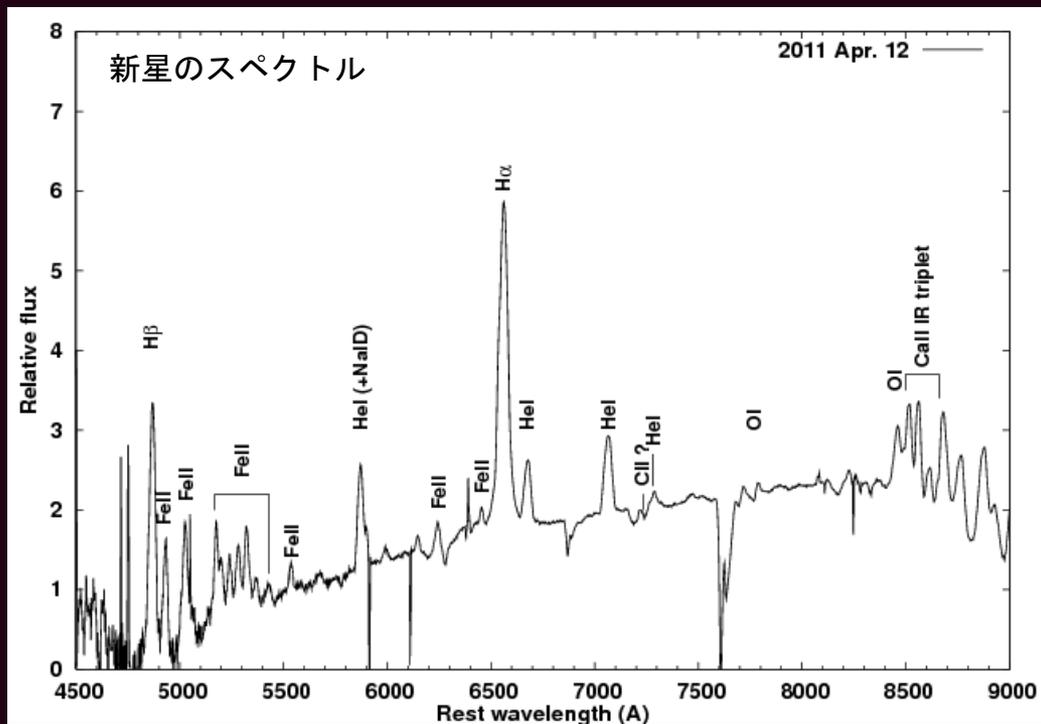
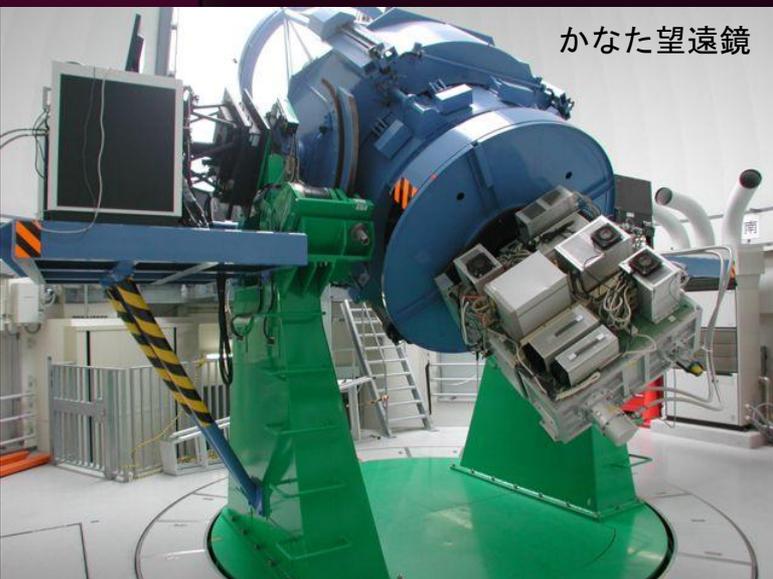


宇宙物理学における ベイズ的モデルの応用

植村誠

広島大学 宇宙科学センター 准教授

自己紹介



今日の話

- 宇宙物理学とは
 - 宇宙物理共通の問題
 - ベイズ的モデルの利点
- 我々の最近の仕事
 - 時間変動を利用した降着円盤の構造再構成
 - 時間変動を利用したジェットからの偏光成分の分離
- まとめ

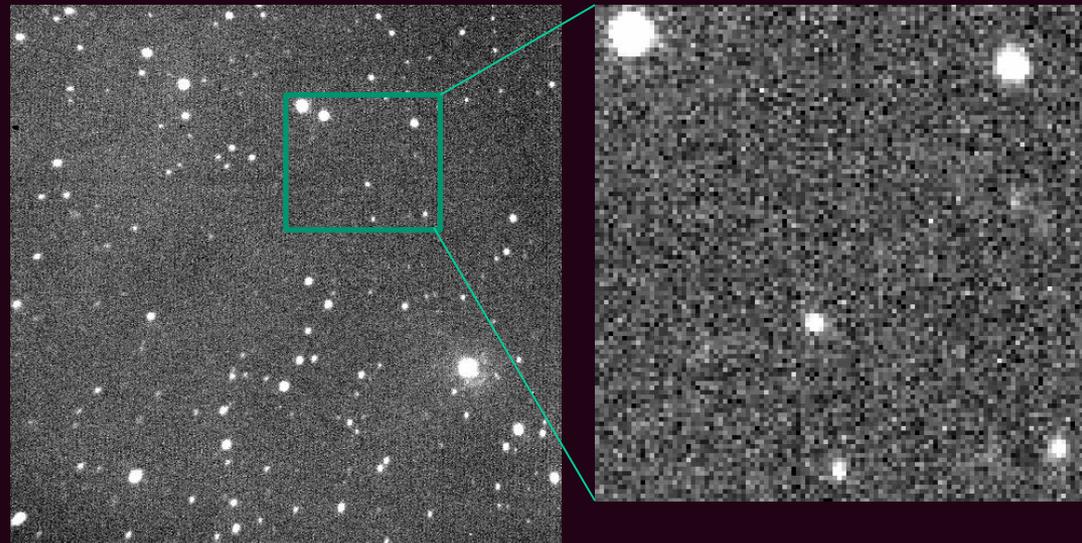
宇宙物理学とは

- 宇宙物理共通の特徴
 - 「手」が届かない —
 - 最も近くの恒星：4光年
 - 現場まで行って測定できない
 - 星はほぼ全て「点源」
 - 星のサイズ： 10^{11} cm、天体の温度： 10^0-7 K
 - 地上で実験が困難

ブラックホール周辺の想像図



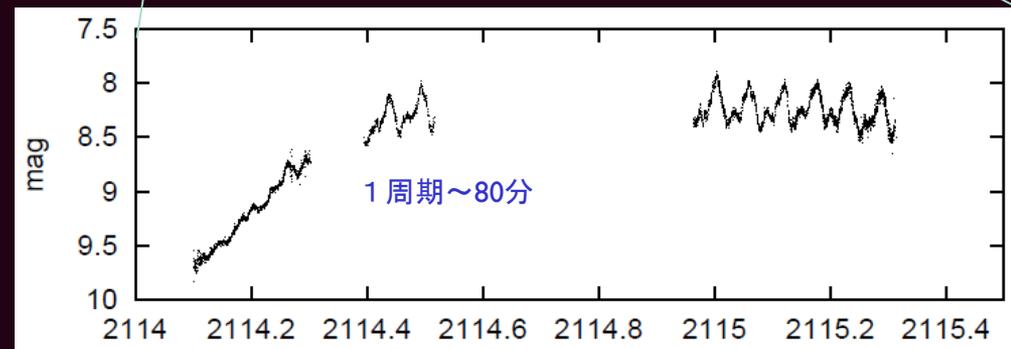
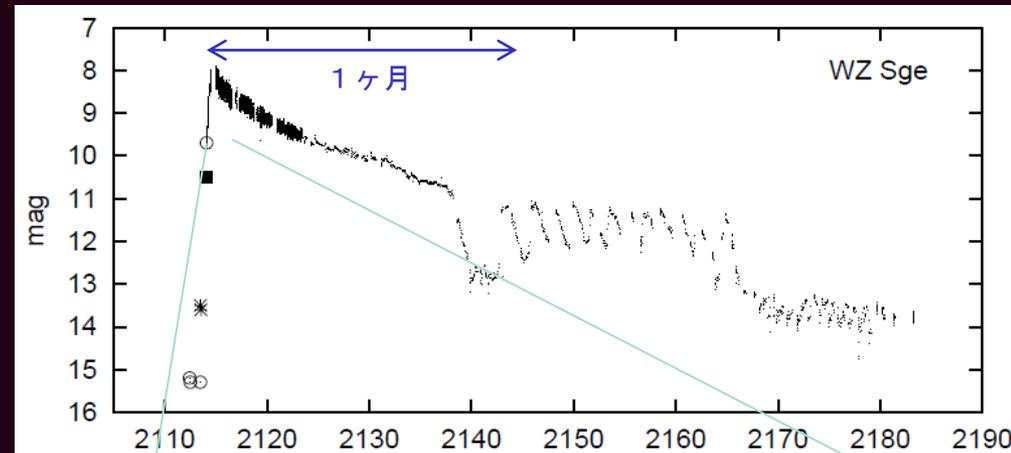
- 全ての手掛かりは「光」
 - 測定できるもの：
 - 光子の数（強度）
 - 光子のエネルギー分布（スペクトル）
 - 時間変化
 - 偏光



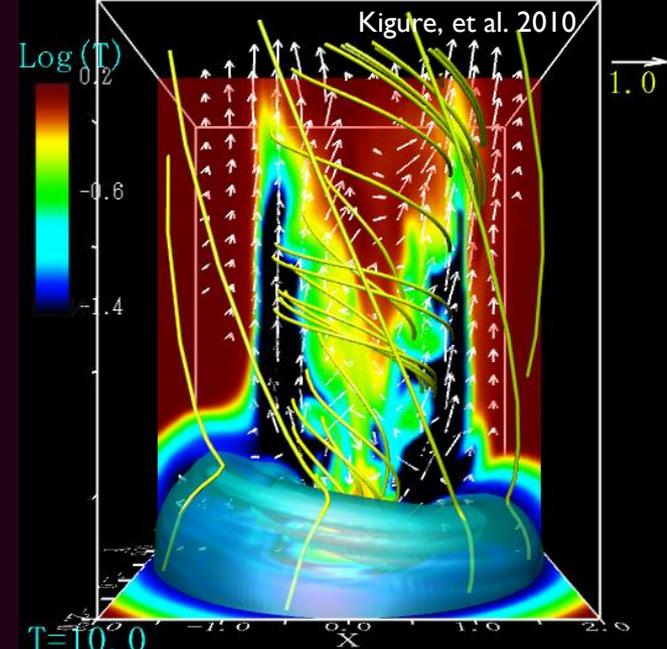
天体の明るさの時間変動

- 明るさが時間と共に変わる星
= 変光星
- 時系列の光度変動グラフ
= 光度曲線

矮新星の光度曲線 (Ishioka, et al. 2002)



宇宙物理学におけるフォワードモデリングの例： ブラックホール降着流の場合



磁気流体 (MHD)
=ガスのダイナミクス

- 質量保存
- エネルギー保存
- 運動方程式
- 状態方程式

一般相対論的効果

輻射流体
(輻射圧 > ガス圧)

流体シミュレーション
結果

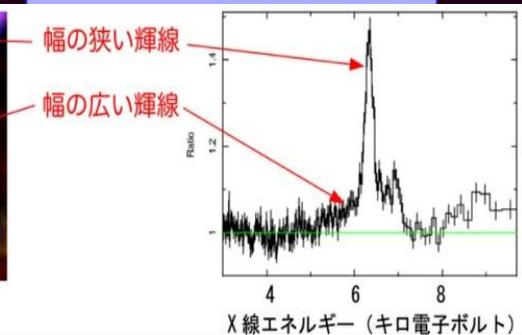
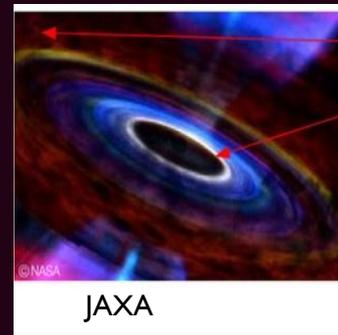
輻射輸送 = 光子の伝達

- 散乱、吸収、再放射

比較

観測事実
(スペクトル)

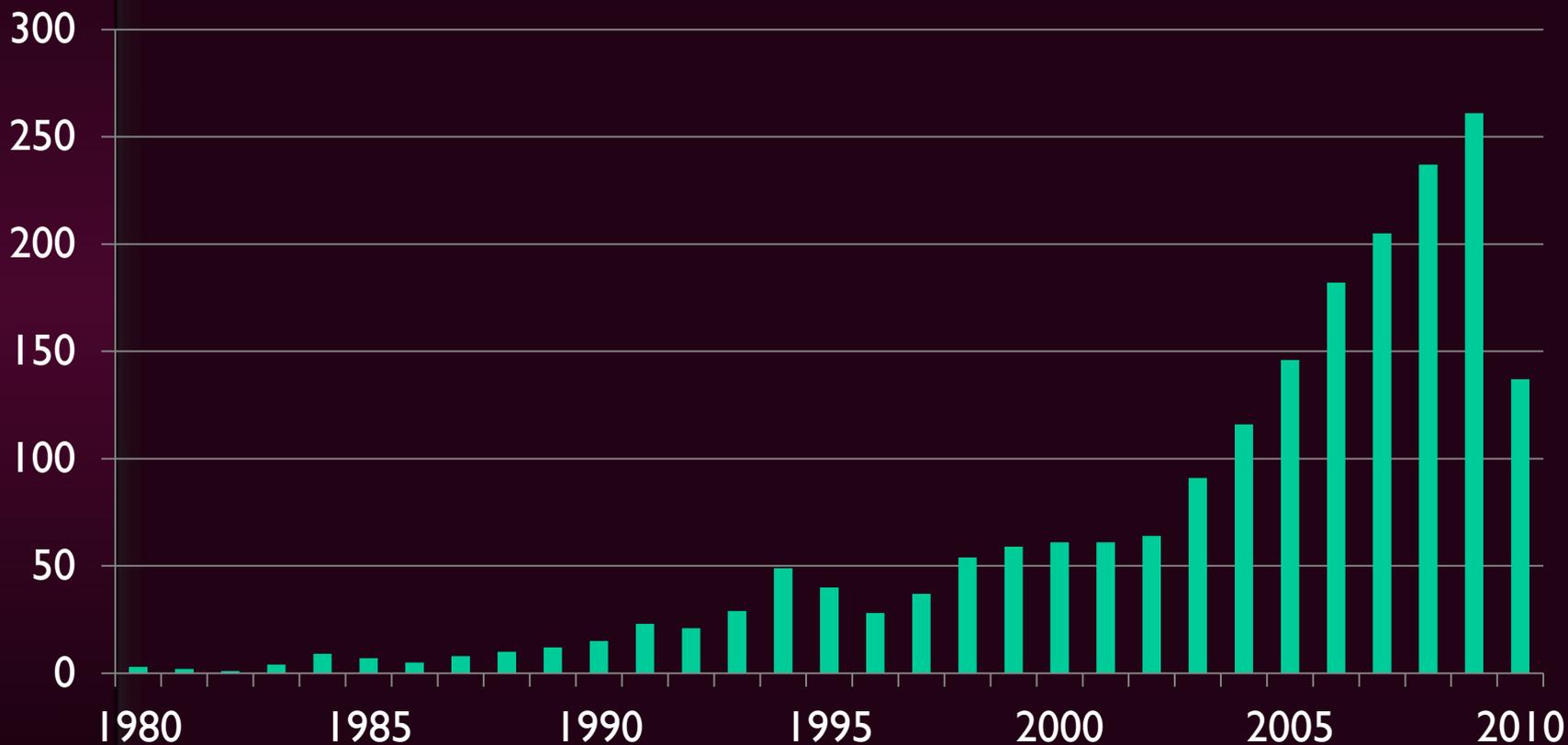
特に輻射の扱いが大変



宇宙物理学におけるベイズモデルの応用

論文数

(ADSでアブストラクトに"Bayes"の文字列が含まれる査読論文)



この10年間で急速に増加

宇宙物理でベイズと言えば： 例：遠方銀河の距離を撮像 観測だけから推定する

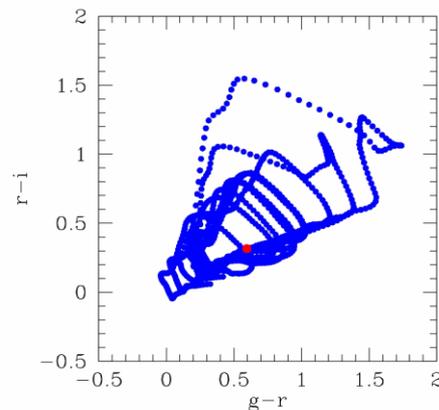
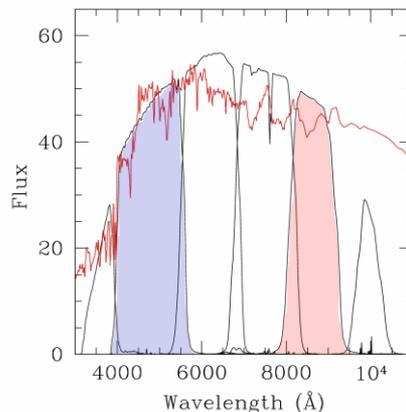
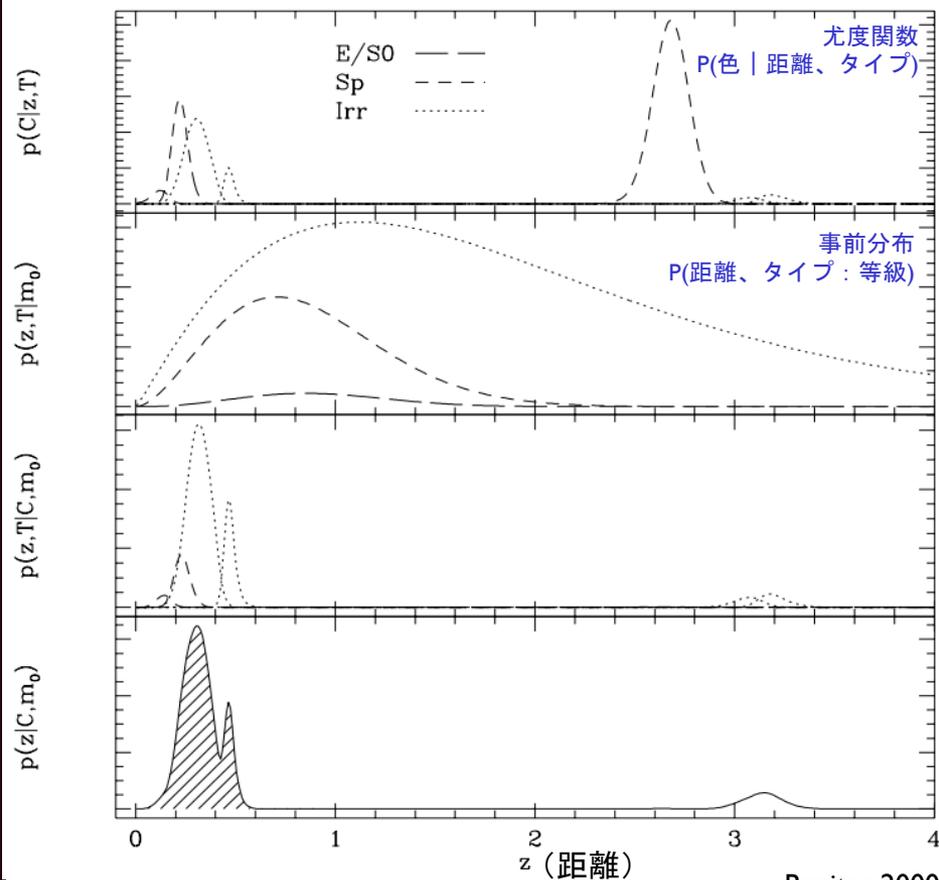


スペクトルを撮る



• Benitez 2000

- 銀河が近いとスペクトルと光のドップラーシフトで後退速度（=距離）がわかる
- 銀河が遠いとスペクトルはnoisyに。撮像しかできなくなる（スペクトル情報はほぼ失われる）
- 撮像観測（=銀河の色）から距離をベイズ的に推定する
 - あるタイプの銀河をある距離に置いた時の色（尤度関数）
 - これだけだと色と距離が一対一対応しない
 - ある等級を与えたときの距離・タイプ（事前分布）

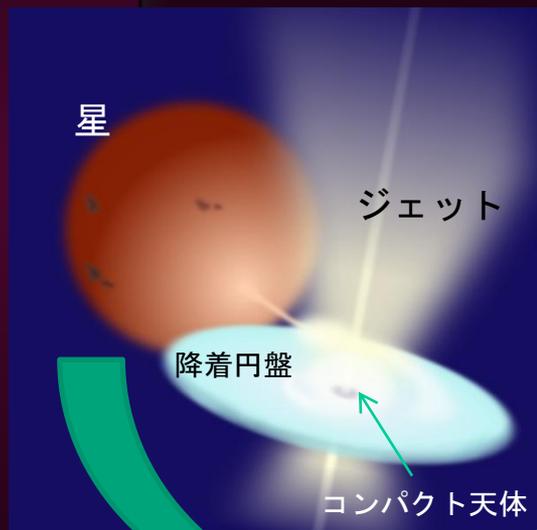


我々の最近の仕事

- 時間変動を利用した降着円盤の構造再構成
- 時間変動を利用した
ジェットからの偏光成分の分離

時間変動を利用した降着円盤の構造再構成

- ブラックホール周りの構造は直接は見えない。
- 時間変動から探る。



観測

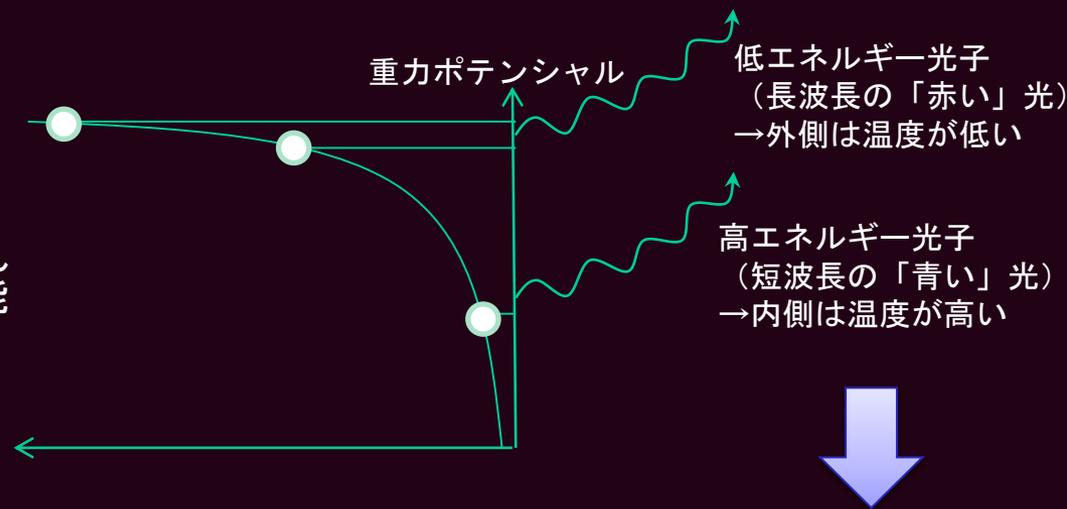
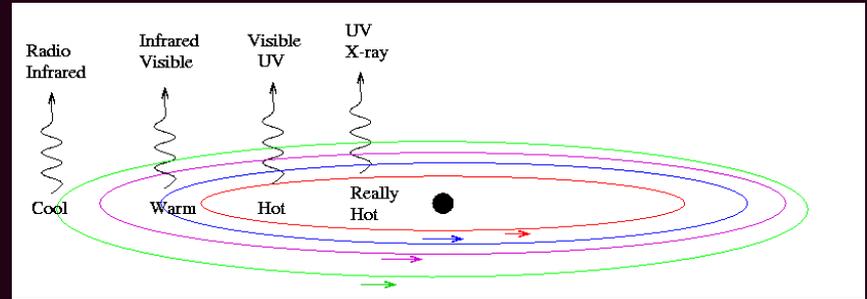


連星の回転周期での時間変動
→降着円盤の情報を含む

連星系なので回転する

降着円盤とは

- 「恒星」と並ぶ宇宙の基本構成要素の1つ
 - 「恒星」：核融合がエネルギー源
 - 「降着円盤」：重力エネルギーが源
 - ケプラー回転しながらゆっくり落ちていく。
 - エネルギーを光へ変換する効率は降着円盤が恒星の10倍以上
 - 異常に明るい遠方銀河（クェーサー）の光源として提唱
 - 他にも、銀河核、ブラックホール、原始星、等。
- 円盤構造を探る試みは多数
 - 連星系の場合、円盤が回転してくれるのでトモグラフィ的解析が可能
 - ただし3次元構造は不明



青い光で内側を、赤い光で外側を調べられる

観測

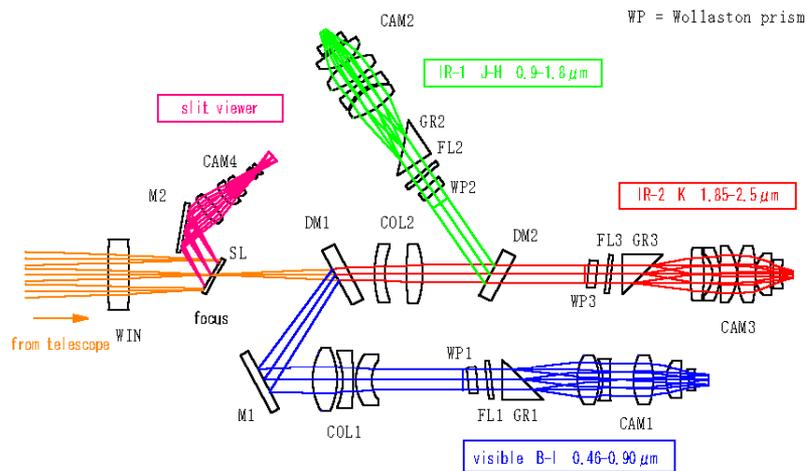
- ・ 可視光と近赤外線と同時に

観測装置「TRISPEC」

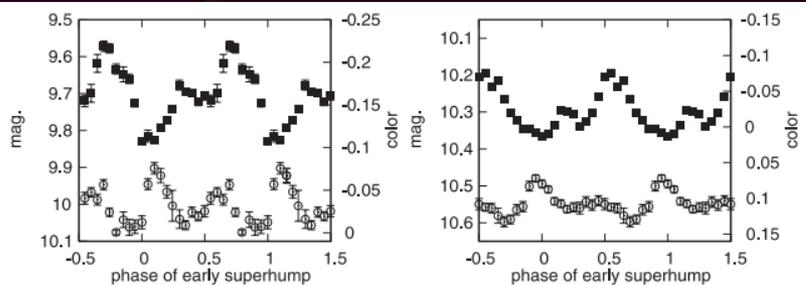
望遠鏡からの入射光をビームスプリッターで3つの光路に分解。3つの2次元アレイ検出器（可視CCD+近赤外線InSB）で撮像。



TRISPEC Spectro-polarimetry Mode



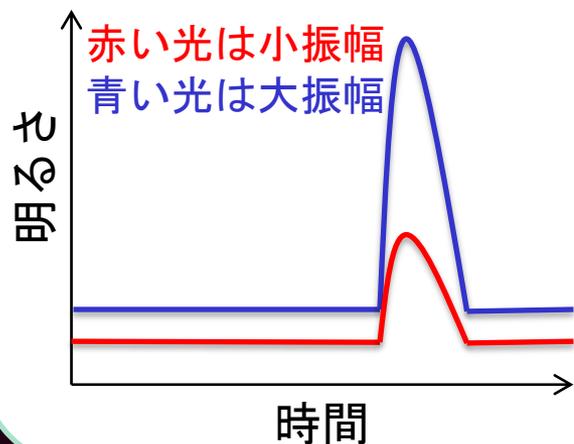
データの例



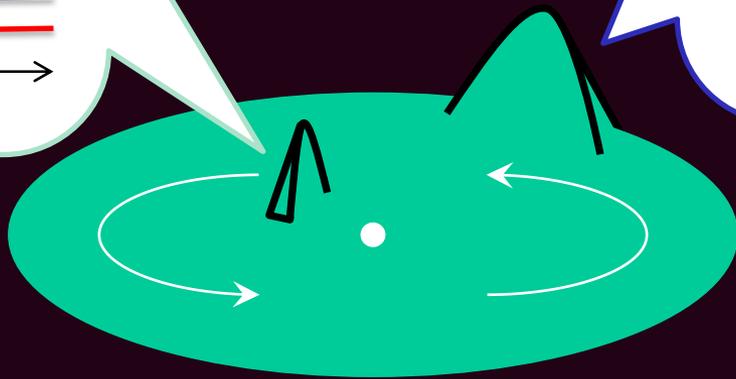
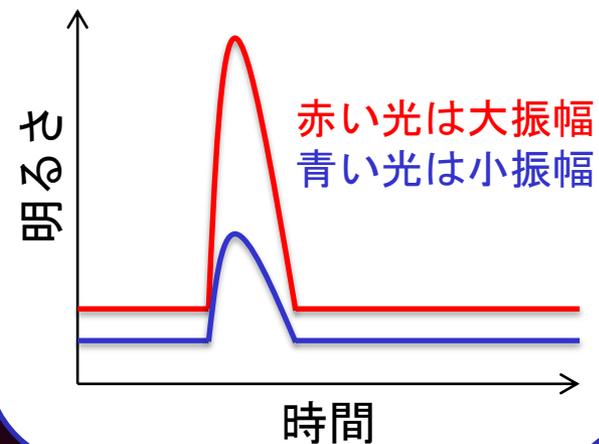
光度曲線から円盤構造を再構成

- 時系列情報→円盤の方位角方向
- 色情報→円盤の動径方向

内側の高温部が
盛り上がっていたら、



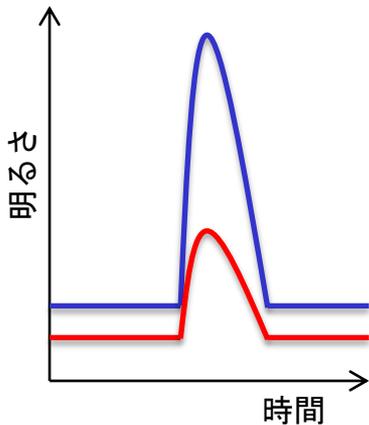
外側の低温部が
盛り上がっていたら、



ベイズモデルの詳細

入力

多バンドの光度曲線



モデル

円盤高さ $h(i,j)$ の事後分布をベイズ推定

$$P(h) \propto L[f_{\nu,obs}(\phi), f_{\nu,model}(\phi)]\pi(h)$$

事後分布

尤度関数

事前分布

* 尤度関数 (観測とモデルの光度曲線で定義)

$$L \propto \prod_{i,j} \exp - \frac{[f_{\nu_i,obs}(\phi_j) - f_{\nu_i,model}(\phi_j)]^2}{2\sigma^2}$$

* 事前分布

(局所的により滑らかに)

$$\pi_{smooth}(h) \propto \prod_{l,m} \left[\exp - \frac{(h_{l,m} - 2h_{l-1,m} + h_{l-2,m})^2}{2w^2} \exp - \frac{(h_{l,m} - 2h_{l,m-1} + h_{l,m-2})^2}{2w^2} \right],$$

($h=0.1r$ の円盤をデフォルトに)

$$\pi_{disk} \propto \begin{cases} \prod_{l,m} \exp - \frac{(h_{l,m} - h_{disk,l,m})^2}{2h_{disk,l,m}^2} & (h_{l,m} \geq 0) \\ 0 & (h_{l,m} < 0) \end{cases}$$

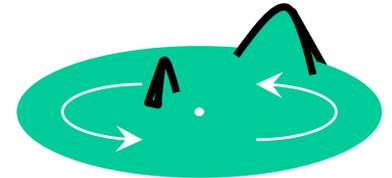
* 実際の推定はマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)を使う。

* 円盤の温度分布は標準円盤モデルを想定して、

$$T = T_{in} \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^{-3/4}$$

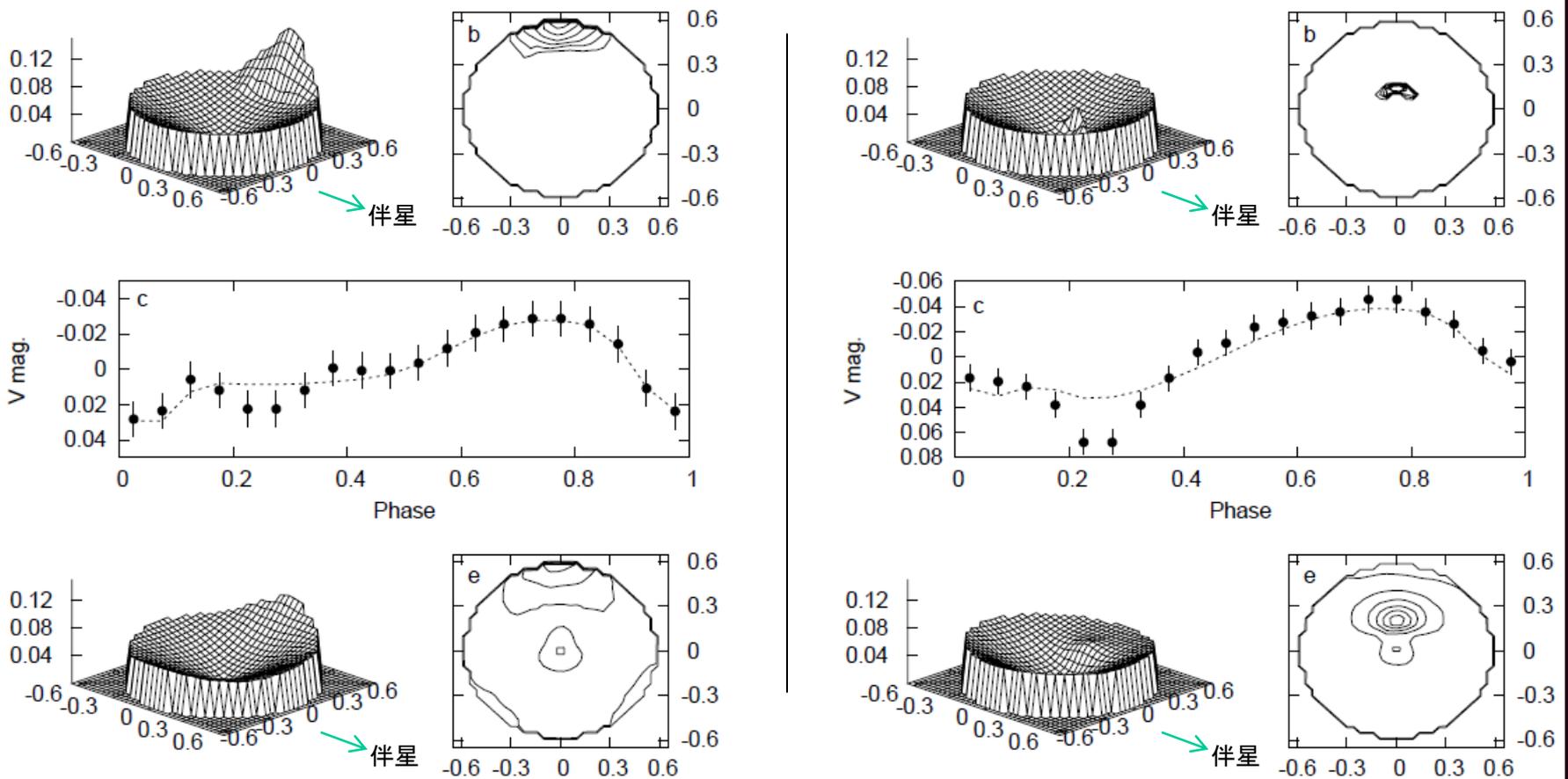
出力

円盤高さのマップ

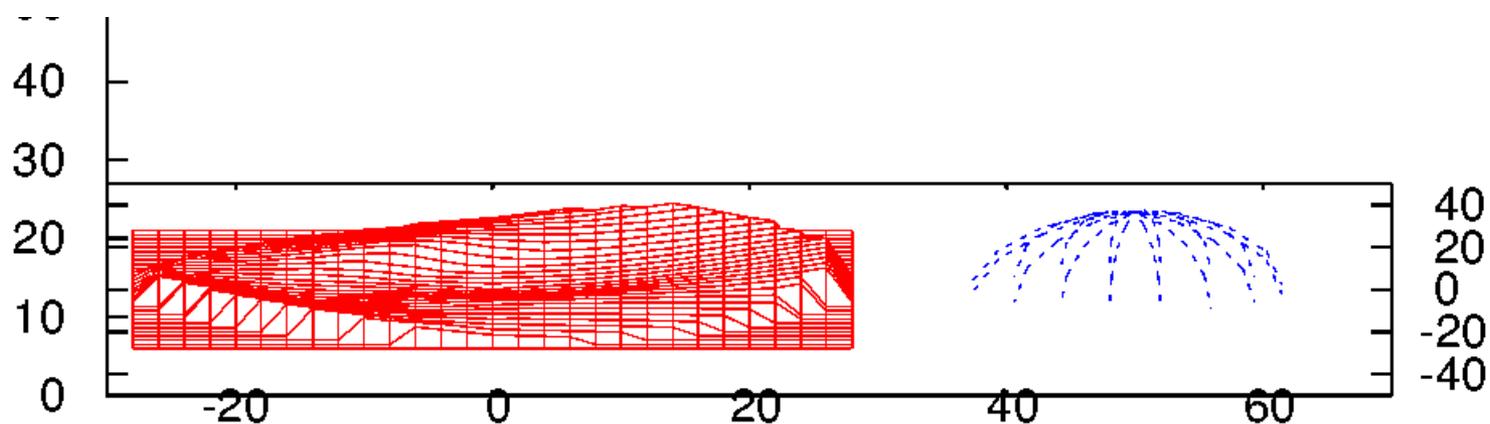


人工データを使ったデモンストレーション

- 期待通りの結果
 - 外側の構造は外側に、内側の構造は内側に、それぞれ再構成。
 - 事前分布の効果で、仮定した構造よりも滑らかな構造に。

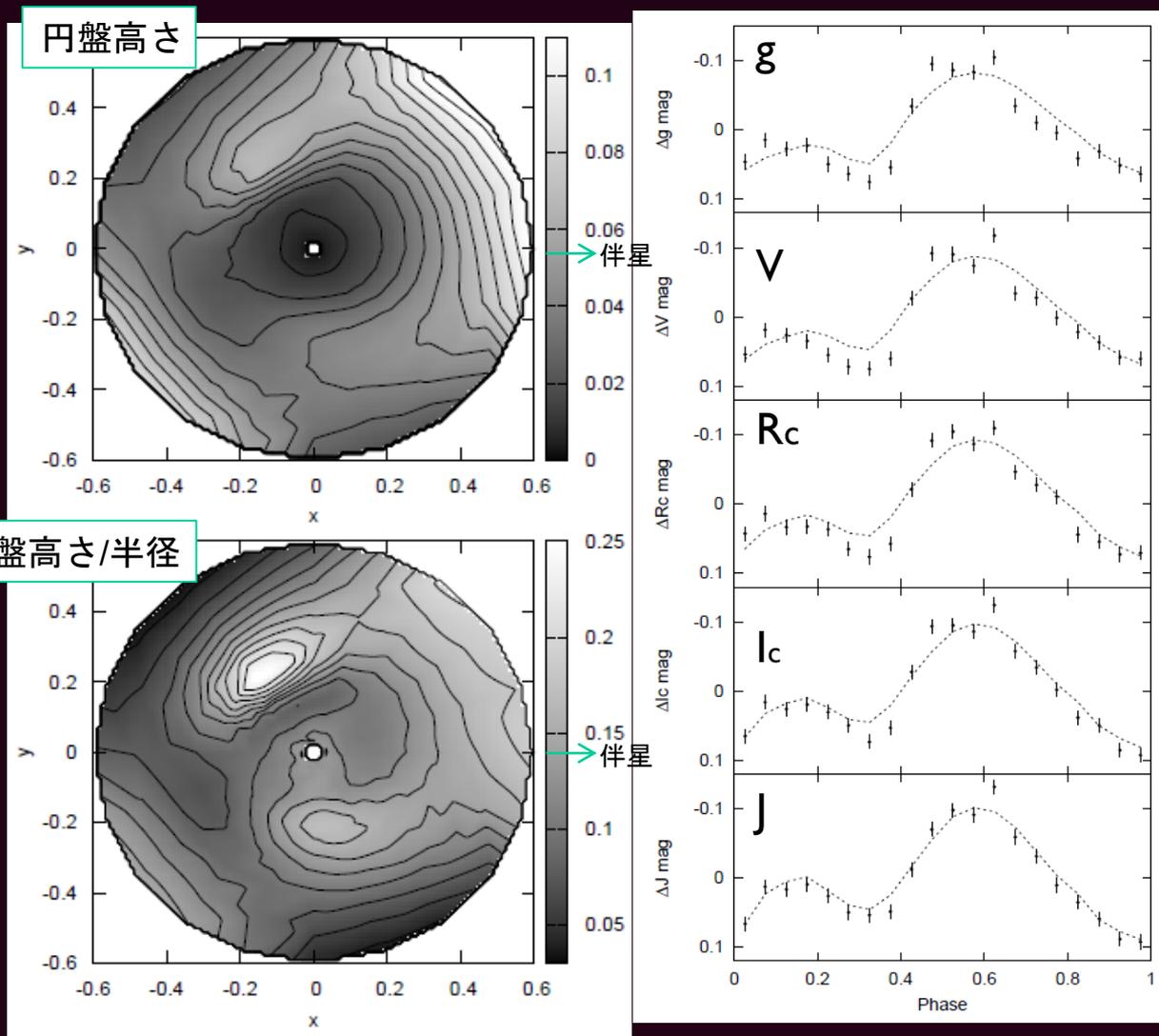


実際のデータから再構成された円盤



矮新星 V455 Andのデータから再構成 極大5日目

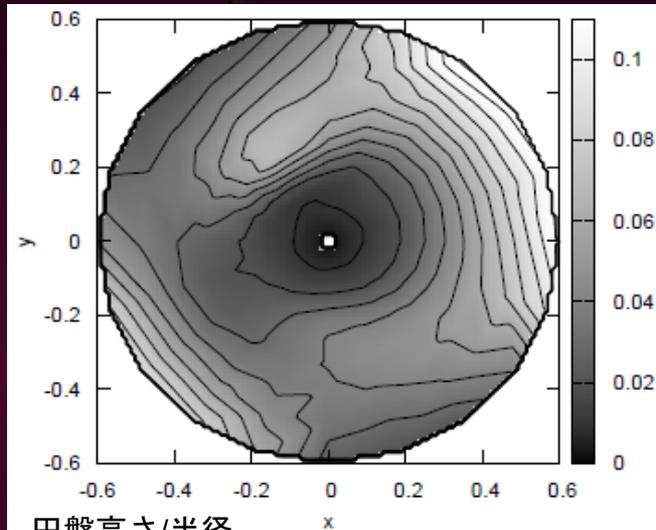
- 極大5日後の5バンド (g,V,R,I,J) データ
- 主・副の極大をつくる構造 + 内側への「腕」構造
- 円盤外縁の最大高さは、 $h/r = 0.20$ 。



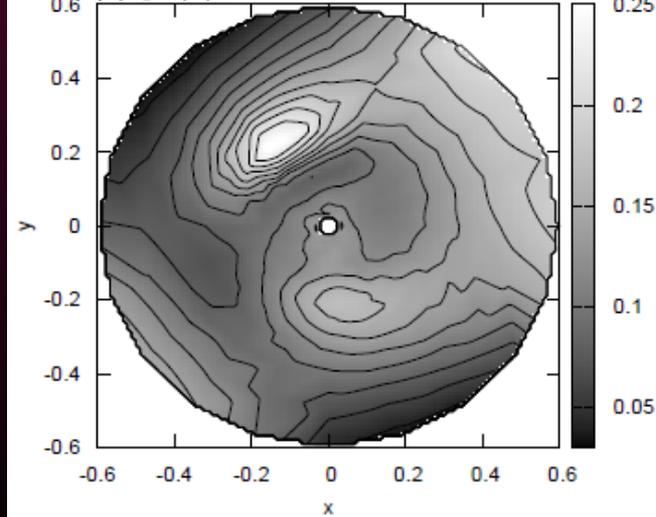
理論モデルとの比較

円盤高さ

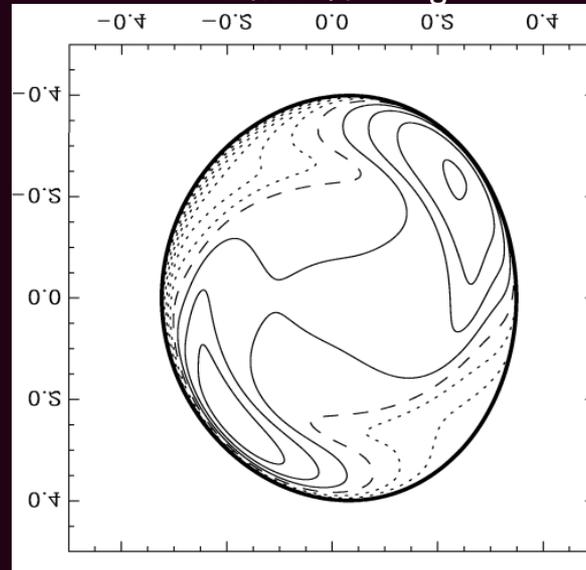
- 潮汐効果？ 2:1レゾナンス？



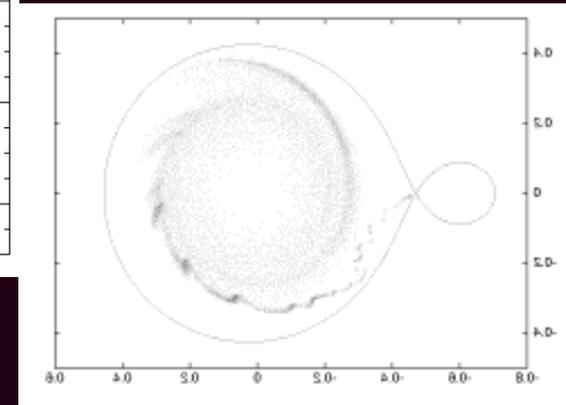
円盤高さ/半径



潮汐効果による円盤高さ
の歪みの理論計算 (Ogilvie 2002)



SPHによる2:1 レゾナンス
のシミュレーション
(Kunze & Speith 2005)



光度曲線から再構成された円盤は「潮汐効果」による歪みと似ているが、左上の構造は説明できない。

小まとめ

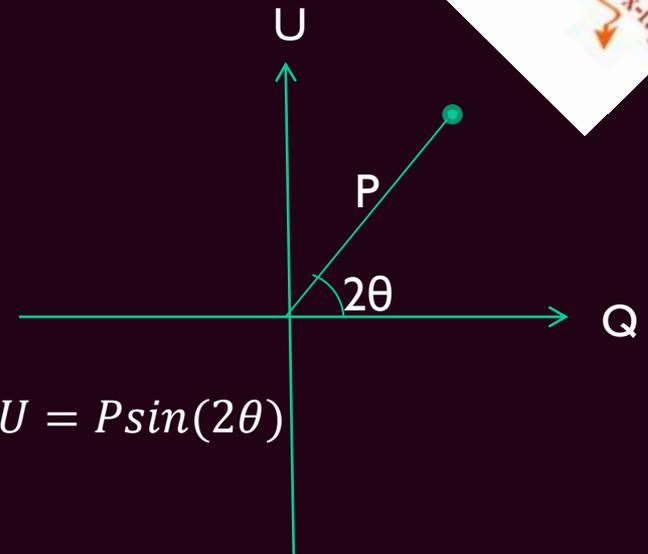
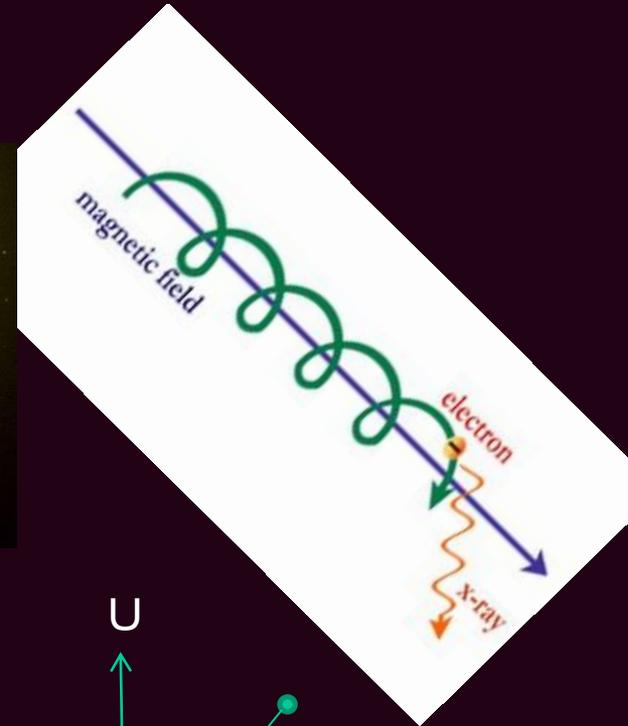
- ベイズモデルをトモグラフィー的解析に応用した例。
- 円盤の構造情報を持った光度曲線から、降着円盤の高さマップを推定するベイズモデルを開発した。
- 再構成された円盤は主・副の極大をつくる最外縁の構造＋内側への「腕」構造をもつ。
- 潮汐効果による歪みに似ているが、副極小を作るための盛り上がり部分を説明できない。
- 今後の展開
 - 他の天体でも同様の結果になるか？
 - 円盤構造の時間変化

我々の最近の仕事

- 時間変動を利用した降着円盤の構造再構成
- 時間変動を利用した
ジェットからの偏光成分の分離

相対論的ジェットと偏光

- 相対論的ジェット
 - 加速・集束・噴出機構が未解明
 - 磁場が重要？
 - 磁気圧、各種MHD不安定性
- ジェットと偏光
 - 自然光＝無偏光
 - シンクロトン放射
 - 磁場に巻きついた電子の運動
→電磁波の放射
 - 磁場に垂直な方向に偏光
 - **ジェットからの放射の偏光を測れば、見えない「磁場」が見える！**
- 偏光の表現
 - 偏光度(PD)と偏光方位角(θ)
 - 加算性なし
 - 2次元ベクトルとして
 - ストークス パラメータ
 - 加算性あり



$$Q = P \cos(2\theta), U = P \sin(2\theta)$$

ジェットの偏光の挙動は何故「めちゃくちゃ」なのか？

- 偏光パラメータと光度or色などとの相関関係

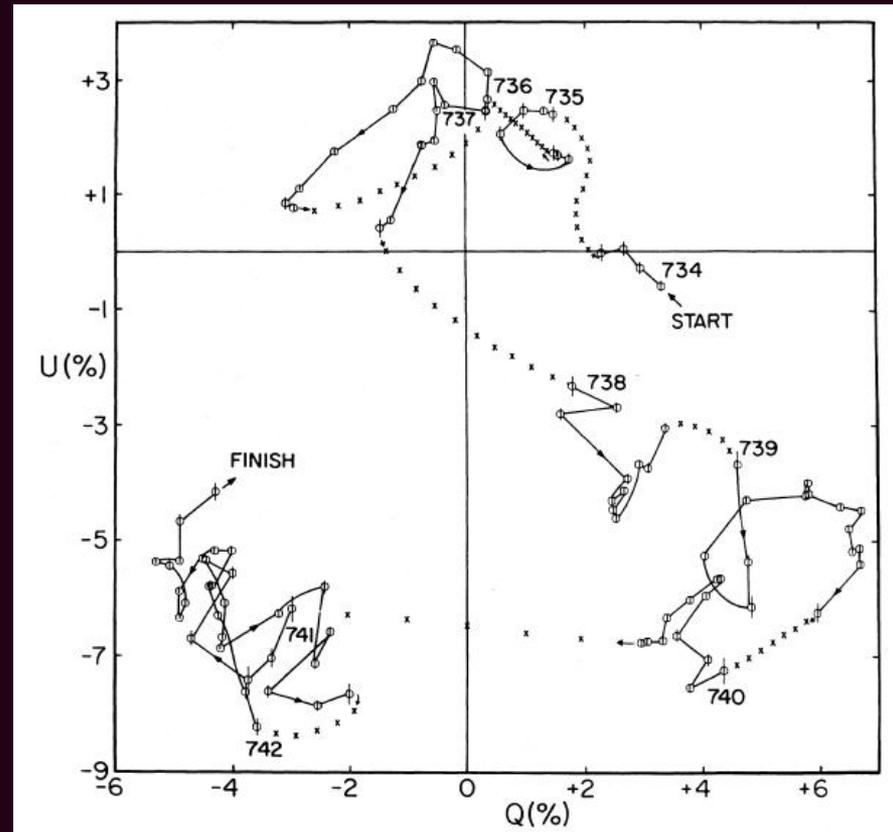
- だいたいとは明らかな相関なし、とされる
- Moore et al. (1982), Jones et al. (1985, 1988), その他たくさん
- 「QU平面上をランダムに動く」とされる
- “erratic” variation

- 広島大学「かなた」望遠鏡による集中観測

- 研究史上最大規模のサンプル数×情報量
- やっぱり「めちゃくちゃ」

- 「めちゃくちゃ」な中に系統的に変動する成分が隠れていないか？

ジェット天体「BL Lac」の1週間のQU平面上での動き (Moore et al. 1982)



2つの偏光成分に分離できないか？

- 1つは「光度曲線と相関して変動する成分」
- もう1つは「長期成分」
- 本質的に決定はできない
 - Long-term trend とフレア成分は観測では縮退している。

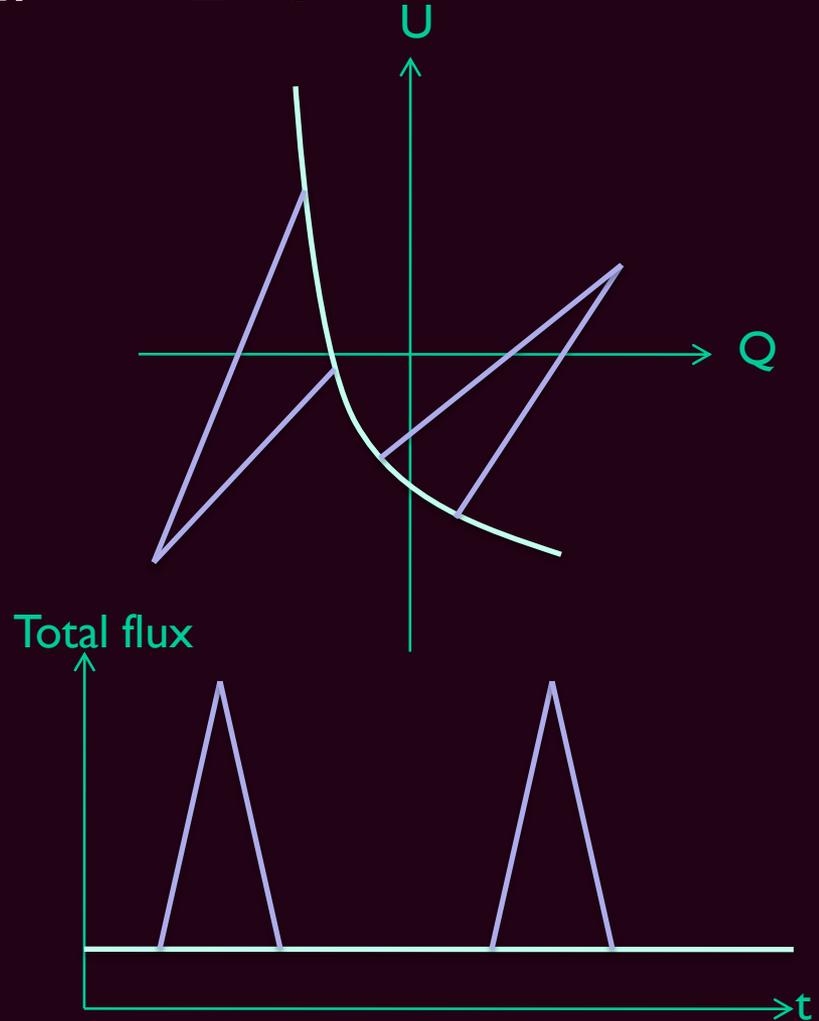
$$(Q_{\text{obs}}, U_{\text{obs}}) = (Q_0 + Q_{\text{flare}}, U_0 + U_{\text{flare}})$$

• ベイズモデルの構築

$$p(Q_0, U_0 | f, Q_{\text{obs}}, U_{\text{obs}}) = \frac{L(f, Q_{\text{obs}}, U_{\text{obs}} | Q_0, U_0) \times \pi(Q_0, U_0)}{C}$$

↑
残りの成分は
光度曲線と相
関するように
(尤度関数)

↑
1つはゆっく
り変動するよ
うに
(事前分布)



$$L(y|x) = \prod_i \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{PF},i}^2}} \exp\left[-\frac{(I'_{\text{obs},i} - \text{PF}'_{\text{S},i})^2}{2\sigma_{\text{PF},i}^2}\right],$$

$$\pi(\{Q_{L,i}\}) = \prod_i \frac{1}{\sqrt{2\pi w^2}} \exp\left[-\frac{(Q_{L,i} - Q_{L,i-1})^2}{2w^2}\right],$$

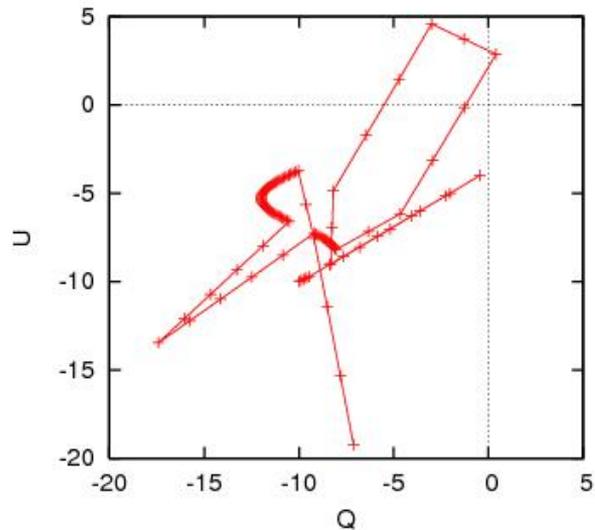
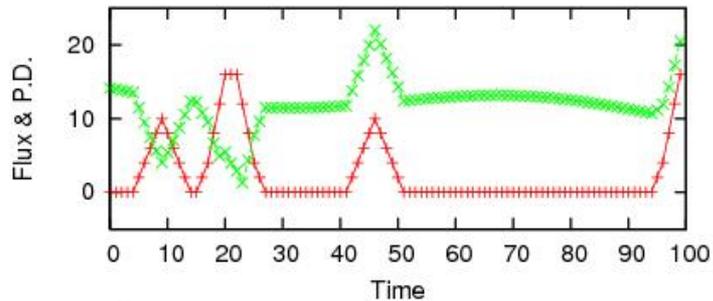
$$\pi(\{U_{L,i}\}) = \prod_i \frac{1}{\sqrt{2\pi w^2}} \exp\left[-\frac{(U_{L,i} - U_{L,i-1})^2}{2w^2}\right].$$

デモンストレーション

シミュレーションデータ

上：光度曲線（赤）と偏光度（緑）

下：QU平面

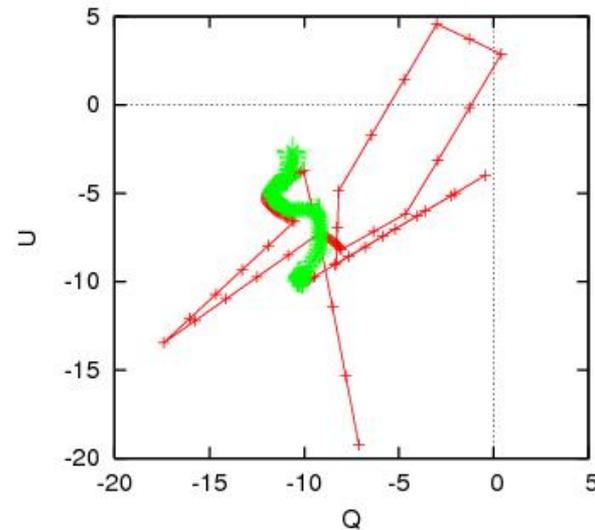
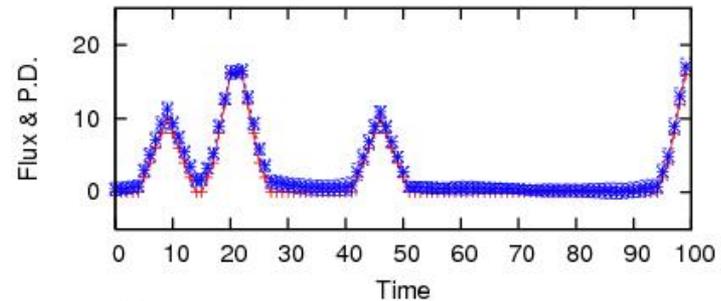


推定結果

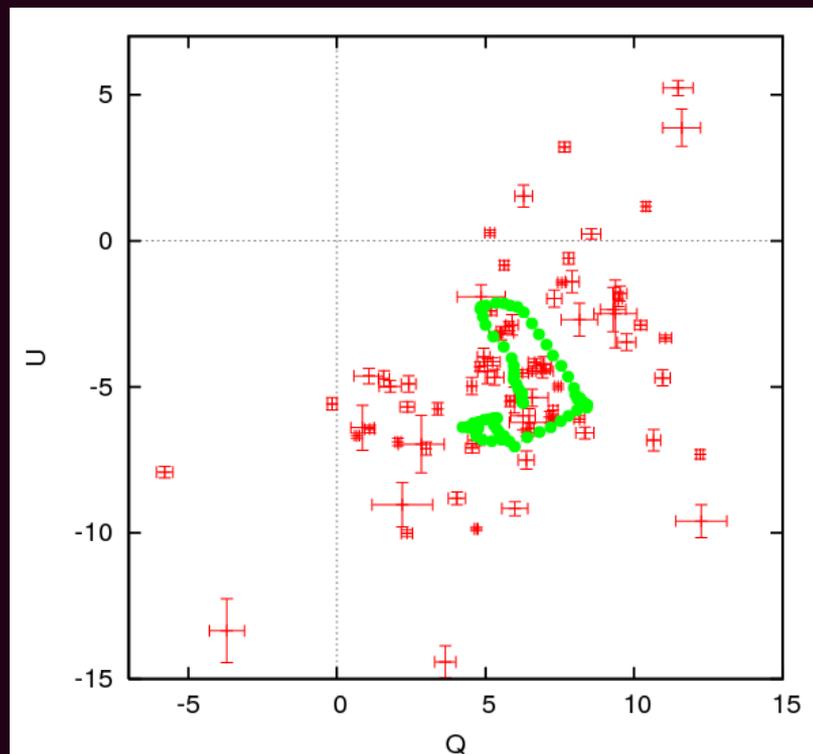
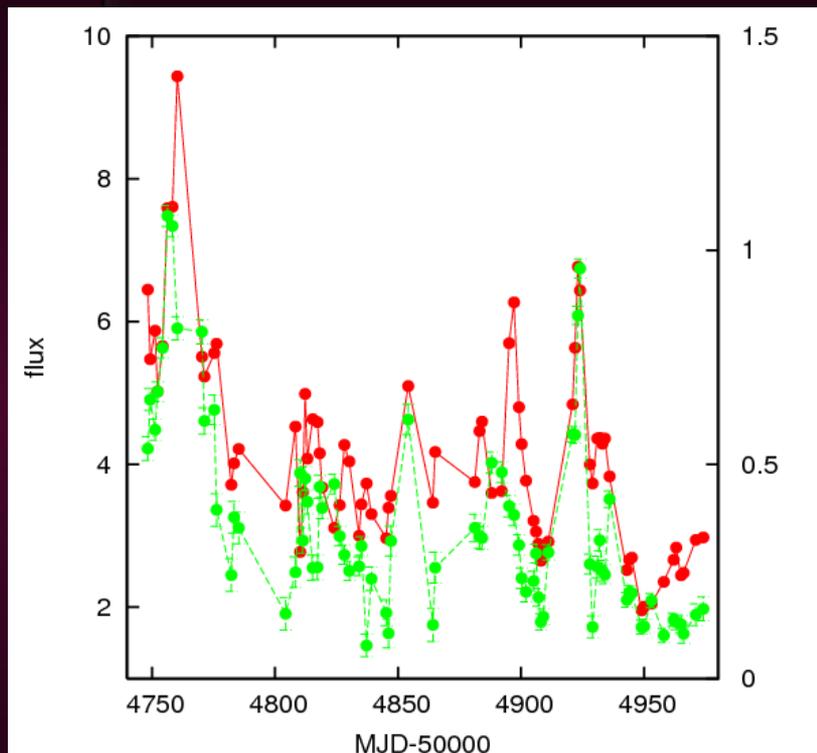
上：光度曲線（赤）と補正された偏光度（青）

下：QU平面。緑が推定された長期変動成分。

仮定したものとほぼ一致。

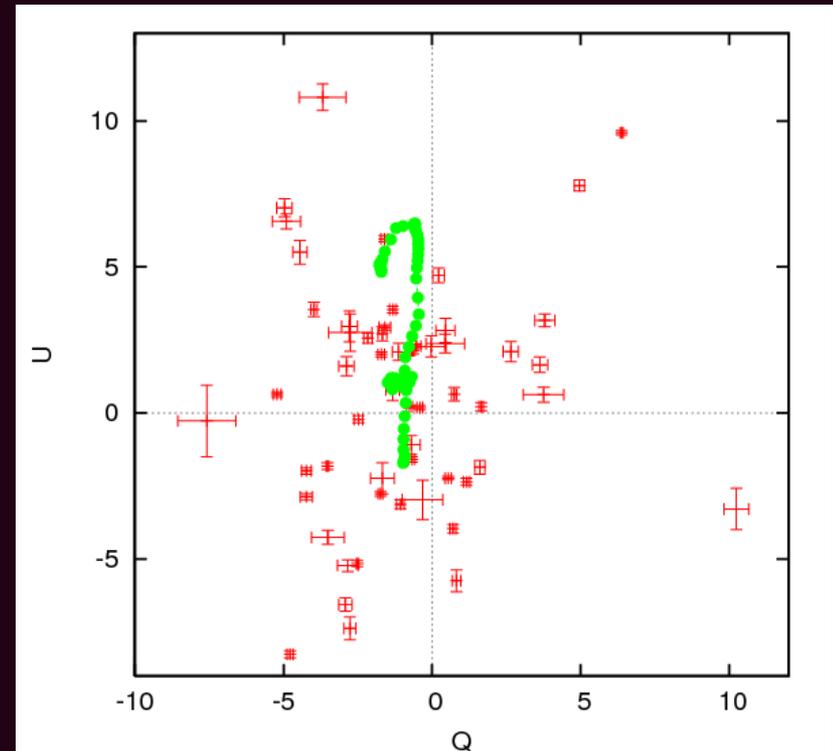
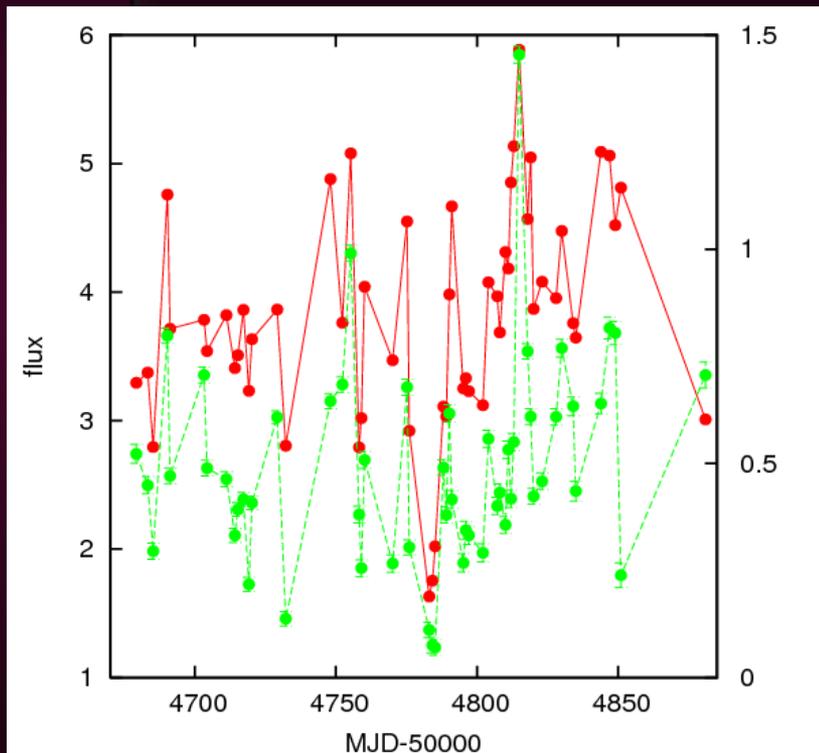


OJ 287の場合



- 長期成分は一定の角度内を振動
- 補正すれば偏光フラックスと光度曲線はよく相関
- 2成分モデルの理想的な例

S 2 0 1 0 9 + 2 2 4 の場合



- 2つの長期成分？
- 光度曲線との相関は有意に改善

小まとめ

- ベイズを成分分離に応用した例。
- 一見「めちゃくちゃ」な挙動をするジェット
の偏光変動から、系統的な変動を抽出したい。
- 偏光と光度変動のデータから、偏光成分を短
時間変動と長時間変動に分離するベイズモデ
ルを開発。
- いくつかの天体では「2成分モデル」で系統
的な変化が見られた。

今日の話のまとめ

- 天体は物理学の「天然の実験場」
- しかし、光を通して天体の限られた情報しか得られないため、バイズ的アプローチのもつポテンシャルは大きい。
- 今日は我々の最近の仕事として、
 - 降着円盤の構造再構成
 - ジェット偏光の成分分離を紹介した。