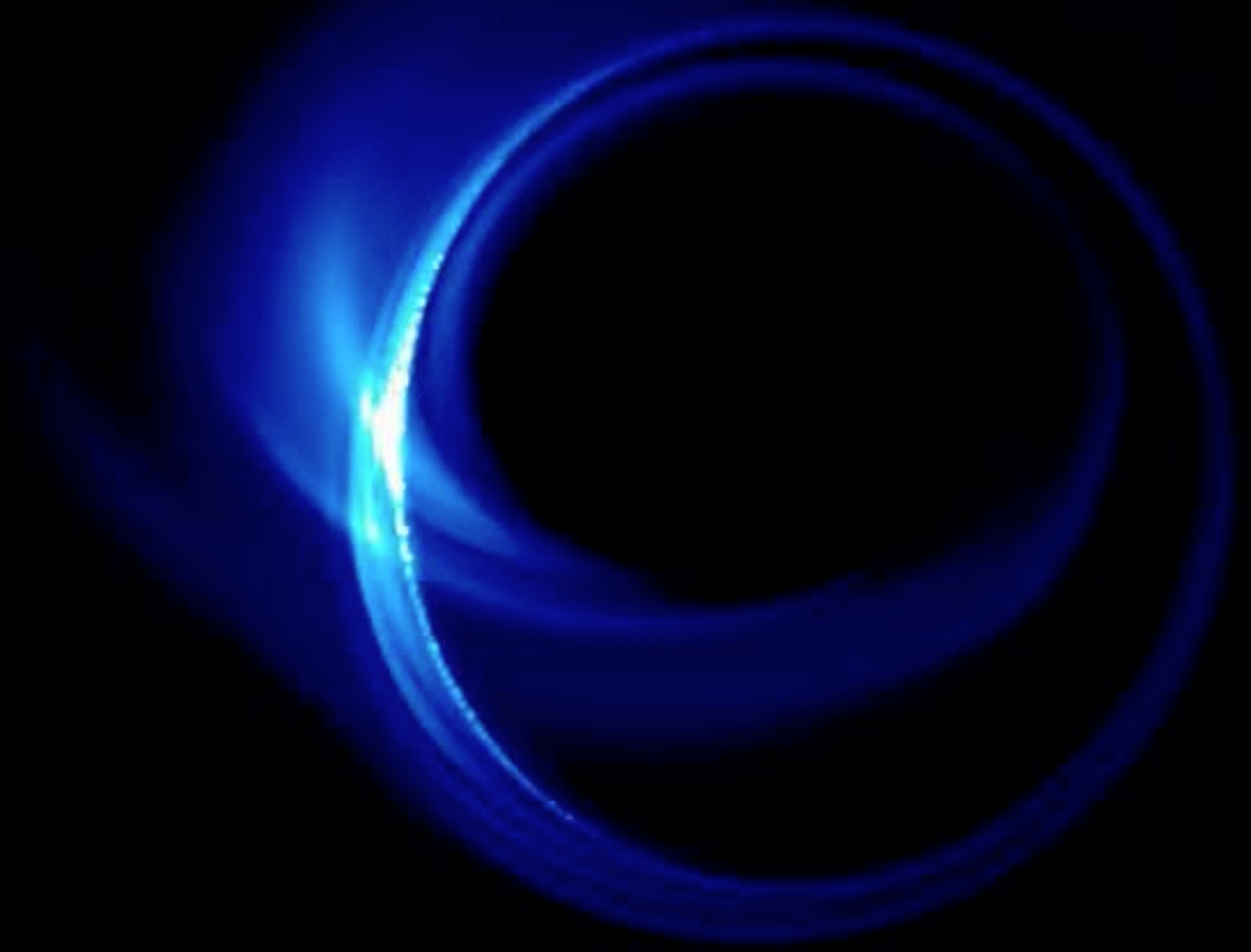
多波長・マルチメッセンジャー・ブラックホール天文学：ブラックホールシャドウから高エネルギーニュートリノまで

川島 朋尚　(東大宇宙線研)

共同研究者 (50音順)
浅野勝晃(東大宇宙線研)
大須賀 健 (筑波大)
高橋 博之 (駒澤大)

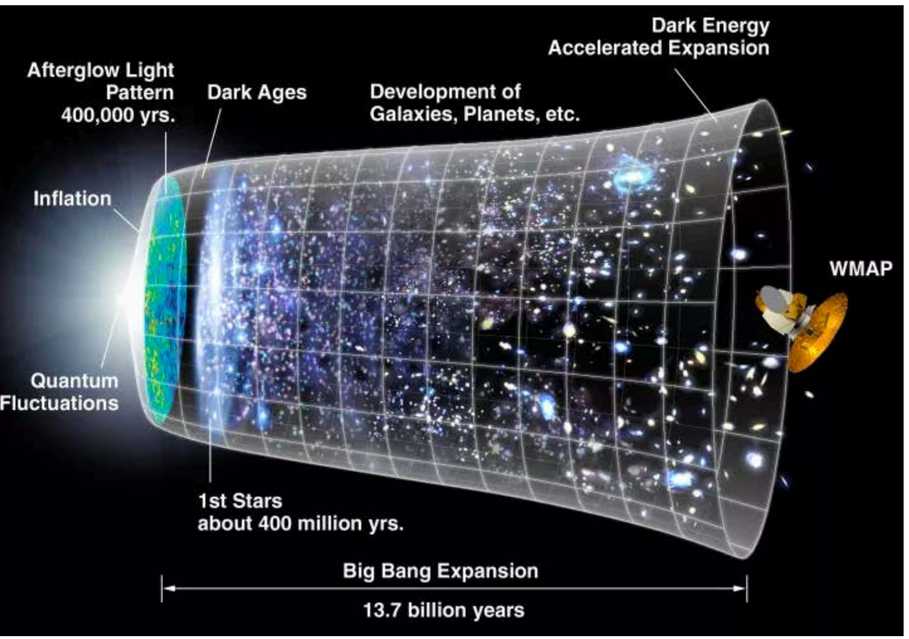


© NASA's Goddard Space Flight Center

宇宙物理・宇宙論における ブラックホール (BH) 降着流

運動学的/輻射フィードバック

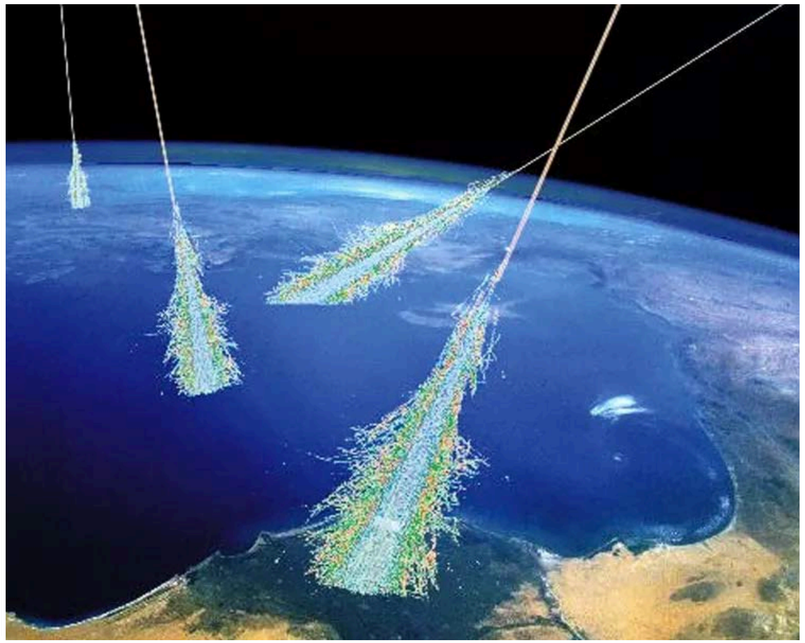
→ BHと母銀河の宇宙論的共進化



© NASA/WMAP

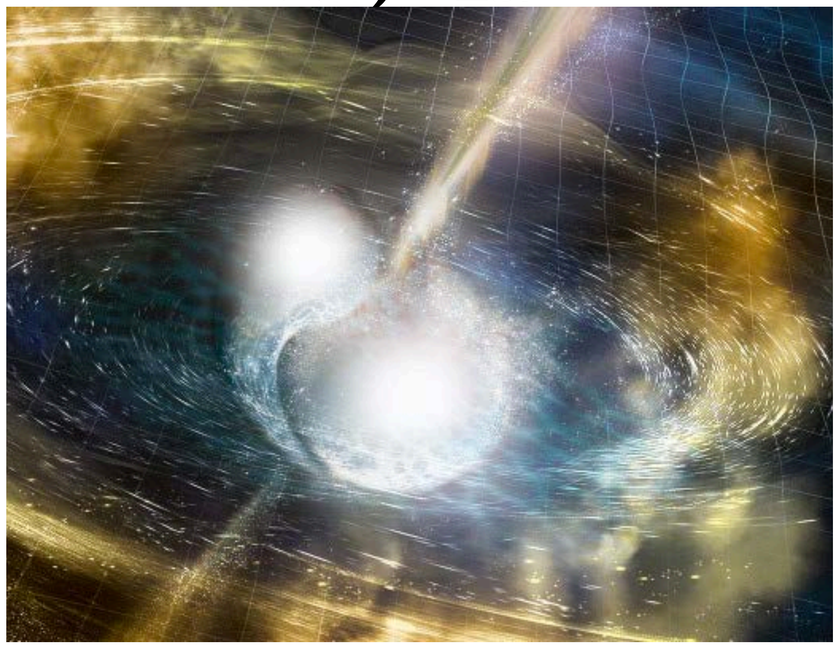
宇宙線加速

→UHECR起源の可能性，VHEγ線，高エネルギーニュートリノ


© Simon Swordy (U. Chicago), NASA

相対論的ジェット物理のアナロジー

→ ガンマ線バースト(重力波電磁波カウンターパート天体)の理解


© NSF LIGO Sonoma State University / A. Simonnet

ブラックホール (BH) 研究の大目標

(1) BH時空構造の決定

(2) 降着流の物理の解明

(3) 相対論的ジェットの形成・加速機構の解明

(4) 高エネルギー宇宙線の起源の解明

(1) - (4) はそれぞれが密接に関係する。

→ 一般相対論・輻射輸送・磁気流体・プラズマ微視的過程に関する包括的な理解が必要不可欠。

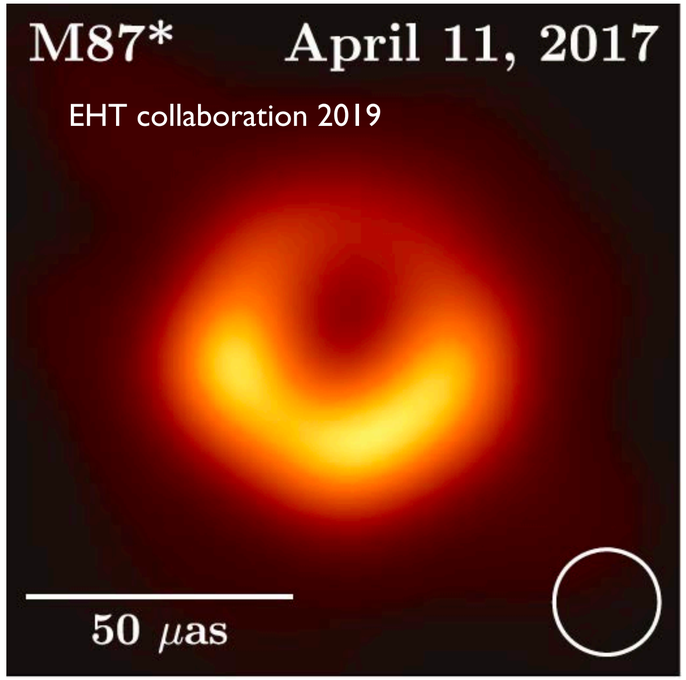
© NASA's Goddard Space Flight Center

次世代EHT+多波長・マルチメッセンジャー観測に向けて

- EHTによるBHシャドウの初観測 (EHTC2019) → BH質量の決定
  - ✓BHスピンや相対論的ジェットの形成機構解明が大きな課題
  - ✓非熱的粒子の加速・ガンマ線放射起源も依然として謎

多波長スペクトル ←

時間変動 ←



→ 宇宙線
ニュートリノ

将来観測に向けて、時間変動・多波長・マルチメッセンジャーを取り入れた理論研究、新解析手法の構築が急務

RAIKOU (来光) : 一般相対論的多波長輻射輸送コード

Kawashima + 2021 submitted to ApJ Supplement

- **Ray-tracing 法:**

✓8次 embedded Runge-Kutta法 w/ adoptive stepsize control

✓Fast-light近似(スナップショット固定のまま時間発展)と**厳密時間発展**を実装

- **輻射過程:**

✓放射・吸収

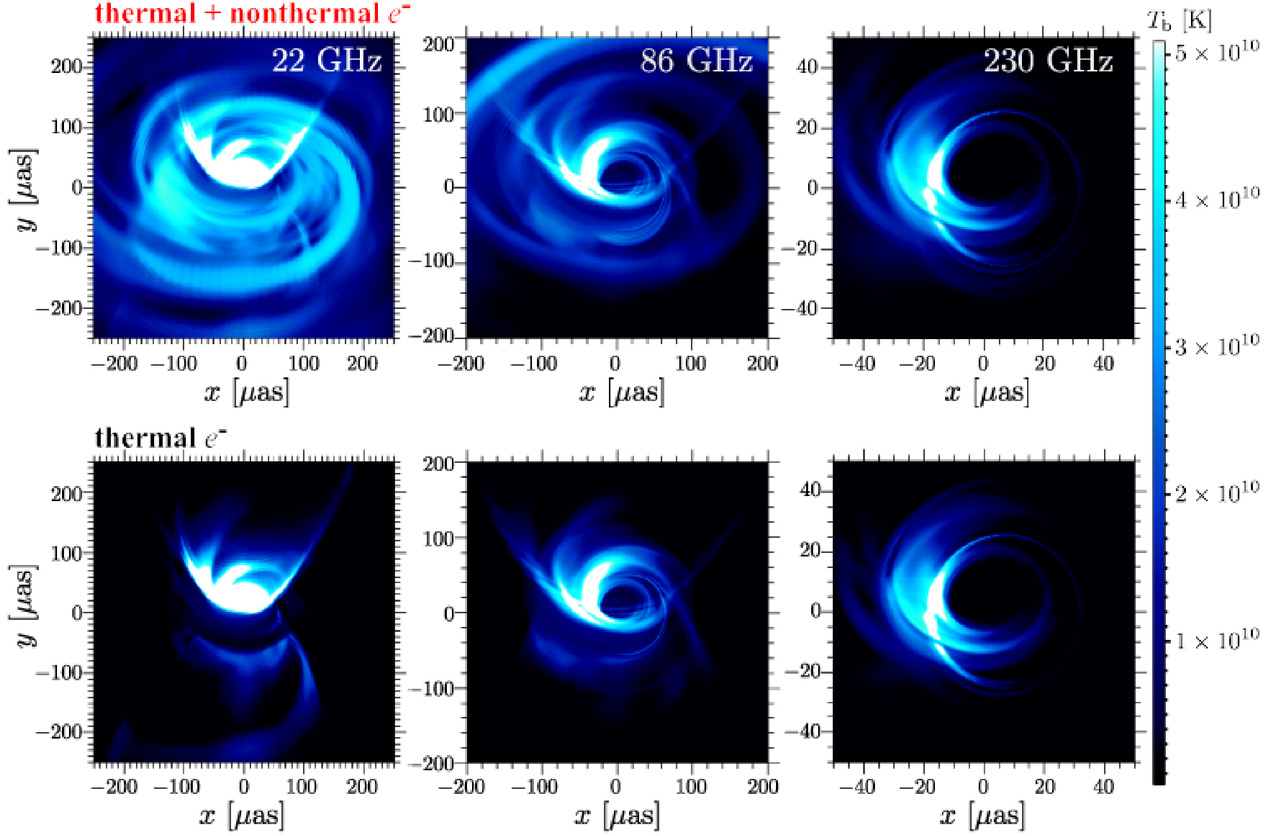
- サイクロ-シンクロトロン放射・吸収 (熱的電子)
- シンクロトロン放射・吸収 (熱的+非熱的電子)
- 制動放射 (熱的電子)

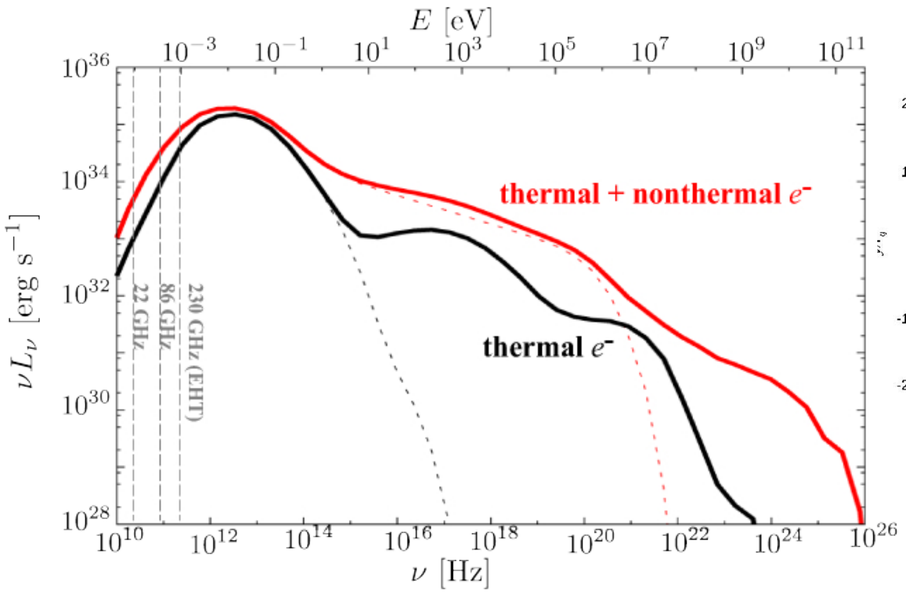
✓ 散乱 (Monte Carlo法)

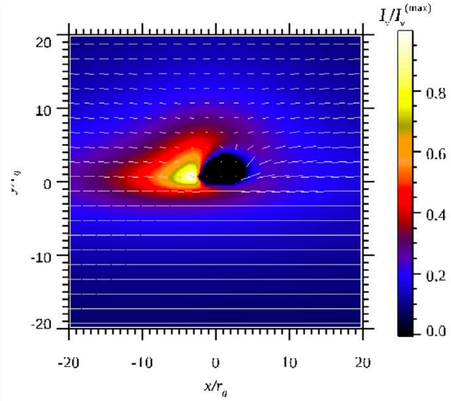
- コンプトン・逆コンプトン散乱 (熱的+非熱的電子)

✓ 偏光 (実装中)

✓ **宇宙線・ニュートリノ**







多波長スペクトル・イメージ

計算セットアップ
一般相対論的磁気流体シミュレーション+ 一般相対論的輻射輸送計算

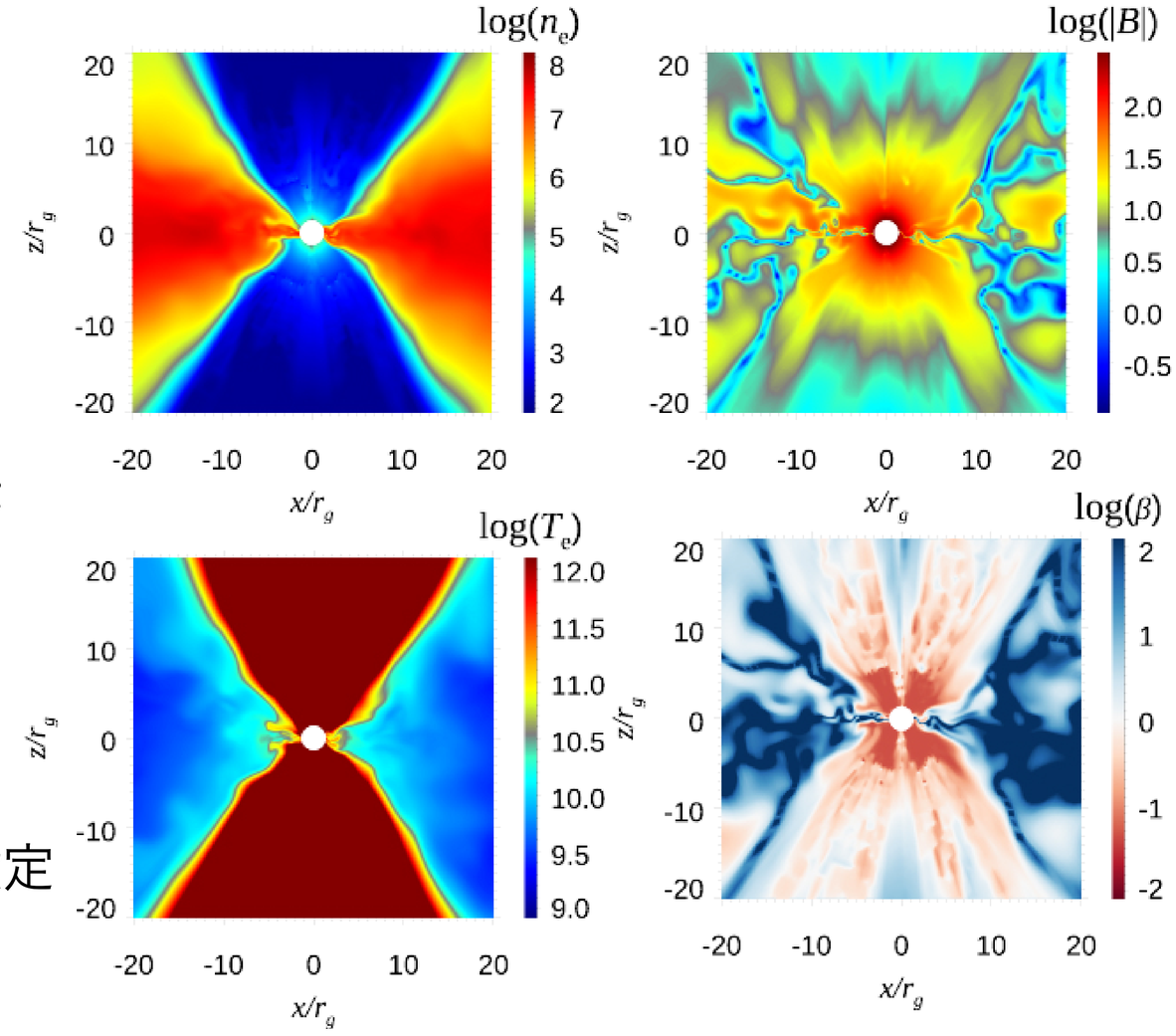
- GRMHD: 一般相対論的(輻射)磁気流体コードUWABAMIによるシミュレーション
  - ✓(Nr, Nθ, Nφ) = (192, 120, 96)
  - ✓BH スピン a=0.9375
- GRRT: RAIKOUで計算
  - ✓Sgr A*のパラメータ $M_{\rm BH} = 4.1 \times 10^6 M_\odot \quad D = 8.1{\rm kpc}$
  - ✓視線角度: 45°
  - ✓電子温度 (R-β prescription: Moscibrodzka+2016, EHTC2019等):

$$\frac{T_{\rm p}}{T_{\rm e}} = \frac{R_{\rm high}\beta^2}{1+\beta^2} + \frac{R_{\rm low}}{1+\beta^2}$$

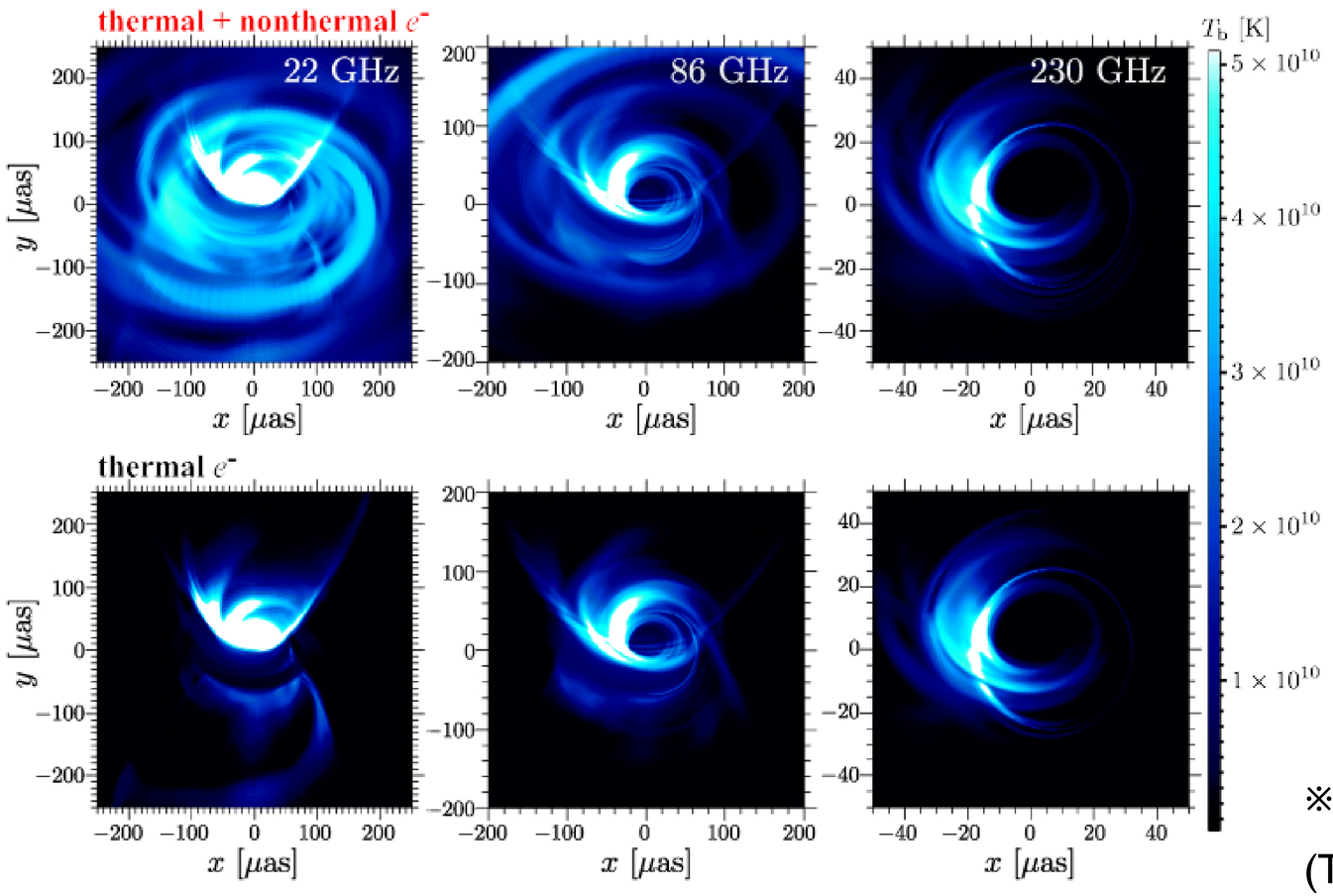
Rhigh = 5, Rlow = 1

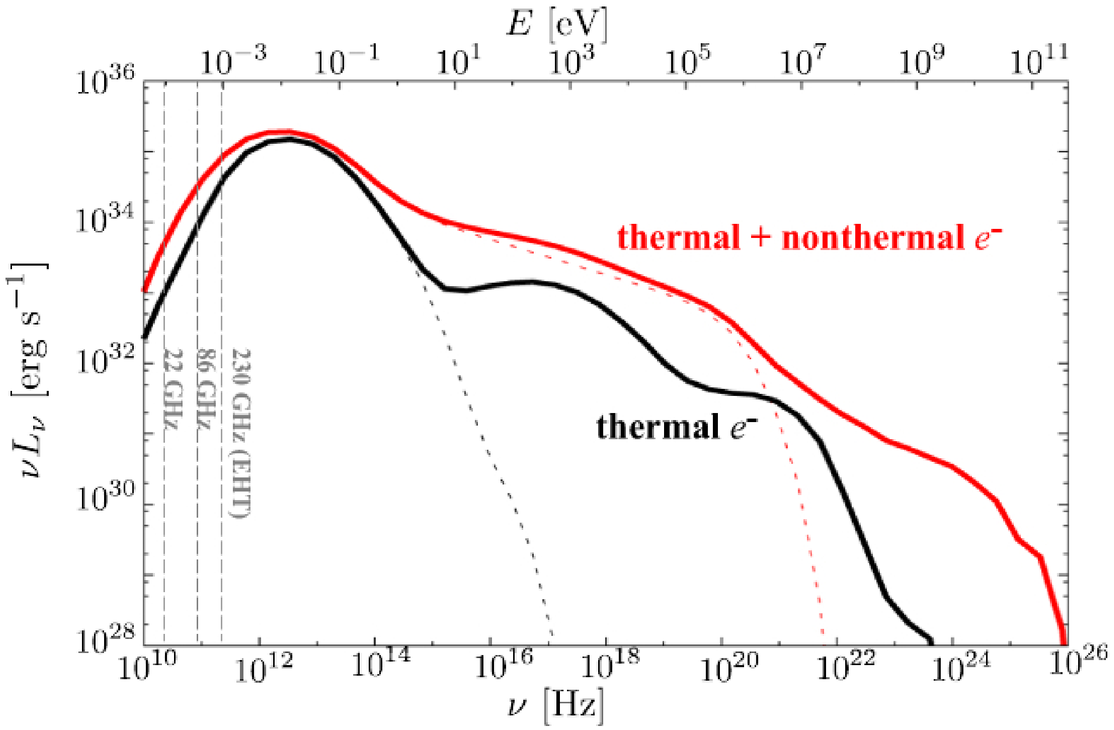
  - ✓非熱的電子on/off

非熱的電子はそのエネルギー密度が
磁気エネルギー密度の3%となるように各メッシュに設定



多波長スペクトルとイメージ

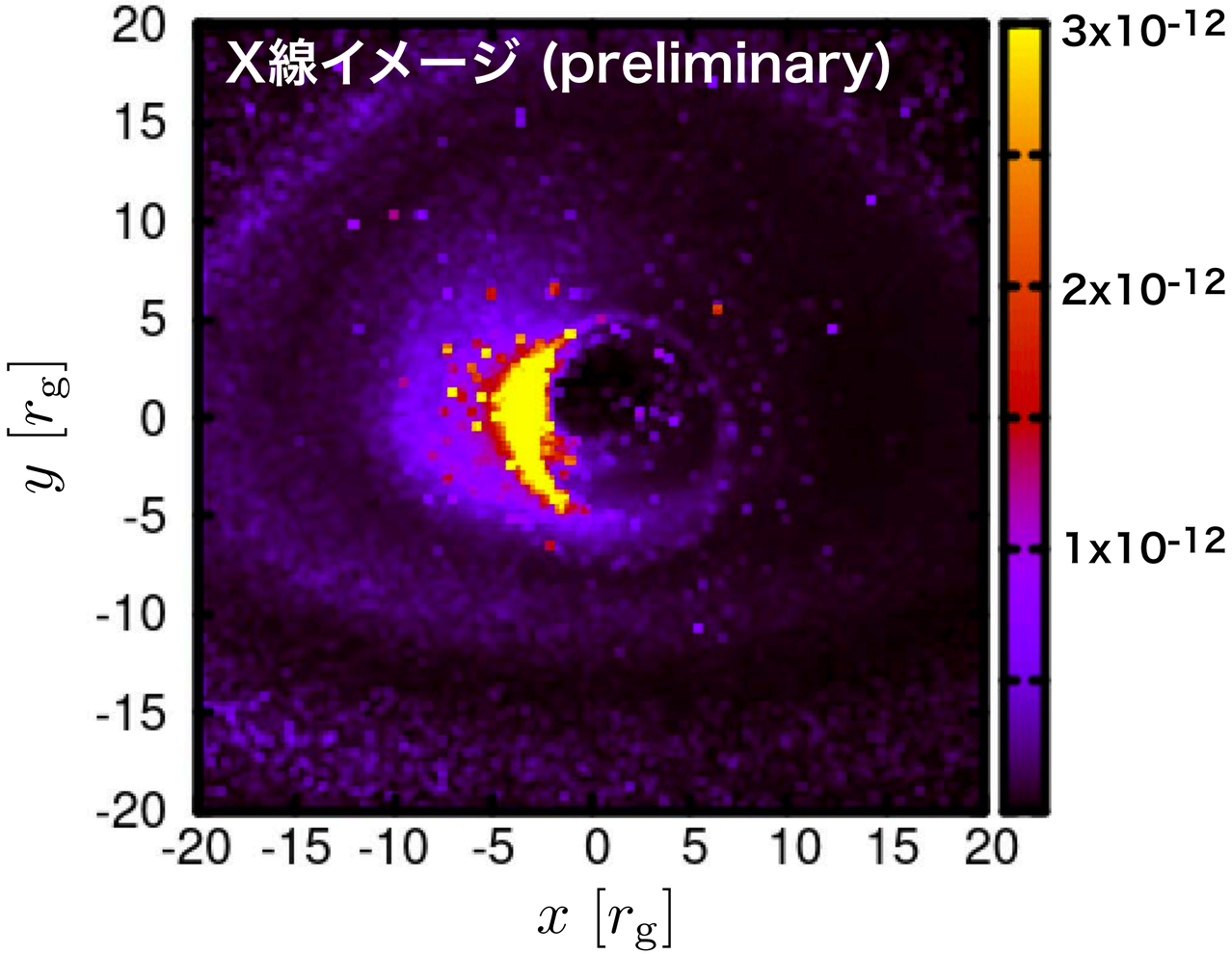


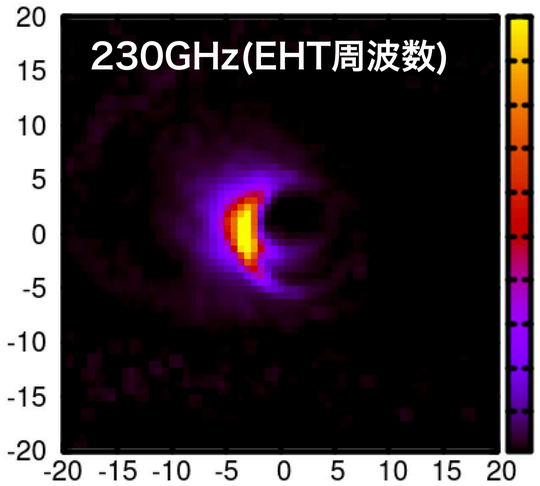


※磁気流体場は一般相対論的(輻射)磁気流体コードUWABAMI (Takahashi + 2016)で計算。

- Sgr A*のパラメータで熱的電子に非熱的電子(single PL)を加えたイメージ・スペクトル計算
- 非熱的電子により、(i) 電波で明るい領域は拡大, (ii) X線・ガンマ線放射は増加。
- X線の起源(熱的電子逆コンプトン散乱 or 非熱的電子シンクロトロン放射)の区別は重要(加速電子の最大ローレンツ因子)だが、難しそう？

(おそらく世界初) X線シャドウ・イメージ (0.3-300keV)

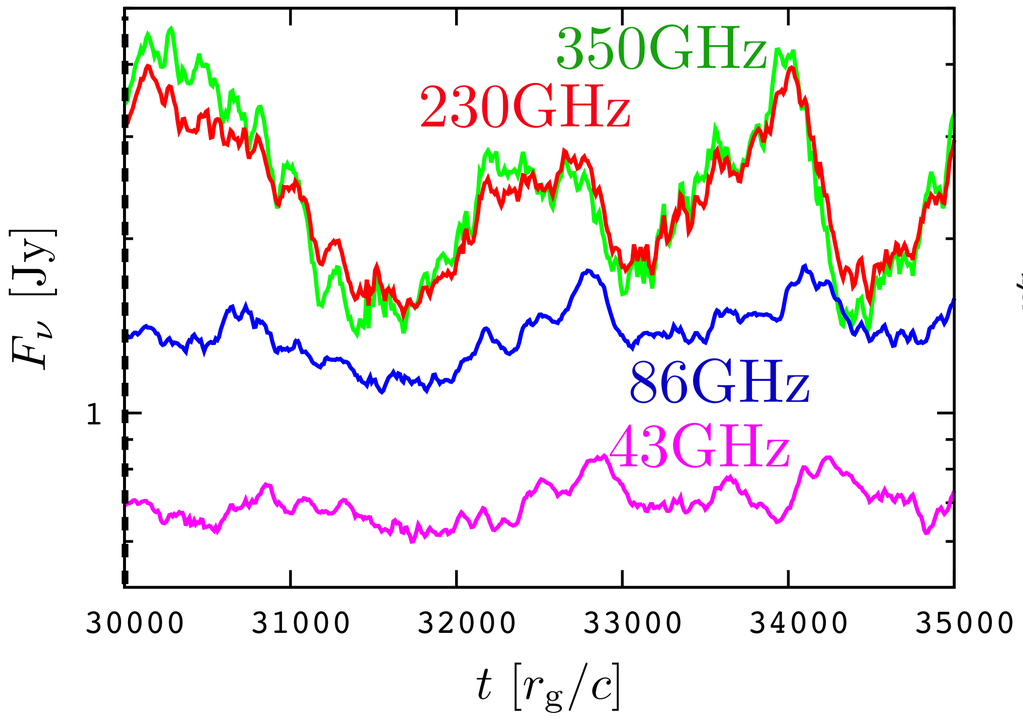


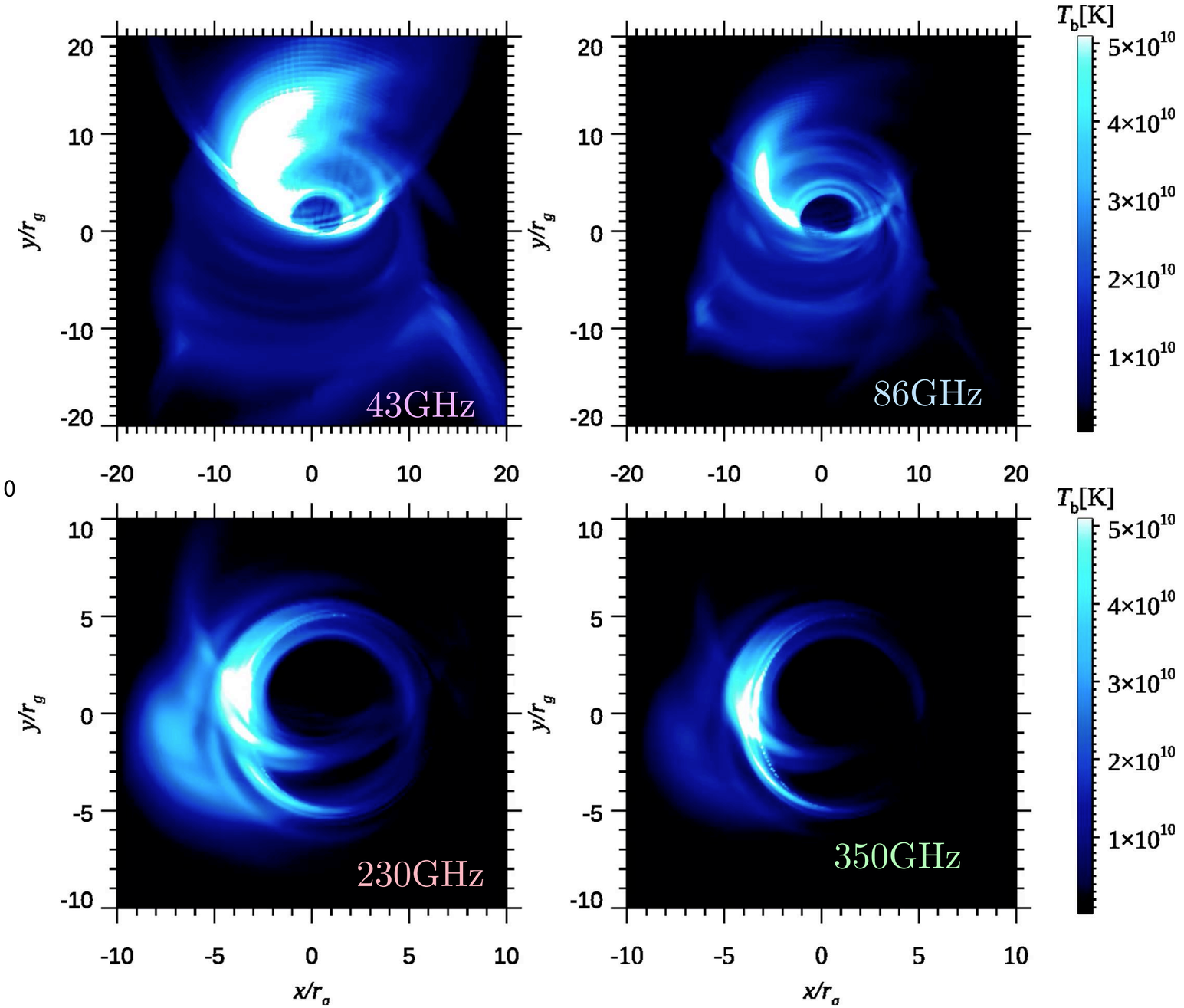


- 降着流のシンクロトロン+コンプトンX線シャドウ・イメージ(非熱的電子)
- 熱的電子コンプトン散乱イメージとの比較により、静穏状態の非熱的電子の最大ローレンツ因子の制限なるか？ 将来のX線干渉計(MIXIM等, 最高1rgスケール分解能)では到達可能。

時間変動

光度曲線・時間変動





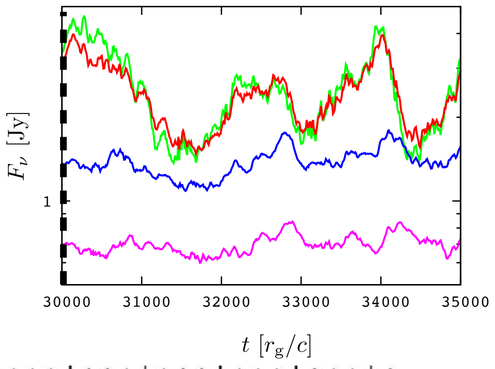
- 低周波(43, 86GHz)は高周波(230, 350 GHz)に比べ、増光にタイムラグ発生
- 高周波は変動が大きく、短周期変動も顕著

高周波/低周波は光学的に薄い/厚いため

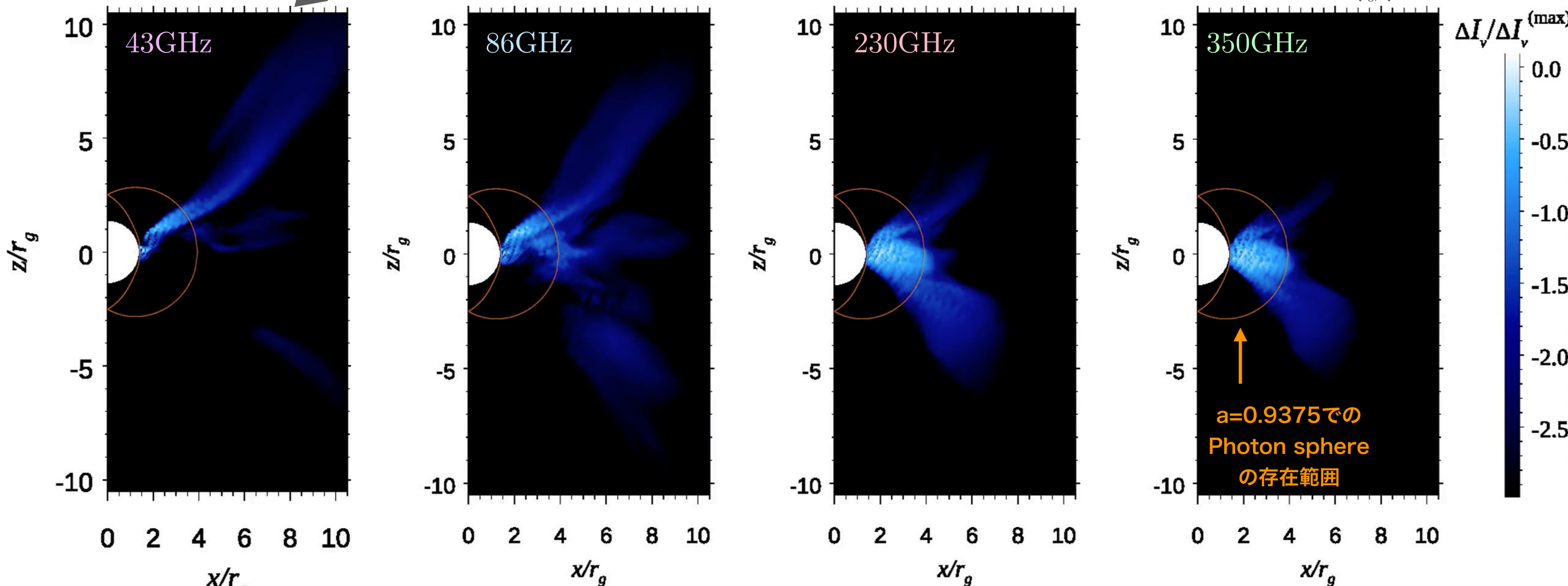
- ~100rg/c (i.e., ~5rgのdynamical time)と~1000rg/c (i.e., ~100rgのdynamical time)の変動が重なっている

観測者に届く光子の発生位置

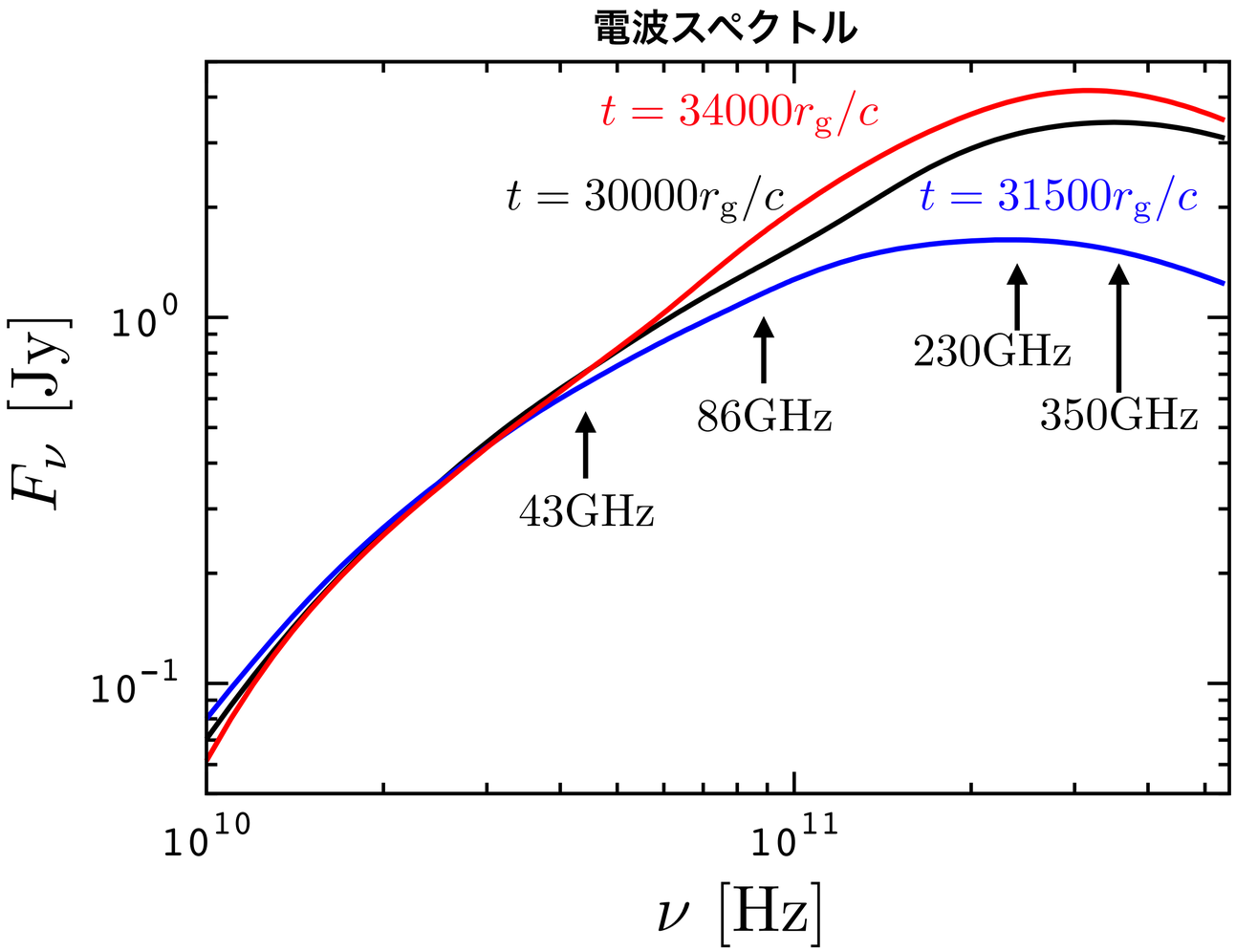
- 低周波(43, 86GHz)は光学的に厚い → 主に観測者側から光子が届く
- 高周波(230, 350 GHz)は光学的に薄い →光線湾曲により、円盤逆サイドから寄与
- 5rg程度の領域で強い変動 → 光子リング形成領域とその周辺からの直接光が100rg/c程度のtimescaleの光度変動を起こしている。

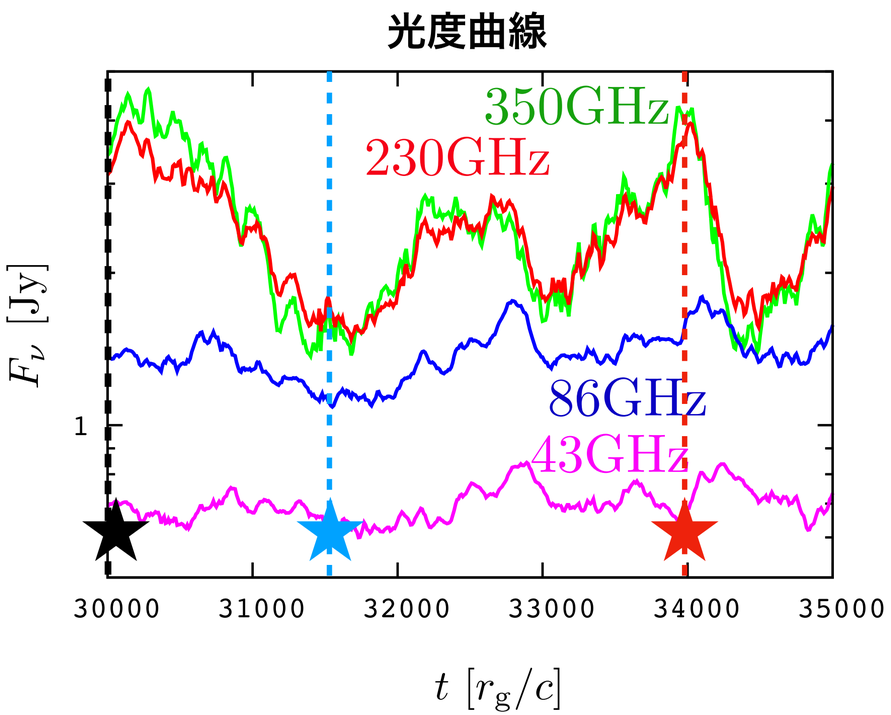


視線角度(45°)



電波帯域におけるスペクトル変動





- 3つの時期 (明るい時期・暗い時期・非常に明るい時期)の輻射スペクトル
- 低周波はほぼ同じ明るさ (∵光学的に厚い)。高周波のほうが、変動が大きい (光学的に薄く、BH近傍の変動が見える)
- 現在X線とガンマ線の変動を計算中

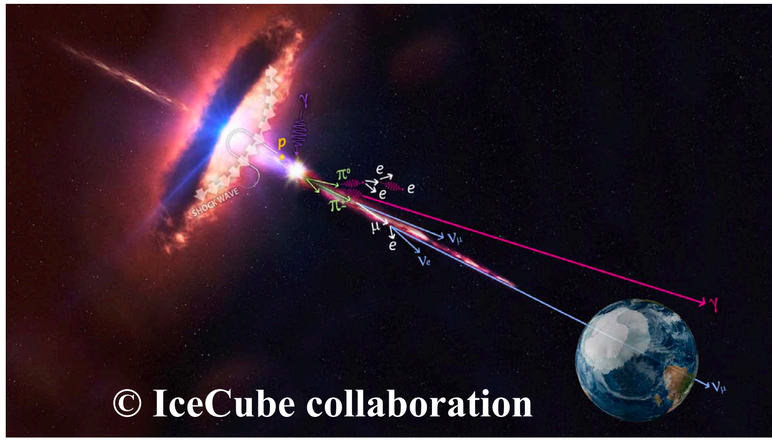
マルチメッセンジャー天文学へ

高エネルギー・ニュートリノを含むマルチメッセンジャー計算

- 高エネルギーニュートリノは宇宙線加速現場の謎を探る上での重要なメッセンジャー
- しかし、IceCubeで観測されるニュートリノ放射源は未同定

  AGN and/or 銀河団 and/or スターバースト銀河 and/or 低光度GRB

- **候補天体のニュートリノ放射特性を従来のone-zone近似を超えて定量的に明らかにすることが重要といえる。**



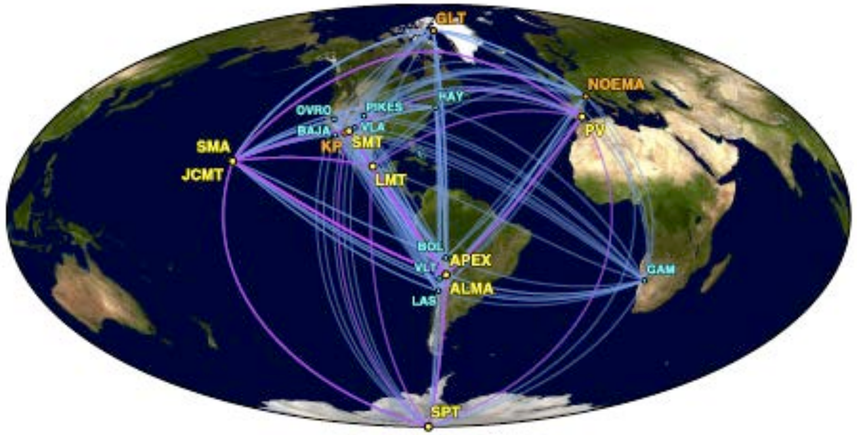
例) AGN

- 降着流・ジェットの状態(強/弱磁化)、大局的構造
- (微小スケール)励起乱流
- ブラックホール・スピン

どのように影響？

- 宇宙線加速
- ニュートリノ光度

※1zoneモデルでの降着円盤微小スケール乱流加速の先行研究：Kimura et al. (2015)等



Blackburn + 2019

- **次世代EHTでのマルチメッセンジャー天文学の展開**

3次元一般相対論的磁気流体(GRMHD)降着流での粒子加速・ニュートリノ放射計算のための数値計算コード　ν-RAIKOU (ニュー来光)を開発

計算手法

(1) 3次元GRMHDデータを用いた宇宙線陽子の軌道計算

- RAIKOUの測地線ソルバーでKerr時空での陽子軌道計算。

(PeV領域までに興味→ gyro長 < mesh sizeを仮定、流線に沿った伝搬計算。)

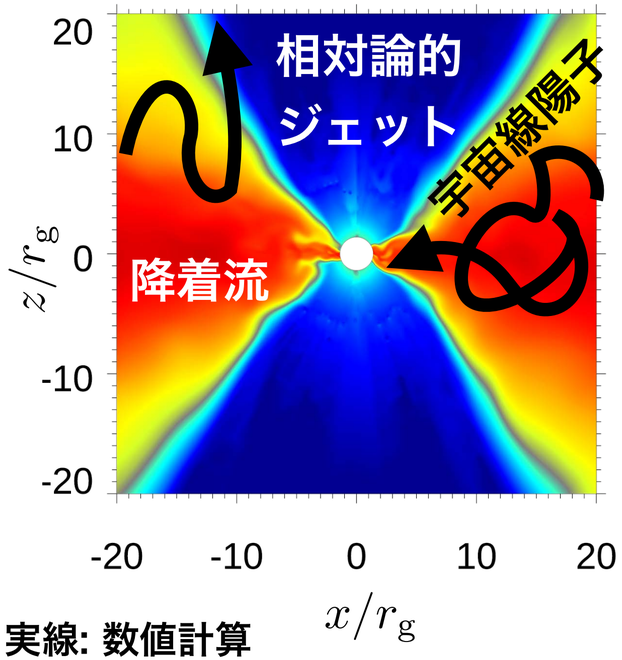
- semi-MAD(中程度に磁化した降着流)のデータ(Kawashima+2021)を 使用。
[GR(R)MHDコードUWABAMI (Takahashi + 2016) を用いた。]

(2)宇宙線陽子SEDの時間発展計算

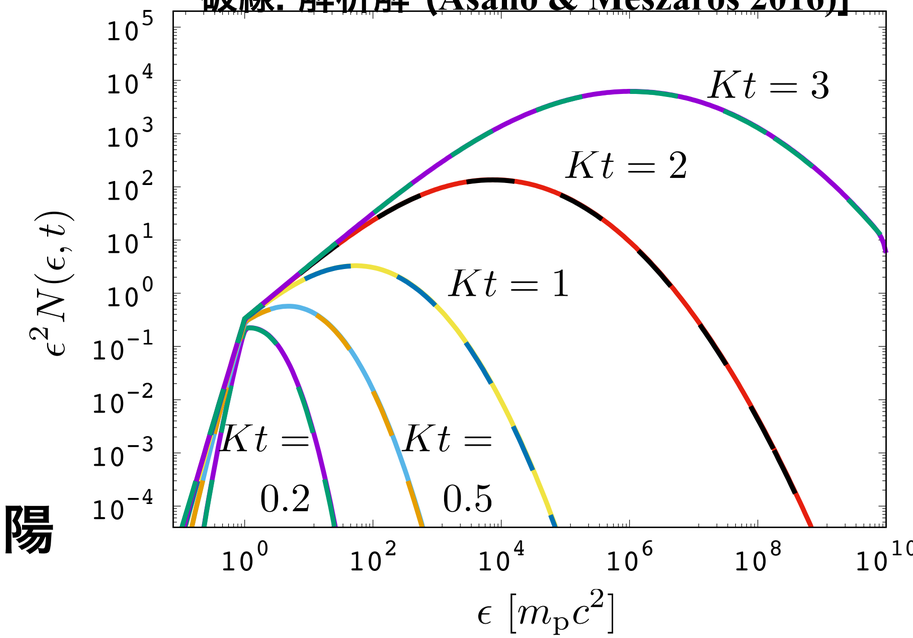
- 宇宙線陽子の注入項、乱流による拡散項、圧縮項を解く。
- 拡散過程はGreen関数(Becker+2006)で時間発展を解く。
(D(ε) = Kε^2 すなわちHard Sphereモデルを仮定)のデータ

(3)ニュートリノSED計算

陽子・ニュートリノSED関係をテーブル化、宇宙線陽子SEDと背景陽子密度から*p-p*衝突によるニュートリノSEDを計算



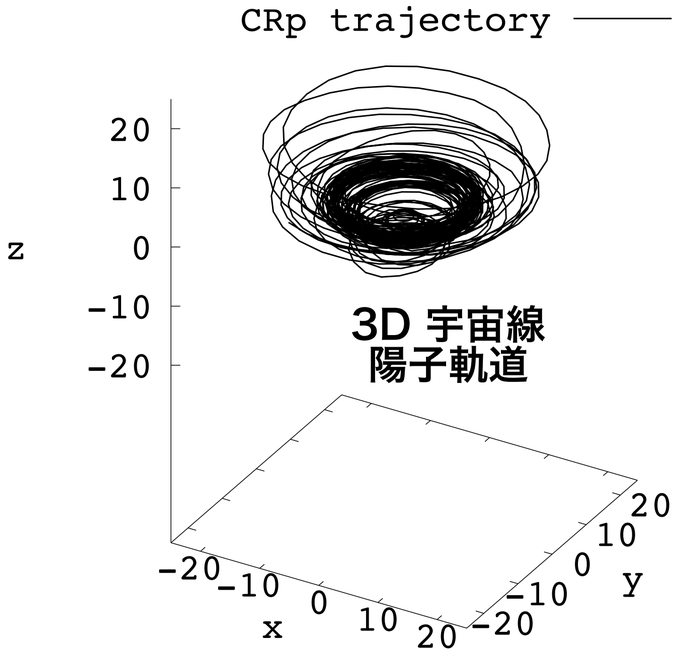
実線: 数値計算
破線: 解析解 (Asano & Meszaros 2016)]



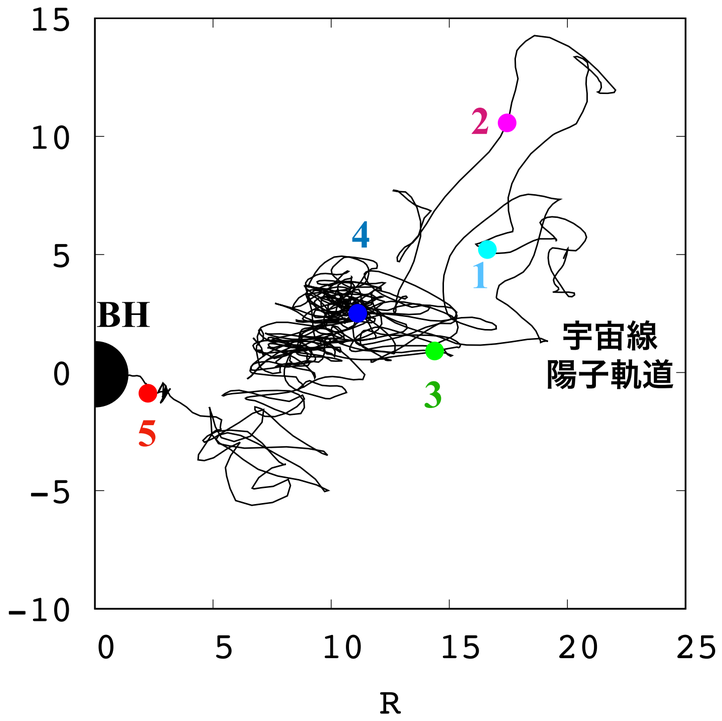
解析解をよく再現している

テスト計算 (preliminary)

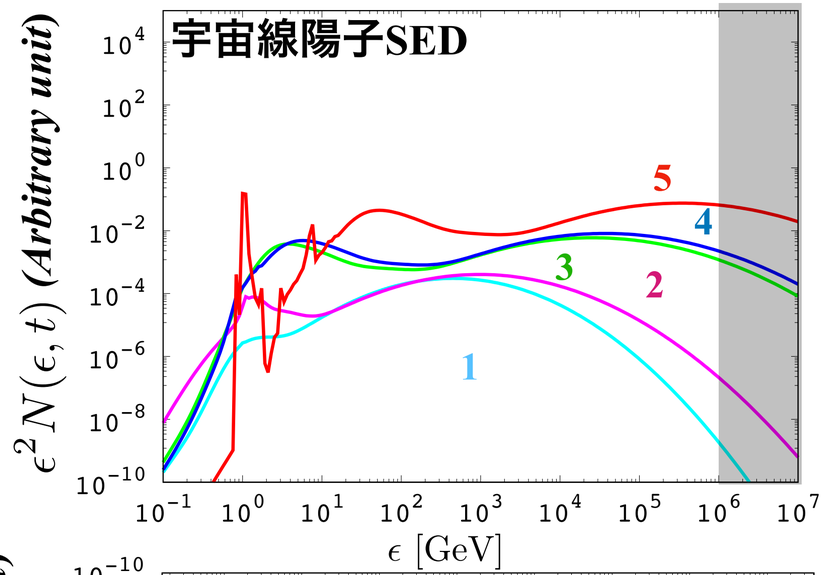
- GRMHDデータを時間更新させながら、
  陽子軌道計算＋宇宙線陽子SED＋ニュートリノSED
  の時間発展をテスト計算

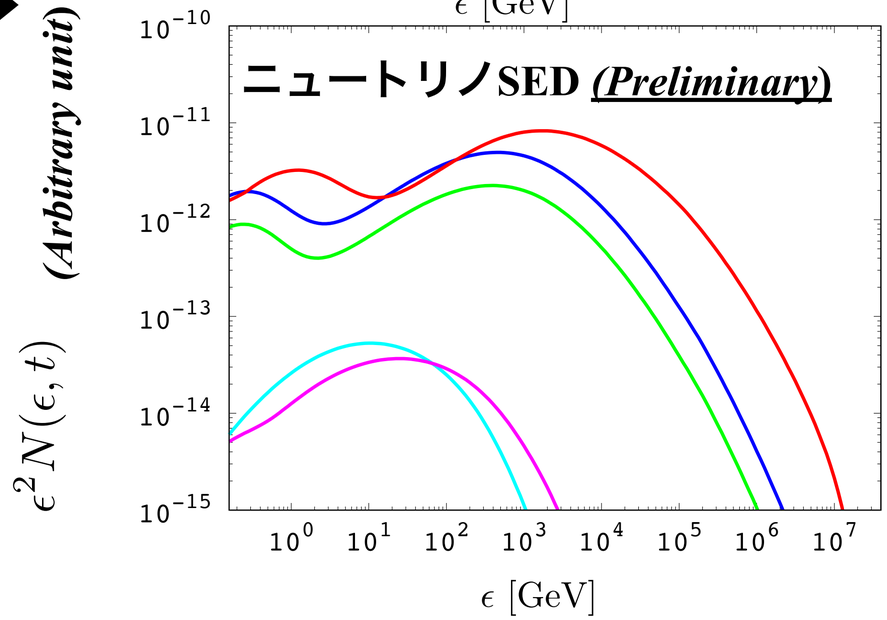


子午面に射影



乱流加速+圧縮の効果で
TeVニュートリノ発生





まとめ

- 次世代EHTや将来の多波長・マルチメッセンジャー観測に向けて、**時間変動・多波長・マルチメッセンジャー**をキーワードに**一般相対論的MHD+輻射＋多粒子輸送計算**に着手。
- (おそらく世界初の)シンクロトロン＋コンプトン散乱のX線イメージ計算。将来のX線干渉計で非熱的電子の加速に迫れるか。
- 時間変動計算ではEHTで観測される 230GHzや350GHzでは時間変動の振幅が大きく、100rg/c程度の速い変動が現れた。時間変動にBHスピンが反映されているか、今後調査。
- 一般相対論を考慮したニュートリノ計算に着手。AGNニュートリノ光度のBZパワー依存性等に迫る予定。次世代 EHTとのシナジー構築も。