

# セイファート銀河NGC4151の ダストトローラス内縁における ダスト再生成

越田 進太郎

東京大

センター

吉

小林行泰

富田

、  
[AXA)、  
ANU)



# Contents

- ▣ 活動銀河核(AGN)におけるダスト
- ▣ ダスト反響法によるトーラスサイズの計測
  - 可視光と近赤外の変光遅延
- ▣ NGC4151の可視・近赤外変光曲線
- ▣ ダストトーラスサイズの変化
- ▣ 議論
  - トーラス内縁部におけるダストの再生成
  - AGNダストの自己遮蔽的分布

# 活動銀河核(AGN)

- ▣ 銀河中心の超巨大ブラックホール(SMB,  $M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^8 M_{\odot}$ ) に落ち込む高温ガスがエネルギーを放出する現象。
- ▣ 電波からガンマ線のあらゆる波長帯にわたって明るく光っている。
- ▣  $z > 6$ の遠方宇宙にも存在する。
- ▣ 大きな変光をおこす。
- ▣ 構成要素
  - 降着円盤
  - 電離ガス領域 (BLR, NLR)
  - ダストトラス

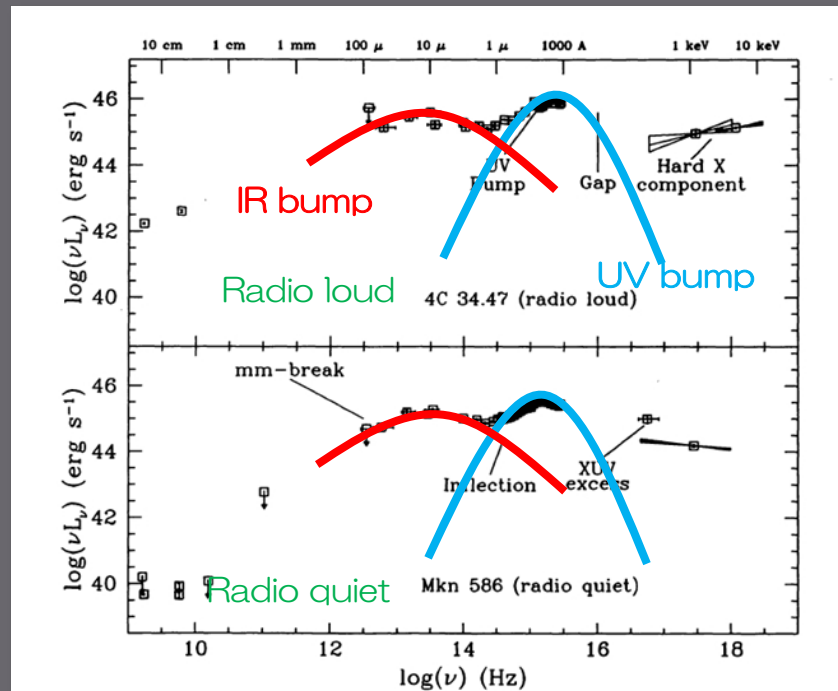


Circinus 銀河  
(HST WFPC2, Andrews 1999)

# 活動銀河核におけるダスト

## AGNのSED：近赤外(NIR) bump

- $\leq 1500\text{K}$  の黒体放射の重ね合わせ
- 昇華温度まで暖められたダストの熱的放射
- 強い赤外放射 $\Rightarrow$ ダストが豊富に存在する。



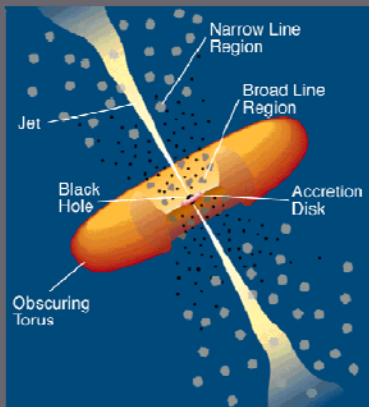
# AGNダストの構造

## □ トーラス状の分布

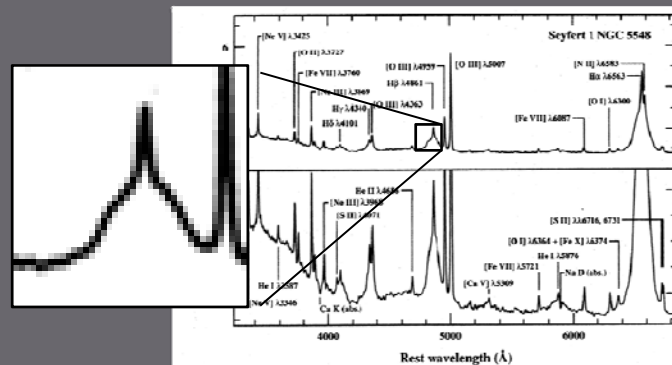
- 降着円盤からの紫外可視(UV/opt)放射によるダストの昇華
  - ⇒ 中空構造
    - ダストの温度分布はUV放射の強さで決まる。
      - ・ ダストの昇華半径
  - 1or 2型AGNの統一モデル
    - 広輝線放射領域(BLR)の遮蔽
      - ⇒ 非等方な分布

$$r_1 = 1.3 L_{\text{uv},46}^{1/2} T_{1500}^{-2.8} \text{ pc}$$

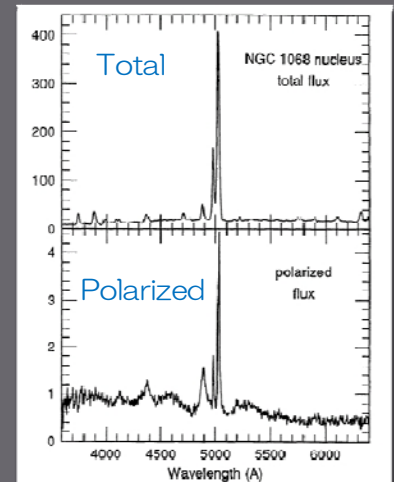
## □ Obscured Broad Line の観測 (Antonucci 1993) により検証された。



Urry & Padovani (1995)



NGC5548 可視スペクトル



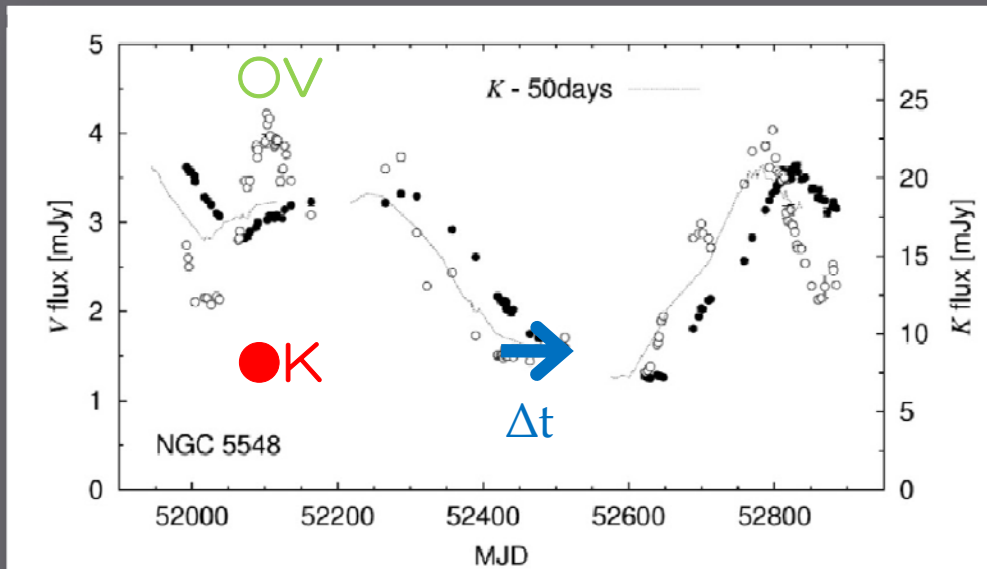
N1068 Hβ (Antonucci 1993)

# ダストトーラスサイズの計測

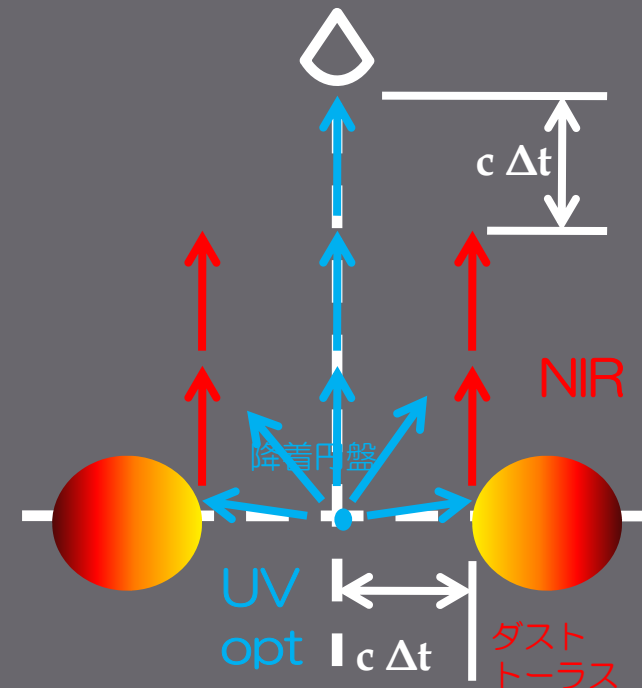
## ▣ ダスト反響法 (reverberation mapping)

- AGNのNIR放射=降着円盤放射によるダスト加熱
  - ⇒NIR変光は UV/opt 変光に類似した形状となる。
- ダストの昇華による中空（トーラス状）構造
  - ⇒NIR変光は UV/opt 変光に対して遅延する。

⇒(遅延時間  $\Delta t$ )  $\times$  (光速  $c$ ) = トーラス内縁半径

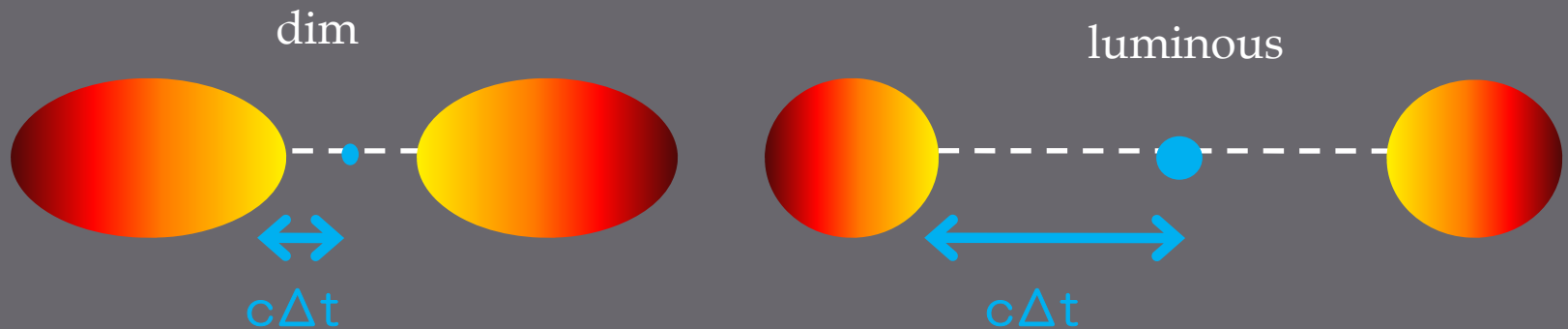


NGC5548 V, K 変光曲線 (Suganuma et al. 2006)



# ダスト反響法

- UV/opt 変光に対する NIR 変光遅延からダストトーラス内縁半径を計測できる。
  - $R_{\text{sub}} = \Delta t \times c$
- 撮像で分解できないAGNの構造を観測することができる ( $\sim 0.1\text{pc}$ )。
- 測光モニターを長期続ければダストトーラス内縁半径の時間変化を追うことができる。



# MAGNUMプロジェクト

- ▣ **Multicolor AGN Monitoring project**
  - 反響法によるダストトーラス内縁サイズの計測を目的としたAGN測光モニタープロジェクト  
(e.g. Yoshii et al. 2002)
- ▣ 2m 専用望遠鏡
- ▣ ハワイ・マウイ島（標高約3000m）



Photo by Tsutomu Aoki



Figure 2. Overview of the MAGNUM telescope

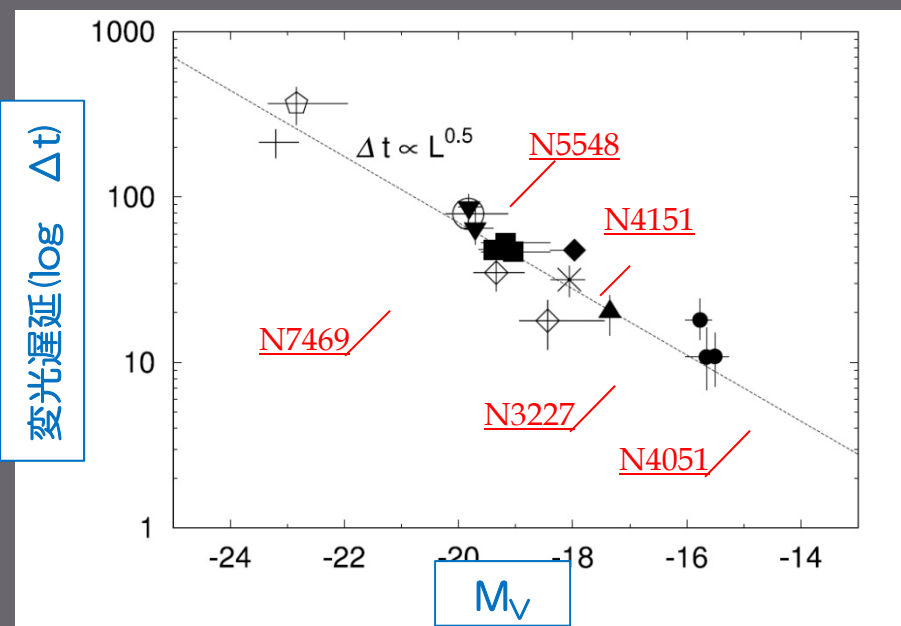


# MAGNUMの観測・成果

- 観測期間：2000.12-2008.12 (最長 8 年間)
- 観測天体数：約70天体 (赤方偏移  $z \leq 0.3$ )
- 可視～近赤外(0.36-2.2 $\mu$ m)の多波長測光観測。
- ダスト昇華モデルを観測的に検証した。

$$\Delta t \propto L_{UV/opt}^{0.5}$$

Koshida+(in prep)



# 本研究の目的

- ▣ **ダストトーラスサイズ時間変化の検出**
  - MAGNUMのモニター観測は高頻度かつ長期間にわたっている。  
⇒ 1つのAGNについてダストトーラス内縁サイズを複数回計測し、時間変化を追うことができる。
- ▣ **AGNダスト再生成の観測的検証**
  - ダストトーラス内縁の時間変化から、AGNにおけるダスト昇華・再生成の様子について観測的な示唆を得る。

# NGC4151

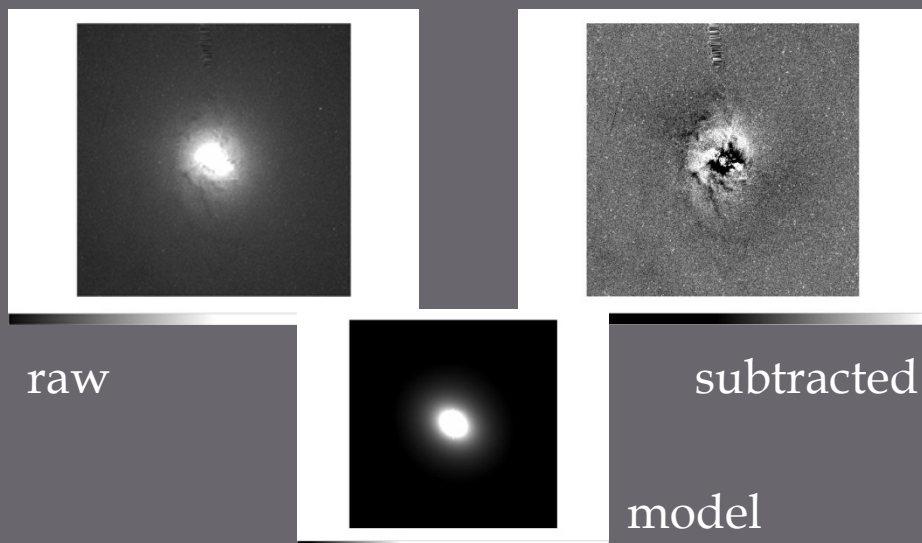
- ▣ 近傍のセイファート1型銀河
  - 1.5型
  - 赤方偏移 $z=0.00332$
  - 近傍の中質量AGN  
( $M_{\text{BH}}=1.33 \times 10^7 M_{\odot}$ , Peterson et al. 2004)
  - 見かけ等級が明るく、最もよく観測されているセイファート銀河の一つ
- ▣ MAGNUMでも8年にわたる測光観測モニターが行われているため、 $\Delta t$ 時間推移を検出するのに適している。



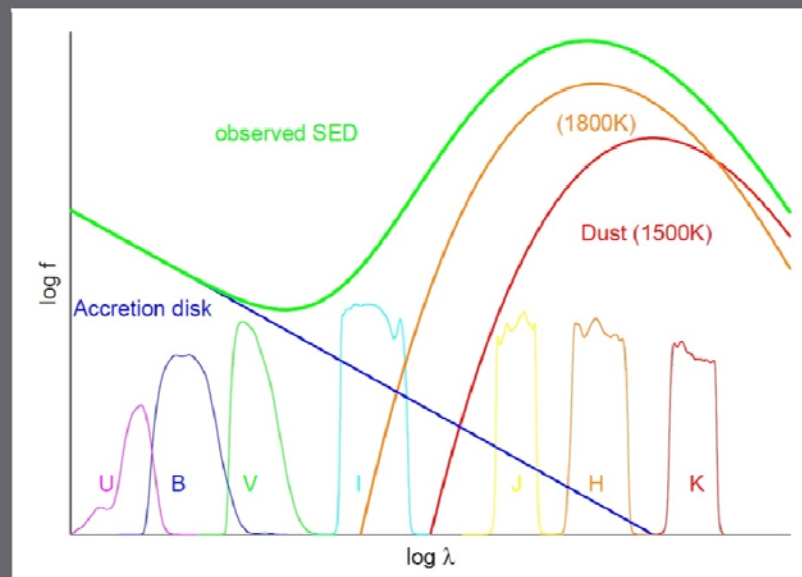
NGC4151 by SDSS

# 光度曲線の導出

- 2001.1-2007.7 に V,K バンドにおいて219回撮像観測
- アパーチャ測光：測光口径  $\Phi=8''.3$
- 参照星を用いた相対測光
- 降着円盤放射およびダスト放射の抽出
  - 母銀河差し引き (V,K)
  - 降着円盤低温成分差し引き (K)



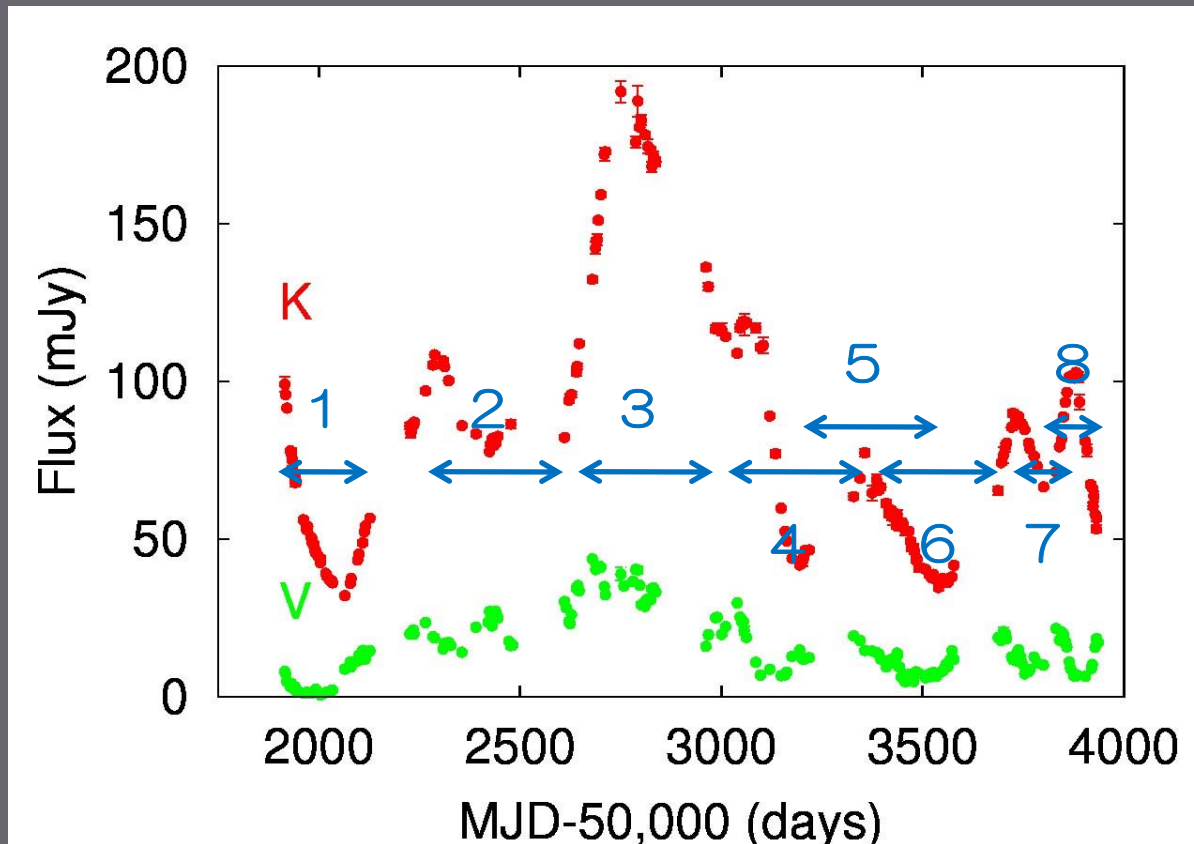
表面輝度分布フィットによる母銀河差し引き  
(NGC4151, Sakata+2009 submitted)



AGN SED 模式図

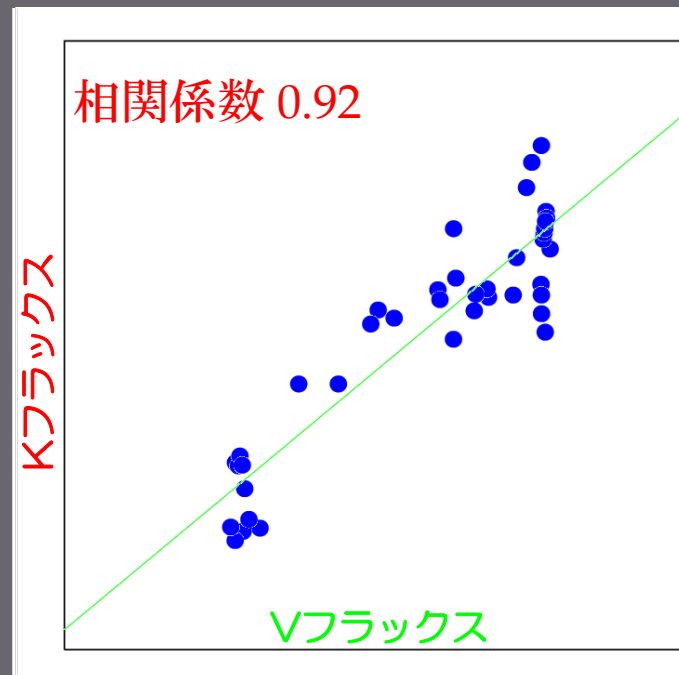
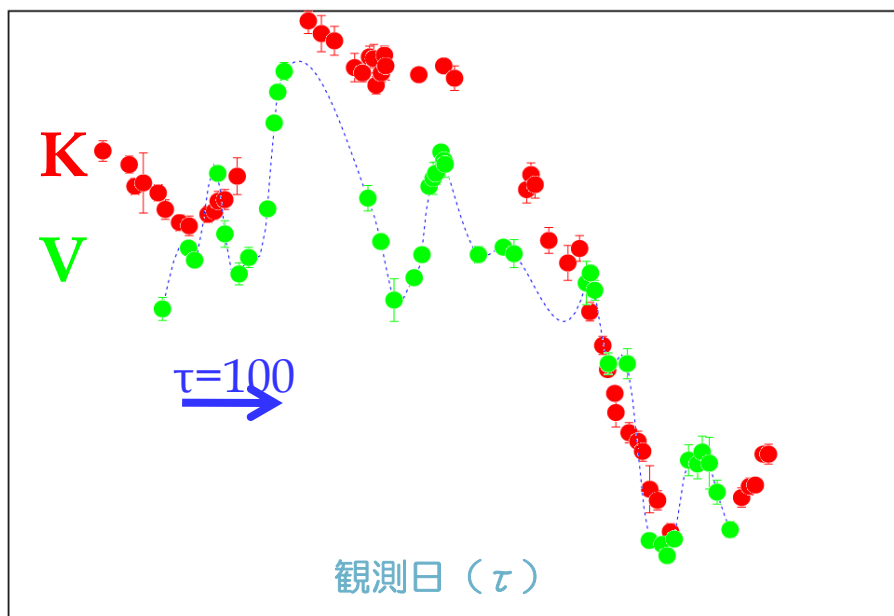
# NGC4151の光度曲線

- V,K で類似した形の変光
- 近赤外の可視変光への追従
- 8年の間に複数の変光特徴がみられる  
⇒複数回の $\Delta t$ 計測が可能。



# 変光遅延時間の導出

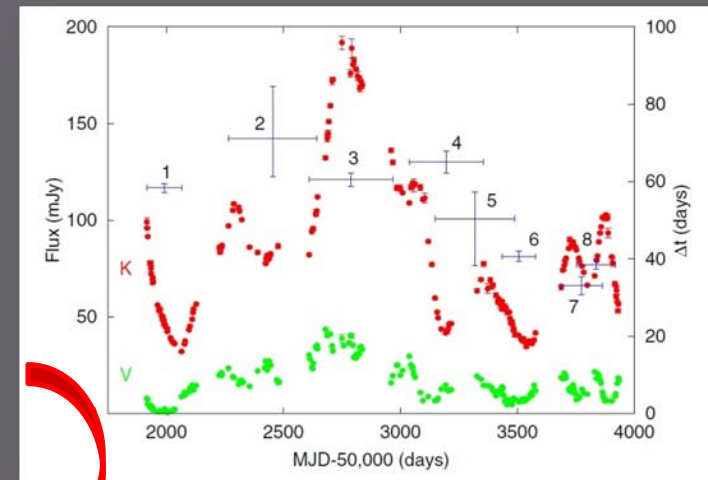
- CCF (Cross Correlation Function) 解析
  - V,K ふたつの光度曲線の観測日オフセットに対する相関係数が大きくなる $\tau$ を遅延時間として採用する。
- 詳細は Suganuma+2006, Koshida+2009 に掲載。



# $\Delta t$ の時間的推移

- 8年間の $\Delta t$ の推移
- 有意な $\Delta t$ の変化(over  $3\sigma$ )
  - 最も早い変化は term 4 から 6

term	MJD	$\Delta t$	$m_v$
1	51990.0	59.6 +1.1 -1.3	-18.35
2	52456.1	71.1 +13.5 -9.8	-18.95
3	52789.1	60.6 +1.5 -1.8	-19.23
4	53198.0	65.1 +2.9 -3.0	-18.64
5	53319.4	50.4 +6.0 -12.1	-18.76
6	53507.4	40.6 +1.5 -1.3	-18.33
7	53776.0	33.1 +2.3 -2.3	-18.66
8	53837.4	38.5 +1.3 -1.2	-18.54

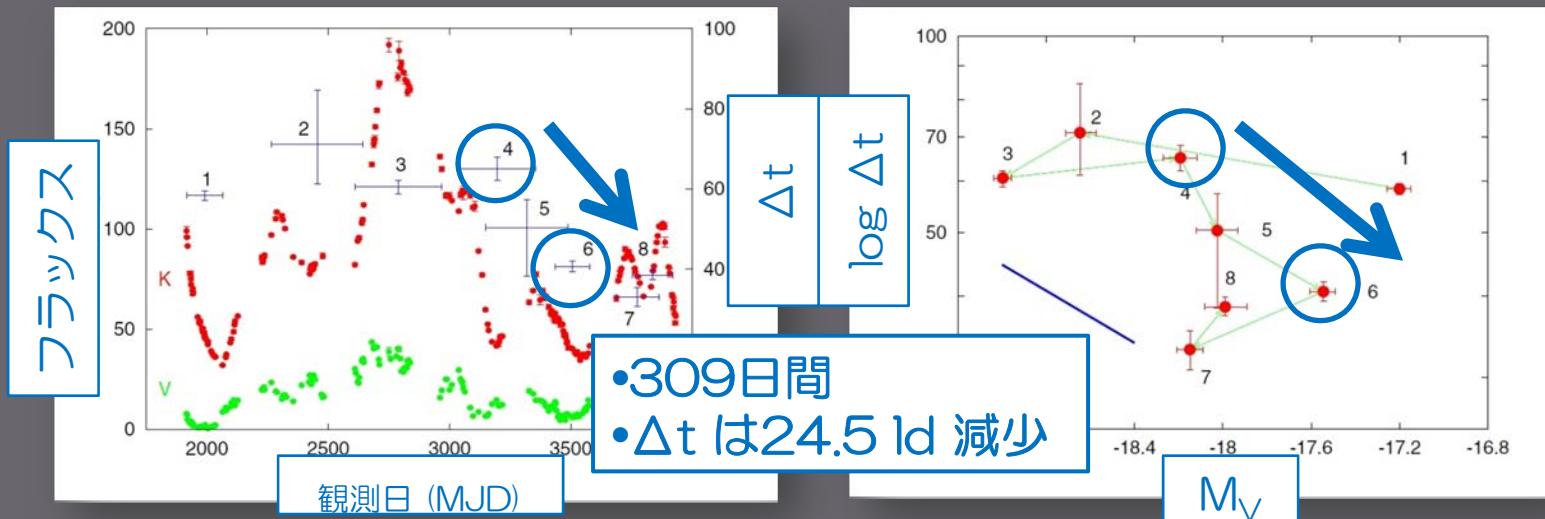


- $\Delta t$  : -24.5 日
- MJD : +309.4 日
- $m_v$  : +0.31 等

# トーラス内縁部でのダスト再生成

- $\Delta t$ の最速の変化：
  - $\Delta t = 65.1 \Rightarrow 40.6$  光日 (term 4 $\rightarrow$ 6, 309 日間)
  - ダスト落下速度に換算すると、  $2.4 \times 10^4 \text{ km s}^{-1}$
- ダストトーラス直近のH $\beta$ 広輝線放射雲の速度分散  $\sim 10^3 \text{ km s}^{-1}$

ダスト粒子の周囲からの落下では $\Delta t$ の減少が説明できない。  
 $\Rightarrow$ ダストの再生成





# AGN 内部のダスト生成環境

□ 理論的にいくつかのモデルが考えられているが、どれが適当かはまだ分かっていない。

■ AGB 星との比較(Elvis+2004)

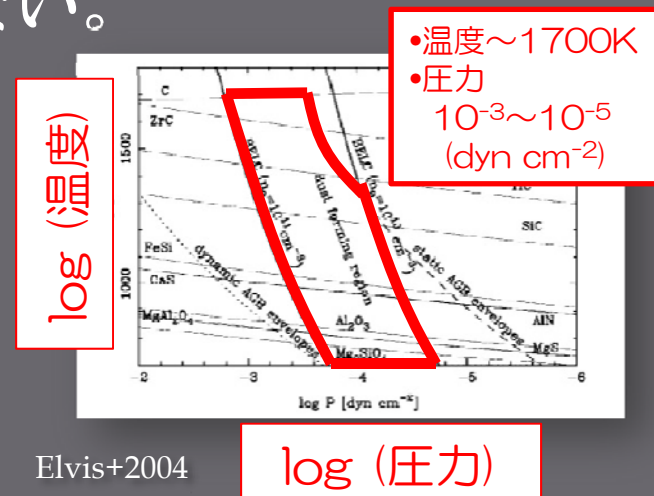
- ガスの outflow による断熱膨張
- AGN BLR 外縁部における温度・圧力でもダスト生成が可能。

(Elvis +2004)

■ Binary WR star

- WR star からの質量放出が連星の恒星風と衝突してダストを形成する (Tuthill+1999, Williams+2009)
- AGN でも BLR cloud 同士の衝突によって同じ現象が起きている可能性がある。

□ **ダスト再生成の観測⇒理論モデルへの示唆・制限**



# Cosmic Dust?

- ▣ 遠方宇宙でも相当量のダストが観測されている。
  - $z > 6.0$  のQSOでダスト放射を観測(Bertoldi+2003)
  - 初期宇宙で大量にダストを生成するメカニズムは完全には解明されていない。
- ▣ 今回の観測でAGN内部でダストが生成されうることが分かった。
  - AGNが cosmic dust の生成源のひとつとなりうる可能性を示す第一歩。

# まとめ

- ▣ NGC4151のダストトーラス内縁のサイズを8年間にわたって観測した。
- ▣ ダストトーラス内縁のサイズは有意に変化しており、その変化速度は最大で光速の7.9%に達した。
  - ダストトーラスにおけるダストの再生成を観測したと解釈するのが自然。
- ▣ AGNが cosmic dust の生成源となりうる可能性を示した。



