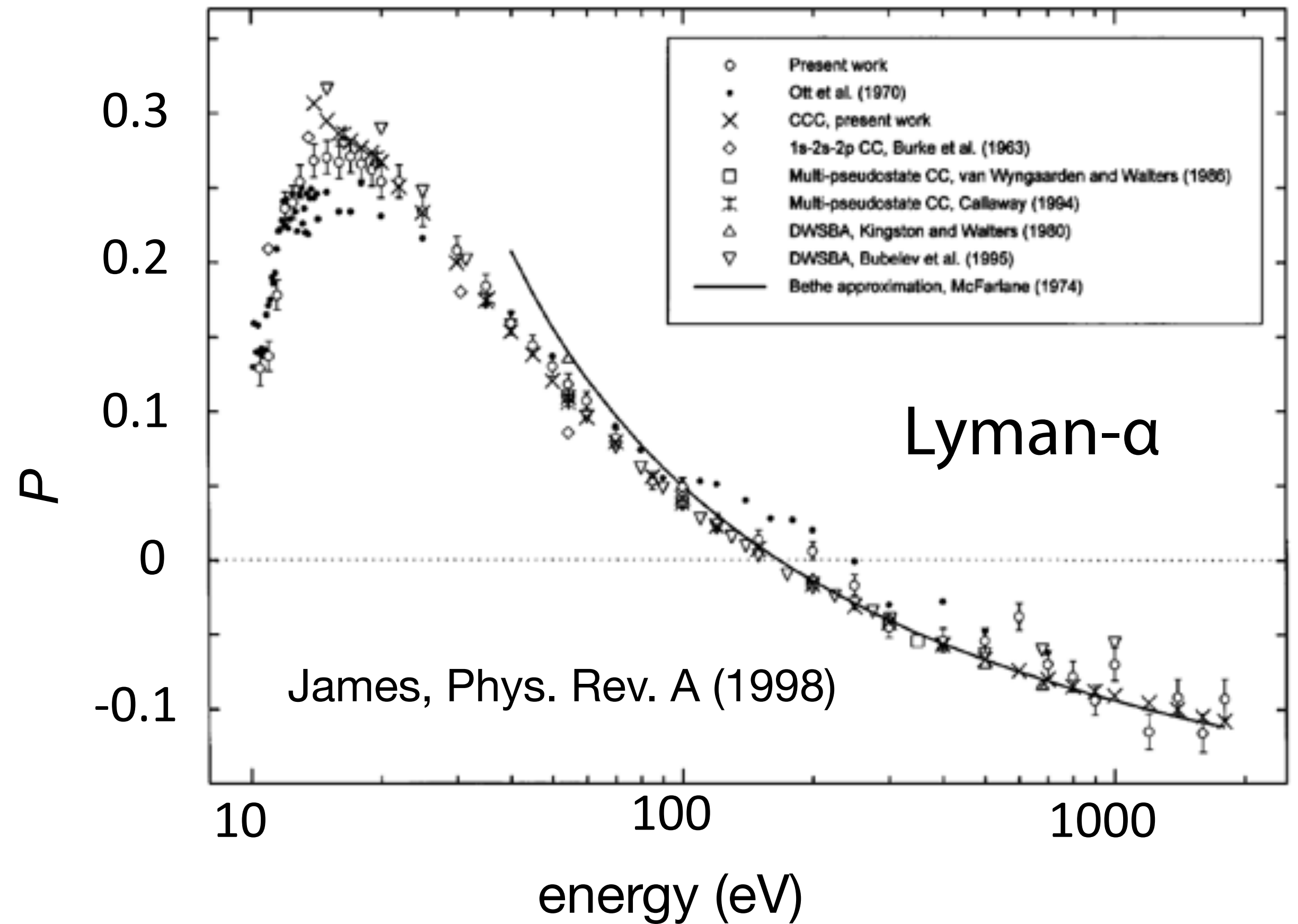
2010年8月	CLASPへの参加の打診
2010年9月	CLASPに関する最初の打合せ @NIFS
2011年4月	CLASP特別講義 (第1回) @NAOJ
2011年12月	CLASP特別講義 (第2回) @NAOJ
2012年1月	CLASP特別講義 (第3回) @NAOJ
2012年6月	IAC (@Tenerife, Spain) 出張
2012年7月	CLASP特別講義 (第4回) @NAOJ
2012年7月	HAO (@Boulder, USA) 出張
2012年8月	Hinode-6 (@St. Andrews) 出席
2012年11月	国立天文台併任
2013年7月	CLASP特別講義 (第5回) @NAOJ
2013年9月	SPW7 (@昆明)にて発表

2013年11月	Hinode-7 (@高山) にて発表
2014年6月	ICSLS22 (@Tullahoma, USA) にてハンレ効果について発表
2014年10月	LHDでの衝突偏光計測開始
2014年12月	ITC24にてハンレ効果について発表
2015年9月	CLASP観測成功
2017年9月	天文学会発表
2017年11月	ISHWにて衝突偏光計測について報告
2019年6月	ハンレ効果関連論文発表
2019年6月	ICSLS24 (@Dublin) にて衝突偏光計測について報告
2019年9月	衝突偏光計測の研究で指導学生が学位取得
2020年12月	衝突偏光計測に関して論文発表
2021年2月	衝突偏光計測に関して論文発表

# anisotropic collisions give rise to polarized line emissions



$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$



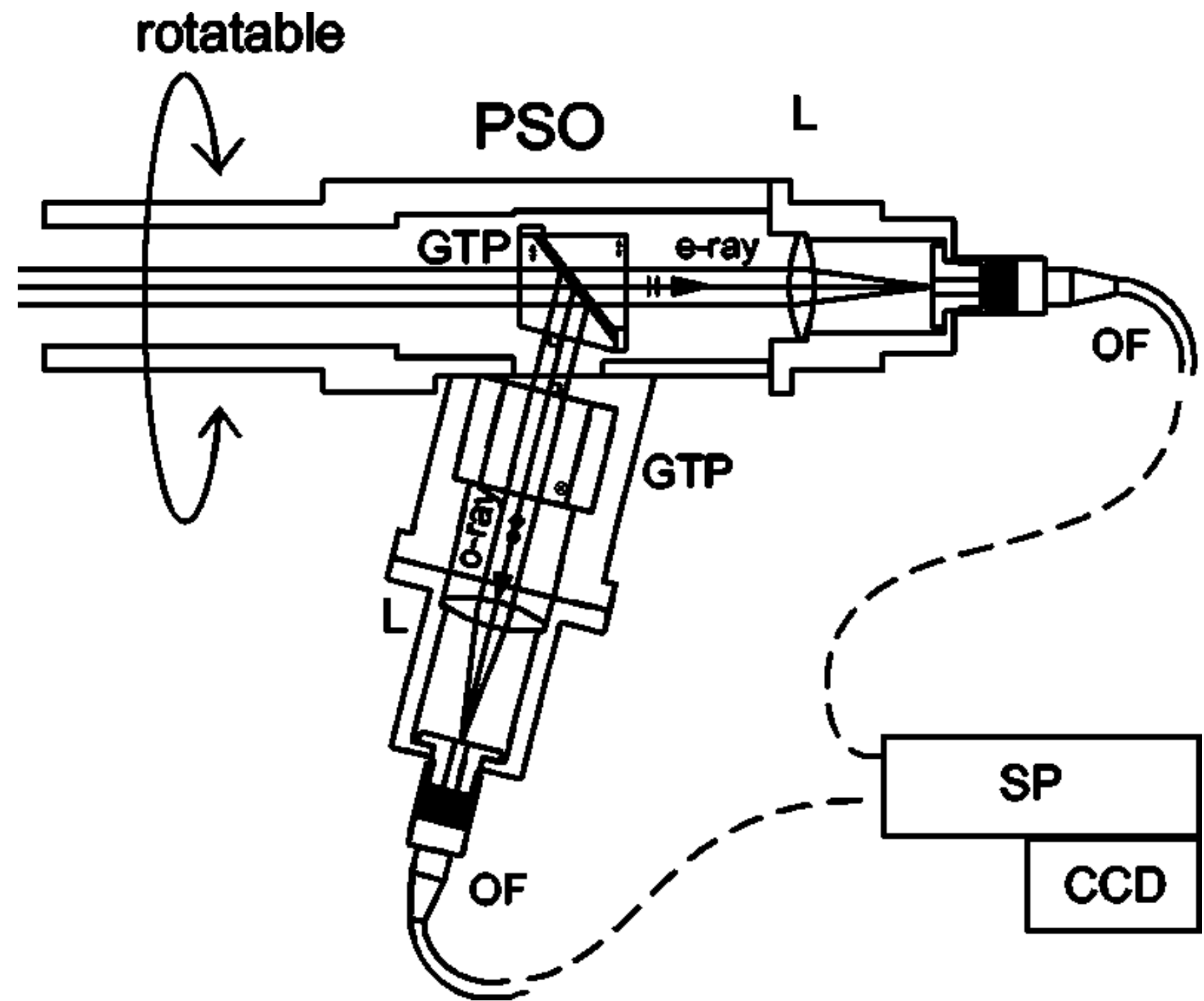


FIG. 4. Polarization separation optics (PSO). GTP: Glan–Taylor prism. L: Lens. OF: optical fiber of 400  $\mu\text{m}$  core diameter. SP: Spectrometer. CCD: charge-coupled device.

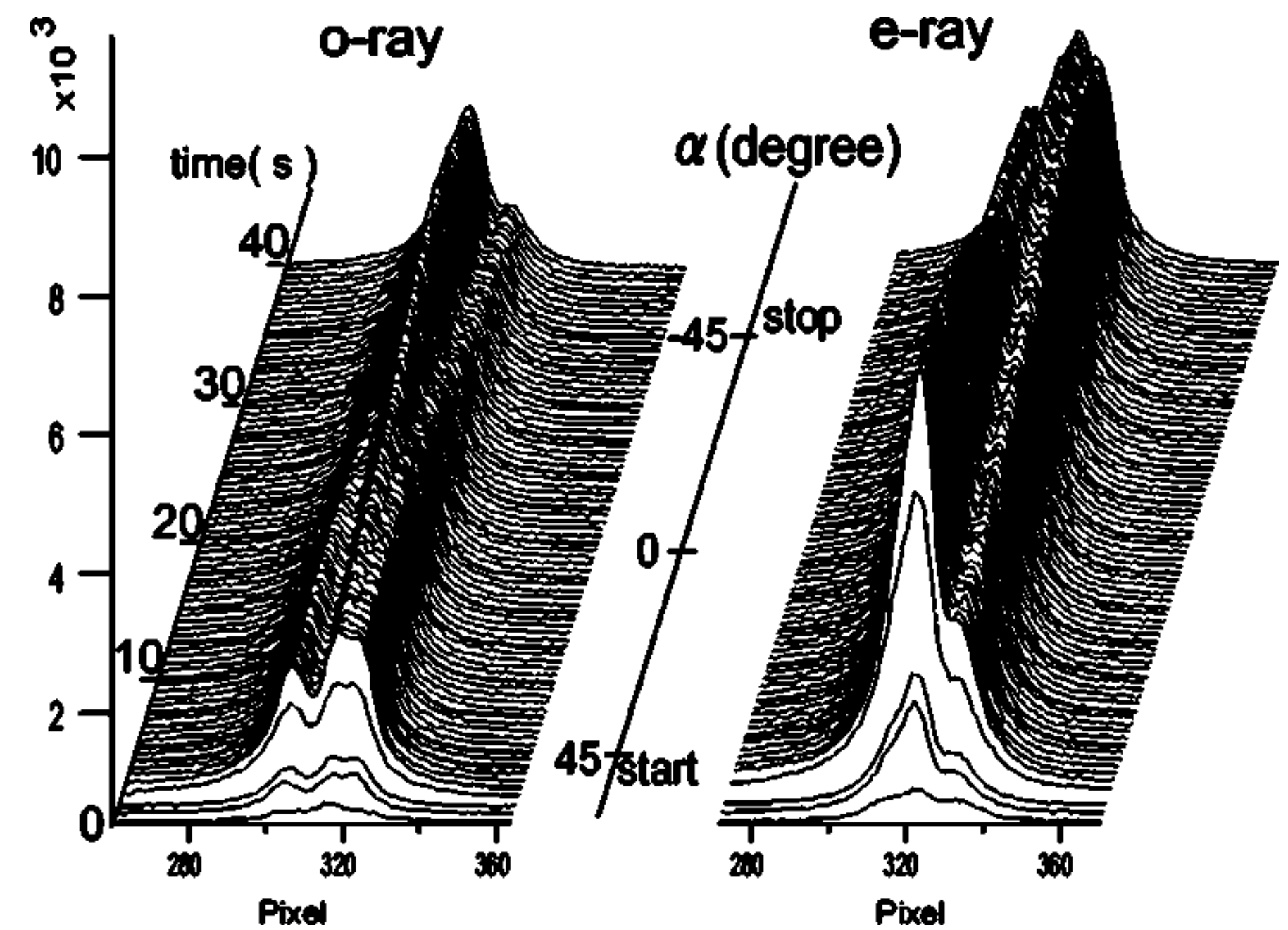
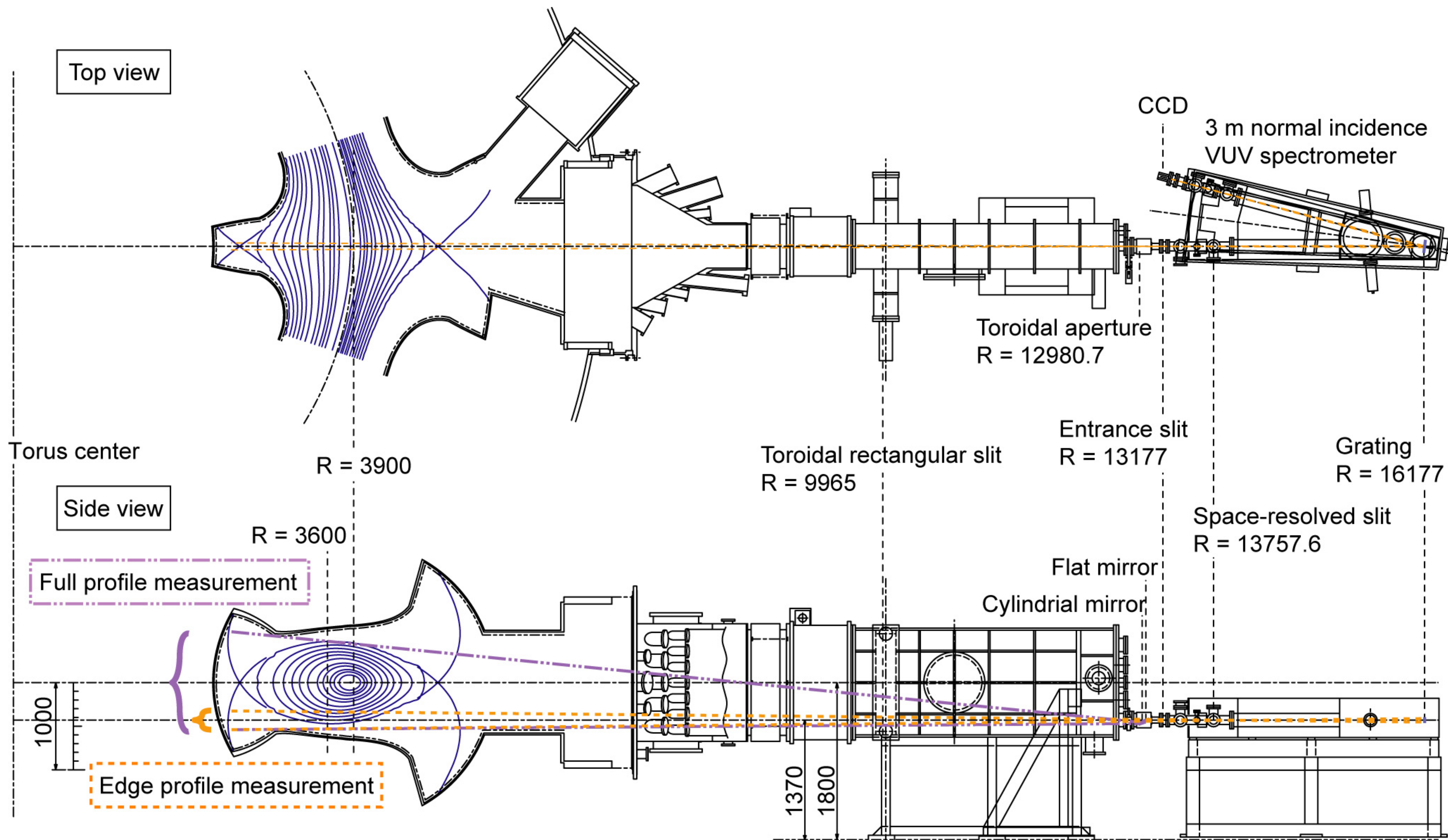
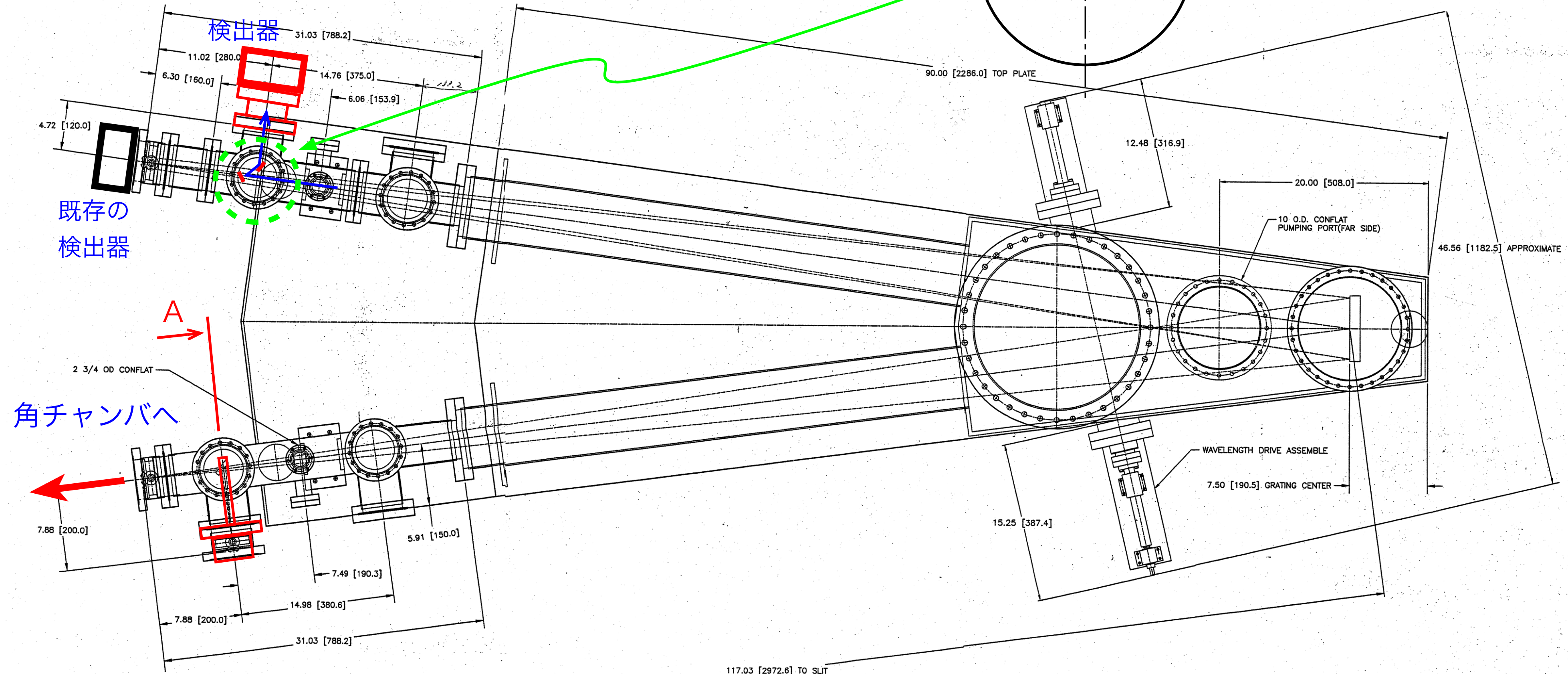
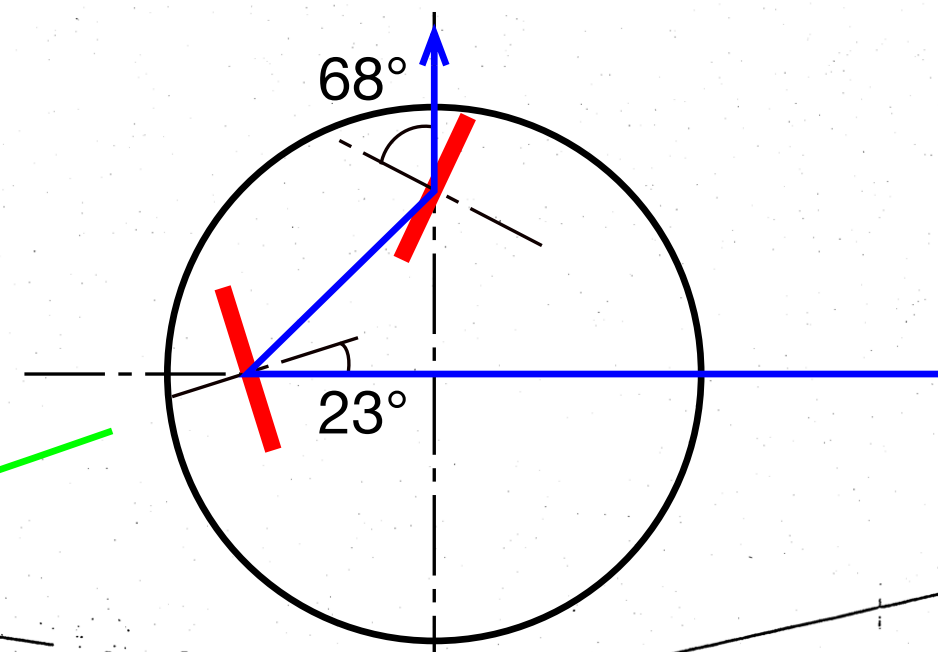


FIG. 5. Dependence of the profiles of the  $H_{\alpha}$  line spectra separated into the *e*-ray and *o*-ray components on the rotation angle of PSO. This is for an NBI discharge plasma (shot No. 41 312).



# 3m直入射分光器平面図

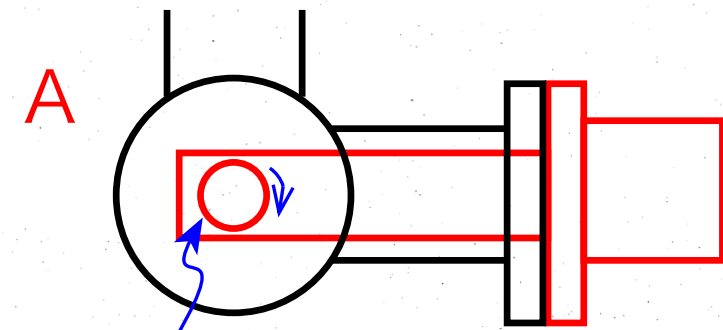
高反射率ミラーとアナライザで90度方向へ反射。  
上から挿入し，不使用時は引き上げる。



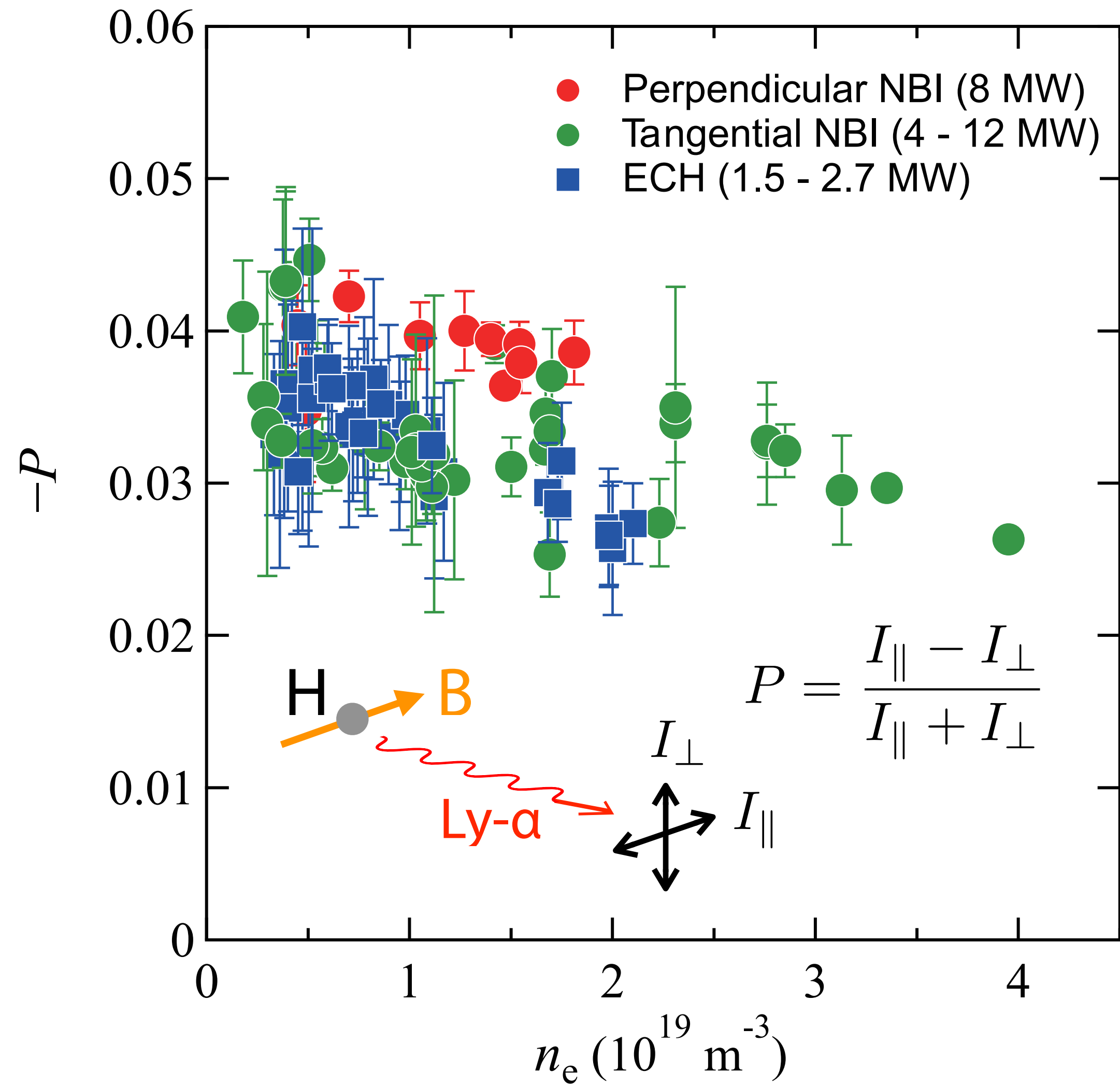
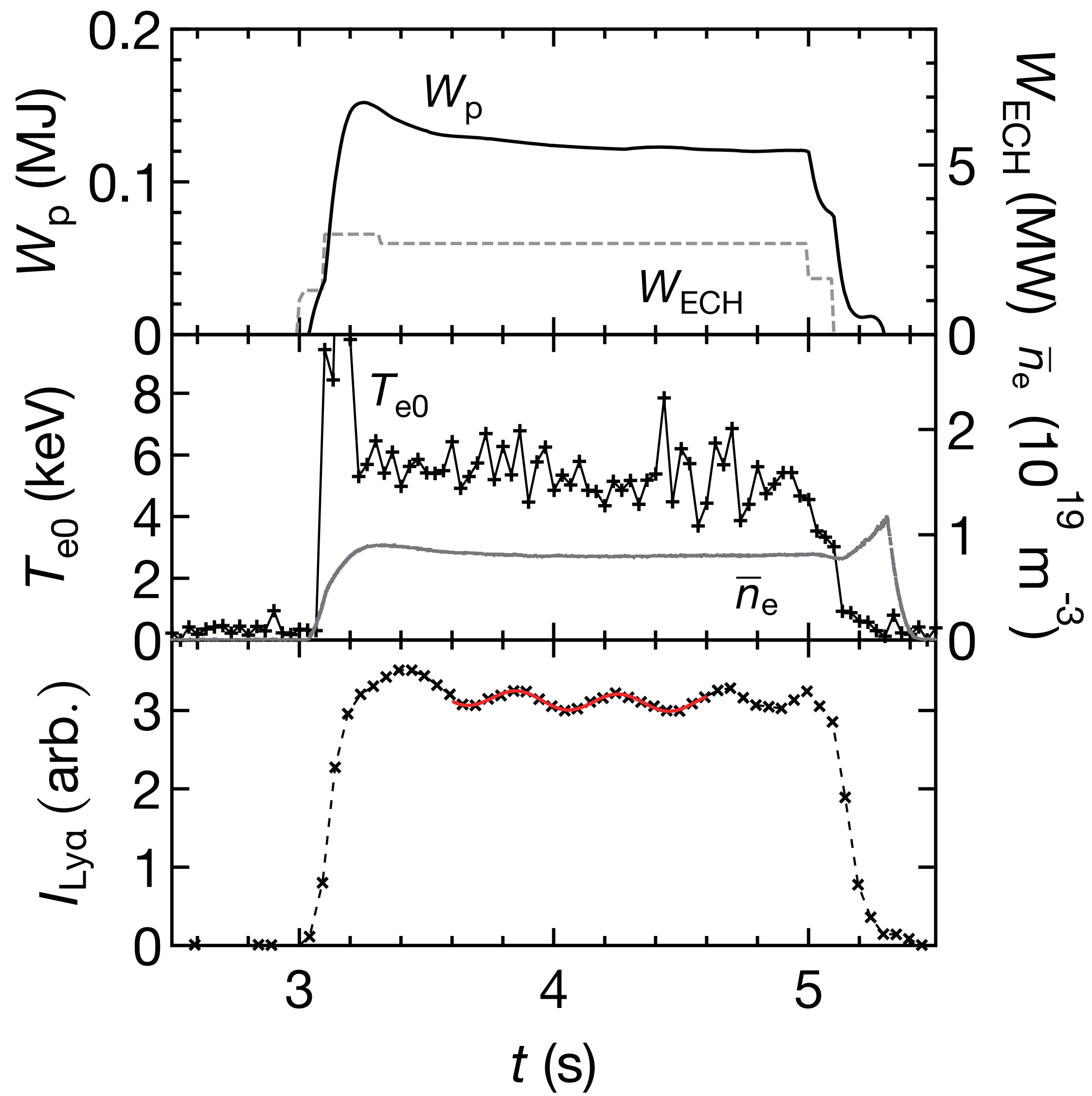
既存の  
検出器

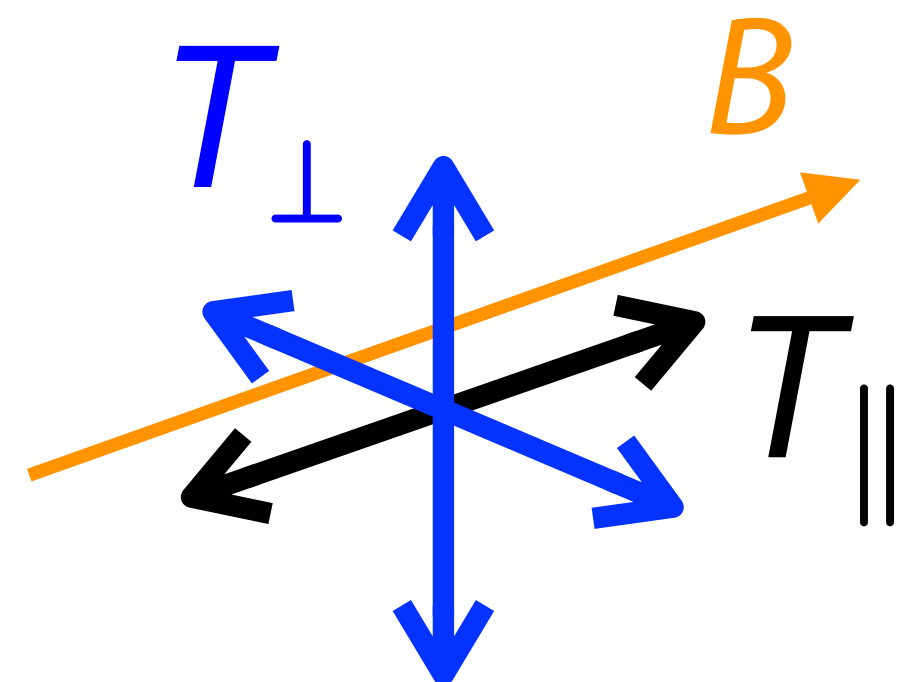
検出器

角チャンバへ

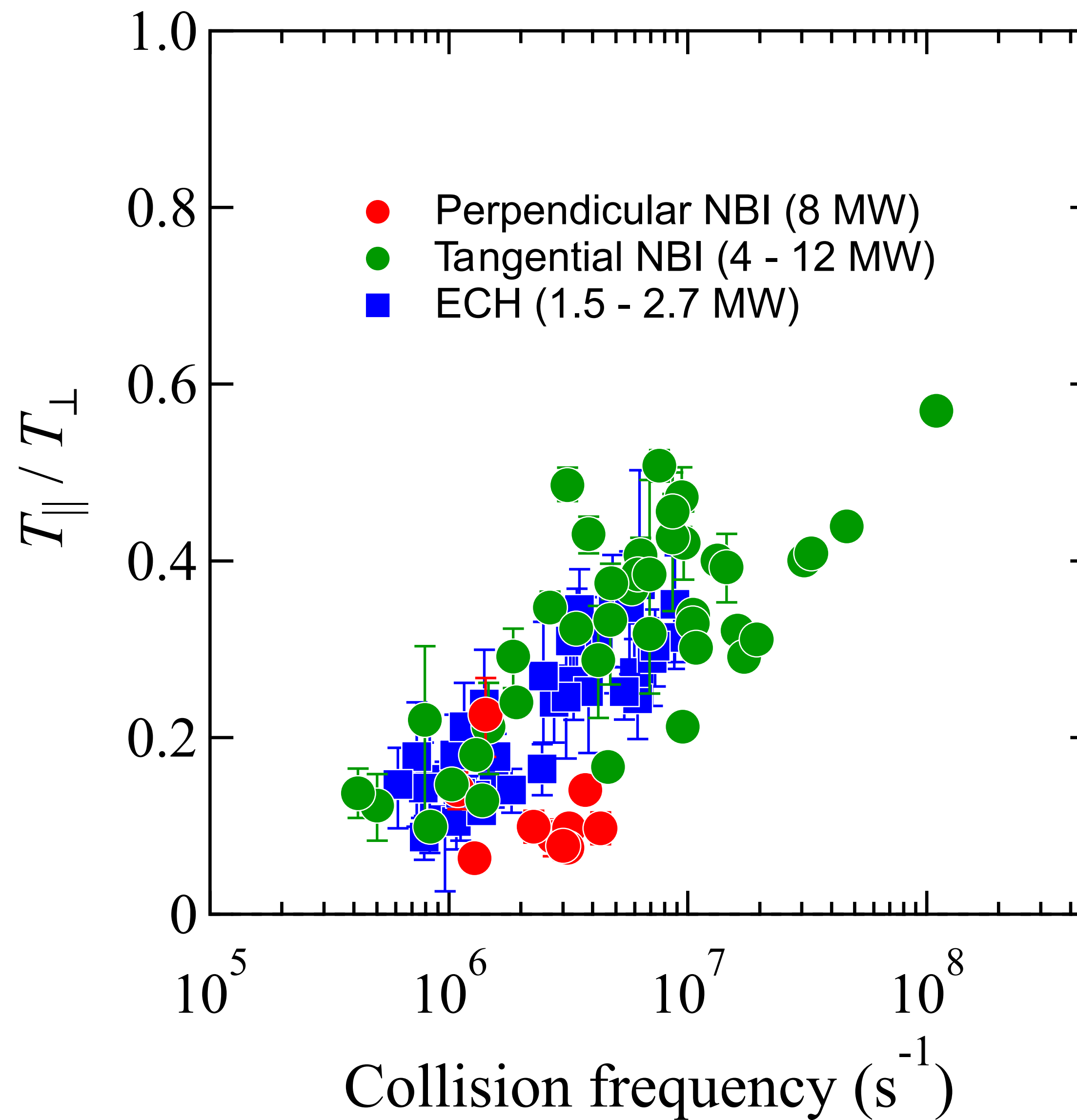


1/2波長板を10Hz程度で回転させる。  
不使用時は引き出す。





anisotropy in terms of  $T_{||}/T_{\perp}$  derived from  $P$



- 1. これまでの連携研究の成果**
- 2. これまでの連携研究に期待したこと，得られたこと**
- 3. これまでの連携研究を実施した枠組みや研究体制**
- 4. 今後の連携研究の展開や，新しく連携したい課題について**

それぞれの分野における具体的な課題をお互いに紹介する研究会があれば、そこに出席することで自分の知識や経験が役立つところ、あるいは自分の抱えている問題解決への手がかりが見つかることもあるかもしれない。