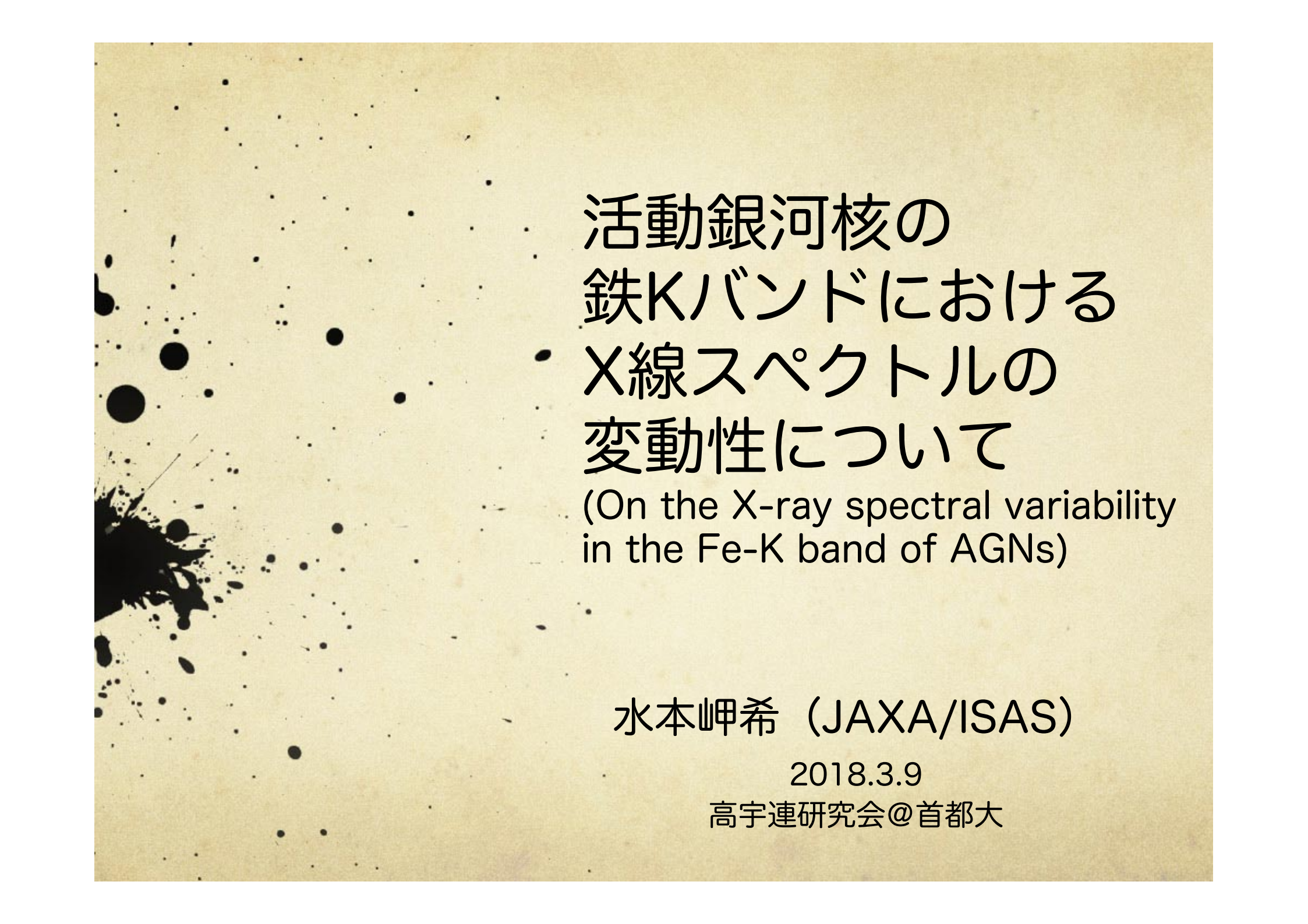




活動銀河核の 鉄Kバンドにおける X線スペクトルの 変動性について

(On the X-ray spectral variability
in the Fe-K band of AGNs)

水本岬希 (JAXA/ISAS)

2018.3.9

高宇連研究会@首都大

目次 (兼イントロダクション)

1. Introduction
 - ・ 活動銀河核X線スペクトルの「広がった鉄K輝線構造」
2. Review
 - ・ 鉄Kバンドを説明するいくつかのシナリオ
3. Purpose of this thesis
 - ・ 時間変動に着目してシナリオの妥当性を検証する
4. Disc-reflection scenario (円盤反射シナリオ)
 - ・ 円盤反射によって鉄Kバンドを説明するシナリオ
5. Cloud-reflection scenario (クラウド反射シナリオ)
 - ・ 吸収体、散乱体によって鉄Kバンドを説明するシナリオ
6. Discussion
7. Conclusion

活動銀河核の広がった鉄K輝線

中性&静止した散乱体に
X線光子が入射
→ 6.4 keVに細い鉄輝線

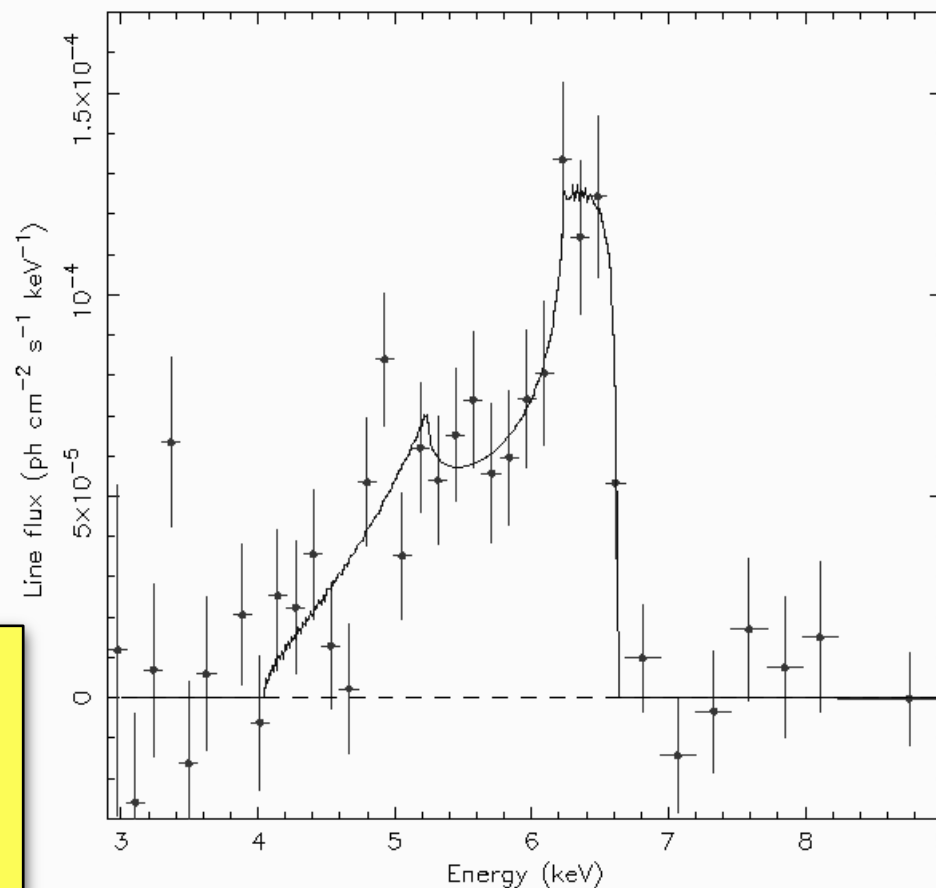
活動銀河核の多くでは
「広がった鉄輝線構造」が
見られる

様々なモデルが提唱されている

- 相対論的円盤反射モデル
- 部分吸収モデル
- アウトフロー吸収線モデル
- 複数の連続成分モデル etc.

(Tanaka+95)

MCG-6-30-15

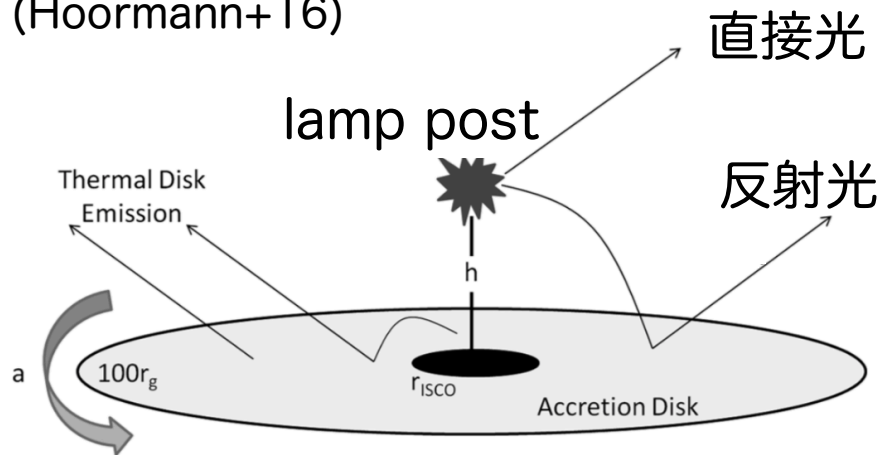


相対論的円盤反射モデル

非常に小さい光源 (lamp post) が
円盤の最内縁を照らす

ほぼ最大限のスピンを仮定

(Hoormann+16)

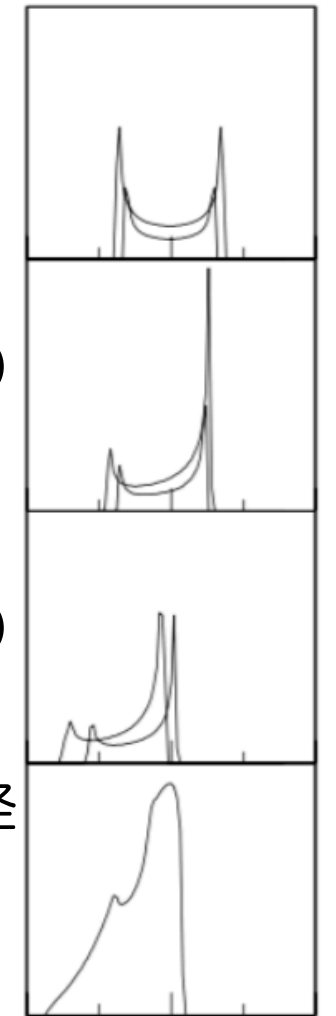


円盤の回転

ビーミング
(特殊相対論)

重力赤方偏移
(一般相対論)

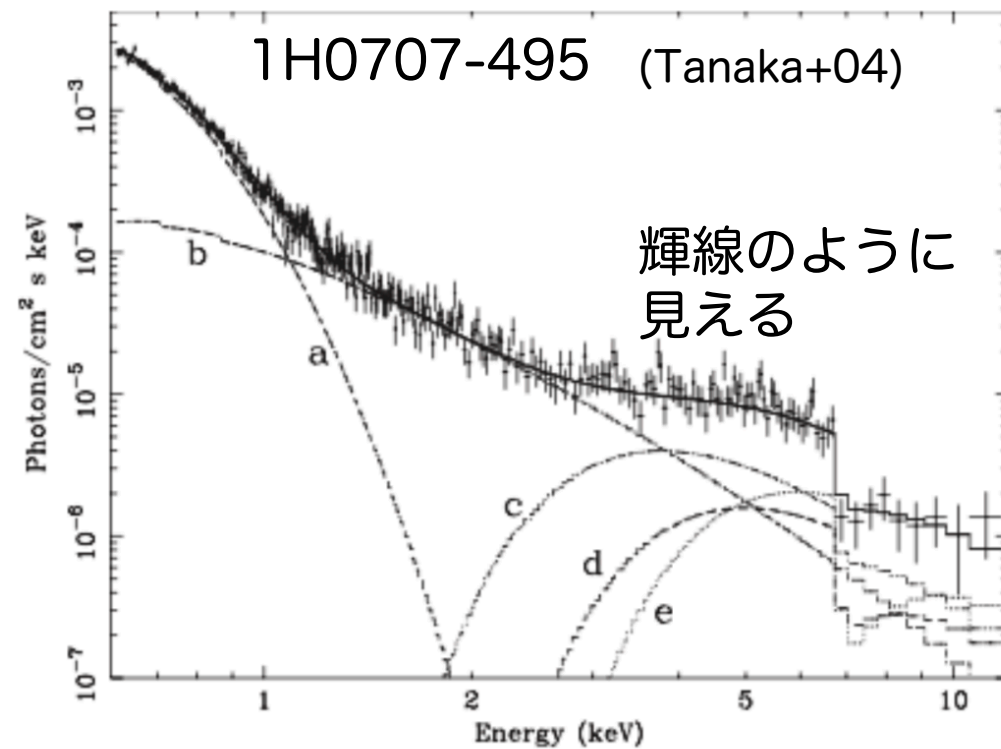
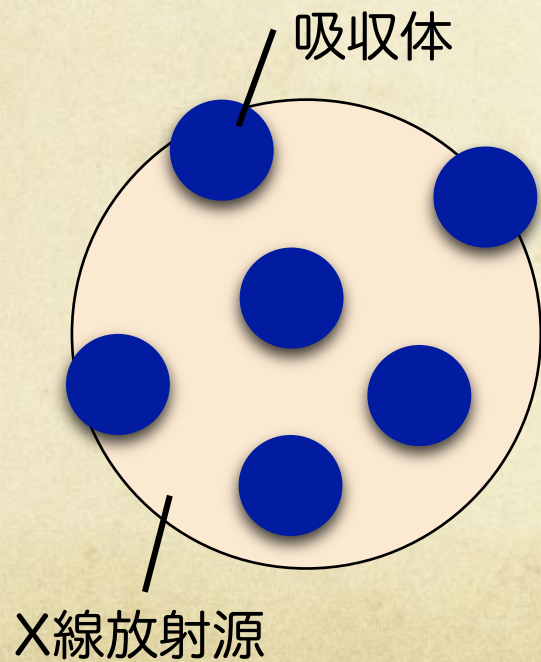
さまざまな半径
で足し合わせ



(Fabian+00)

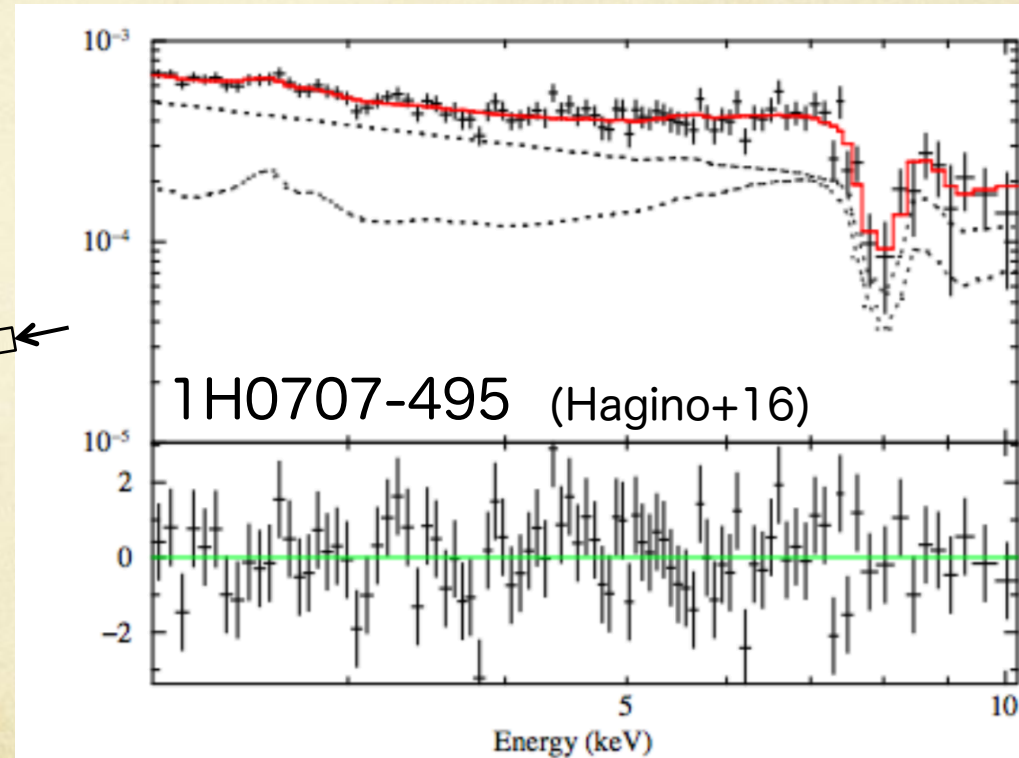
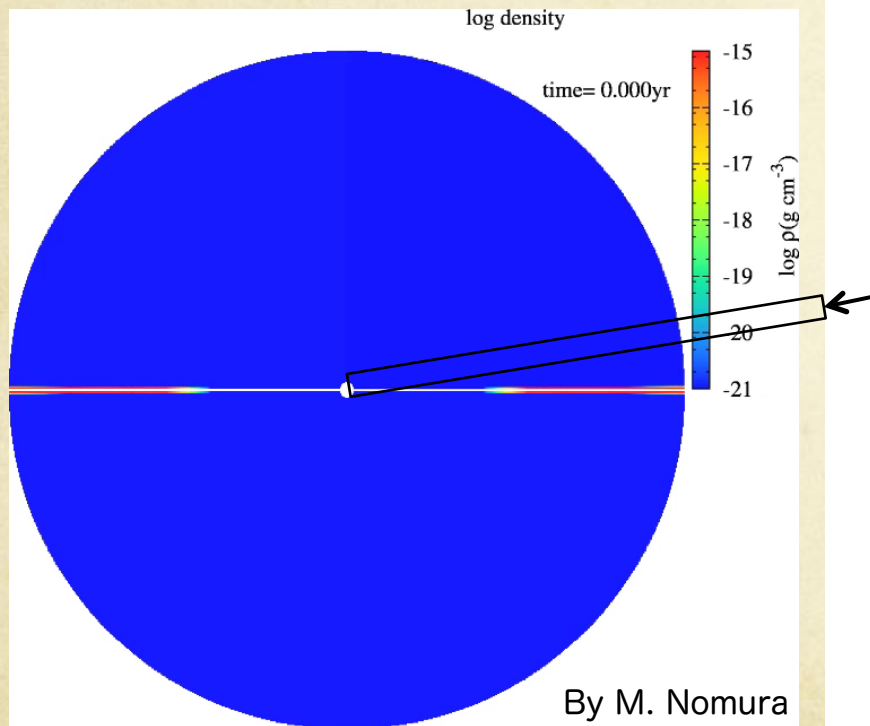
部分吸収モデル

- 輝線ではなく吸収エッジ
- 冷たい吸収体が部分的に光源を覆い隠す



アウトフロー吸収線モデル

超高速アウトフローが深くて広い吸収線を作る
(UltraFast Outflow; UFO)



モデルを切り分けるには

- 「広がった鉄輝線」のスペクトルは、複数のモデルで説明可能
- モデルの縮退が解けない
 - 連続成分との切り分けが難しい
 - 連続成分の取り方を変えるとプロファイルが簡単に変わる (e.g., Noda+11)

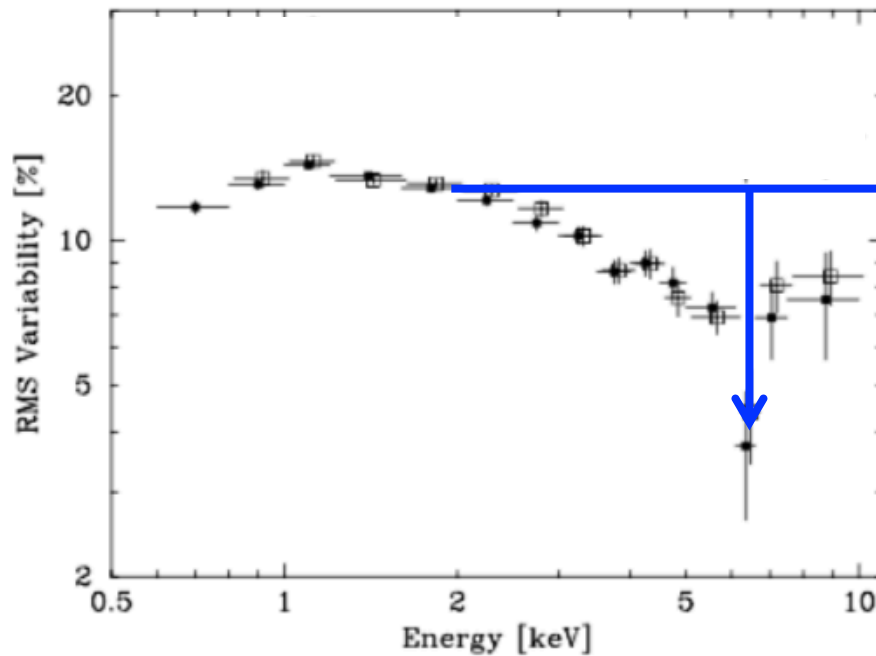
X線スペクトルの時間変動を手掛かりにしよう

1. root-mean-square (rms) スペクトル
2. 時間遅れ (ラグ)

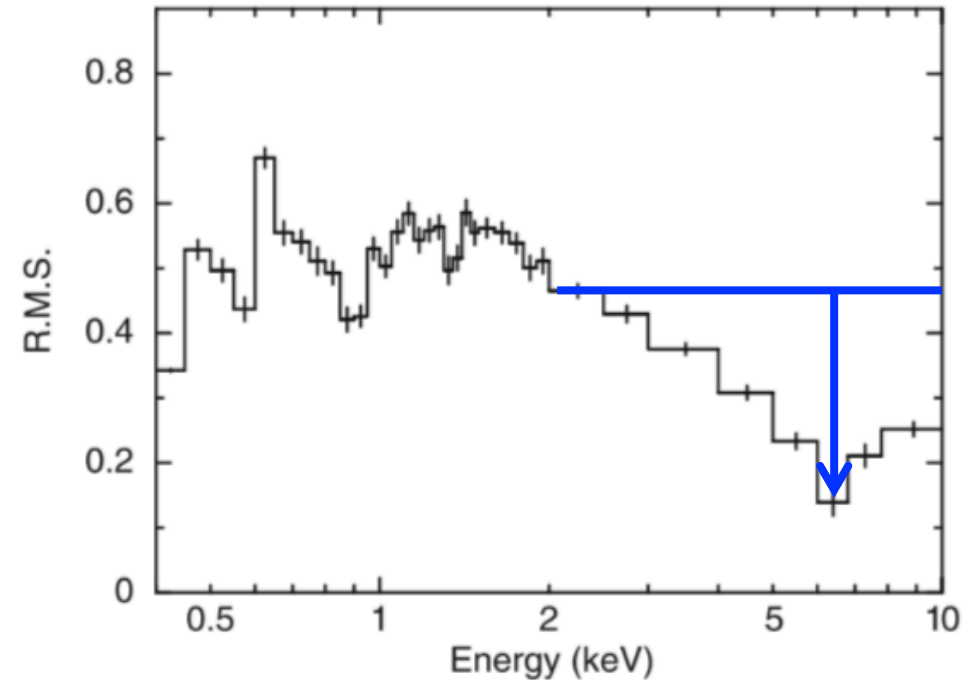
時間変動: rmsスペクトル

MCG-6-30-15

NGC 4051



(Matsumoto+03改)



(Terashima+09)

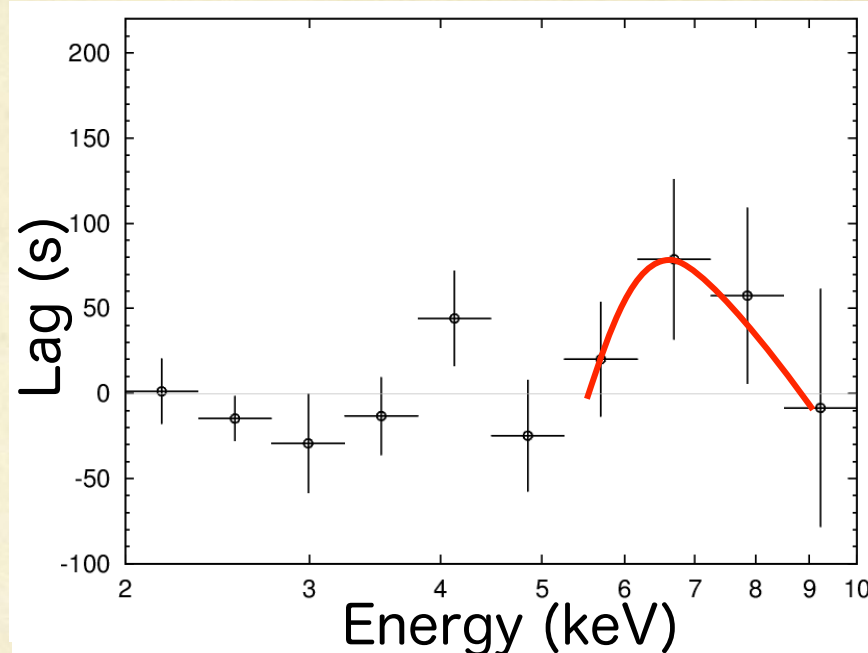
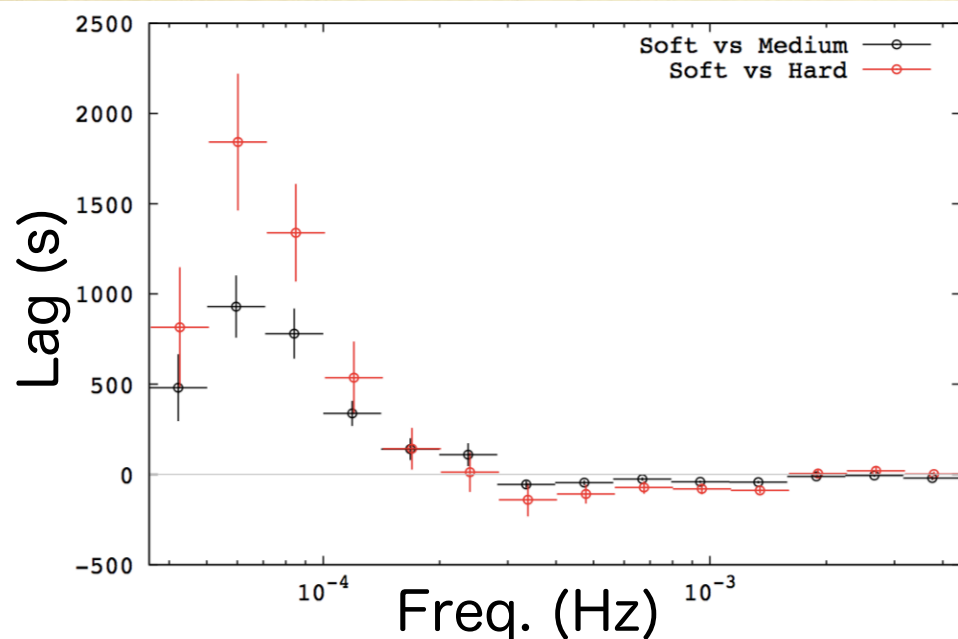
鉄Kバンドでrmsスペクトルが広く深く凹む
＝変動率が低下している

時間変動II: 時間遅れ (ラグ)

(IRAS 13224-3809)

Lag-frequency

Lag-energy



Reverberation lag

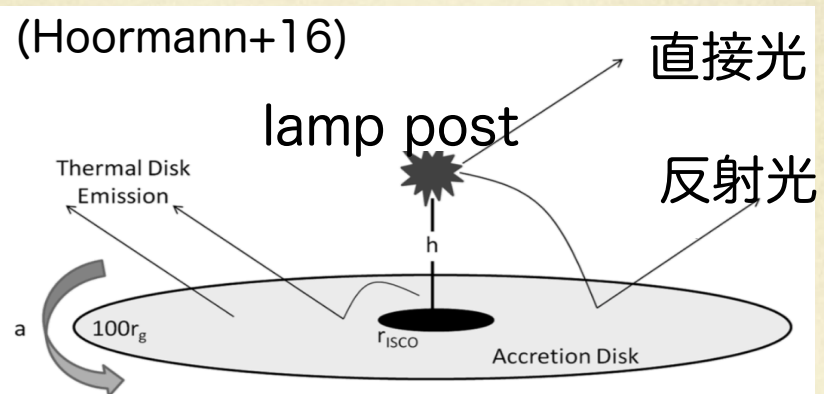
1. 時間遅れの強度: $\sim \text{数} R_g / c$
2. 周波数: $\sim c / 100 R_g \text{ Hz}$
3. Lag-energy: 広がっている (6-8 keV) (Kara+16)

どちらのシナリオが妥当？

		スペクトル	rmsの凹み	時間遅れ
円盤反射シナリオ	相対論的円盤反射モデル	○	?	?
クラウド反射シナリオ	部分吸収モデル	○	?	?
	アウトフロー吸収線モデル			

円盤反射シナリオ

(Hoormann+16)



[1] Miniutti+04
[2] Kara+13

rmsの凹み

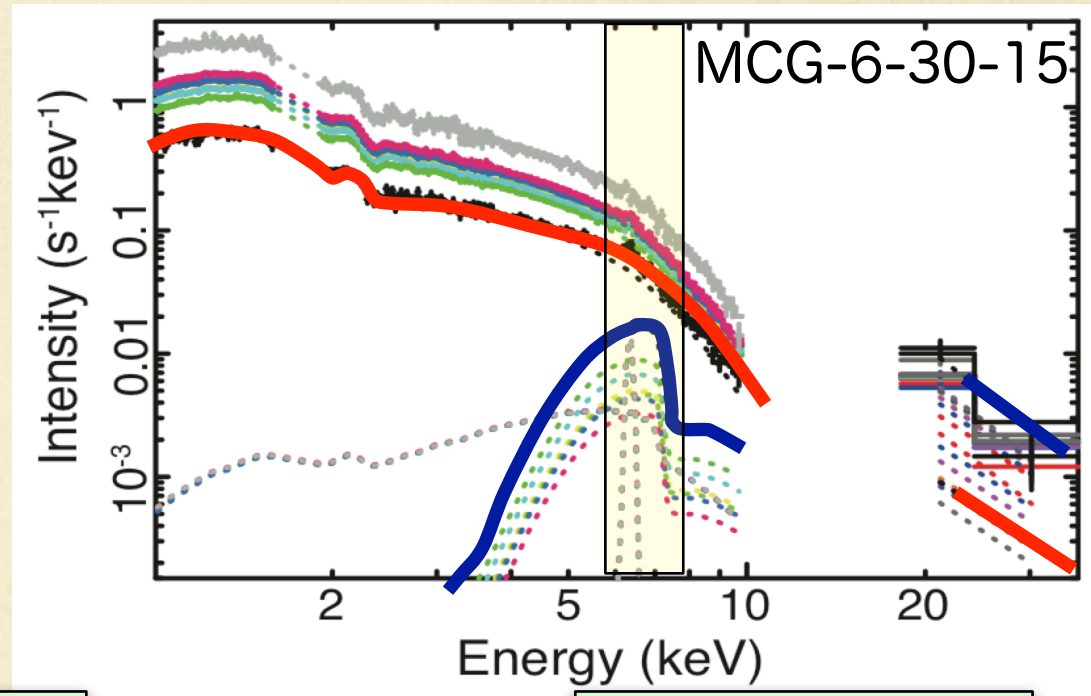
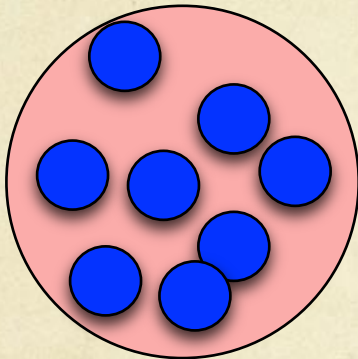
- lamp postの高さが変動する
- 直接光は大きく変動するが、反射光はさほど変動しない [1]
- 反射成分が強い場所でrmsが凹む

時間遅れ

- lamp post の高さは数 R_g 程度
- Light travel time = 時間遅れ [2]

- 同時に説明しようとした例はない。
- rmsの凹みは定量的には説明できない？ (Inoue+03)

クラウド反射シナリオ



rmsの凹み

- 部分吸収率が変わることによって深い凹みを作ることが可能 (e.g., Inoue+03, Yamasaki, MM+16)

時間遅れ

- Lag-frequencyは説明可能 (Miller+10a, 10b, Turner+17)
- 広がった輝線的構造は説明されていない

本論文の目的

		スペクトル	rmsの凹み	時間遅れ
円盤反射シナリオ	相対論的円盤反射モデル	○	個別には説明可能	
クラウド反射シナリオ	部分吸収モデル	○	○	まだ
	アウトフロー吸収線モデル			

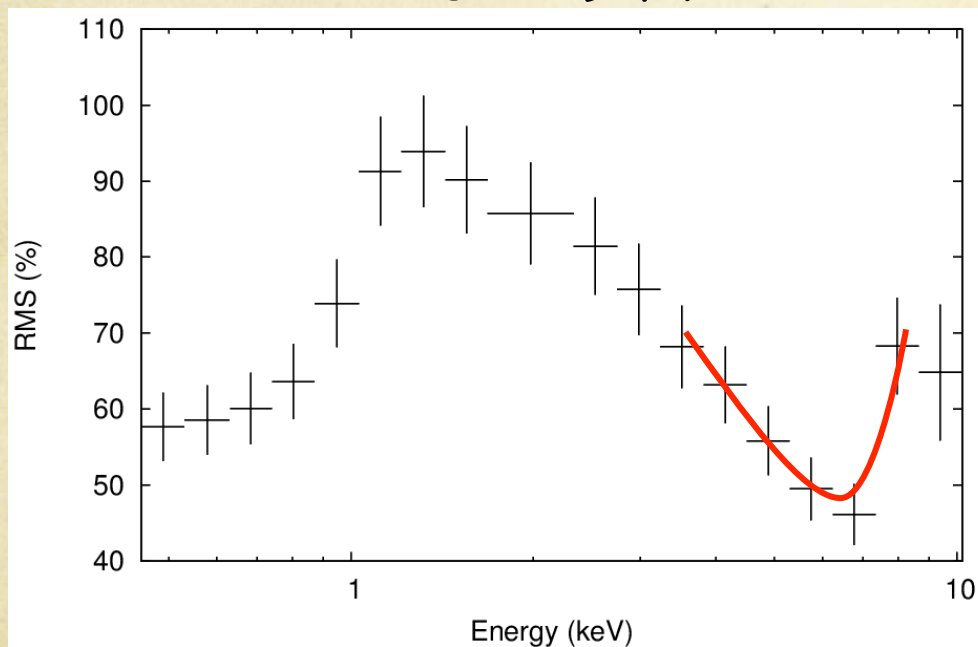
- 円盤反射シナリオで、rmsの凹みと時間遅れを同時に説明することができるか？
- クラウド反射シナリオで、時間遅れを説明することができるか？
 - それはrmsの凹みと矛盾しないか？

円盤反射シナリオ

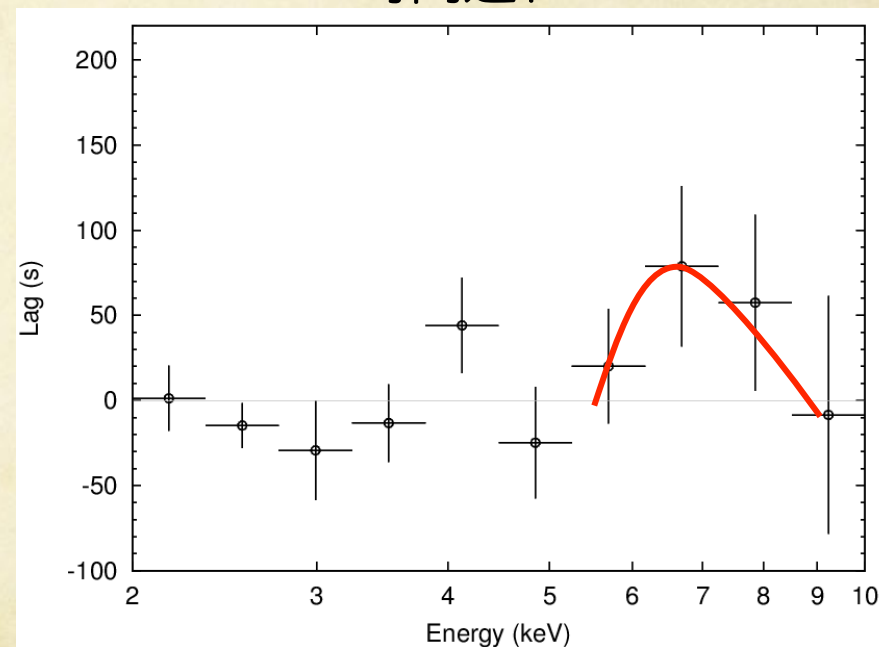
ターゲット：IRAS 13224-3809

深いrmsの凹みと時間遅れがともに顕著に見えている典型的な天体

rmsスペクトル

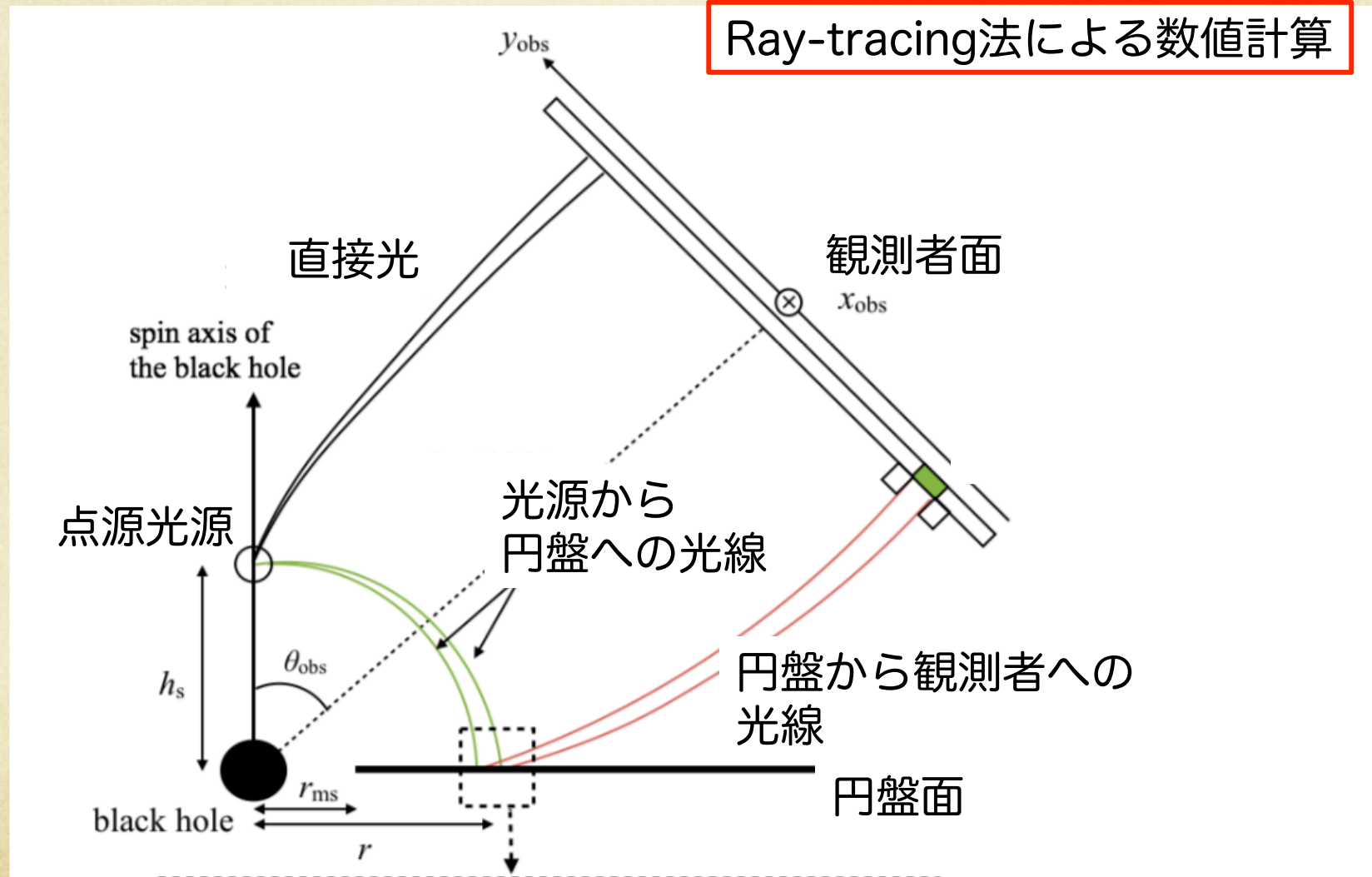


時間遅れ



セッティング #1

Ray-tracing法による数値計算



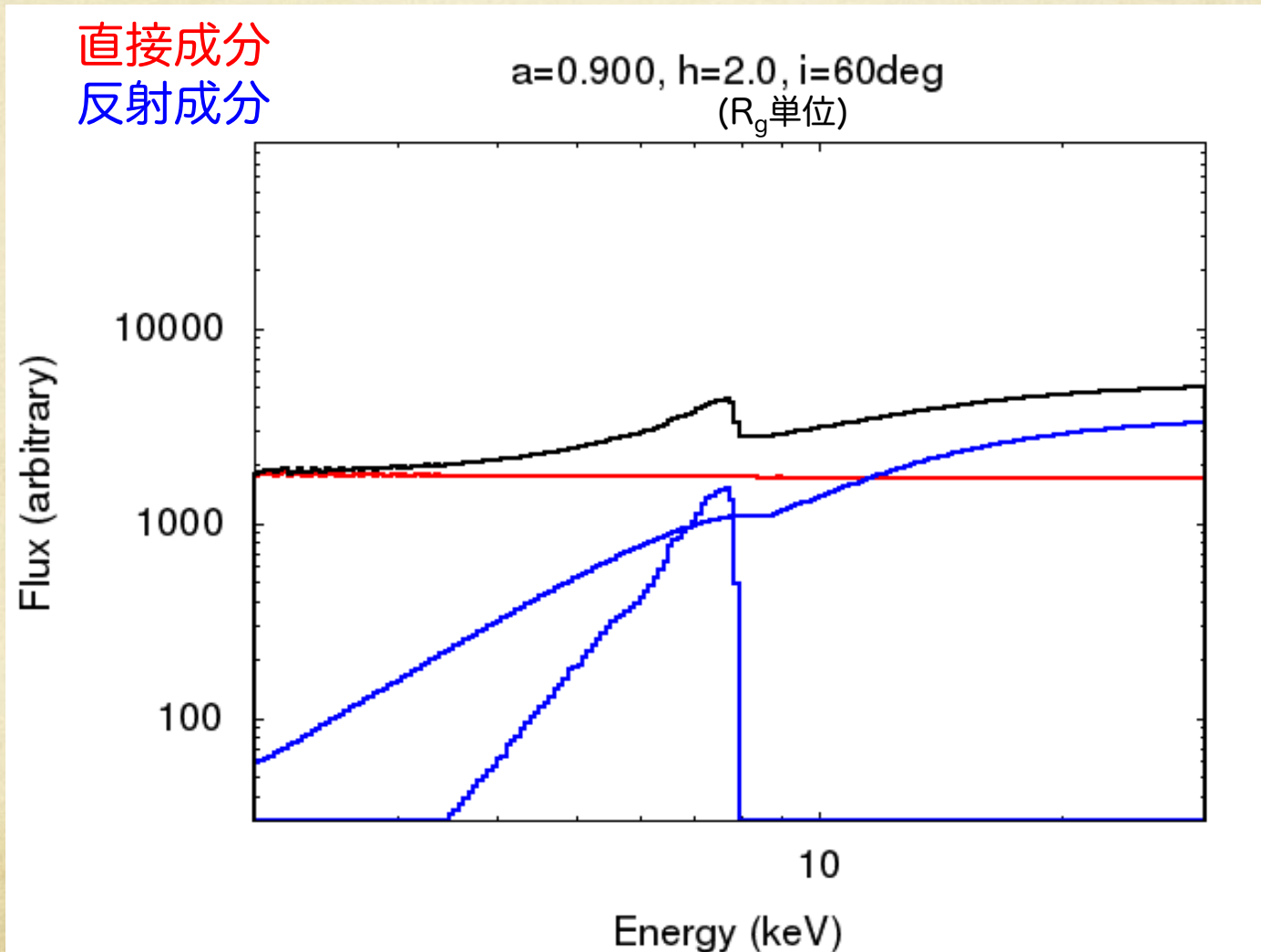
コード作成と計算は共同研究者（森山ら）が実行

セッティング #2

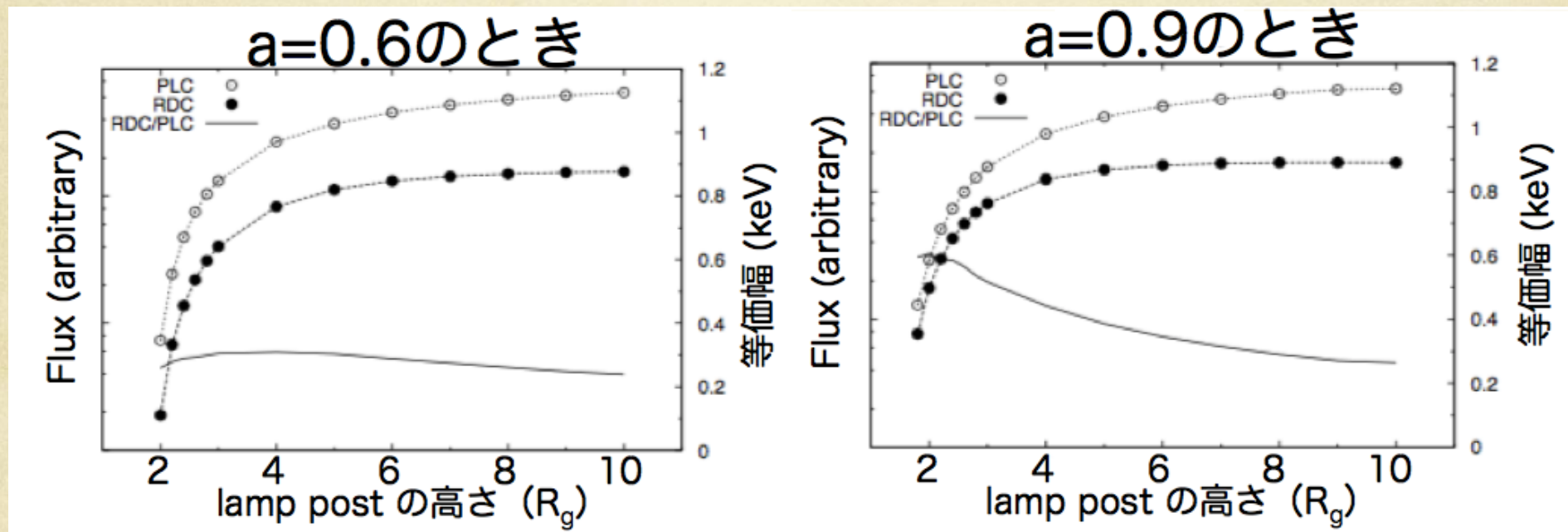
- 半無限大の厚みを持った電離していない円盤を仮定
- 円盤内での複数散乱は考えない
- スピン $a=0, 0.6, 0.9, 0.998$
- Inclination=60deg
- 散乱の角度依存性は考えない
- 吸収断面積: Morrison & McCammon 1983
- 散乱断面積: Klein-Nishina
- 光源は $\Gamma=2$ のべき型スペクトル
- Lampは回転軸上に設置
- $R_{\text{in}}=\text{ISCO}$, $R_{\text{out}}=100R_g$
- h ($=\text{height}/R_g$) が 2.2-10 の間で変動。 $h=2.2-3$ は 0.2 刻み, $h=3-10$ は 1 刻み

スペクトル変動

$a=0.9$ のとき



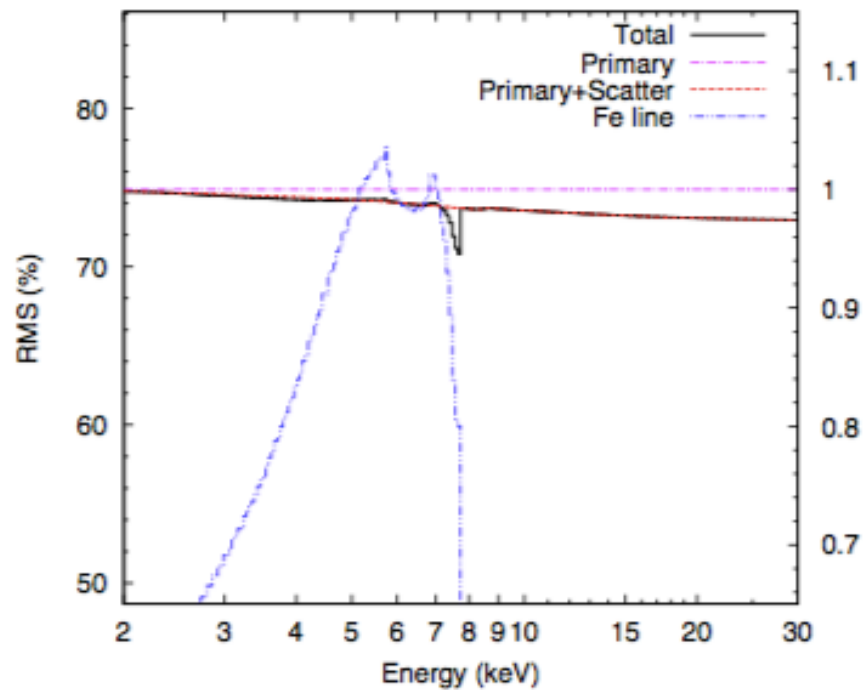
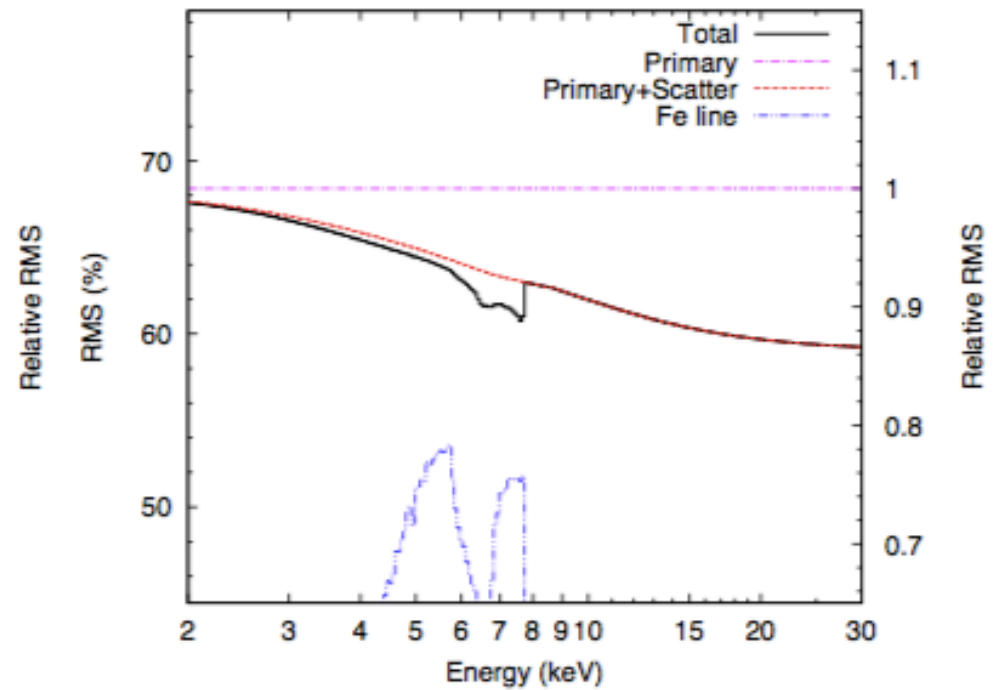
フラックス変動



- 直接成分
- 反射成分

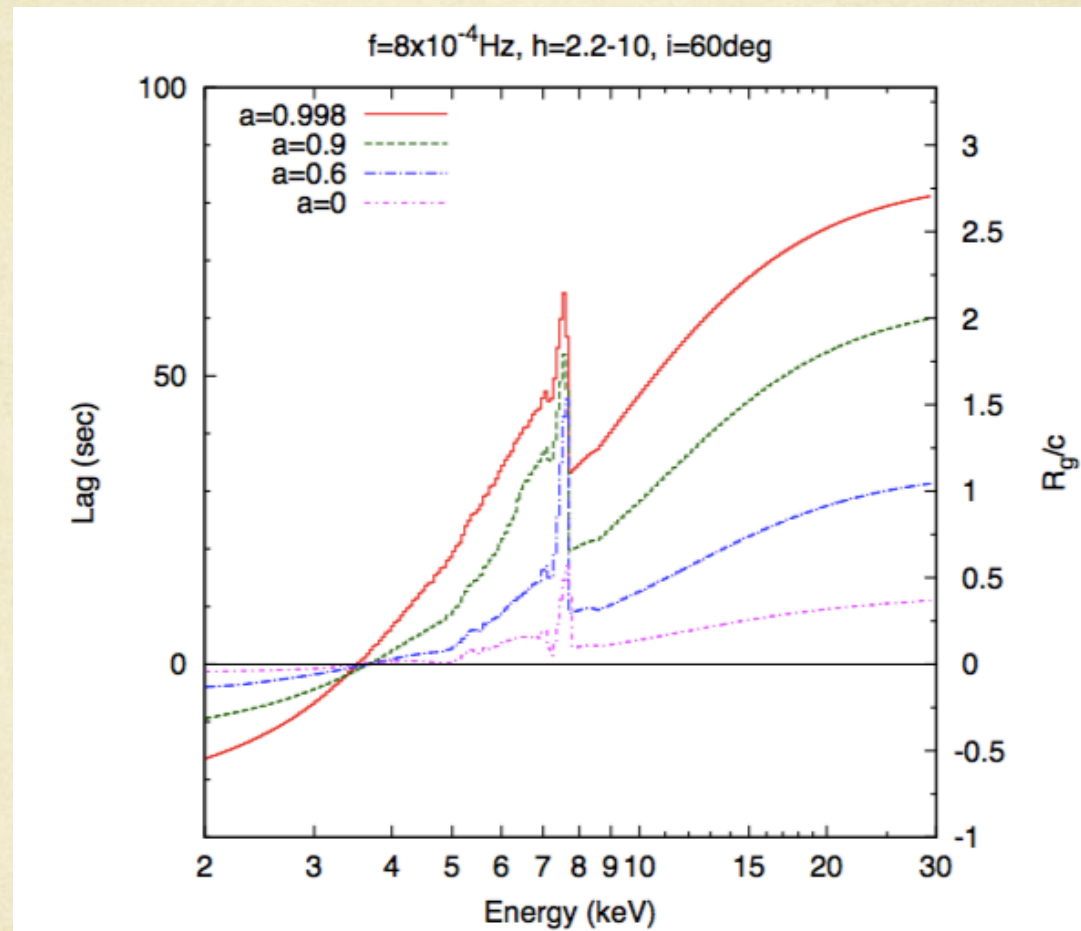
— 鉄輝線の等価幅

rmsスペクトル

 $a=0.6$  $a=0.9$ 

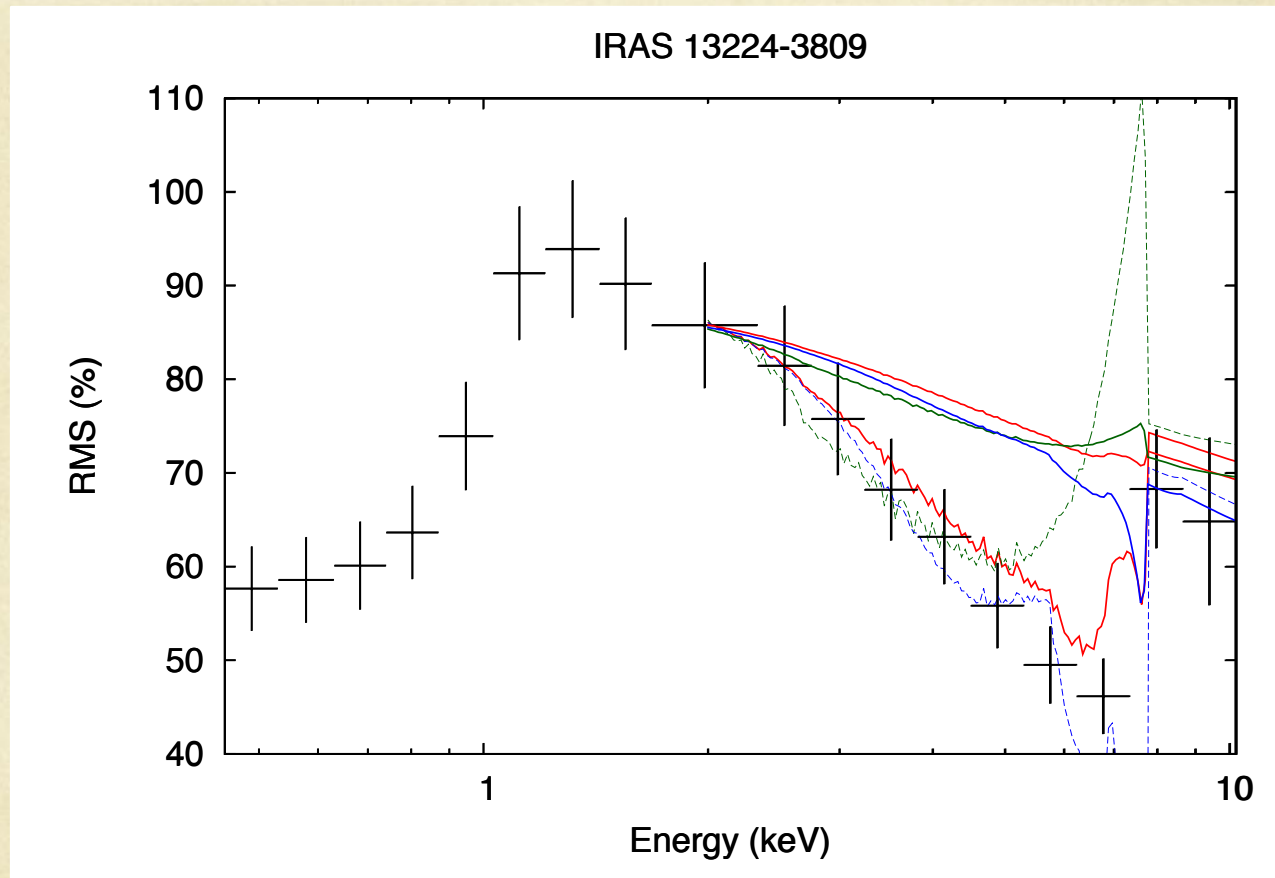
スピンの大きい ($a > 0.9$) 時にrmsの凹みができる

時間遅れ



スピンの大きい ($a > 0.9$) 時に
広がった鉄輝線的構造ができる

rmsを観測と比較



鉄:太陽組成

$h=2-10R_g$

$h=2-3R_g$

$h=3-10R_g$

鉄:太陽組成 $\times 10$

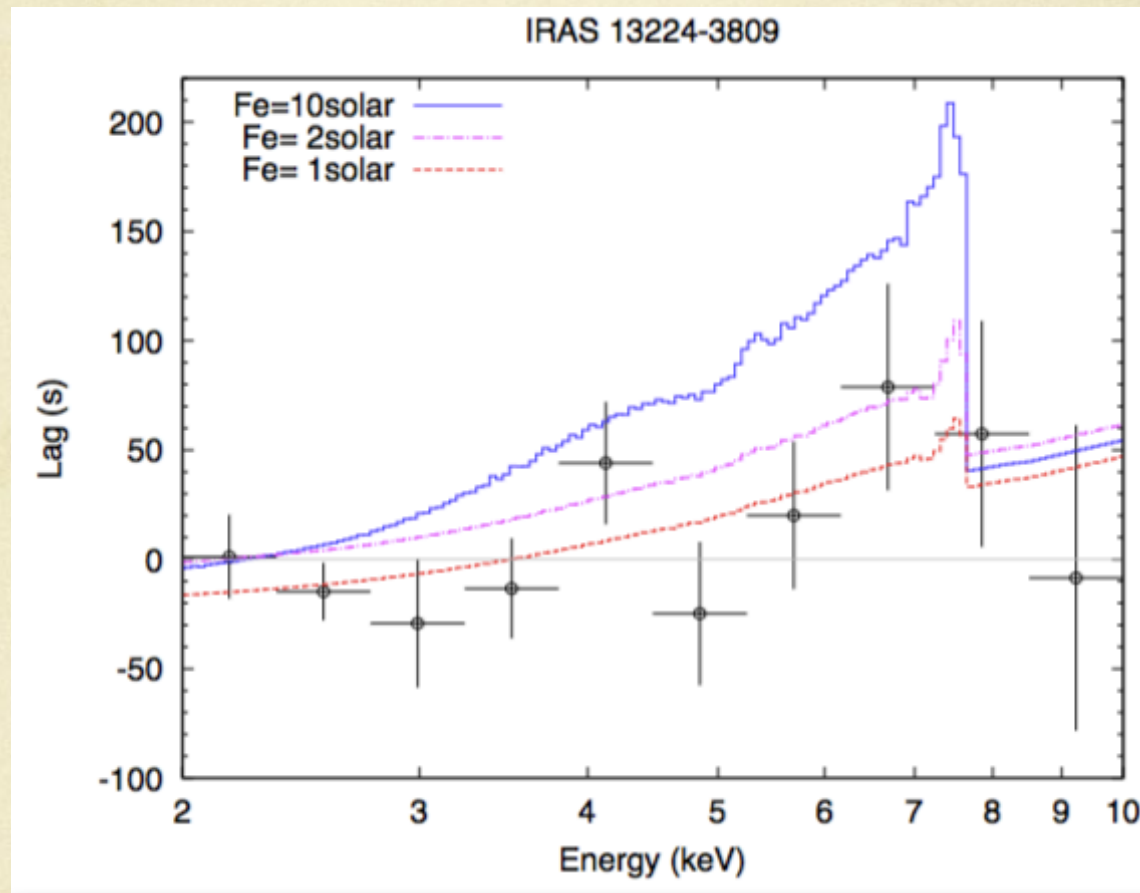
$h=2-10R_g$

$h=2-3R_g$

$h=3-10R_g$

太陽組成の10倍程度の鉄が必要

時間遅れを観測と比較



- 太陽組成程度の鉄で十分
- 10倍にすると観測と矛盾

円盤反射シナリオのまとめ

- Ray-tracing法に基づいた数値計算
- IRAS13224-3809の観測を説明することを試みた
- 鉄組成で矛盾が生じる
 - rmsの凹み → 鉄が太陽組成の10倍以上必要
 - 時間遅れ → 鉄は太陽組成程度でよい
- 円盤反射シナリオでは鉄Kバンドの変動性を同時に説明することは難しい

クラウド反射シナリオ

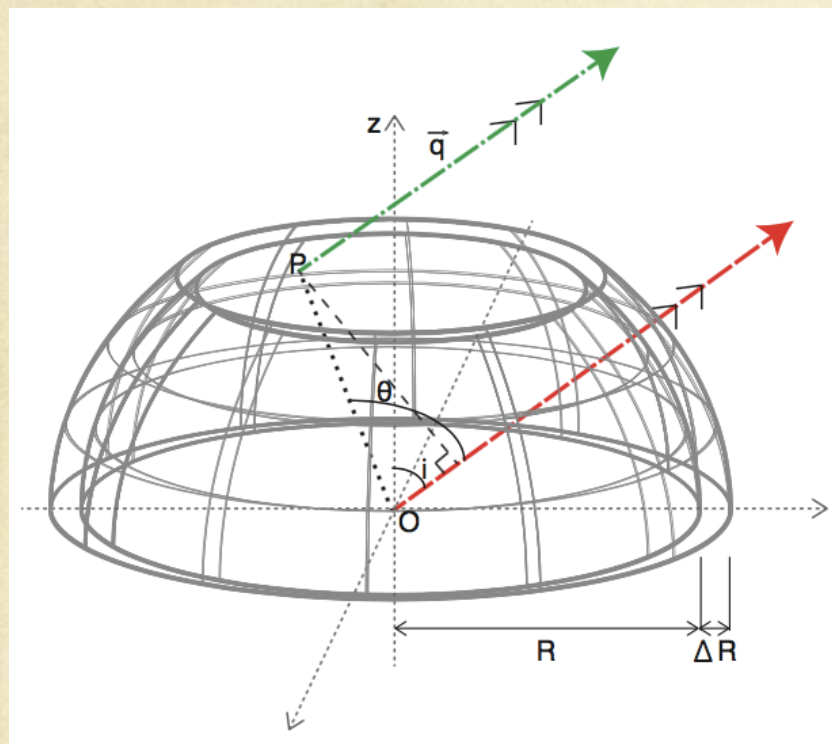
時間遅れを説明しなくてはならない

時間遅れ

- Lag-frequencyは説明可能
- 広がった輝線的構造は説明されていない

時間遅れの中に、広がった輝線的構造を
何とかして作ろう
→ クラウドに速度を与えてみる

セッティング



MONACO (Odaka+11) による
モンテカルロシミュレーション

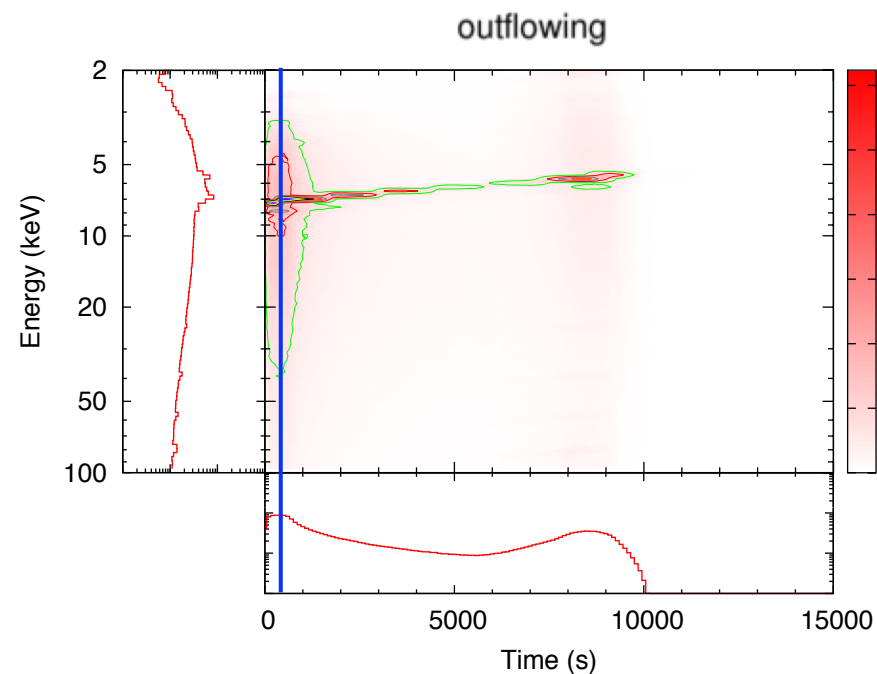
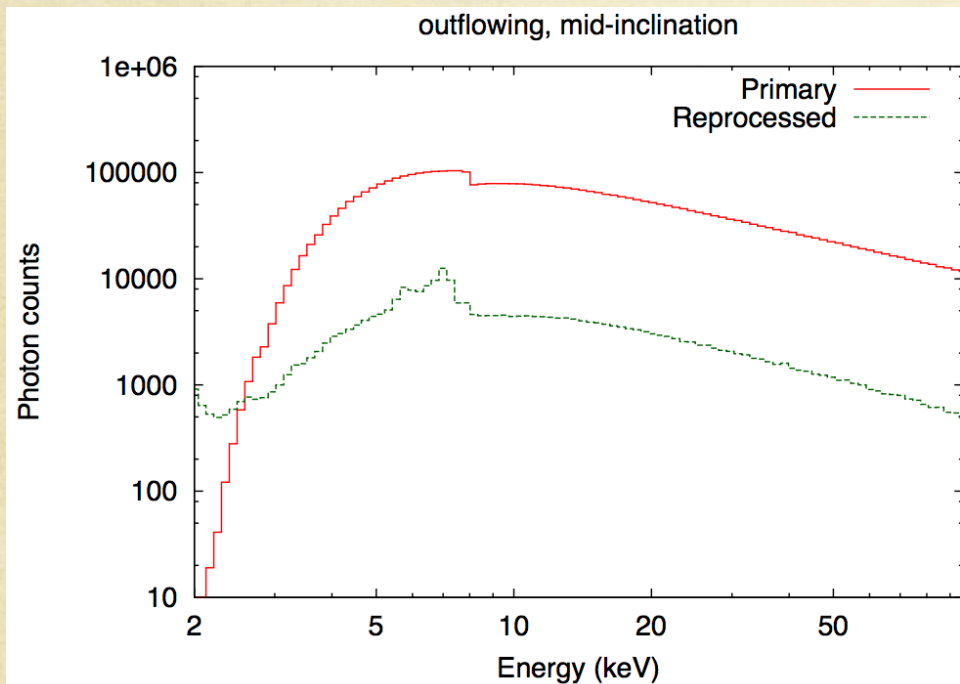
- 電離していない部分球殻
- $R = 100 R_g$ ($M_{\text{BH}} = 10^7 M_{\text{solar}}$)
= 5000 光秒
- 殻の厚み (ΔR) = $R/10$
- アウトフロー速度 : $0.14c$
- $N_H = 2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$

- 入射スペクトル : $\Gamma = 2$ のべき型スペクトル
- 光子数 : 7×10^8
- 立体角 : $\Omega/4\pi = 0.7$

計算結果 #1

エネルギースペクトル

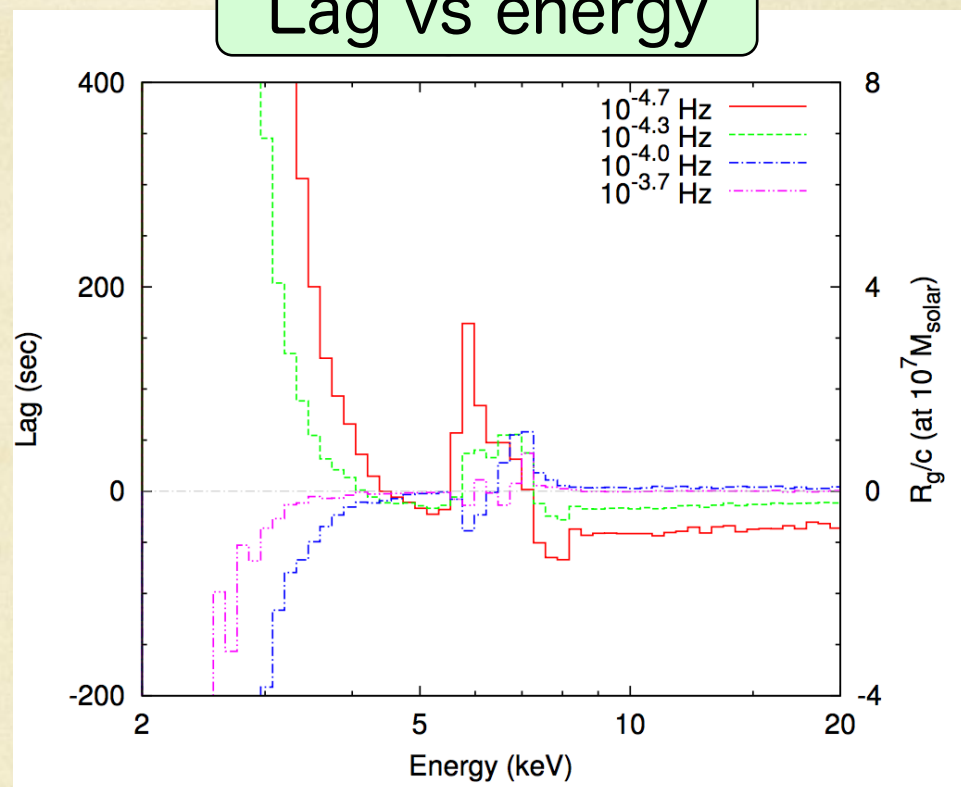
2次元レスポンス



(光子数で重み付けした) 時間遅れの平均値
=210 秒

計算結果 #2

Lag vs energy



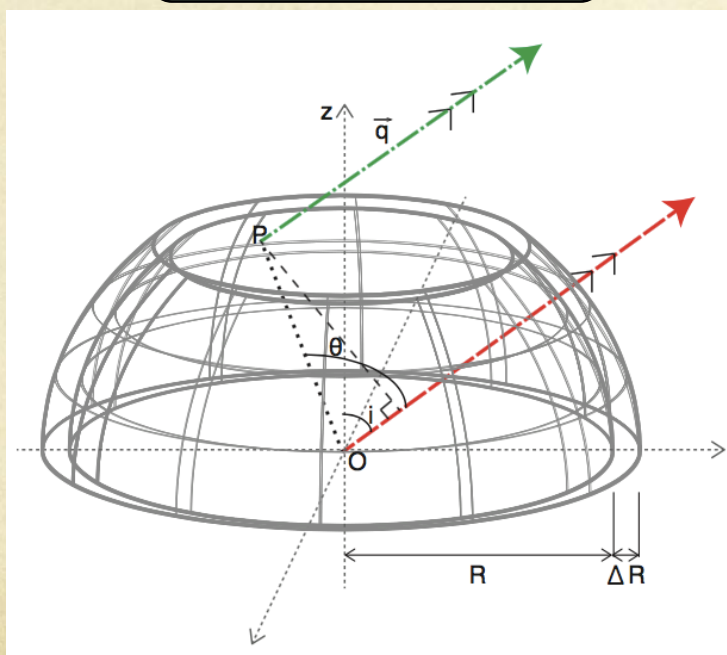
- ① 時間遅れの強度： $\sim$ 数 R_g/c
- ② 周波数： $\sim c/100R_g$
- ③ Lag-energy： 広がっている (5-7 keV)

(Kara+16)

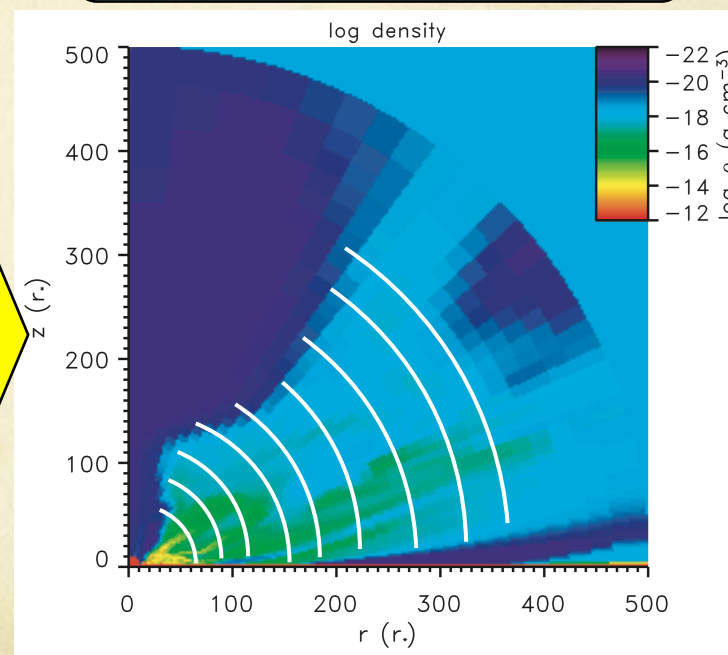
何が時間遅れを作るか

<100R_gに存在するアウトフローする物質 → 円盤風

部分球殻



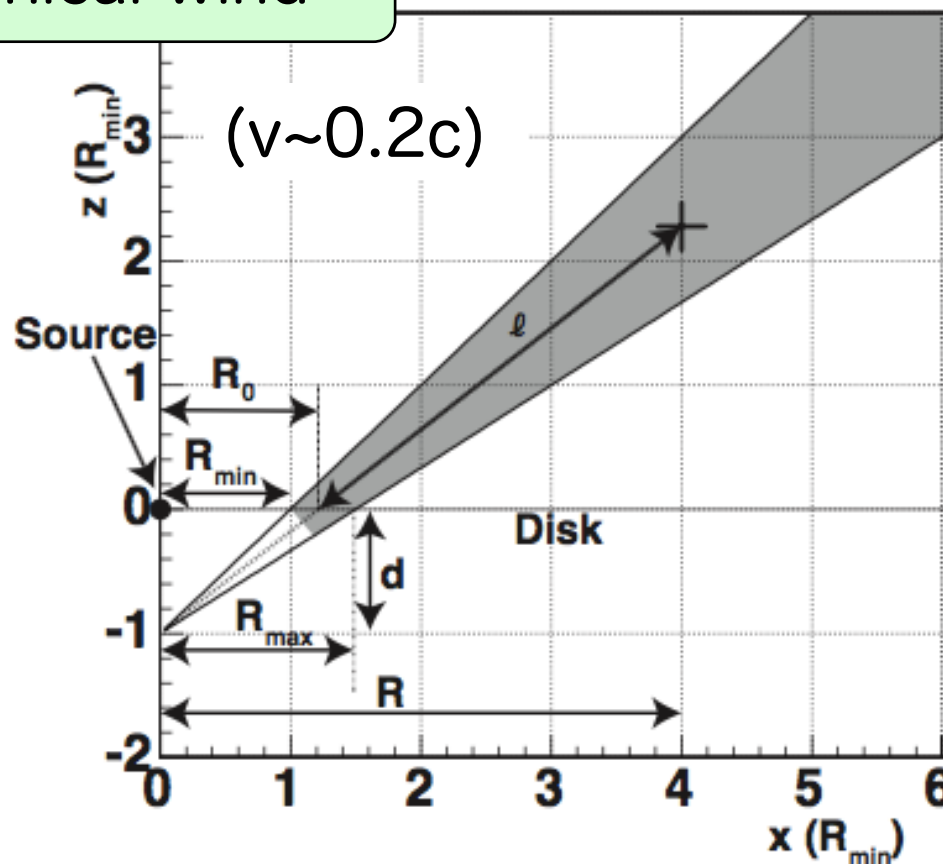
円盤風



Proga & Kallman 04

円盤風のジオメトリで計算

Biconical wind

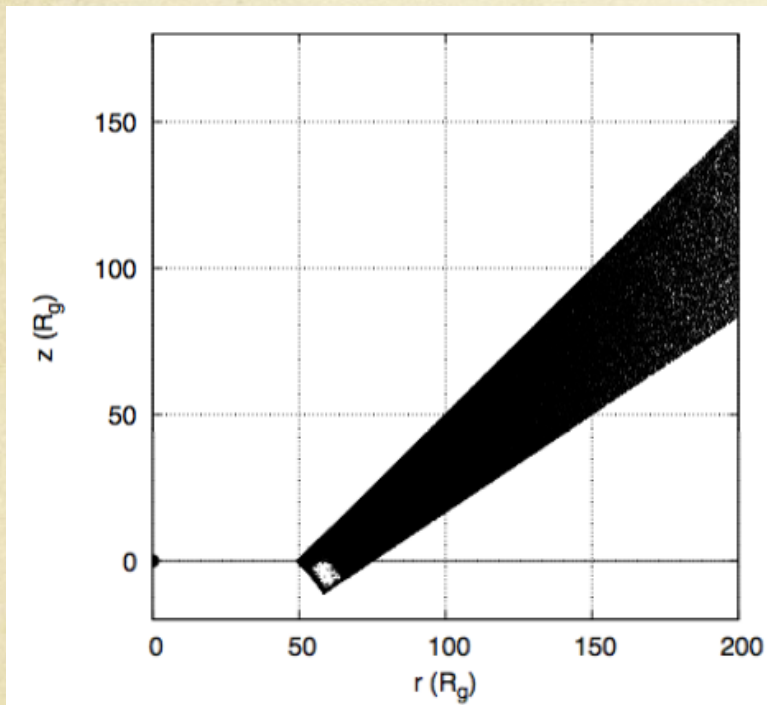


Hagino+15,16

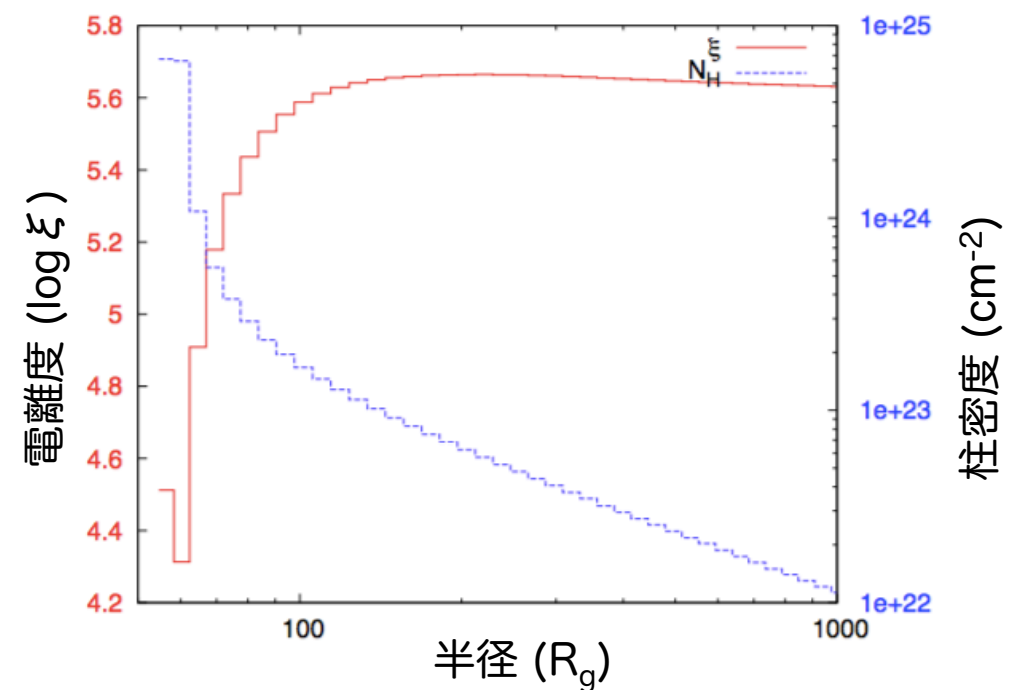
電離度、密度、速度が r の関数

円盤風の計算結果 #1

散乱された座標



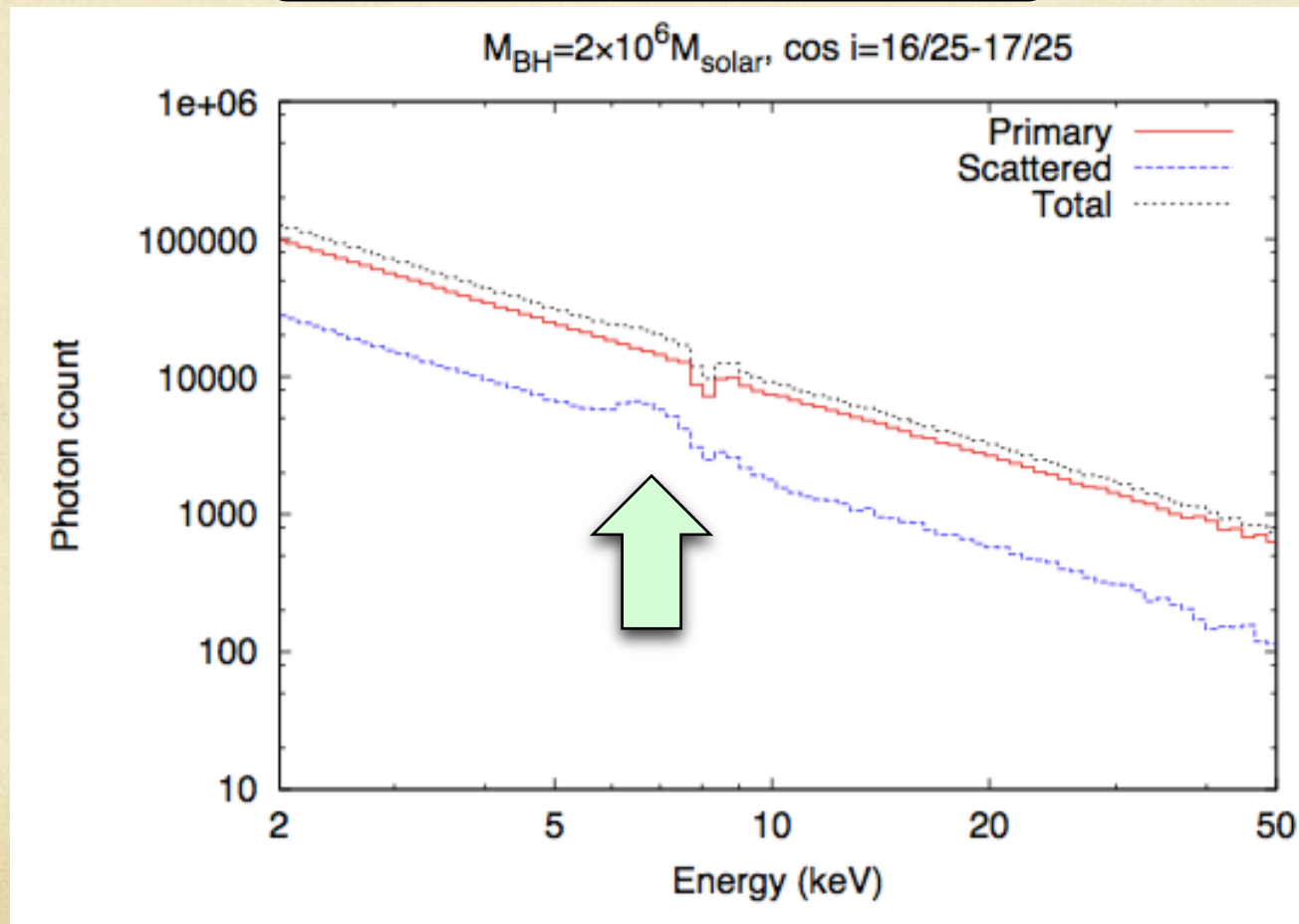
パラメータ



$r < 100 R_g$ で鉄イオンによる共鳴散乱が起こっている

円盤風の計算結果 #2

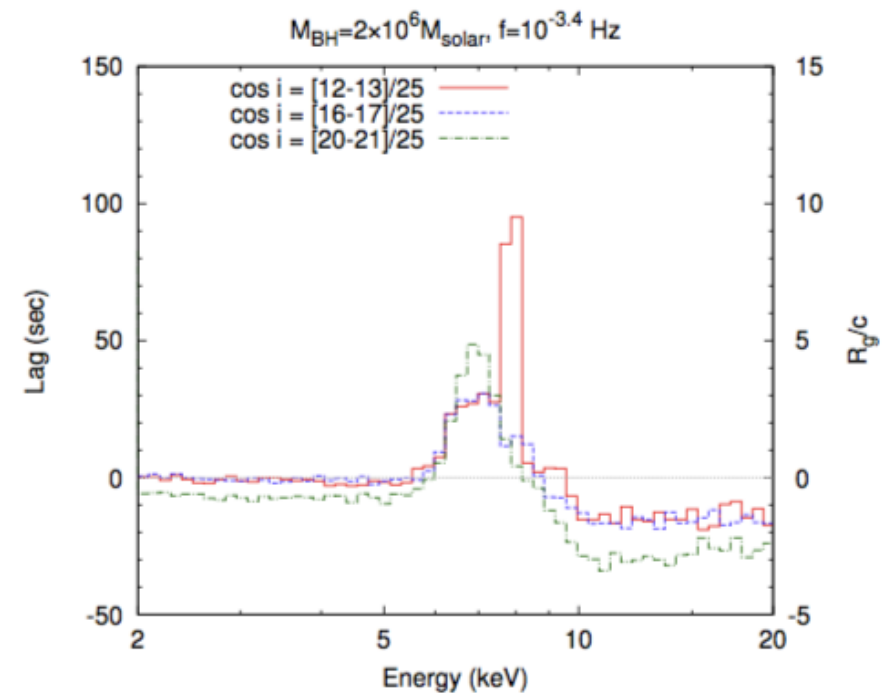
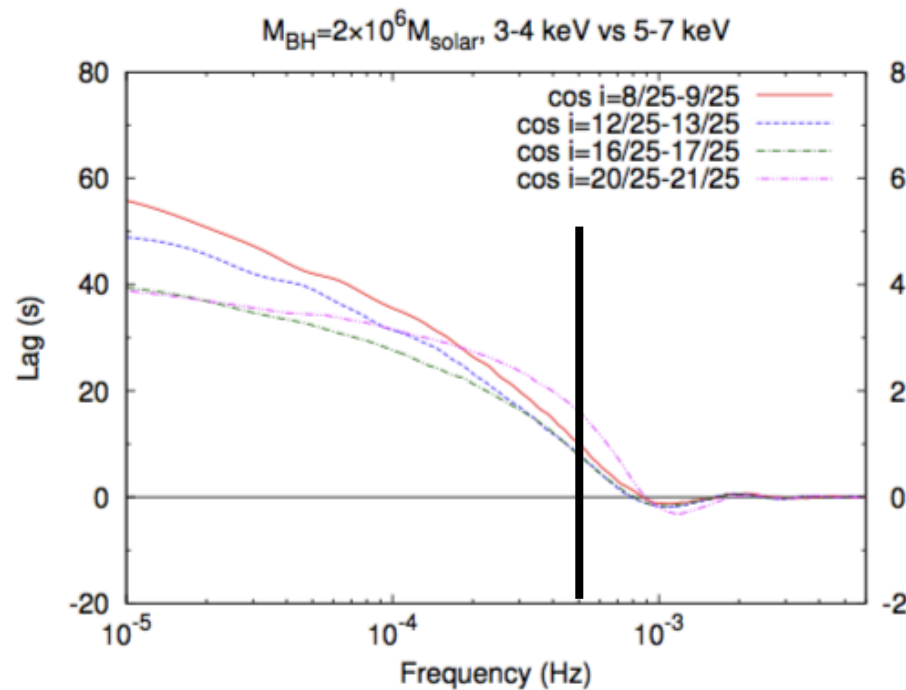
エネルギースペクトル



円盤風の計算結果 #3

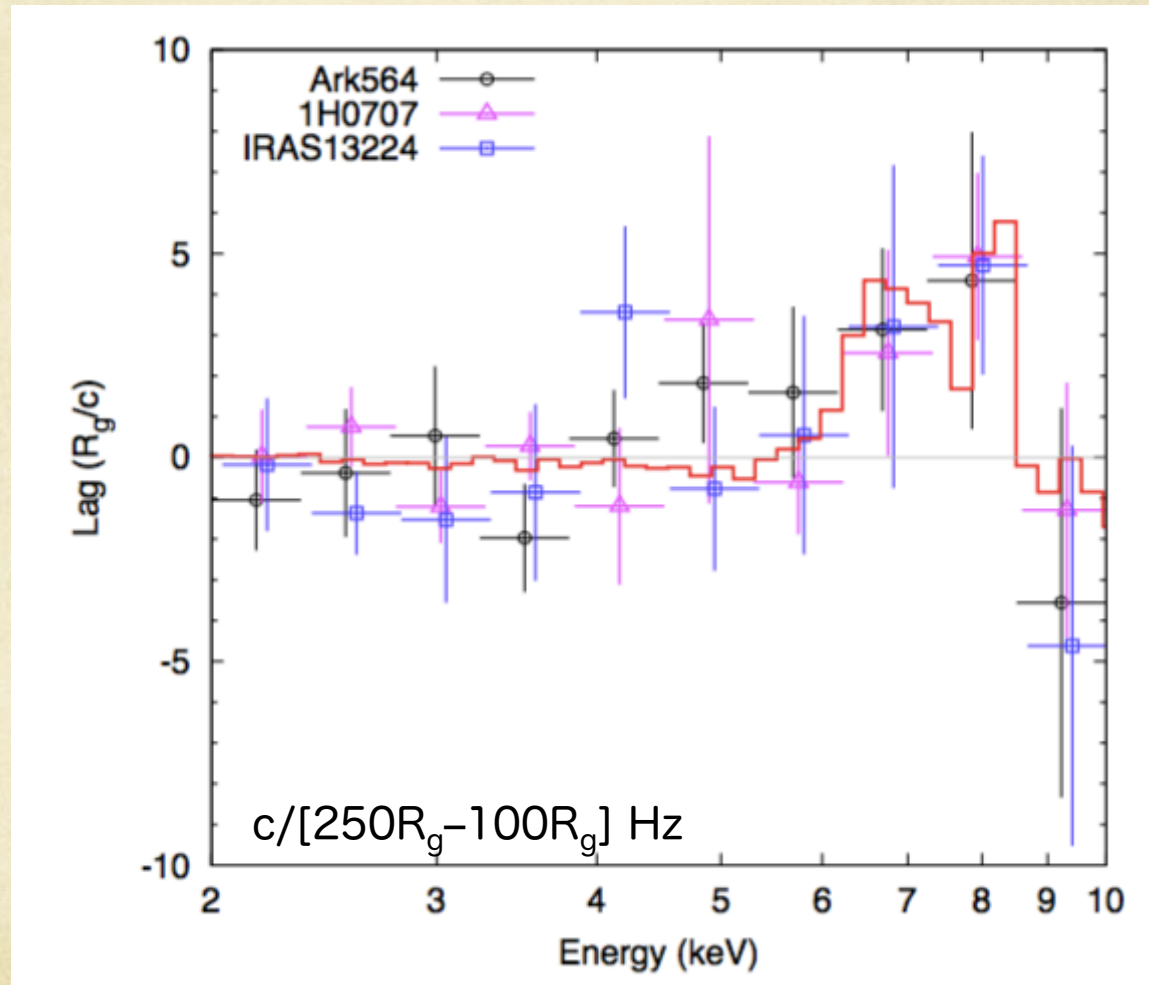
lag-frequency

lag-energy



広がった鉄輝線の構造が見える

観測と比較



観測と一致

クラウド反射シナリオのまとめ

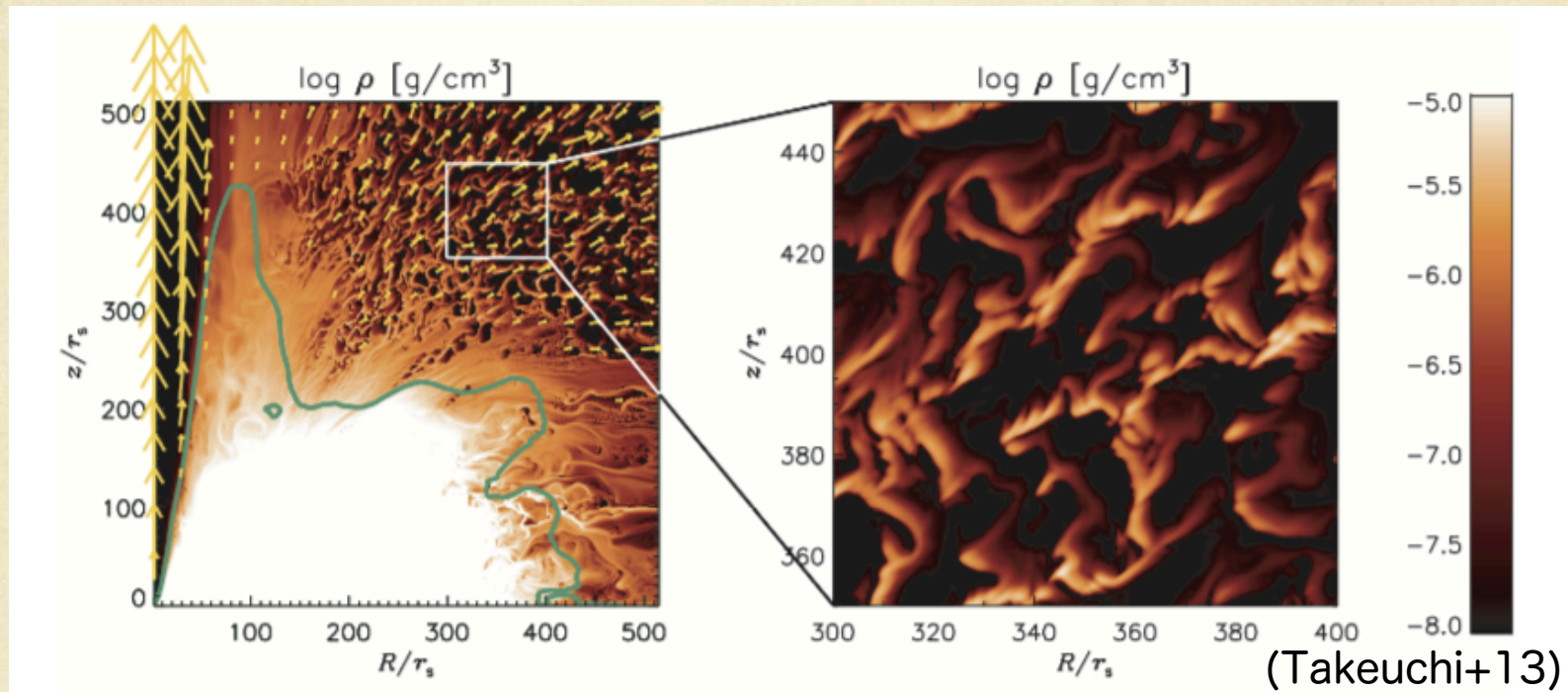
- MONACOによるモンテカルロシミュレーション
- $100R_g$ 以内に存在するアウトフローするクラウドによって、観測される時間遅れが再現可能
- → 円盤風が尤もらしい
- 円盤風のジオメトリで計算を行い、観測される時間遅れを定量的に説明することに成功した

鉄Kバンドの変動性

		スペクトル	rmsの凹み	時間遅れ
円盤反射シナリオ	相対論的円盤反射モデル	○	鉄組成が互いに矛盾	
クラウド反射シナリオ	部分吸収モデル	○	○	○
	アウトフロー吸収線モデル			

- スペクトル & rmsの凹み → 冷たい部分吸収体
- 時間遅れ → 円盤風

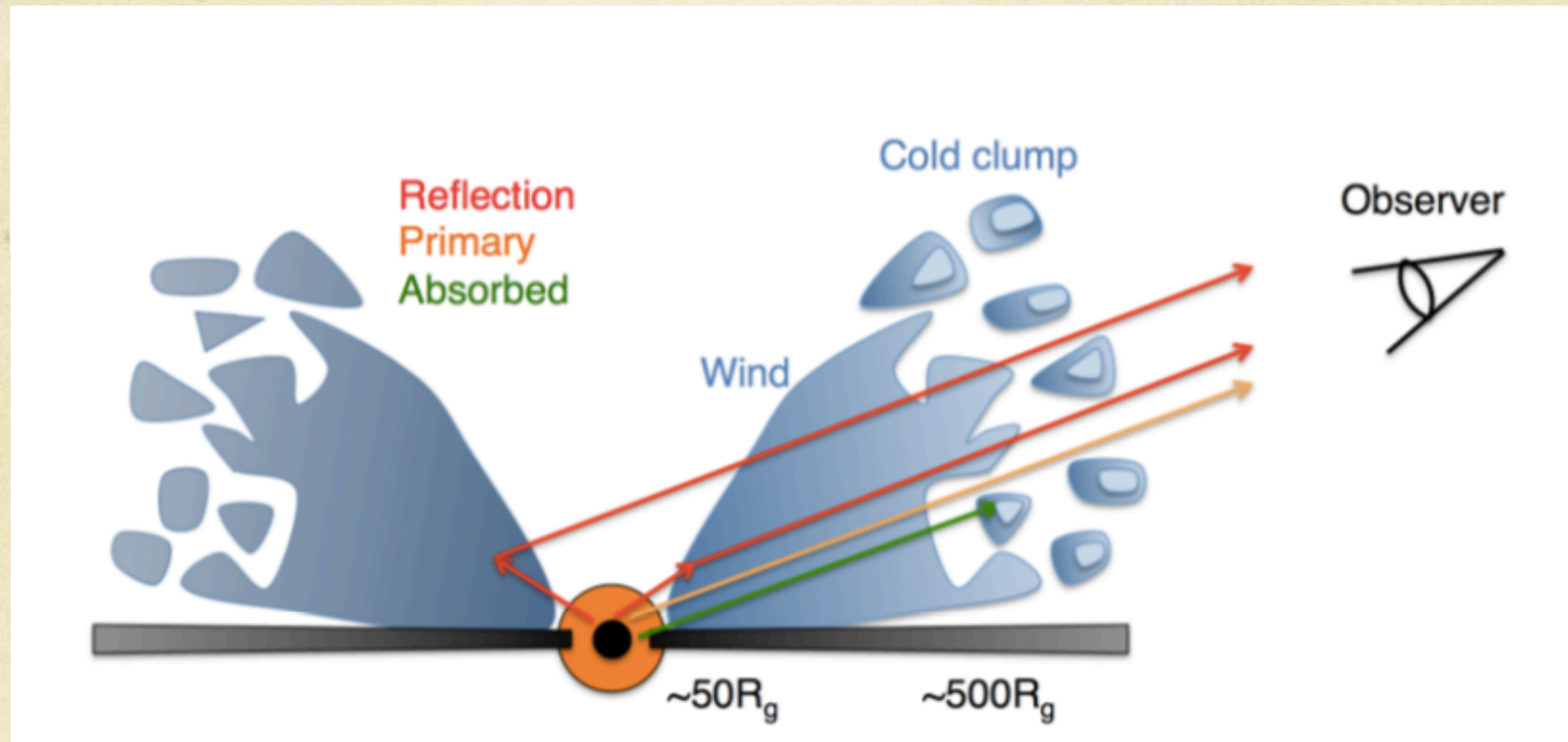
アウトフローの作る不安定性



輻射圧 > 重力 → 見かけ上外向きに重力
→ Rayleigh-Taylor 不安定性
→ 輻射不安定性（輻射が密度の薄いところを進む）により増幅

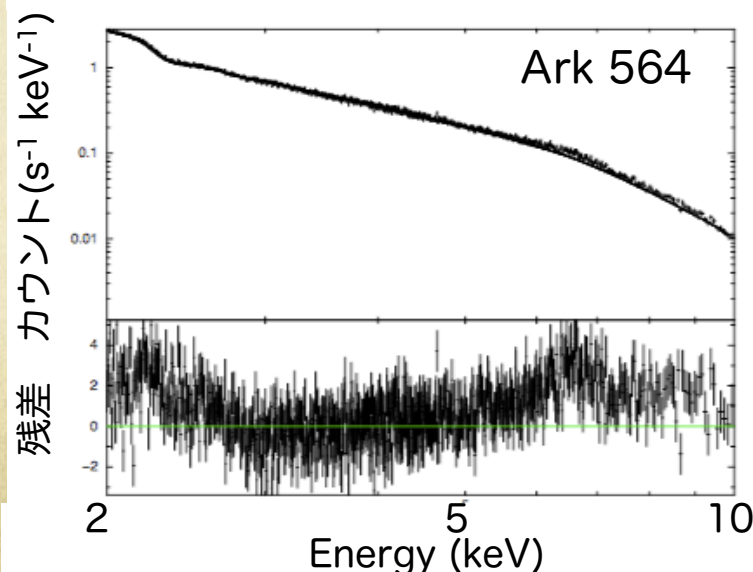
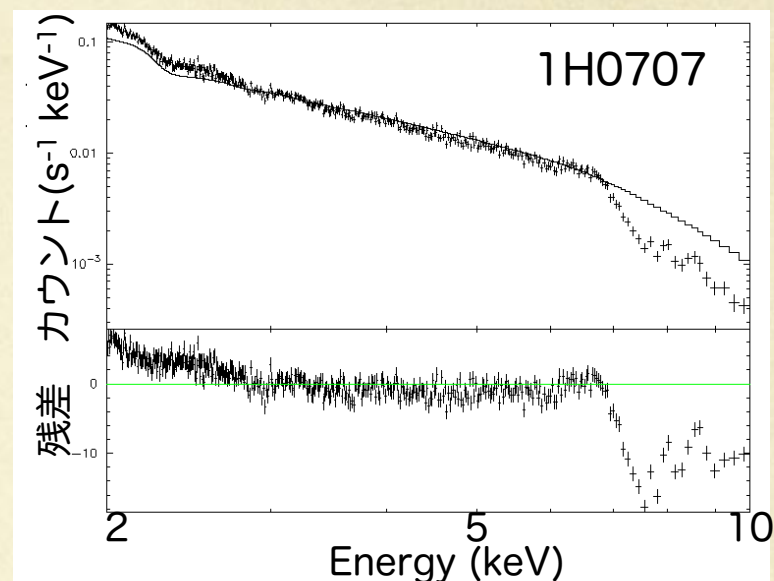
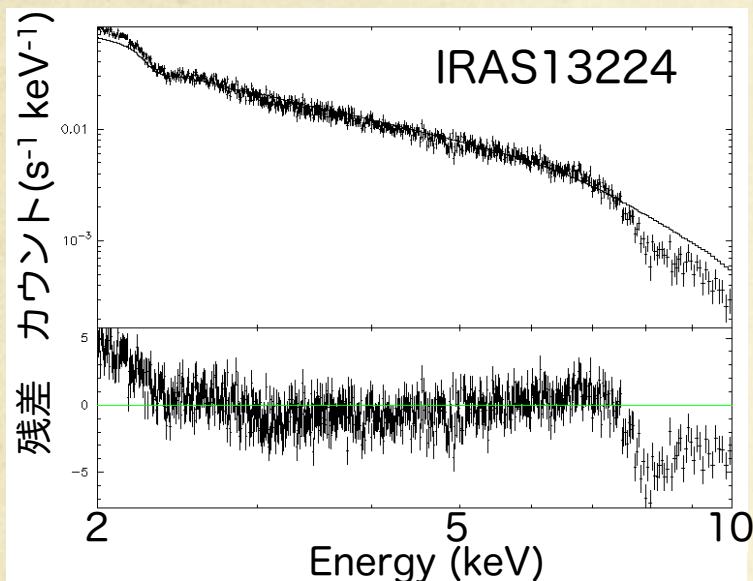
アウトフローがあると、その外側に
クランピーな吸収体が自然に作られる

最終的な描像



- スペクトル → 外側の冷たい粒々の吸収体
- rmsの凹み → 内側のアウトフロー
- 時間遅れ

X線スペクトル



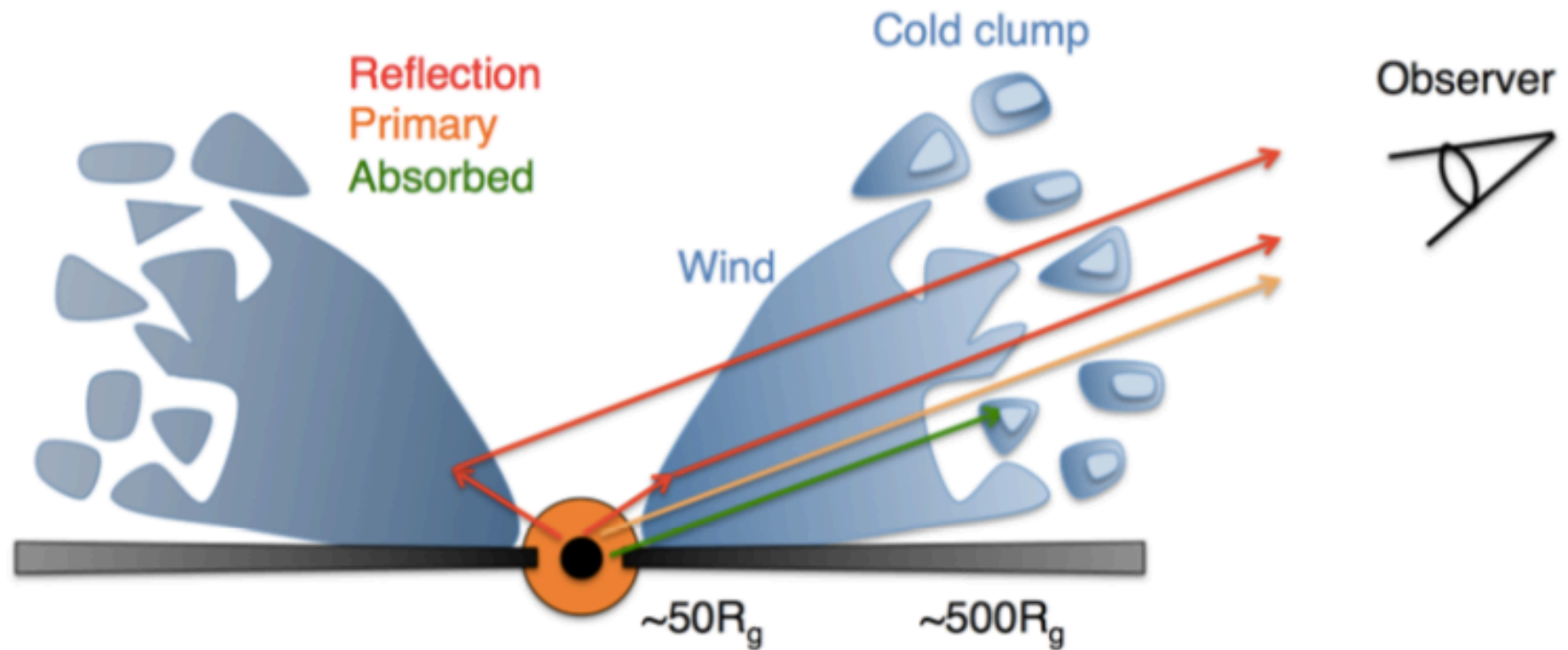
モデル：べき型関数

IRAS13224 & 1H0707
→ 強い吸収エッジが見える

Ark 564
→ 吸収構造は（ほぼ）見えない
→ $EW=200\text{eV}$, $\sigma=650\text{eV}$ の輝線

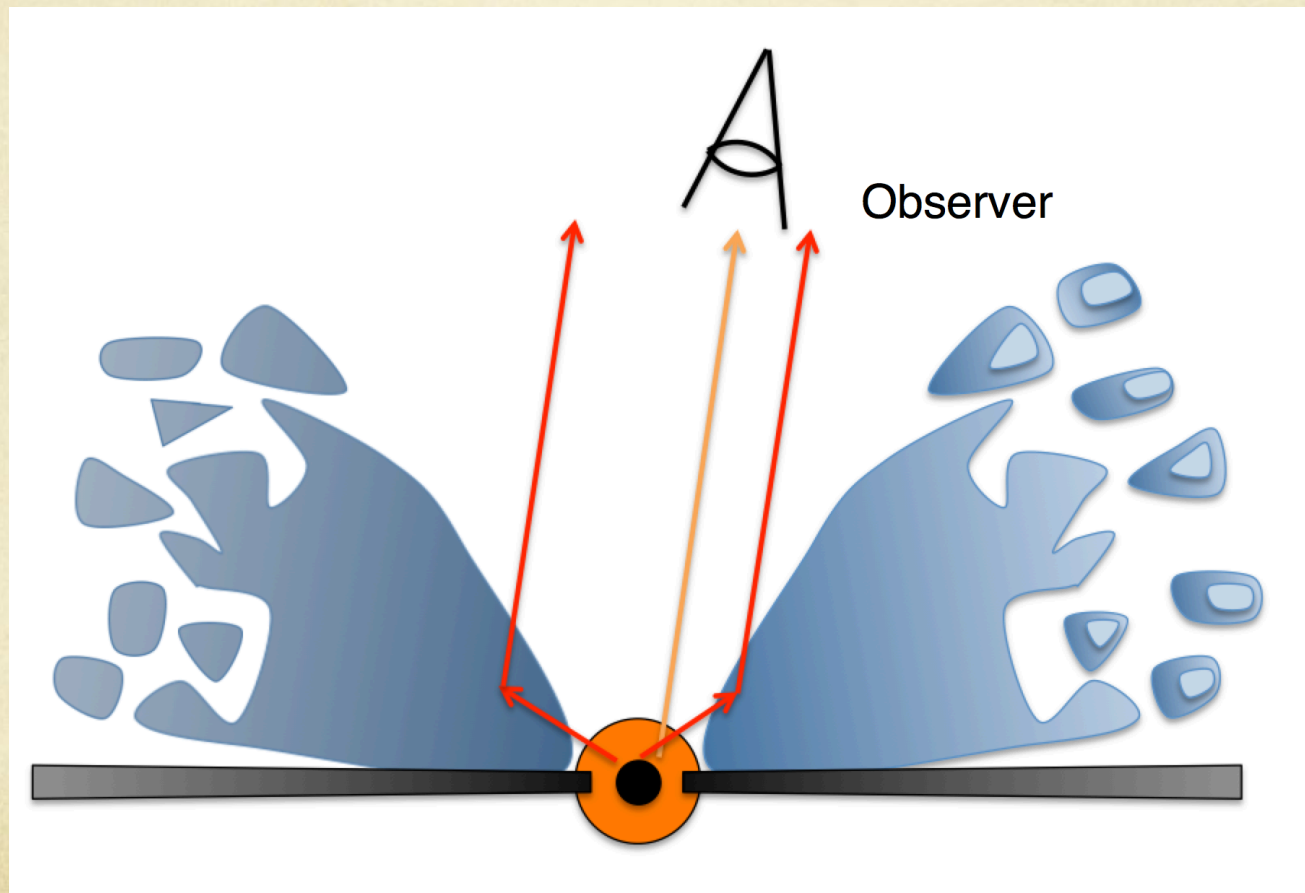
IRAS13224 & 1H0707 の場合

吸収体を突き切るような視線方向で見ている



Ark 564 の場合

Face-onで見ている



輝線の広がりとEWも説明可能

まとめとFuture work

- 活動銀河核の広がった鉄K輝線構造に関する2つの時間変動の特徴
 - rmsスペクトルの凹み
 - 時間遅れ
- 円盤反射シナリオでは、鉄組成に自己矛盾
- クラウド反射シナリオでは、円盤風+冷たい粒々の吸収体で矛盾なく説明可能
- 時間遅れを使えば、視線外の円盤風にアクセスすることができる
- Hydro-dynamical数値シミュレーションと組み合わせた計算や、Athenaなど将来ミッションによって、円盤風の構造を詳しく調べることができると期待