

一般相対論的輻射輸送コードの開発および ブラックホール・中性子星の超臨界降着流 研究への適用

川島 朋尚

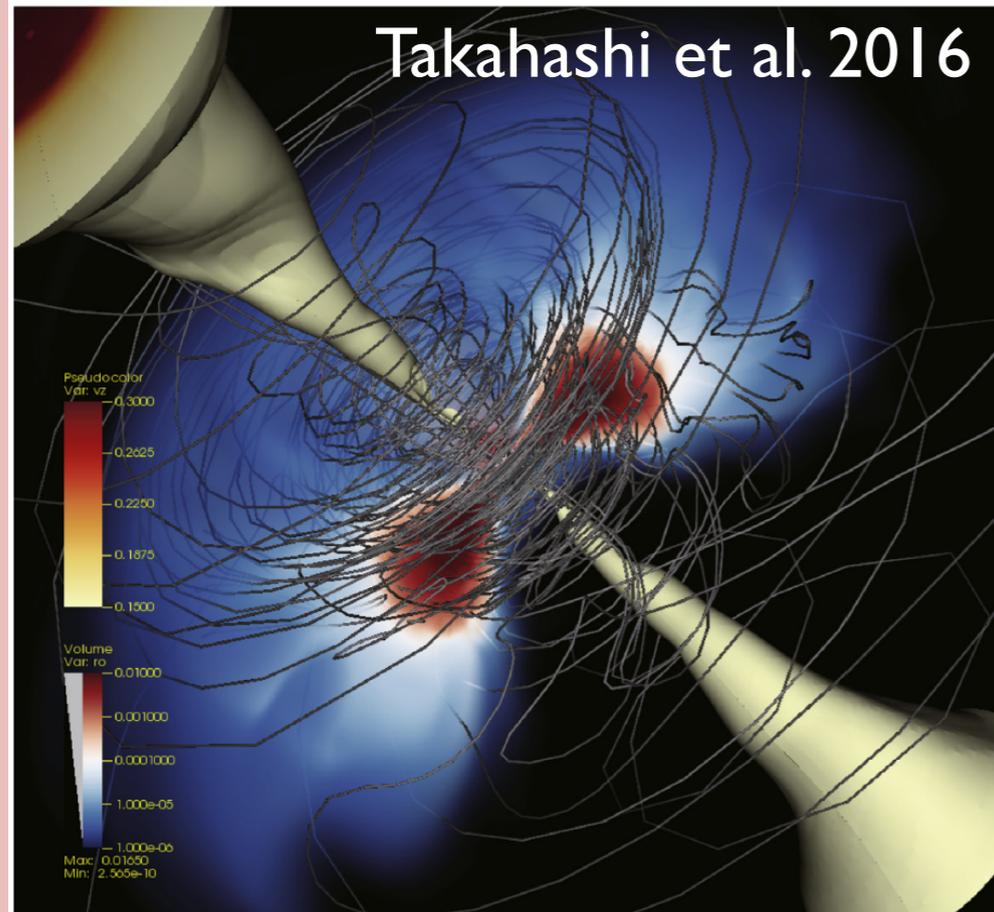
(国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト)

主な共同研究者

大須賀 健 (筑波大学) 高橋 博之 (中部大学)

一般相対論的輻射輸送の重要性

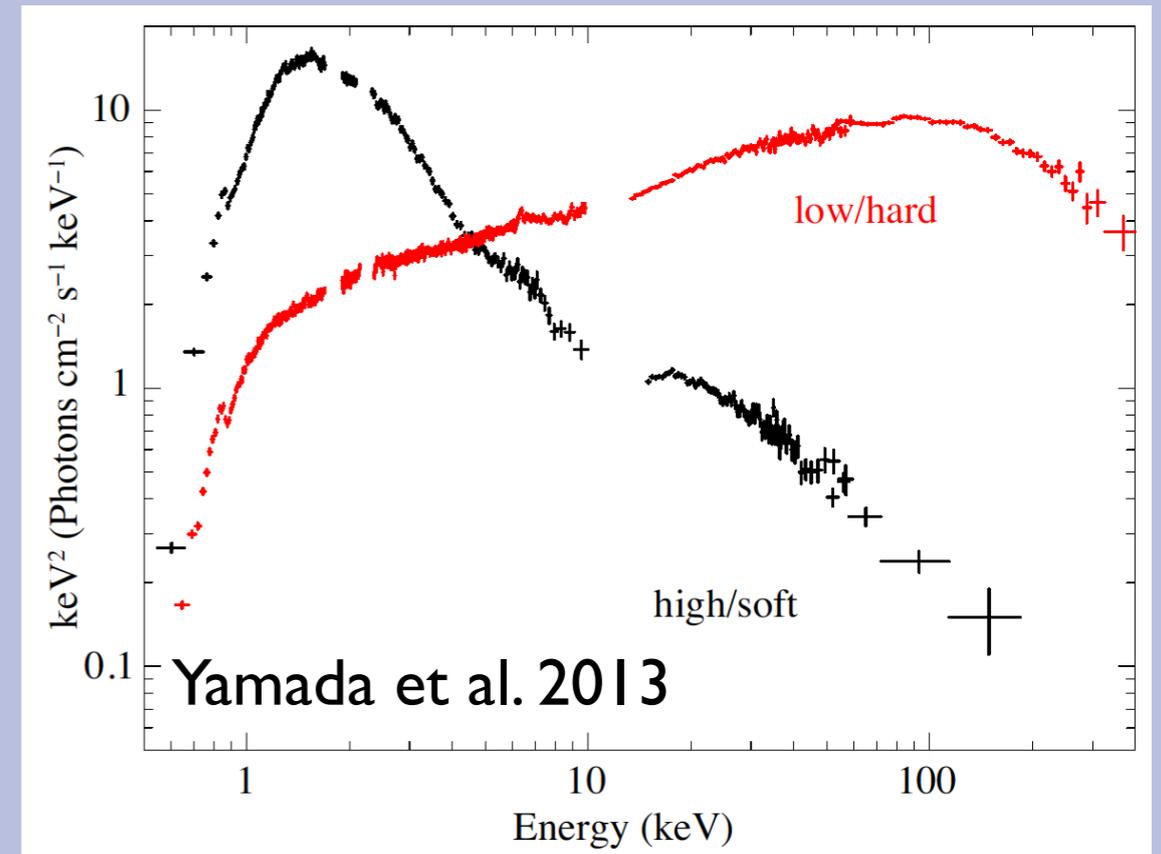
Theory and Simulation



SED

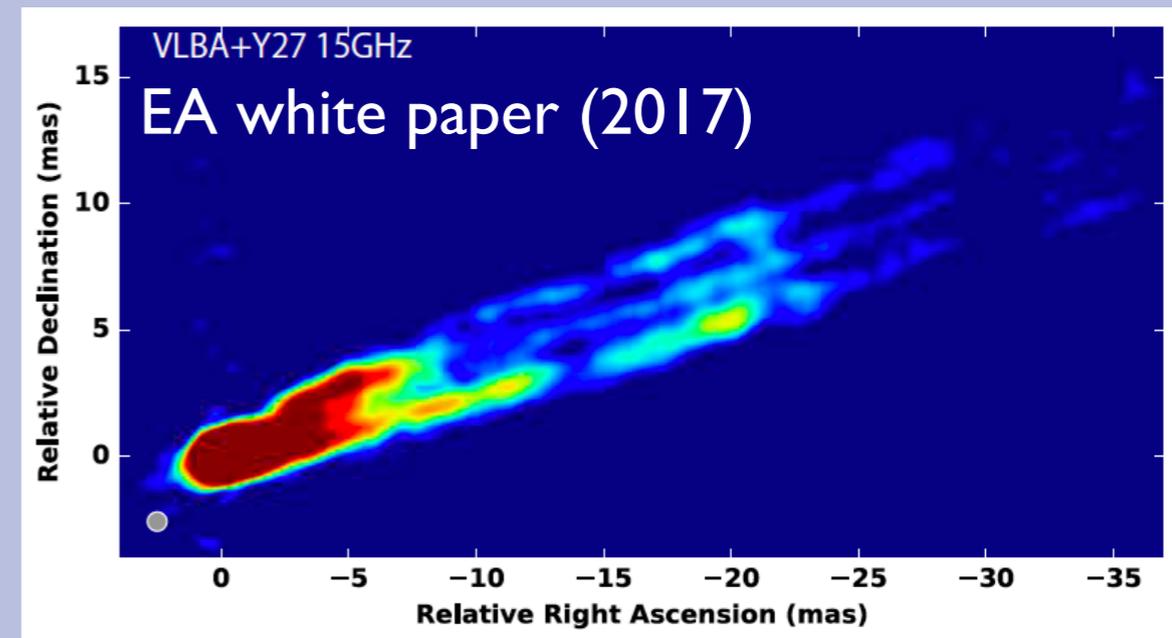
imaging

Observation



- 観測データとの直接比較による理論/シミュレーション・モデルの検証
- ブラックホール(BH)、中性子星(NS)近傍では曲がった時空の効果が重要

一般相対論的輻射輸送コードが必要!



どのような輻射輸送コードのスキームが必要か？

- 観測との直接比較をしたい

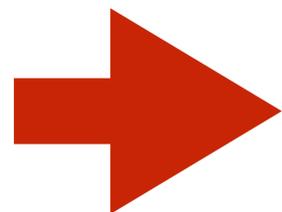
=> **ray-tracing法** (輻射場の位相空間をメッシュで分割せず emitter-observer間の光線軌道を一本ずつ解く方法)

- デメリット：計算量が多い
- メリット：詳細なスペクトル・イメージが得られる

- BH・NS近傍で重要なコンプトン過程を正確に扱いたい

=> **Monte-Carlo法**

- デメリット：計算量が多い
- メリット：多重散乱が容易に扱える、光子の振動数変化を正確に解ける



観測データとの詳細な比較のために
Ray-tracing + Monte Carlo法に基づく
一般相対論的輻射輸送コードを開発

開発した一般相対論的輻射輸送コードに実装した物理過程

	Our previous code (TK+ 2012)	Our <u>new</u> code (TK+2019?) 名前考え中	grmonty (Dolence +2009)	ODYSSEY (Pu + 2016)	pandurata (Schnittman & Krolik 2013)
GR effects	-	○	○	○	○
(thermal) Bremsstrahlung	○	○	- (ただし開発者内部では実装済)	-	?
(thermal) Synchrotron	△	○	○	○	?
(thermal) Compton scattering	○*	○	○	-	△
(non-thermal) Synchrotron	-	○	-	○	-
(non-thermal) Compton scattering	-	now implementing	-	-	-

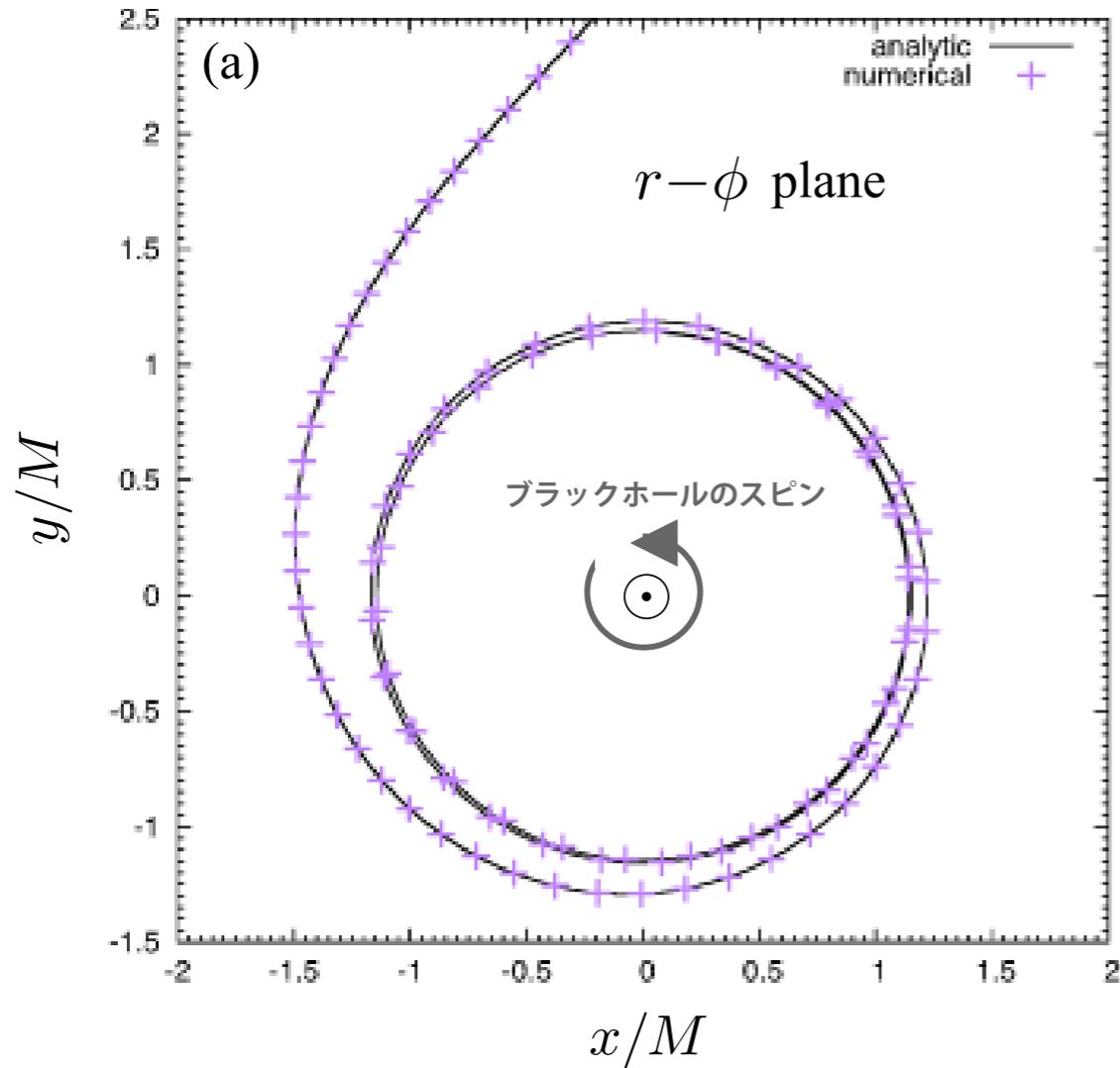
*Compton scattering should be calculated more correctly.

新コードではブラックホール・中性子星近傍において重要な輻射過程をほぼ全て取り入れた

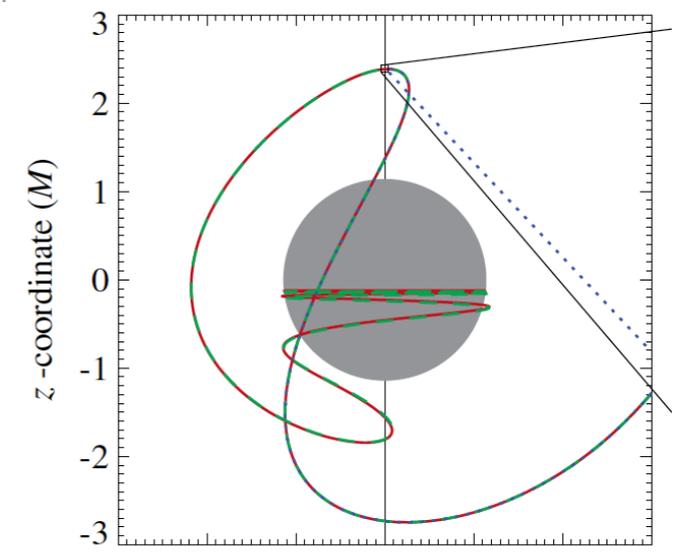
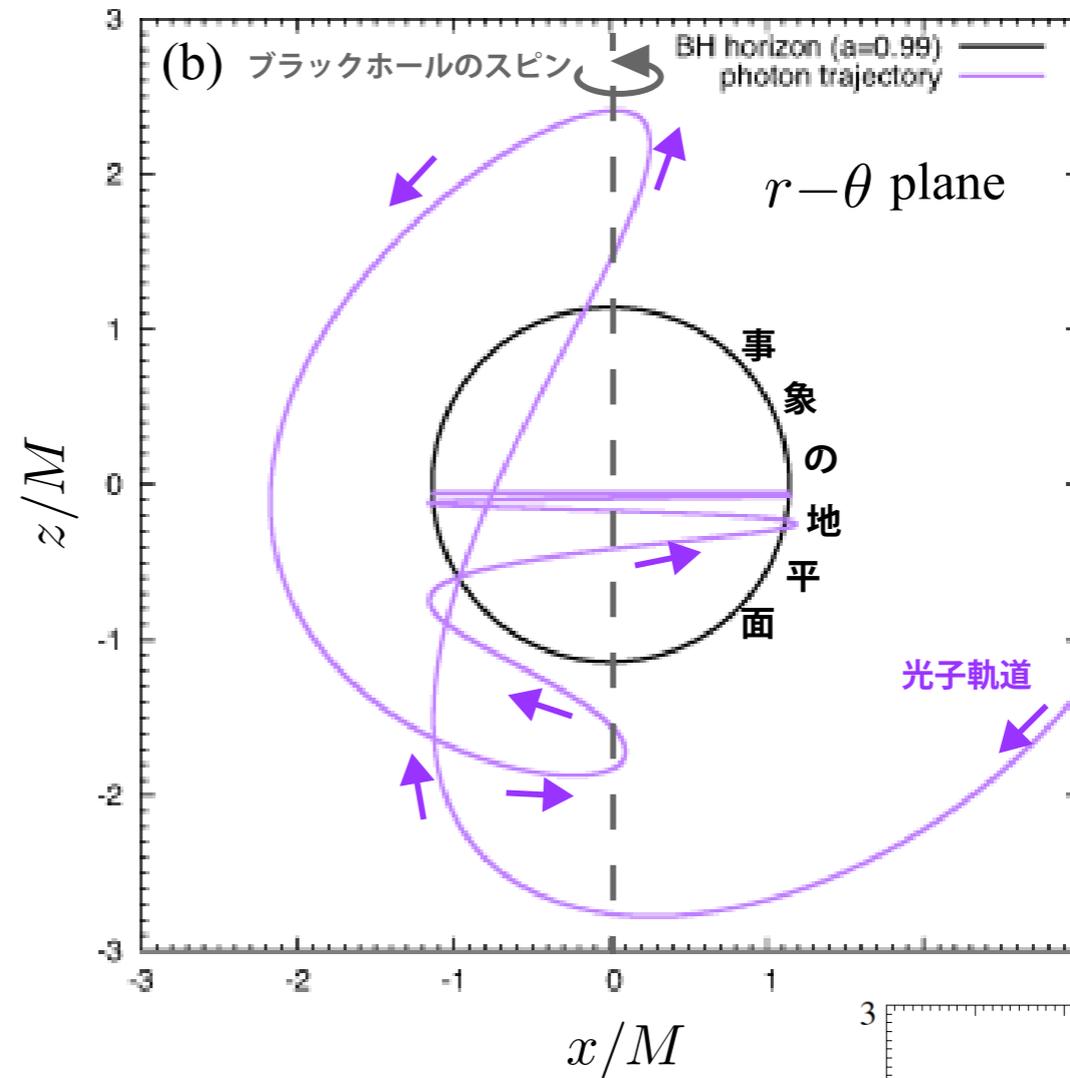
一般相対論的輻射輸送テスト

一般相対論的Ray-tracingソルバー テスト1 (光子軌道)

解析解との比較



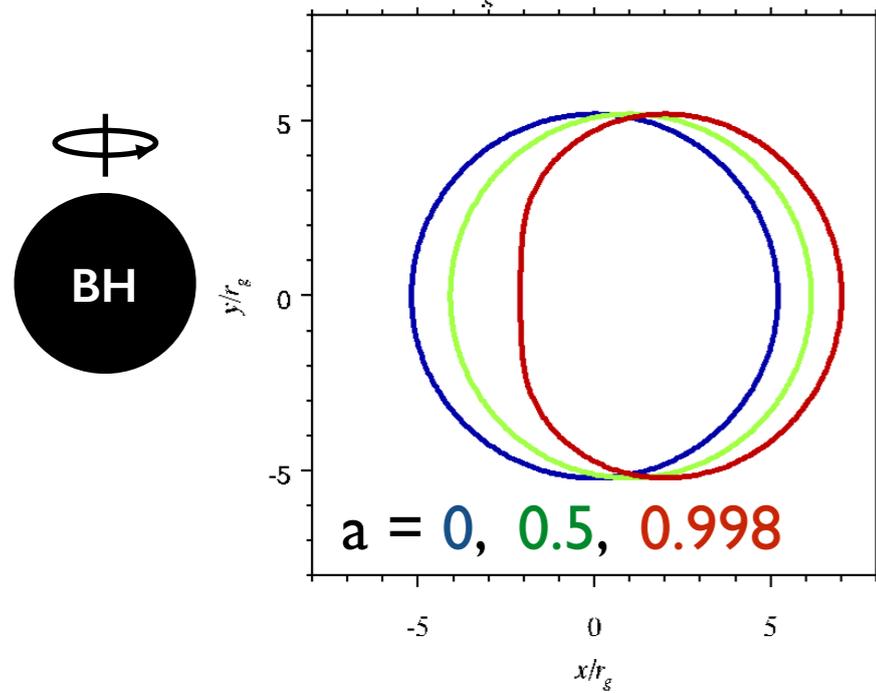
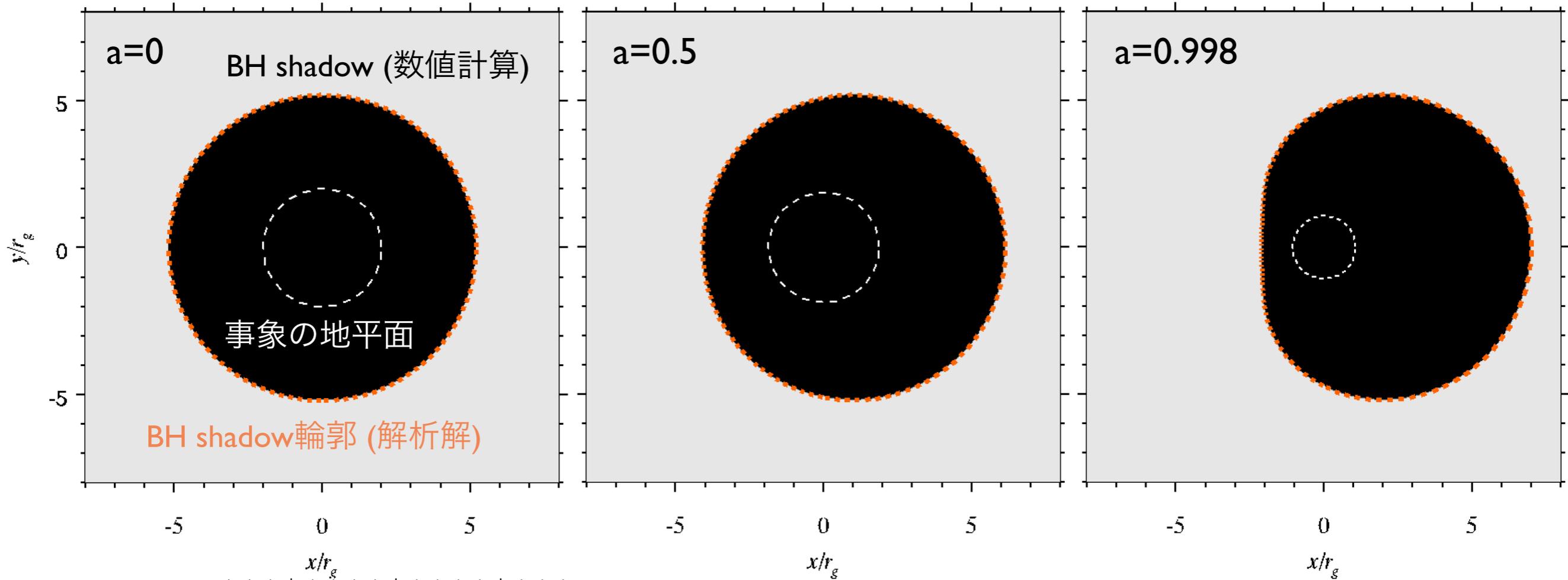
Chan + 2012との比較



解析解や過去の数値計算結果を再現できた

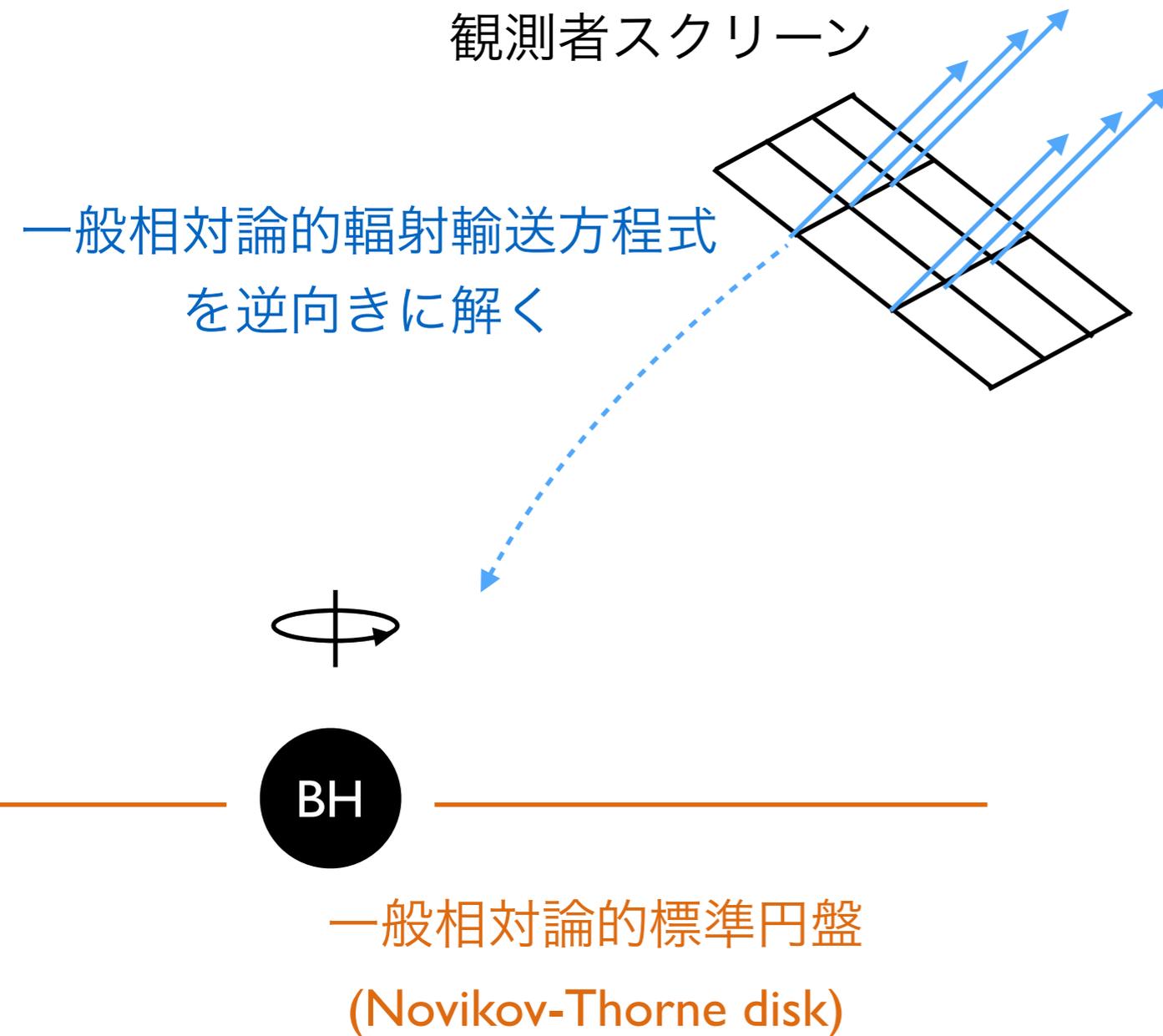
一般相対論的 ray-tracing ソルバー テスト2 (BH shadowテスト)

high spin →

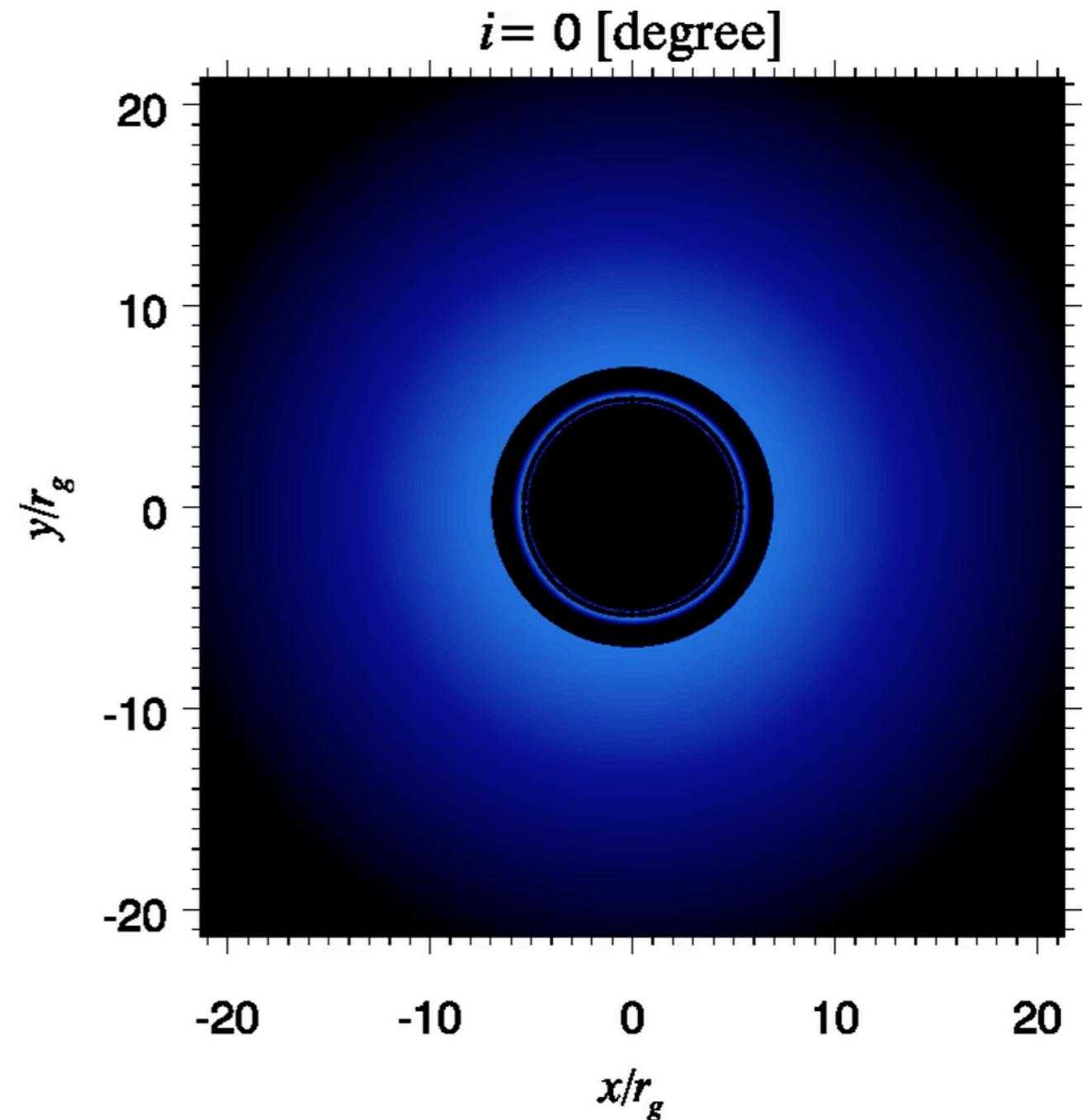


- BH重力で光子軌道が曲げられることにより形成される BH shadow 形状を再現.
- スピンが大きくなると BH shadow は回転軸に垂直方向にやや歪みながらシフトしていく.
- スピン0のとき shadow半径は $3\sqrt{3}r_g$. そして半径のスピン依存性は弱い. (r_g はシュバルツシルト半径の半分)

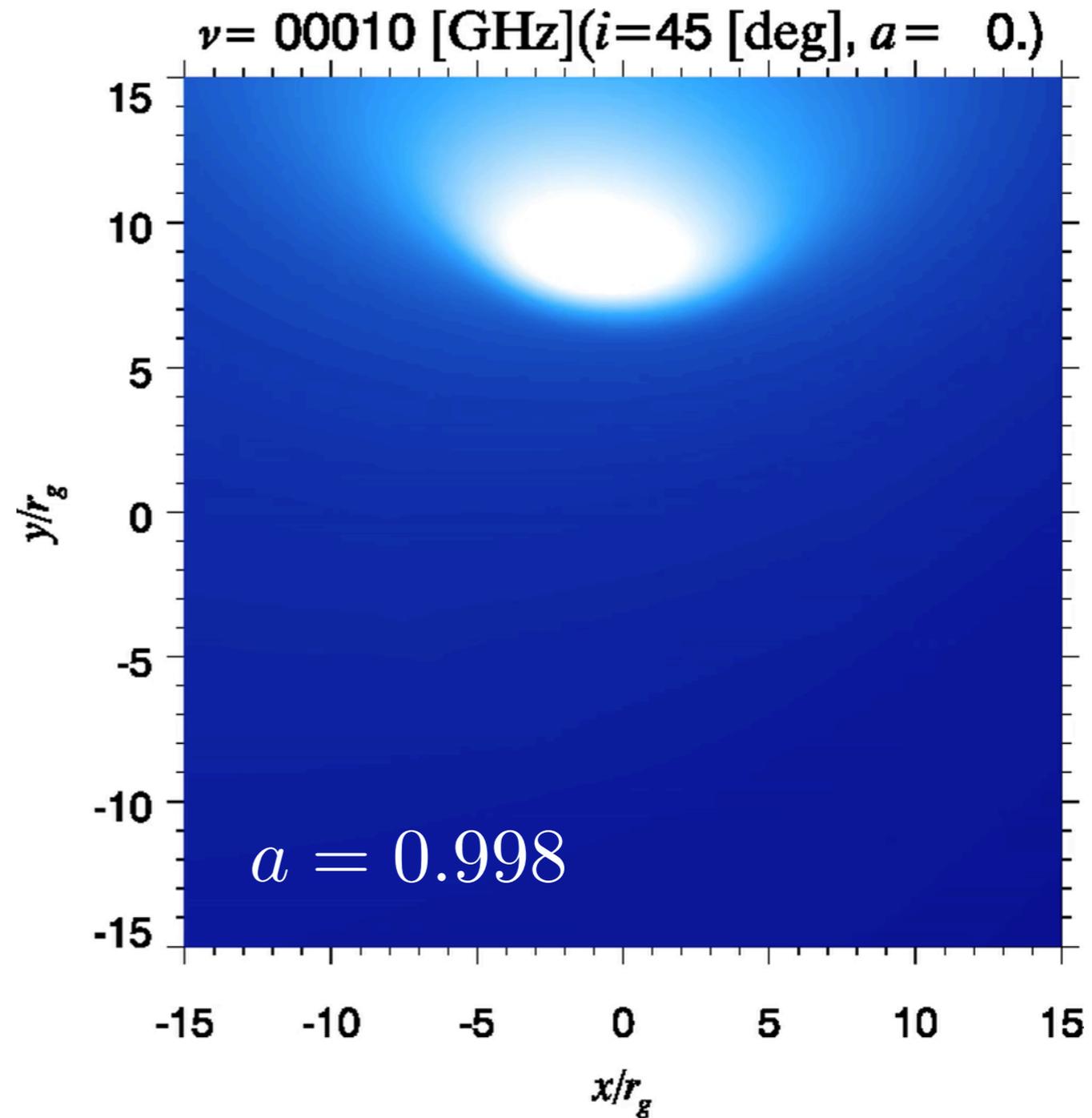
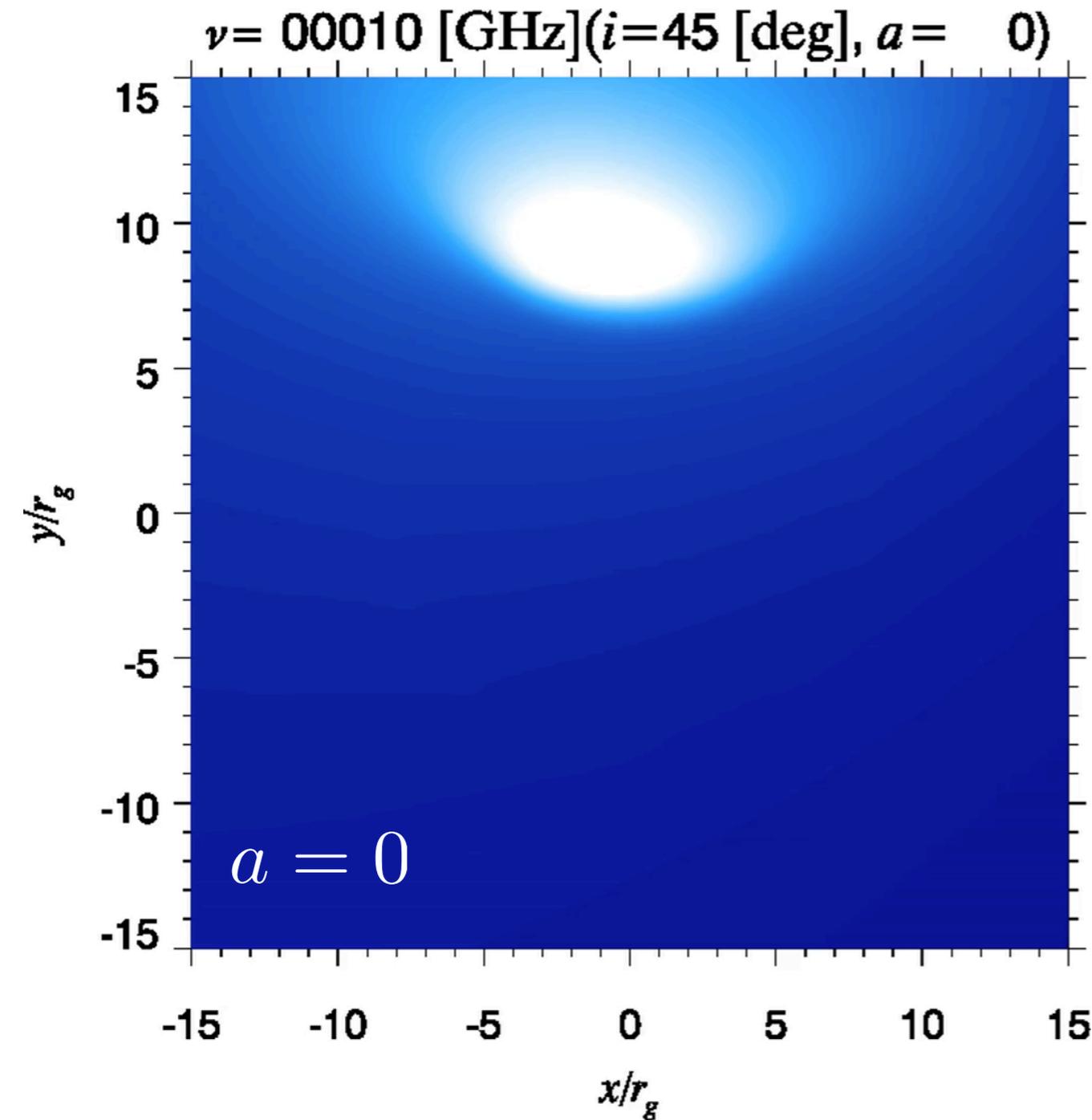
一般相対論的輻射輸送 ソルバー テスト1 (一般相対論的標準円盤のBHシャドー計算)



テスト計算 ($a=0$)



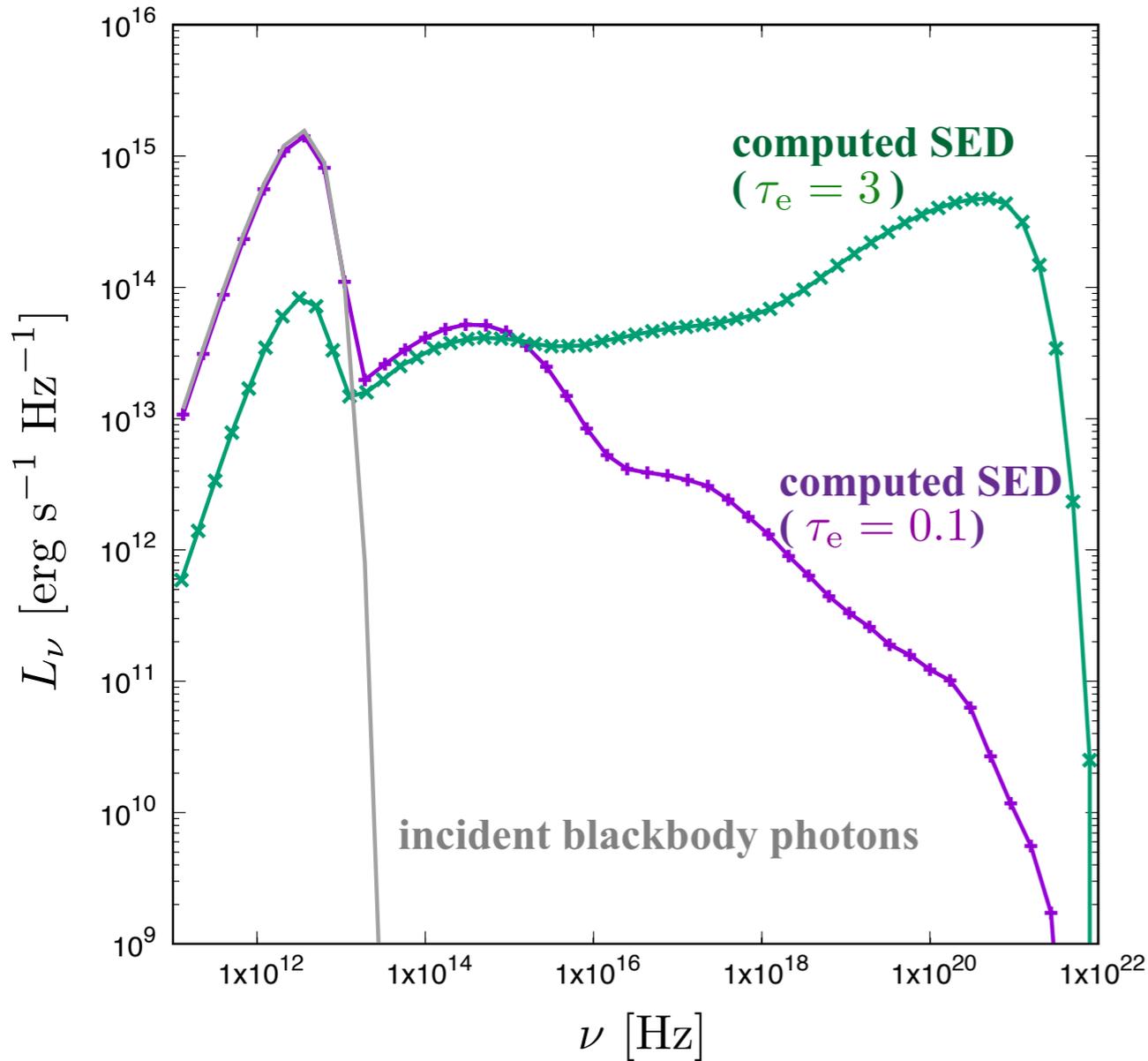
一般相対論的輻射輸送 テスト2 (簡易版 放射不良円盤モデル)



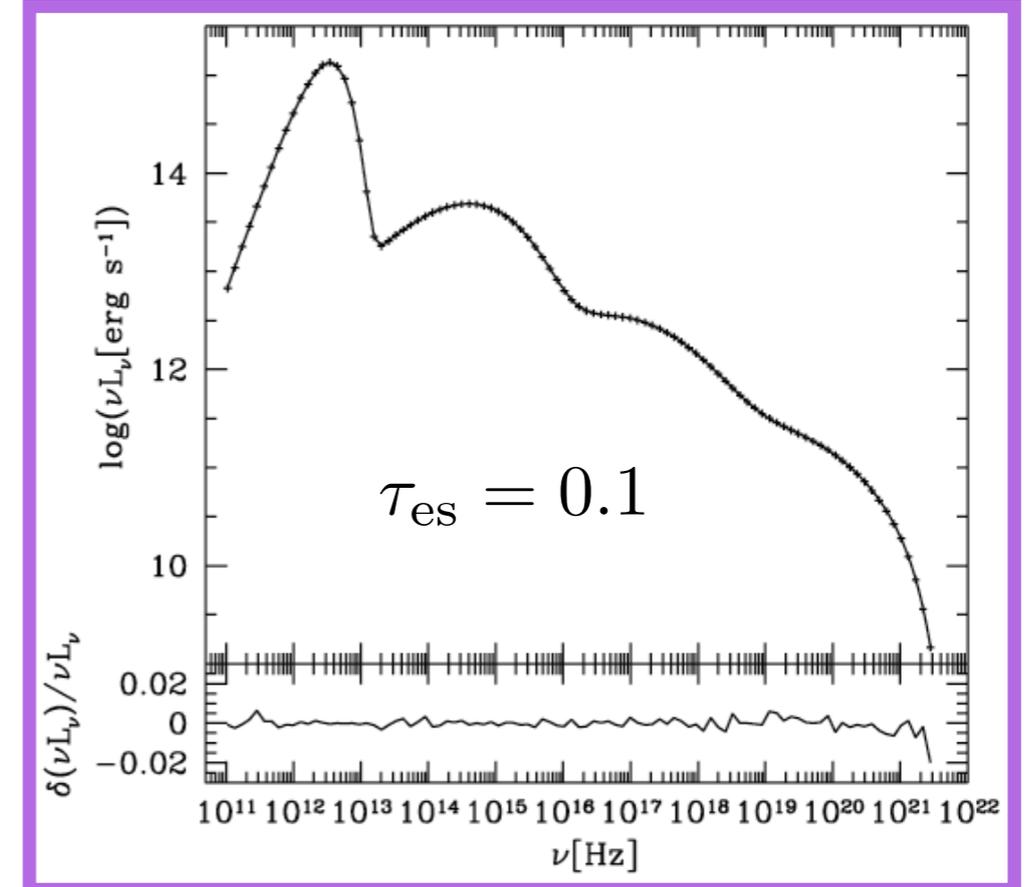
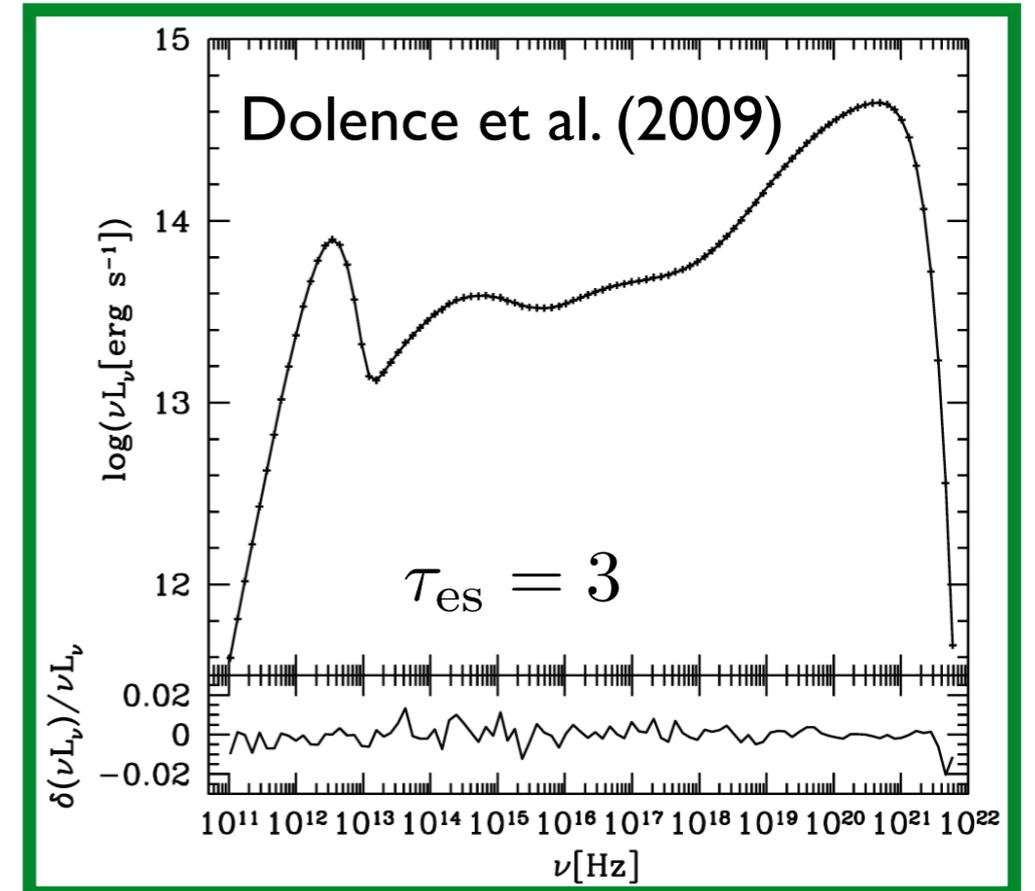
- 放射不良円盤(RIAF, ADAF)の簡易版モデルであるKeplerian Shell model (Falcke 2000, Broderick & Loeb 2006) を用いてshadowを計算.
- 放射過程はCyclo-synchrotron放射吸収(Mahadevan et al. 1996) を用いた.
- 約100 GHz以上でBH shadow が現れ、過去の計算を再現.

MC法に基づくコンプトン散乱テスト

黒体放射光子の逆コンプトン散乱

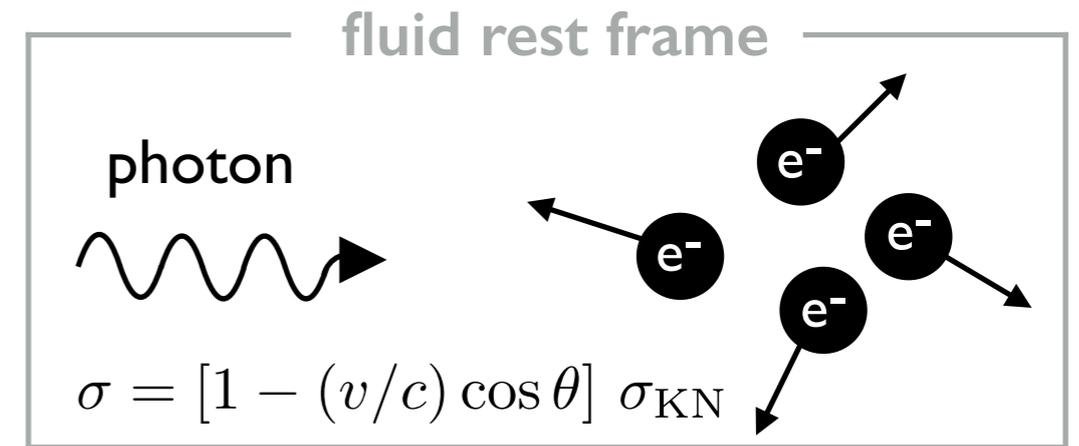
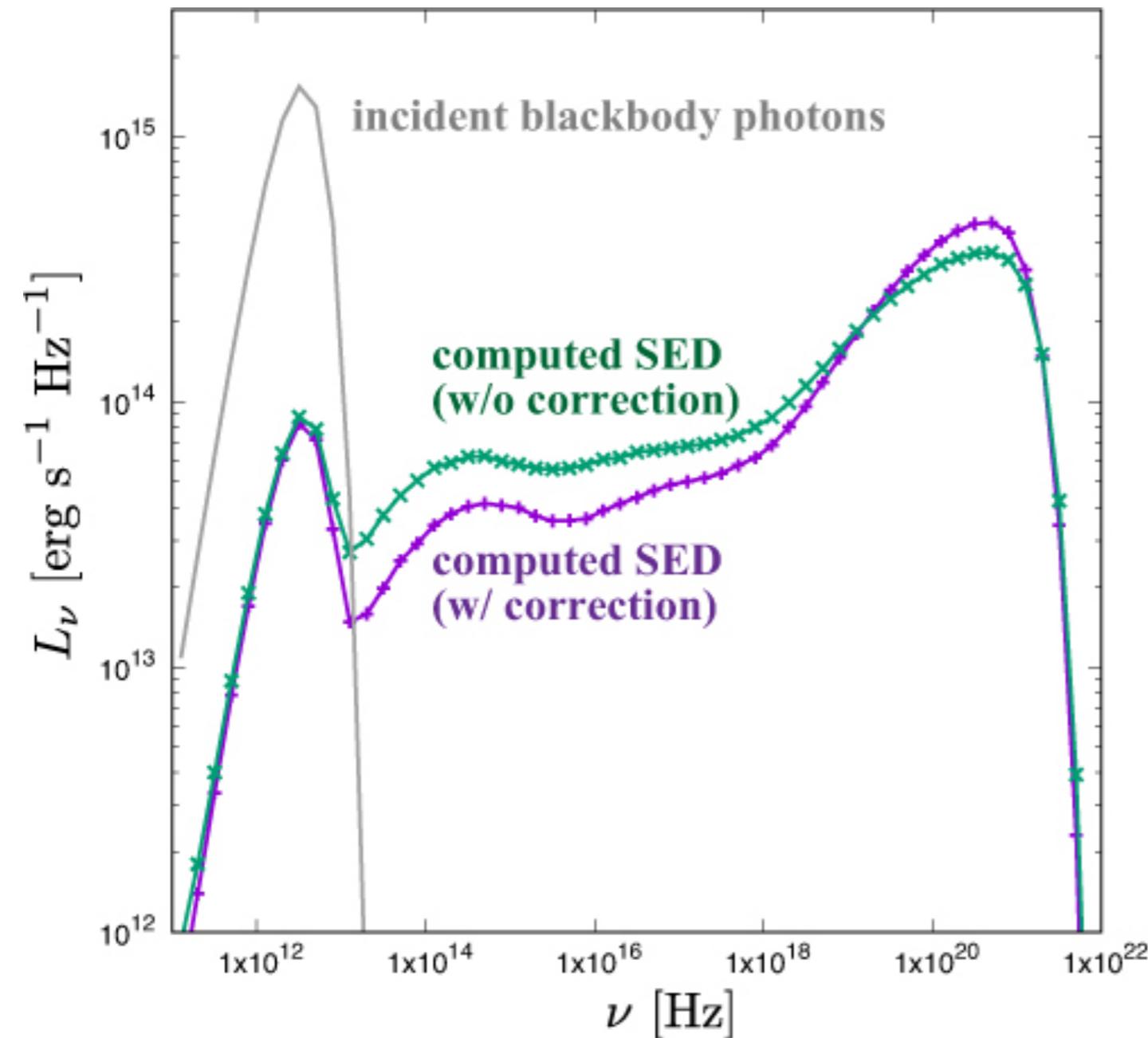


- プラズマ球の中心から黒体放射光子を放出させコンプトン散乱 (吸収無視)
- 黒体放射光子の輻射温度 : $\frac{kT_{\text{BB}}}{m_e c^2} = 10^{-8}$
- プラズマ球の電子温度 : $\frac{kT_e}{m_e c^2} = 4$
- 光学的厚み : $\tau_{\text{es}} = 3$ $\tau_{\text{es}} = 0.1$



入射光子方向を考慮した散乱電子のMCサンプリング

(最初の指摘は Gorecki & Wilchewski 1984)



- 散乱断面積の入射光子方向依存性を**考慮した計算**と**考慮しない計算**を比較。

- 光子の輻射温度：

$$\frac{kT_{\text{BB}}}{m_e c^2} = 10^{-8}$$

- 電子温度と光学的厚み：

$$\frac{kT_e}{m_e c^2} = 4 \quad \tau_{\text{es}} = 3$$

- 散乱電子をMCサンプリングする際に入射光子の方向依存性を考慮することは重要!
- 熱的コンプトン散乱は過去の”良い”計算を再現できた。(非熱的電子によるコンプトン散乱は現在実装中.)

開発した振動数依存の一般相対論的輻射

輸送コードの適用:

ブラックホール・中性子星への超臨界降着流の輻射スペクトル計算

超高光度X線源(ULXs)

- 極めて明るいX線点源 (系外銀河で観測)
- 等方仮定光度 > 恒星質量BH、中性子星のエディントン光度：

$$L \sim 10^{39-40} [\text{erg s}^{-1}]$$
$$\sim 10^{1-2} (M/M_{\odot}) L_{\text{Edd}}$$

- 候補モデル：

- ✓ 中性子星 + 超臨界降着
- ✓ 恒星質量BH + 超臨界降着
- ✓ 中間質量BH + 亜臨界降着

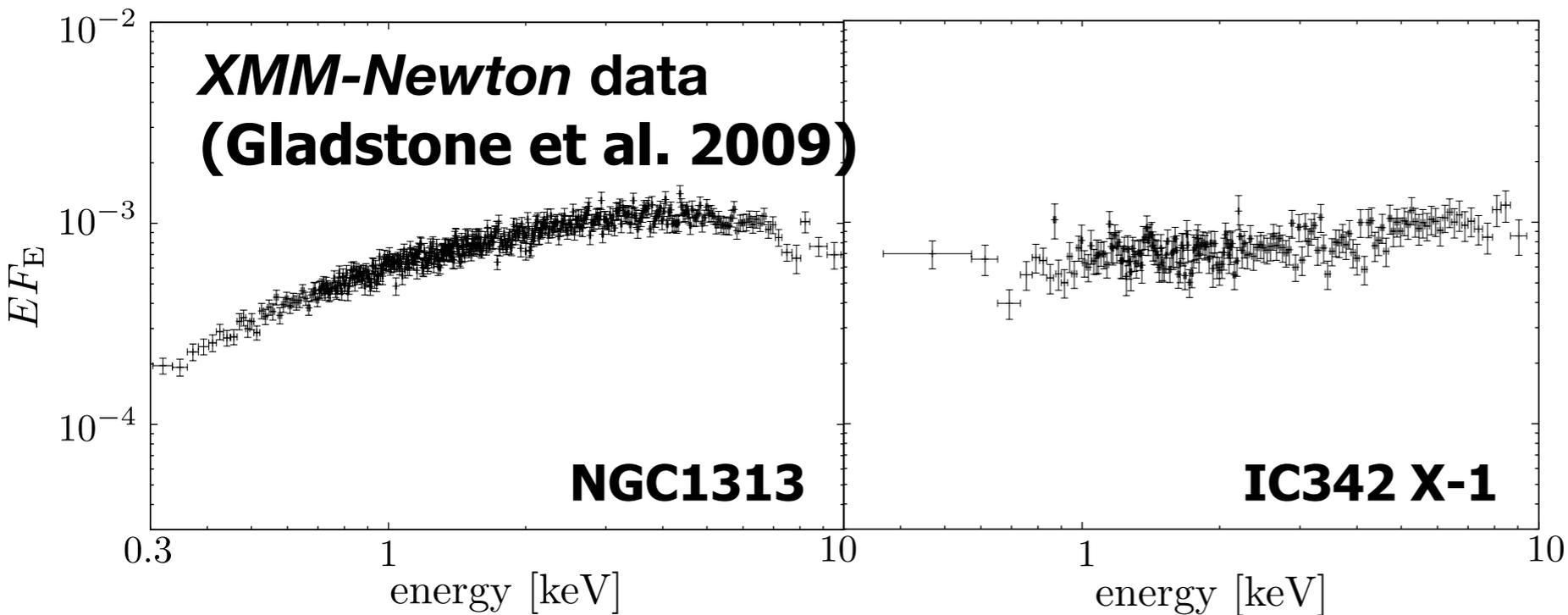


ULXパルサーの発見で、一部のULXは中性子星であることが明らかになった。

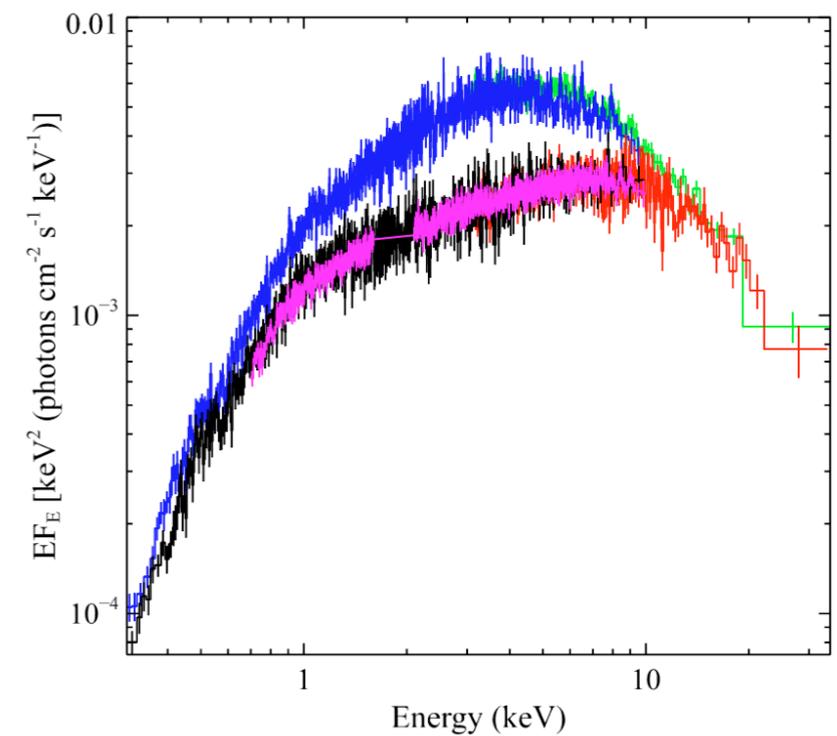
しかし、2つの超臨界降着モデルの違いはどのように現れる？

輻射スペクトルから判別可能か？

ULXのスペクトル



**XMM-Newton + NuSTAR
(Walton et al. 2014)**

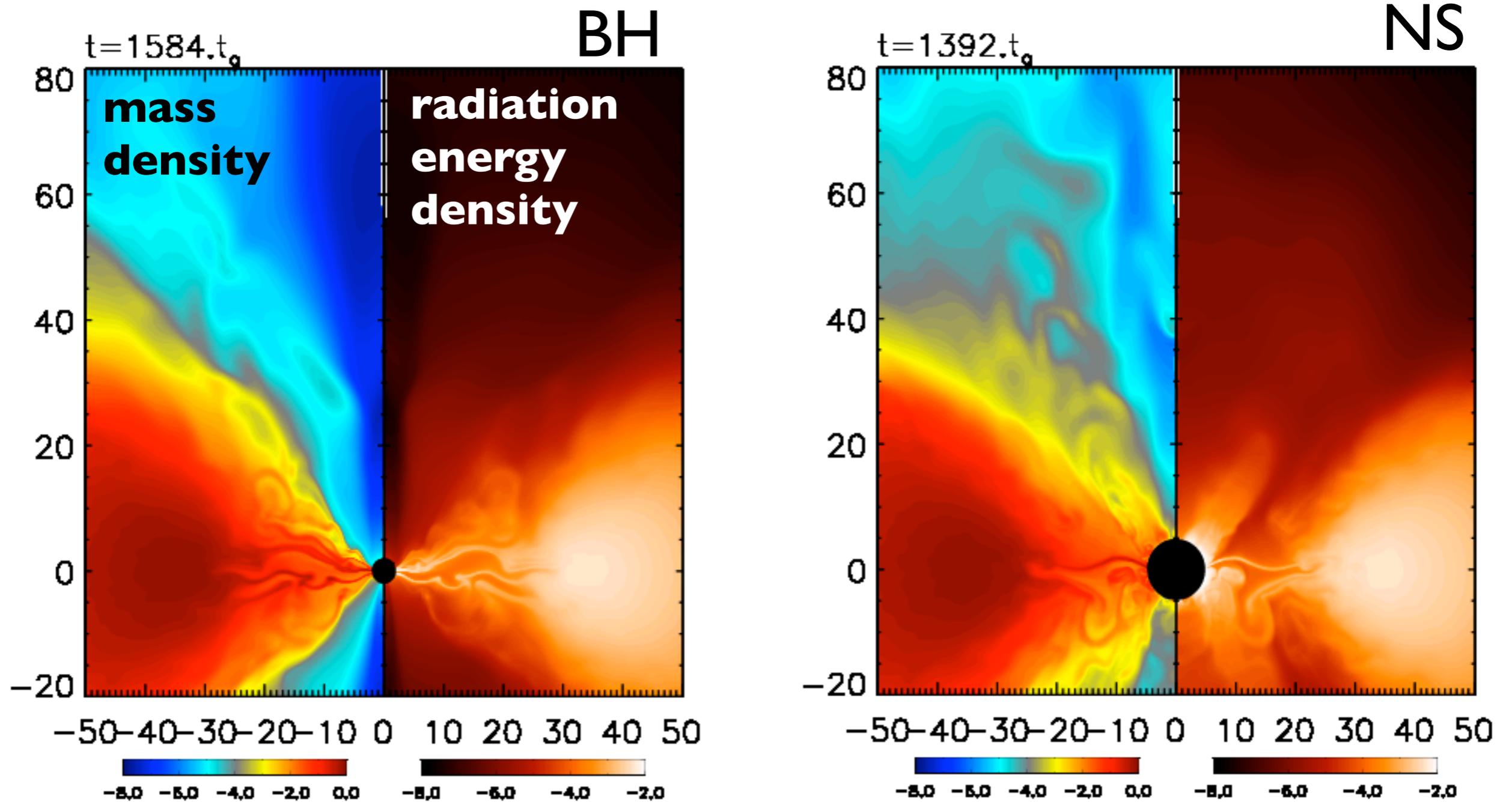


ULXは大きく分けて
(1) 5 keV付近のrolloverを伴うソフト状態
(2) 20keV付近まで冪が伸びるハード状態

**これらはエディントン限界以下の系内ブラックホールや活動
銀河中心核では現れない特徴**

(Gladstone et al. 2009, Yoshida et al. 2013, Walton et al. 2014)

超臨界降着BH & NSの 一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション(GRRMHD)



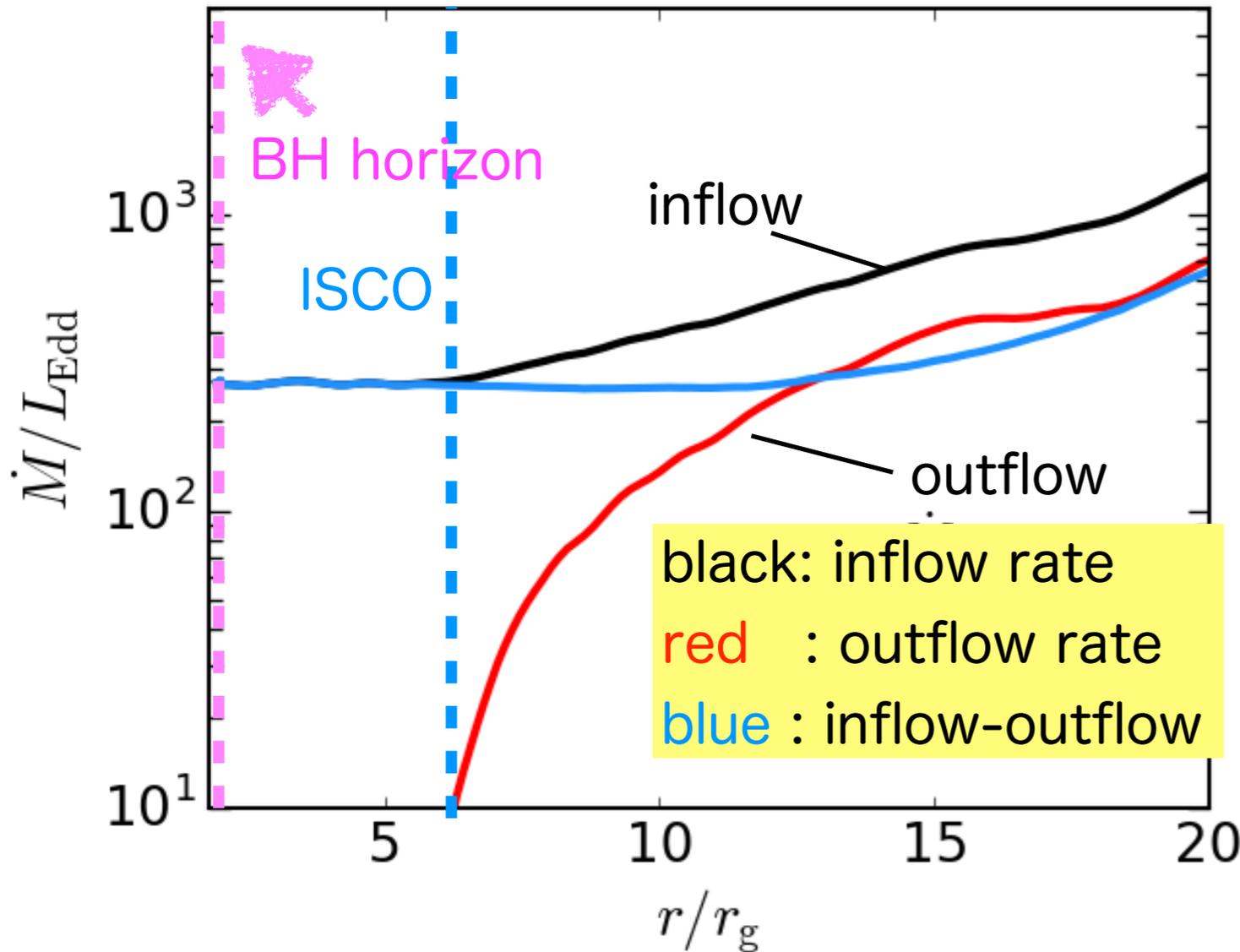
GR-RMHD simulation [Takahashi et al. (2018)]

GRRMHDシミュレーションにおけるインフロー・アウトフロー率

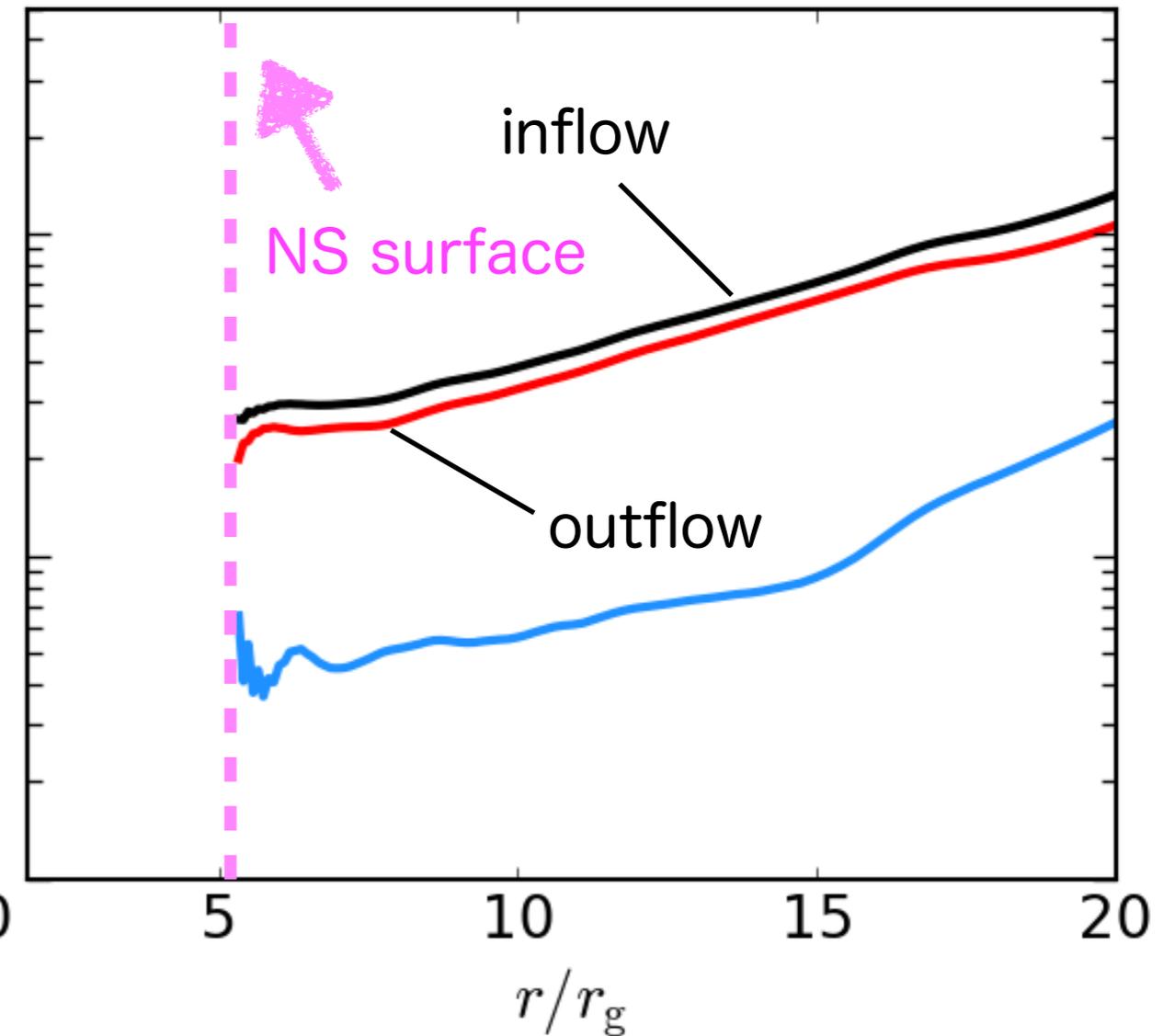
(高橋さんスライドを転用)

Takahashi, Mineshige, Ohsuga '18

Non-Rotating Black Hole



Non-Rotating Neutron Star



- BHでもNSでも超臨界降着は起きる
- NSへの質量降着率はBHに比べ、正味の質量降着率は1桁下がる(強力なアウトフローが発生するため)
- **SEDに違いは現れるのか?**

def. of outflow/inflow rate

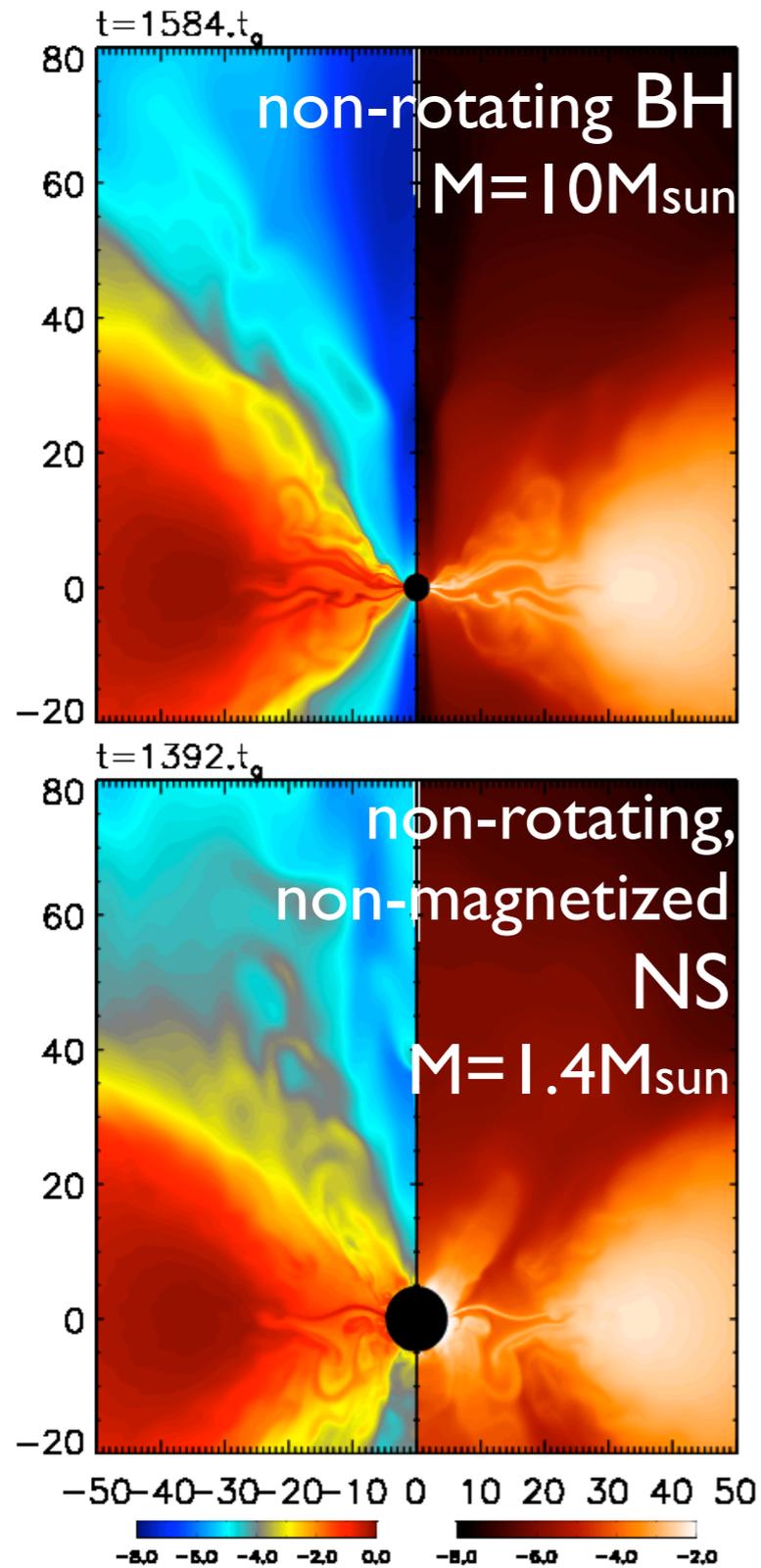
$$\dot{M}_{\text{out}} \equiv \int \rho u^r \theta(u^r) \sqrt{-g} d\theta d\phi$$

$$\dot{M}_{\text{in}} \equiv \int \rho u^r \theta(-u^r) \sqrt{-g} d\theta d\phi$$

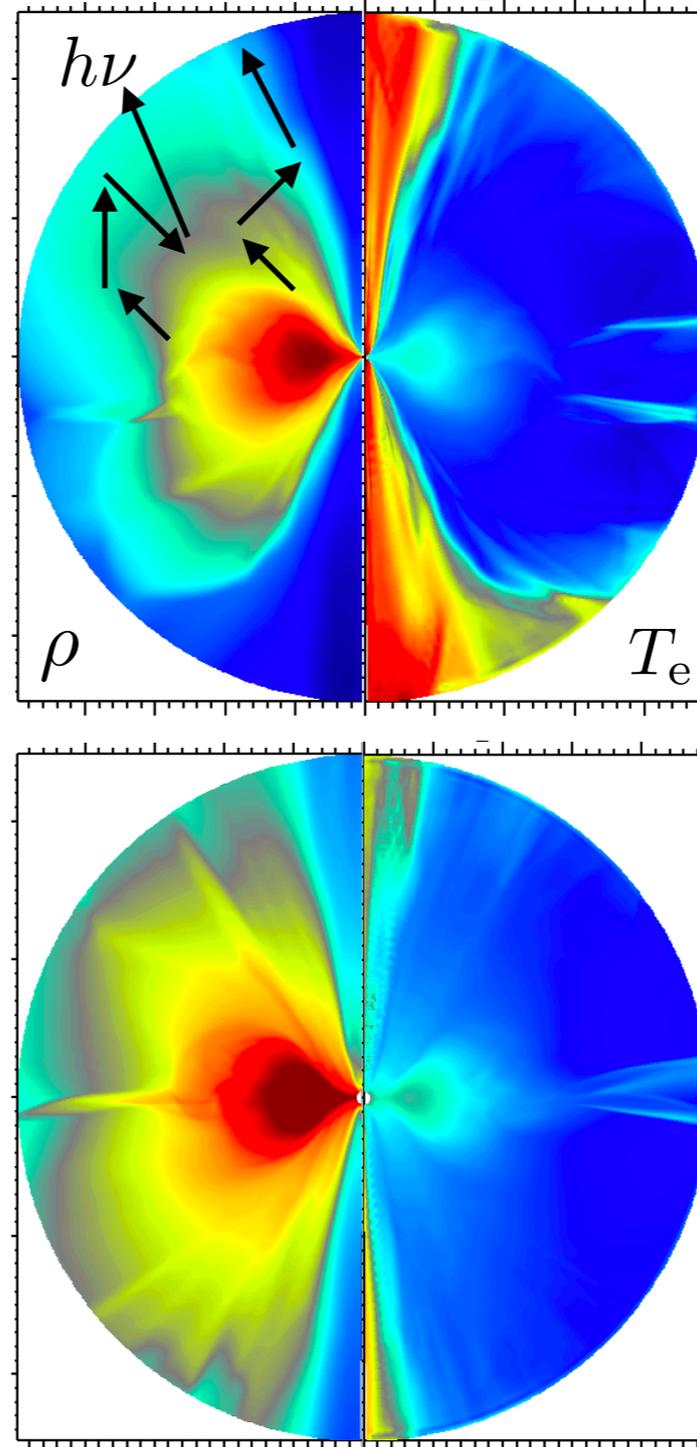
計算方法

GR ray-tracing radiative transfer with MC method
(inc. Bremsstrahlung, Comptonization)

GRRMHD simulation

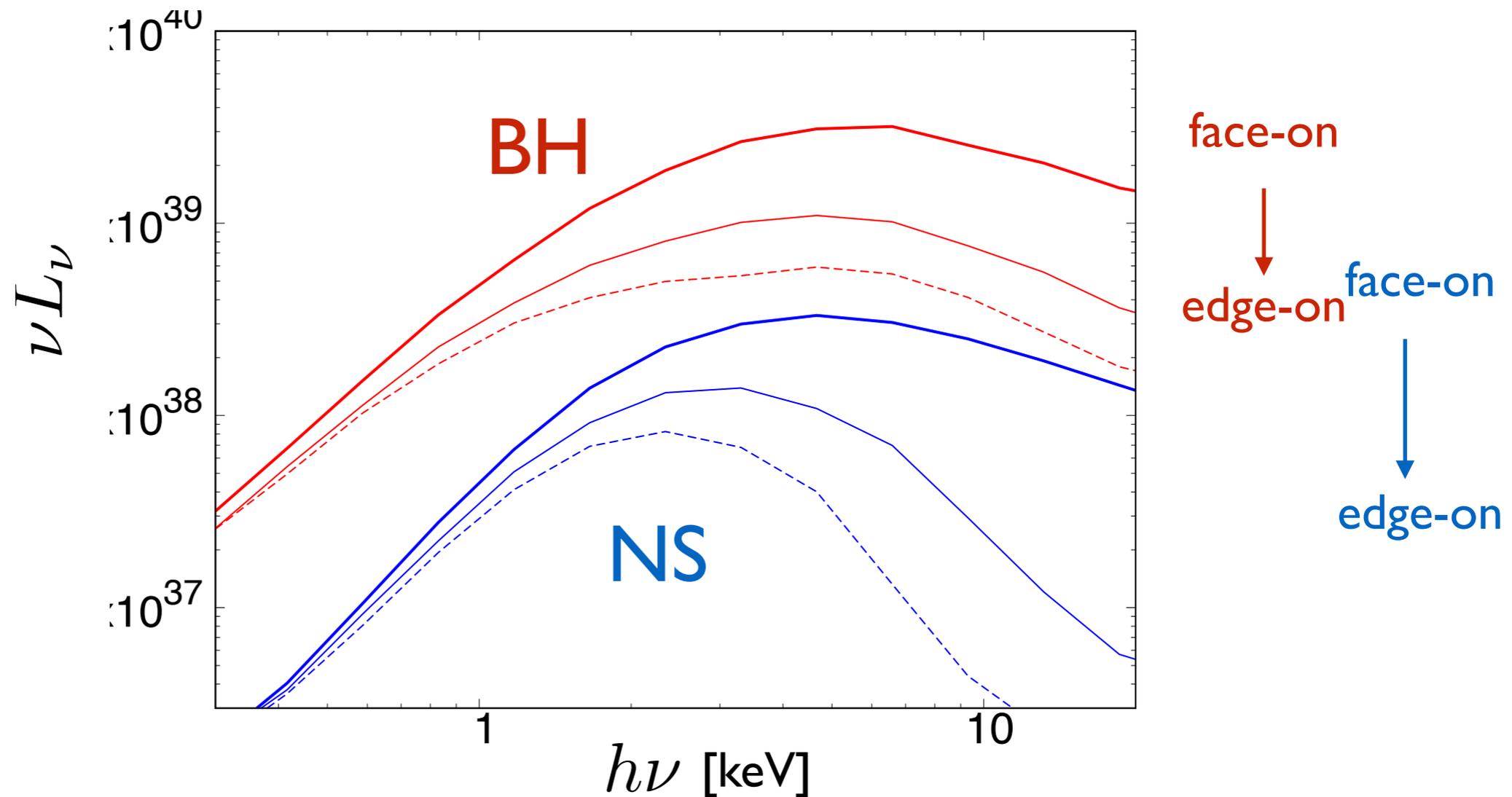
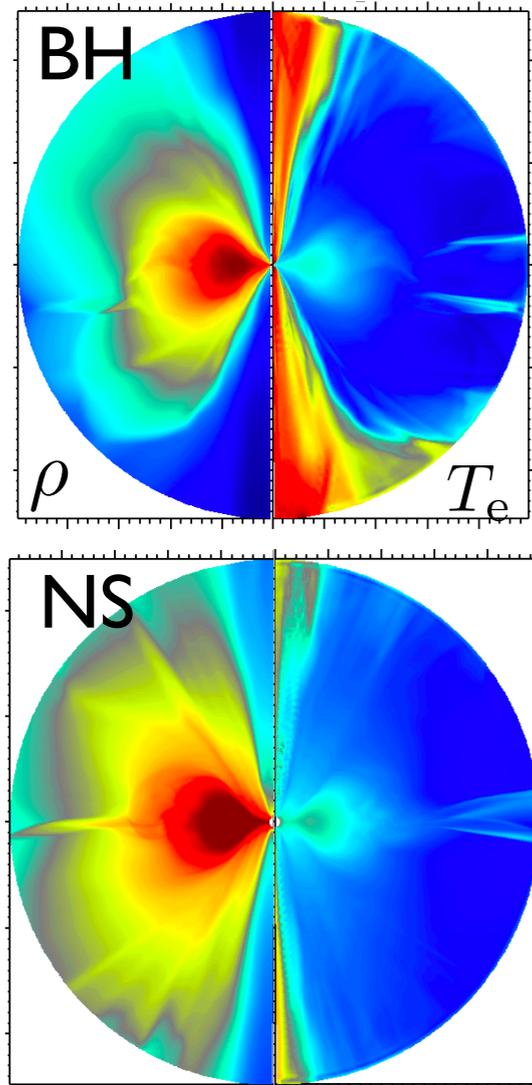


密度
温度
4元速度
時間平均



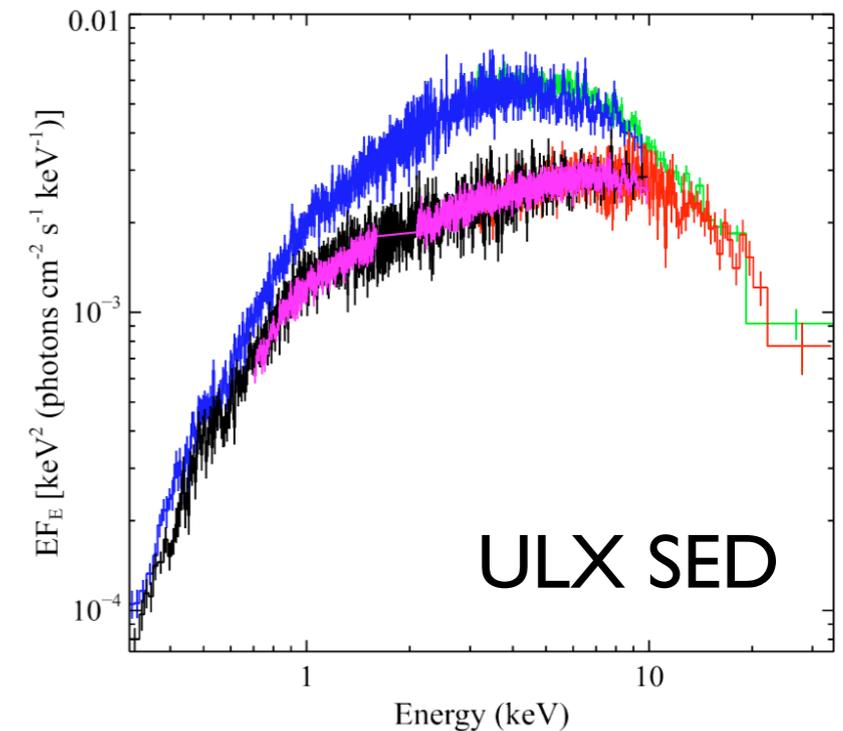
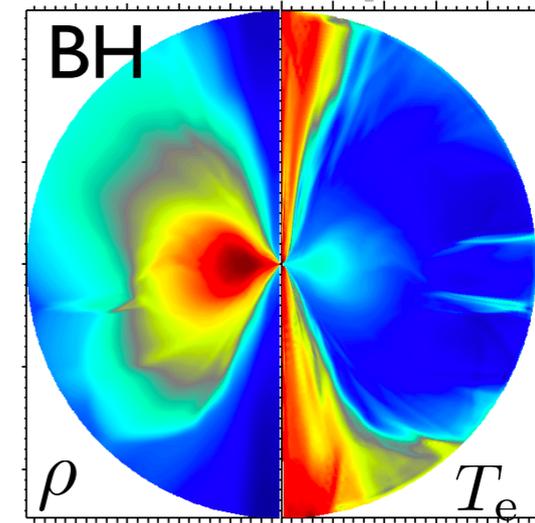
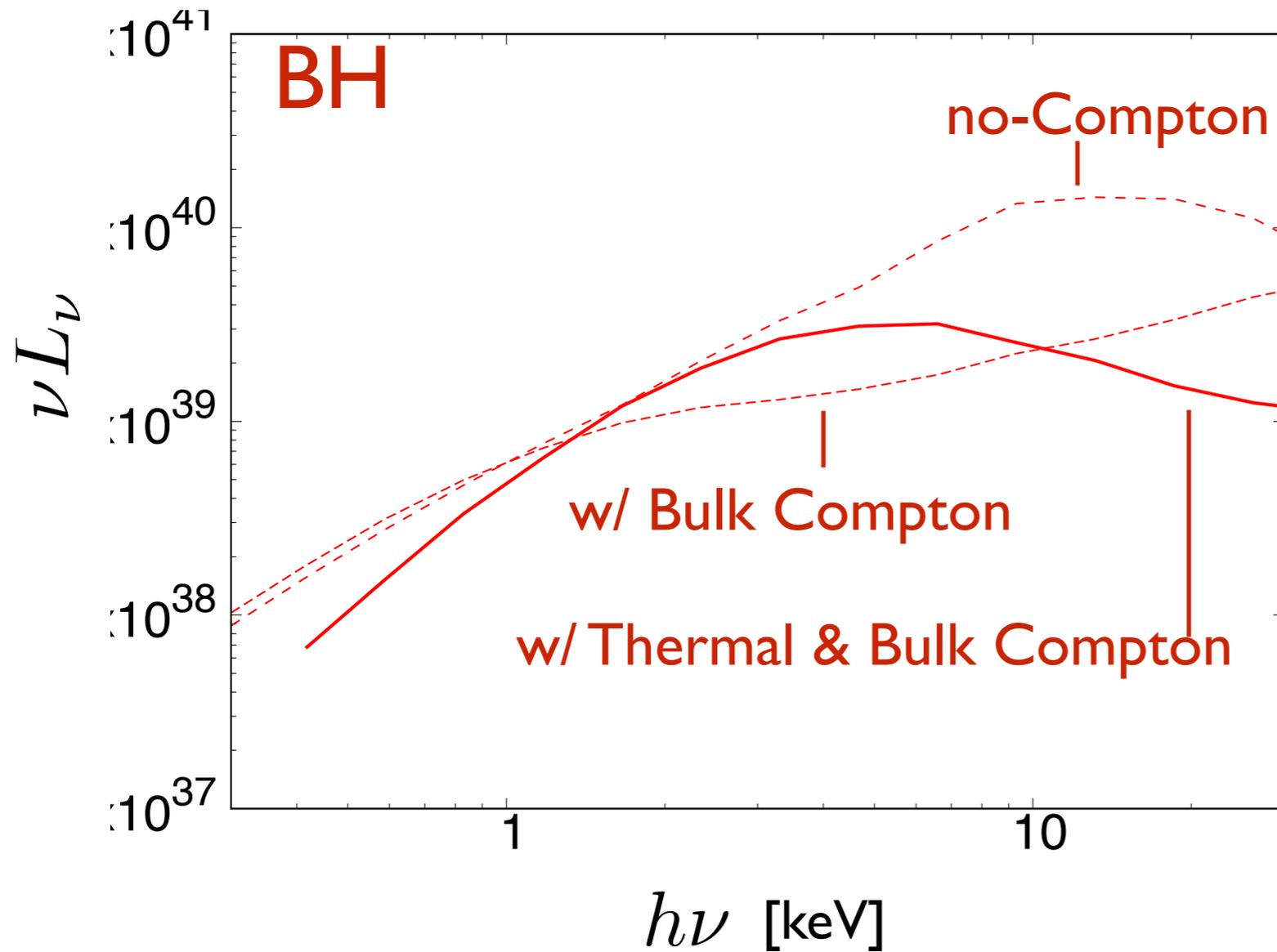
SED

BHとNSの輻射スペクトル比較



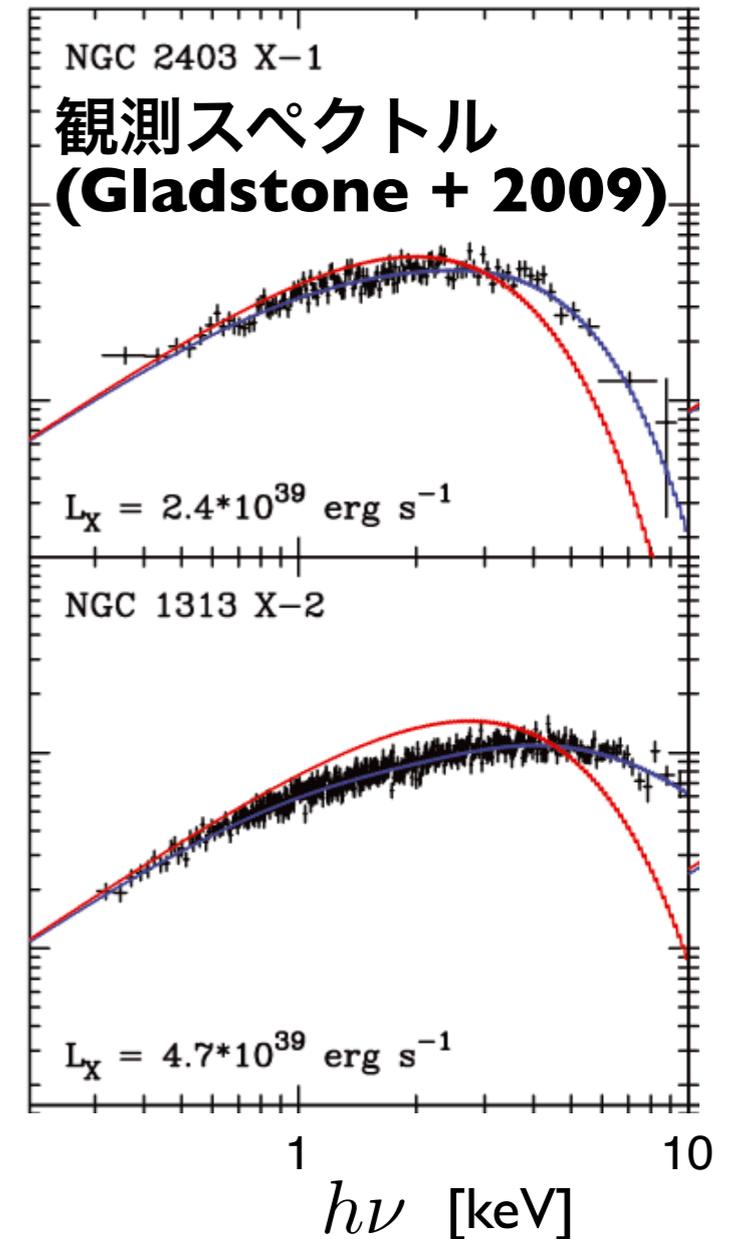
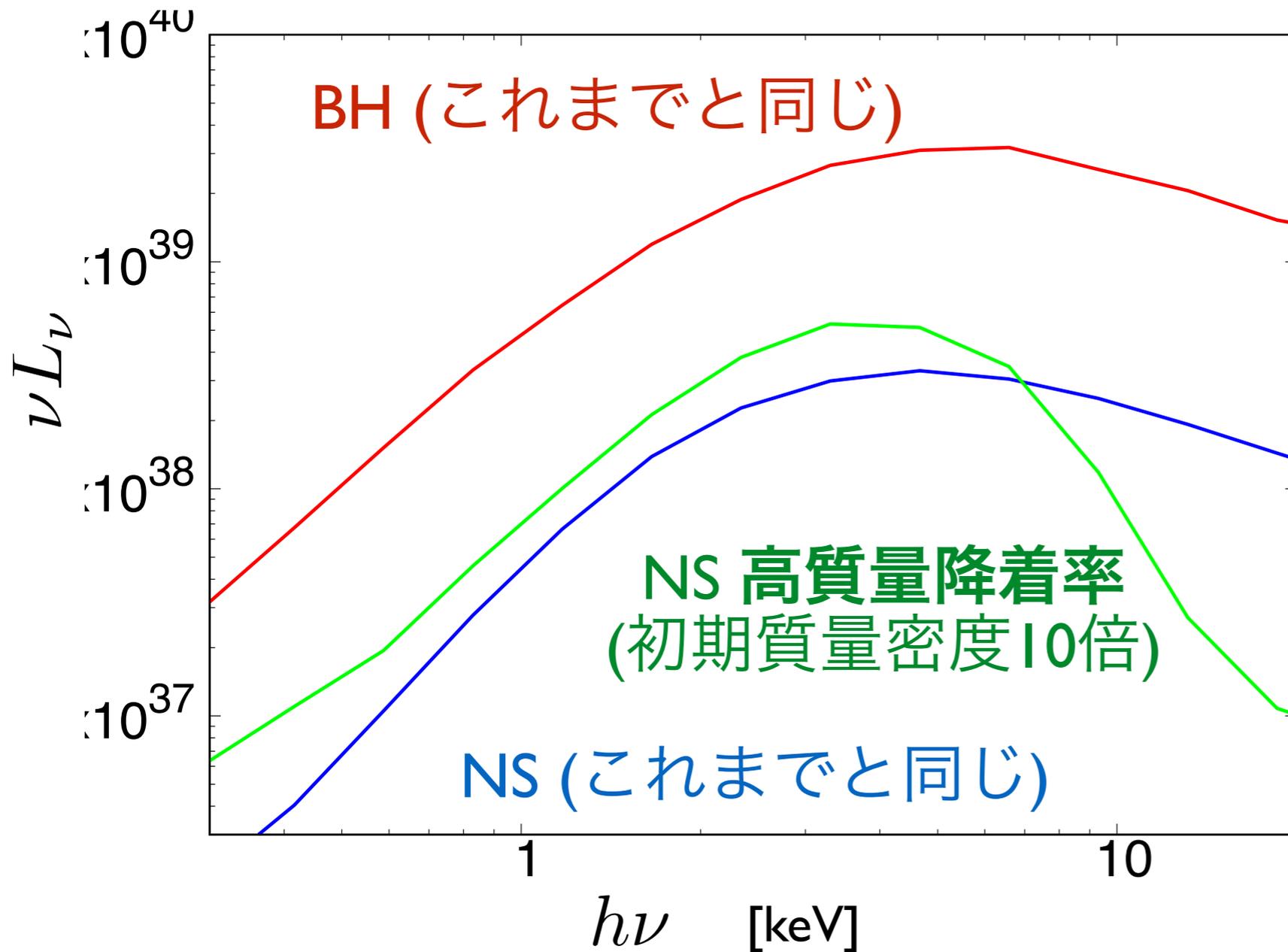
- BHもNSもULXに特徴的な5keV付近のrolloverが現れている。
- BHの方がややピークの位置が高振動数側でややhard (ただし円盤温度はNSの方が高温)。

コンプトン効果がスペクトルに与える影響



- バルクコンプトン散乱がSEDを硬くする
- 熱的コンプトン散乱がSEDをソフトにし**5keV 付近のroll-overを形成=>**

(preliminary) NSへの降着率を増加させた場合



- NSへの質量降着率を増やすと硬X線光子が脱出しにくくなり、よりソフトに。
- 同じ光度でBHとNSを比較すると、BHの方が有意に硬いスペクトルになると予想される。(現在、様々な質量降着率の計算を行なっている。)

=> BHとNSを区別できるかもしれない！

まとめ

- **Ray-tracing + Monte Carlo法に基づく一般相対論的輻射輸送コードを開発した。**
- GRRMHDシミュレーションのポストプロセスにより、超臨界降着を起こすブラックホール(BH), 中性子星(NS)の一般相対論的輻射スペクトル計算を実施した。
- NSの方が種光子のピーク振動数は高い(∴降着円盤が高温)が、観測されるSEDはソフトになる。NSからの高密度アウトフローにおけるdownscatteringがSEDをソフトにしているためである。**ひょっとしたら超臨界降着を起こすBHとNSが区別できるかもしれない。**

京・ポスト京でやってみたいこと

- 短期的
 - ✓ 時間依存の一般相対論輻射輸送計算 (京、ポスト京であれば可能) => スペクトルやイメージの時間変動計算結果と詳細な観測との比較が可能になる。
 - ✓ 様々なブラックホール (恒星質量ブラックホール、中間質量ブラックホール、超大質量ブラックホール)の計算や磁場を持った中性子星の計算に適用。
- 中期的
 - ✓ 偏光を取り入れた計算
- 長期的
 - ✓ 磁気流体とMC輻射輸送の完全カップリング

観測とシミュレーションの直接比較から

ブラックホール・中性子星の質量・スピンの測定を目指す