

# Astro-E2で迫る 星・惑星形成

田村元秀  
国立天文台

2004年3月22日 学会 Astro-E2 特別セッション

本日の話:

X線と赤外線で見えた星形成領域と  
ASTRO-E2への期待

- \* 星形成領域における赤外線とX線
  - \* X線観測の意義
- \* 弱輝線Tタウリ型星 & Tタウリ型星
  - \* 原始星とアウトフロー
  - \* HII領域
- \* 期待される観測のまとめ

<青字の部分がAstro-E2に期待する観測です>



## 星形成とX線: おおまかな歴史

- もともとは、星形成と高エネルギー現象との関連は薄いように思われていた。。。
  - 分子雲 (10K)、若い星の表面温度 (2000-3000K)、星周円盤の温度 (100-1000K)
- **第一期:** しかし、1980年代にEinstein衛星が星形成領域の数多くの若い星に付随したハードX線を検出して状況は一変した
- **第二期:** 1990年代に、ROSATやASCA衛星によって、星形成領域で数百個の前主系列星、全天では数千個の古い前主系列星に関係する天体が検出された
- **第三期:** 現在、他波長で捕らえられている、ほぼ全ての種類の若い天体がX線で検出できるようになった

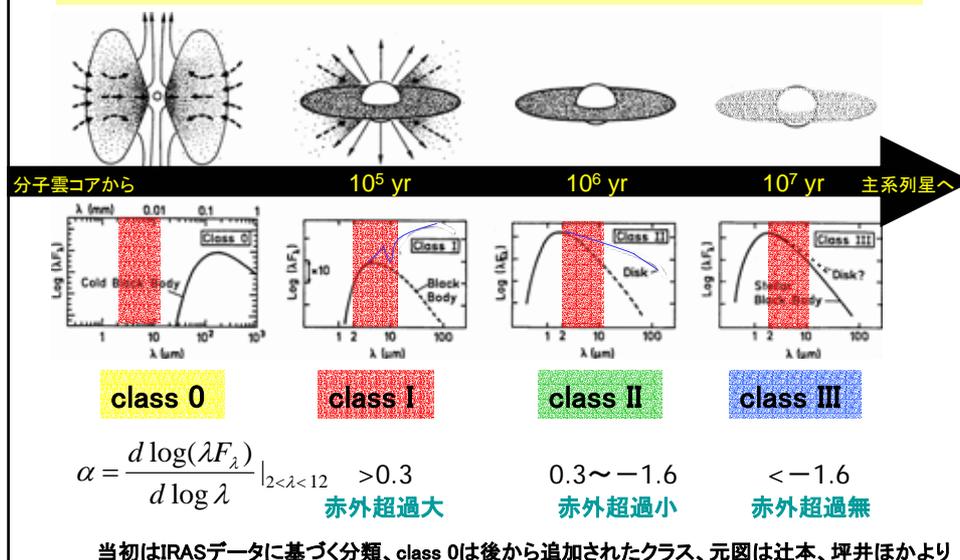
## なぜ星形成領域をX線で観測するのか？

- 太陽のような低質量星は前主系列(PMS)段階において非常に高い磁場活動を示し、X線を放っている
  - $\langle L_X/L_{bol} \rangle$  (T Tauri) = 100–10000  $\langle L_X/L_{bol} \rangle$  (Main Sequence)
  - つまり、星自体が明るく観測しやすい(赤外線と同じ)
- 分子雲による減光の影響が少ない
  - これも赤外線が有効な事と同じ理由
  - 波長2keVにおける吸収 $\approx$ 波長2  $\mu$ mにおける吸収
  - よりハードXならば $A_V=100$ 以上も見通せる
- 若い星はクラスタで生まれるので、X線の性質を「統計的」に調べることができる
- 大質量星形成(領域)の理解が遅れている
  - 赤外線でも、低質量星の研究が一段落ついて、大質量星形成領域の観測が見直されている
  - 特に、高エネルギー現象の高感度・高解像度観測が必要

## X線による観測の目標(個人的印象)

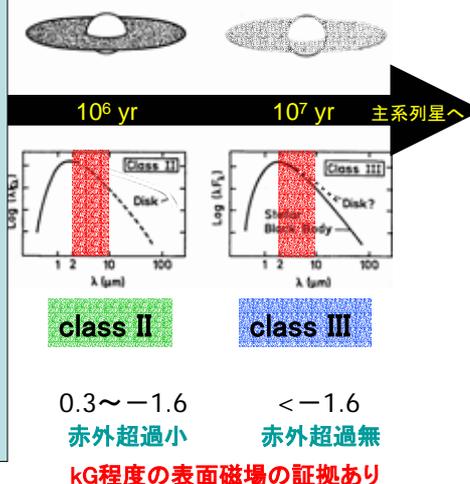
- さまざまな種類のYSOからのX線の起源を説明すること
  - X線放射領域は太陽半径の数倍–数十倍と考えられ、星形成領域は最も近いものでも50–100pcの距離にあるため、数masの解像度が必要
  - 他の波長も含めて、当面はX線放射領域の「直接」観測は出来ない
- それが、星形成の物理の理解にどのような進展をもたらすのかを念頭に置きつつ。。。

## 赤外線に基づくYSOの分類とその進化



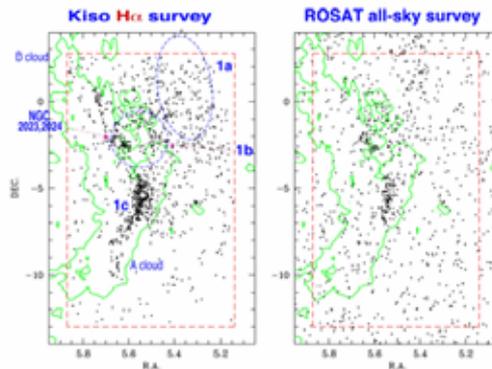
## 弱輝線Tタウリ型星とTタウリ型星

- 可視光で観測可能
- 近赤外で特に明るい
- 赤外超過は比較的小さい
- 自然シーイングでは点状
- 0.1秒角の解像度でようやく星周構造(原始惑星系円盤)が描けるようになった
- ジェットを伴うことがある
- 分子流は一般に存在しない(クラス1からの遷移的天体には付随)
- SEDは星の黒体放射+円盤



## 弱輝線Tタウリ型星

- 弱輝線T Tauri型星 (WTTS) からのX線
  - ROSAT All Sky Survey (RASS)
  - 全天で数千個レベルのWTTS(候補)の発見
  - 分子雲の外側に広範に分布
  - 光学同定により、WTTSと確認されつつあるが、同定できていないものも多い(その正体は不明)
  - X線の起源は太陽と同様
    - non-thermal電波、黒点の証拠、kG磁場の存在、測光・分光によるフレアの確認
  - 全天サーベイから個々の星形成クラスターの観測へ
    - TTSやそれ以前の段階の天体を一網打尽に調べる
    - X線の起源を探るには、長時間(数日から数ヶ月のスパンの)モニター観測も重要



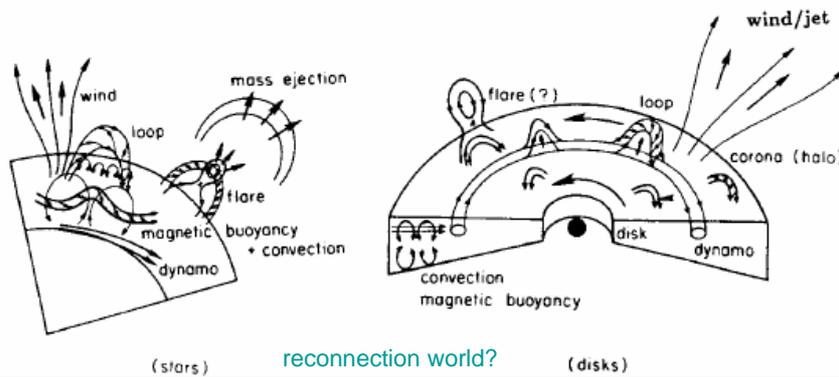
Walter et al. 1999

## 古典的Tタウリ型星

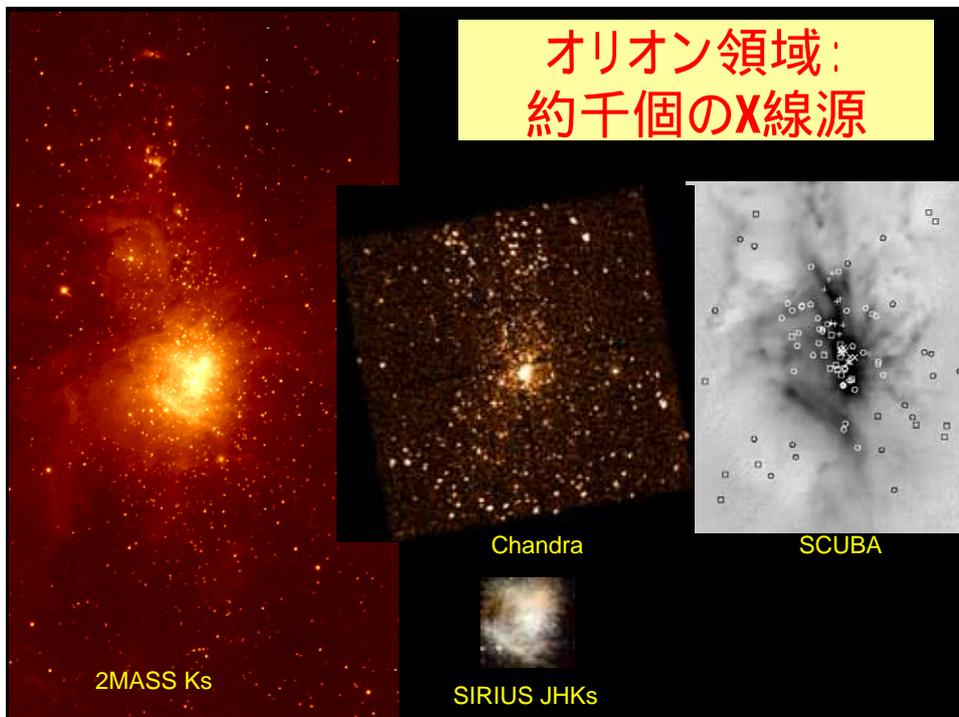
- T Tauri型星 (TTS) からのX線 – Einstein衛星
  - Feigelson & Decampli 1981; Montmerle et al. 1983
  - 高光度:  $L_x = 10^{28} - 10^{31}$  erg/s
    - thin thermal plasma spectra
  - X線光度とボロメトリック光度の良い相関
    - $L_x/L_{bol} = 10^{-3} - 10^{-5}$
  - 高温度: 典型2keV, >10keVも
  - 非常にvariable
    - ONCの場合、数日ごとに  $L_t(\text{peak}) > 10^{29}$  erg/sのフレア
    - つまり、ソフトなquiescent corona放射よりもフレア放射が卓越する
  - これらの基本的X線性質はWTTSとCTTSであまり変わらない
  - ⇒ CTTSのX線起源はWTTSと同様と思われる。しかし。。。。

## 前主系列星からのX線

- 前主系列星のX線は、太陽磁場からのアナロジーの延長で、星表面あるいは星周円盤も介した大規模なダイナモとフレア(reconnection)で説明できるか？



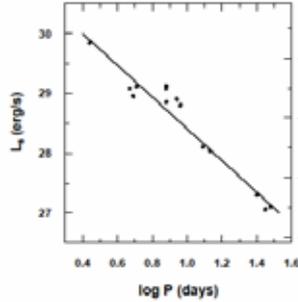
## オリオン領域： 約千個のX線源



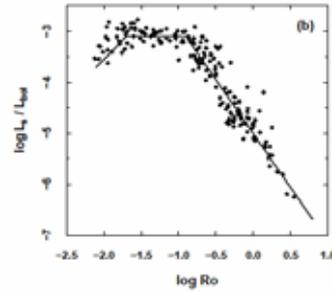
## 前主系列星からのX線:起源 (1/3)

主系列星の場合:太陽磁場を説明するダイナモ理論  
で同じく説明できると信じられている

"soft (0.5-2.5keV) X-ray L" vs. "Period"  
for solar analogs



"Ls" vs. "Rossby number"  
for clusters and field stars



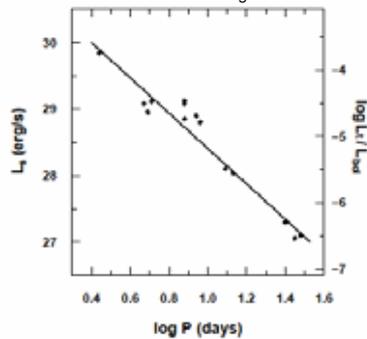
Ro  
= rotation Period/  
convective  
overturn time

主系列星の磁場の活動性は回転と相関(多少経験的だが)

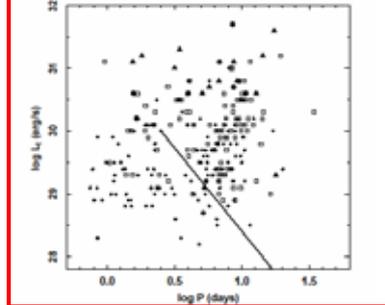
主系列星と同じダイナモだとすると  
YSOでも同様の関係式が得られるはず、しかし。。

## 前主系列星からのX線:起源 (2/3)

soft (0.5-2.5keV) X-ray L vs. Period  
for solar analogs



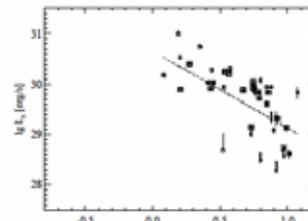
broadband (0.5-8keV) X-ray L vs. Period  
for PMS stars



オリオンではX線強度vs回転の同じ関係は成り立たない  
(Feigelson et al. 2003)、さらに...

注意

Tau-Aur-Perサンプルでは相関ありと言われていた  
(Stelzer & Nuehauser 2001)





## 原始星のX線観測

### ● Class I からのX線の発見 (R CrA分子雲)

- ASCA Hard X-rays: Koyama et al. 1996
- 高温 (10<sup>8</sup>K)
- 吸収大 (4x10<sup>22</sup> Hcm<sup>-2</sup>)
- 大規模flareも頻繁か

### ● その普遍性

- いろいろな分子雲で既検出
- ρ Ophでは既知のClass Iの70%から検出 (Imanishi et al. 2001)
- 上記の性質も普遍的らしい

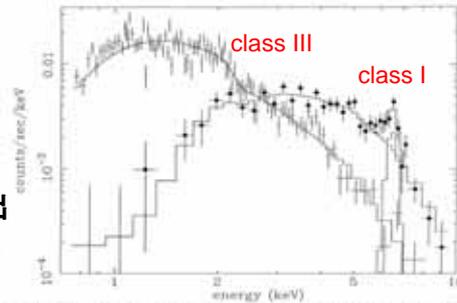
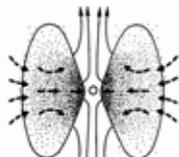
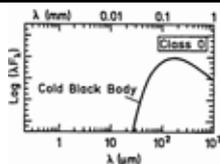


Figure 4. ASCA spectra of a heavily absorbed Class 0 protostar (R CrA) and a nearby unabsorbed Class II T Tauri star at the Chandra X-ray Observatory (Groves et al. 1996).

## 原始星: クラス 0 天体



分子雲コアから



class 0

$$\alpha = \frac{d \log(\lambda F_{\lambda})}{d \log \lambda} \Big|_{2-10 \mu\text{m}}$$

- 可視光では見えない (分子雲中および星周構造中のダストの吸収)
- 近赤外・中間赤外でも見えない
- アウトフローを伴う
- SEDは単一温度の黒体放射
- 降着物質がまだ多量に外にある状態
- Class I天体のedge-on天体も含まれるだろう

- この描像が正しいとすると、ほとんどのクラス0天体はX線でも観測できないくらい吸収が大きいだろう

## Class 0天体のX線観測

- Class 0 からのX線の発見(OMC2/3分子雲)
  - Chandra Hard X-rays
    - Tsuboi et al. 2001, Tsujimoto et al. 2002
  - submm cores MMS2 & MMS3 with NIR H<sub>2</sub> outflow
  - 吸収極大 (a few  $10^{23}$  Hcm<sup>-2</sup>)
- その普遍性は今後の課題
  - 吸収が大きいので感度リミット
  - 問題点: face-onに近いものだけが観測されるというバイアスがかかることが予想される(OMC-2/3は典型的なクラス0か?)



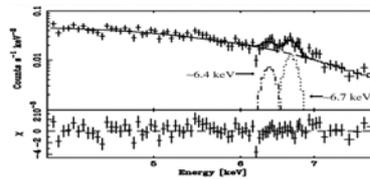
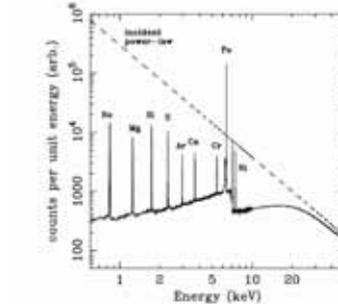
## 原始星・クラス0天体のX線の起源は？

- 円盤はTタウリ型星だけでなく原始星にも存在するので、円盤説は魅力的だが、Tタウリ型星のX線の円盤起源が未定なので、アナロジーが難しくなった
- 原始星におけるX線、高温スペクトル、鉄輝線(後述)の普遍性は？
  - 統計的議論のためにはサンプルがまだ少なすぎる
- 高感度により個々の星形成領域のサンプルを増やすこと

## 円盤とX線輝線: XRSのウリである 2keV以上の分光に関して (1/2)

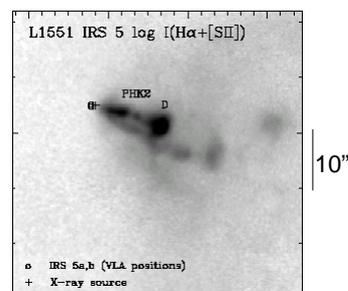
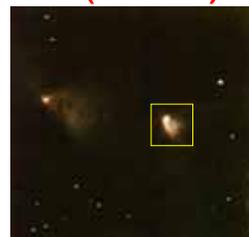
- 中心星からのX線が円盤で「反射」し蛍光放射する可能性
- AGNにおける現象のアナロジー
- 最も強い蛍光輝線が6.40 keVの鉄のK $\alpha$ 線
  - review by Reynolds ('03)
  - YLW16Aなどで見られる2本の鉄輝線 (Imanishi et al. 01; Koyama et al. 96)
    - 6.7keV (Fe XXV) from flare
    - 6.4keV (Fe I) from disk?
- 高感度・高分散分光でより普遍的に見えてくる、あるいは、別の輝線も見えてくる⇒X線と円盤の相互作用の精密な物理の解明
- ただし、円盤の運動等を調べるには $\Delta v=300\text{km/s}$ では足りないだろう

C.S. Reynolds, M.A. Nowak / Physics Reports 377 (2003) 589-666



## 円盤とX線輝線: XRSのウリである 2keV以上の分光に関して (2/2)

- 原始星には大規模アウトフローが存在する
  - L1551 IRS5から1"程度 (200AU) 離れた場所からX線 (Bally et al. 2003)
  - その原因は、X線の反射・ジェットによるショックなどが考えられるが不明
  - アウトフローからのX線の区別とその起源の理解は今後の課題
  - 輝線の速度広がりが見出できるかもしれない(ショックモデルからのジェット速度の推定値は数百キロ?)

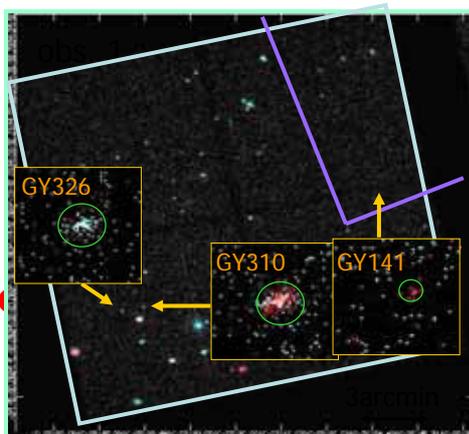


## 若い褐色矮星と若い sub-brown dwarfs

- 星形成領域には、若い褐色矮星 (YBD) や若い free-floating planets (sub-brown dwarfs) が存在する
  - Tamura, Itoh, Oasa, Nakajima 1998, Science
  - Lucas & Roche 2000, MNRAS
  - Zapatero-Osorio et al. 2000, Science
  - 前主系列星と似た天体構造 (対流層) と星周構造 (円盤) の存在が予想される



## YBD の X線観測



blue : hard ( $E > 2\text{keV}$ ) red : soft ( $E < 2\text{keV}$ )

- YBDからのX線の発見 ( $\rho$  Oph分子雲)
  - Chandra Hard X-rays
    - Imashi et al. 2002
  - (2/8) YBD + (5/10) YBD candidatesでX線検出
  - 吸収大 (a few  $10^{22} \text{Hcm}^{-2}$ )
  - $\log(L_x/L_{\text{bol}}) \sim 10^{-3} - 10^{-5} \sim$  TTSLレベル
- 感度向上さえ有れば、young sub-brown dwarfの検出は時間の問題だろう
  - $\Rightarrow$  超低質量星の構造・星周構造の総合的理解へ

## 大質量星形成領域:M17

21cm連続波と  
明るいO型星

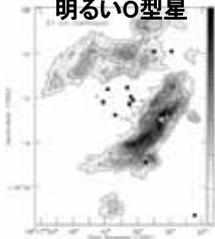


Fig. 1a

赤 (soft: 0.5–2keV)  
青 (hard: 2–8keV)

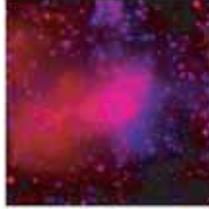
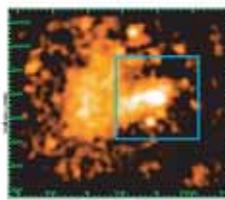


Fig. 1b



近赤外3色



ROSAT

- 最近、HII領域の描像を大きく変える観測が出始めた (Townesley et al. 2003)
  - 個々のYSOからのX線だけでなく、広がった soft Xを発見
  - O型星のクラスタからの "X-ray fountain" が南東に吹出している
  - X線領域と分子雲の境界が "Stromgren shell"
  - このX線の原因は、wind-wind相互作用か、wind-cloud相互作用か?
  - 適当なX線輝線を用いた運動の解明+HII領域のモデルの建て直し

## まとめにかえて: Astro-E2における星形成観測の視点

- 近傍分子雲での統計的議論が重要か
  - 高い感度を生かす(近傍ならば解像度は二の次で良い)
  - 赤外線源に比べれば、まだまだWTTS/TTS以外のYSOの天体サンプルが少ない
- S/Nの良い分光観測例がそもそも少ないと思われる
  - 感度向上に伴うサンプル増加の期待
  - 各クラスでサンプルを揃えて、「evolutionary sequence」と「スペクトル、フレアタイプ等」の統計的議論を行う
- Hard Xはクラス0天体以前における中心核部分を直接トレースできる唯一の手段
  - 分子アウトフローは核を取り巻く星周構造の間接的証拠しか与えない
  - 赤外線バイアスのない高密度分子雲のhard Xサーベイ
- ここまでのまとめとして、以下のようなプロジェクト観測が可能では?
  - 適当な大きさ・面密度の若い星のクラスタを選ぶ
    - モザイク数数十個で分子全体を覆える
    - 2'内にソースが入り過ぎない
    - たとえば、 $\rho$  Oph dark cloud
  - XRSを用いてモザイク観測を行い、分子雲全体の3Dスペクトルを得る
  - 多くの分光サンプルを生かして、「X線に基づく」YSOのspectral energy classificationを試みる
  - 独立に、個々の代表的天体のtemplateを整備する
  - 意外と、赤外・可視での代表的天体の詳細なX線観測が出ていない印象がある
  - この状況は、現在の赤外線による星形成領域の観測に似ている
    - 撮像観測が一通り終わって、multi-object-spectrometerによる多体分光または面分光の時代へ

## まとめにかえて：Astro-E2における星形成観測の視点

- そのほか、これまで試みられていない視点としては。。。
  - 星形成領域におけるT Tauri型星の半数はbinary
    - TTSにおけるbinarityとX線の性質を確立しないと、より遠方の観測(あるいは低解像度観測)の議論に不定性が残る
      - separationなどbinary parameterとX線の比較
      - 原始星についても同様の研究が必要だが、原始星のbinarity自体の研究が遅れている(ALMA以降か?)
  - 遠方のクラスターの観測は不得手だが、広がった成分について高感度分光を行い、大質量星形成と高温プラズマの関係を理解する
    - XRSの得意な広がった天体の分光