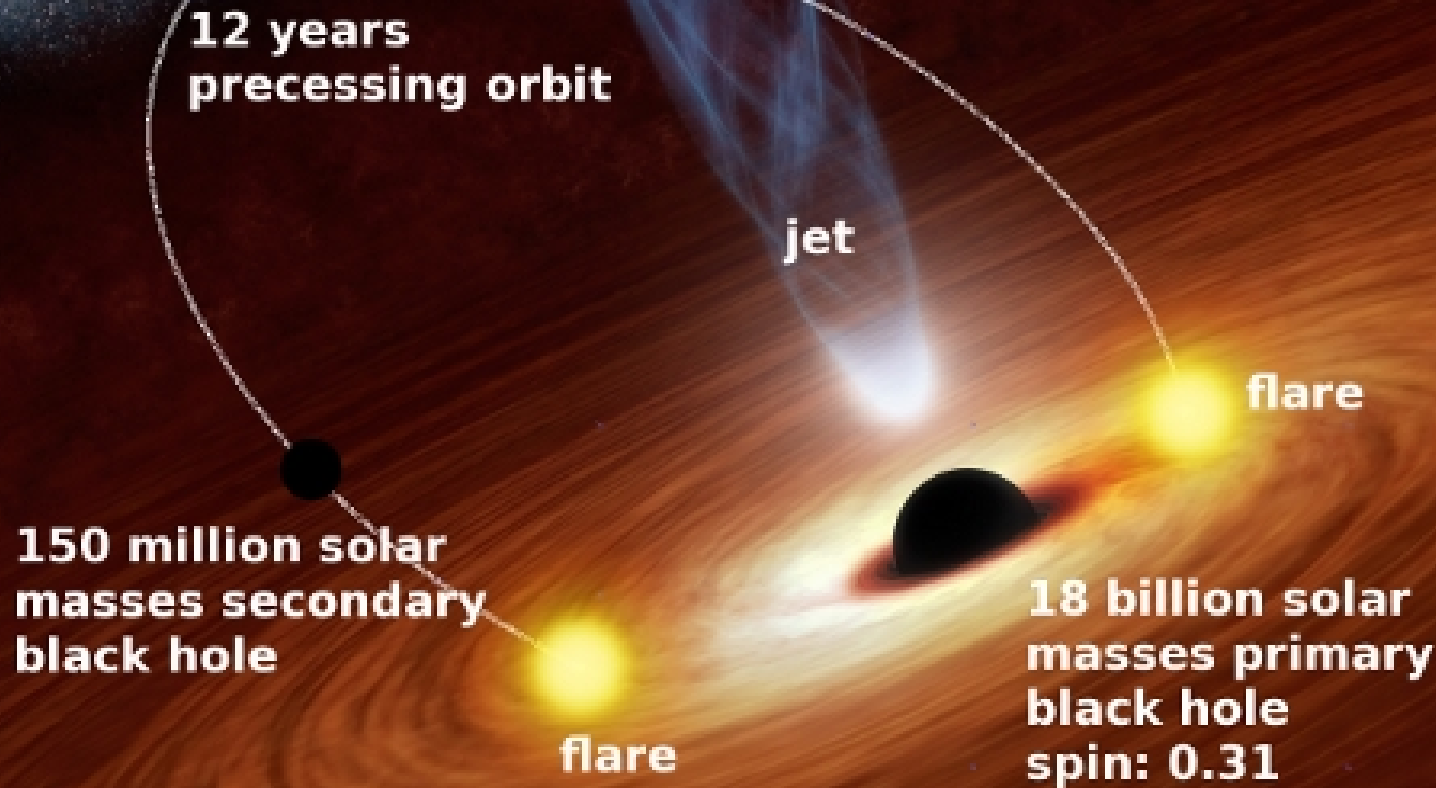


OJ287



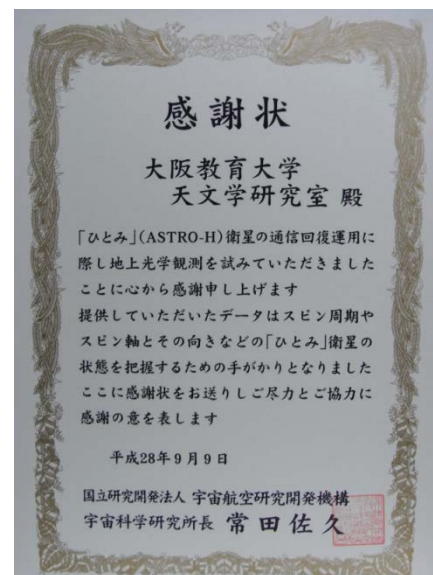
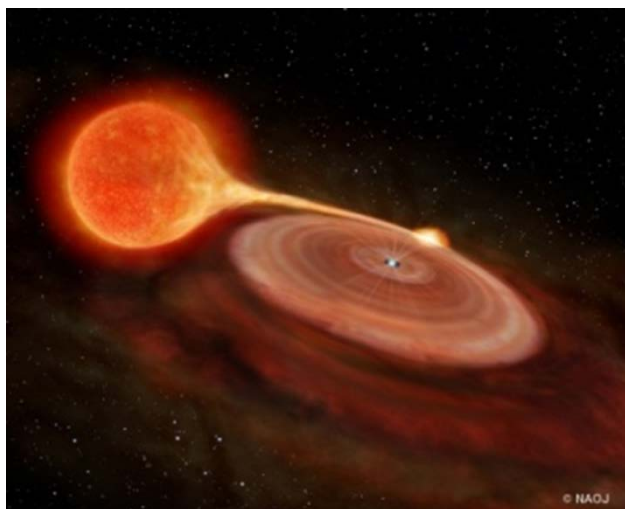
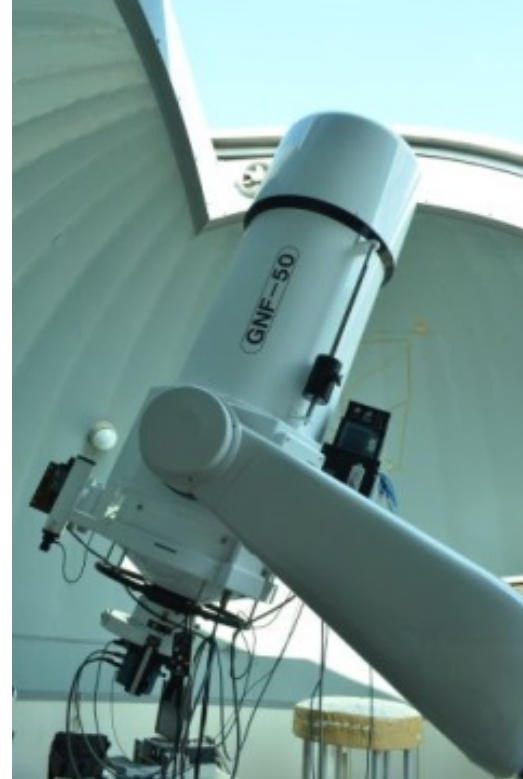
credit: S. Zola & NASA/JPL

OJ 287 の歳差連星ブラックホールモデル

松本桂（大阪教育大）

簡単な自己紹介

- 大阪教育大学 教員養成課程 理科教育講座
- 口径50cm望遠鏡＋可視光CCDカメラ
- 激変星、突発天体現象の可視光観測
- (変光星全般、超新星、AGNなど)
- (天文普及など)



OJ287

12 years
precessing orbit

jet

flare

150 million solar
masses secondary
black hole

flare

18 billion solar
masses primary
black hole
spin: 0.31

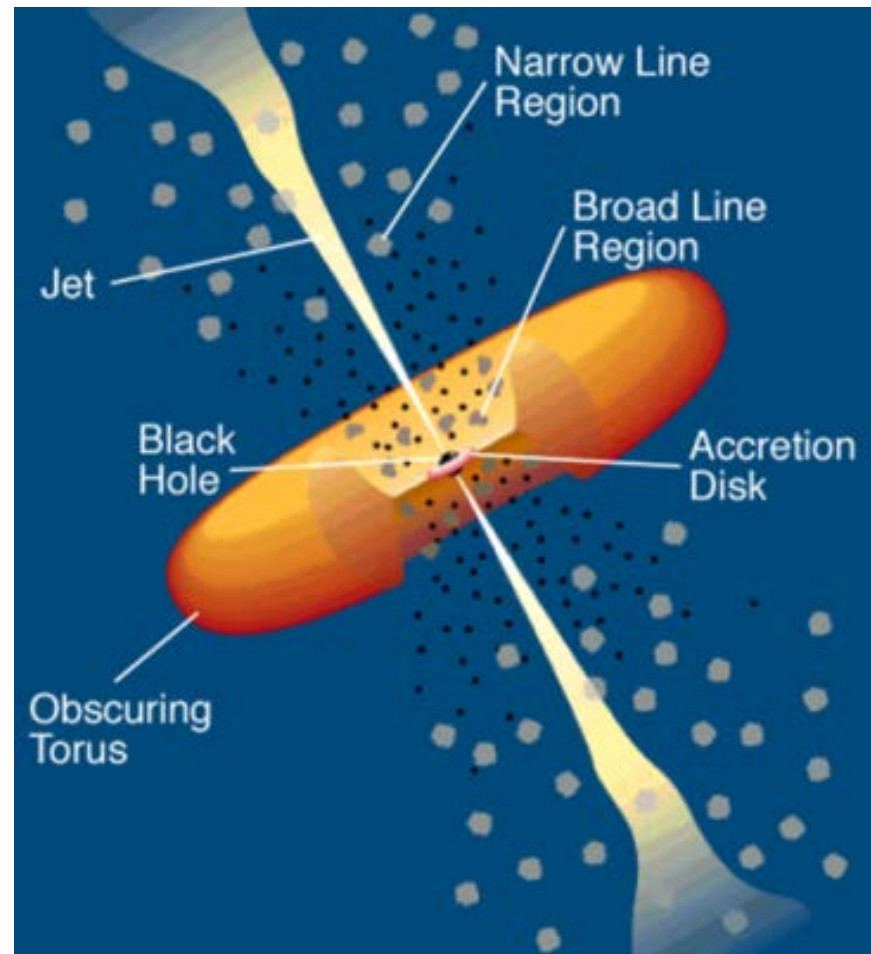
credit: S. Zola & NASA/JPL

もくじ

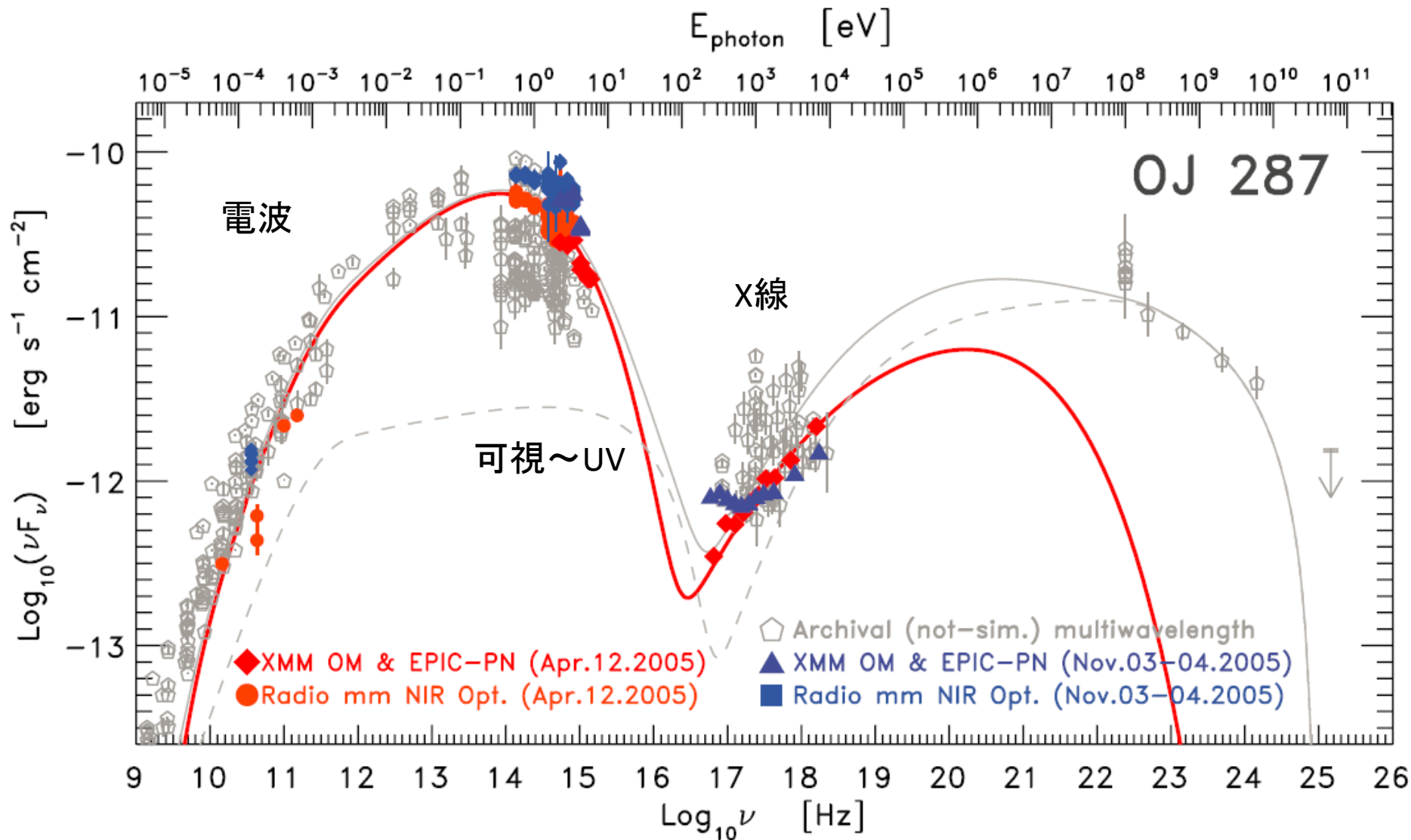
1. OJ 287 の可視測光学的な特徴
2. 歳差連星モデルの紹介(2008年までの話)
3. 歳差連星モデルにまつわる最近の話題

OJ 287 の特徴 (0/3)

- BL Lac 型天体のひとつ
 - 活動銀河核の一種
 - ガンマ線から電波にわたる電磁波
 - 電磁波の変光と偏光
 - 輝線が目立たないスペクトル

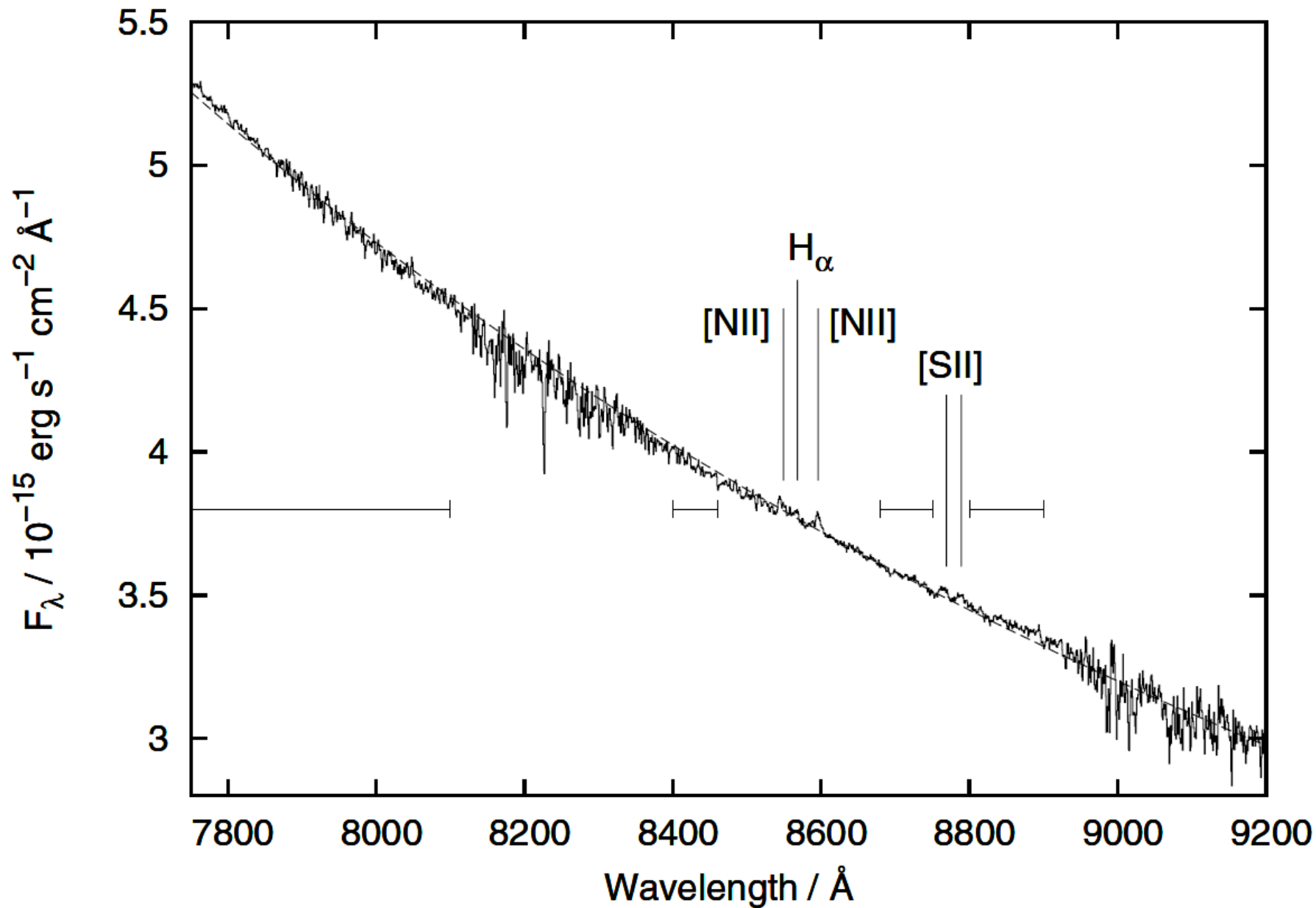


SED (quiescence & outburst in 2005)



静穏時の SED は synchrotron self-Compton (SSC) model で説明可能

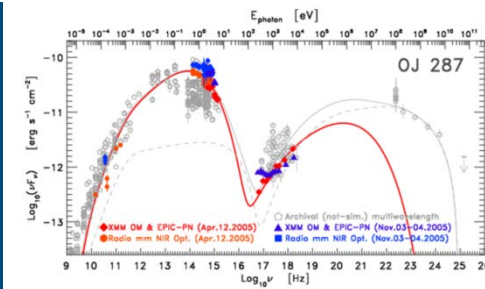
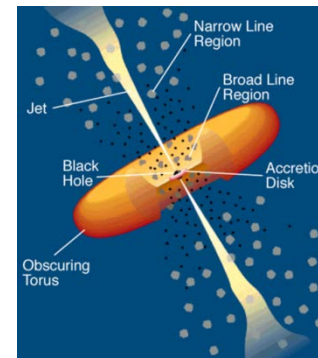
Valtonen+ (2012)



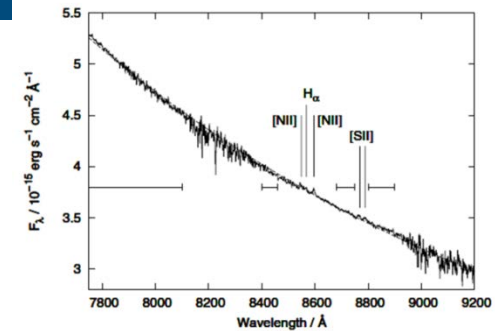
$z=0.3056$

Nilsson+ (2010)

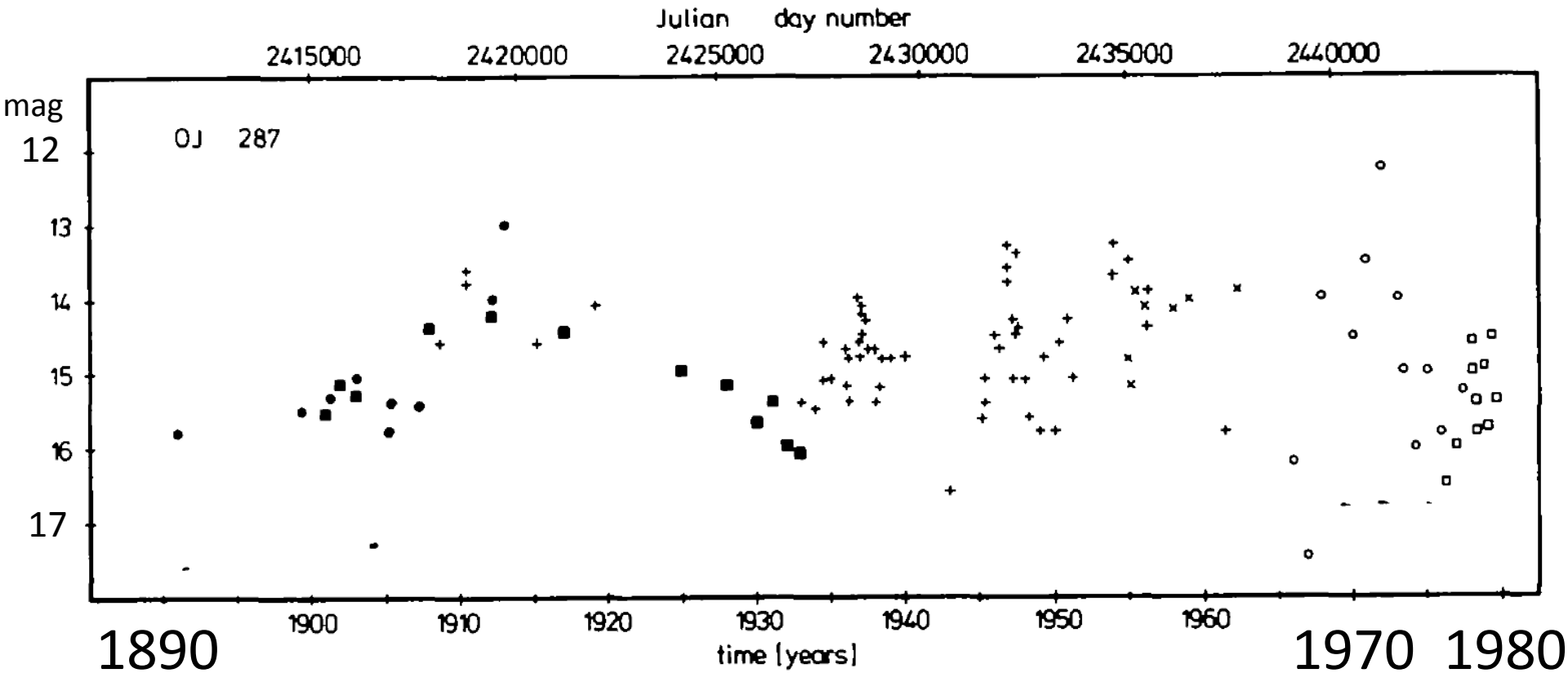
OJ 287 の特徴 (1/3)



- BL Lac 型天体のひとつ
 - 活動銀河核の一種
 - ガンマ線から電波にわたる電磁波
 - 電磁波の変光と偏光
 - 輝線が目立たないスペクトル
- 準周期的にアウトバーストを繰り返す



12年の周期性に初めて言及した論文の図



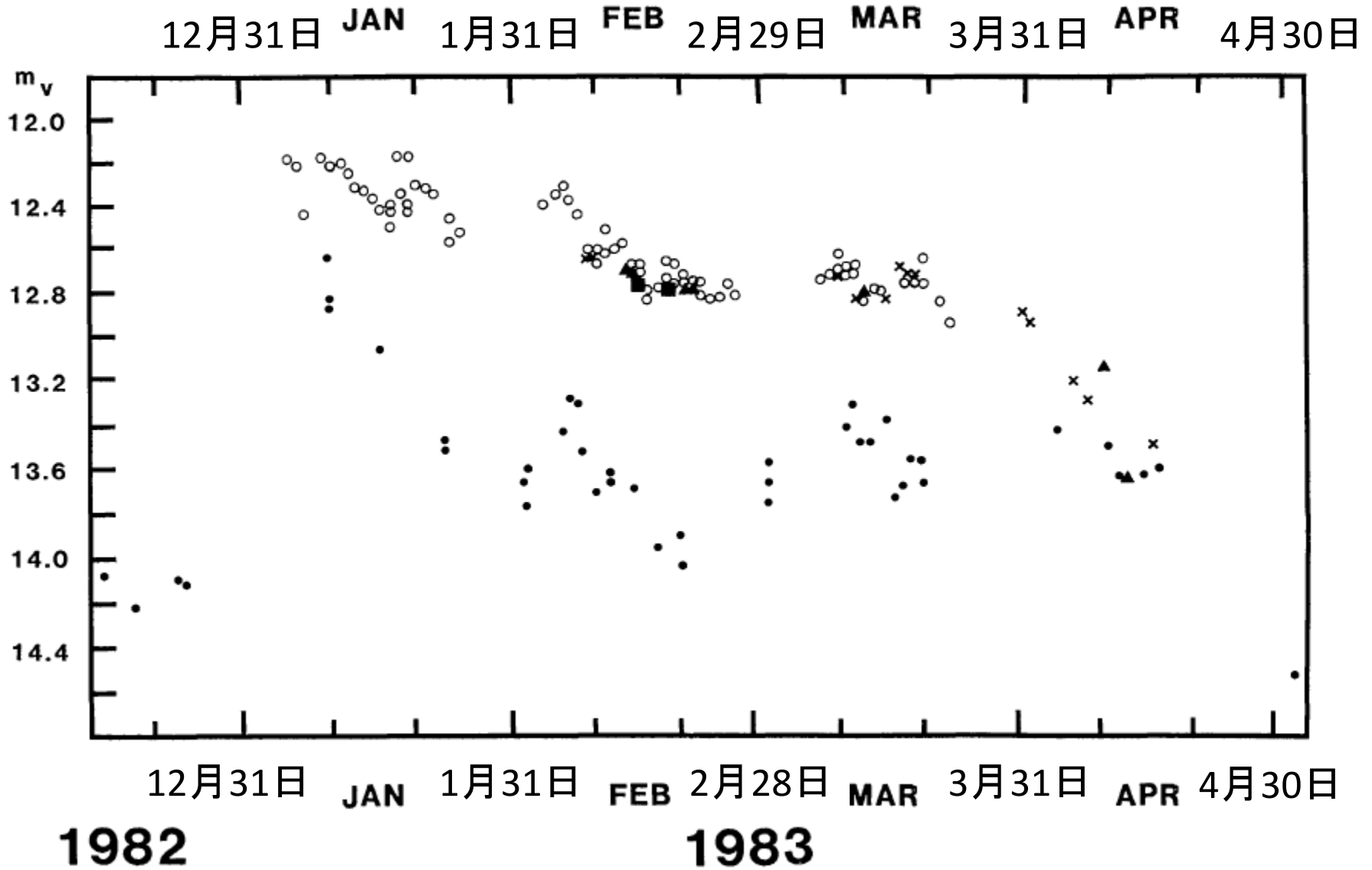
“No periodicities are clearly evident.”

“In general the outbursts seem to exhibit a common behaviour: a strong minimum precedes the actual outburst ~ 5 yr, the major outburst being accompanied by secondary ones of ~ 1 mag amplitude. The whole process lasts about 12 yr.”

similar structures in the outbursts?

1971

1972



“old” binary model

Sillanpää et al. (1988)

TABLE 1

MAXIMA IN LIGHT CURVE OF OJ 287

| Observed Epoch | Flux (mJy) | Expected Epoch |
|----------------|------------|-------------------------|
| 1913.1..... | 30.9 | 1913.1 |
| 1936.8..... | 11.2 | 1936.4 (0.4 yr late) |
| 1947.3..... | 14.6 | 1948.05 (0.75 yr early) |
| 1959.3..... | 19.5 | 1959.7 (0.4 yr early) |
| 1971.9..... | 40.7 | 1971.35 (0.65 yr late) |
| 1983.0..... | 22.3 | 1983.0 |
| ... | ... | 1994.65 |

“sometime early, sometime late”

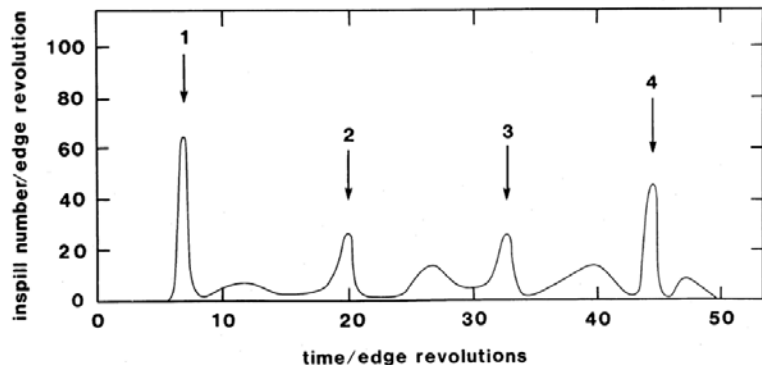


FIG. 3.—Time rate of mass inflow to the disk center in run 1. Arrows indicate the four close encounters of the two black holes.

- OJ 287 の過去の増光は、多少前後があるものの11.65年間隔で周期的に起こっている(二つの極大構造は当時まだ明らかではなかった)
- 増光の光度曲線の形状は、tidally induced mass inflow のパターンに類似している(振幅およびタイムスケール)
- AGN ではしばしば binary nuclei が示唆される



- binary BH の軌道周期で増光の周期性を説明するモデル
- disk内の tidal transfer による relativistic jet のoutput の増加
- 増光のタイムスケールから円盤半径や軌道長半径などを、第2体が円盤を擾乱する条件から軌道の離心率を推定して軌道モデルを作成

1983—1984年の次の増光はいつか？

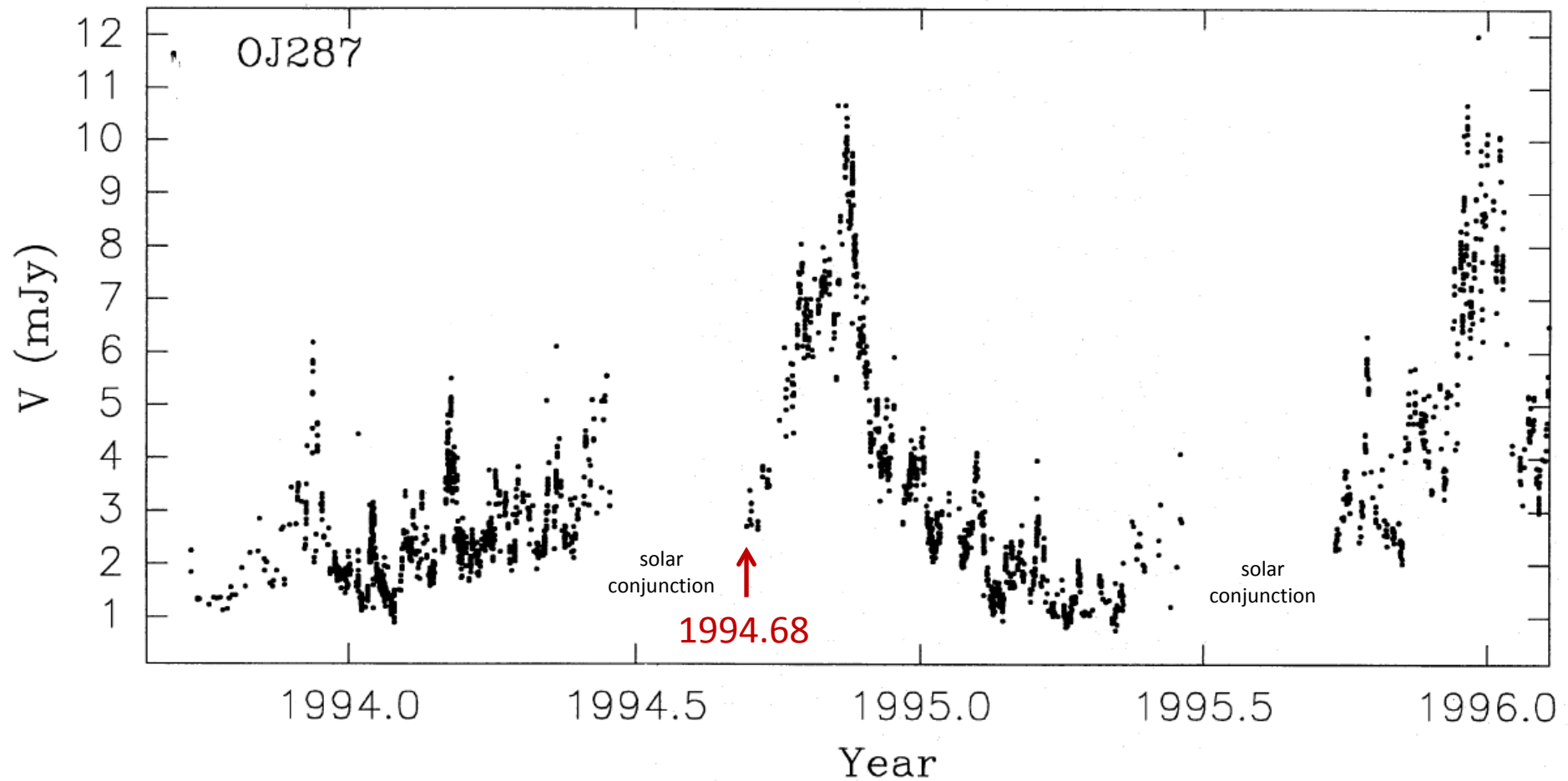
11.65年の周期性が妥当ならば

$1983.0 + 11.65 = 1994.65$ 年頃

(1994年の秋頃)になるはず

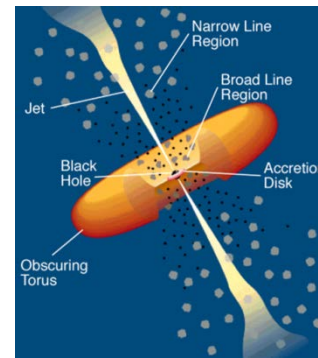
おおむね的中

Sillanpää+ (1996)

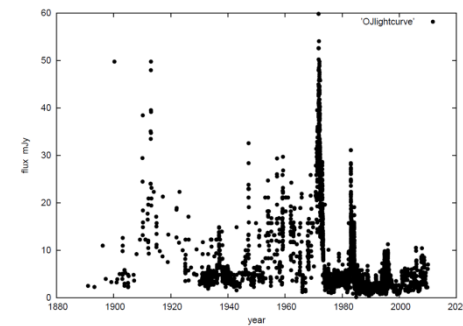
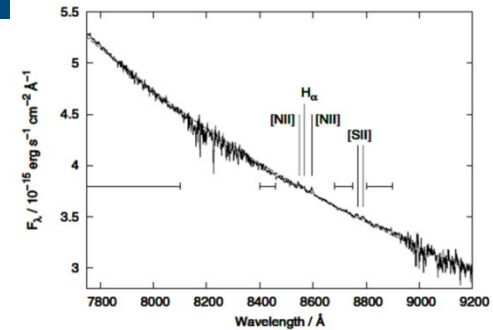
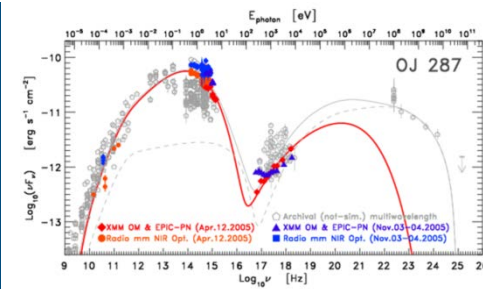


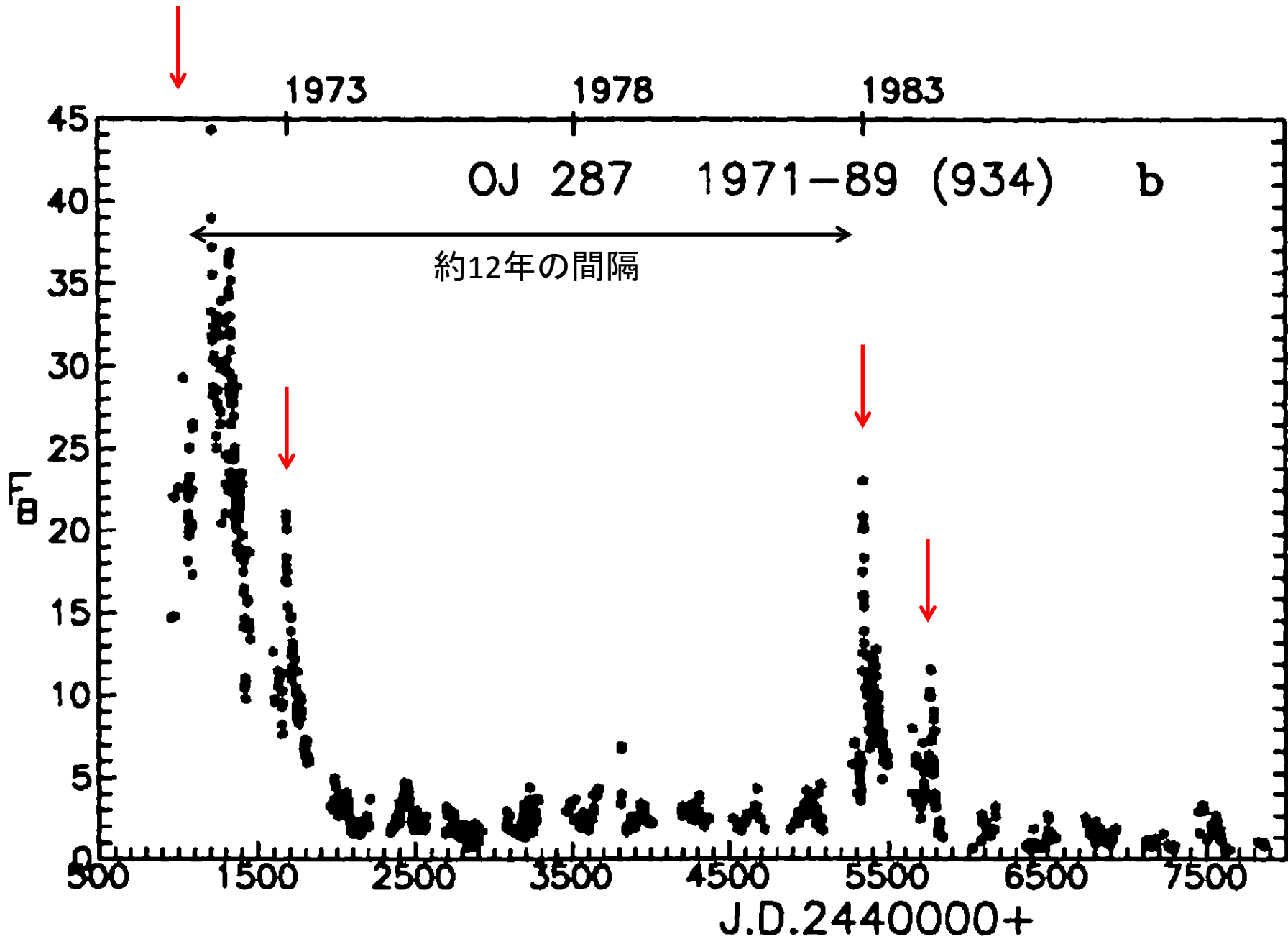
basic periodicity が確認された

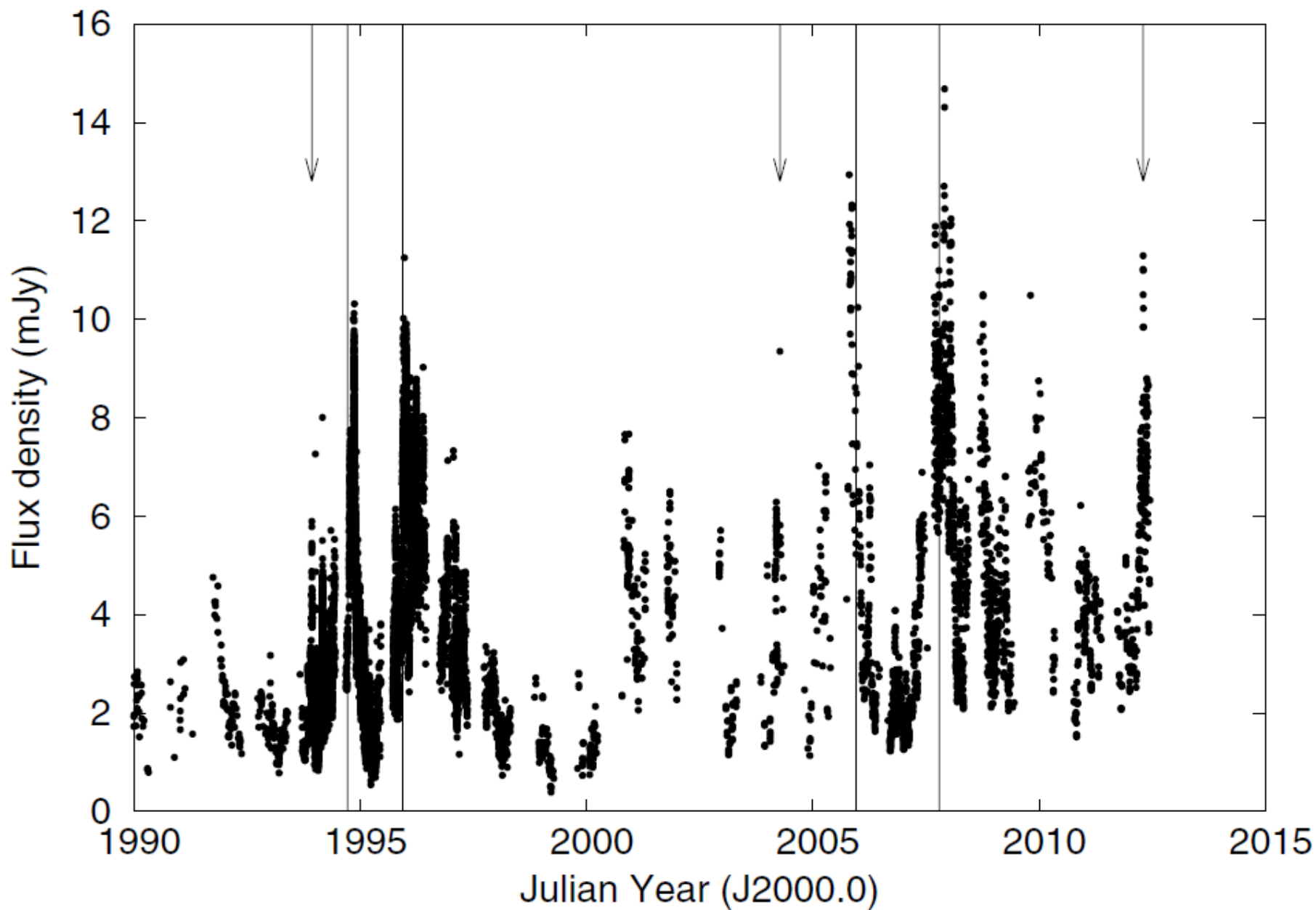
OJ 287 の特徴 (2/3)

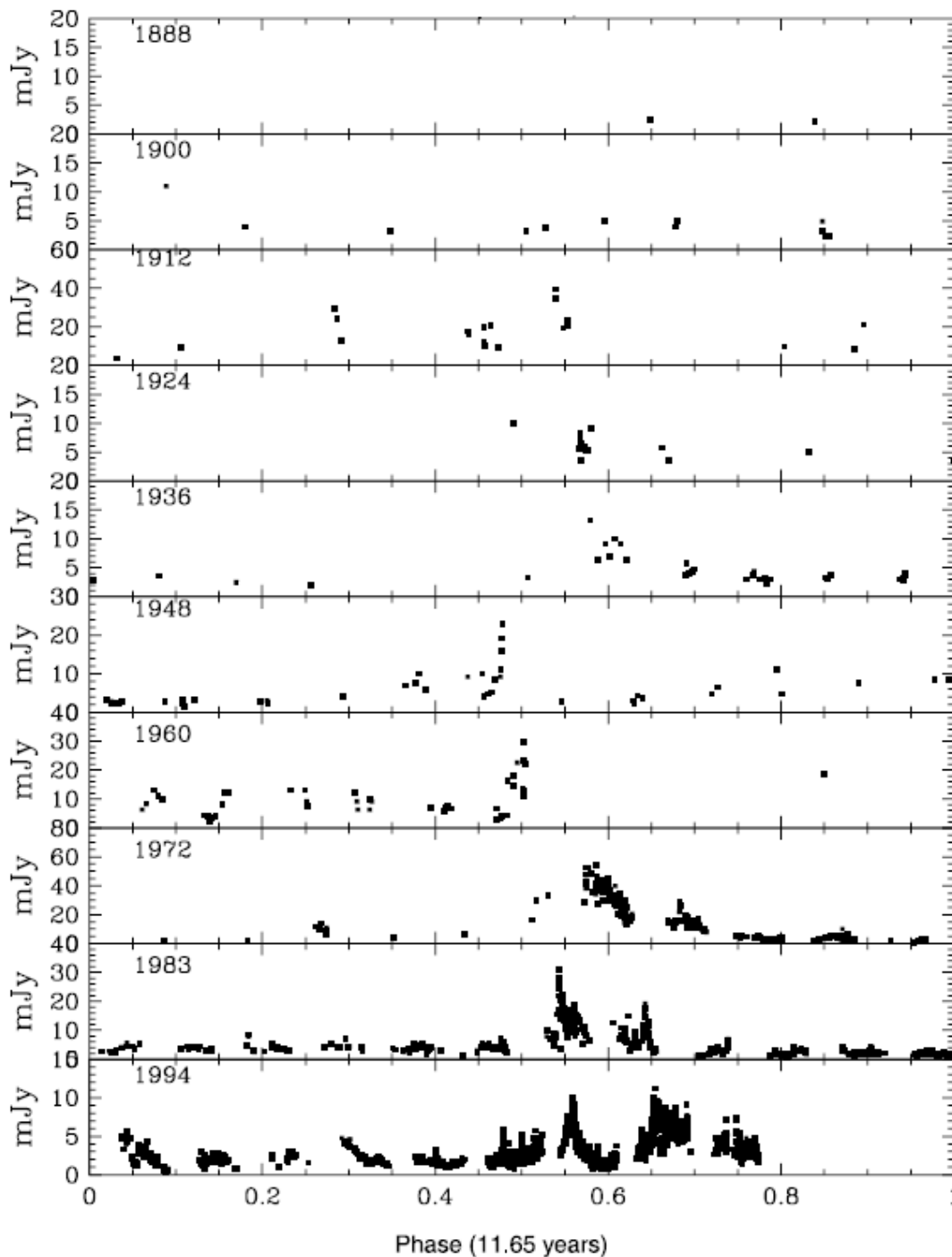


- BL Lac 型天体のひとつ
 - 活動銀河核の一種
 - ガンマ線から電波にわたる電磁波
 - 電磁波の変光と偏光
 - 輝線が目立たないスペクトル
- 準周期的にアウトバーストを繰り返す
- 二つの短い極大(フレア)が付随する







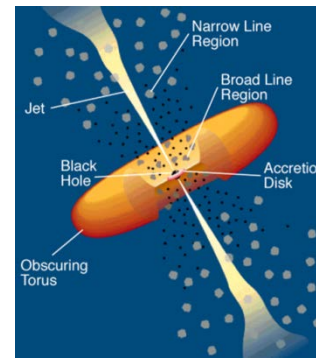


historical light curve を
11.65年周期でfoldすると、
極大時期の drift が見られる

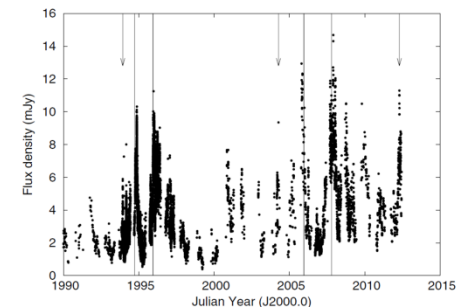
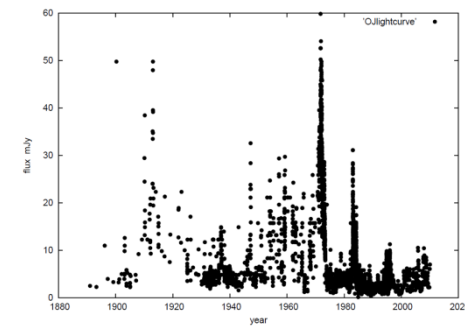
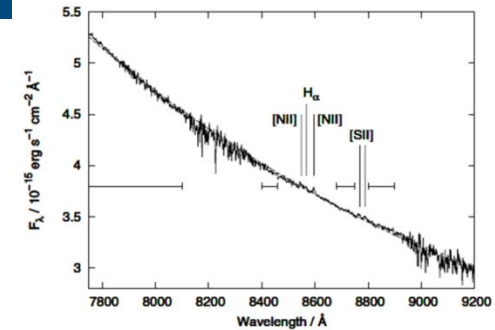
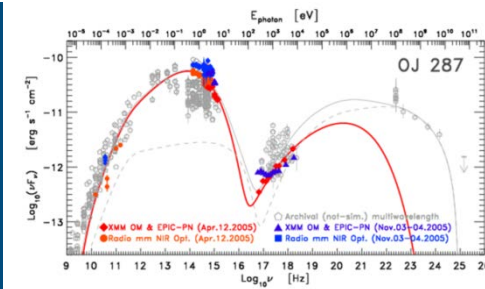
可能な解釈:

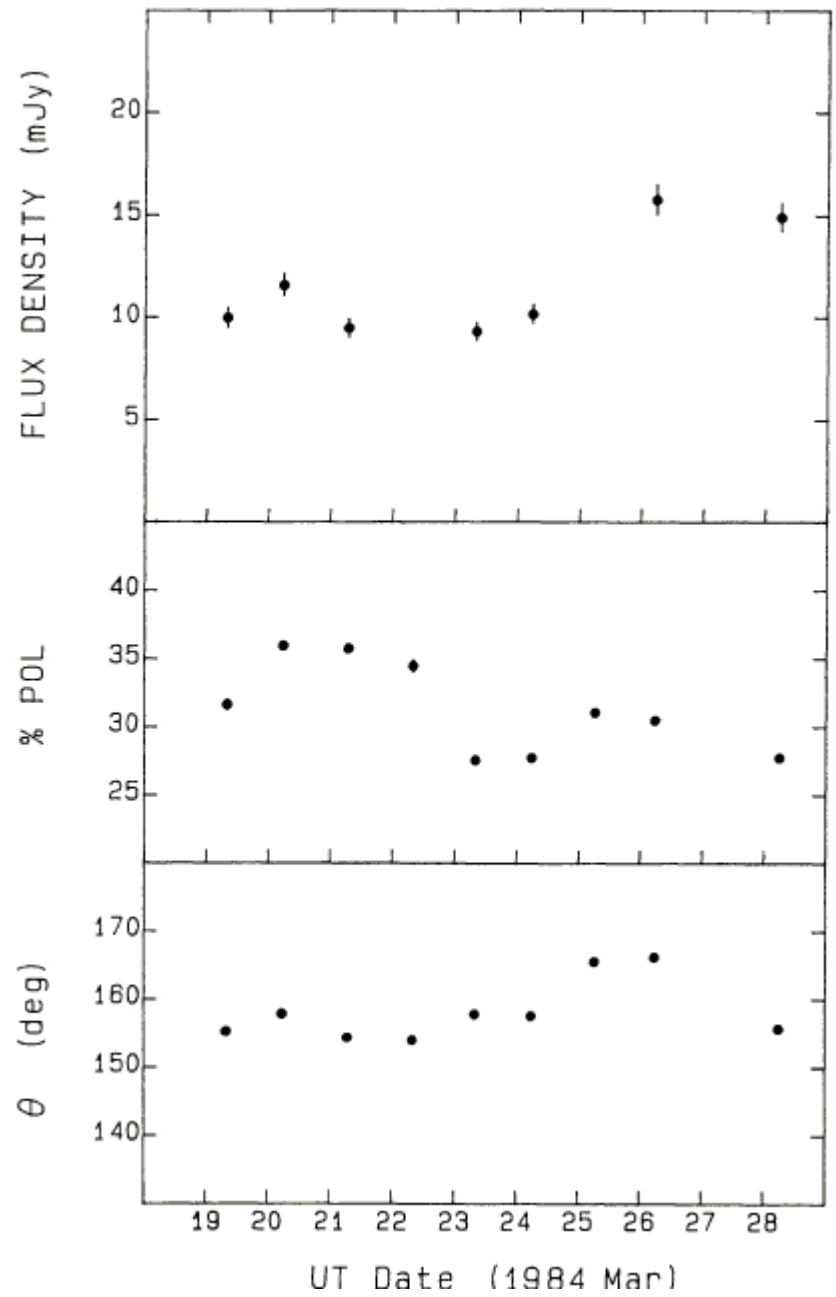
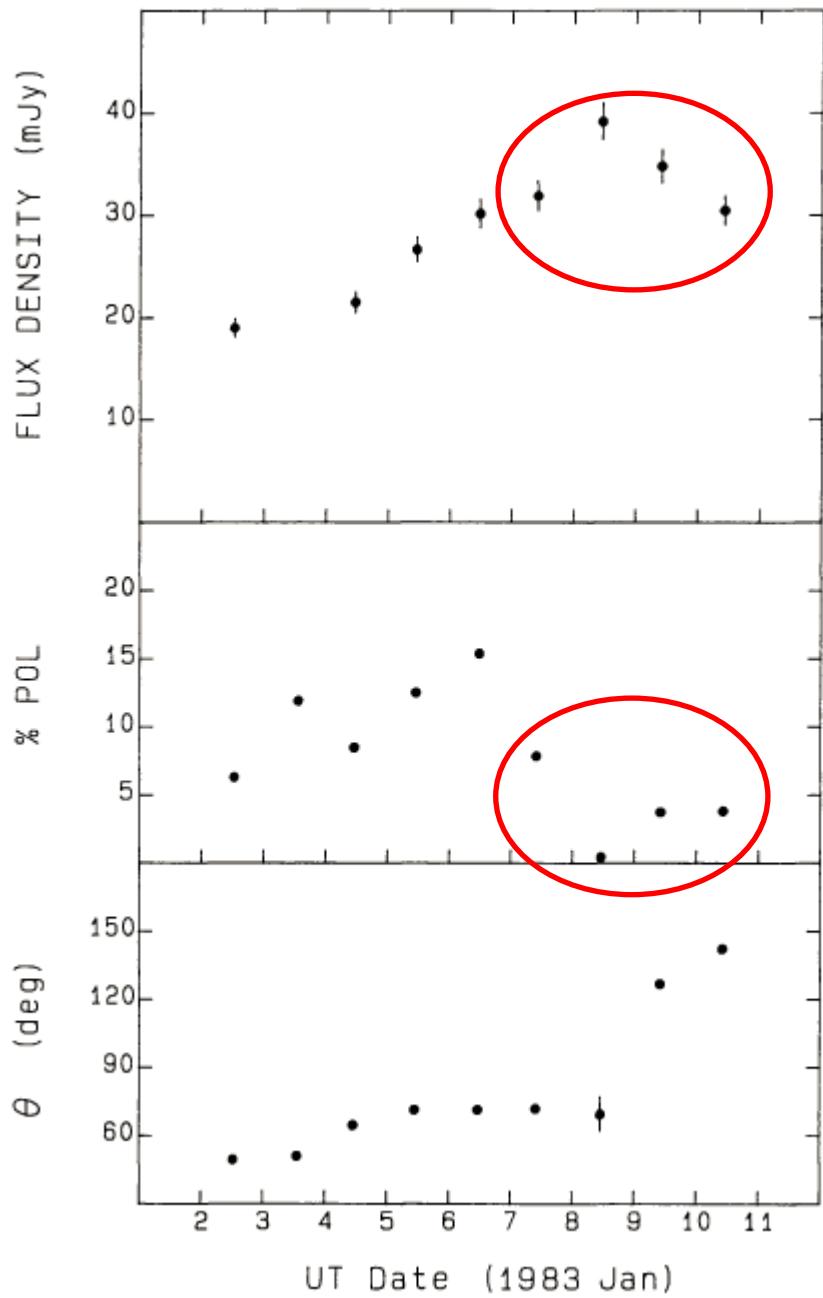
- (1) 11.65年の周期が間違い
(underestimated?)
- (2) 実際に極大時期のが変化し
ている

OJ 287 の特徴 (3/3)

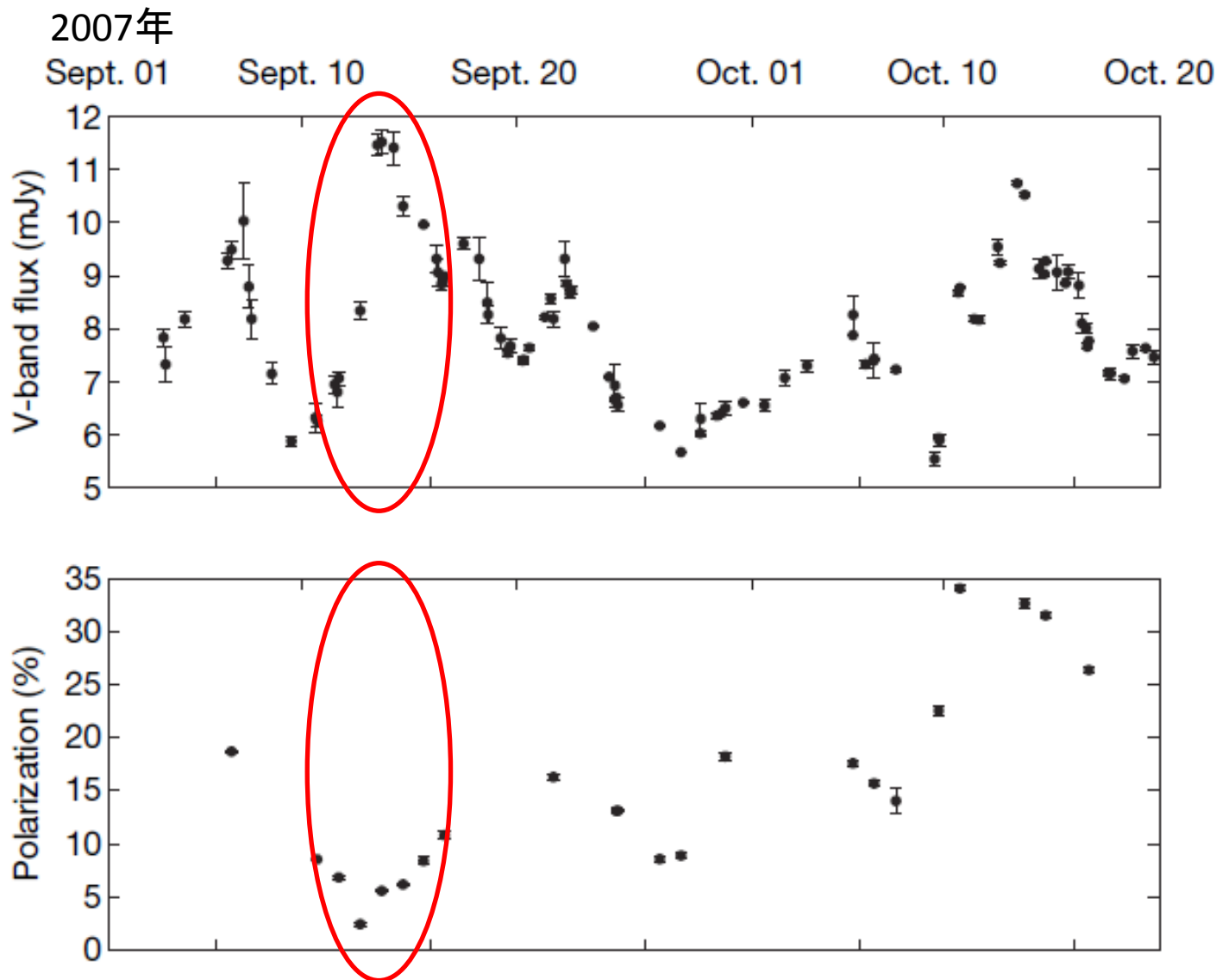


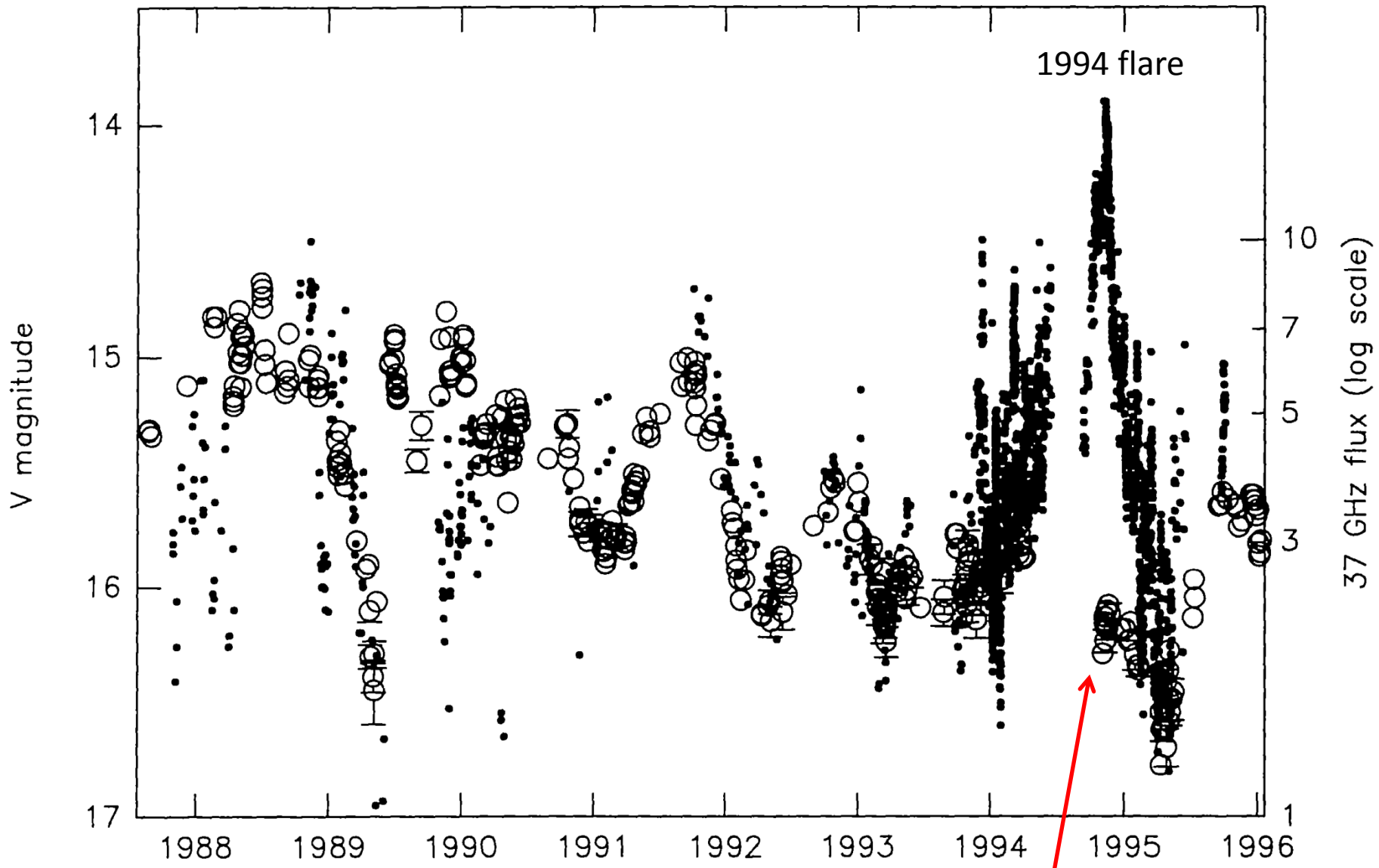
- BL Lac 型天体のひとつ
 - 活動銀河核の一種
 - ガンマ線から電波にわたる電磁波
 - 電磁波の変光と偏光
 - 輝線が目立たないスペクトル
- 準周期的にアウトバーストを繰り返す
- 二つの短い極大(フレア)が付随する
- 短いフレア中は偏光度が小さくなる





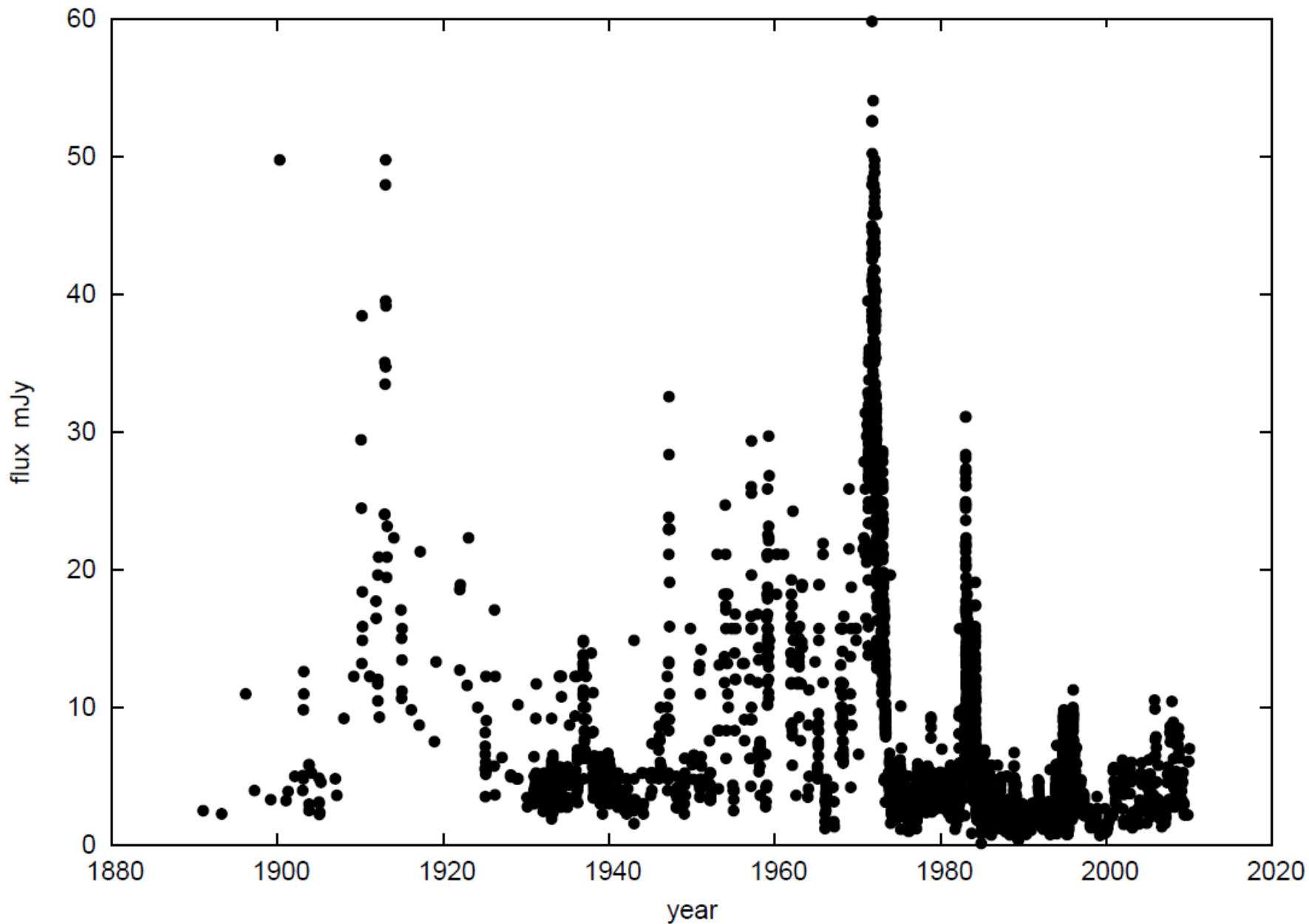
12年周期のアウトバースト期において偏光度が低下する短いフレア





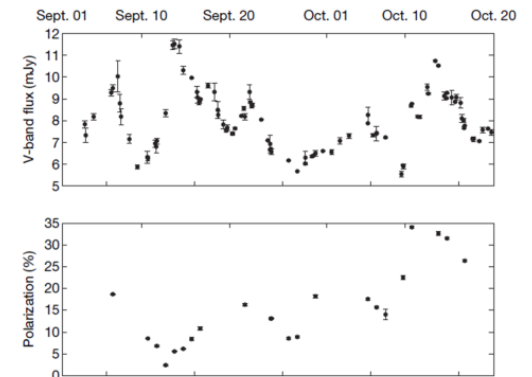
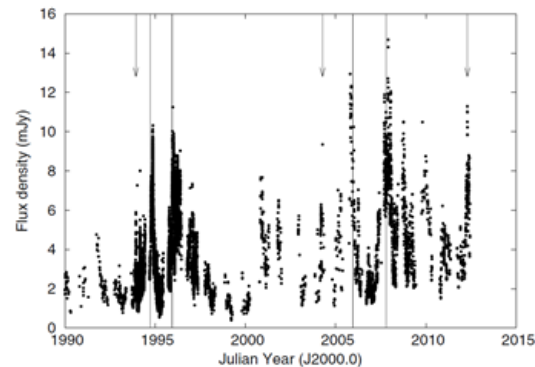
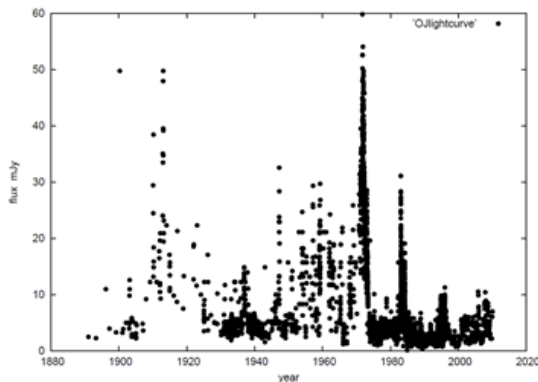
可視光の増光中に電波の
フラックスは上昇しなかった

約60年の周期性？ (strong impression)



OJ 287 の光度曲線の解釈: まとめ (モデルで説明されるべきこと)

- 約12年周期で起こるアウトバースト
- アウトバーストに伴って1-2年の間隔で生じる有意に短い (~ weeks) 2つの極大
- その周期は一定ではない?
- 短い極大時の偏光度の低下
- (アウトバーストの規模の約60年周期)



OJ 287 モデルのおおまかなカテゴリ(1)

(12年の周期性をどう説明するか)

- フラックスの上昇は intrinsic
 - **old binary model:** secondary BH の periastron passage による enhanced accretion (Sillanpää+ 1988)
 - **precessing binary model:** secondary BH が primary BH の降着円盤を1公転につき2回通過することで 熱的フレアを起こす (Lehto & Valtonen 1996)
 - **modified old binary model:** 2つのフレアは異なる原因で起こる(1回目のフレアは熱的、2回目のフレアは jet 内で形成された shock に起因する非熱的 synchrotronフレア) (Valtaoja+ 2000)
- フラックスの上昇は disk や jet の orientation の変化
 - **analogy to Her X-1 or SS433:** 連星BHの歳差による boosting factor の変化 (Katz 1997)
 - **both BHs have jets:** primary & secondary BHs の2つの jet が地球へ向く (Villata+ 1998)
 - **歳差する jet の beaming:** secondary BH の gravitational torque による降着円盤の歳差 (Abraham 2000)

Sillanpää+ (1988), Valtaoja+ (2000) モデルの問題点

- OJ 287 のアウトバーストでは、tidal timescale よりも短い sharp な極大が2回ペアで起きる
- 12年周期の極大の間隔は irregularity があり、周期的ではない (“not spaced evenly relative to the binary period”)



- tidal outburst を含みつつ、
- 周期的ではない増光間隔を説明でき、
- 約12年おきに2つの短い継続時間の熱的なフレアを説明できる astrophysical model が必要

歳差する軌道で円盤とBHを衝突させる案

Lehto & Valtonen (1996): time delay

Sundelius et al. (1997): disk bending

Valtonen (2007): new orbit solution, shrink of the orbit

- 連星モデルで考えると、1公転につき2回の熱的放射のフレアを起こせば、12年の周期的な増光と2つの極大を説明できる
 - **secondary BHは primary の降着円盤と交差すると考える**
- 熱的フレア (=diskとの交差)の周期は一定間隔ではない
 - strict periodicity からの変化を説明するには**連星軌道が大きく歳差する必要がある ($> 30^\circ$ per orbit)**
 - (これほど大きな歳差率は一般相対論的効果を用いなければ説明が難しい)
 - 過去の増光の時期を説明できるユニークな軌道(周期・離心率・歳差率)を決める
 - 必要な歳差率から primary BH の質量を推定
 - disk と secondary BHの衝突時の状況(ガスのパラメータや生成エネルギーなど)を見積もり、secondary BH の質量を推定

12年周期の公転軌道

2回目の衝突
(フレア2)

降着円盤

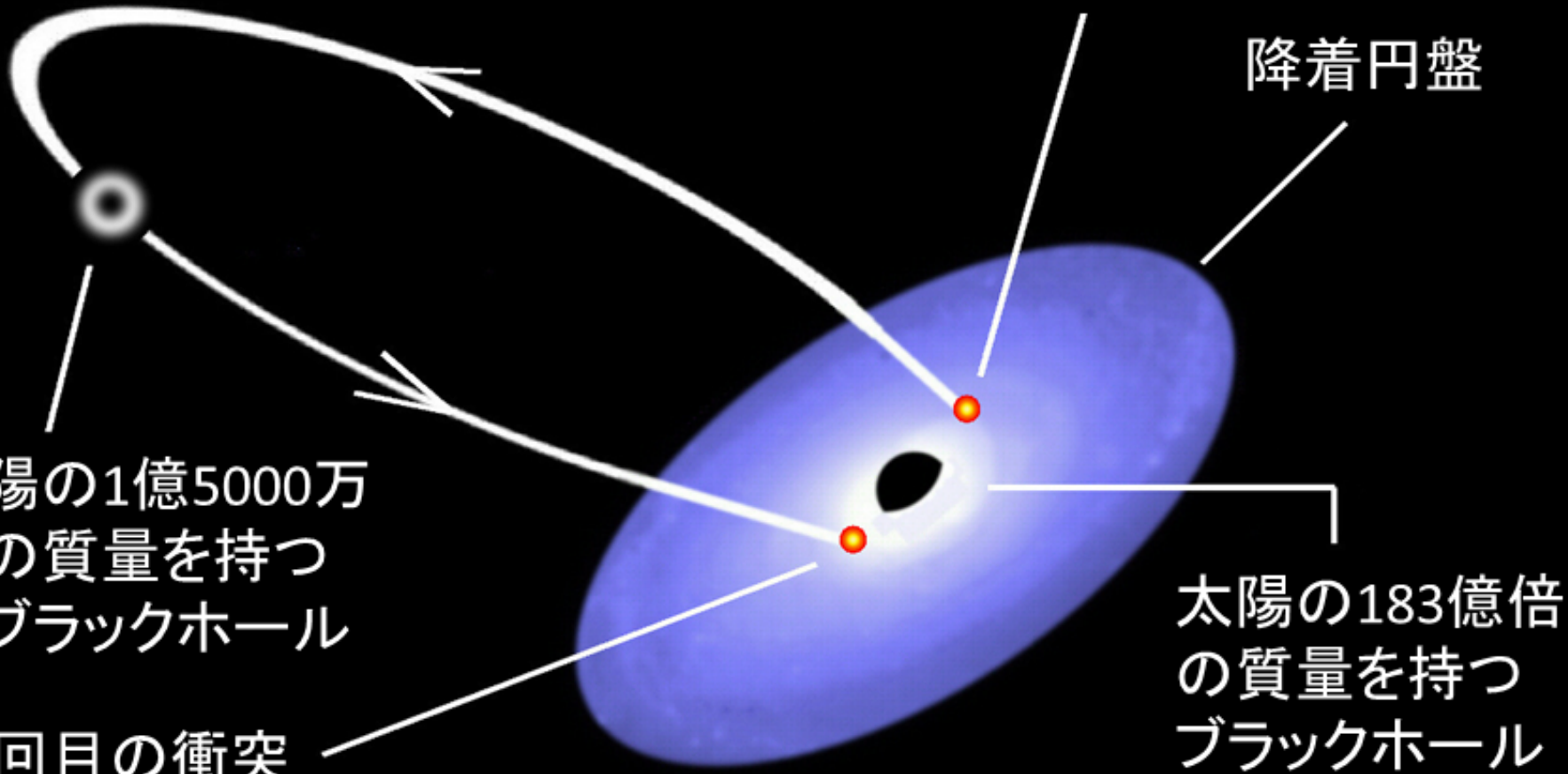
太陽の1億5000万
倍の質量を持つ
伴ブラックホール

太陽の183億倍
の質量を持つ
ブラックホール

1回目の衝突
(フレア1)

13 光週の距離

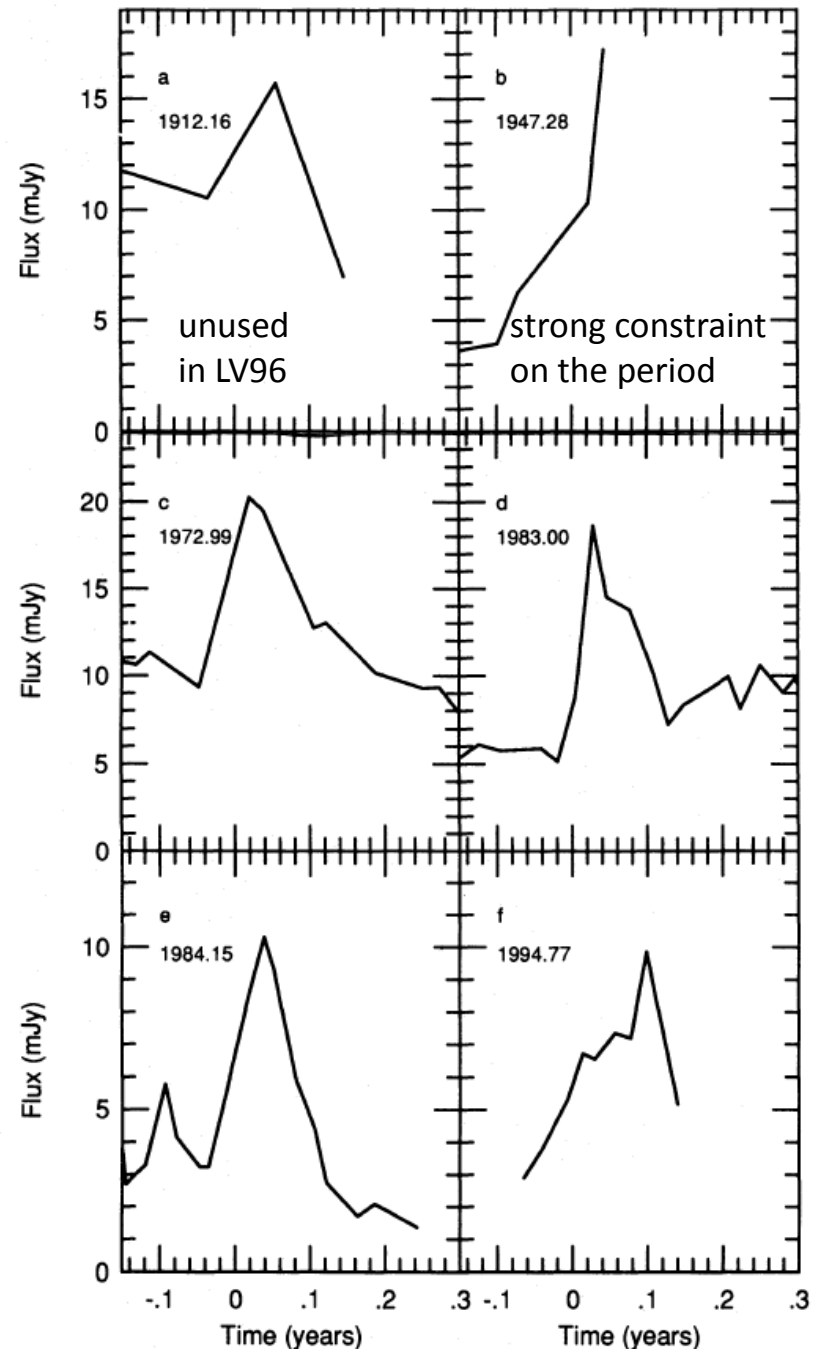
$\leq 10 \mu \text{ arcsec}$ の
空間分解能があれば
BHs を resolve 可能

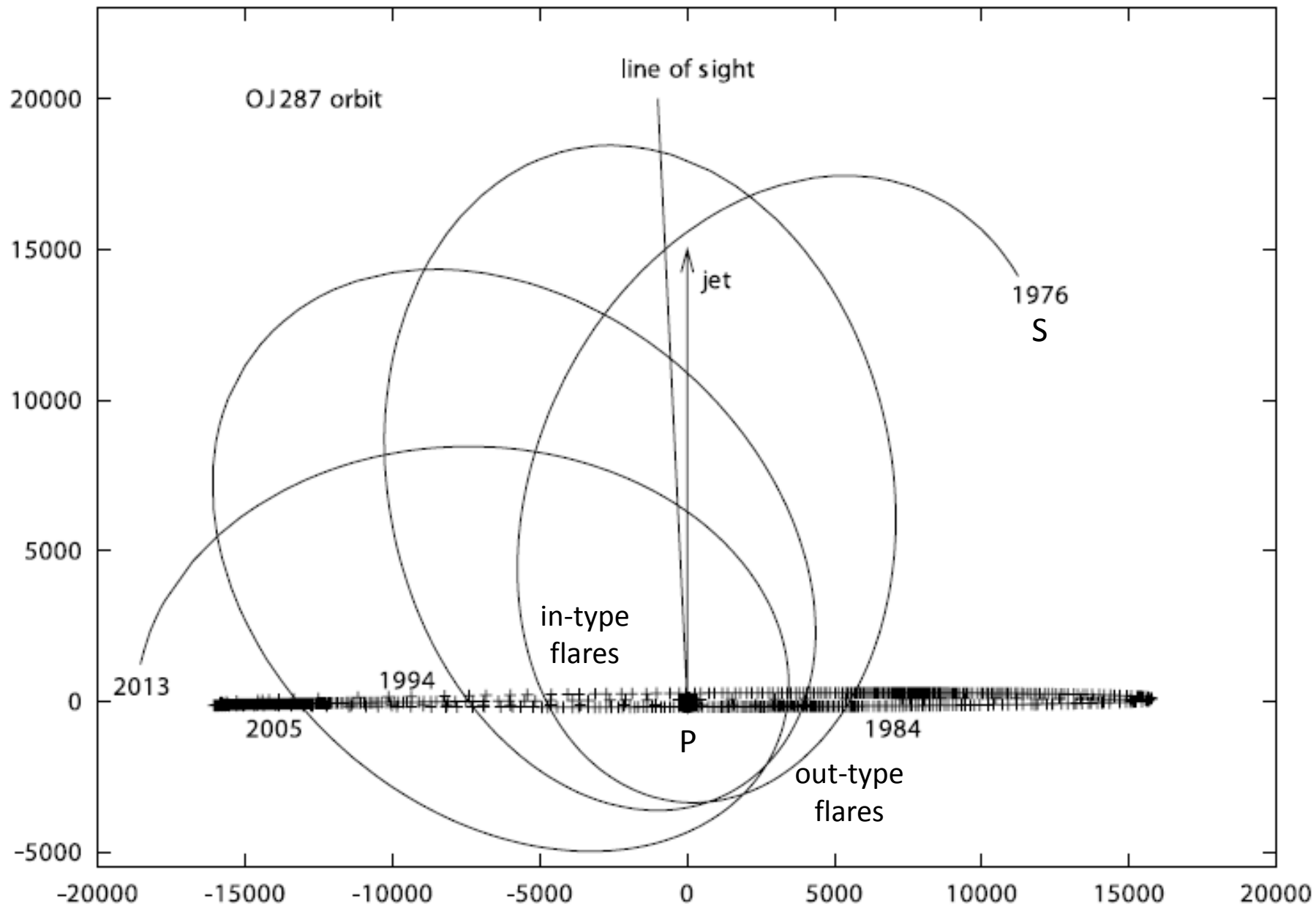


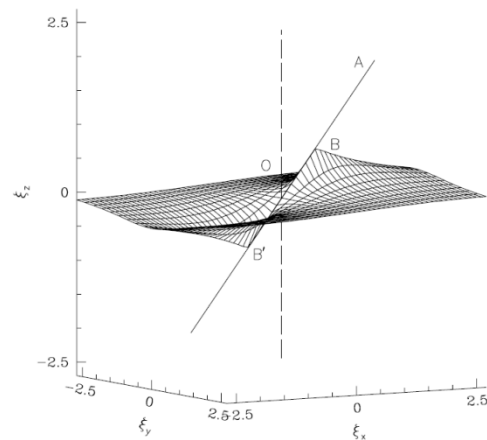
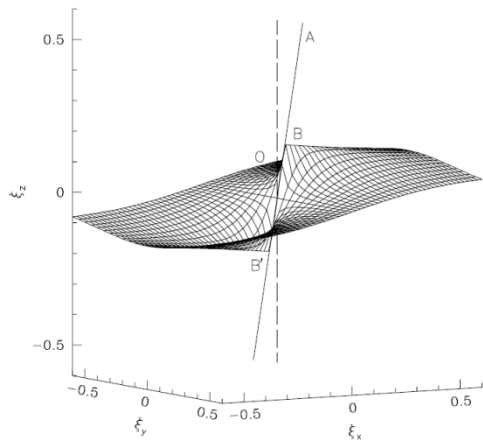
LV96の軌道モデル

- アウトバーストのシャープな極大 (熱的フレア) は secondary BH が primary のdisk と交差することで起きる。そのタイミングを説明できる軌道周期を探す。
- ケプラー軌道において一定の phase angle (またその+180°でも) でフレアが起こると仮定する。
- 1983年と1984年のフレアの間隔から、軌道の離心率は0.7より大きく離れない。
- 1973年と1994年のフレアの時期から、軌道の歳差率および長軸の配置が決まる。
- $\Delta\phi = \frac{6\pi GM_1}{a(1-e^2)c^2} \geq 30^\circ$ を満たすには $M_1 \geq 10^{10} M_\odot$ が必要。

0.02 yr averaged light curve

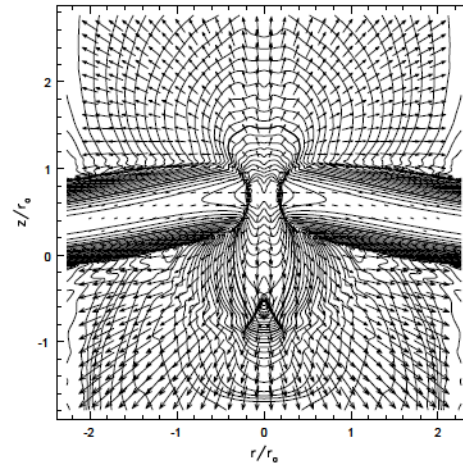
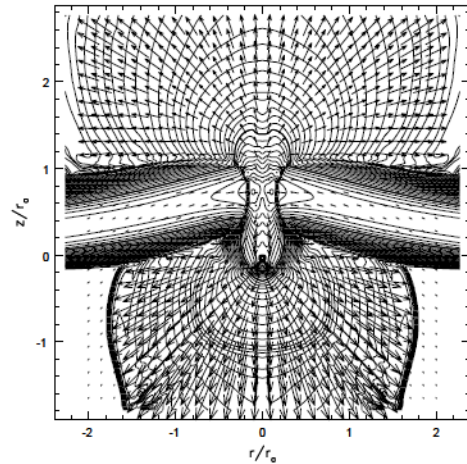
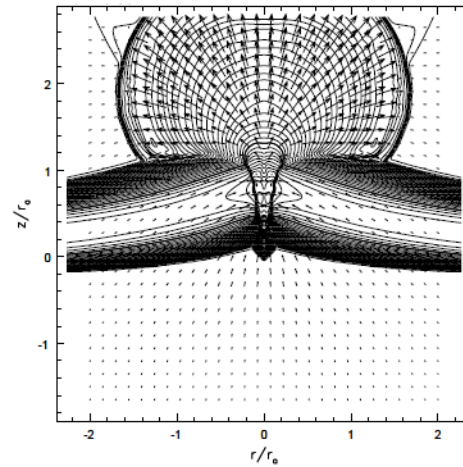
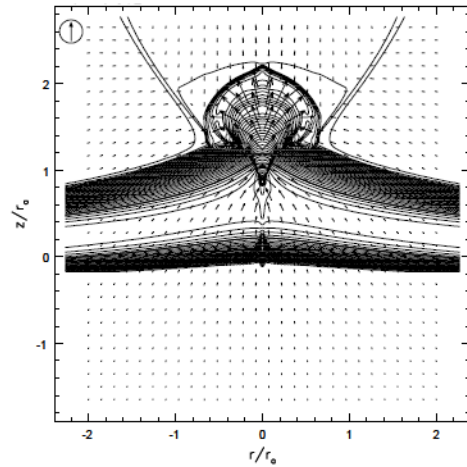




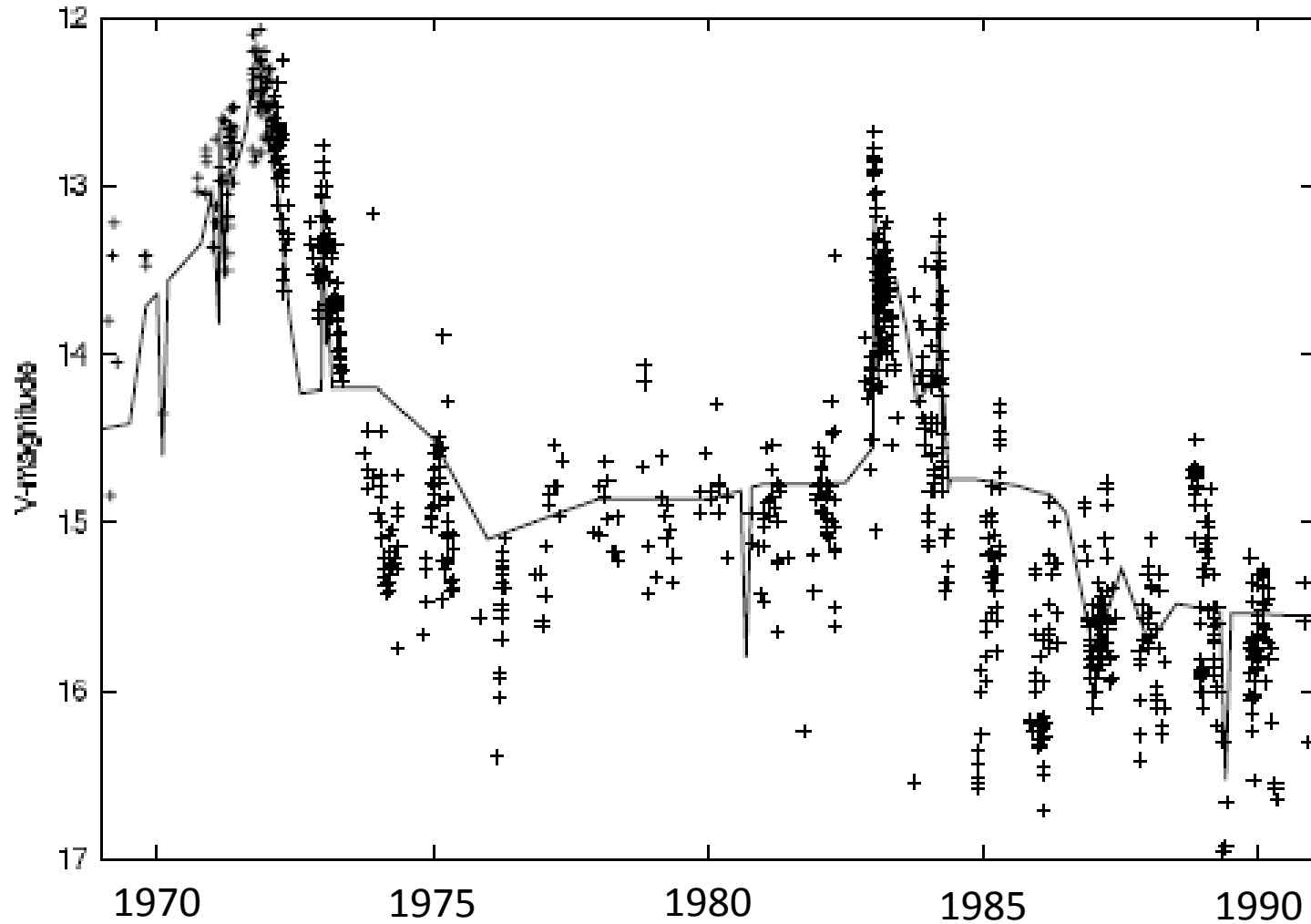


flare model

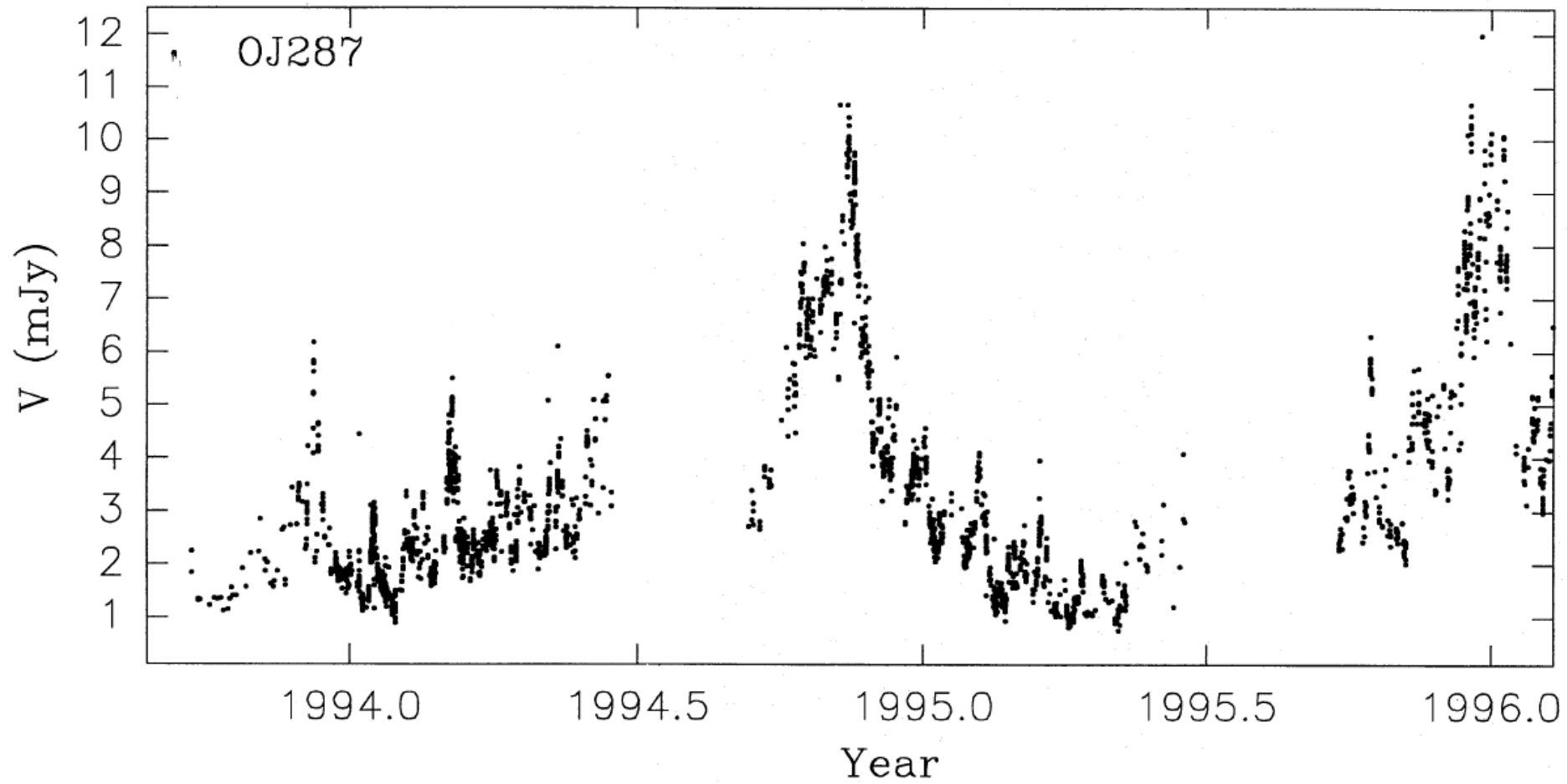
- secondary BH と disk の衝突が起こると、disk から引き抜かれた hot gas bubble が音速で膨張し、optically thin になると $\sim 10^5$ K の bremsstrahlung radiation burst により光る
- $1.4 \times 10^8 M_{\odot}$ の secondary BH の衝突により、観測されるエネルギーやタイムスケールを説明できる
- 典型的なパラメータ
 - time delay $\propto M_2 \cdot h \cdot n / v_{rel}$
 - length of OB $\propto M_2 \cdot h \cdot n / v_{rel}$
 - V-band flux density $\propto M_2 \cdot h \cdot n / v_{rel}$
- Ivanov+ (1998): hydrodynamical simulations of BH – lifted-up disk collision
- Pihajoki (2016): relativistic corrections to the observed spectra & timescales



double thermal flares + tidal outbursts



1994—1995 年の次の増光時期の予測 歳差連星モデルの最初の test



OJ 287 モデルのおおまかなカテゴリ(2)

(将来の増光を予測する方法)

- 12年の周期性で考える
 - best fit period = 11.844年 (Kidger 2000, 下の表)
 - 1回目の増光は11.86年周期で periodic (Valtaoja+ 2000)
 - 増光時期の予測は考慮の対象外 (many)
- **過去の光度曲線から外挿で予測するしかない**

| Model | Primary Maximum | Secondary Maximum |
|---------|-----------------|-------------------|
| 1 | 2006.707 | 2007.847 |
| | 2018.551 | 2019.691 |
| 2 | 2006.749 | 2007.839 |
| | 2018.635 | 2019.675 |

Model 1: periods for both 1st & 2nd maxima are constant (11.844 yr)

Model 2: period for 1st maxima is 11.844 yr, for 2nd is 11.836 yr

- 増光周期は実際に変化していると考えられる
 - 歳差連星モデル (Lehto & Valtonen 1996)

1994—1995年の次の熱的フレアはいつか？

Lehto & Valtonen (1996), Sundelius+ (1997)

strict periodicity が妥当ならば
2006.71年になるはず

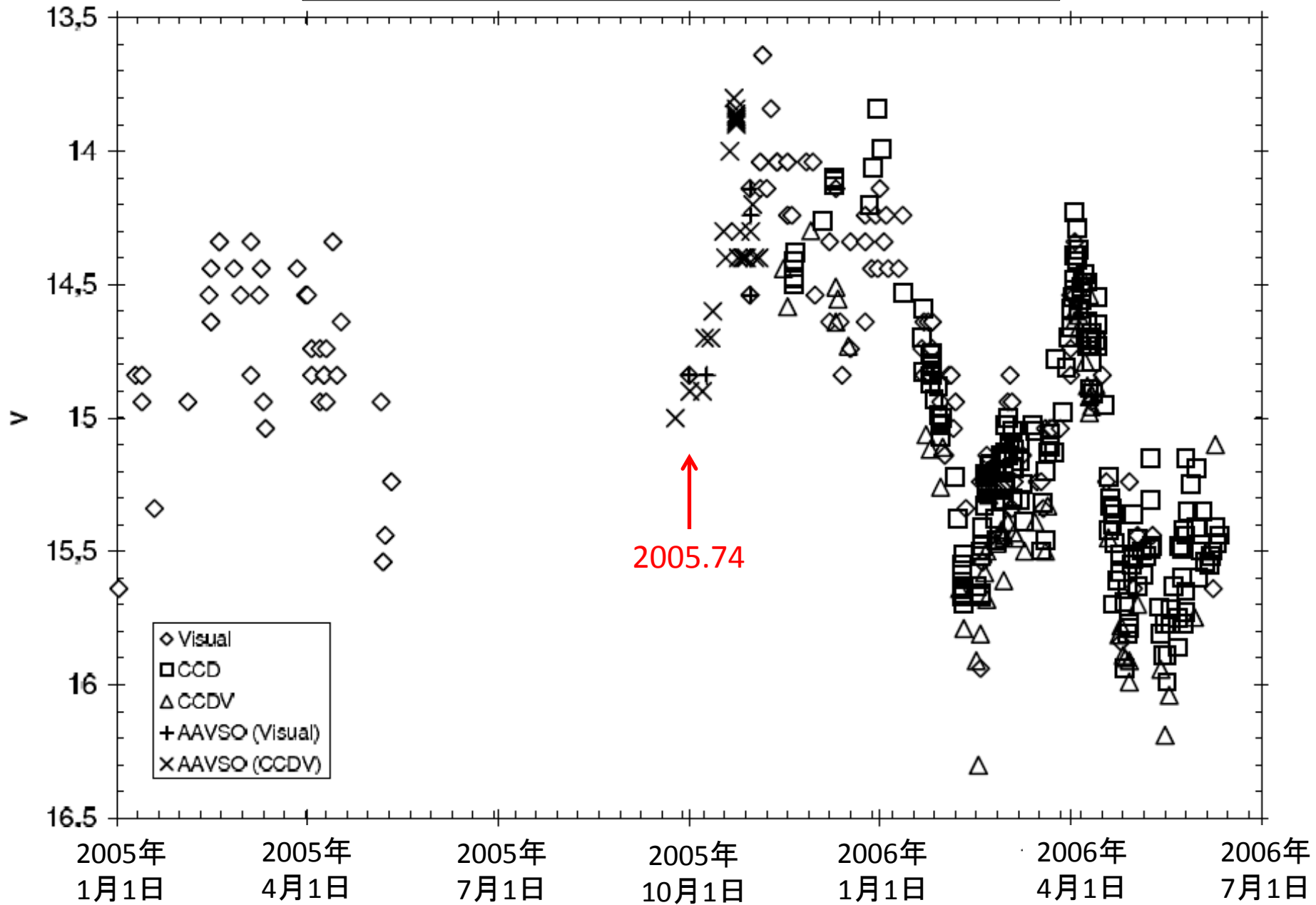
歳差連星モデルのみ

2005.74年と予測

forward precession: ~6 months contribution

lifted up disk: ~6 months contribution

公転軌道の大きな歳差率の必要性が確認された



2005年の次の熱的フレアはいつか？

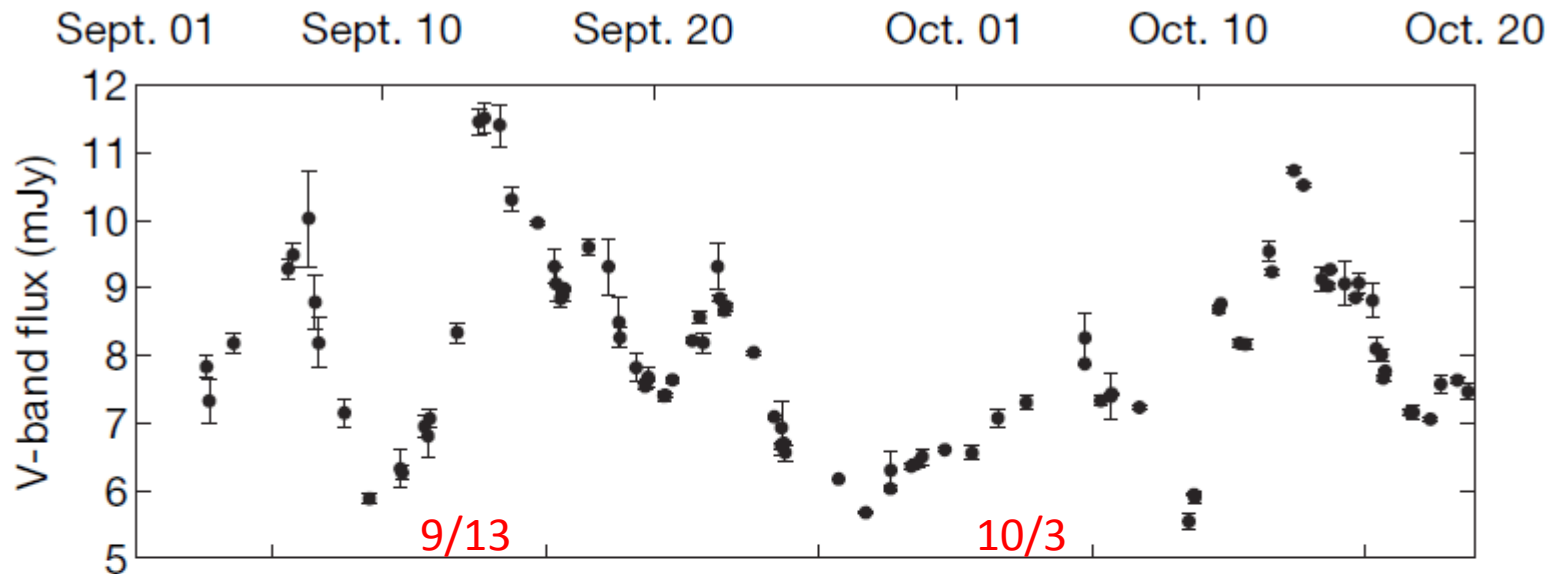
Valtonen (2007) new orbit solution

重力波放射による energy loss を
考慮すると、2007年9月13 \pm 2日
(2007.692年)

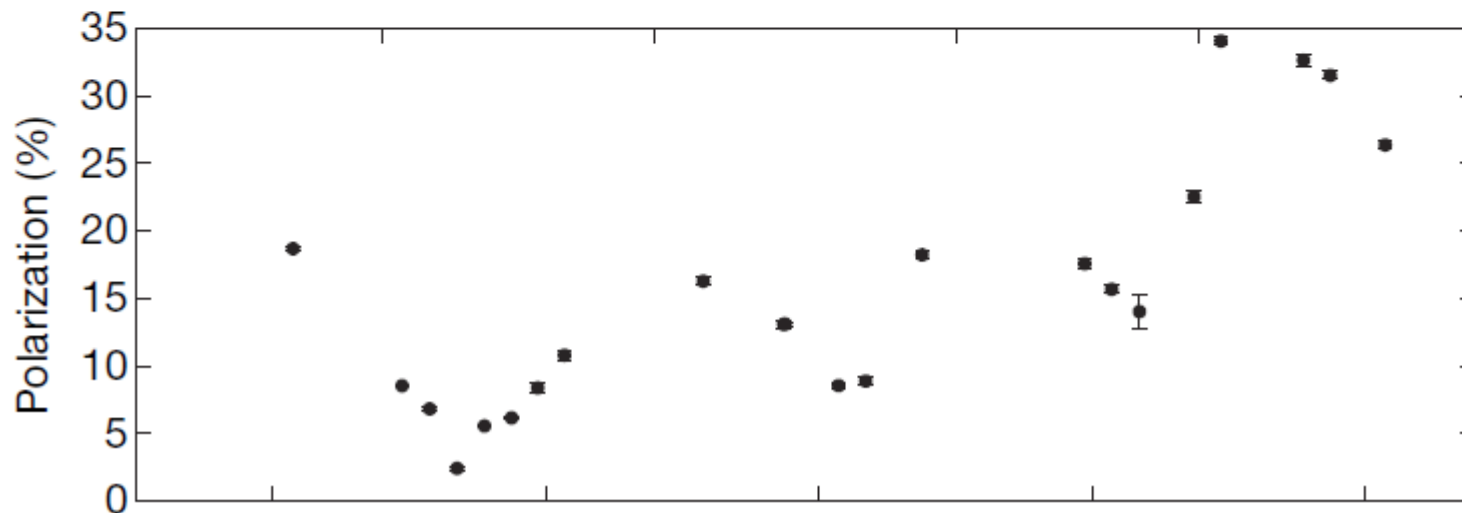
(比較のため)

考慮しないと、2007年10月3日
約20日間の遅れ

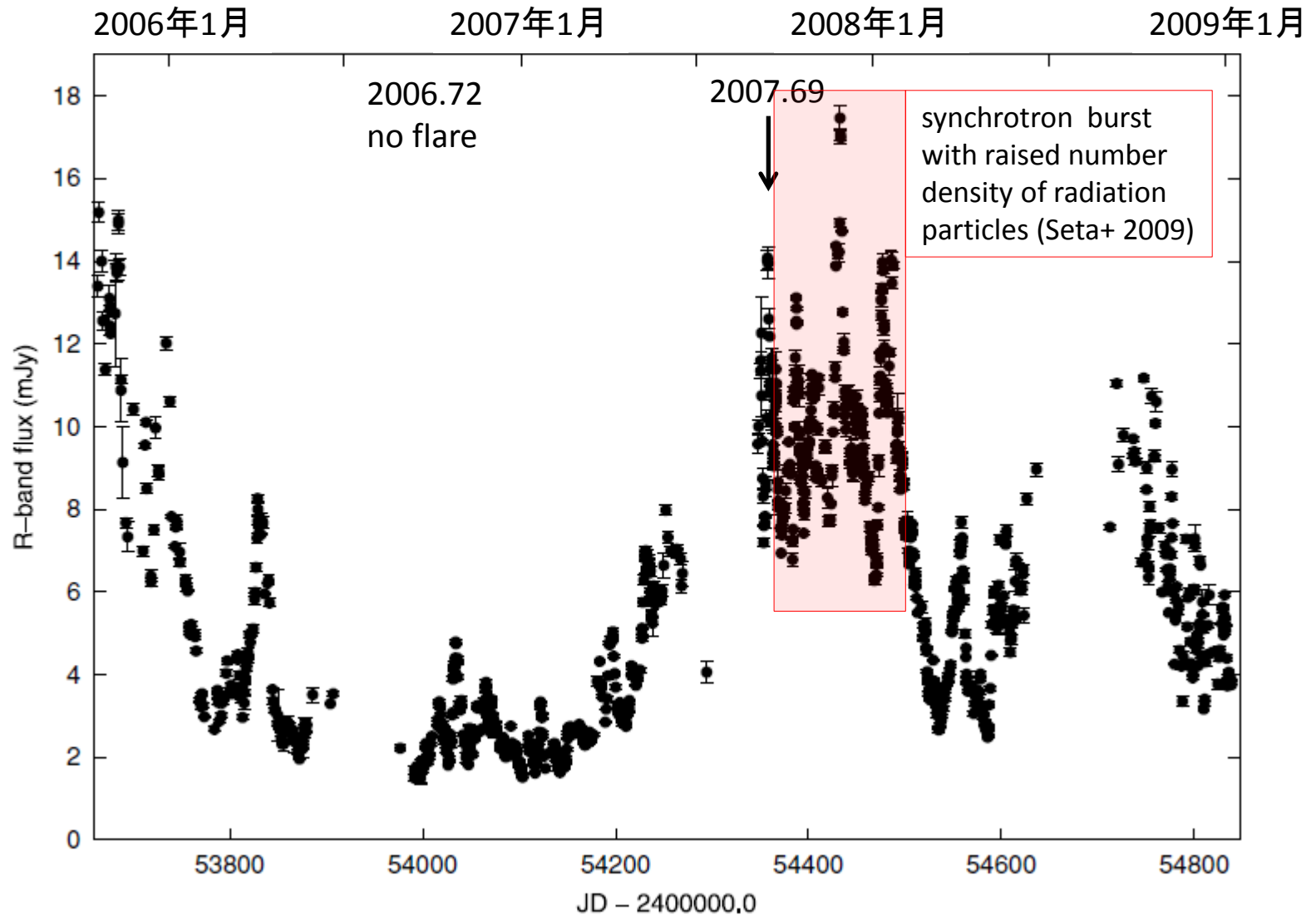
- 2007年および以前の増光時期がモデルと偶然に一致した確率は無視できる。
- 増光時期予測には連星軌道への一般相対論的効果の考慮が不可欠である。



(9/12に増光開始 → 予測の誤差は1日程度)



thermal flare + tidal outburst in 2007



2008年の時点で歳差連星モデルの基本的な正しさは確立したと考えて良い

primary BH のスピンを加味した軌道計算

Valtonen et al. (2010, 2011)

- 2007年までのモデルは Schwarzschild BH に基づいていたが、天体物理学的な状況を考えると、現実のBHはスピンを持つ
- spinning primary & secondary BHs (Kerr パラメータ χ_1, χ_2)
- 3PN-accurate orbital dynamics (8 parameters of the orbit)
- average during 200 yr integration starting 1856

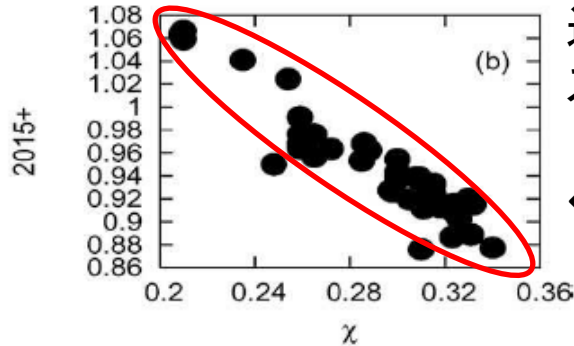
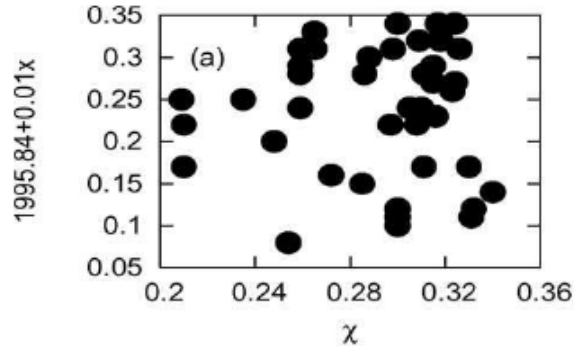
flare times (fixed points)

solution parameters

| Time | Uncertainty | Parameter | Astrophysics | Orbit |
|----------|--------------|--------------|---|---|
| 1912.970 | ± 0.010 | $\Delta\phi$ | 38.6 ± 1.0 | 39.1 ± 0.1 |
| 1947.282 | ± 0.0005 | m_1 | $(1.8 \pm 0.1) \cdot 10^{10} M_{\odot}$ | $(1.84 \pm 0.01) \cdot 10^{10} M_{\odot}$ |
| 1957.080 | ± 0.020 | m_2 | $(1.4 \pm 0.4) \cdot 10^8 M_{\odot}$ | $(1.46 \pm 0.1) \cdot 10^8 M_{\odot}$ |
| 1972.94 | ± 0.005 | χ_1 | 0.25 ± 0.04 | 0.28 ± 0.03 |
| 1982.964 | ± 0.0005 | ϕ_0 | 56.0 ± 4.0 | 56.3 ± 1.0 |
| 1984.130 | ± 0.002 | e | 0.7 ± 0.03 | 0.70 ± 0.001 |
| 1995.843 | ± 0.0005 | α | 0.3 ± 0.2 | 0.3 ± 0.1 |
| 2005.74 | ± 0.005 | q | – | 1.0 ± 0.3 |
| 2007.692 | ± 0.0005 | | | |

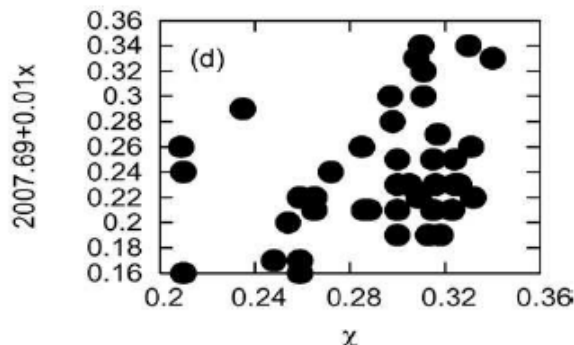
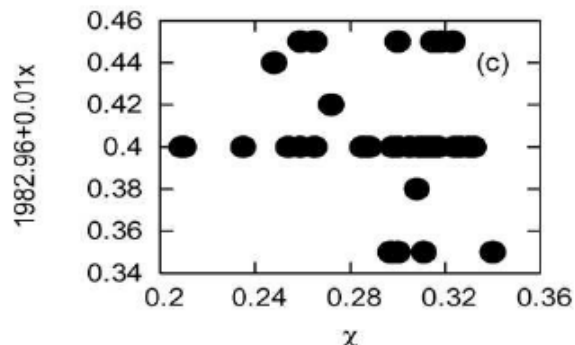
(1 σ)(3 σ)

Note. These are the starting times of the outbursts.

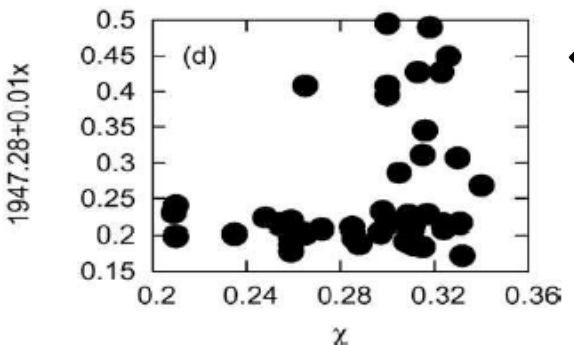
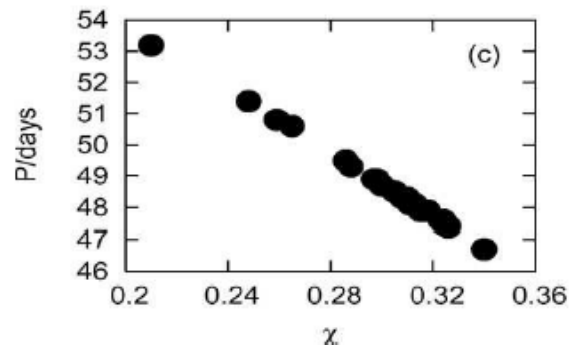
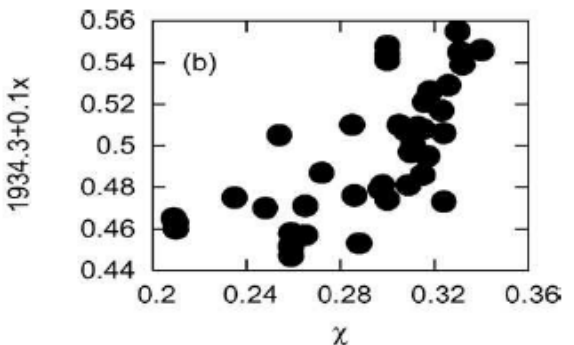
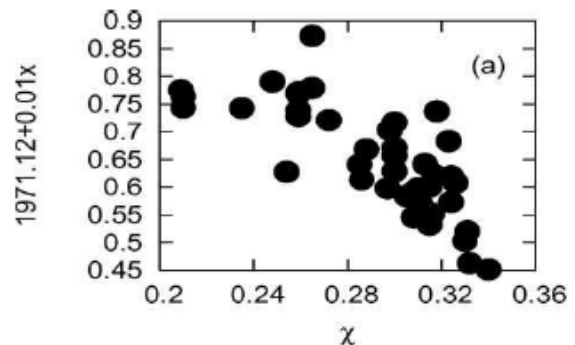


過去と将来のフレア開始時期の
スピンパラメータ χ_1 への依存性

← (b) 2015年のフレア開始時期
とスピンパラメータは強く相関
late January, 2016 if $\chi = 0.2$
early November, 2015 if $\chi = 0.36$



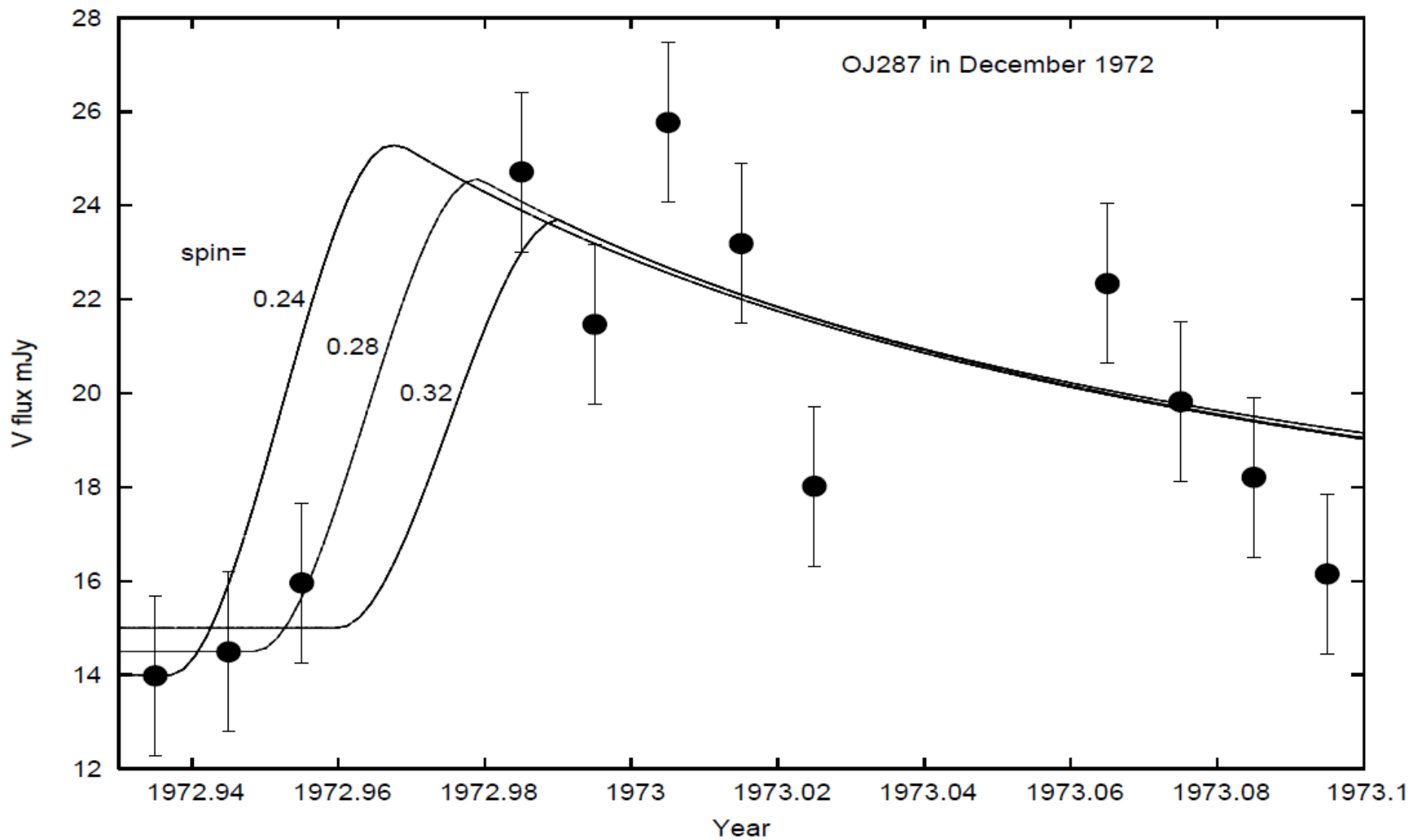
(a,c,d) は scatter diagrams に近い



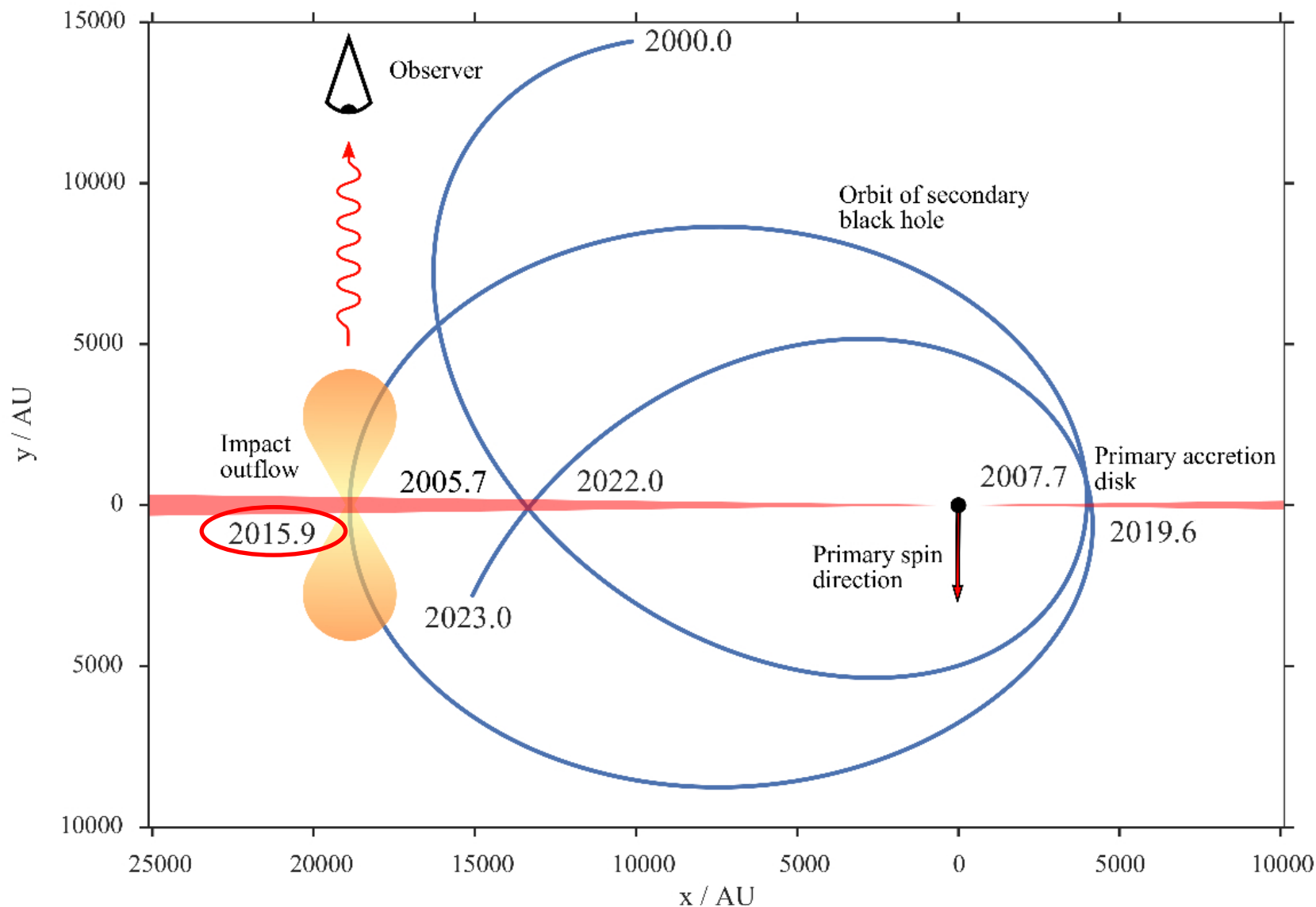
← (c) 最内縁安定軌道の周期(約
103日)に対するスピンパラメー
タの依存性(観測から約43-49
日の基本周期性 ← 2 mode wave
disturbance)

Valtonen+ (2010)

フレアの開始時期が χ_1 に影響を受けやすい例(1972年フレア)



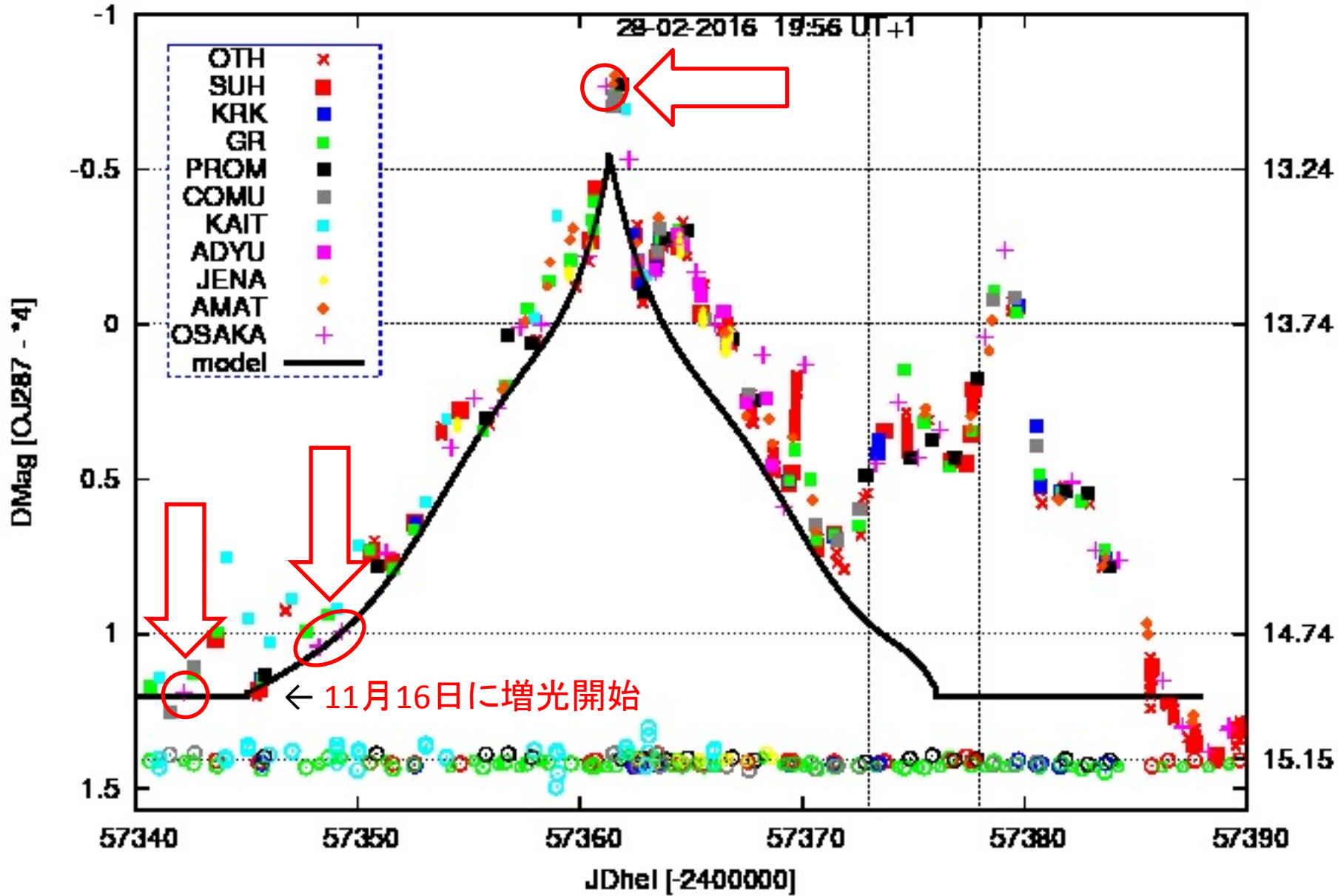
- 2005–2007年の次の熱的フレアは2015年12月6日±8週間と予測
- 増光開始時のスピンパラメータの依存性: $\chi_1 = 0.25 - 0.5(t - 2016.0)$

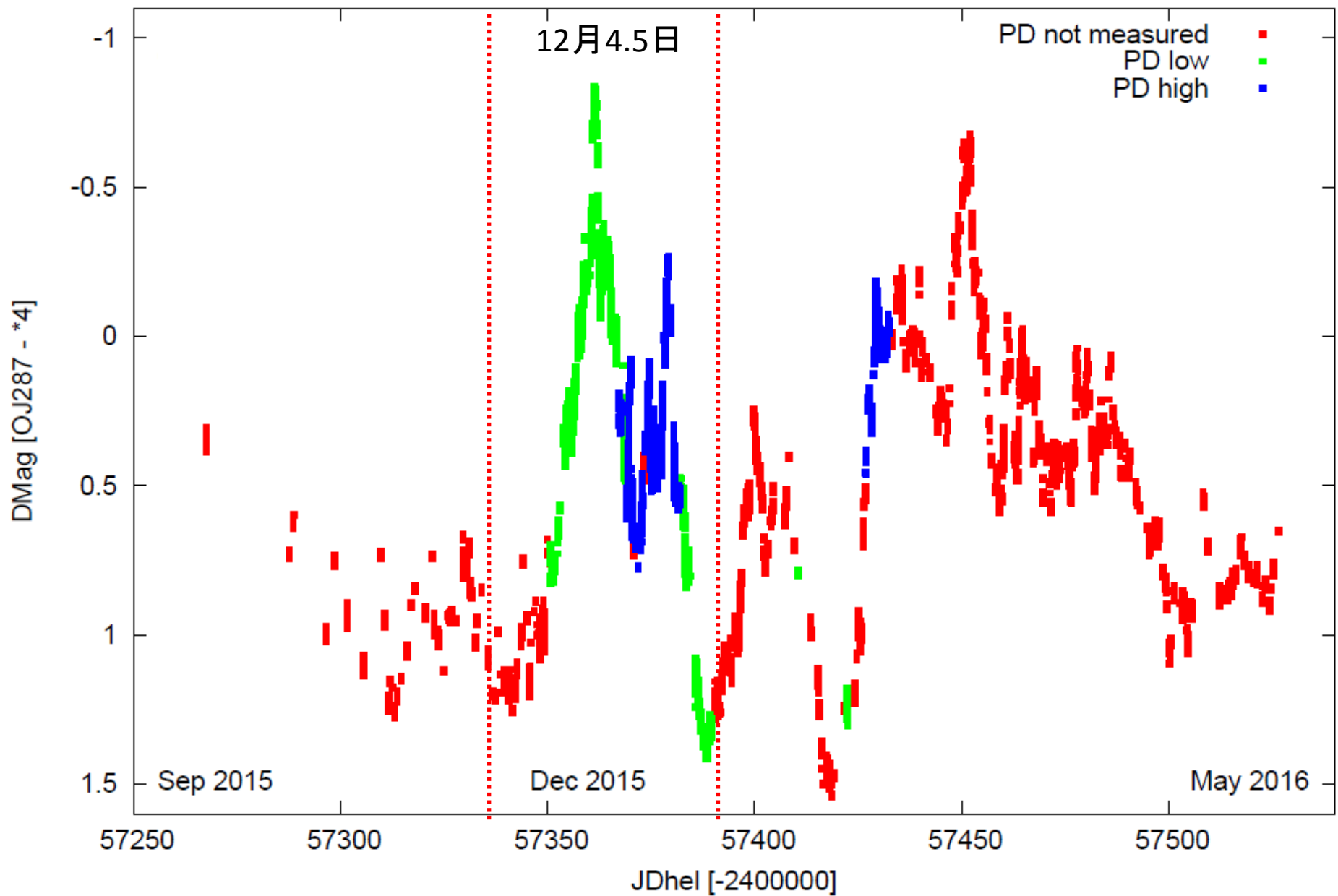


OJ287 2015 outburst [R filter]

12月4.5日に極大

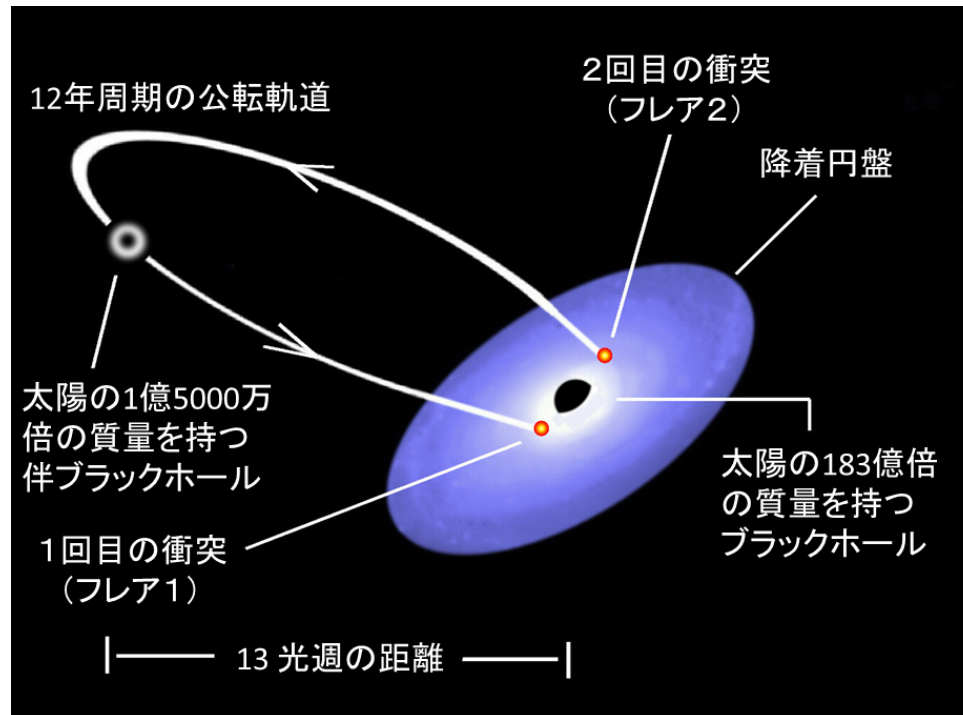
Dec 17 Dec 21



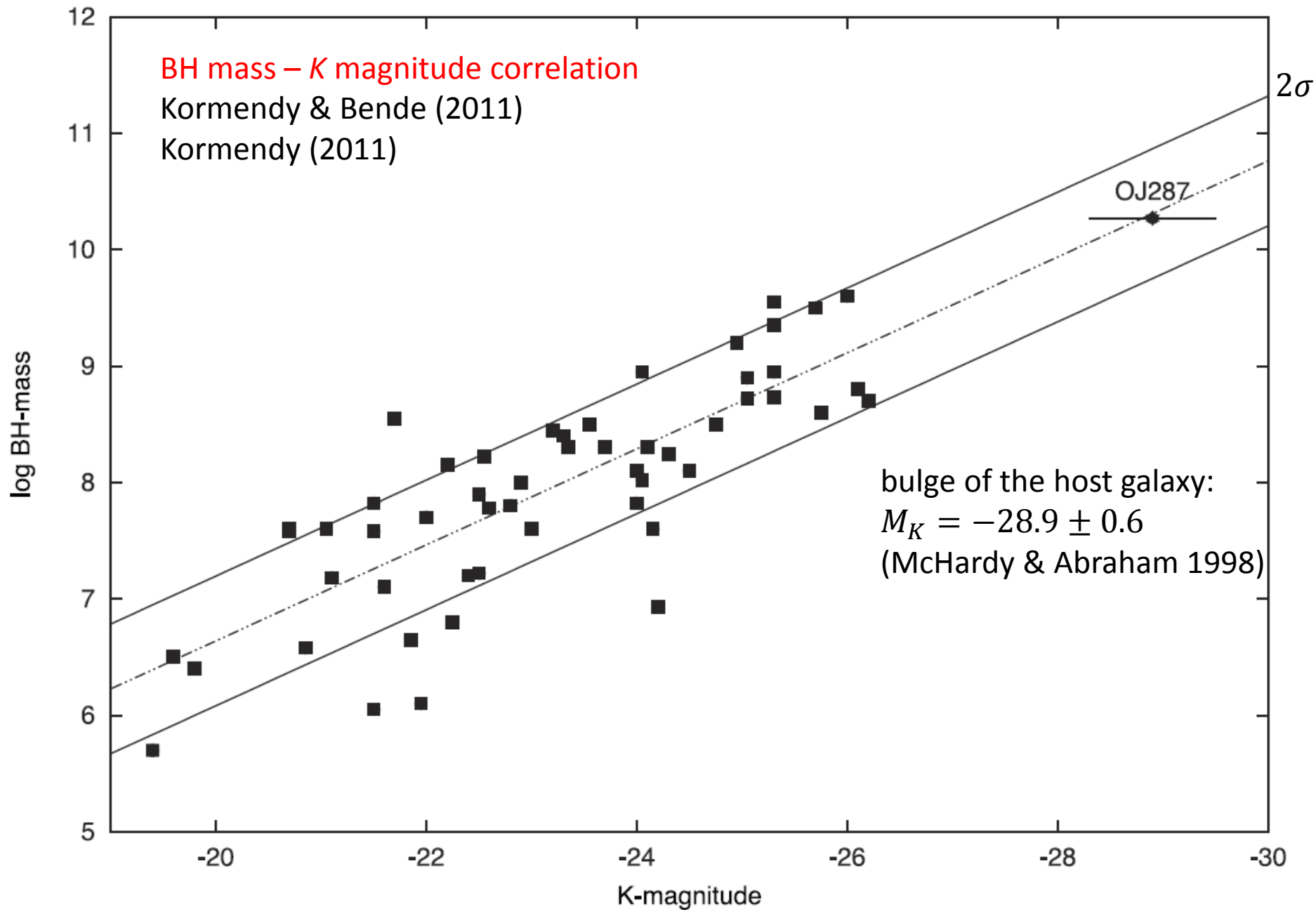


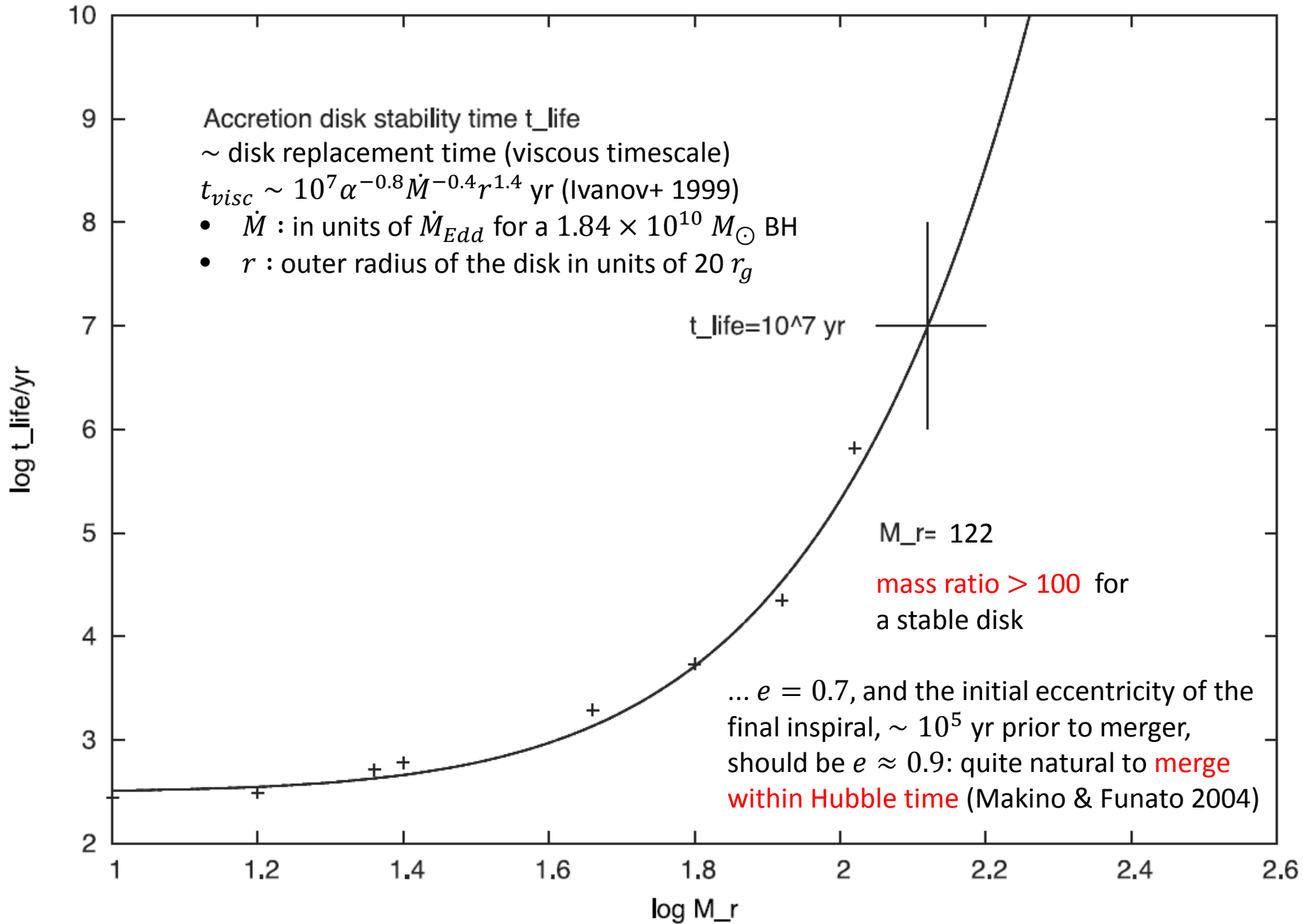
2015年フレアの結果

- フレアの開始: 2015.874 ± 0.007
- $\chi_1 = 0.313 \pm 0.01$ (0.304 ~ 0.322)
- $M_1 = 1.83 \times 10^{10} M_{\odot}$, $M_2 = 1.5 \times 10^8 M_{\odot}$, $e = 0.700$



歳差連星モデルの予測が観測的に検証された





a side result:

“BH”は本当に一般相対性理論で言うところのBHか？
(BH の uniqueness 定理と no-hair 定理)

- BH (stellar-mass, supermassive) の存在の観測的証拠
 - 硬い表面を持たないコンパクト天体への accretion process
 - $2GM/c^2$ より小さく重い、見えない天体の周囲の gas or stellar dynamics
- 一般相対論に従うとBH計量の軸対象定常解はKerr計量である
- 定常的で軸対象な電荷を持たないBH周囲の時空(それを特定する多極子モーメント)は、BHの質量と角運動量のみで記述可能である (Carter 1970)
- BHの no-hair 定理は、一般相対論においてのみ適用される
→ 他の重力理論と一般相対論との間の強力な discriminator
(e.g., Will 2006, Yunes & Siemens 2013, Gair+ 2013)

OJ 287 を用いた一般相対性理論の検証の試み (no-hair 定理の practical test)

- Kerrパラメータ χ で特徴付けられる Kerr BH では、四極子モーメント Q は一意に定義される (Thorne & Hartle 1985, Will 2008)

$$Q = -q \frac{S^2}{Mc^2}$$
$$q_2 = -q \chi^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} q_2 = c^4 Q / G^2 M^3 \\ \chi = cS / GM^2 \leq 1 \end{array} \right. \quad \text{required by cosmic censorship conjecture}$$

Q : quadrupole moment of a spinning body

S : spin angular momentum; M : mass

q : “no-hair” parameter

- true black holes: $q = 1$
 - neutron stars: $q = 2.0 \sim 12.1$ (Wex & Kopeikin 1999)
 - possible bosonic structures: $q = 3 \sim 4$ (Wex & Kopeikin 1999)
- Kerr BH を周回する質点の軌道を追跡し q を決める
 - そのような test ができる系が自然界に存在する \rightarrow OJ 287

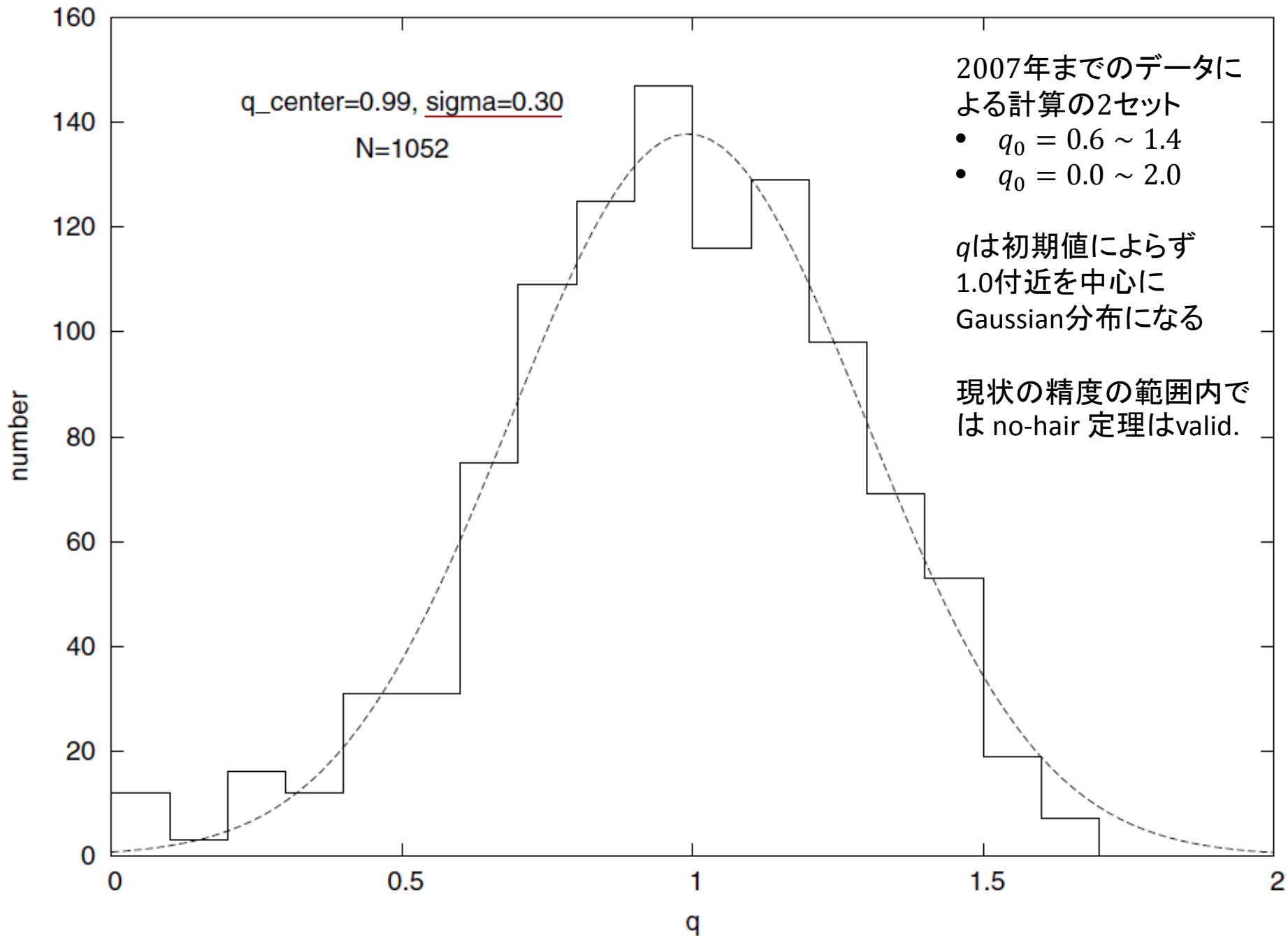
evolution of binary BH by PN-accurate orbital dynamics (Kidder 1999)

$$\ddot{x} \equiv \frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x}_0 + \ddot{x}_{1PN} + \ddot{x}_{SO} + \ddot{x}_{SS} + \ddot{x}_Q + \ddot{x}_{2PN} + \ddot{x}_{2.5PN} + \ddot{x}_{3PN}$$

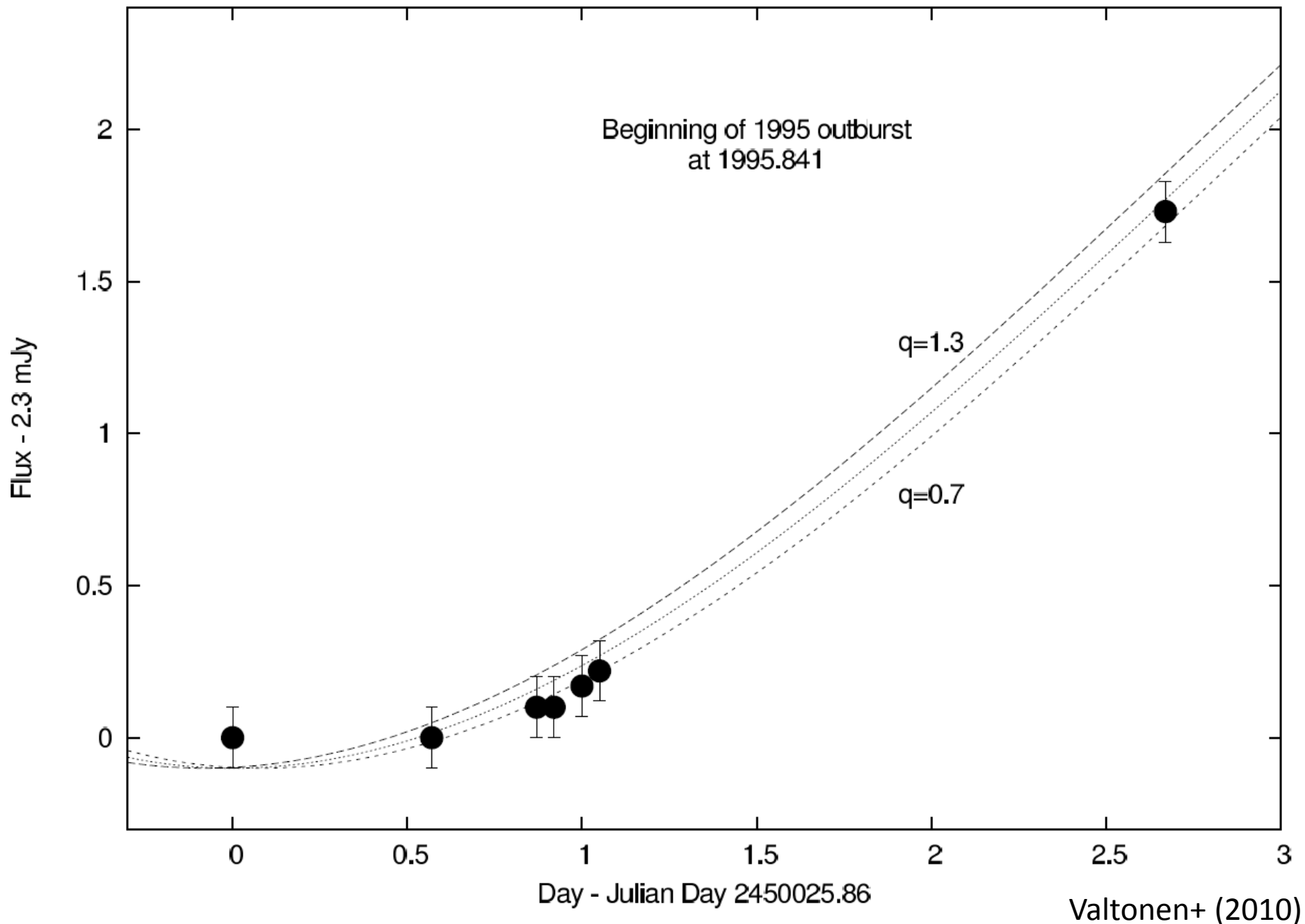
- $x = x_1 - x_2$: center-of-mass relative separation vector between BHs
- \ddot{x}_0 : Newtonian acceleration
- $\ddot{x}_{1PN}, \ddot{x}_{2PN}, \ddot{x}_{3PN}$: conservative terms (Damour 1982, Mora & Will 2004)
- \ddot{x}_{SO} : spin-orbit interactions (Barker & O'Connell 1979)
- \ddot{x}_{SS} : spin-spin interactions (Barker & O'Connell 1979)
- \ddot{x}_Q : quadrupole-monopole interactions (Barker & O'Connell 1979)
- $\ddot{x}_{2.5PN}$: radiation reactive term (Damour 1982)

$$\ddot{x}_Q = q \chi^2 \frac{3 G^3 m_1^2 m}{2 c^4 r^4} \left\{ \left[5(n \cdot s_1)^2 - 1 \right] n - 2(n \cdot s_1) s_1 \right\}$$

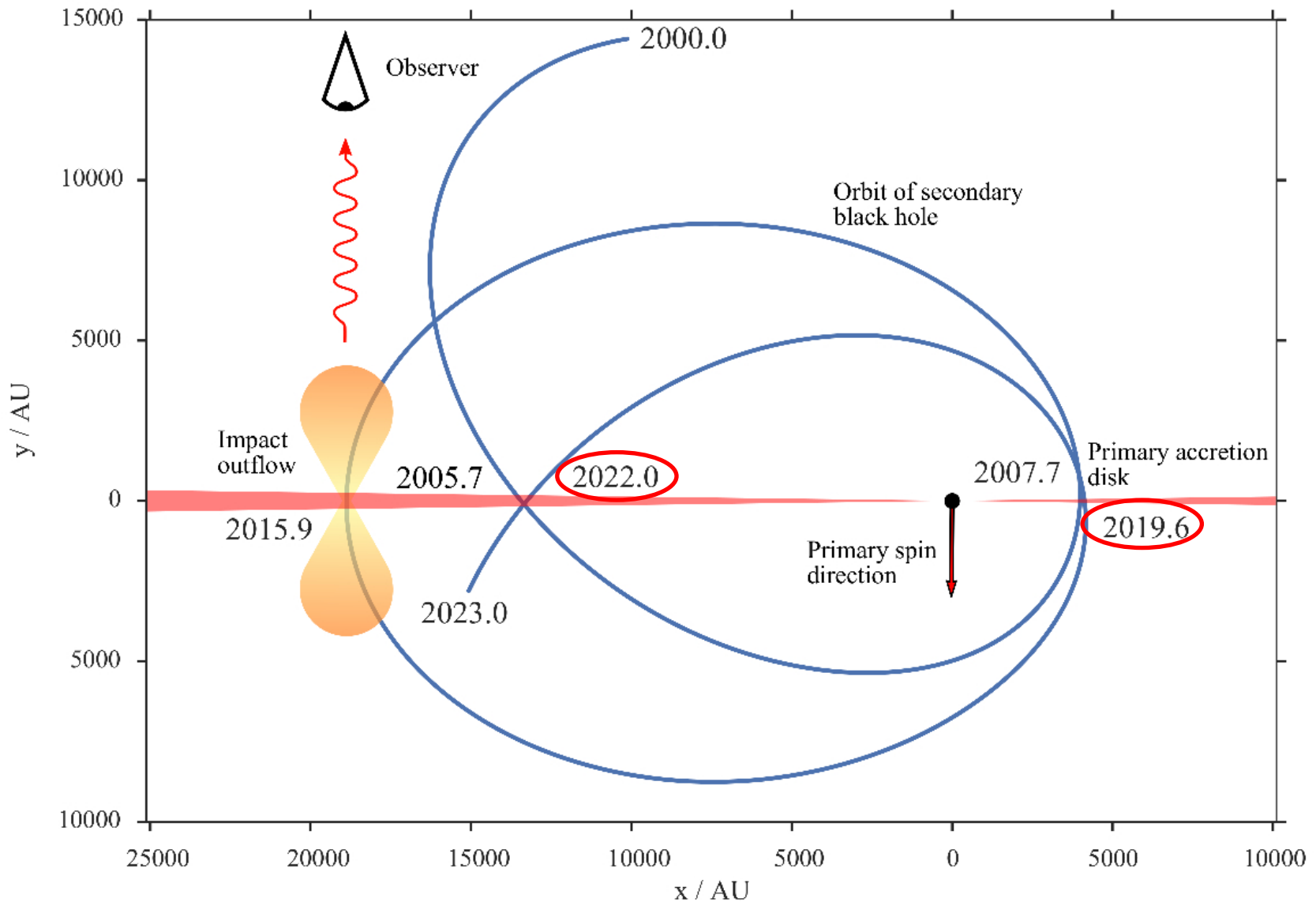
- s_1 : unit vector defining the spin $S_1 = \chi_1 G m_1^2 s_1 / c$
- $m = m_1 + m_2$
- $n \equiv x/r, r = |x|$

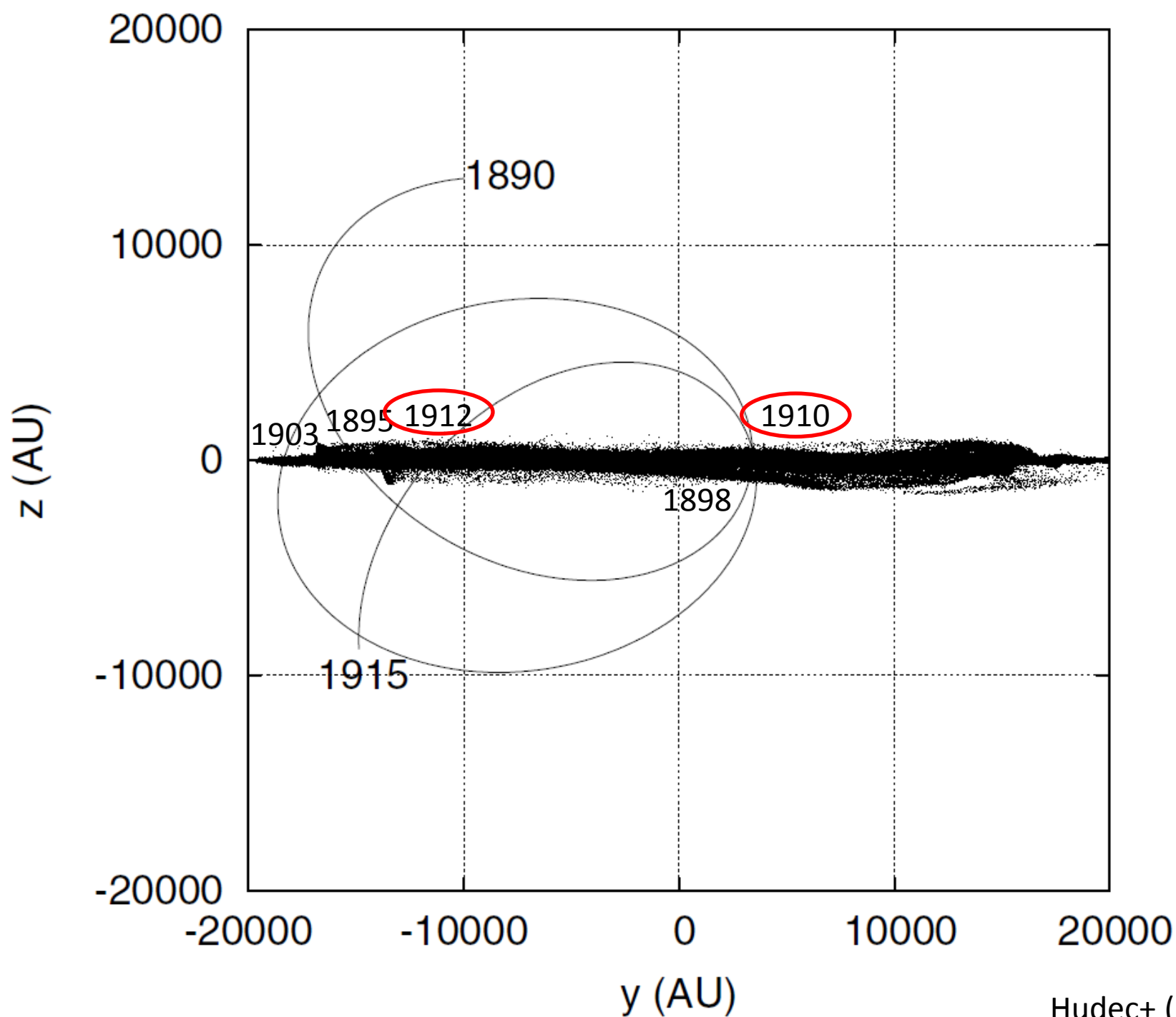


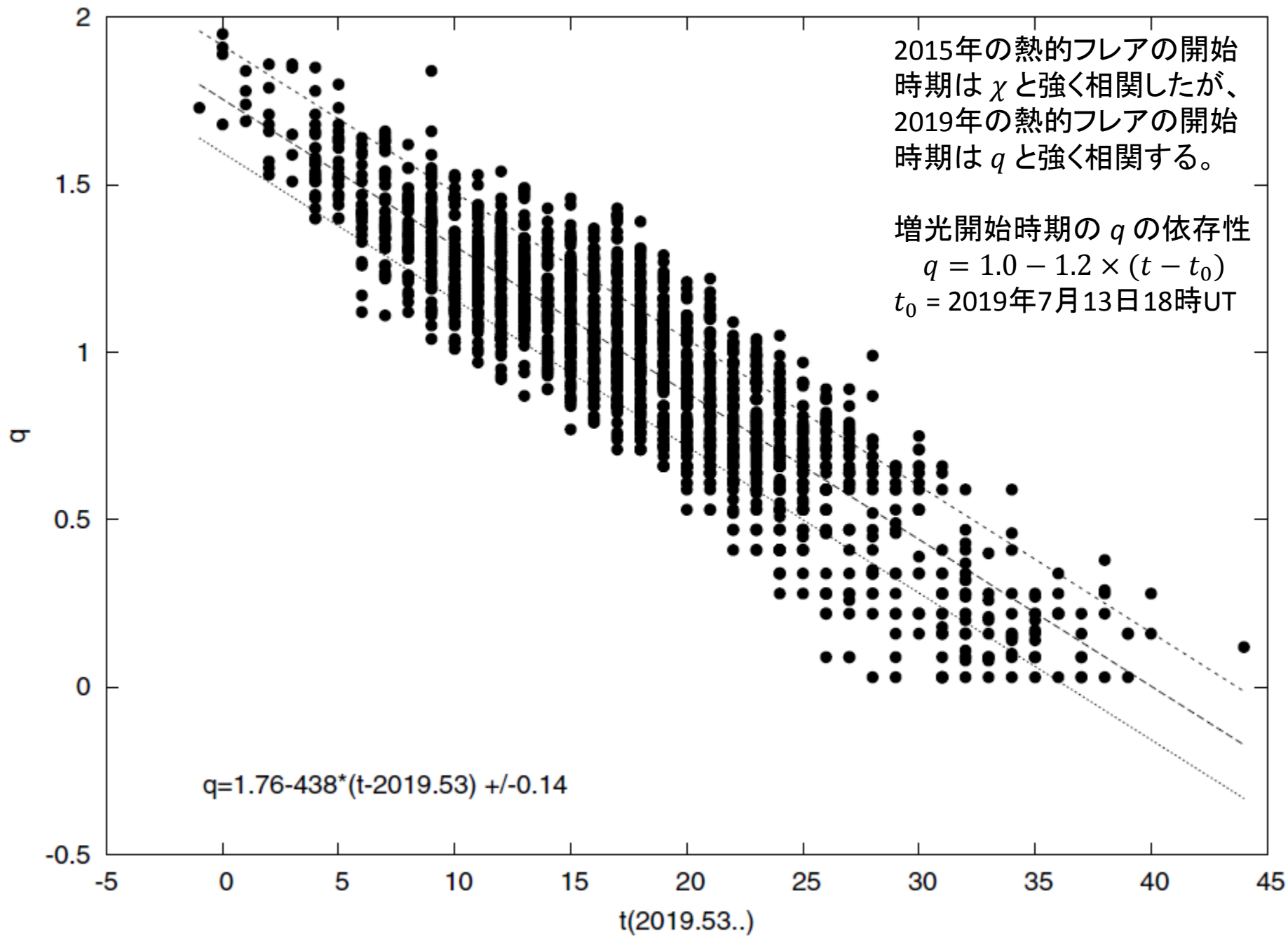
フレア開始時期の q に対する依存性の例

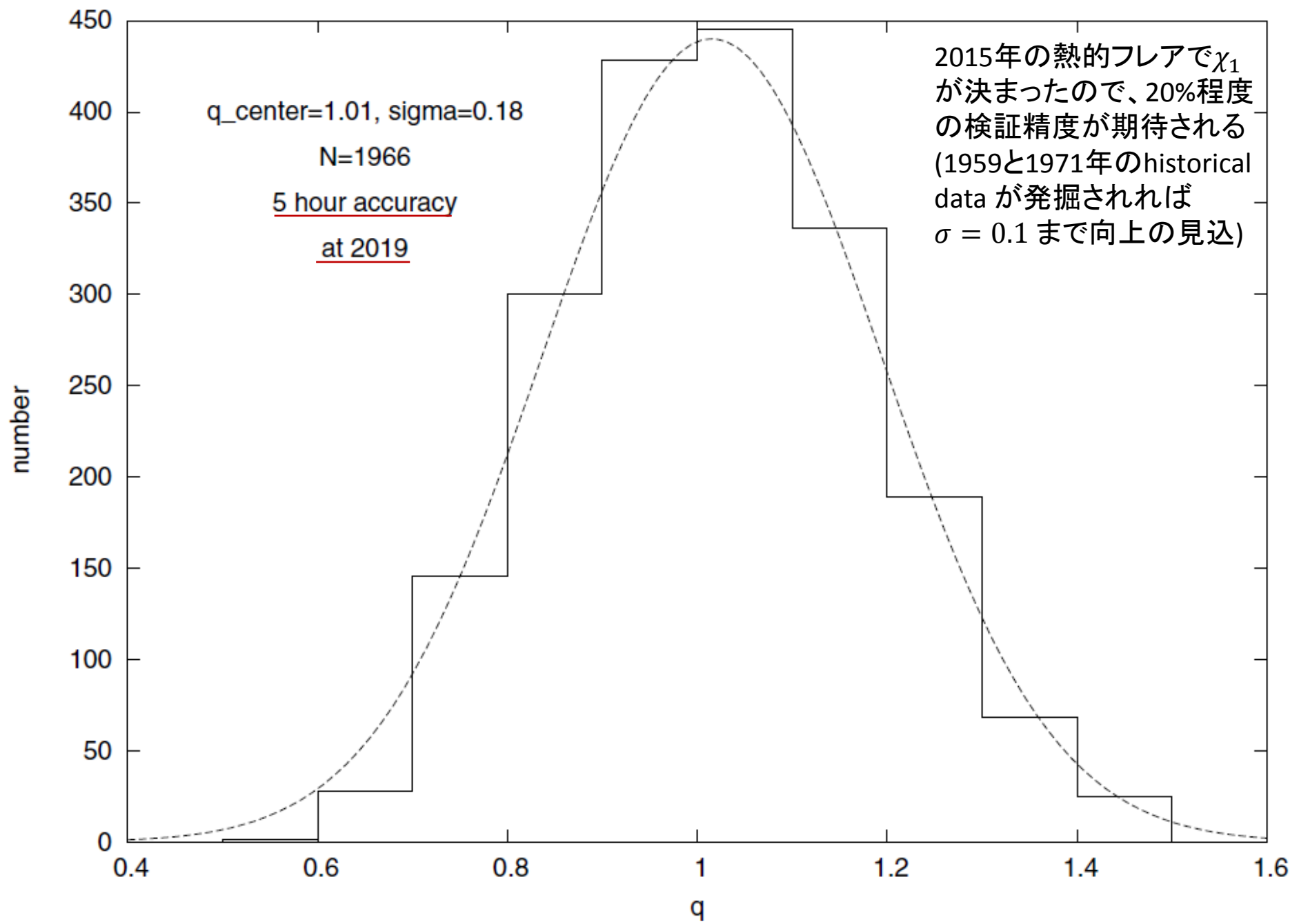


- 2015年の次の熱的フレアの開始は2019年7月13日と予測
- diskからの大量のgasの引き抜きによる活動性の増加

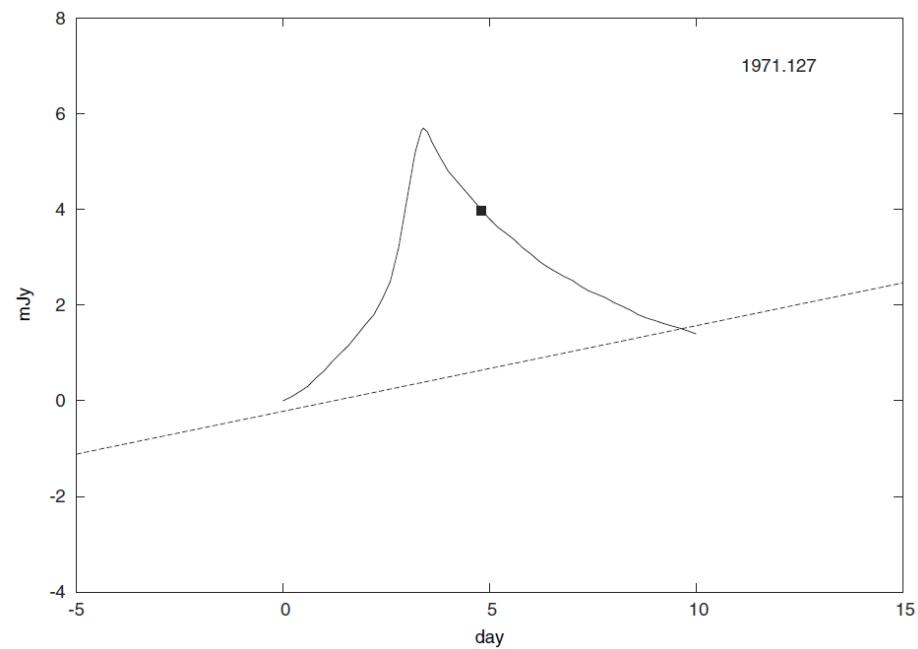
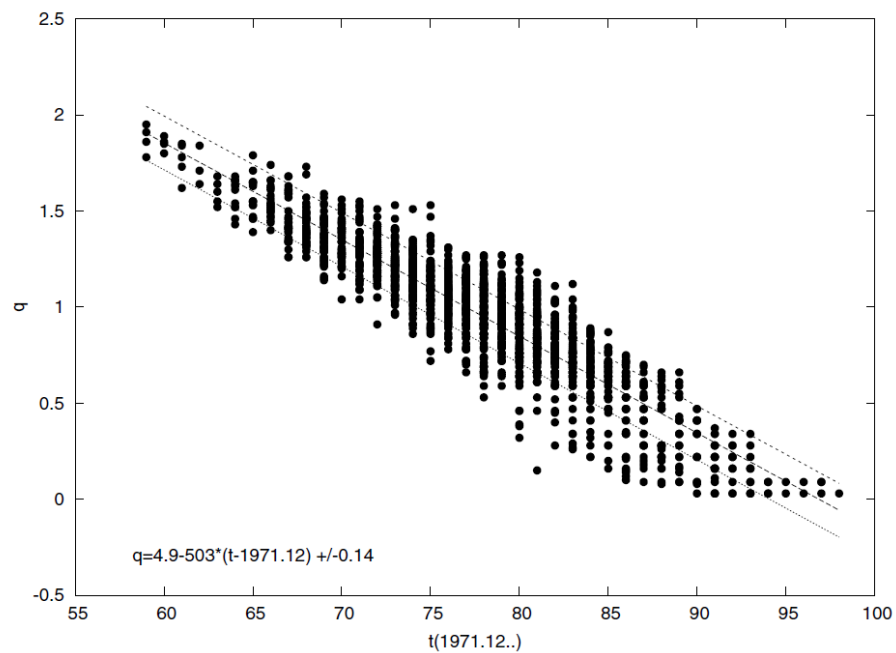
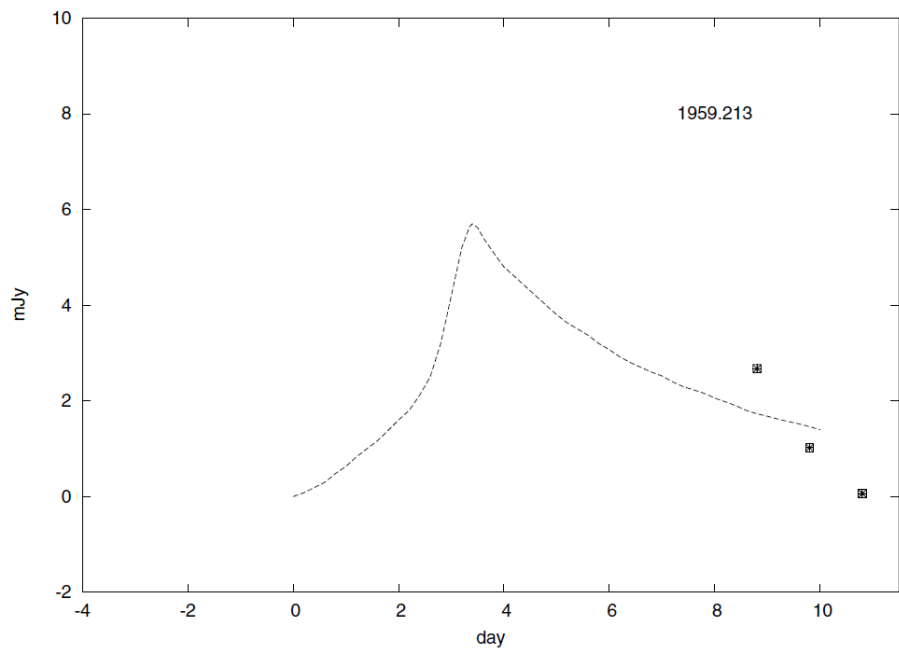
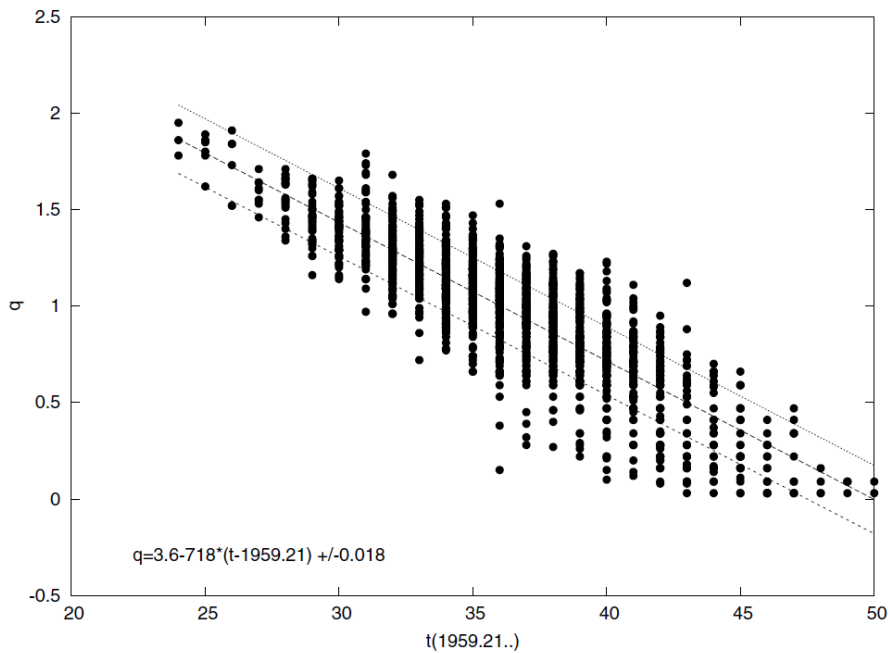






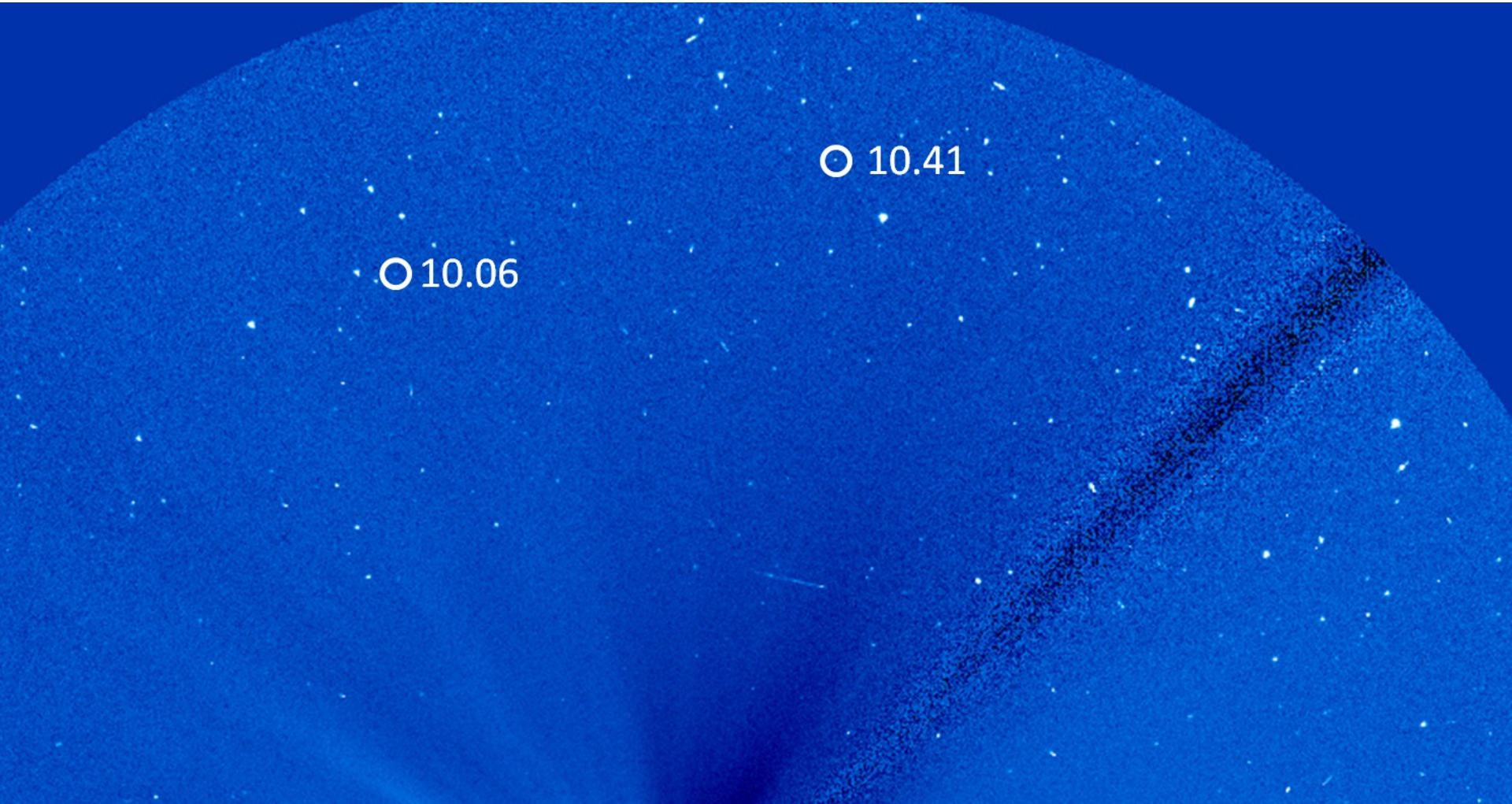


開始時期が q に強く相関する1959年および1971年の熱的フレア



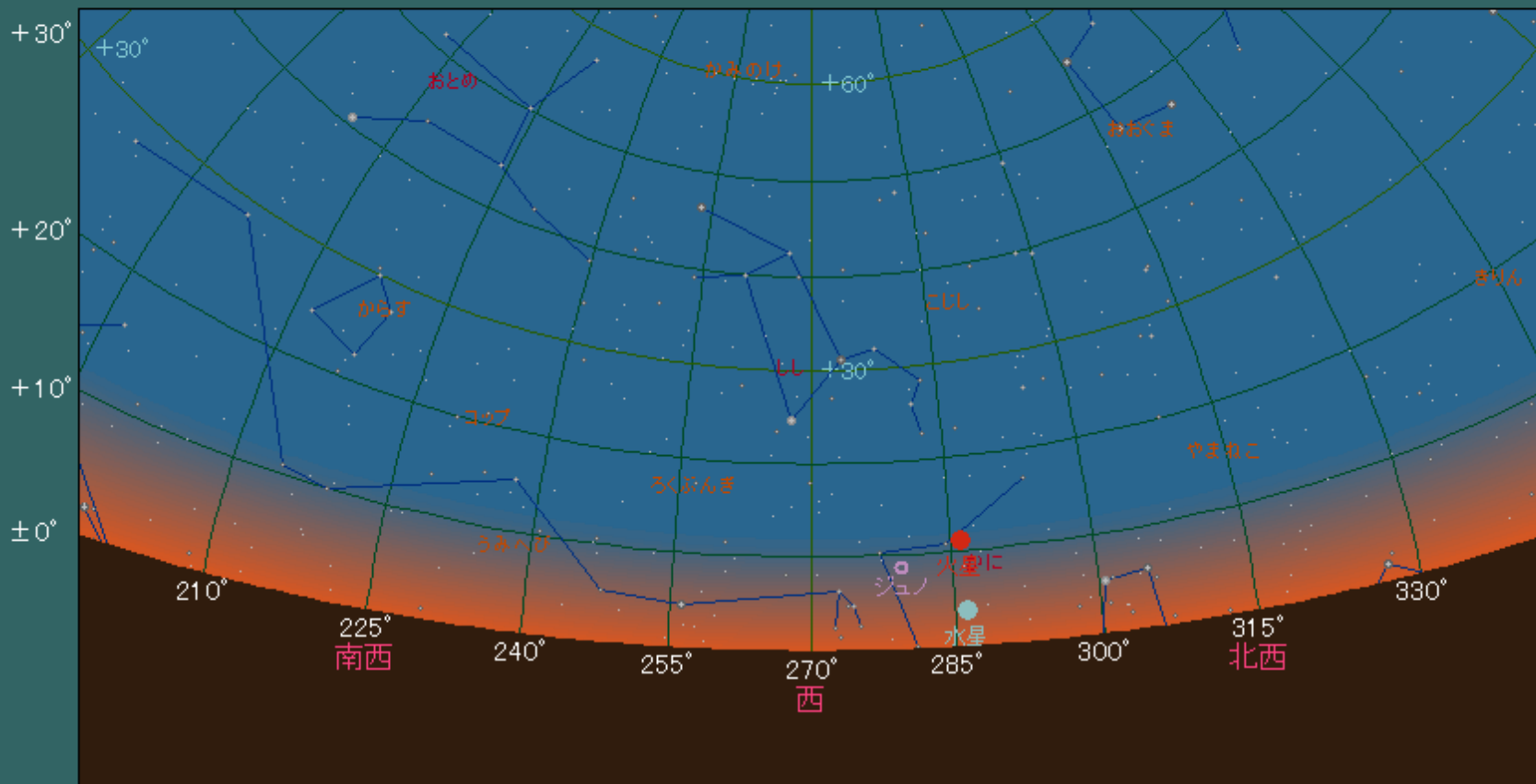
次の増光：2019年も2022年も7月頃になる見込 どうやって観測するのか？

- coronagraph を使う？ (SOHO LASCO)
 - LASCO C2 は太陽コロナに邪魔されて観測不可
 - LASCO C3 は16°の視野があり OJ 287 は入る
 - LASCO C3 の限界等級は10–14 (Andrews 2000)、実際は11くらい？
- 惑星間空間まで出る？
 - STEREO SECCHI HI-1 (heliospheric imager)
 - 24°の視野があり OJ 287 は入る
 - 限界等級は13–14
 - New Horizons LORRI (Long Range Reconnaissance Imager)
 - 口径20.8cmの望遠鏡
 - 限界等級は $V \leq 17$ (4x4 binning mode)



| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 分 | ±1 | +2 | +3 | +5 | +10 |
| +/- | +15 | +20 | +30 | +45 | +60 |

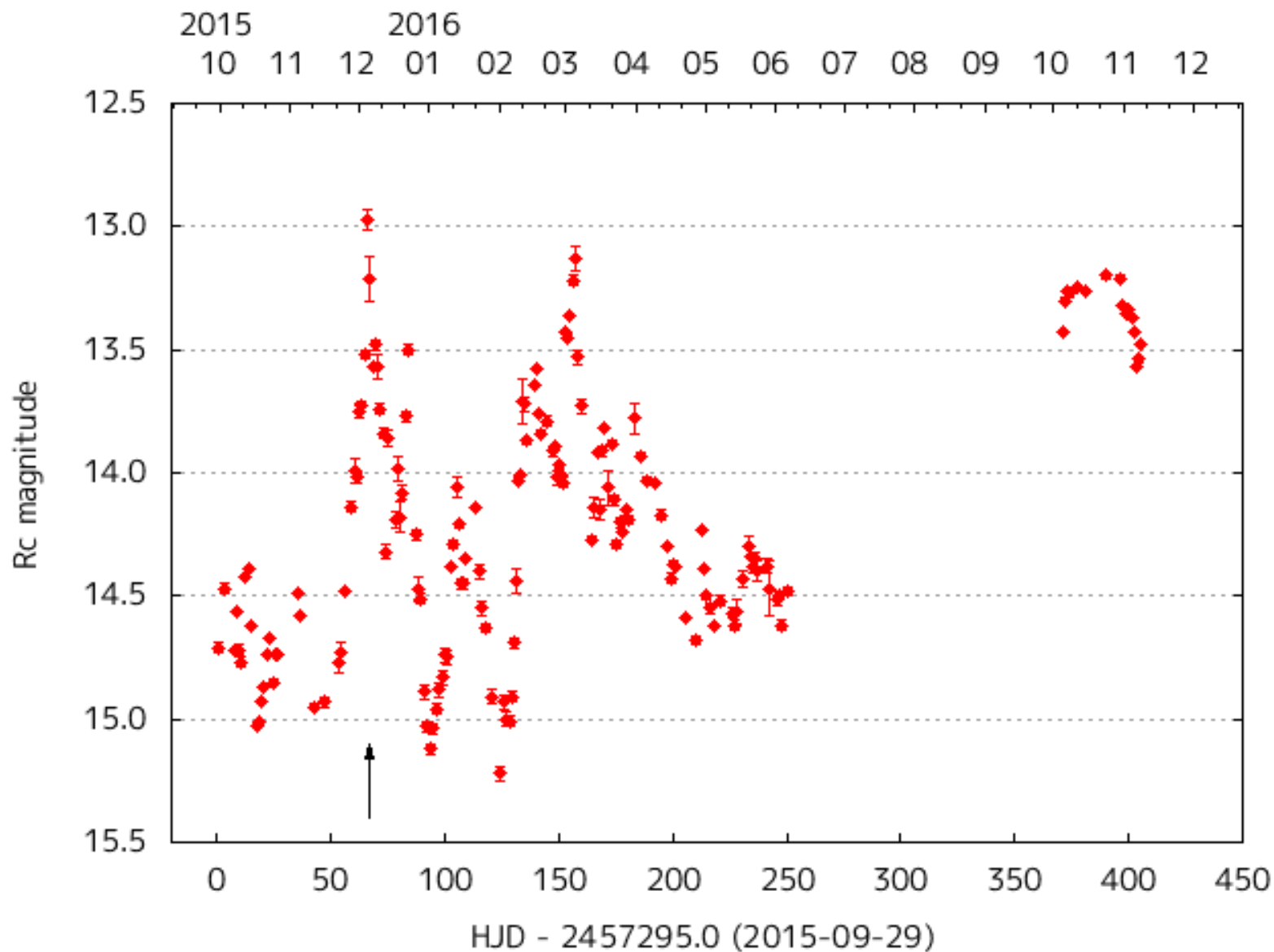
2019年07月14日19時12分 大阪の星空



| | | | |
|---------|-----------------------|-----|--------|
| 緯度 | + 34.7° | 日の出 | 04時55分 |
| 経度 | +135.5° | 日の入 | 19時12分 |
| 空の状態 | 薄明 | 月の出 | 17時00分 |
| 空が暗い時間帯 | 20時55分~03時12分 | 月の入 | 02時27分 |
| | | 月齢 | 11.6 |
| 表示方向 | 高度 23.2° 方位 270.0°(西) | 倍率 | 1.0倍 |

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| ● 1等星 | ● 5等星 | ● 太陽 | ● 土星 | ● セレス |
| ● 2等星 | ● 水星 | ● 天王星 | ● パラス | ● ジュノ |
| ● 3等星 | ● 金星 | ● 海王星 | ● 冥王星 | ● ベスタ |
| ● 4等星 | ● 火星 | ● エリス | ● 月 | |
| | ● 木星 | | | |

最近の光度曲線



まとめ: OJ 287 の歳差連星BHモデル

- OJ 287 は 連星ブラックホールのクエーサーとして公転軌道が判明している(たぶん)唯一の天体
 - 連星系軌道の歳差を考慮することで、過去・将来の増光時期の予測が可能
 - 2005～2015年のアウトバーストの時期を予測できた唯一の理論
 - アウトバーストに付随する短い熱的フレア(これも唯一?)の性質を説明可能
 - 12年周期以外のこと(60年周期、out-type flare 後の急減光)も説明できそう
→ 本命と考える理由
- 現在、増光間隔が大きく変化している時期
 - 2019年および2022年のフレアによるモデルの(かなり強い)検証
→ ただし地上からの観測は難しそう
 - 約60年(歳差周期の半分)の長期変動性によるモデルの検証
- 強い重力場(PSR B1913+16の $\sim 10^4$ 倍)での相対論の試験場
 - 一般相対論の効果が連星系軌道や増光時期に大きく影響
 - 既にインスパイラル期にある