

ブラックホール降着流・噴出流における 輻射輸送計算： 輻射スペクトルおよびイメージング計算

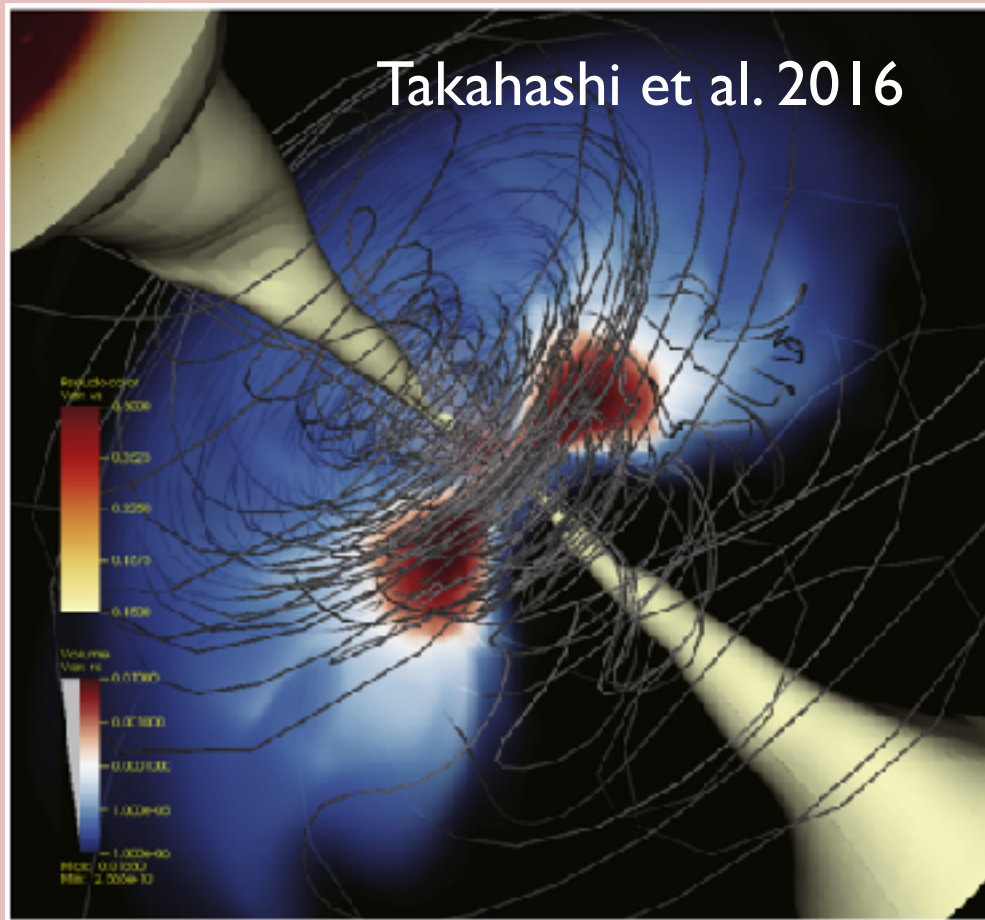
川島 朋尚 (国立天文台)

共同研究者：大須賀健 (国立天文台/総研大)

観測的可視化の重要性

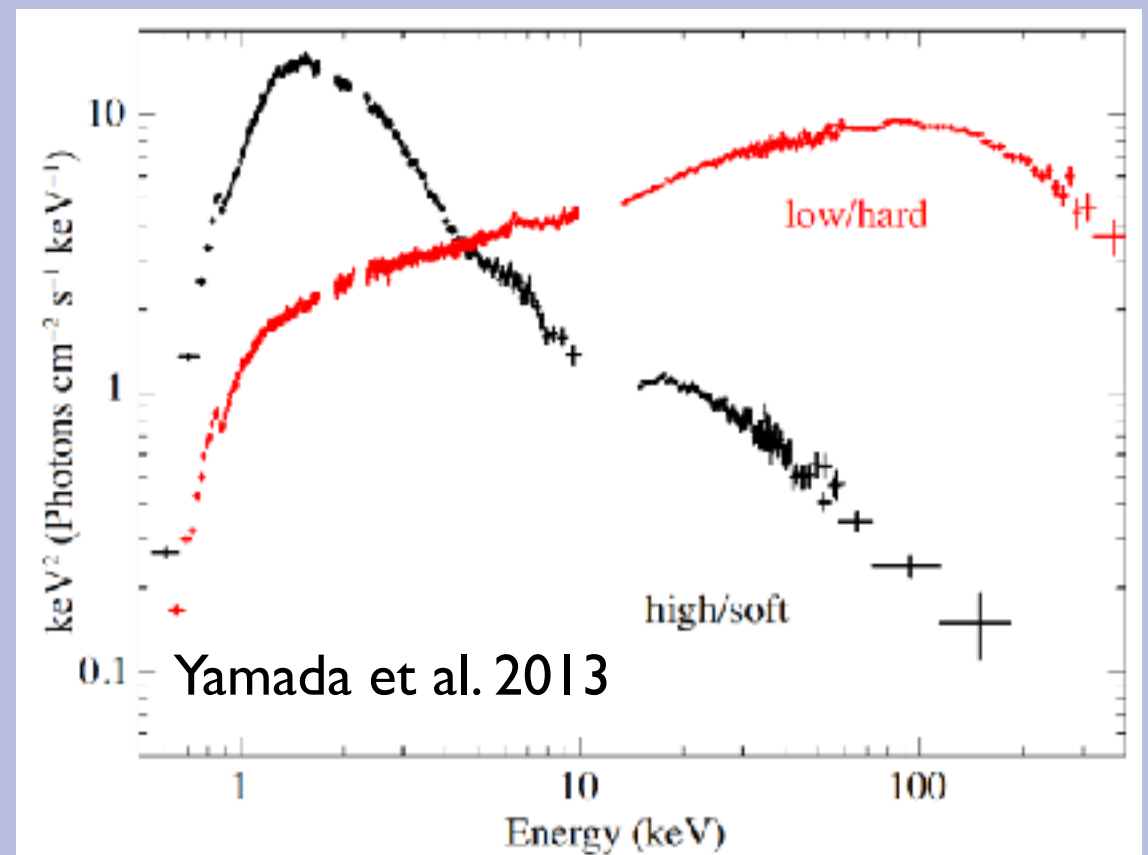
理論・シミュレーション

Takahashi et al. 2016



SED

観測



Yamada et al. 2013

imaging

秦さんのスライド

New 15GHz image
(Nov/2015, uniform weight)

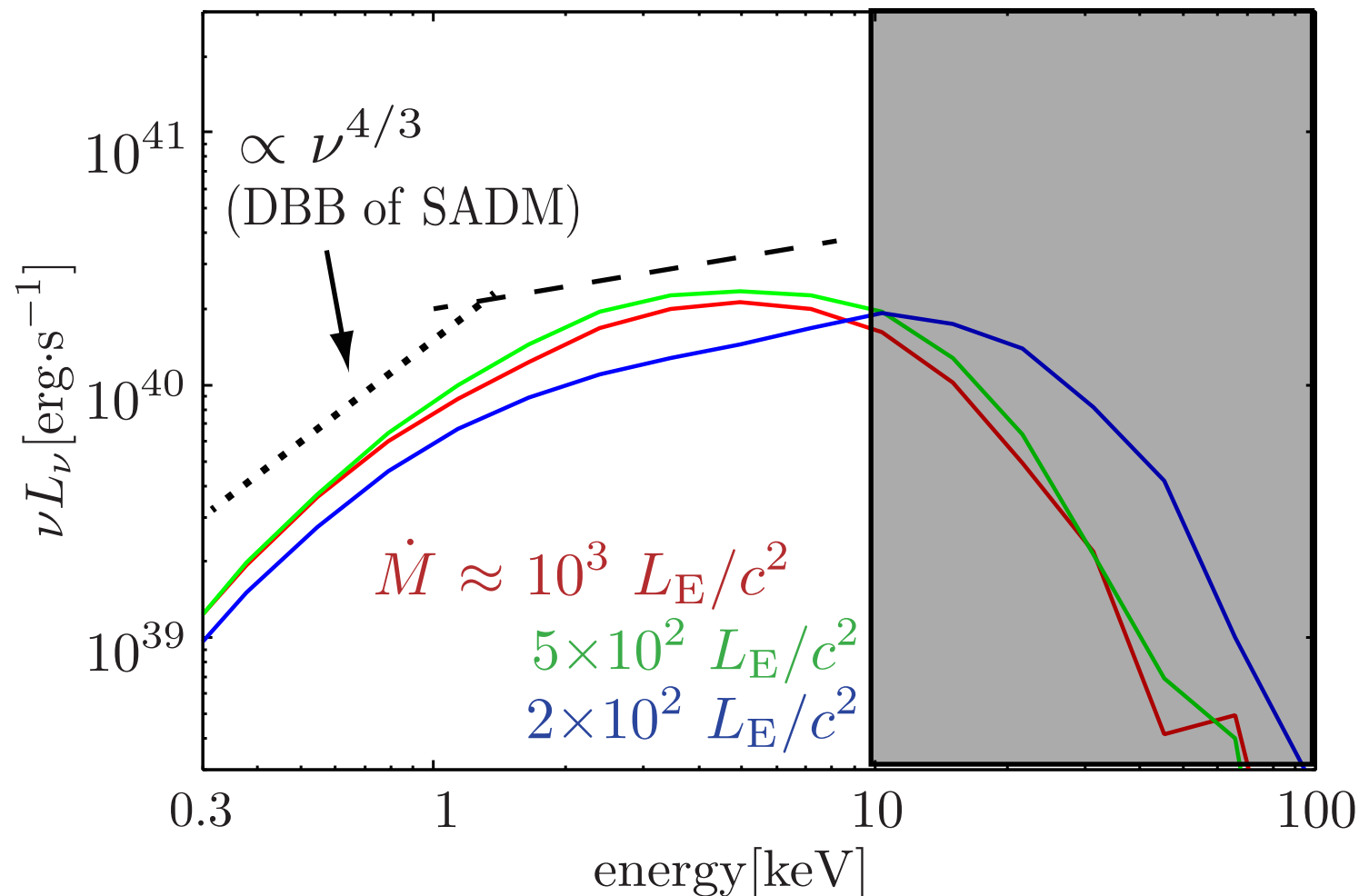
0.4 pc (projected)



理論・シミュレーションと
観測を直接比較

過去の我々の研究~ブラックホール超臨界降着流のスペクトル計算 (Kawashima et al. 2012)

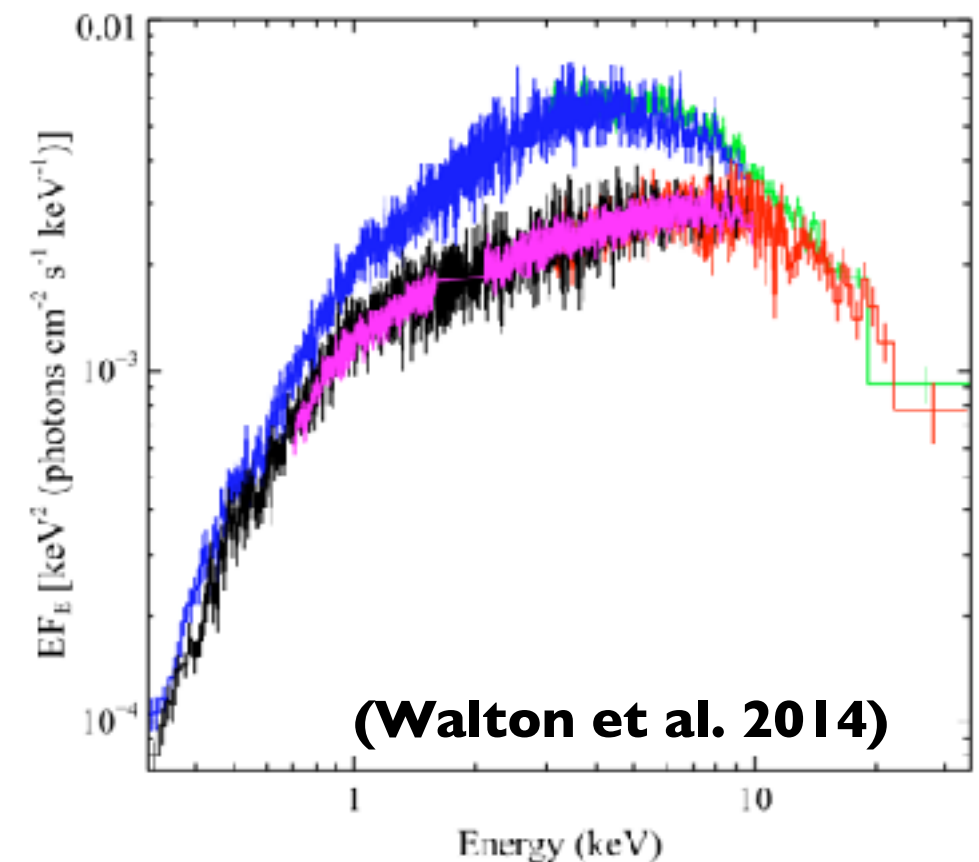
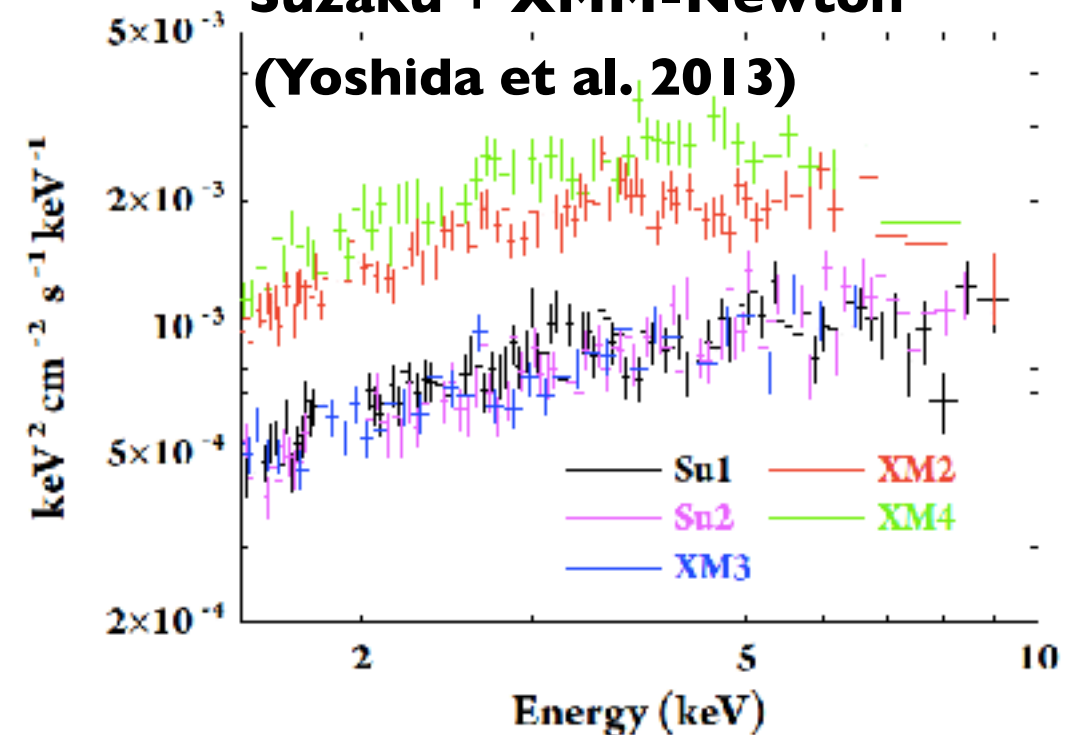
モンテカルロ法に基づく輻射スペクトル計算結果



- BH超臨界降着流の輻射流体シミュレーションのポストプロセスでMC法に基づく輻射スペクトル計算 **(世界初!)**
- 超高光度X線源の謎のX線スペクトルを恒星質量BHへの超臨界降着流の輻射スペクトルが再現

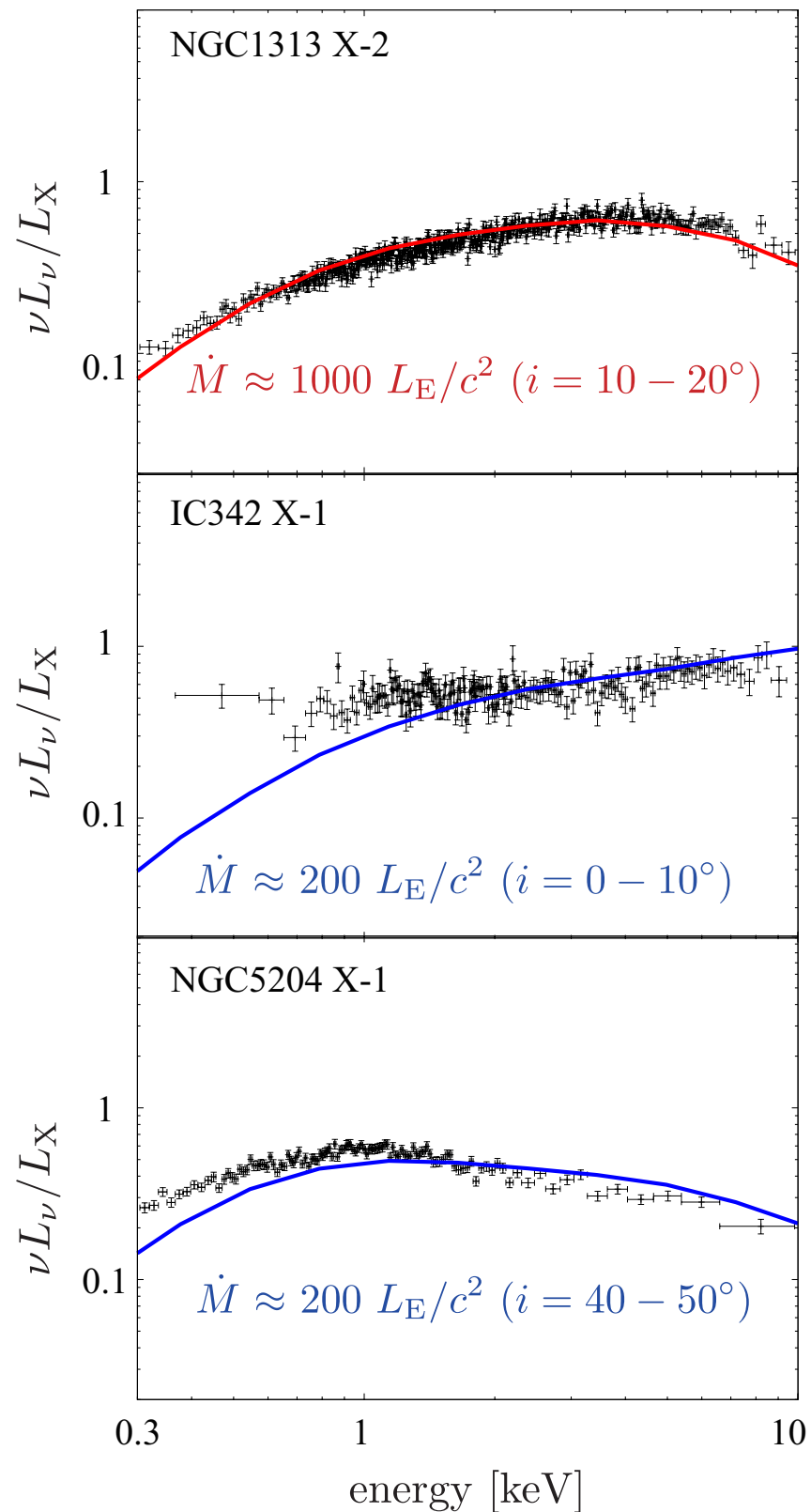
ULXのX線観測
輻射流体シミュレーション結果

Suzaku + XMM-Newton
(Yoshida et al. 2013)



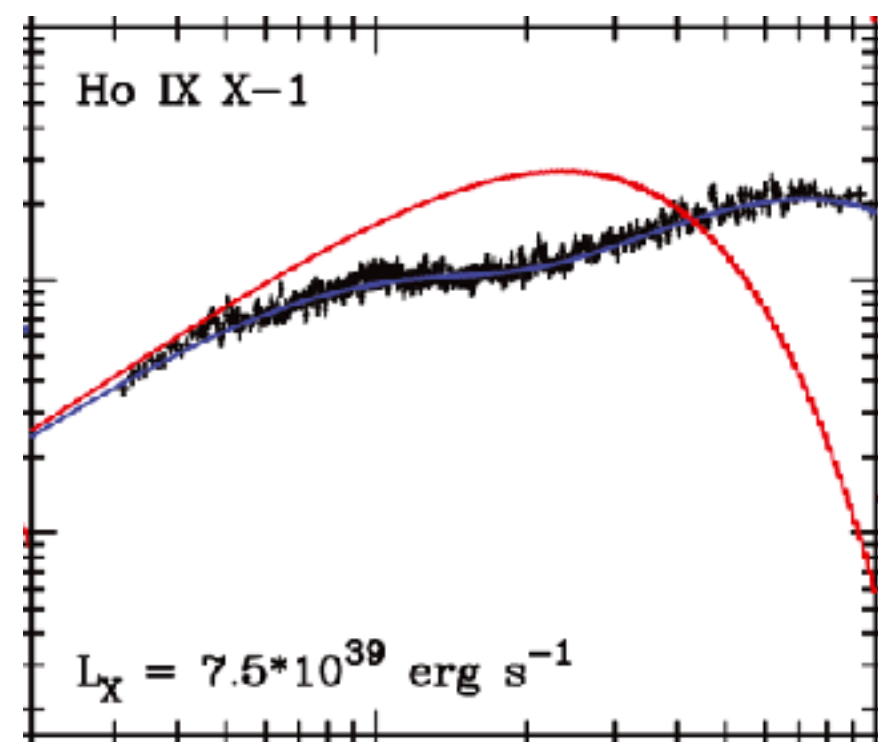
(Walton et al. 2014)

ULXスペクトル観測を説明できた部分・残されている謎



- disk-like状態(diskBBに近いが5keV付近でrollover)
- PL-like状態(10keVぐらいいまでhardな幂が延びる)
- soft-UL状態(ソフトな幂が5keV付近でrollover)
→これらはほぼ、うまく再現できている。

- hard-UL状態(disk-like状態よりhardな状態)は再現できていない
- もっとhard光子を発生させる必要あり。
- BHスピンの鍵か？→**GR輻射輸送計算の必要性**



GR輻射輸送計算の(個人的な)モチベーション

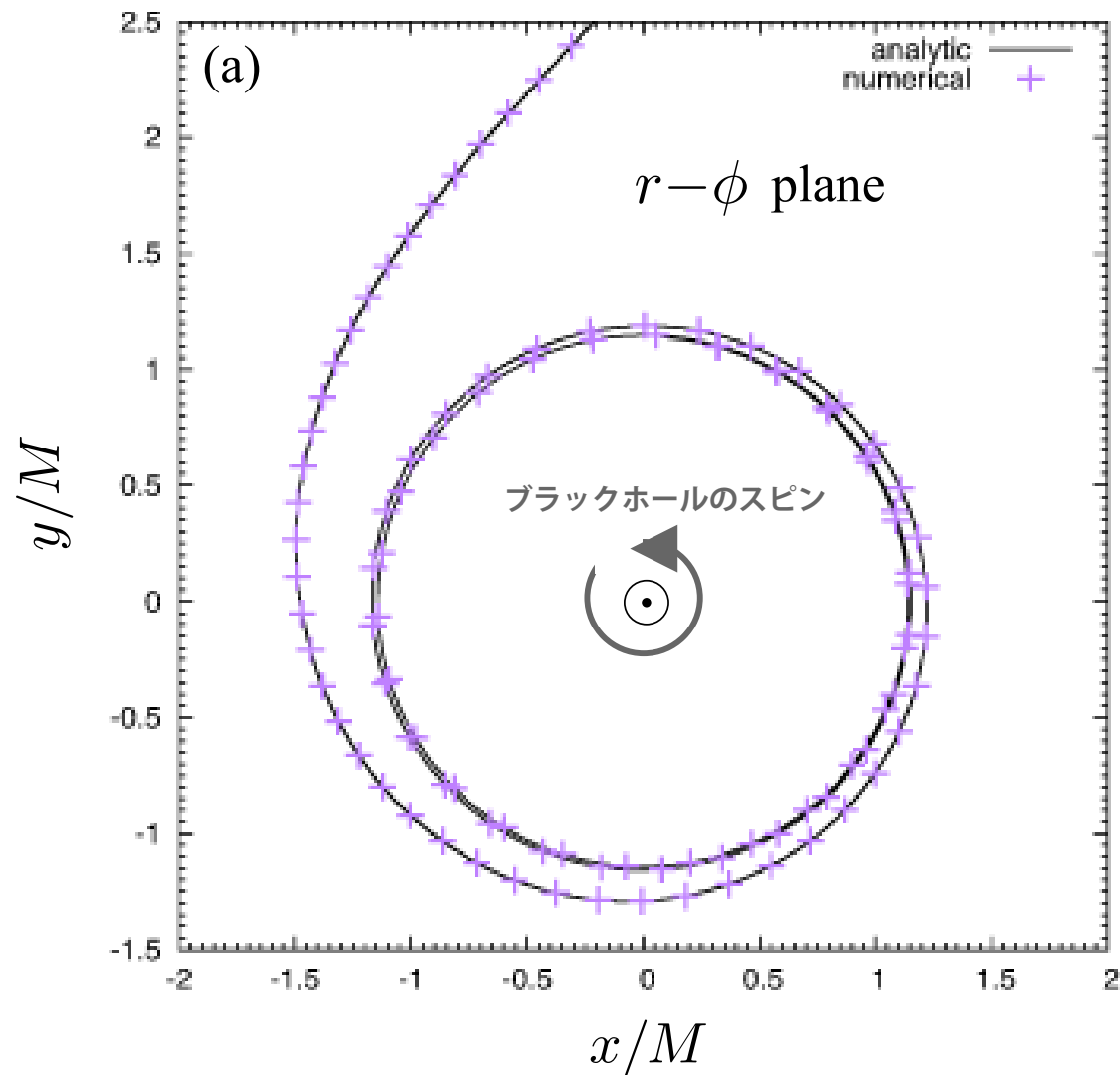
- ULXの全てのスペクトル状態の解明
 - ✓ スペクトルのスピン依存性 (Narayan et al. 2017よりも正確な計算で詳細に。)
- ULXパルサーの謎に迫る
 - ✓ NSへの超臨界降着柱はULXパルサーの輻射スペクトルと光度曲線を再現できるか？
- Jetted-TDEにおける超臨界降着と放射機構の解明
 - ✓ Swift 1644+57で鉄輝線およびその短いタイムラグが観測 (Kara et al. 2016)
 - BH近傍からの放射が超相対論的ジェットから抜け出ている？
- BHシャドーの計算
 - ✓ Event Horizon Telescope に向けて
 - ✓ BH近傍の降着流・ジェット構造解明

GR輻射輸送コードを開発

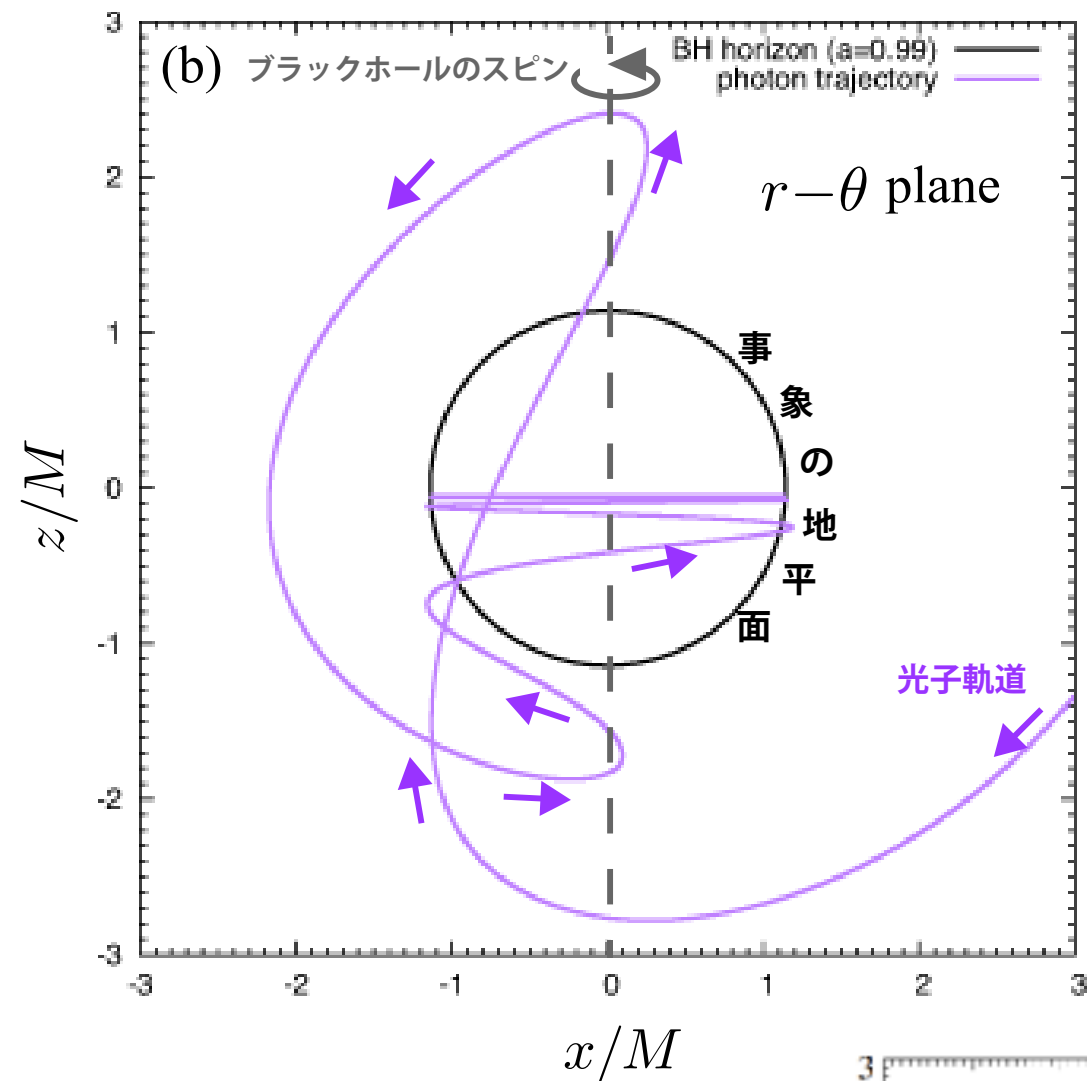
輻射スペクトル計算について

GR Ray-tracing テスト

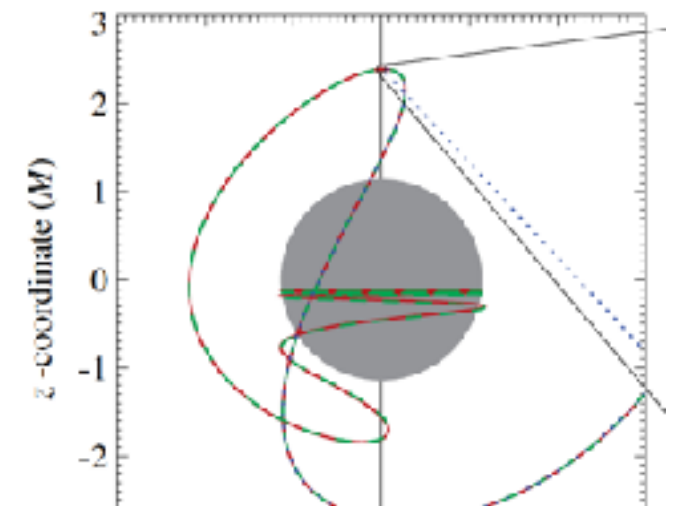
解析解との比較



Chan et al. 2012の計算の再現



解析解や、先行研究の光子軌道をよく再現している。



新しいコードでのコンプトン散乱の解き方（概要）

(Dolence et al. 2009, Canfield et al. 1989, Gorecki & Wilchewski 1984)

- まず、GR ray-tracingを解きながら散乱場所を決定 ($P = 1 - \exp(-\tau_e)$)
このとき、クライン仁科断面積の電子の熱的運動による補正を考慮。

$$\sigma_h \equiv \frac{1}{n_m} \int d^3 p \frac{dn_m}{d^3 p} (1 - \mu_m \beta_m) \sigma$$

- 電子散乱が起こると判定されたら、相対論的マクスウェル分布に基づき電子の運動量をサンプリング

(1)電子速度の大きさを暫定的に決定

(2)電子の向きを逆関数法で暫定的に決定 (散乱断面積の相対論的な補正 $1 - v/c \cos\theta$ を考慮)

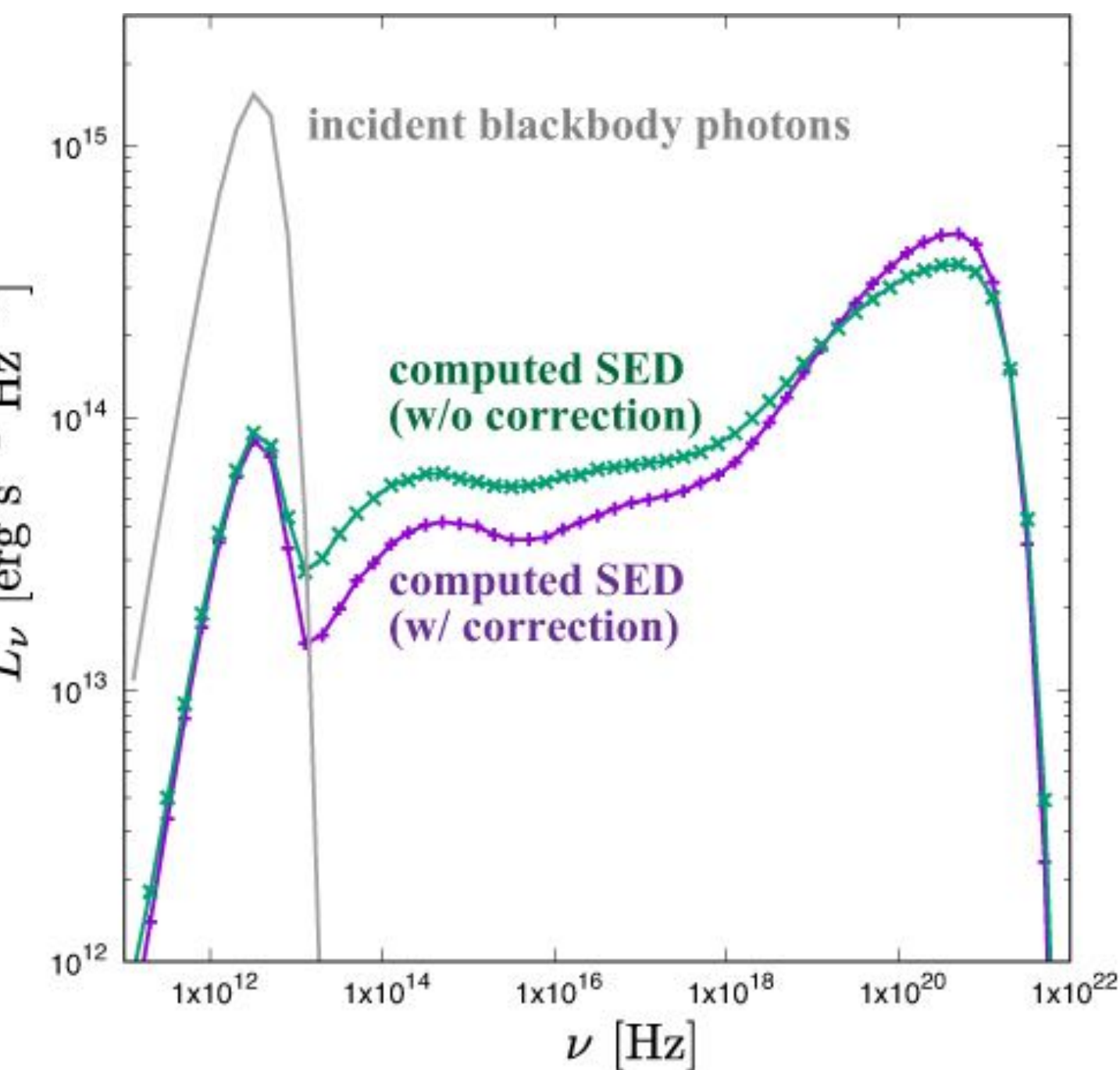
(3)電子静止系に光子Eをドップラーシフトさせ、 σ_{KN}/σ_T からrejection methodを用いてMCサンプリングした電子の運動量が尤もらしいか判定 (reject されたら(1)に戻る)

$$\sigma_{KN} = \sigma_T \frac{3}{4\epsilon_e^2} \left(2 + \frac{\epsilon_e^2(1 + \epsilon_e)}{(1 + 2\epsilon_e)^2} + \frac{\epsilon_e^2 - 2\epsilon_e - 2}{2\epsilon_e} \log(1 + 2\epsilon_e) \right)$$

これをやらないとどうなるか? (すなわち **Pozdnyakov + 1977**)との比較

- クライン仁科の微分断面積に従い、散乱後の光子の運動量を決定。

電子サンプリングにおいて光子方向依存性を考慮することは重要

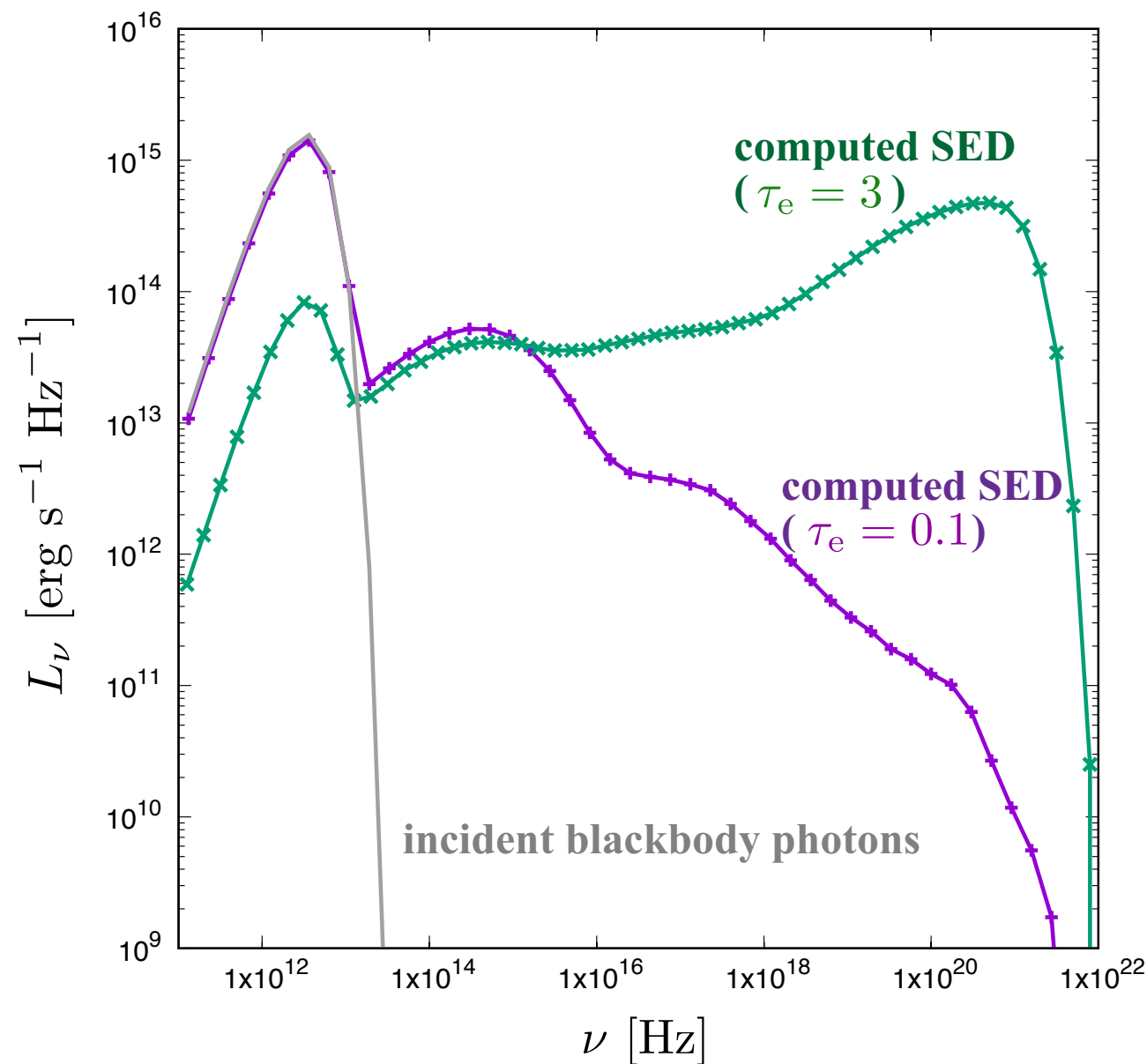


- 散乱電子をMCサンプリングする際に光子方向依存性を考慮した場合と考慮しなかった場合を比較
- 黒体輻射光子を一様プラズマ球に入射 (吸収無視)
- 黒体輻射の温度: $\frac{kT_{\text{BB}}}{m_e c^2} = 10^{-8}$
- プラズマの電子温度と光学的厚み:

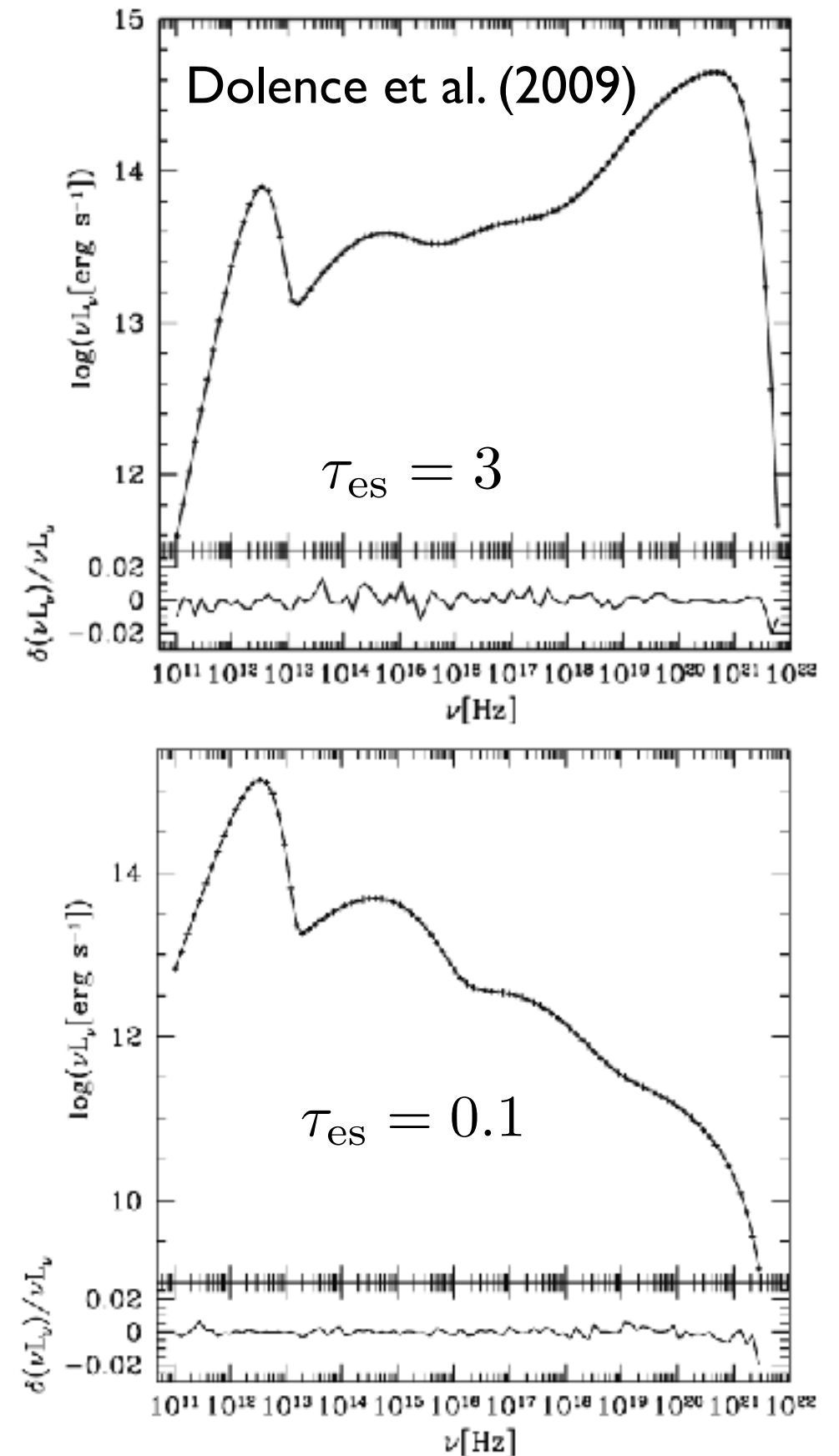
$$\frac{kT_e}{m_e c^2} = 4 \quad \tau_{\text{es}} = 3$$

詳細なスペクトル計算にはMC散乱電子サンプリングの際に入射光子方向依存性を考慮することが重要

輻射スペクトルのテスト計算



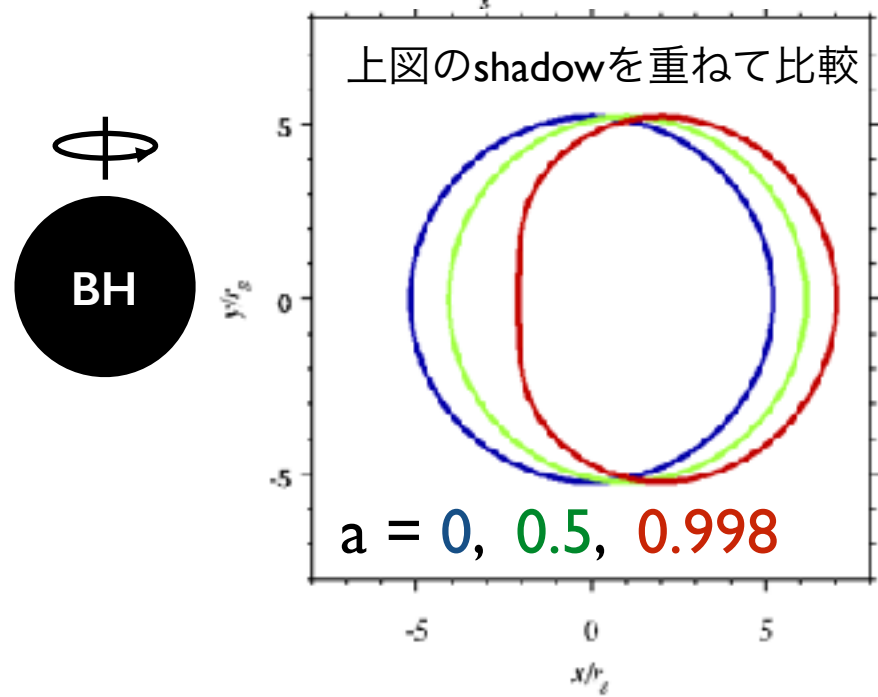
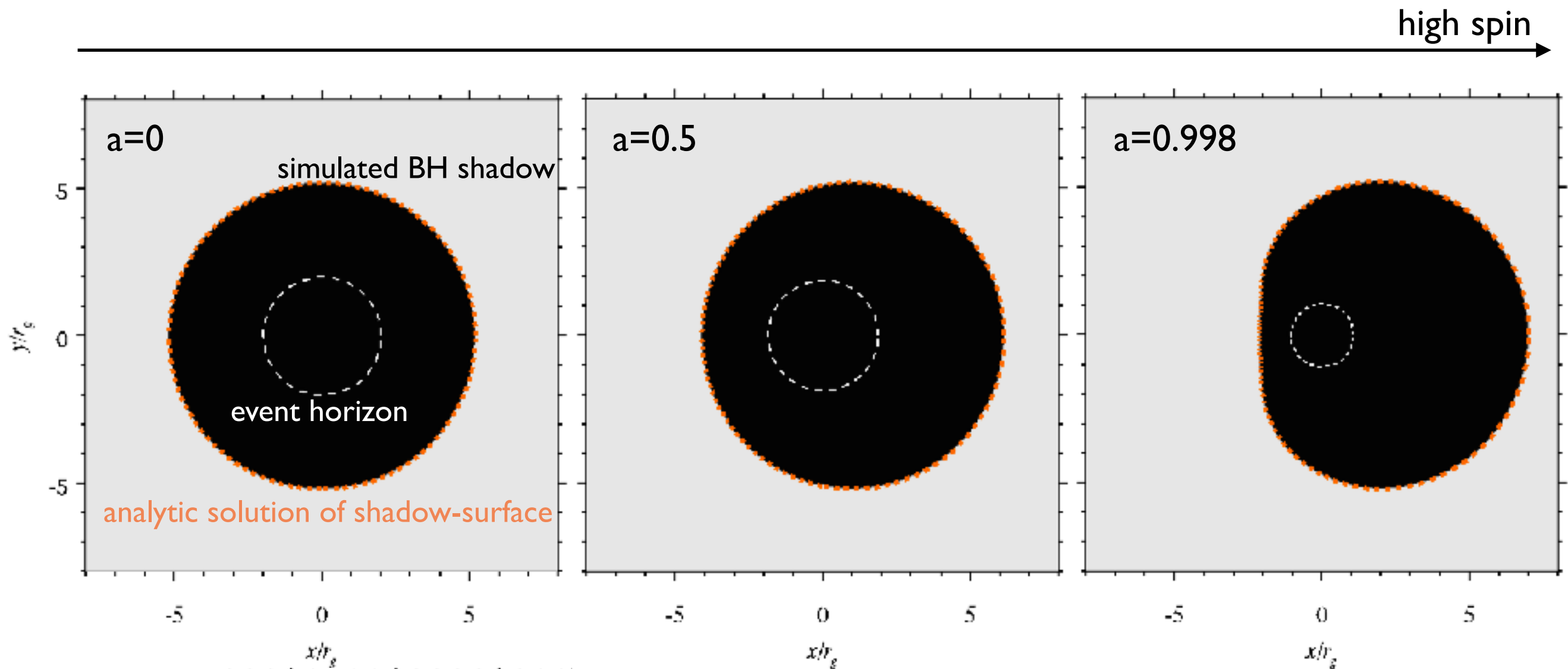
- 黒体輻射光子を一様プラズマ球に入射 (吸収無視)
- 黒体輻射の温度： $\frac{kT_{\text{BB}}}{m_e c^2} = 10^{-8}$
- プラズマの電子温度 $\frac{kT_e}{m_e c^2} = 4$
- 光学的厚み： $\tau_{\text{es}} = 3$ $\tau_{\text{es}} = 0.1$



イメージング計算について

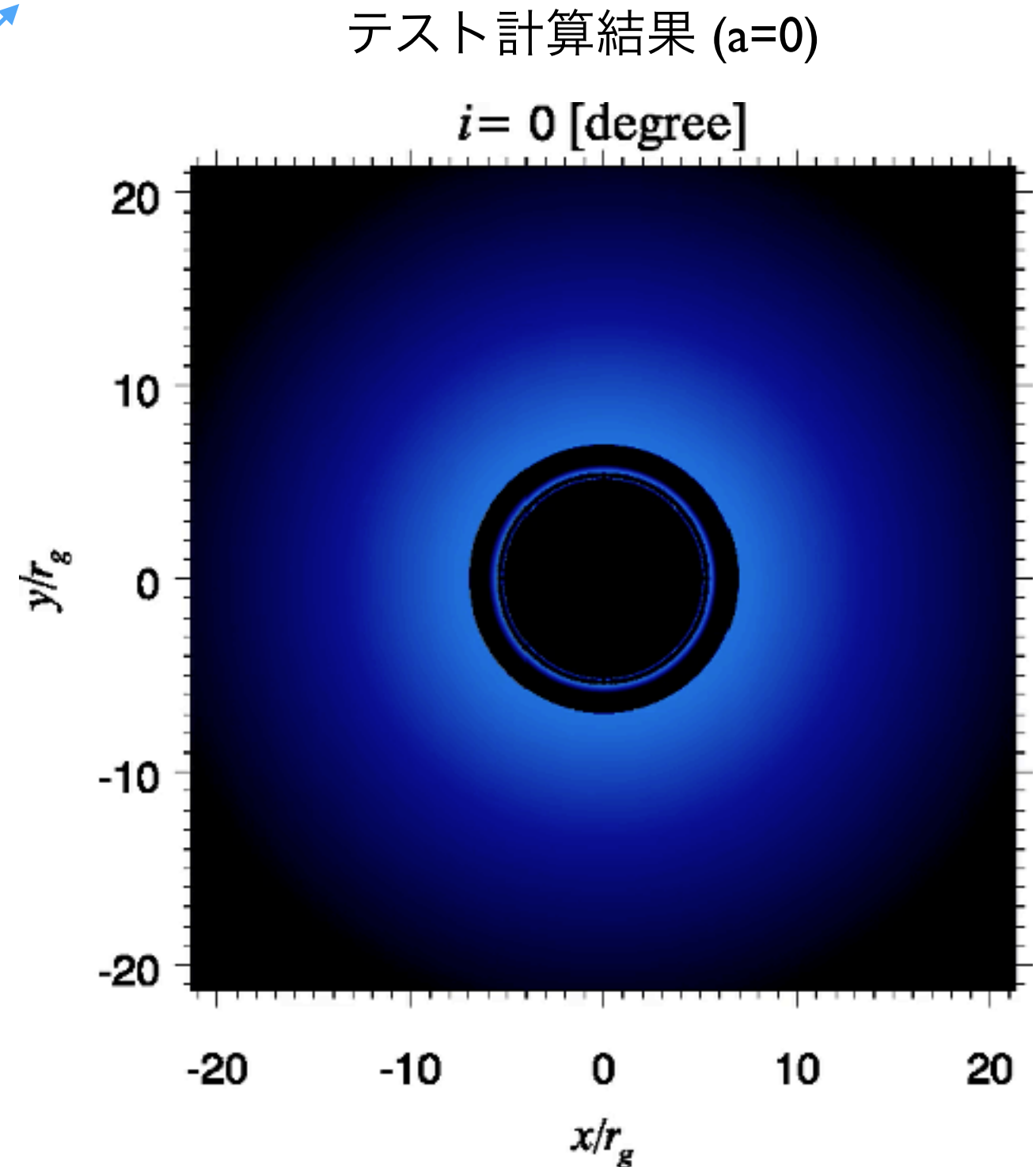
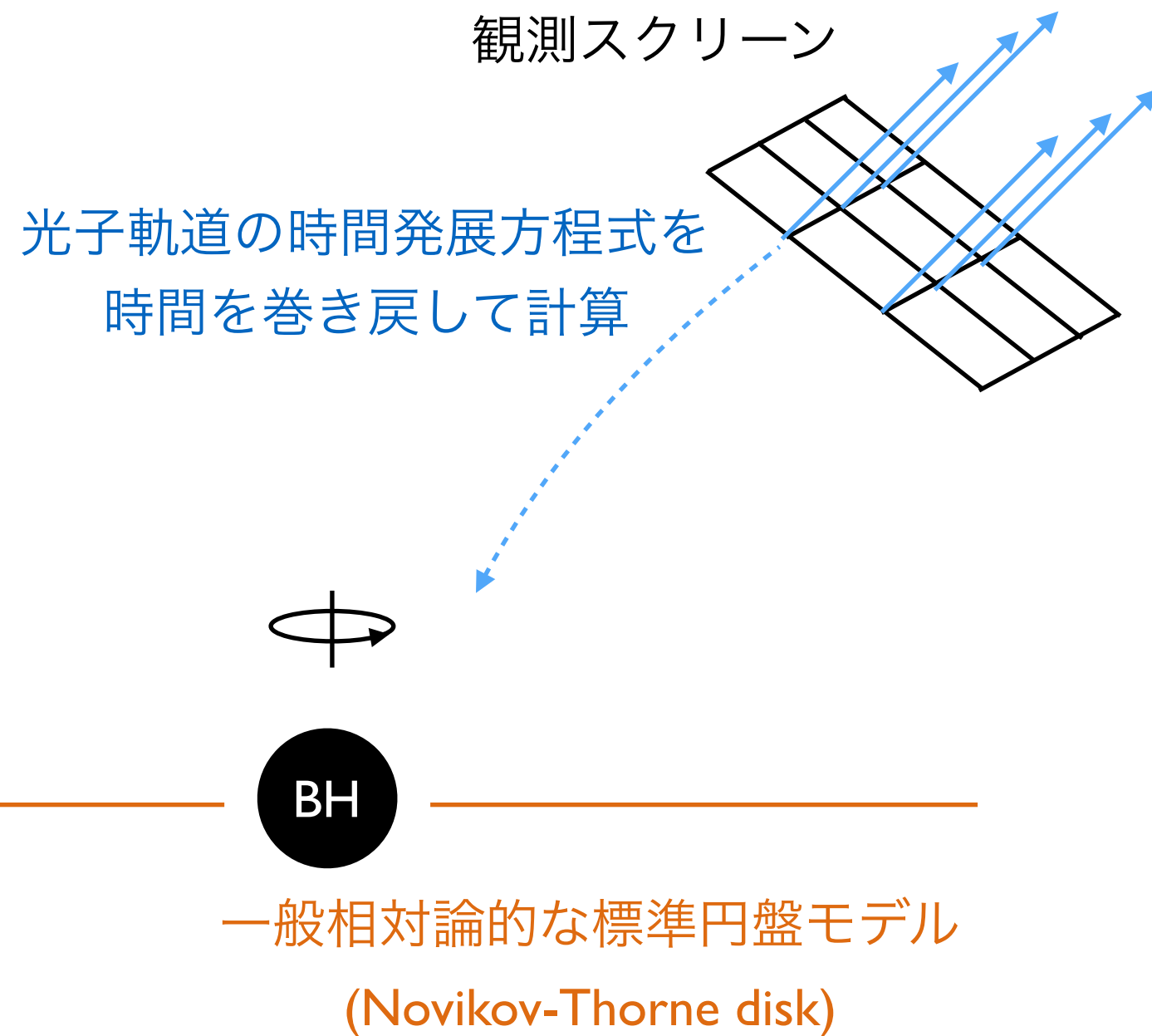
- **GR Ray-Tracing**モジュールを活用 -

BH shadow テスト - BHスピン依存性 ($\theta = \pi/2$) -

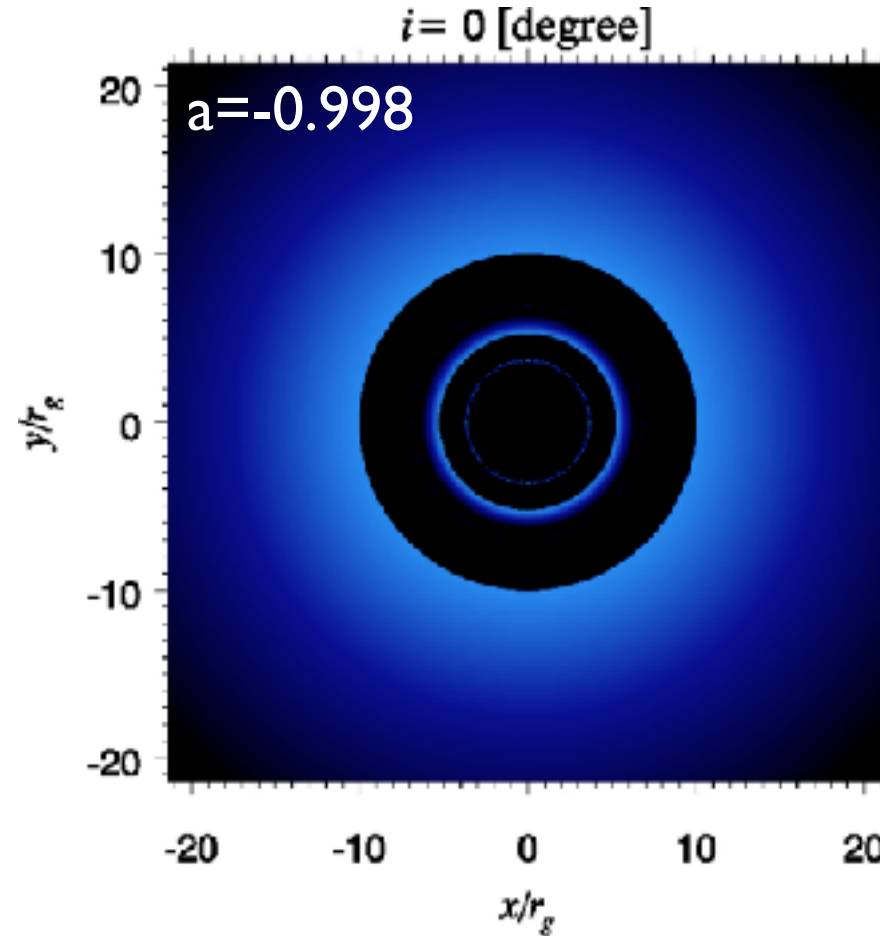
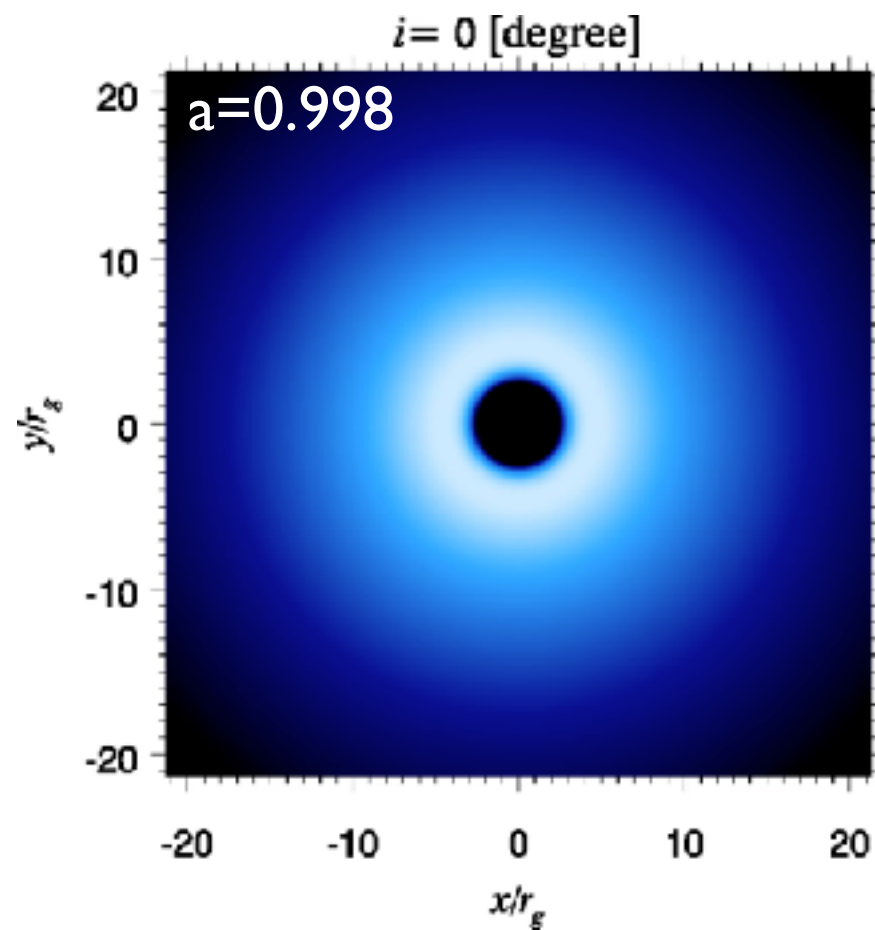
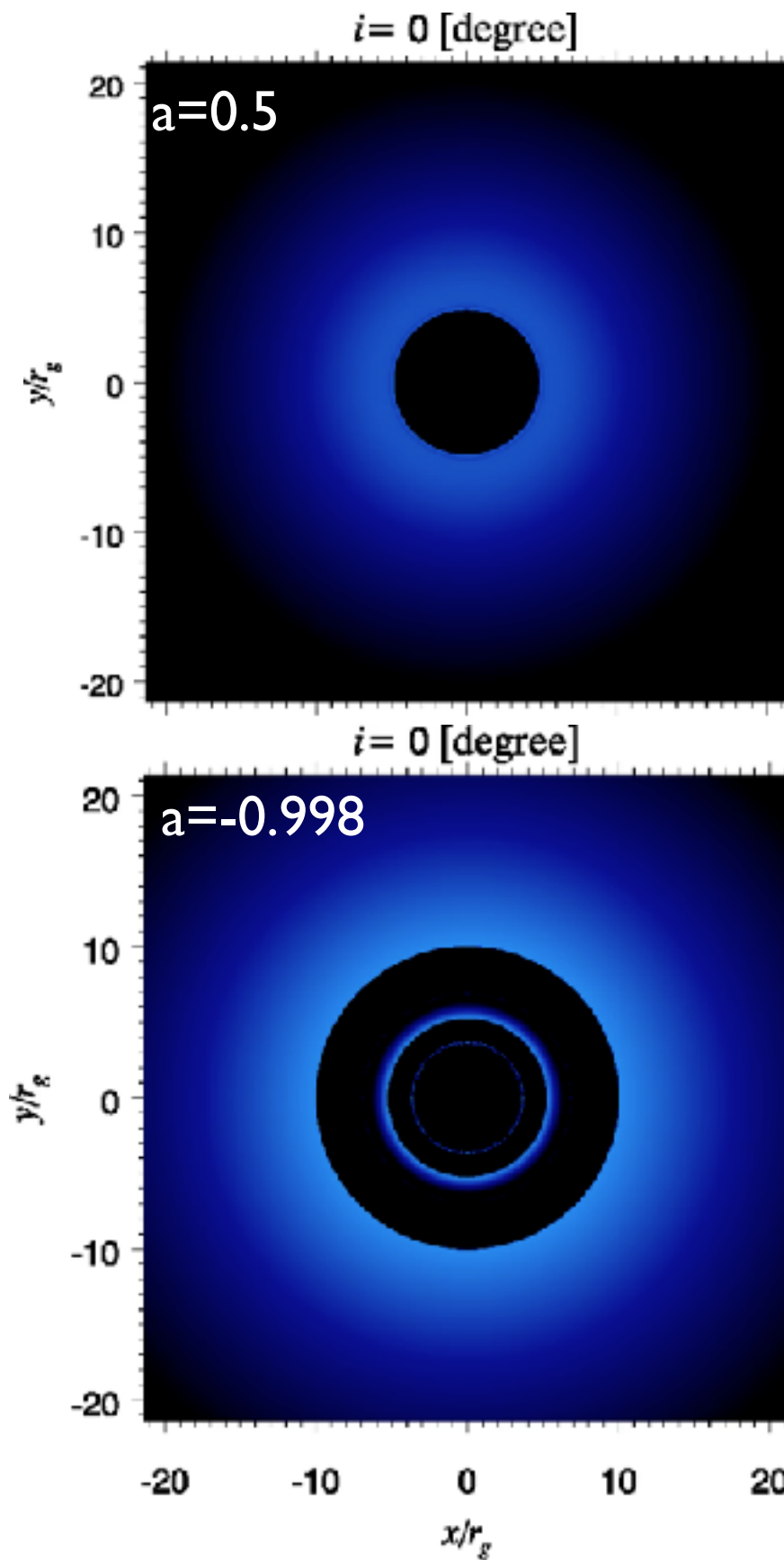
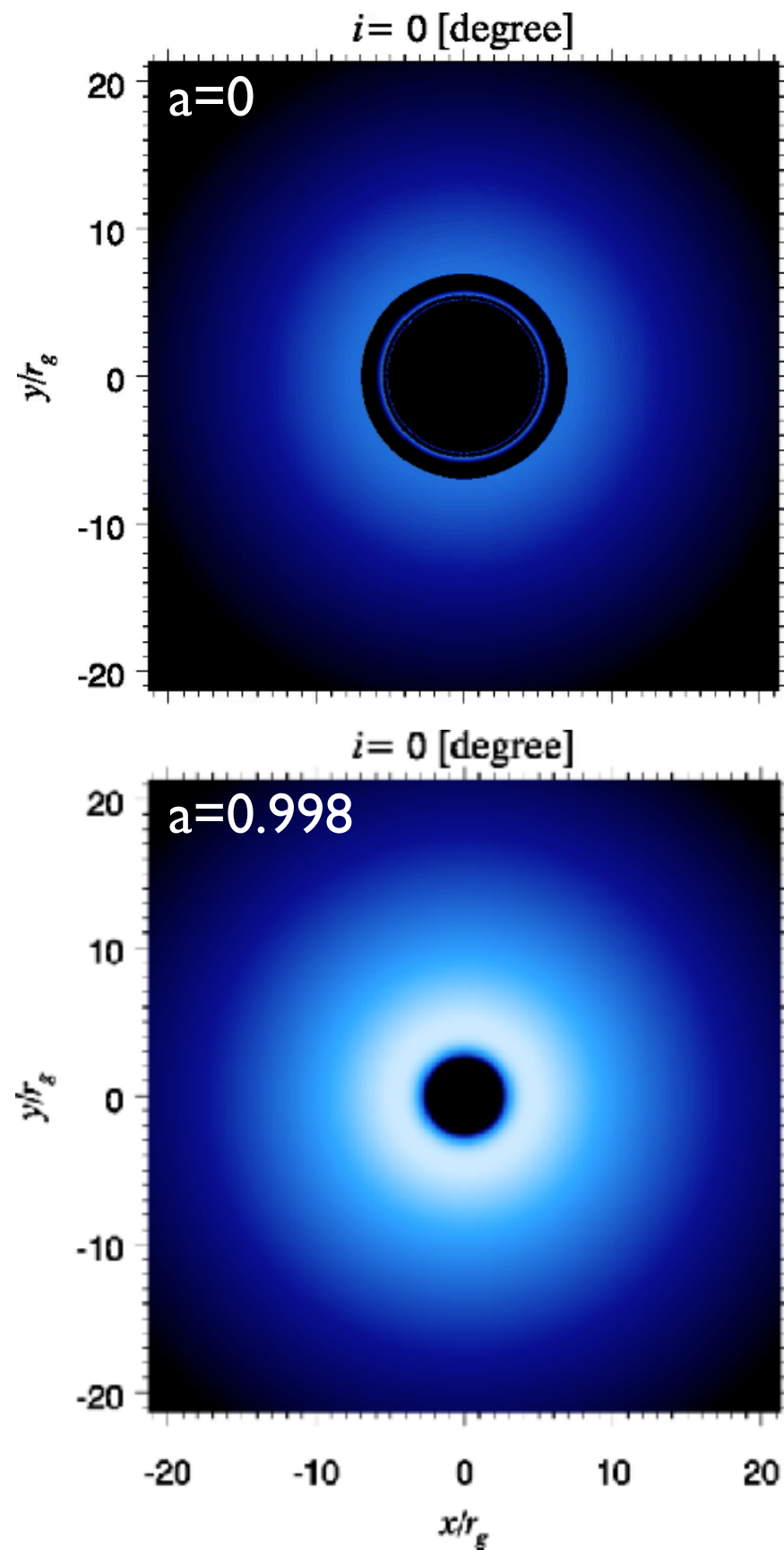


- 様々なspin parameterにおいて、今回のray-tracing計算はBH shadow表面形状の解析解を再現
- spinが高くなるにつれて、frame-dragging 効果によりshadowは赤道面方向に歪んでいく

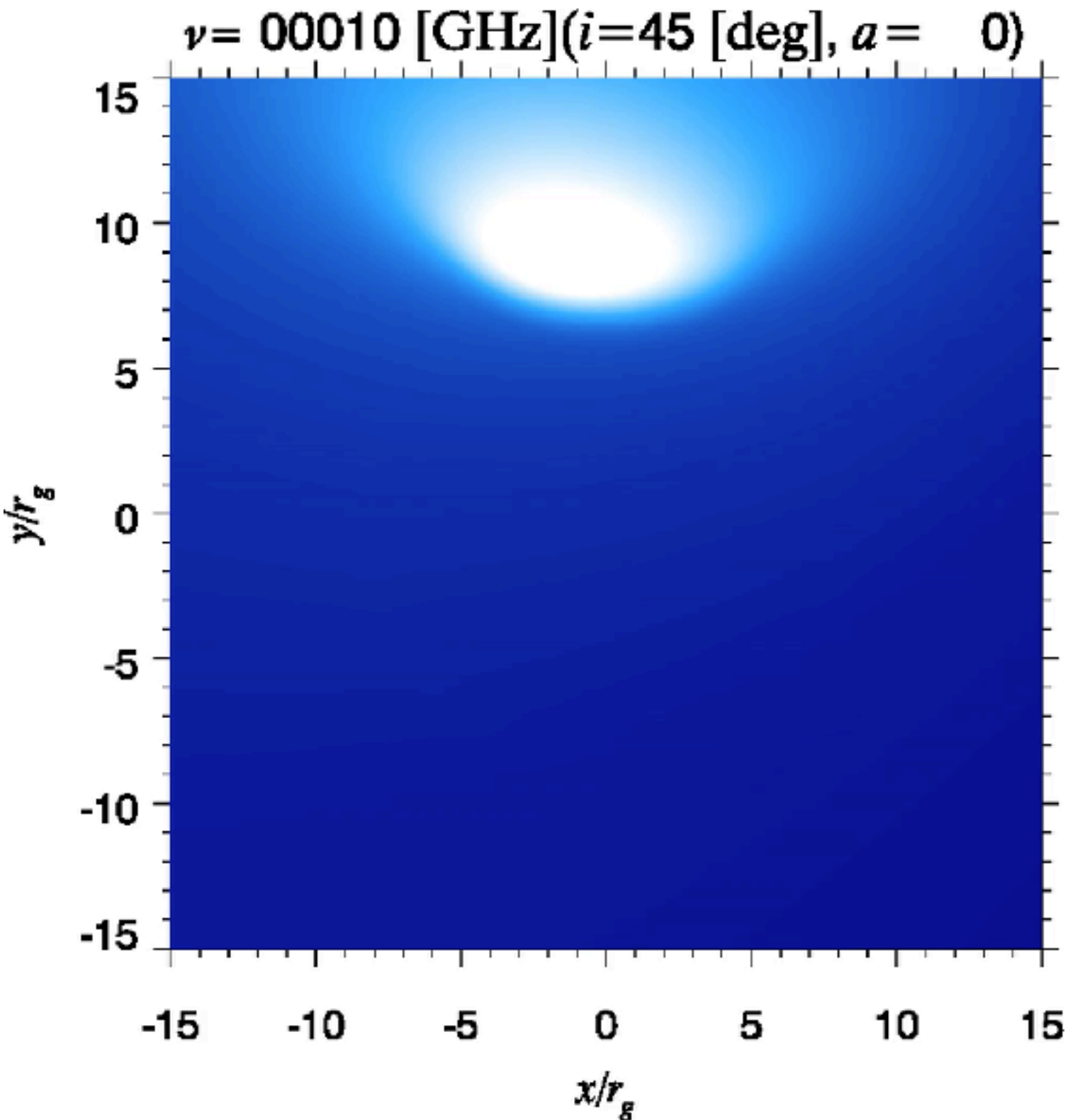
BH shadow テスト (Novikov-Thorne disk)



Novikov-Thorne diskによるBH shadowのspin依存性



Keplerian shell (RIAF-likeモデル) の BHシャドー



- 円盤状の構造を考慮したKeplerian Shellモデル(Broderick & Loeb 2006)
- 熱的電子によるcyclo-synchrotron放射・吸収(Mahadevan et al. 1996)を計算
- 徐々に光学的に薄くなり、100GHz以上でBHシャドーが現れる

まとめ

- モンテカルロ法に基づく一般相対論的輻射輸送コードを作成した。
- BH降着流・コロナ・ジェットにおいて重要な(サイクロ-)シンクロトロン放射・吸収、黒体放射、コンプトン散乱を実装。
- スペクトル計算およびイメージング計算のテスト計算テスト計算を実施。
- 今後ULXのスペクトル計算やBHシャドローのイメージング計算に適用予定。
- 今後、流体シミュレーション結果のポストプロセスを実施する予定。
(共同研究できれば幸いです。)