観測天文学における 偏光現象と測定手法

千葉工業大学 天文学研究センター 秋田谷 洋

Contents

- 1. 身の回りの偏光
- 2. 偏光の数学的表現
- 3. 天文学における偏光
- 4. 偏光の測定
- 5. まとめ

3

1. 身の回りの偏光



4







基礎科学セミナー第62回



⇔ 偏光板の向き



水たまりの反射







タ方の空



太陽の方向は?

直線偏光 = 光源 – 散乱体の特性・幾何分布を反映



基礎科学セミナー第62回

虹(身近な自然現象の偏光)





基礎科学セミナー第62回

9



·第62回

基礎科学セミナ







(一部の)立体映像







Ŧ







12 2024/10/26

74. Jukushima 国立天文台 天文情報公開センター 広報普及室 基礎科学セミナー第62回

ASTRONOMY RESEARCH CENTER, CI



オリオン大星雲 M42

Near-infrared image

名古屋大学 南アフリカ1.5m IRSF 望遠鏡; Tamura+06

13 2024/10/26

Egg nebular

Hubble space telescope





Sahai+98 基礎科学セミナー第62回

2. 偏光の数学的表現



ASTRONOMY RESEARCH CENTER,

16 2024/10/26



17 2024/10/26

完全偏光と部分偏光

- 自然界の電磁波は、一般に様々な「完全偏光(I²=Q²+U²+V²)」の アンサンブル総和として観測される
- **□** $\vec{S_i} = (I_i, Q_i, U_i, V_i)$ のとき、観測される総和のStokes parameterは、 $\vec{S} = (I, Q, U, V) = \sum \vec{S_i}$
- □ 個々の $\vec{S_i}$ では($I_i^2 = Q_i^2 + U_i^2 + V_i^2$)だが、 $I_i > 0, Q_i, U_i, V_i$ は正負とりうるので、 $I^2 ≧ Q^2 + U^2 + V^2$ となる。
- □ =部分偏光
 - 独立変数がI, Q, U, V の4つに
 - Iが総エネルギー、Q, Uはそのうち直線偏光している成分、Vは円偏光している成分。
 - Q/I, U/I, V/Iが直交座標系・直径1の球内のいずれかの値をとる



□ 偏光度:
$$p = \sqrt{q^2 + u^2}$$
; $\sigma_p = \frac{\sqrt{q^2 \sigma_q^2 + u^2 \sigma_q^2}}{p}$
□ 偏光方位角: $\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}(\frac{u}{q})$
2024/10/26 (q=Q/I, u=U/I)

基礎科学セミナー第62回

19

天体観測における偏光の利点





強度: I (視線に対して軸対称 でも出る光)

偏光: Q, U, V (「軸対称から の崩れ」で出る光)

点光源に内在する幾何情報

- 20 2024/10/26
- ASTRONOMY RESEARCH CENTER, CIT

3. 天文学における偏光

天文学における偏光(可視・赤外線)

□ 光散乱

- □ 天体の非等方構造の推定
- 散乱体の特性(散乱体の種類・運動、ダストの場合その性質)
 dichroism (非等方な前方散乱・吸収)
 - ■星間ダストの性質・星間磁場
- □ 荷電粒子の加速度運動(synchrotron)
 - 高エネルギー現象(AGN/コンパクト天体ジェット)の磁場・エネ ルギーの推定

□ Zeeman効果

□ 星の磁場強度・方向の推定

etc.

光の「強度」の測定では分からない情報が得られる



空間

第62回



23

偏光観測= Stokes parametersの測定



基礎科学セミナー第62回

24

3-1 光散乱

26

(c) NOAO

(c) 松原(2017), 天文学辞典





Active Galactic Nuclei



(Credit: Aurore Simonnet, Sonoma State University; NASA)

ASTRONOMY RESEARCH CENTER, CIT

27

2024/10/26

Unified description for Sayfert I & II Antonucci & Miller (1985)

Abstract
Citations (1737)
References (37)
Co-Reads
Similar Papers
Metrics
Export Citation

Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068.

Show affiliations

Antonucci, R. R. J.; Miller, J. S.

Extensive high-resolution, high SNR polarization spectra of the nucleus of NGC 1068 are presented. The polarized flux plot reveals the presence of very highly polarized, very broad symmetric Balmer lines and also permitted Fe II. This plot closely resembles the flux spectra of Seyfert type I nuclei. The broad lines are redshifted about 600 km/s relative to the narrow lines. This line emission indicates that both polarizations are due to scattering, probably by free electrons which must be cooler than a million K. A model is suggested in which the continuum source and broad line clouds are located inside a thick disk, with electrons above and below the disk scattering continuum and broad-line photons into the line of sight. All of the narrow lines, including the narrow Balmer lines, have similar low polarizations, unrelated to that of the continuum.

Publication:	Astrophysical Journal, Vol. 297, p. 621-632 (1985)
Pub Date:	October 1985
001:	10.1086/163559 🖸
Bibcode:	1985ApJ297621A 🕜
Keywords:	Galactic Nuclei; Polarimetry; Seyfert Galaxies; Balmer Series; Circular Polarization; Emission Spectra; Iron; Line Spectra;

Feedback/Corrections?







(a)

(b)

(c)

(d)

7000

WMMM

[s¤]

FIG. 5.-Cutaway drawing of a continuum source and broad-line clouds surrounded by a geometrically and optically thick disk. Only photons traveling out along the polar directions can scatter into the line of sight. We would observe a high polarization in the plane perpendicular to the symmetry axis, which we presume to be the radio structure axis.

Antonucci & Miller (1985)



Comets/ (c) NASA Asteroids



C/2023 A3 10/13 津田沼8号館 (c) Akitaya





(c) ESA

30 2024/10/26

Linear polarization of comets



Red-region (~R-band) 直線偏光

多くの彗星は同じ 可視光偏光度(位相角) の振る舞い。→彗星ダストー様な組成 長波長(例えば1-2.4um)の偏光度で振る舞いはどうなるか? ダスト粒子の大きさ・空隙率によって、異なる値が予期される

31 2024/10/26



Polarimetry of C/2023 A3





500 1000

1500 2000

2500 3000

3500

4000

optical

Spectro-

polarimet 1000

2000

On going. (a=40-90 deq) □広島大かなた1.5m, 西はり ま天文台2m, 平昌0.6m,

- □可視光直線偏光は一般の彗 星偏光度を示すか?
- □赤外線(1-2.4um)の偏光度

→ダスト粒子の空隙率を明



Asteroids / Solar small bodies ■ 表面組成、反射能(albedo)ごとに多様な振る舞い ■ 探査機ターゲットの表面を地上観測で独立に調査 Ryugu (Kuroda+21)



33

Linear Polarization Map



Figure 4.2. Distribution of linear polarization vectors in galactic coordinates. The length and orientation of each vector represents the polarization degree and position angle for a star at that locus. Data are from Heiles (2000) and references therein.

Whittet (2003) based on Heiles (2000)

34 2024/10/26

星間(直線)偏光と磁場の関係



星間減光と星間偏光




STRONOMY RESEARCH CENTER, 0 H

37

2024/10/26

基礎科学セミナー第62回

Serkowski curve

Serkowski(1971, 1973), Coyne et al. (1974), AJ, 79, 581

 202天体の星間偏光p(λ) に、<u>経験則</u> Serkowski curve p/p_{max} = exp[-K ln²(λ_{max}/λ)], K=1.15
 を適用。星間偏光p(λ)を p_{max}、λ_{max}で特徴づけ。
 様々なλ_{max}, p_{max}の星間偏光p(λ)は規格化すれば同一



FIG. 3. Normalized wavelength dependence of polarization for three wellobserved stars with $\lambda_{max} \cong 0.50 \ \mu m$ (filled circles) and three stars with $\lambda_{max} \cong 0.69 \ \mu m$ (open circles). The curve is calculated from the empirical formula (1).

Serkowski curveの物理的意味

Serkowski et al.(1969)

非等方粒子のQ_E-Q_Hを 適当なサイズ分布で畳 み込んだもの



FIG. 6. Extinction efficiencies for slightly absorbing cylinders oriented normal to incident radiation: Q_E for $E \parallel$ axis, Q_H for $H \parallel$ axis. Polarization efficiency is also shown as $Q_E - Q_H$. Reproduced by permission from Greenberg (1968).



FIG. 4. Comparison of the observed wavelength dependence of interstellar polarization (thick solid curve with circles, squares, and crosses repeated from Fig. 2) with some theoretical models for cylindrical grains, described in the text. A thin solid line is the mean wavelength dependence of interstellar polarization which was previously (Coyne and Gehrels 1967) derived by averaging nonnormalized curves for stars with various values of λ_{max} ; it differs considerably from the present normalized curve.

星間偏光の研究意義

- 1. ダスト粒子の整列機構の解明
- 2. ダスト粒子の組成・サイズの解明
- 3. (偏光//磁場という事実を受け入れて) 星間磁場の方向・ 強度の決定
- 4. (目的天体の前方に付加される系統誤差として)

天体位置測定衛星 Gaia

■ 全天の天体を年周視差 測定

□ 2e9 天体

□ G>~20.7 mag

■ 10⁻⁵ arcsec 精度 (1kpcで距離1%精度)

■ 2022に3次データ公 開

■ 2026, >2030に4 次・5次データ公開予 定

(c) ESA/ATG medialab



銀河系内磁場のトモグラフィー

Doi, …, Akitaya, et al. (2023)

	1			ENHANCED BY GO	ogle	D Englis
東京大学大学院総合 The University of Tol Graduate School of Arts and	合文化研究科・教養学部 syo, Komaba sciences, College of Arts and Sciences		3	T X	U #1FZ	ップ 交通アクセン つけての なのの
HOME 総合情報	入学・進学希望の方	留学生・留学希望の方	在学生の方	卒業生の方	保護者の方	教職員の方
7						
ニュース 概要・基本データ 教育プログラム	<u>トビックス</u> 202 【研究成界 銀河の構造	^{24.01.12} 見】天の川の「あやつり糸」 造形成の謎に迫る――	の断層撮像に初く	めて成功――三次:	元磁場構造の初観	則で天の川



https://www.c.utokyo.ac.jp/info/news/topics/20240112140000.ht ml

42

2024/10/26

基礎科学セミナー第62回



銀河系内磁場の トモグラフィー

退緯(天の川に垂直な方向)



銀河磁場の向きを 奥行き方向に分解 して明らかにした。 →



基礎科学セミナー第62回

14.0

43 2024/10/26

3-2 SYNCHROTRON放射

Synchrotron Polarization





Blazer 3C279 PA rotation with gamma-ray



46 2024/10/26

基礎科学セミナー第62回





Arimoto+23 (Nature Astronomy)







47 2024/10/26



48 2024/10/26

基礎科学セミナー第62回



(c) 2023 金沢大学、イラスト制作:武重隆之介・髙橋壮一

2024/10/26

基礎科学セミナー第62回

Zeeman effect Sunspot with spectrum



Credit: NSO/AURA/NSF

 $B \rightarrow 4130 \text{ Gauss}$



NAOJ Universe of Spectroscopy (2011), NAOJ NEWS, No. 296, p. 16 (2010)





基礎科学セミナー第62回

51

2024/10/26

3-3 ZEEMAN効果と磁場測定

磁場測定の手法~Zeeman 効果 磁場により磁気量子数に対して縮退していた準位が分 離



l_i : orbital angular momentum of i-th electron s. : spin of i-th electron 2024/10/26

$$E_i = E_{0i} + \frac{gM_J \hbar eB}{2\pi mc}$$

 M_J : magnetic quantum number for B direction (-J ~ J, 2J+1 states)

La'nde g-factor
$$g=1+\frac{J(J+1)-L(L+1)+S(S+1)}{2J(J+1)}$$

J : total angular momentum quantum number L : total orbital angular momentum quantum number

S : total spin



第62回

2024/10/26

54

実際の磁場測定の技法 (1)Zeeman Broadening

- Zeeman Broadening
 - ◆ Zeeman効果によりline幅が広がる
 - →磁場強度(絶対値)を反映



- filling factor、line強度の重み付け平均となる ▲
- $F(\lambda) = F_B(\lambda) * f + F_Q(\lambda) * (1-f)$
 - → F_B(λ):磁場領域のスペクトル
 - $F_Q(\lambda)$: 磁場なし(quiet)領域のスペクトル、f: filling factor
 - $F_{Q}(\lambda)$ の精密なmodelling、磁場、filling factor等をパラメ ターにしてF(λ)を生成・fitting

(方向によらない)光球磁場全強度測定に利用

(3) 円偏光分光

- Circular polarization
 - •磁場の視線成分
 - → o成分が正負逆に円偏光(正負は磁場の方向 を示す)
 - → Π成分なし
 - → LHC, RHCを独立に抽出可。peakの差の検 出が容易
 - •磁場の正負の「卓越成分」のみ検出可
 - →正負異なる微小成分をまとめて見ると、強度は強くとも正味としてキャンセル;
 - → (eg. 太陽:大局的には 4G, plageで~ 1.5kG、spotsで3.0kG)
 - → 整列の程度の指標
 - ◆ 光球吸収線以外にも適用可



低質量星形成・進化の中のT Tauri型星段階 T Tauri型星:低質量(< 2M_{sol})前主系列星



57

Magnetospheric Accretion Model

- inner diskのtruncation
 - → a few x R_{*}
- ■磁場に沿った物質降着
 - = magnetospheric accretions column
 - accretion shock
 - → 落下物質が中心星に衝突
 - → 磁極付近に accretion shocks
- 磁場を通じた中心星と円盤の相
 互作用
 - →質量、角運動量の交換



Fig. 1.— A sketch of the basic concept of magnetospheric accretion in T Tauri stars (from *Camenzind*, 1990).

T Tauri型星の星周構造、物質降着・放出、天体の進化に磁場 2024/10が大きく関与 基礎科学セミナー第62回



一第62回

59 2024/10/26



60

4. 偏光の測定

偏光を望遠鏡でみるには?

広島大学 1.5m かなた望遠鏡 HONIR (おにーる) ^{料研費: 15K05023ほか</sub>}













清野 玄太 基礎科学セミナー第62回



ASTRONOMY RESEARCH CENTER,

63

2024/10/26

基礎科学セミナー第62回

直線偏光測定の大原則



測定(1): 偏光子のみを回す G 備光子方位角4方位: ψ=0°, 90°,45°, 90°で光量を測定 既存装置に偏光機能を加える手っ取り早い方法 **I(90)** □ 理想 $\frac{Q}{I} = \frac{I(0) - I(90)}{I(0) + I(90)}, \frac{U}{I} = \frac{I(45) - I(135)}{I(45) + I(135)}$ 現実 ε(t);時刻tの大気透過率 $\frac{Q}{I} = \frac{\epsilon(t_0)I(0) - \epsilon(t_{90})I(90)}{\epsilon(t_0)I(0) + \epsilon(t_{90})I(90)},$ $\frac{U}{I} = \frac{\epsilon(t_{45})I(45) - \epsilon(t_{135})I(135)}{\epsilon(t_{45})I(45) + \epsilon(t_{135})I(135)}$

- □ 大気透過率の変動 ε(t₀)/ε(t₉₀), ε(t₄₅)/ε(t₁₃₅)分が除去できない。
- 空の状態が非常に良くても0.2-0.3 %の精度が限界
- □ 精度の信頼性の担保には、明るい比較星の同時光量モニター等が必要

I(0)





P

R~200-400

1200

成を抑制

測定(2): 表式

F(t) o-ray Go Go Ge

$$\begin{split} I_{o}(\lambda,0^{\circ},t_{1}) &= G_{o}\cdot F(t_{1})\cdot\frac{I(\lambda)}{2}\left[1+\frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)}\right] \\ I_{e}(\lambda,0^{\circ},t_{1}) &= G_{e}\cdot F(t_{1})\cdot\frac{I(\lambda)}{2}\left[1-\frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)}\right] \\ I_{o}(\lambda,45^{\circ},t_{2}) &= G_{o}\cdot F(t_{2})\cdot\frac{I(\lambda)}{2}\left[1-\frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)}\right] \\ I_{e}(\lambda,45^{\circ},t_{2}) &= G_{e}\cdot F(t_{2})\cdot\frac{I(\lambda)}{2}\left[1+\frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)}\right] \\ R(\lambda) &= \left[\frac{I_{o}(\lambda,0^{\circ},t_{1})/I_{e}(\lambda,0^{\circ},t_{1})}{I_{o}(\lambda,45^{\circ},t_{2})/I_{e}(\lambda,45^{\circ},t_{2})}\right]^{1/2} \end{split}$$

4測定量 G_o, G_e (o-ray, e-rayの効率)、 F(t₁), F(t₂) (2回の測定ごとの空の効率)

半波長板光軸方位角Ψのときの測定量

*q=Q/I*の測定 (u=U/Iでも同様)

ψ=0, 45°でそれぞれ lo, leを測定。

 $I_o(\lambda, \psi, t) = G_o \cdot F(t) \cdot \frac{I(\lambda)}{2} \left[1 + \frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)} \cos(4\psi) + \frac{U(\lambda)}{I(\lambda)} \sin(4\psi) \right]$

 $I_e(\lambda,\psi,t) = G_e \cdot F(t) \cdot \frac{I(\lambda)}{2} \left[1 - \frac{Q(\lambda)}{I(\lambda)} \cos(4\psi) - \frac{U(\lambda)}{I(\lambda)} \sin(4\psi) \right]$

空の透過率変動、o-ray, e-rayの効率差を全てキャンセルしてQ/I, U/Iが導出できる (最もrobustな偏光測定法)

68

5. まとめ

本日触れなかった偏光

- □ 可視・赤外線以外の偏光
 - □電波、X線
- □ファラデー回転(銀河系内磁場による)
- CMB(宇宙マイクロ波背景放射) Bモード偏光 (原始重力 波の痕跡)

今日お話ししたこと

- 1. 身の回りの偏光
- 4. 偏光の数学的表現
 3. 天文学における偏光 光散乱、シンクロトロン、Zeeman効果
 4. 偏光の測定 偏光素子、測定手法
 5. まとめ

72 2024/10/26
天文学研究センター 2024/4設立



73



2024/10/26

学歴·職歴

- □ -2006/3 東北大学卒・東北大学大学院 修士・博士修了 (Ph.D)
- □ 2006/4-2011/3 国立天文台 TMTプロジェクト室 (2010年10-12月・カナダ・モントリオール大に短期滞在) □ 2011/4-2017/3 広島大学 宇宙科学センター
- □ 2017/4-2017/9 茨城大学 宇宙教育研究センター
- □ 2017/10-2018/12 埼玉大学 大学院理工学研究科 □ 2019/1-2020/1 広間大学 宇宙科学センター

□ 2020/2- 千葉工業大学 惑星探査研究センター □ 2024/4- 同 天文学研究センター

ASTRONOMY

RESEARCH CENTER,

C T



中小口径望遠鏡とその装置の開発・運用(特に<mark>偏光観測</mark>に強い)

- □ (TMT開発、電波望遠 鏡観測所にも一時期関 与)
- 星形成領域、前主系 列星の形成過程・星
 周構造、星間磁場・
 星間ダスト(星間偏 光)



75

2024/10/26