月食の偏光観測

PI: 高橋 隼（兵庫県立大学）

はじめに

- **忘れられた謎: 月食の偏光**
  - 月食中の月は、地球大気を透過し僅かに屈折した太陽光に照らされる。
  - Coyne & Pellicori (1970) は、月食中の月が2.4%偏光していたと報告。
  - 偏光の原因は解明されていないが、かれらの報告以降、研究された形跡なし。

- **「月食の偏光」に再注目する理由**
  - 物理的な興味
    - 太陽-地球-月が一直線に並ぶ位置関係で偏光が生じるのは不思議。
    - なぜ偏光するのか？
  - 新しい研究手法への期待
    - もし惑星大気を透過する際に偏光が生じるのであれば、惑星大気の新しい研究手法に応用できるかもしれない。
- **研究目標**
  - 月食の偏光を確認し、偏光の原因を解明する。

観測

- **2014年10月8日 皆既月食**

  - OISTER 偏光撮像キャンペーン: ピリカ/MSI（北海道大）、60cm/POL（兵庫県立大）、かなた/HOWPol(広島大) → Takahashi+ (submitted to PASJ)

- **2015年4月4日 皆既月食**

  - すばる望遠鏡/FOCAS での偏光分光観測 → Takahashi+ (2017, AJ)

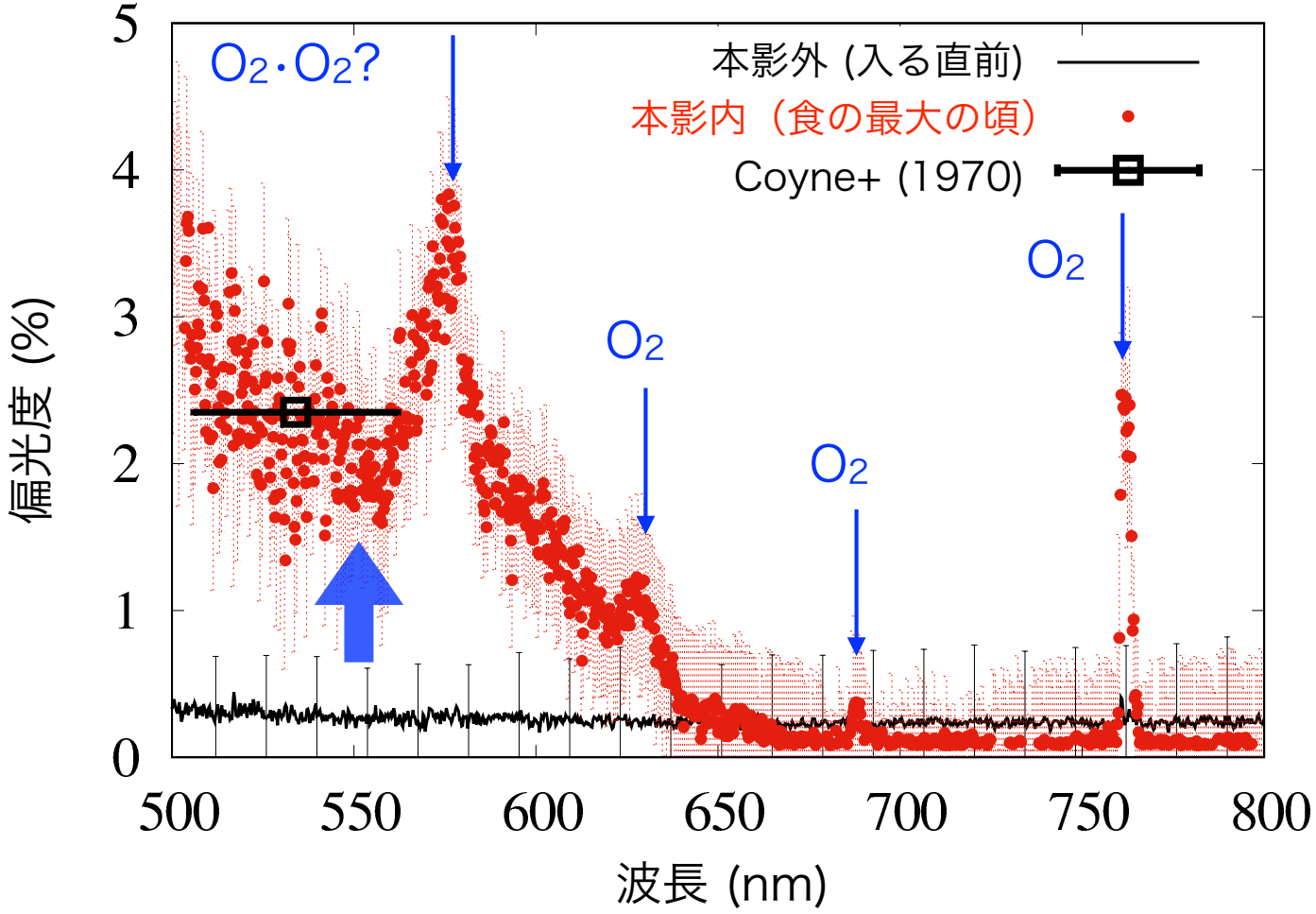
- **2018年1月31日 皆既月食**

  - かなた/HONIR（広島大）、SaCRA/MuSaSHI（埼玉大）

2015/04/04 皆既月食

(Takahashi+, 2017, AJ)

観測結果: 偏光度スペクトル



- 対象領域が本影に入る前は、全波長域にわたってほぼ無偏光。
- **本影に入って以降、食が深くなるにつれ、波長600nm以下での偏光度が上昇した。**最大で2-3%程度。Coyne & Pellicori (1970)の報告とよく一致する。
- 760nm O_2 Aバンド等、偏光度の強いフィーチャも見られる。

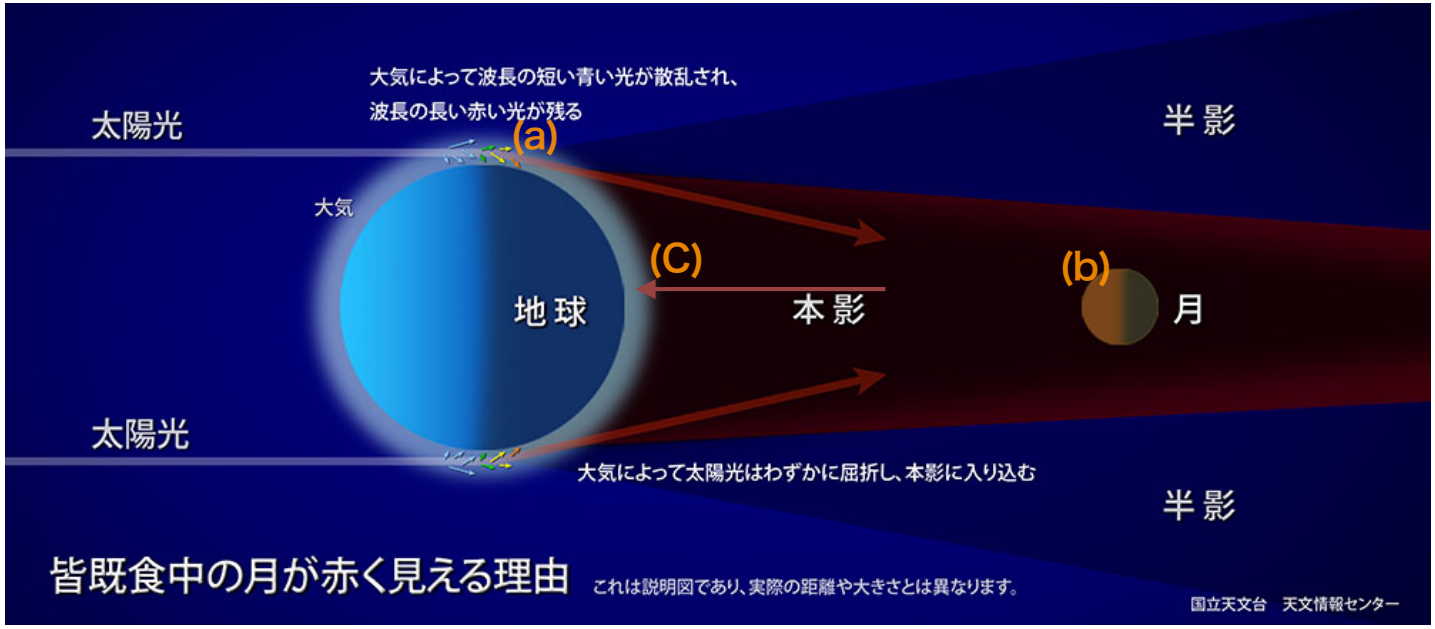
議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

(c) 2回目の地球大気透過



議論: 偏光の原因

どこで偏光したのか？

(a) 1回目の地球大気透過

(b) 月面での反射

(c) 2回目の地球大気透過

(a) の過程で起きる

非等方的な2回散乱

＋

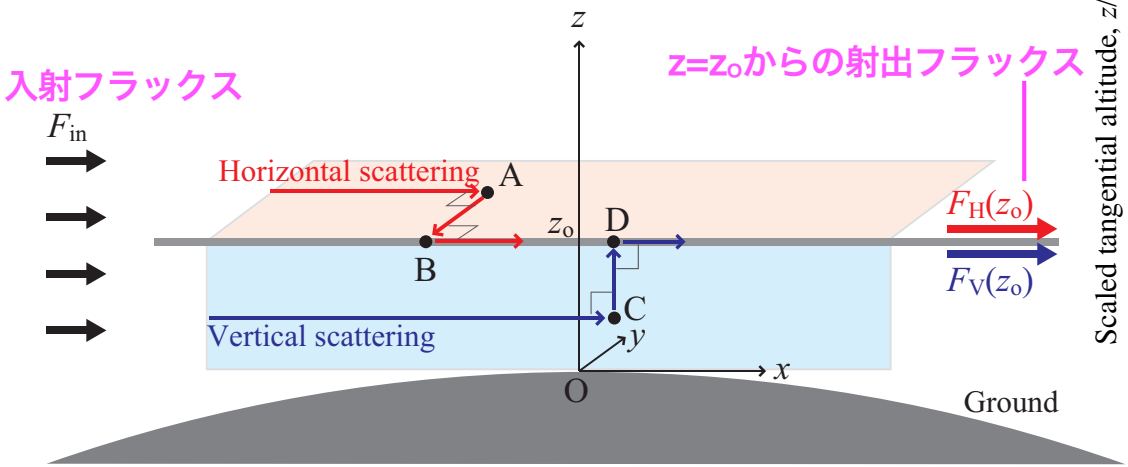
リムに沿った「何らかの非一様性」

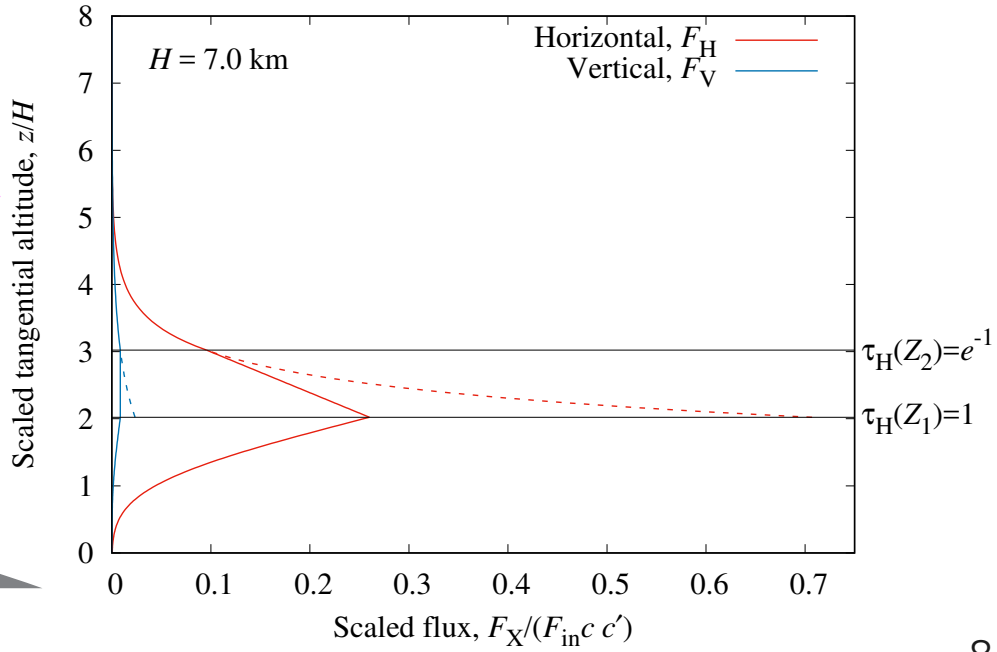
が偏光の原因である可能性が高い。

非等方的な2回散乱

- 直進成分（直接屈折光+1回前方散乱光）
  - ほとんど偏光しない（前方散乱 P<0.005%、屈折 P<0.03%）
- 2回散乱成分
  - フラックスは水平散乱が垂直散乱より圧倒的に強い(←$\tau_H >> \tau_V$)

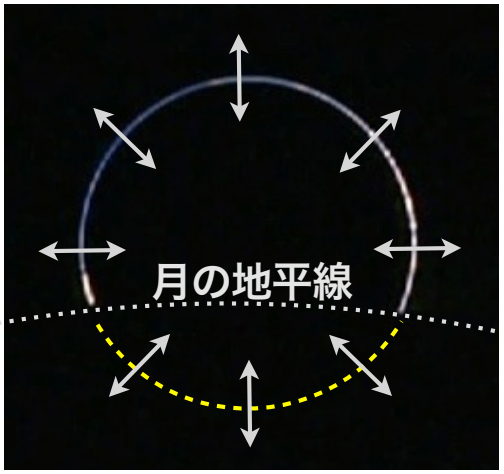
➡射出光は垂直方向に偏光するはず。



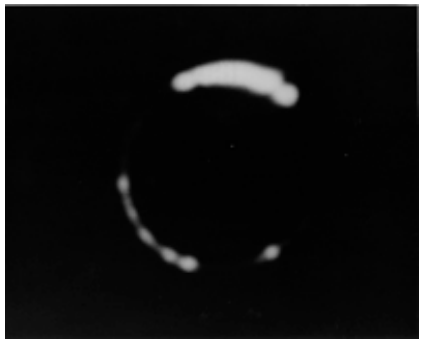


リムに沿った非一様性

月食中に月から見た地球



Kaguya

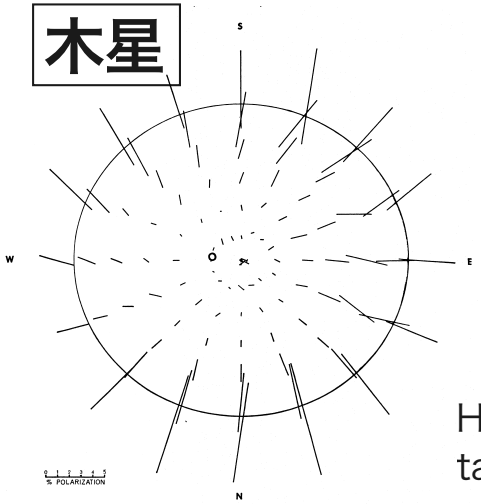


Surveyor III

- 月食中に月から地球を見ると、リムからの光がリング状に見える。
- リムの偏光方位角は放射状に分布していると考えられる(cf. 木星)。
- 地球からの月食観測では、リムを積分した光を見ている。
- 月食が偏光するには、リムの偏光フラックスに何らかの非一様性が必要。
  - 雲の分布？、スケールハイトHの違い？
  - 1回の月食観測データだけでは非一様性の原因の特定は難しい

➡複数回の観測で制限したい

木星



Hall and Riley1969
taken from Gehrels+ 1969

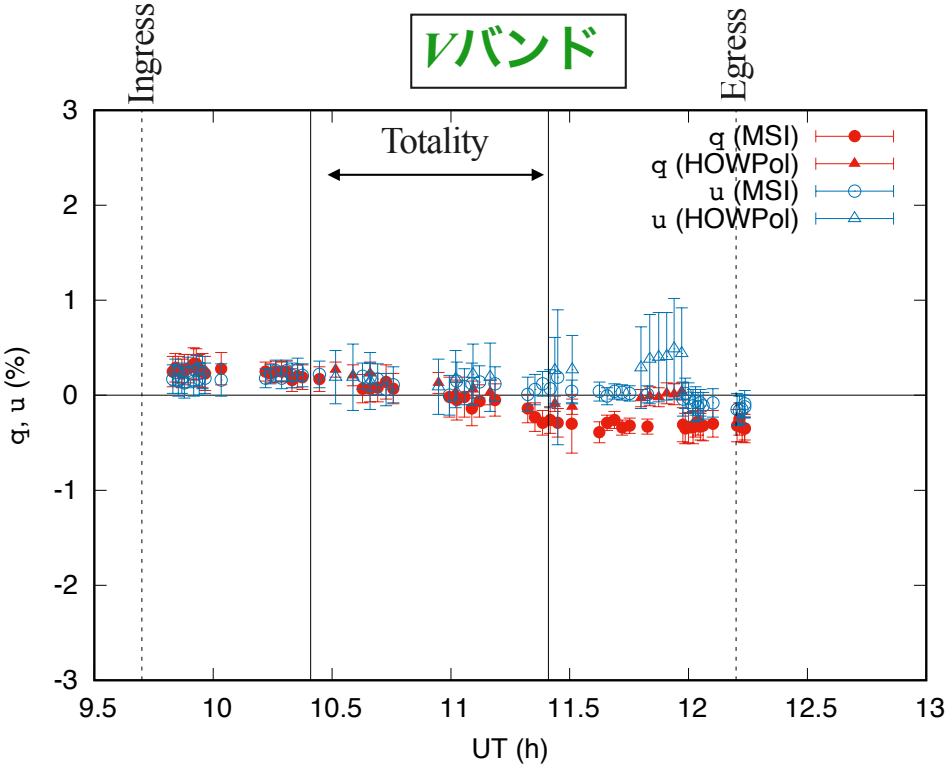
2014/10/08 皆既月食
2015年との比較

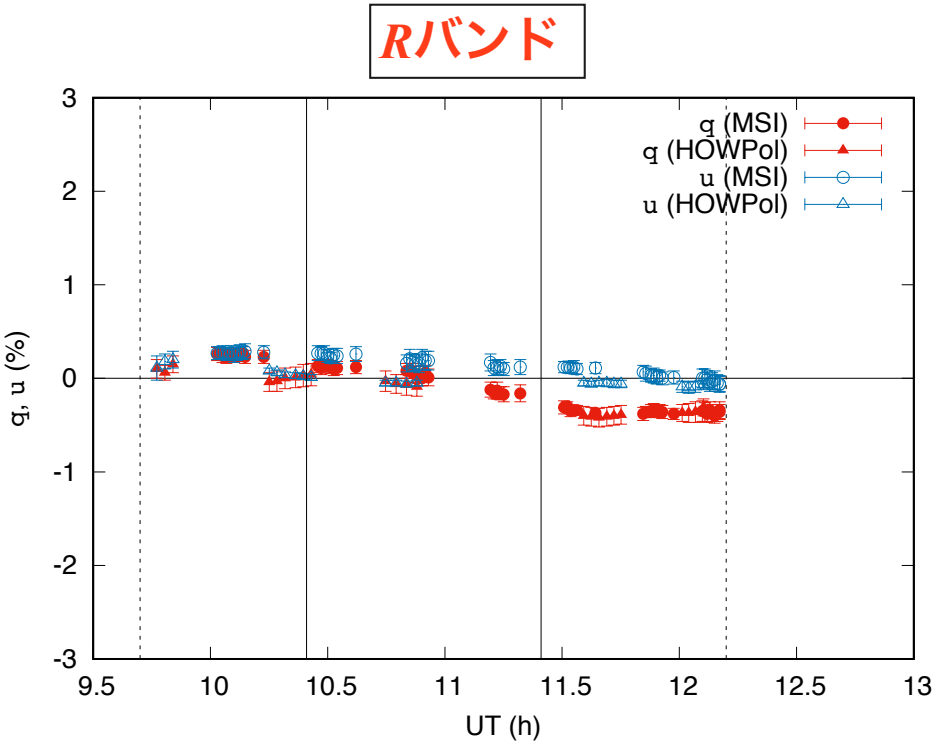
(Takahashi+, submitted to PASJ)

2014年 観測結果: q, u

ストークス $q=Q/I$, $u=U/I$

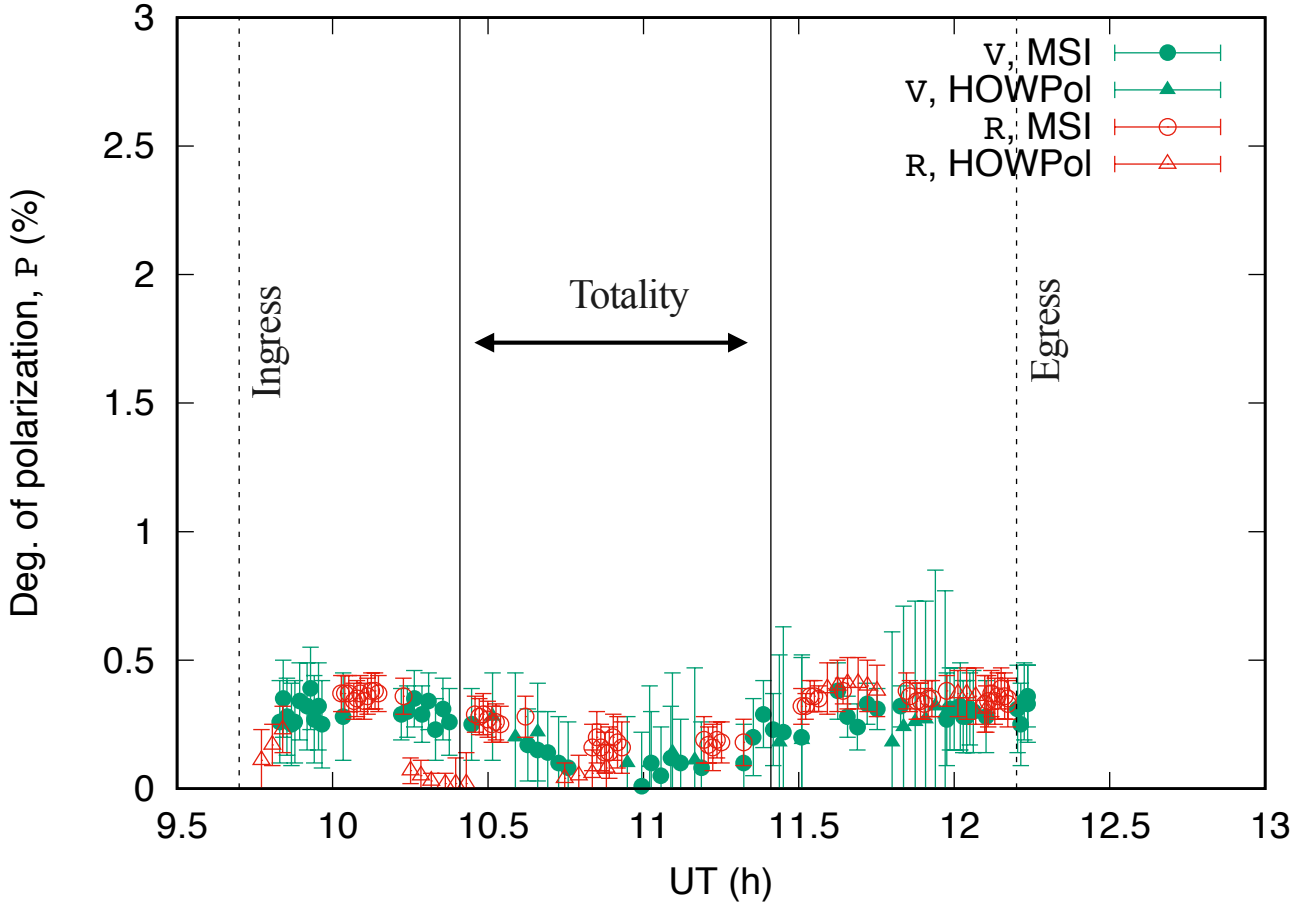
偏光度 $P=(q^2+u^2)^{1/2}$





- $|q|, |u| < 0.5\% \rightarrow P < 1\%$

2014年 観測結果: P

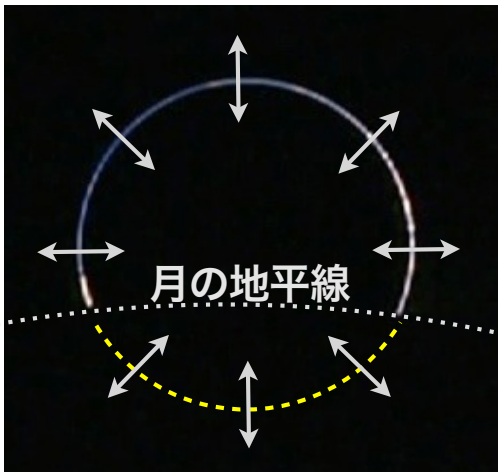


- MSIとHOWPolはほぼ一致するが、 一部で0.5%程度の食い違い。
- 有意な偏光度の検出は主張できない。
- 2014年10月の月食中の偏光度は、1%未満であった。

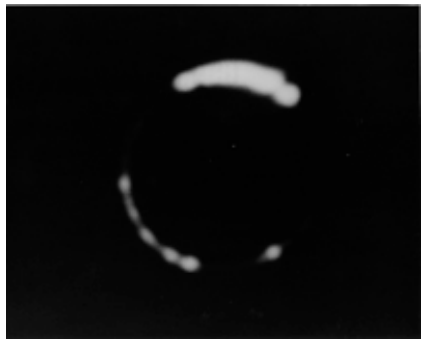
2015年4月(P_{max}~2–3%)よりも、2014年10月は偏光度が小さかった

何が偏光度の違いを生むのか？

月食中に月から見た地球

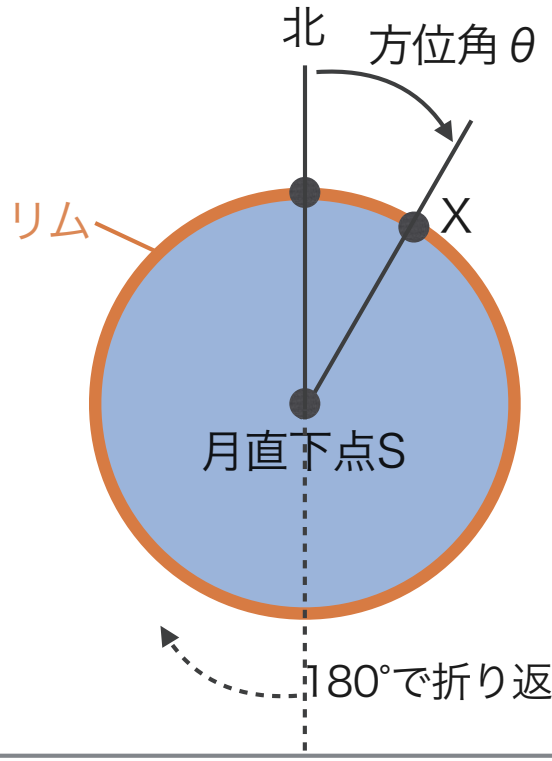


Kaguya


Surveyor III

○方位角θの定義

リム上の点Xの位置を方位角θで表す。



- 偏光の原因は「非等方的な2回散乱」
+「リムに沿った大気非一様性」
- 非一様性の程度の違いが、正味偏光度の違いを生むのではないか？
- リムの明るさは非一様。雲の分布で説明される (Shoemaker+ 1968)。
- 類推で雲の分布に注目。Terra/MODISデータから雲被覆率を取得。

雲分布の比較

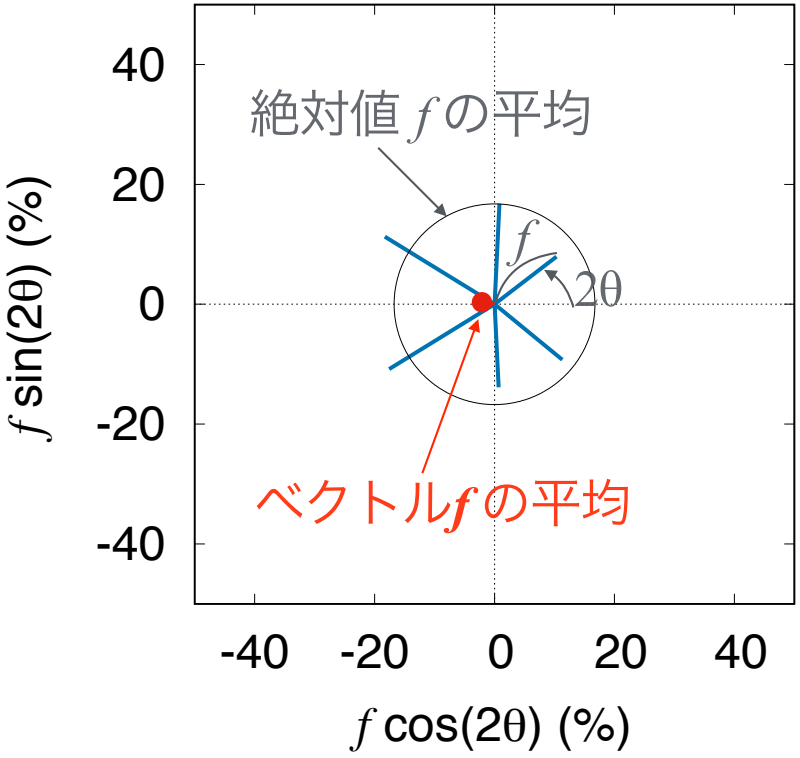
f: 雲被覆率

θ : リム上の地点の方位角

非一様性指数 $\stackrel{\text{def}}{=} \dfrac{|\text{ベクトル}\boldsymbol{f}\text{の平均}|}{\text{絶対値 } f \text{ の平均}}$

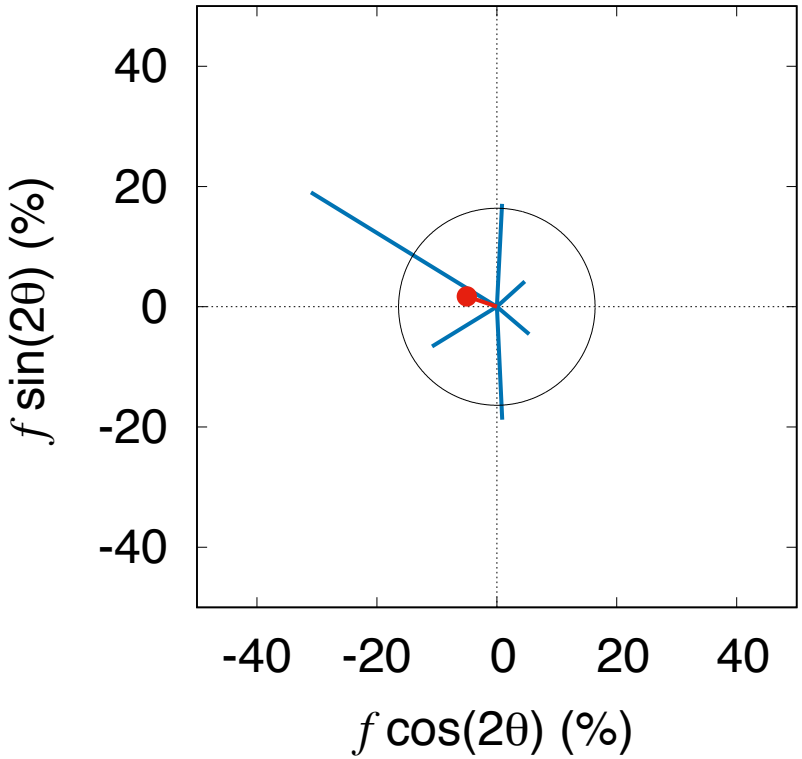
- **雲頂高度: 7km(スケールハイト)以上**

2014年（偏光非検出）



非一様性指数 = 0.13

2015年（偏光検出）



非一様性指数 = 0.32

2015年のほうが2014年より雲分布の非一様性が大きかった。
➡高い雲の分布が正味偏光度を決定づけている？

偏光方位角の整合性

- 2015年に観測された偏光方位角Θは~90°(東西)。
- リム上で、雲が多い方位角θ（ベクトルfの平均）は~80°(ほぼ東西)。

- 水平方向の光学的厚みτ_Hが中間的(1程度)な雲が、偏光の原因だと考えると、雲の分布と偏光方位角が整合的になる。
  - 上層(高度7–15km)の巻雲や巻層雲は、垂直方向より水平方向に広がっている (Lamb & Verlinde 2011)
  - 雲の粒子による散乱光の偏光は、散乱面に垂直 (Coffeen 1979)。

➡Takahashi+ (2017)で想定した「非等方的な2回散乱」は起こりうる。

巻層雲

Simon Eugster CC BY-SA 2.0 DE
https://en.wiktionary.org/wiki/cirrostratus

まとめ

- 2014年10月の月食偏光度(<1%)は、2015年4月(~2–3%)よりも小さかった。
- 高度7km以上の雲分布は、2014年は一様に近かったのに対し、2015年は非一様だった。
- 雲の分布が、地球大気透過光の正味偏光度を支配している可能性がある。
- さらなる観測データの収集によって、仮説を検証できるだろう。