

宇宙科学情報シンポジウム@ISAS/JAXA 2020/02/14

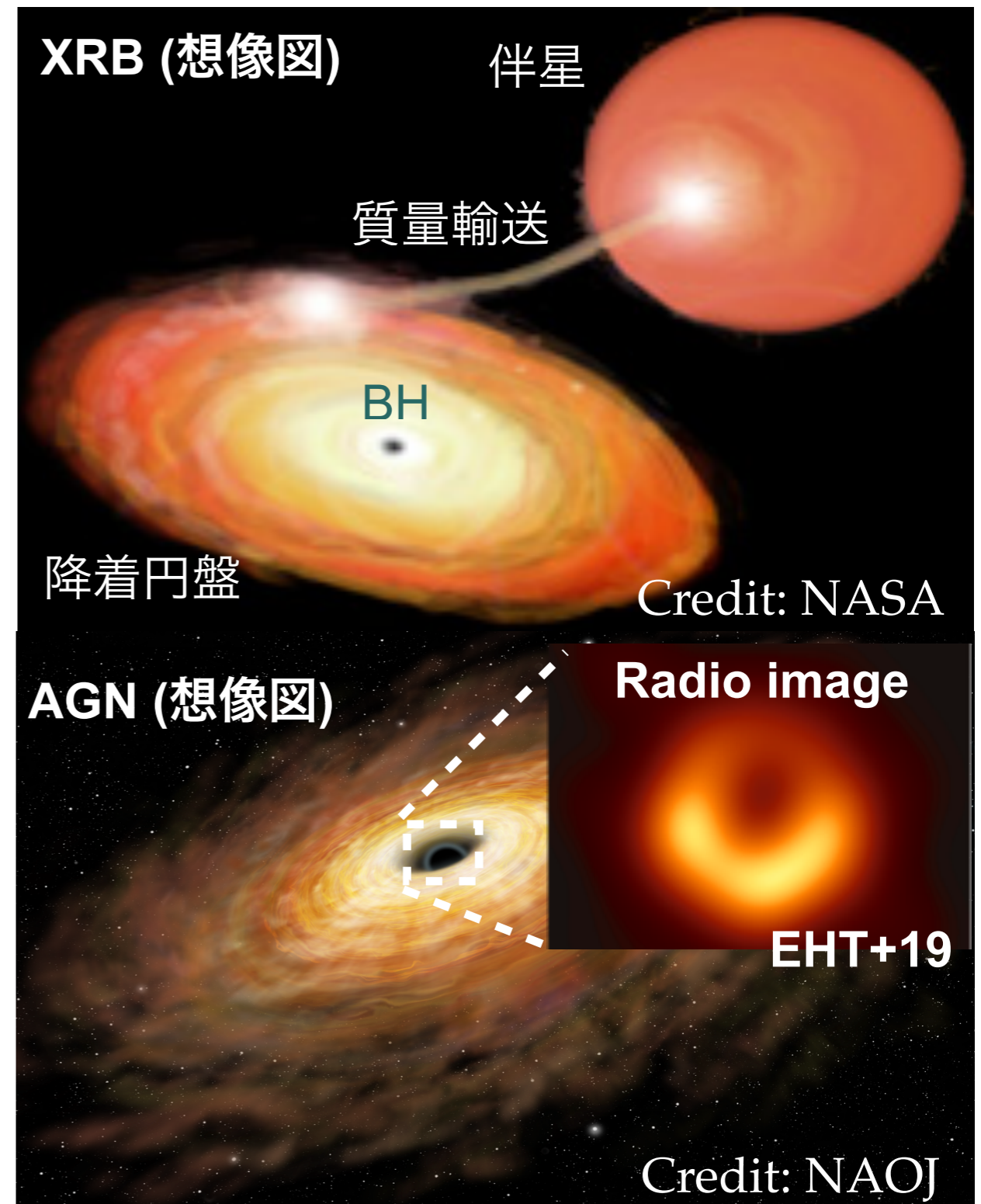
円盤風駆動機構の解明に むけたX線スペクトルモデル 構築のためのフレームワーク

都丸 亮太 (東京大学, IPMU)

Chris Done, 大須賀 健,
小高 裕和, 野村 真理子,
高橋 忠幸

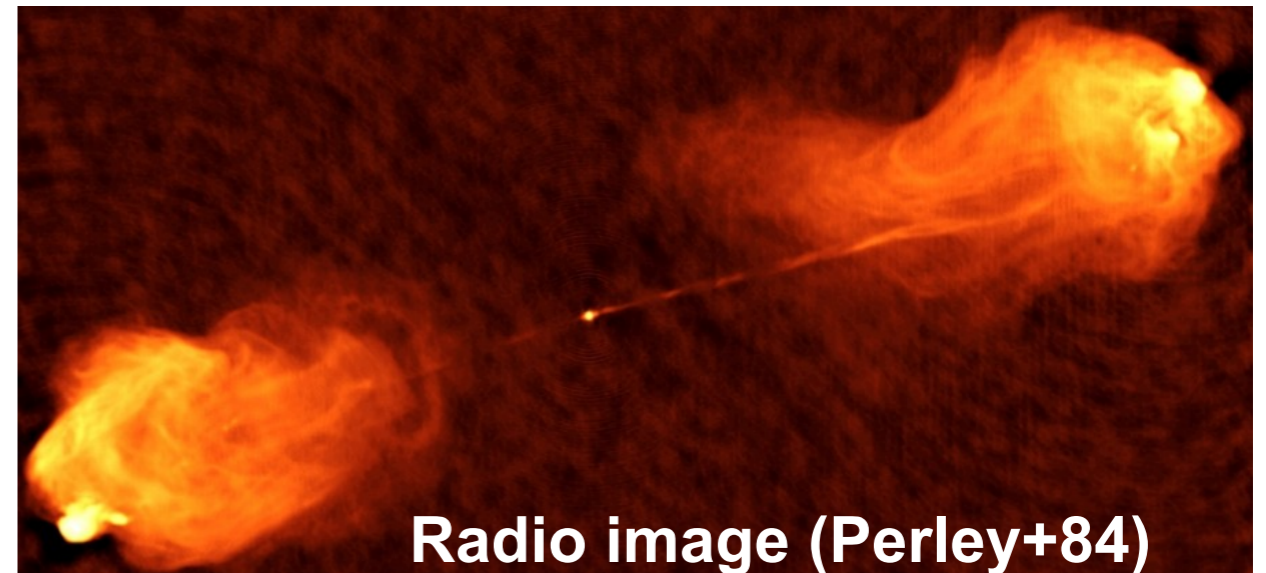
ブラックホールからの電磁放射

1. 恒星質量ブラックホール
(X線連星: XRB)
 $\sim 10 M_{\odot}$
 2. 超巨大ブラックホール
(活動銀河核: AGN)
 $\sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$
- ❖ 降着円盤を形成
ガスの重力エネルギー
→熱エネルギー→放射
放射への変換効率は最大
(核融合より高効率)
強重力, 強放射の極限環境を提供



アウトフロー

- ❖ ブラックホールからアウトフロー
→質量とエネルギーを輸送
→降着環境, 宇宙全体に影響
- ❖ アウトフローはどのように駆動するのか？
 - ❖ ジェット → 磁場
 - ❖ 円盤風 (disk wind, 本研究)
 - ガス圧勾配力 (熱駆動)
 - 放射力 (放射駆動)
 - 磁気力 (磁気駆動)



本研究では, 恒星質量ブラックホール (X線連星)の円盤風について取り扱う

円盤風とデータ解析

近年の高分解X線分光によって吸収線の青方偏移が測れるようになった

❖ ガウシアンによるフィッティング

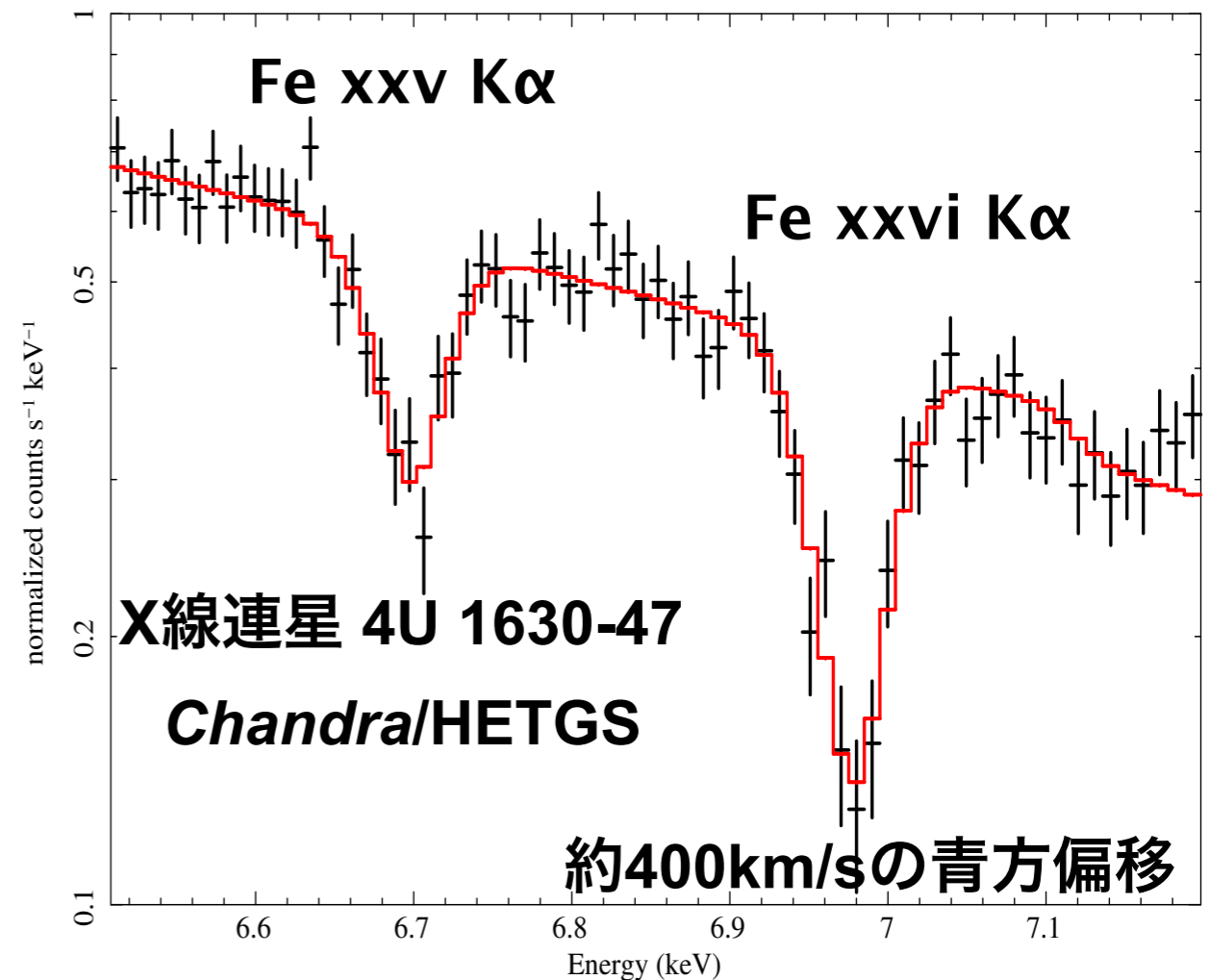
1. 深さ→柱密度 ($N_i = \int n_i dr$)

2. 青方偏移→速度

3. 幅→速度分散 (乱流)

4. N_{i+1}/N_i → 電離状態

→ 質量損失率や、噴出位置を推定



なぜそのような吸収体が存在するのかという疑問に答えられない

→ 具体的な駆動機構を考慮したモデルを開発し観測データを解析

(密度, 速度分布を計算しさらにそこからの輝線吸収線構造を計算)

熱駆動 (Begelman + 83)

X線照射により円盤が加熱され円盤風が発生 → X線連星で働く可能性

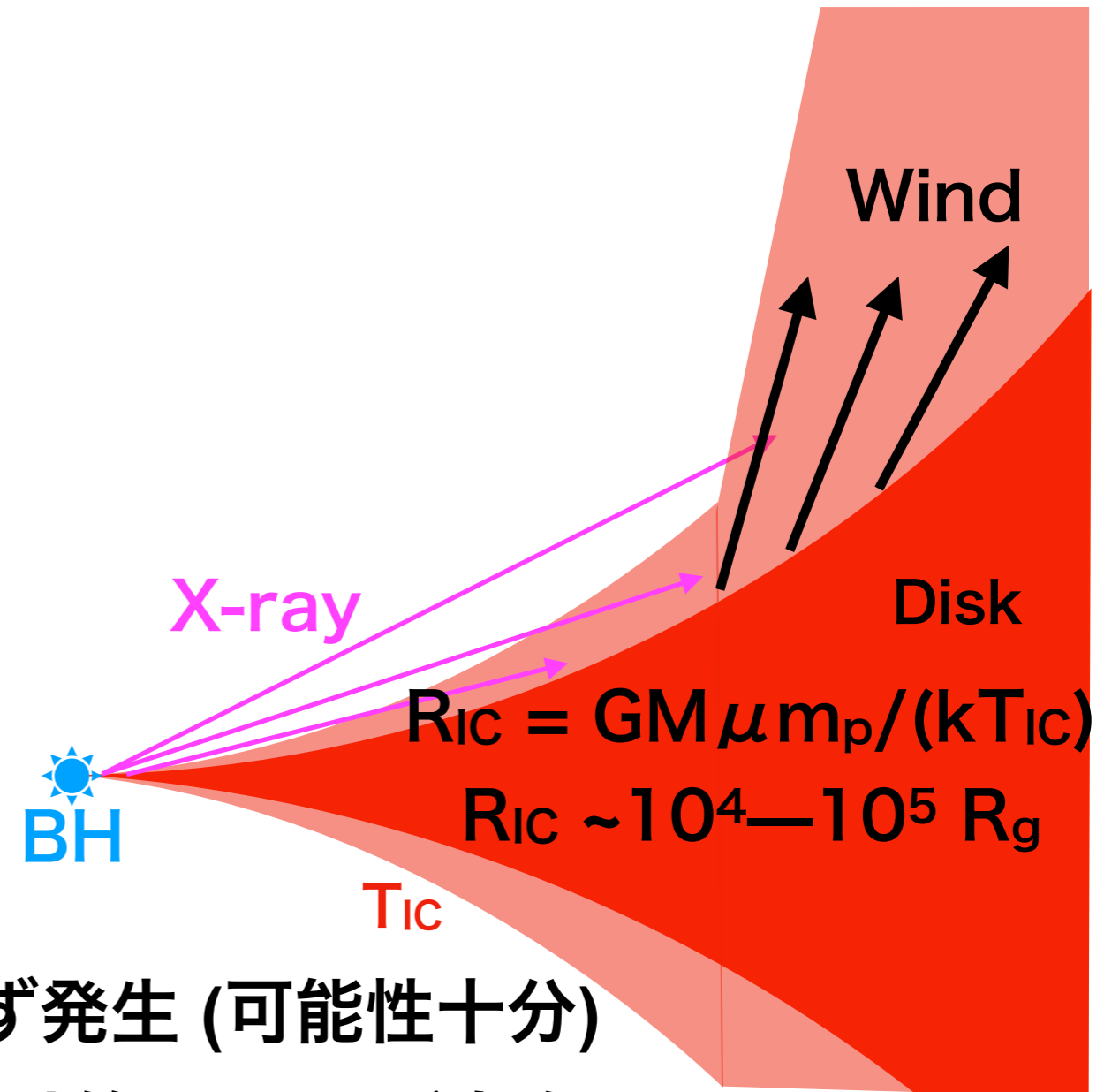
❖ 円盤表面温度

$$T_{\text{IC}} = \frac{\int E F_E(E) dE}{4k \int F_E(E) dE} \sim 10^{7-8} \text{ K}$$

$$R > GM\mu m_p / (kT_{\text{IC}}) = R_{\text{IC}}$$

(ガスエネルギー > 重力)

❖ T_{IC} や加熱冷却はX線SEDに依存



円盤が十分大きければ必ず発生 (可能性十分)

→ 観測との直接比較可能なモデル(計算コード)が存在しない。

モデル開発にはSEDによる加熱冷却の変化を考慮する必要性がある

フレームワーク

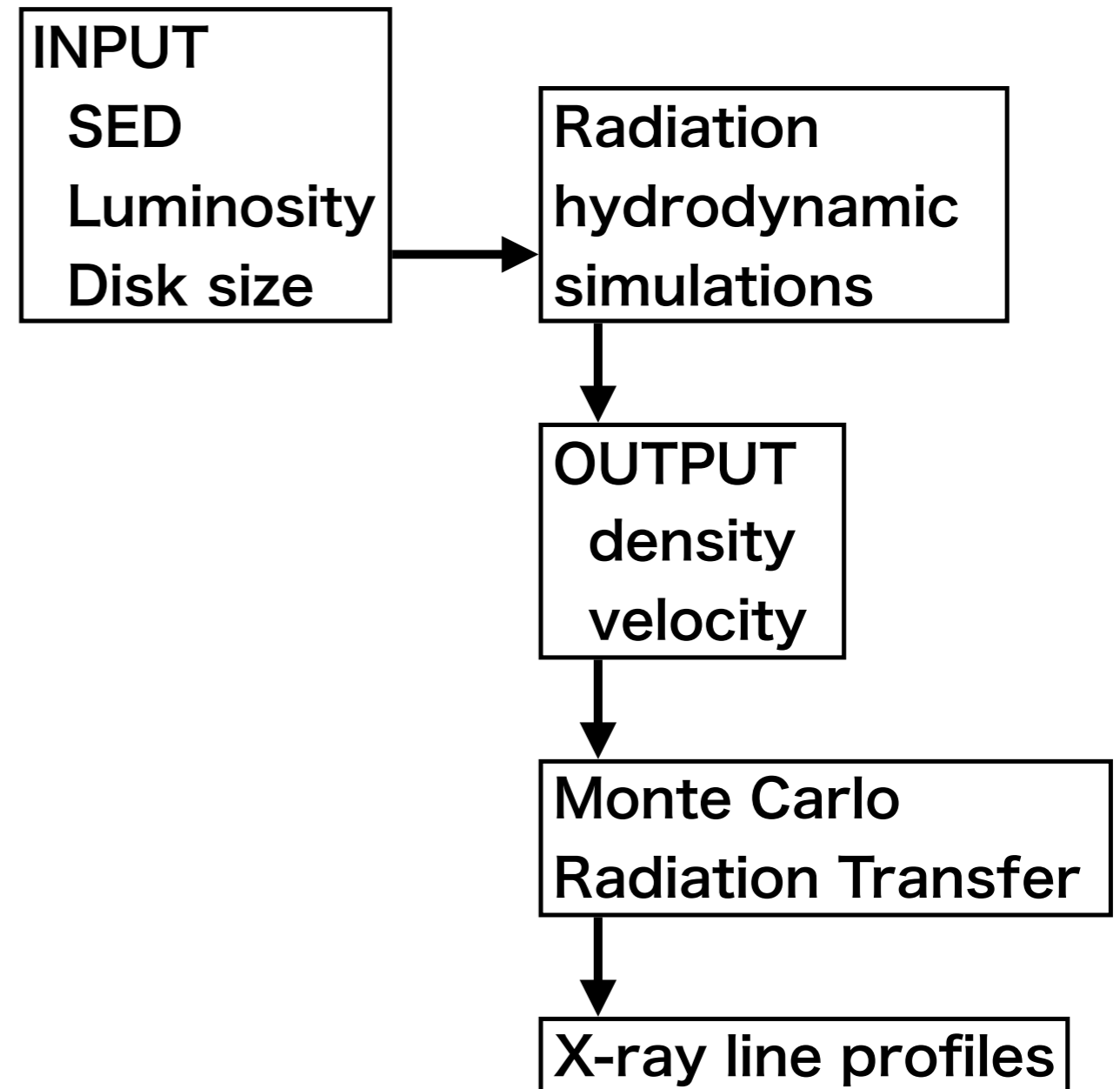
放射流体，放射輸送を通して観測と比較可能なスペクトルモデルを構築

❖ モデル構築

1. SEDから加熱冷却，放射力の関数を作成
2. 円盤風の密度，速度分布を放射流体シミュレーションで計算
3. 得られた密度，速度分布を持つ円盤風内部で作れる輝線吸収線構造をモンテカルロ放射輸送コードで計算

❖ 観測との比較

Chandra/HETGS

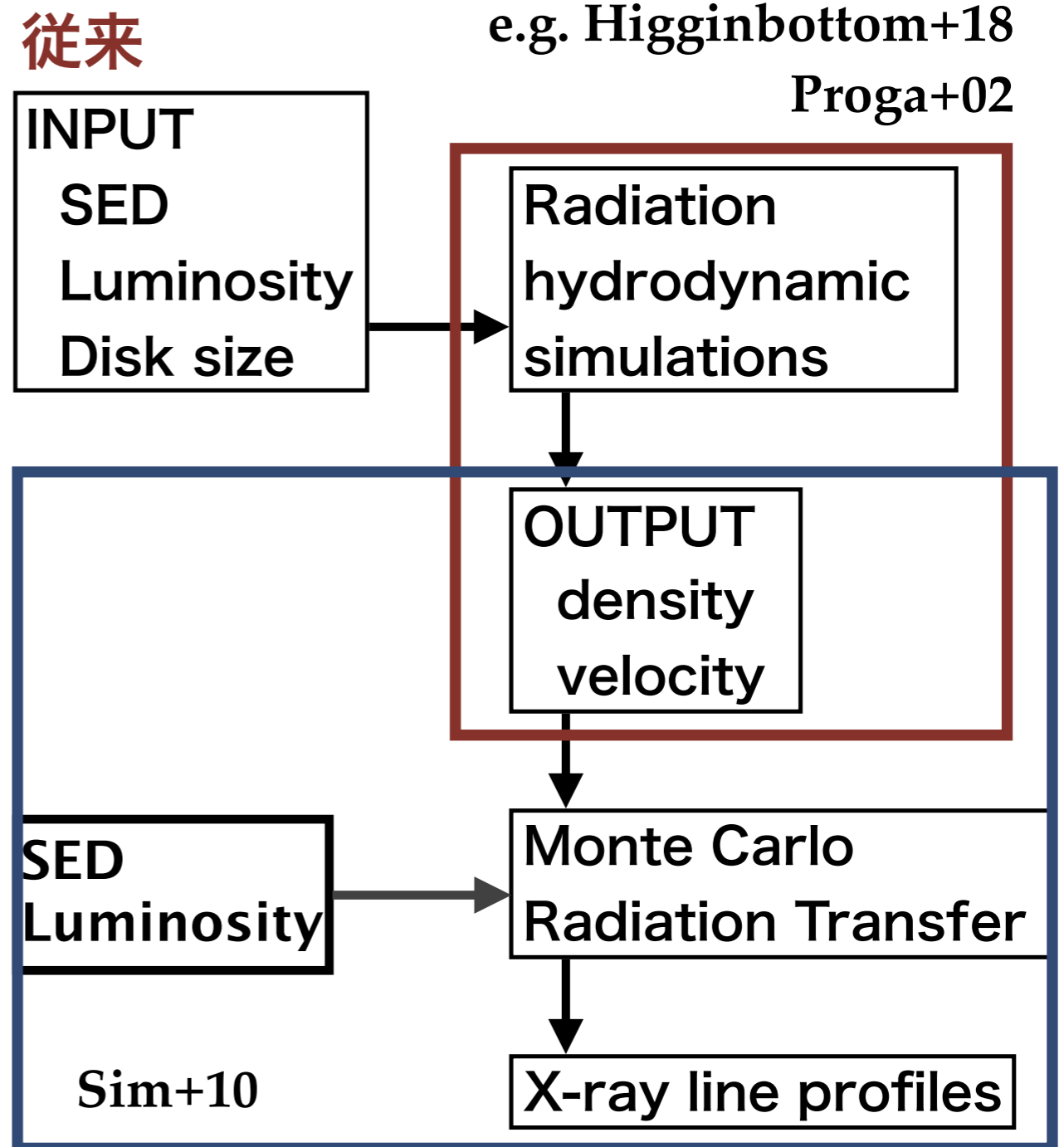


従来との違い

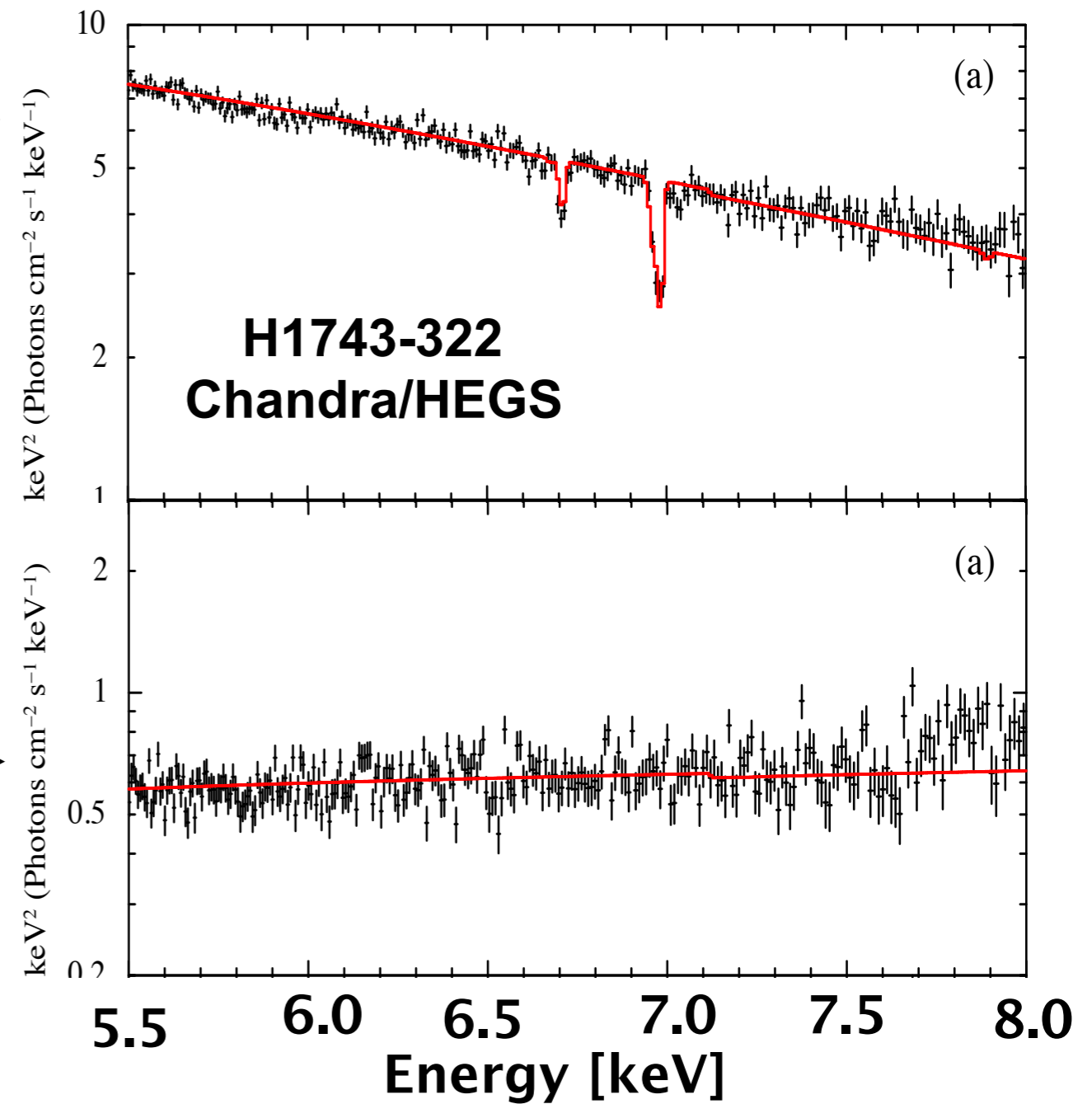
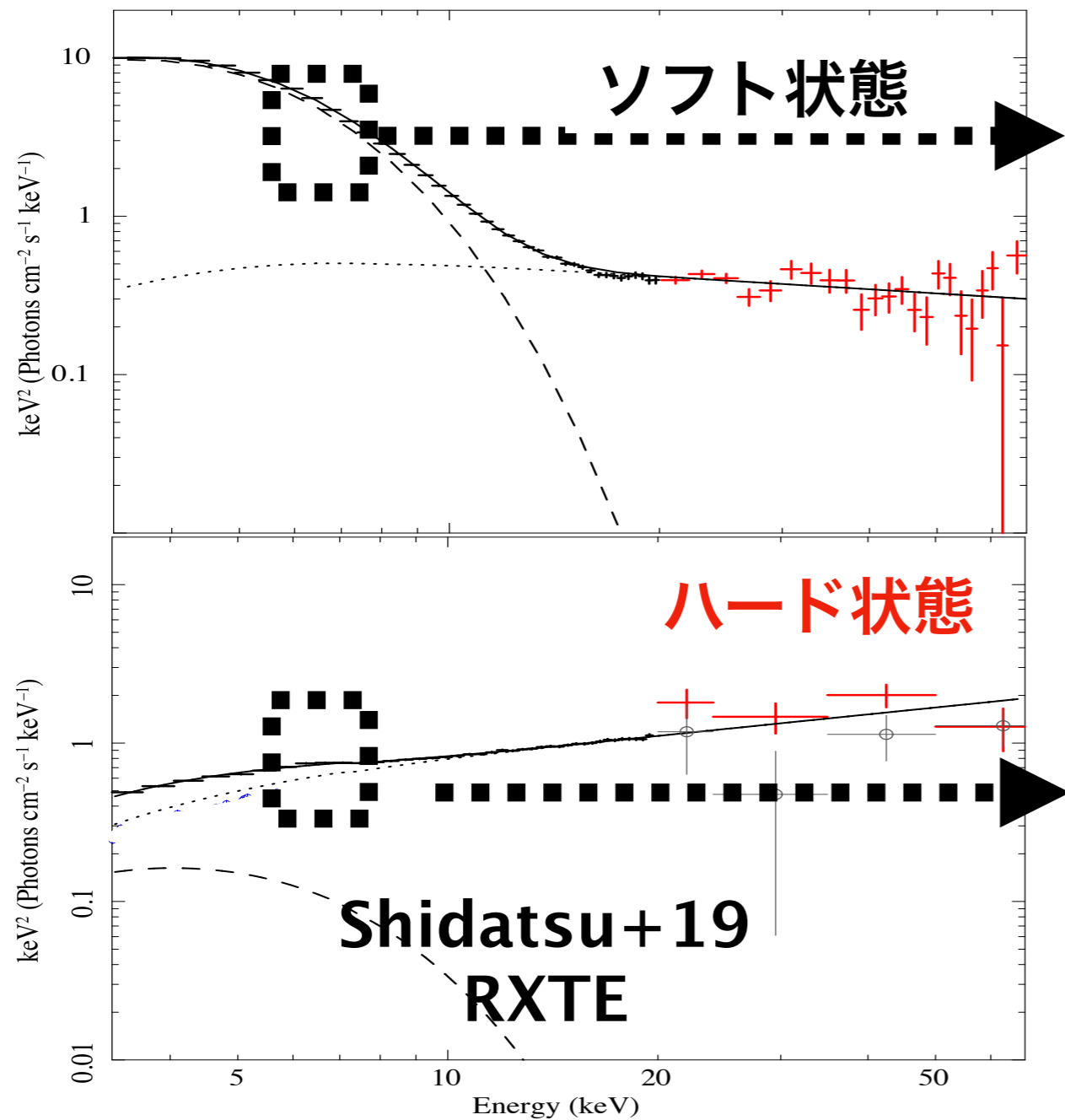
- ❖ これまでは、スペクトルモデルと流体シミュレーションが切り離されていた。

加熱冷却，放射力，円盤風の密度，速度分布，そこで作れる輝線吸収線構造を一貫して計算できていない。

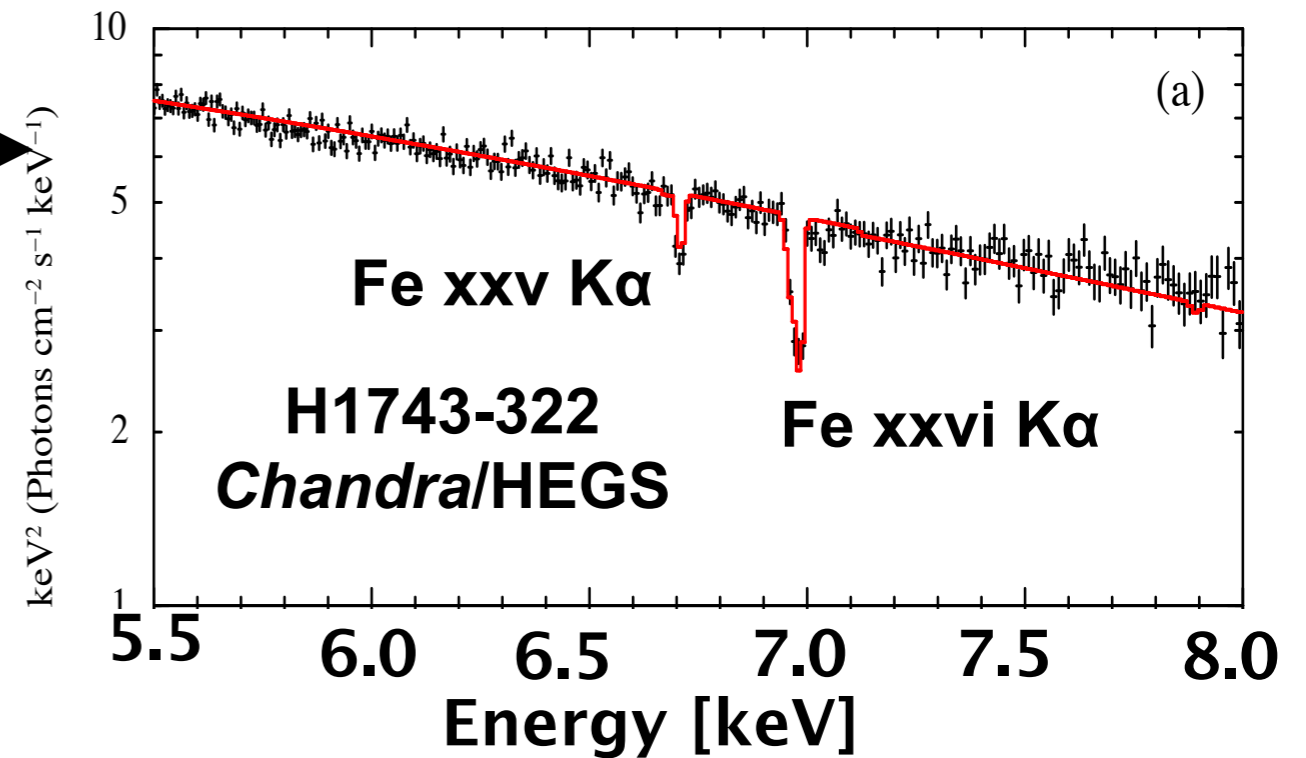
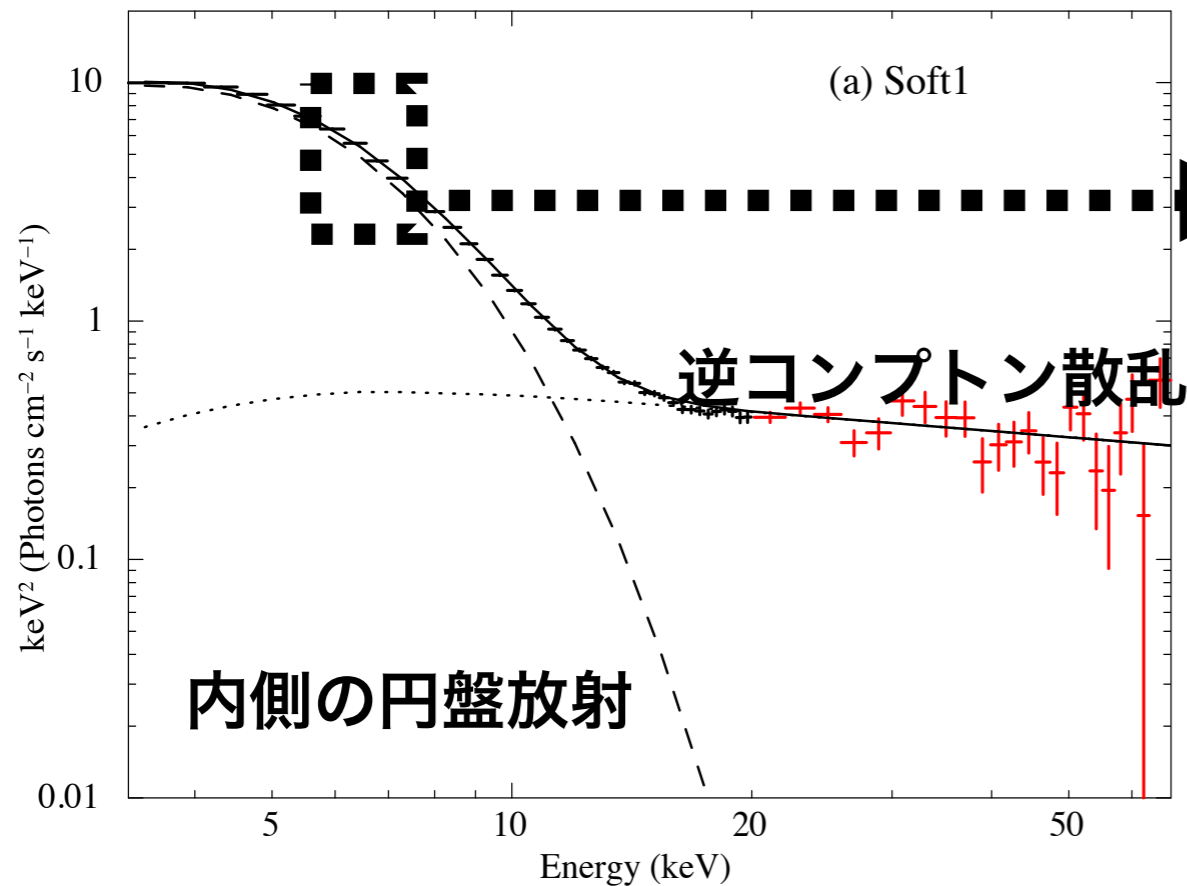
→コンシストな計算ができていない。



観測ターゲット H1743-322

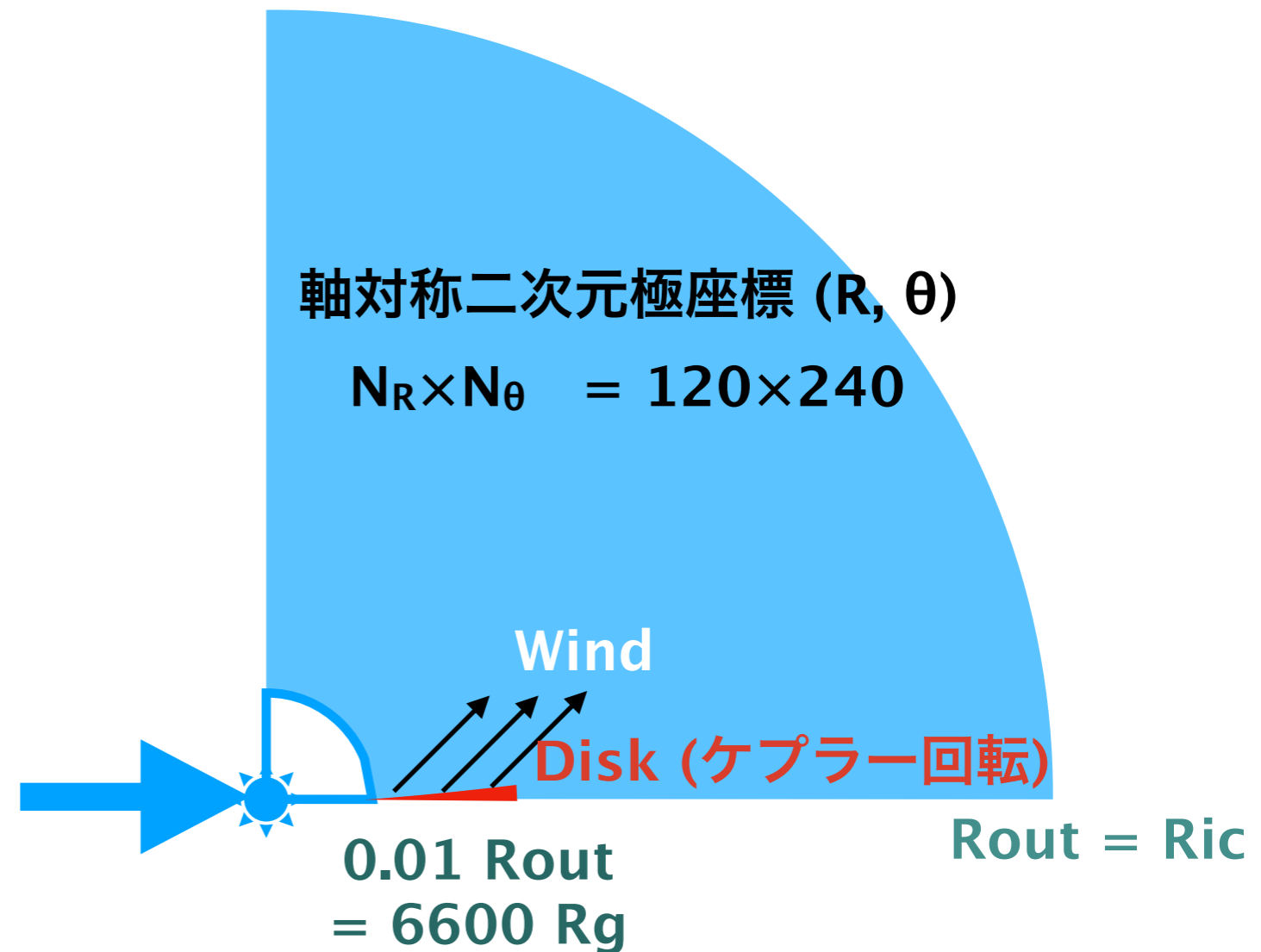
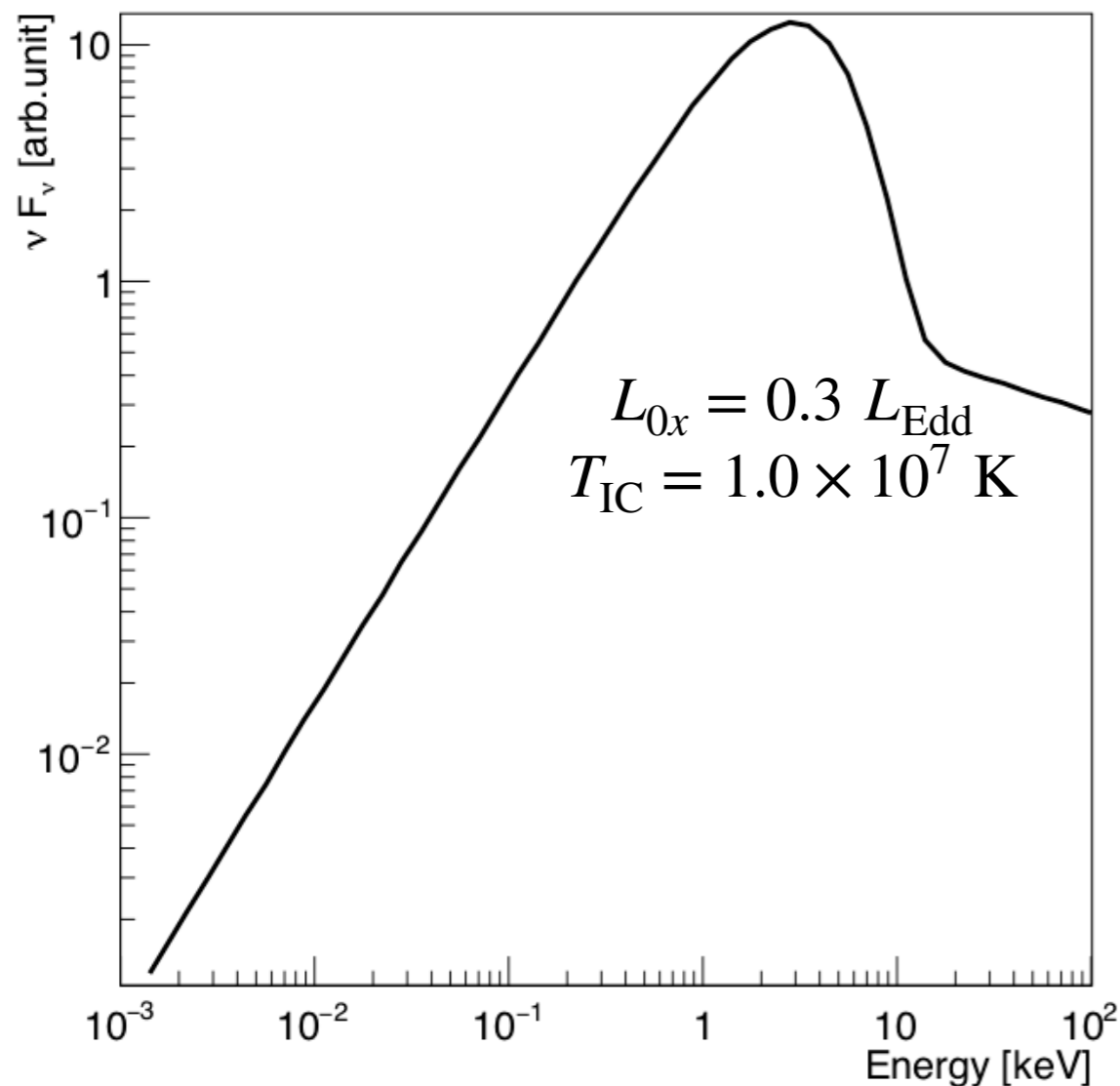


ターゲット天体 H1743-322



- ❖ 典型的なBH X線連星
- ❖ 円盤からの黒体放射が主体な状態で吸収線が検出
- ❖ 観測されるX線連続スペクトル (SED)を使用しモデル構築

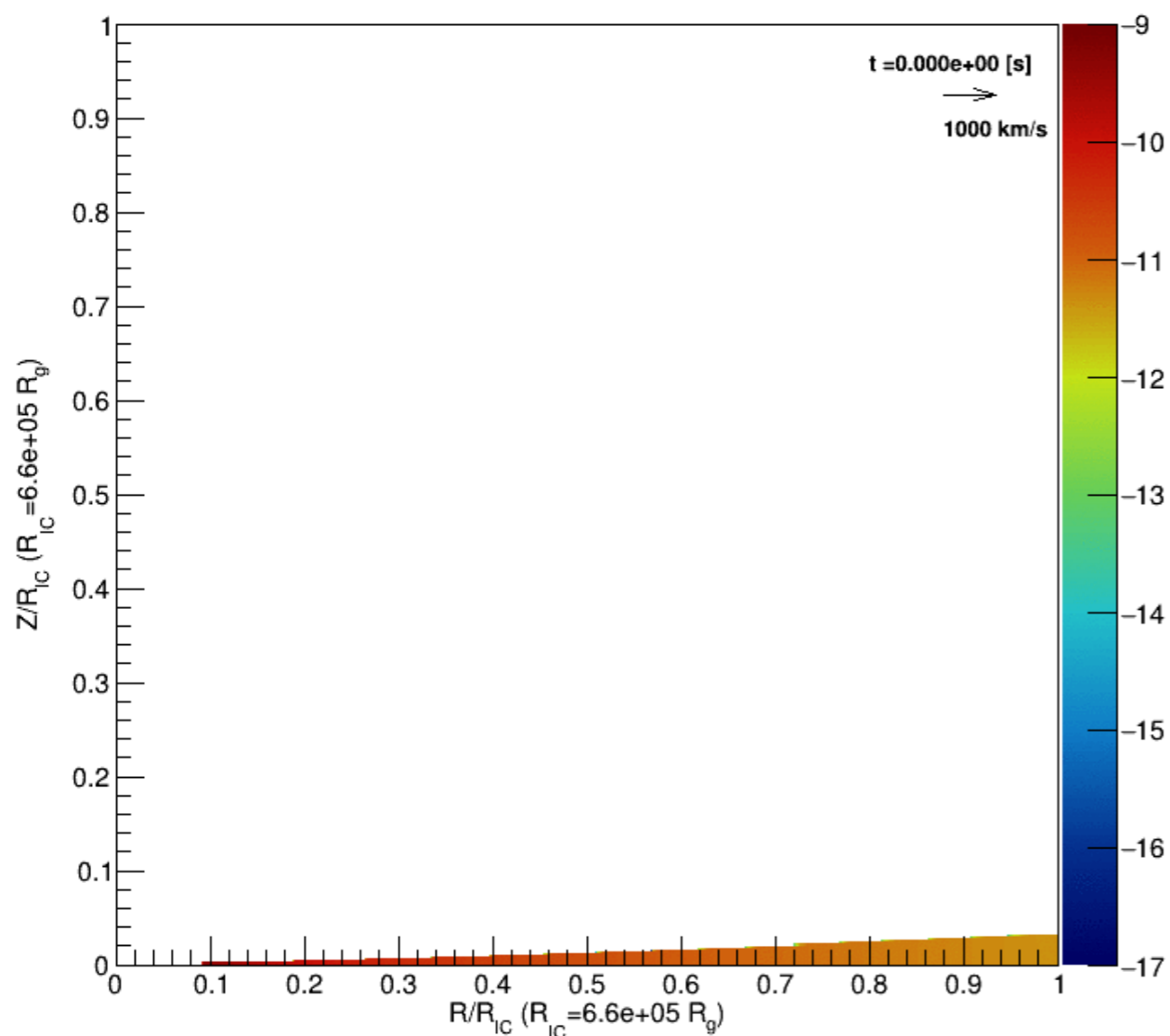
放射流体シミュレーション



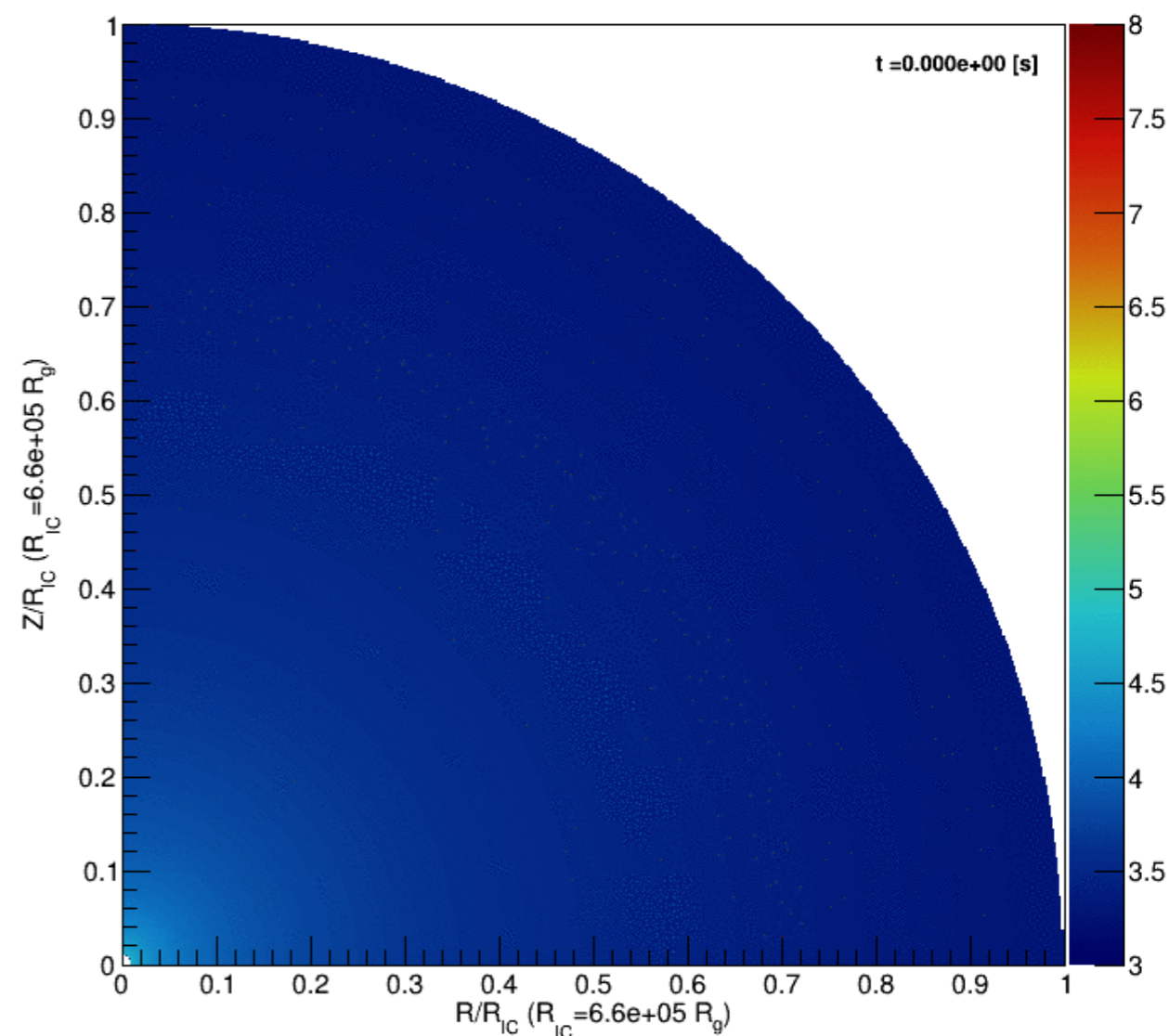
- ❖ 放射加熱冷却率, 放射力と放射の減光を計算するコードを独自開発し, 流体コード (Takahashi & Ohsuga 13)に組込む
- ❖ 計算はスーパーコンピュータ (XC50@NAOJ)

シミュレーション結果

Log ρ [g cm⁻³]



Log T [K]



- ❖ 密度, 速度, 温度分布を計算
→放射輸送シミュレーションへ

モンテカルロ放射輸送 (MCRT)

❖ 3次元MCRTコード

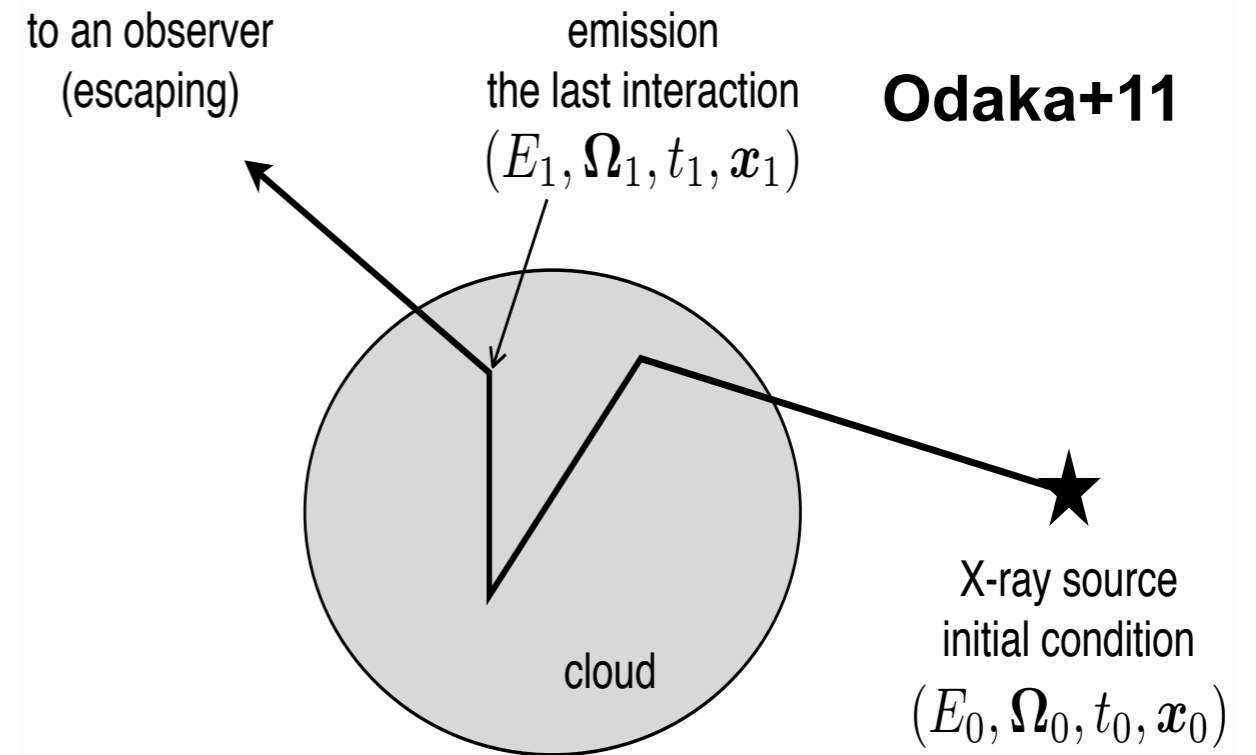
(MONACO, Odaka+11)

媒質中の光子の伝搬を計算

散乱, 吸収, 再放出

(Line shift and broadening)

輝線吸収線を自己矛盾なく計算

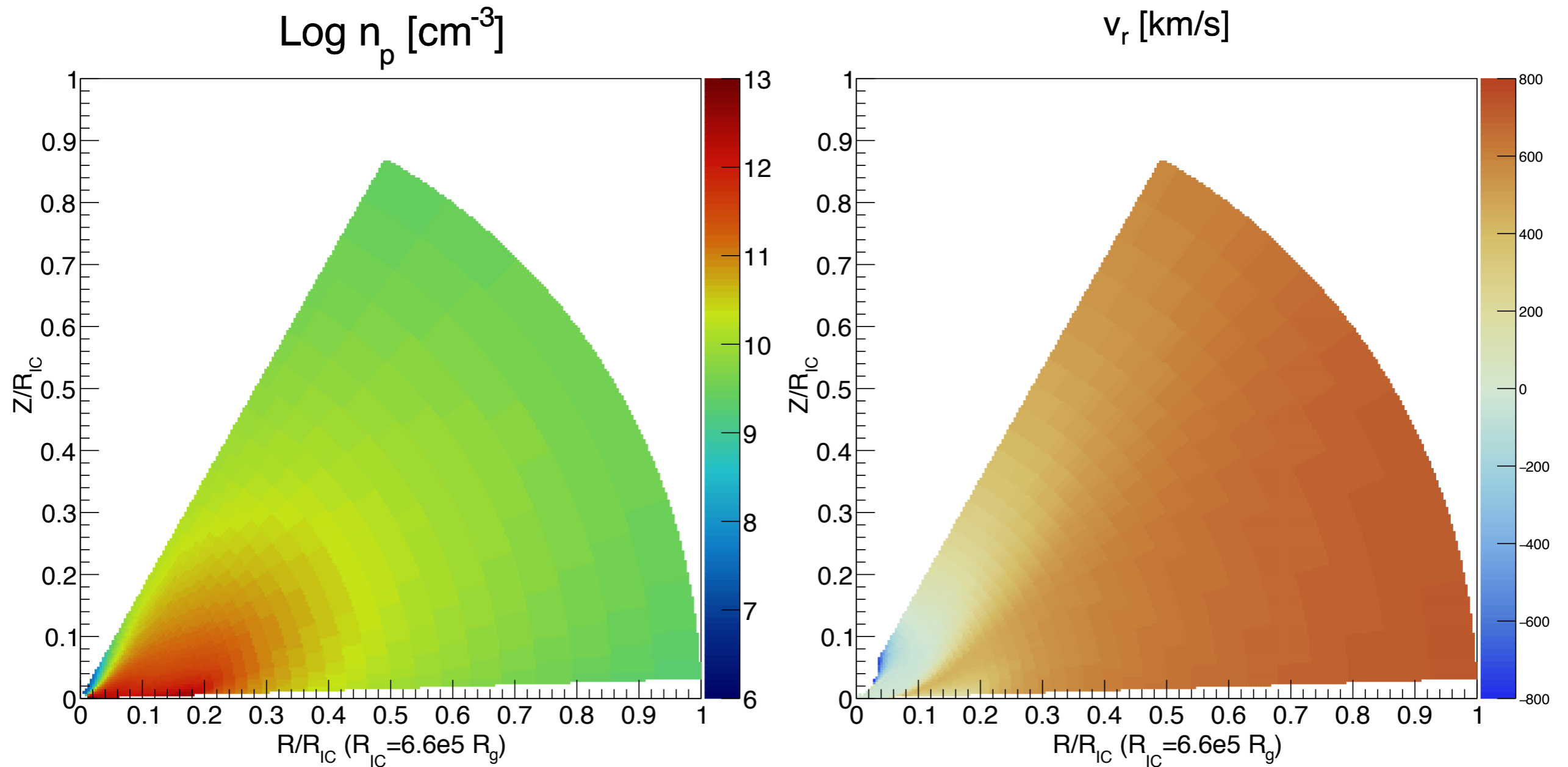


入力: 幾何構造, 密度/速度/イオン/乱流分布, 入カスペクトル

出力: 光子エネルギー, 方向, 反応位置, 時間

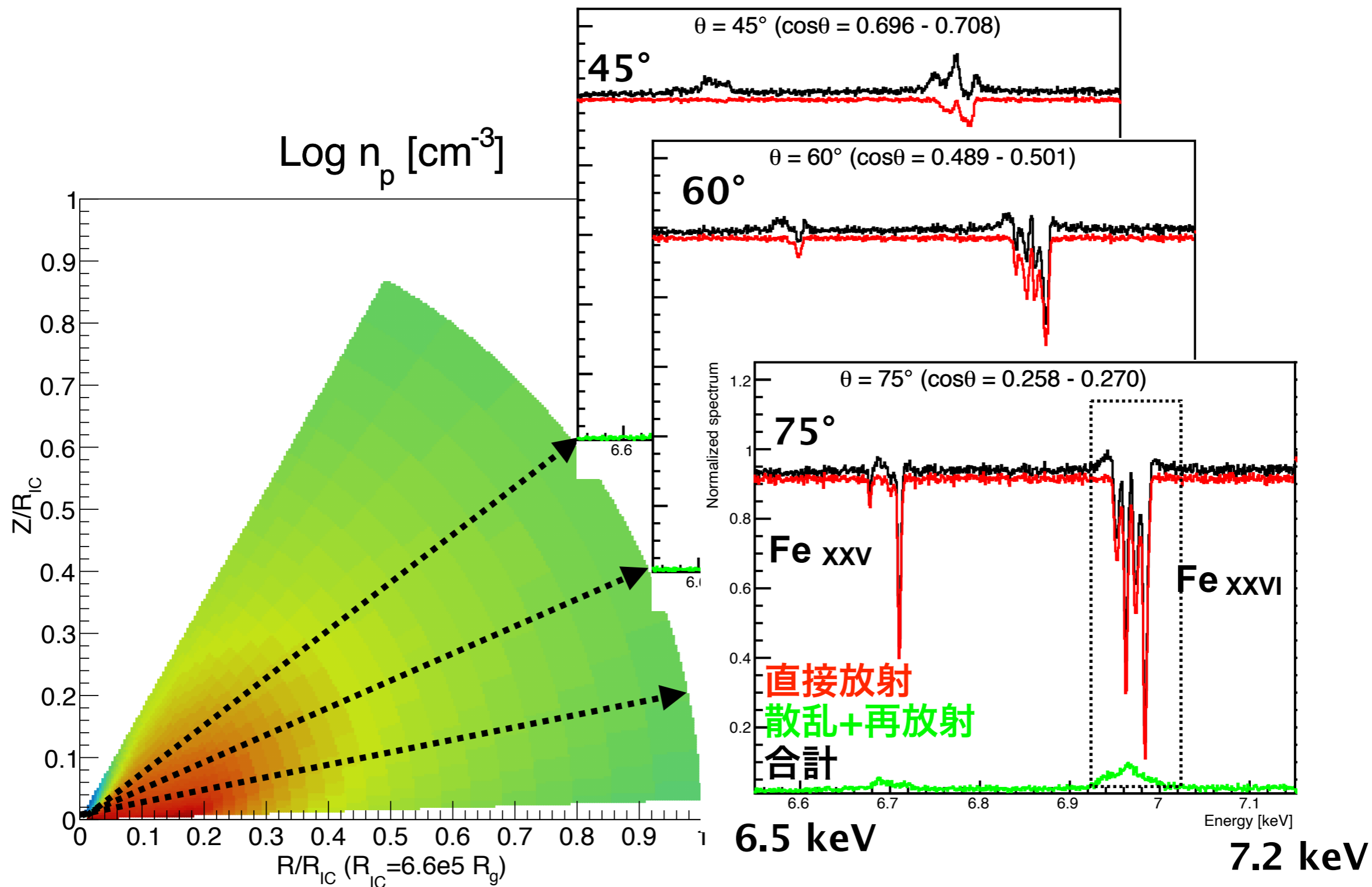
解析することでスペクトルを生成

密度, 速度分布

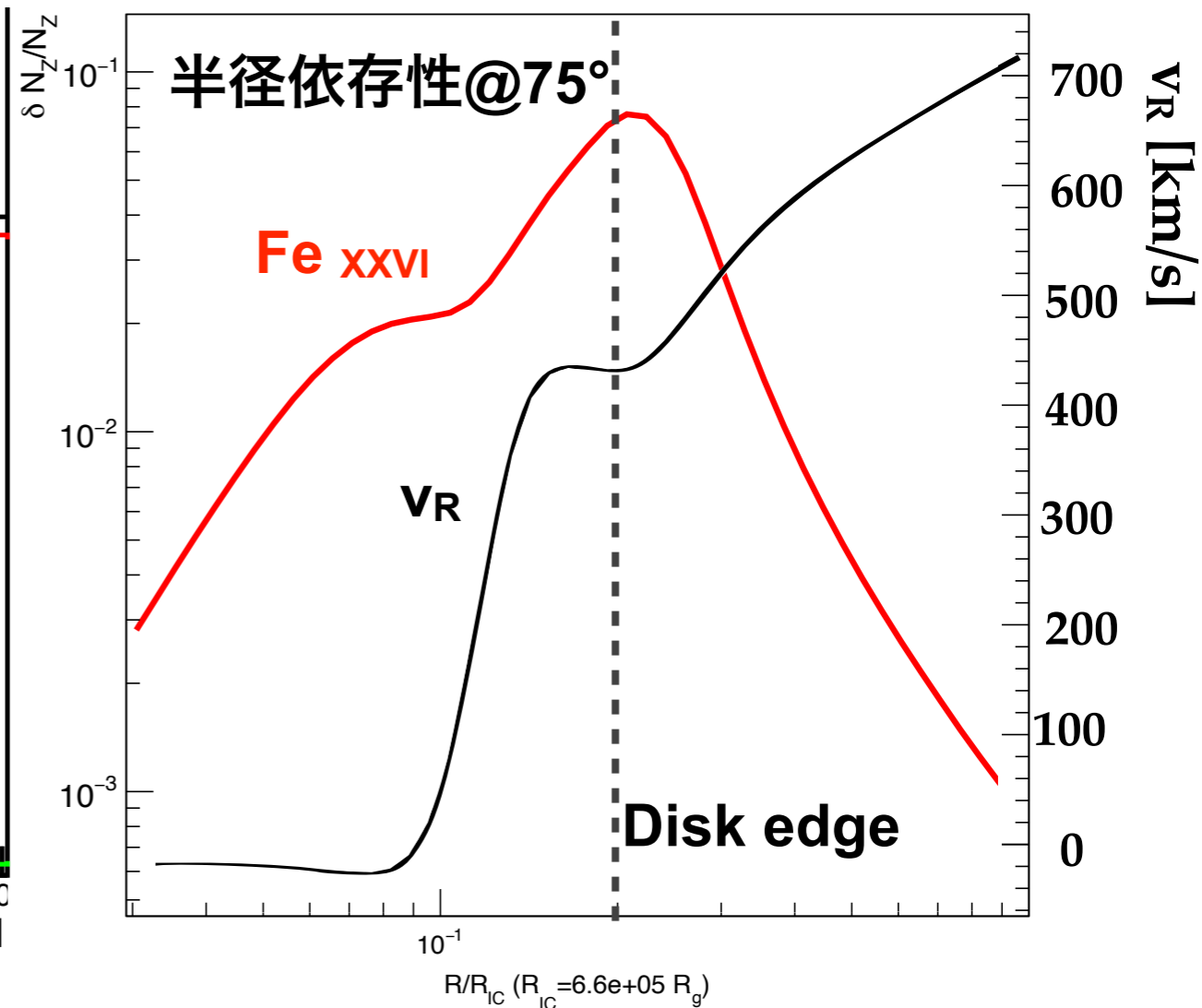
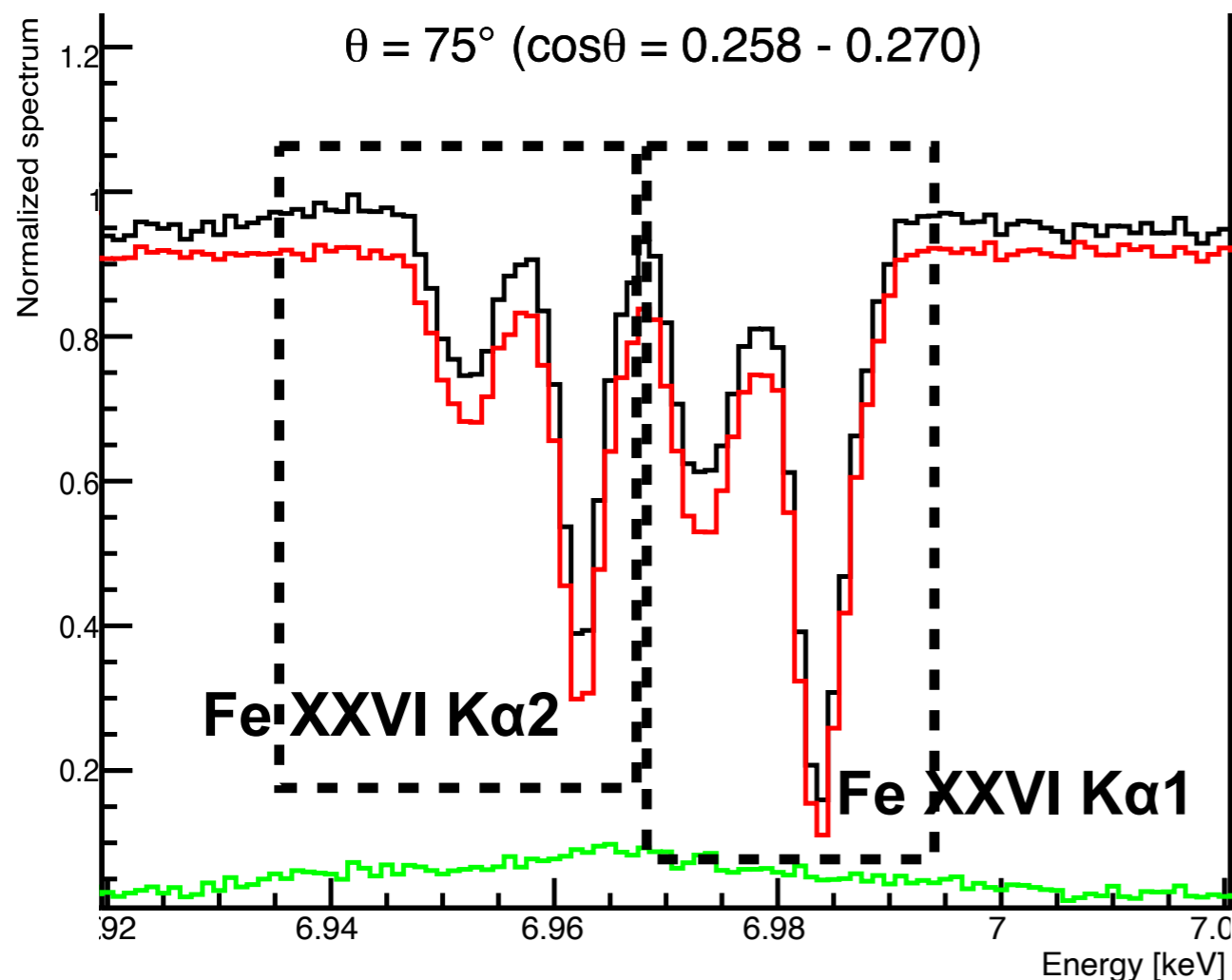


- ❖ 流体シミュレーションの一部を抜きとり使用
- ❖ 原点から光子を発生

モンテカルロ放射輸送



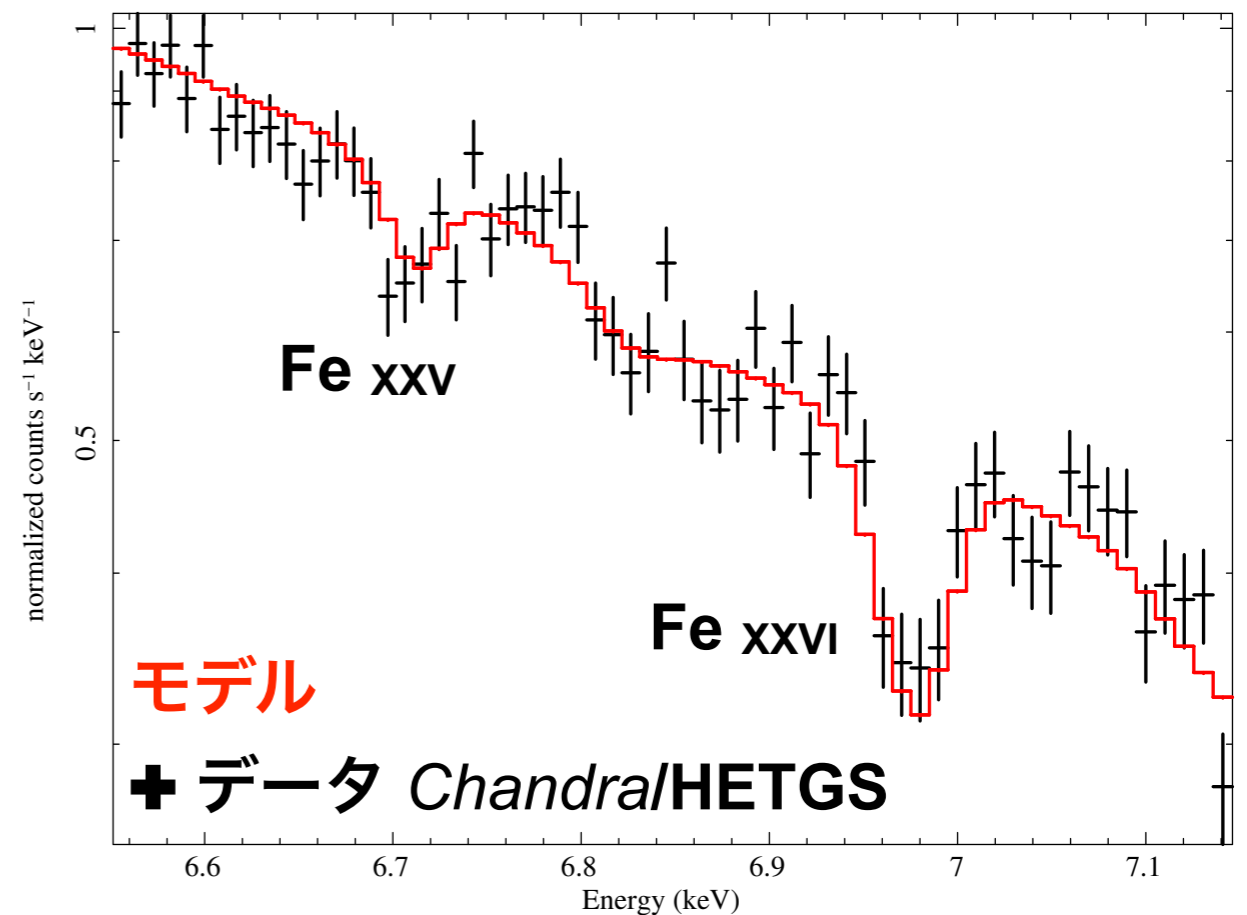
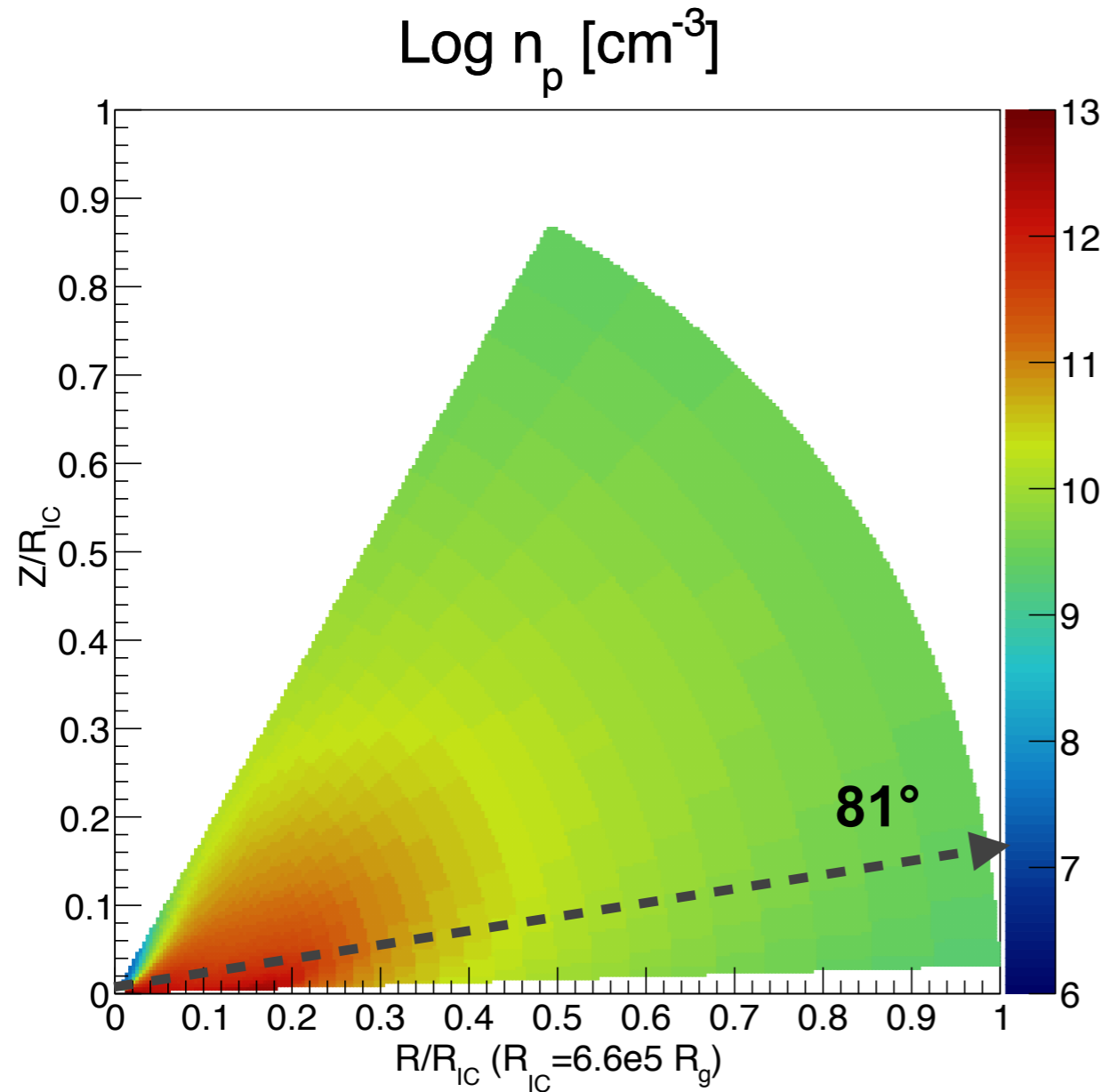
吸収線構造



- ❖ 内側にある静的な円盤大気 (コロナ)による吸収線
- ❖ 外側にある円盤風による青方偏移した吸収線

流体シミュレーションから計算することはじめて見られる構造

観測との比較

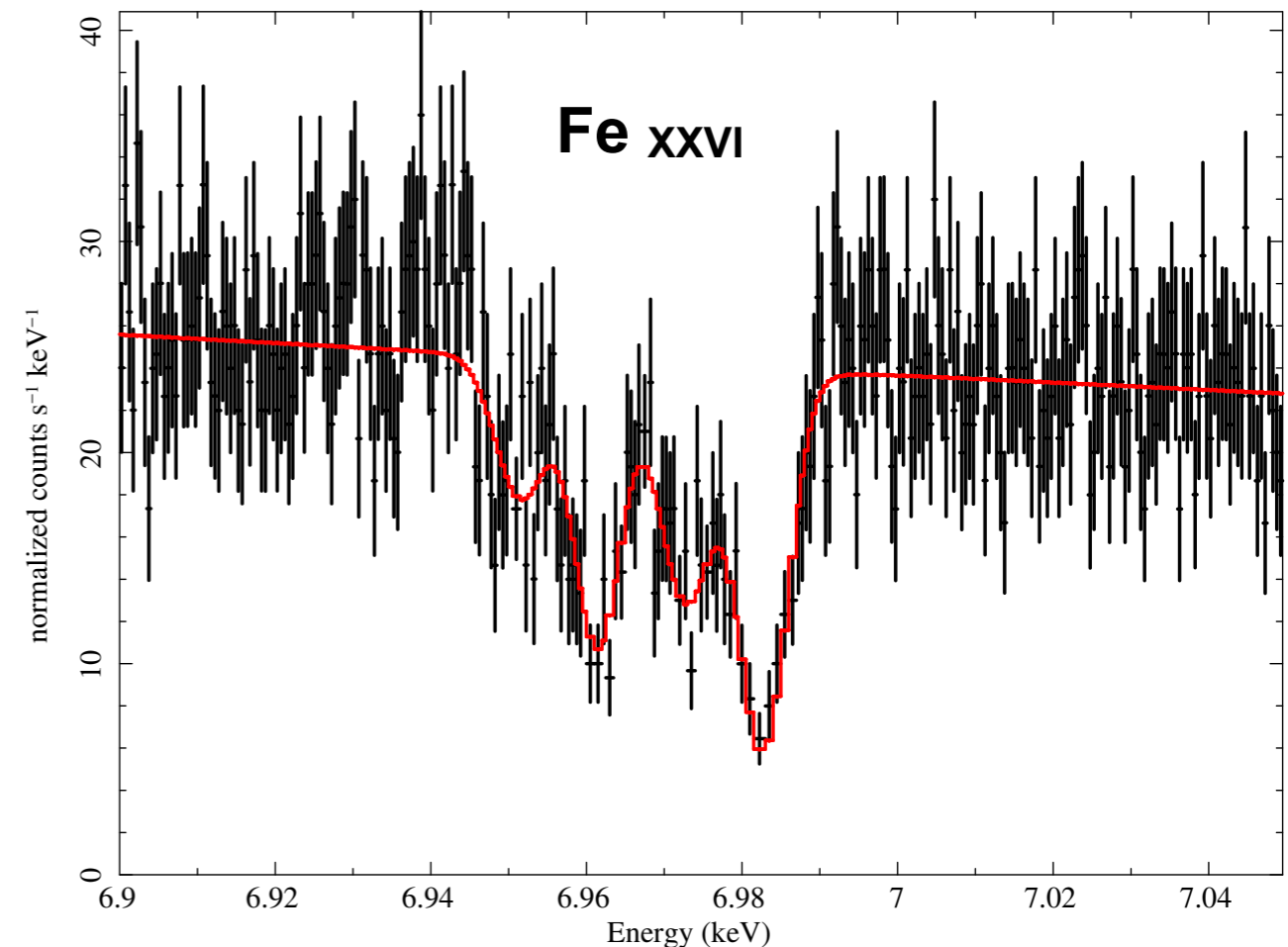


- ❖ 観測データを良く説明→熱駆動型円盤風で説明可能
- ❖ 特徴的な二股の吸収線構造は分解不可 ($K\alpha_{1,2}$ も分解不可)

XRISMへの期待



- ❖ 次期X線天文衛星XRISM
 - ❖ 2022年打ち上げ予定
 - ❖ エネルギー分解能 5—7 eV
- ❖ 速度差を分解可能
 - このモデルの予言を検証可能
 - 他のモデルとの区別が可能



将来の観測を予言するための重要なモデルを提供

まとめ

- ❖ X線連星の円盤風駆動機構を明らかにするため、放射流体シミュレーションとモンテカルロ放射輸送を組み合わせたシミュレーションフレームワークを開発。
- ❖ X線連星 H1743-322の観測データに適用することで、この天体に見られる吸収線の起源が熱駆動で説明できることが明らかになった。
- ❖ 将来のXRISM衛星にとって重要なモデルを構築することができた。