

土星の偏光観測

川上碧、伊藤洋一、高橋隼（兵庫県立大学）

惑星の偏光観測では、天体の偏光から大気表面にある物質の物理情報を得ることができ、そこから大気中の粒子分布などを詳しく調べることができる。本研究では土星本体の偏光分布を調べ、土星本体の大気表面の構造について議論した。観測には西はりま天文台 2mなゆた望遠鏡と同時偏光撮像・分光装置POLを用いた。Vバンド画像の解析を行った結果、偏光度は土星本体の中心から縁に向かって増加し、偏光方位角は本体の縁に対しておおよそ水平方向を示した。これはレイリー散乱による偏光を考えると、密度に差がある大気によって2回のレイリー散乱が起きていることで説明できる。

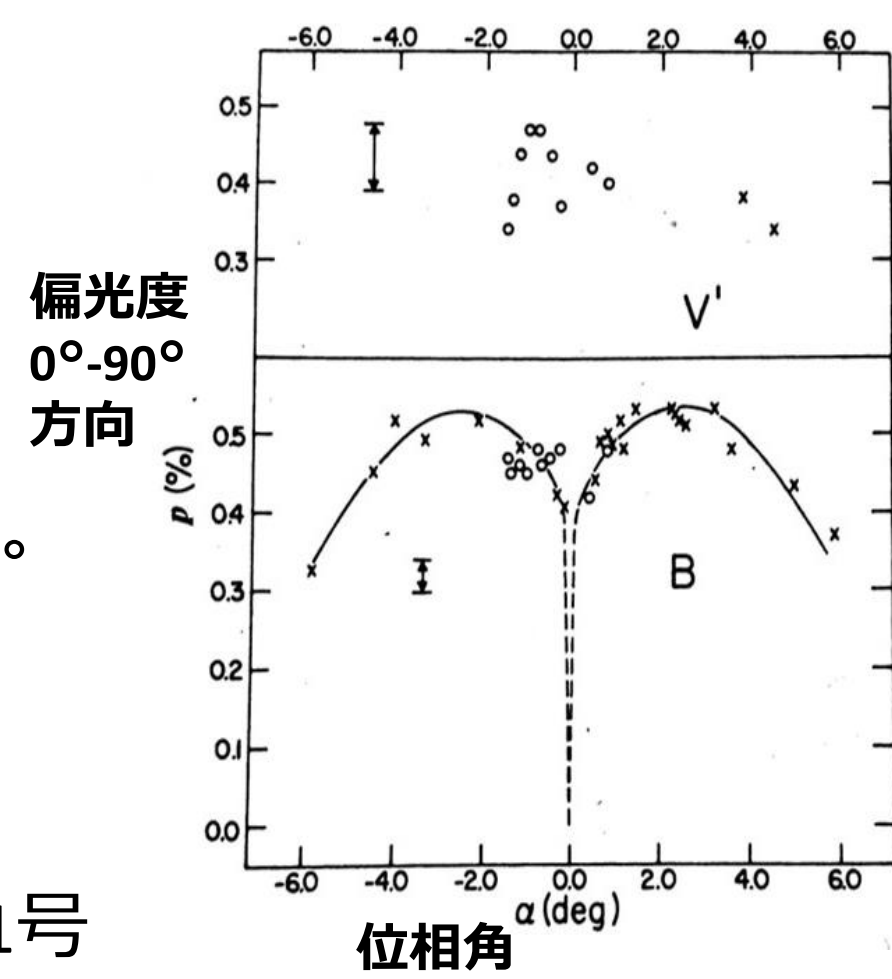
1. 土星の偏光観測

偏光を調べることで光を反射した物質の物性や形状を推定できる。これを土星表面に適用し、大気中の粒子分布を調べる。

先行研究

① Johnson et al.(1980)【環の観測】

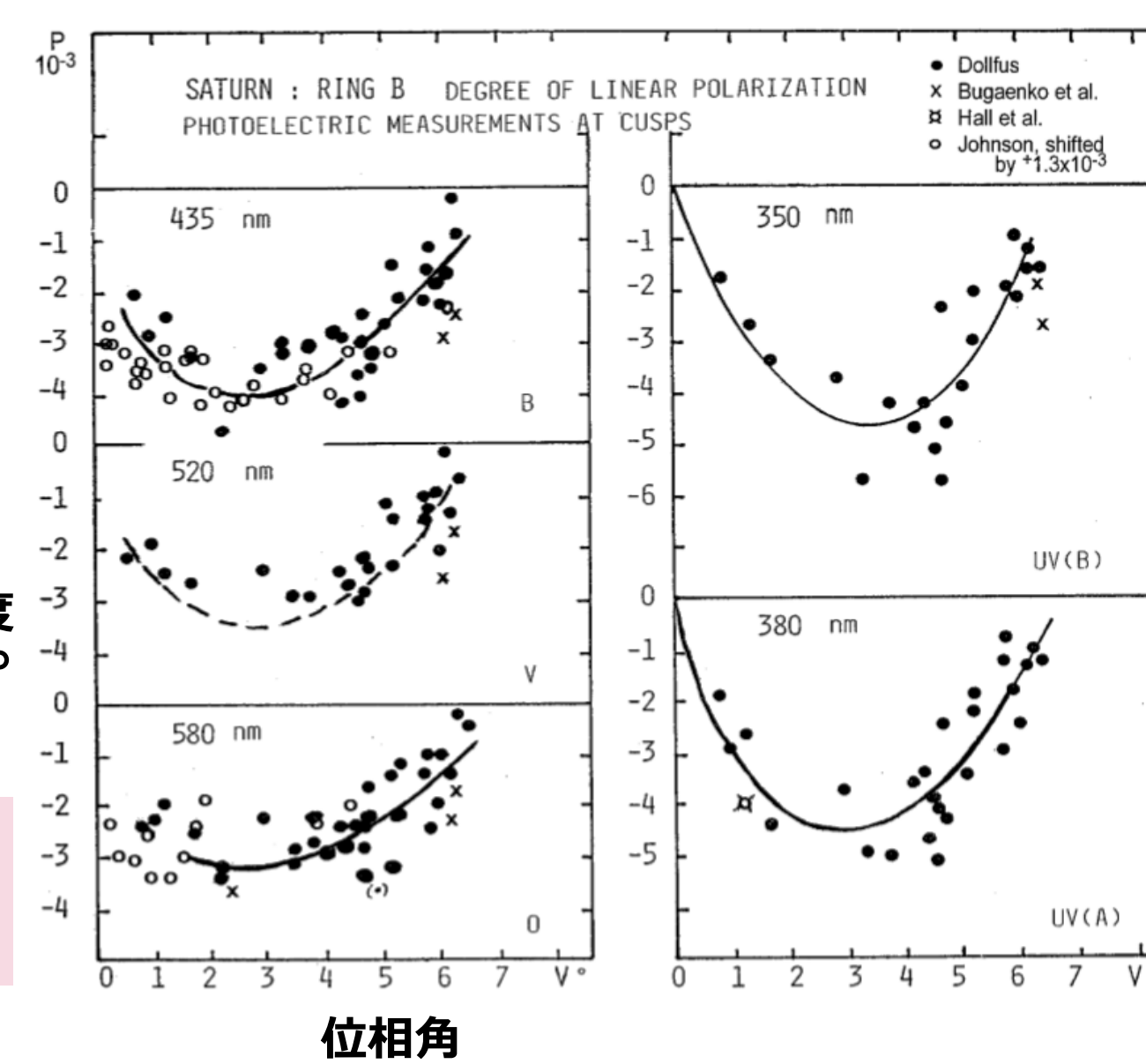
1978年12月から1979年5月の間に波長440nm、553nmでA環の東端の地上観測を行った。波長440nmの観測から、土星の環では1回散乱が起きていた。室内実験のデータと比較すると霜の偏光データに類似している。



↑ Johnson et al.(1980) 土星のA環の偏光度 点は測定値、線は回帰曲線

② Tomasko and Doose(1984)【本体の観測】

1979年8月31日、9月1日に波長440,640nmで探査機パイオニア11号から観測を行った。偏光度は土星の内部から縁に向かって増加した。→レイリー散乱によるもの（1回散乱よりも大きな偏光を示す）波長640nmの観測では、位相角が35°以下または113°以上で偏光は正の値、それ以外の時偏光は負の値をとった。→比較的大きな土星の雲の粒子による偏光



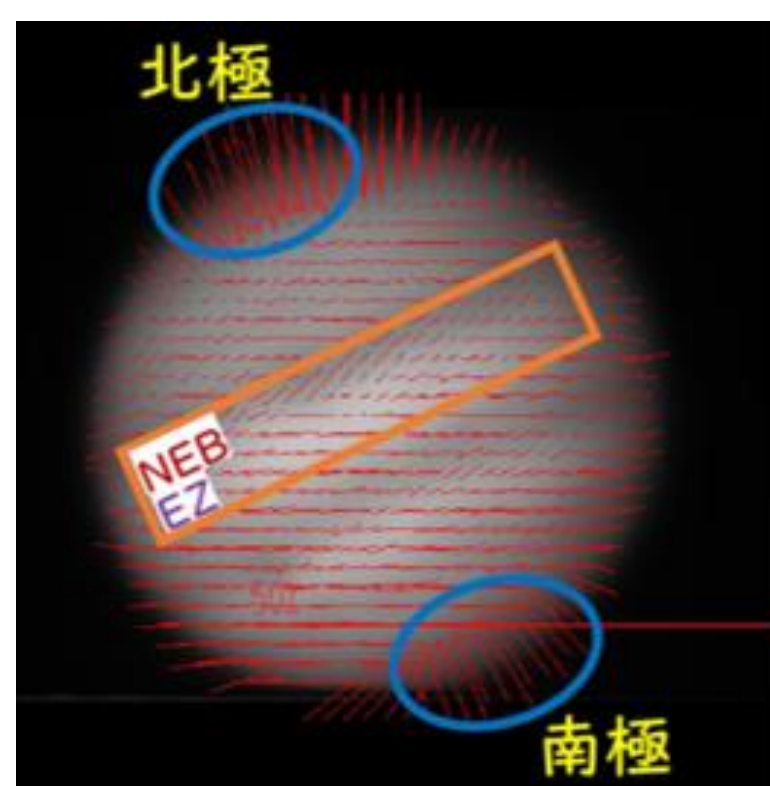
Dollfus(1996)→土星のB環の偏光度 点は測定値、線は回帰曲線

③ Dollfus(1996)【環の観測】

波長350,380,435,520,580nmでB環の両端を地上観測した。波長520nmの測定点の回帰曲線は、高い反射率（アルベド）の1~150μm程度の細かな粒子の存在を示す理論モデルと一致した。

★木星の偏光観測(池邊 2019 修士論文)

西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡に同時偏光撮像・分光装置POLを取り付けて木星の偏光観測を行った。2015年3月から2017年2月、フィルターはB, V, R, I,メタンの5つで観測し、木星のVバンド画像を解析した。結果、偏光度は南北の極で約7%、極以外で0~2%程度、偏光ベクトルは南北の極ではほぼ南北方向に、極以外ではおおよそ東西方向に分布した。木星の極では大気密度が非一様であるため、2回のレイリー散乱で大気密度分布の境界に垂直な南北方向の偏光が起こる。また、赤道付近の偏光ベクトルはおおよそ東西方向であり、赤道ゾーンの北側と北赤道ベルトではくの字に分布する。これは大気複雑な構造により、2回のレイリー散乱によって斜めの偏光が起こるためである。



↑池邊(2019) 木星の偏光ベクトル

本研究の目的

土星本体の偏光分布から、大気表面の構造を調べる。土星の環の先行研究は多いが、本体については部分的にしか観測されていない。1回レイリー散乱は偏光度が位相角のみに依存するため、一定な位相角での観測が必要となる。

2. 観測

観測所：西はりま天文台
望遠鏡：2mなゆた望遠鏡
装置：同時偏光撮像・分光装置POL

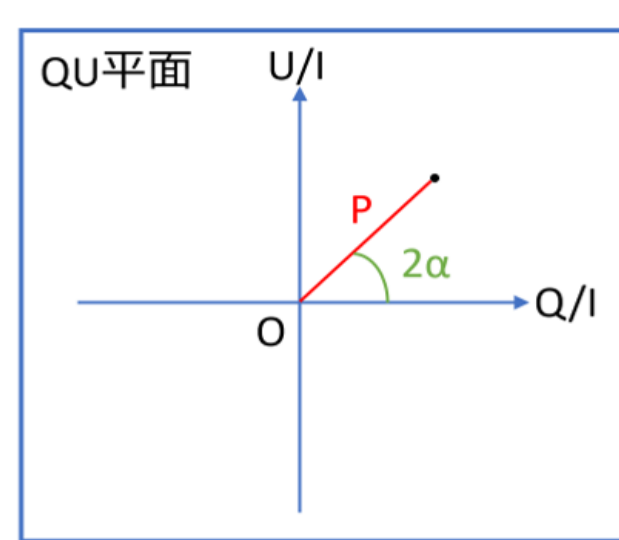


↑なゆた望遠鏡とPOL

観測日：2019年8月26日
観測天体：土星、偏光標準星、M11
フィルター：B(440nm),V(550nm),R(660nm)
露出時間：【土星】B:5s V:1s R:0.5s
観測視野：0.7分角×2.5分角
位相角（地球-土星-太陽のなす角度）：4.33°

3. 解析

Vバンドで撮影した画像を解析した。解析には天体画像処理ソフトIRAFを用いた。天体画像の明るさの観測値(flux)から偏光度Pと偏光方位角αを計算する。Q/Iは0°-90°方向の偏光、U/Iは45°-135°方向の偏光を表している。偏光は横軸をQ/I、縦軸をU/IとしたQU平面で表すことができる。この時、偏光度Pは原点からある値までの距離、偏光方位角αは偏光度の直線とx軸のなす角の半分で表される。



$$\frac{Q}{I} = \frac{F_0 - F_{90}}{F_0 + F_{90}}, \frac{U}{I} = \frac{F_{45} - F_{135}}{F_{45} + F_{135}}$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}\right)^2} \times 100 [\%]$$

$$\tan 2\alpha = \frac{U}{Q} \quad (-90^\circ < \alpha < 90^\circ)$$

↑偏光を表す式
←土星の取得画像（画像の上が東、左が北）
□は観測視野
左から135°、45°、0°、90°の偏光画像

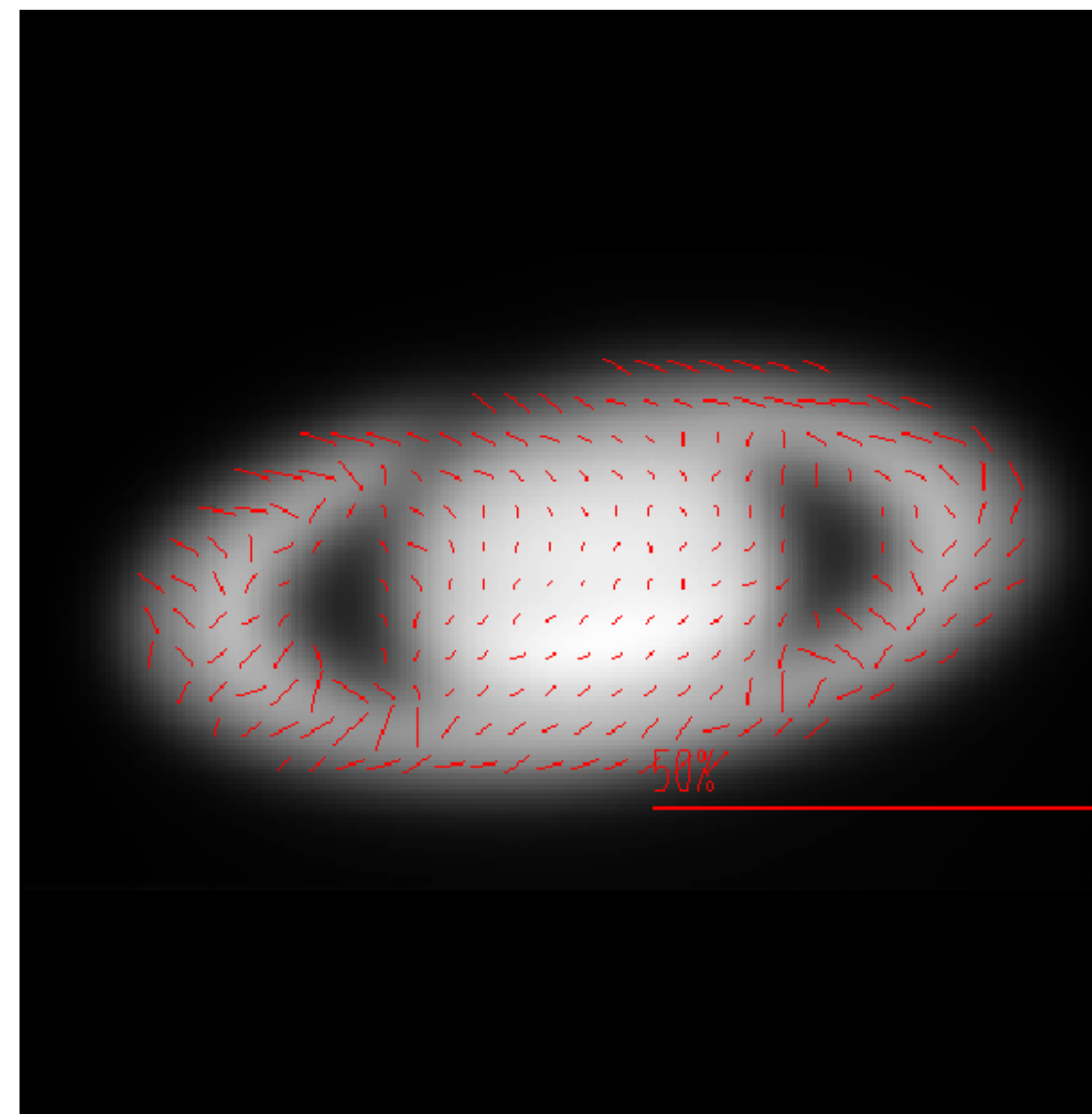
解析は以下の手順で行った。

- ①ダーク補正
- ②フラット補正
- ③方角補正
- ④歪み補正
- ⑤Q/I、U/Iの計算
- ⑥位置補正
- ⑦器械偏光補正
- ⑧偏光度、偏光方位角の計算
- ⑩マスク画像作成
- ⑪偏光ベクトル作成



4. 結果

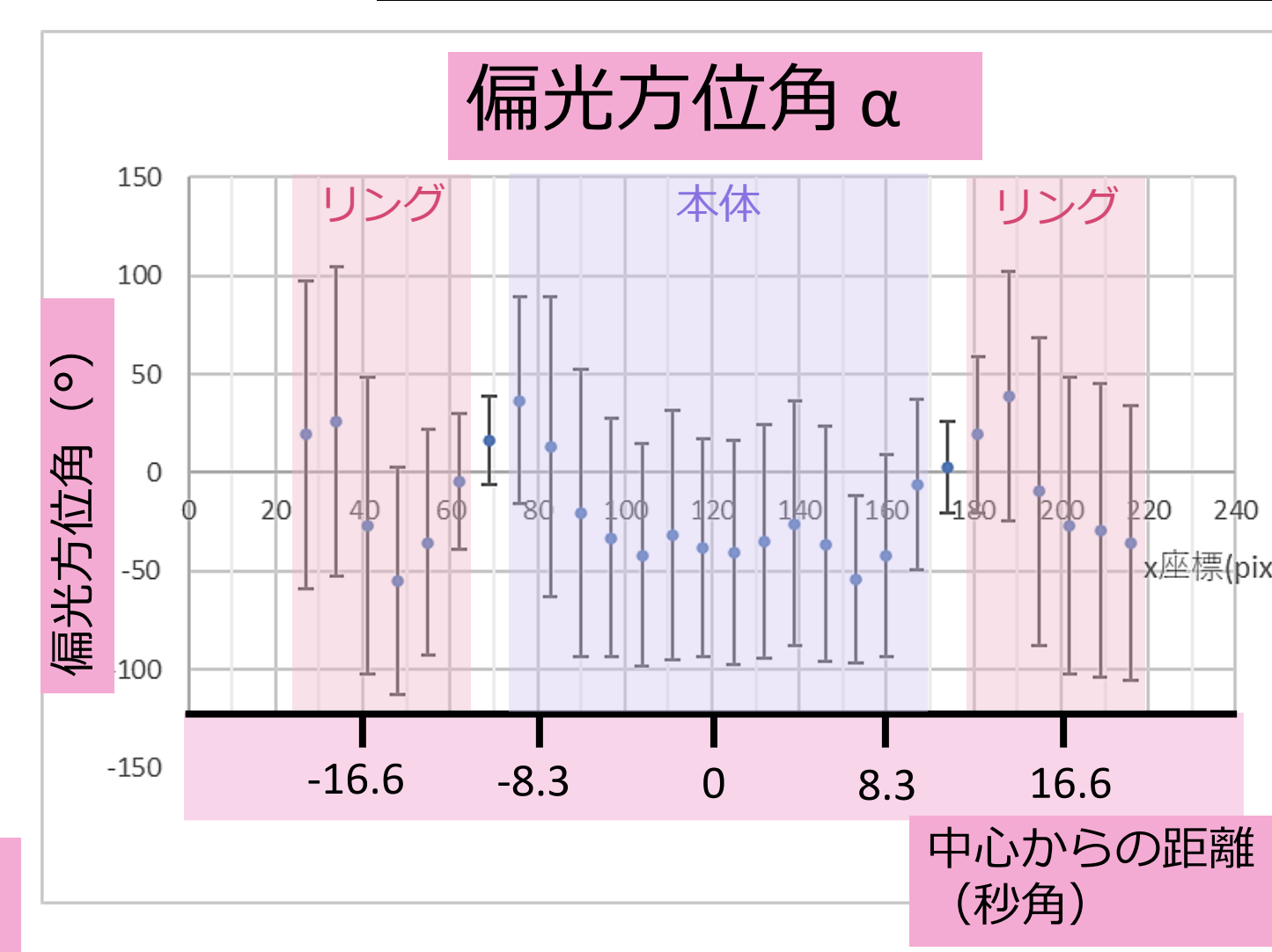
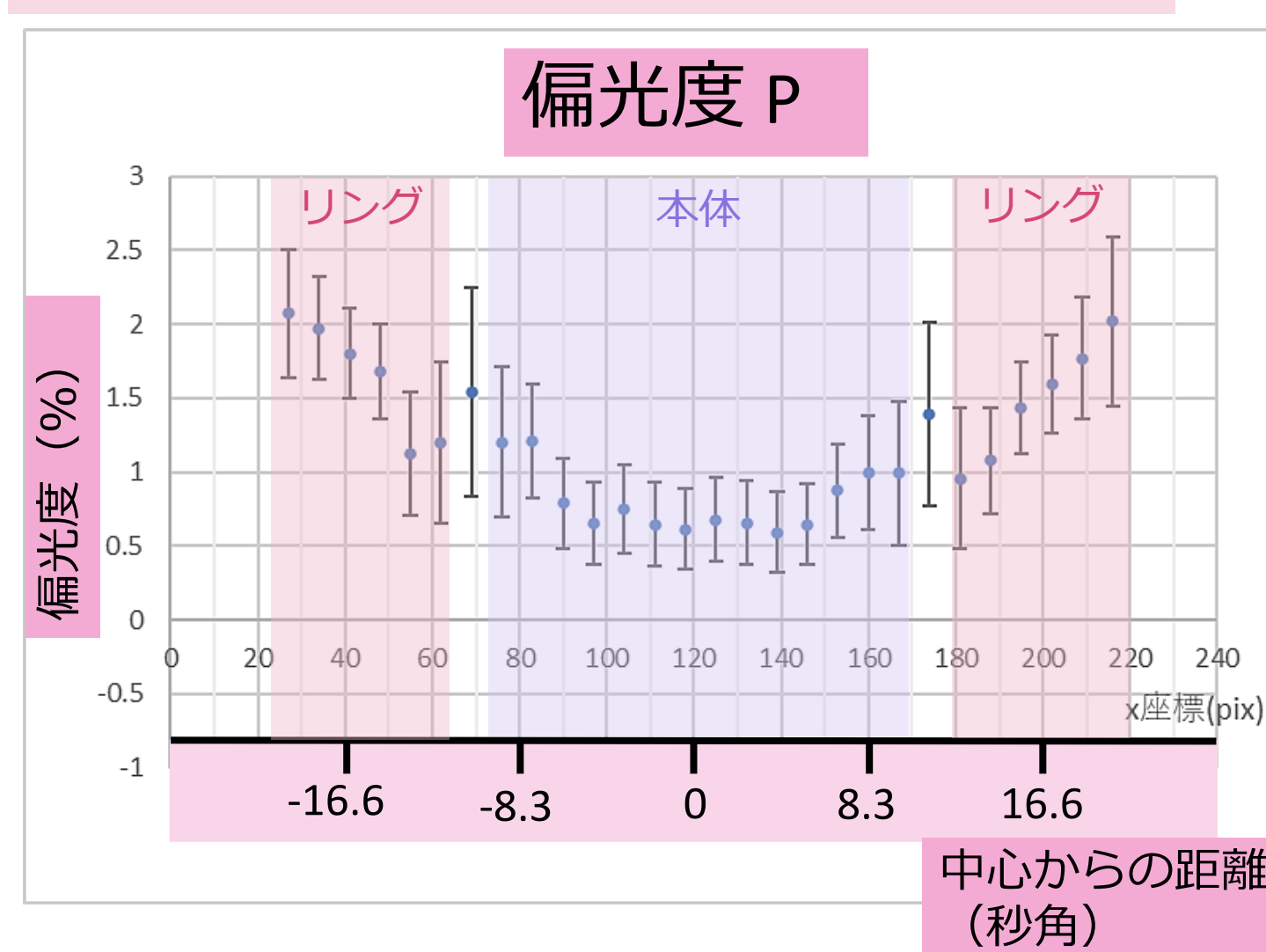
土星本体の中心を通る南北方向と東西方向の偏光を調べた。↓土星の偏光ベクトル
偏光度
東西方向 最小で0.59%、最大で2.07%
南北方向 最小で0.53%、最大で3.38%
中心（赤道付近）から本体の縁に向かって増加した。



偏光方位角

東西方向 -54.99°~36.63°の範囲で変化
東西の端でおおよそ南北方向のベクトル
南北方向 -58.54°~64.41°の範囲で変化
南北の極付近で、反対向きのベクトル
本体の縁に対しておおよそ水平方向のベクトルを示した。

↓土星の東西方向の偏光度Pと偏光方位角α



5. 考察

土星の大気では、大気中のガス分子がレイリー散乱が起こすと考えられる。本研究ではレイリー散乱による偏光を考えた。

5-1.1回のレイリー散乱

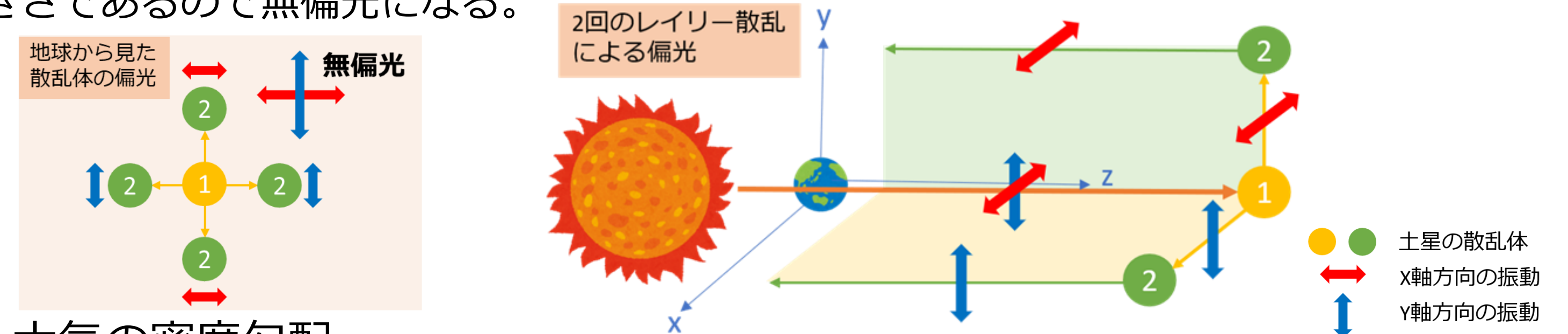
1回散乱された光が地球に届く場合の偏光について考える。位相角が0°より大きいとき、地球に届く光は散乱面に垂直な土星の南北方向の偏光を示す。レイリー散乱による偏光は散乱角θの関数で表される。偏光方位角は散乱面に対して垂直方向を示す。「散乱角=180°-位相角」として、1回レイリー散乱をしている時の偏光度が求められる。偏光は位相角(散乱角)のみに依存するため、土星のどの場所においても同じ偏光を示す。

$$P = \frac{1 - \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta}$$

土星の観測を行った2019年8月26日21時の時点で、位相角は4.33度であり、偏光度は0.286%と求められた。地球の北を0°とすると土星の北は6.5°東に傾いていたため、偏光方位角は6.5°である。もし土星が1回レイリー散乱だけをしていたら、一様に偏光度0.29%、偏光方位角6.5°を示すので、土星本体の偏光は1回のレイリー散乱だけでは説明できない。

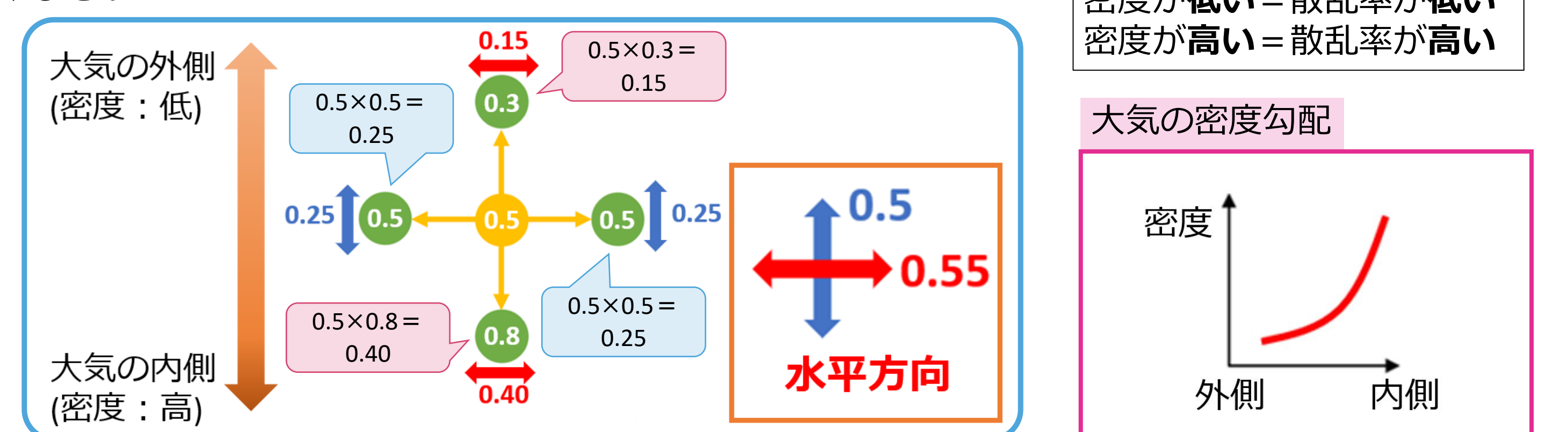
5-2.2回のレイリー散乱

2回散乱された光が地球に届く場合の偏光について考える。図は位相角0°の時を表しており、太陽-土星-地球は一直線に並んでいる。まず、散乱体1が太陽光の無偏光の光を散乱する。光が散乱体1から散乱体2に進むとき、散乱面(ここでは散乱光の進行方向を含む面)に垂直な方向の振動の光が進む。散乱体2から地球に届く光は進行方向に対して垂直な方向の振動の光なので、光の振動方向はそのまま保存される。散乱体1に対する散乱体2の位置によって偏光方位角は変化する。大気の密度が一樣な時、散乱体1に対して散乱体2が上下左右一様に存在している。地球から見た時の散乱体の偏光は、光の振動が垂直方向(南北)にも水平方向(東西)にも同じ大きさであるので無偏光になる。



5-3.大気の密度勾配

密度の違いによる偏光方位角の変化を考える。1回目の散乱率は常に0.5とする。また左右方向は密度が一樣であるとする。散乱体1の上側は大気の外側で密度が低く、下側は大気の内側で密度が高くなる。図は上方向が0.3、下方向が0.8の散乱率の場合を示している。このとき、大気の外側から内側にかけて密度勾配が大きくなるため、偏光は水平方向に強くなる。



↑土星大気中の散乱体の様子
散乱率の和が左右方向(垂直な偏光)では0.5、上下方向(水平な偏光)では0.55になるので、全体としては水平方向の偏光方位角となる。

土星では本体の周縁部で大気の外側から内側にかけて、密度勾配が大きくなるため東西の端で南北方向=水平方向に強い偏光を示したと考えられる。