

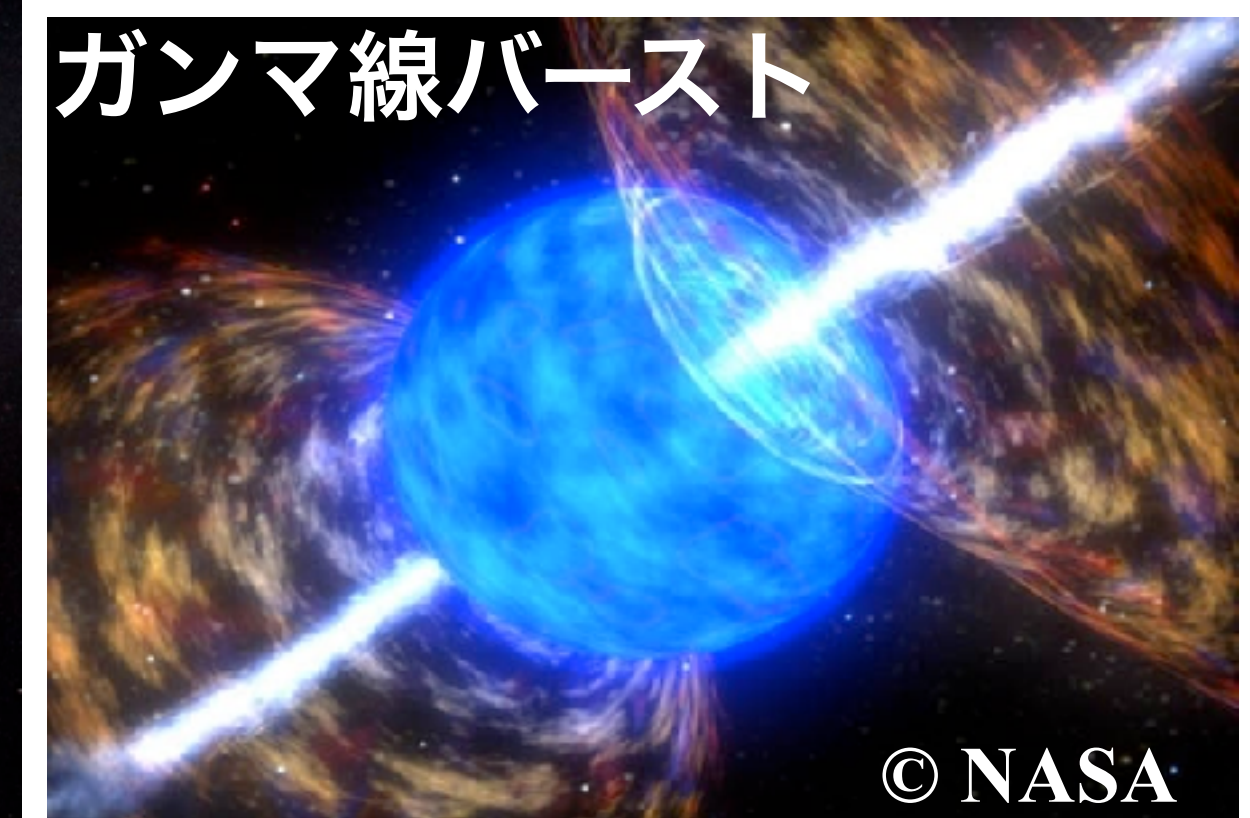
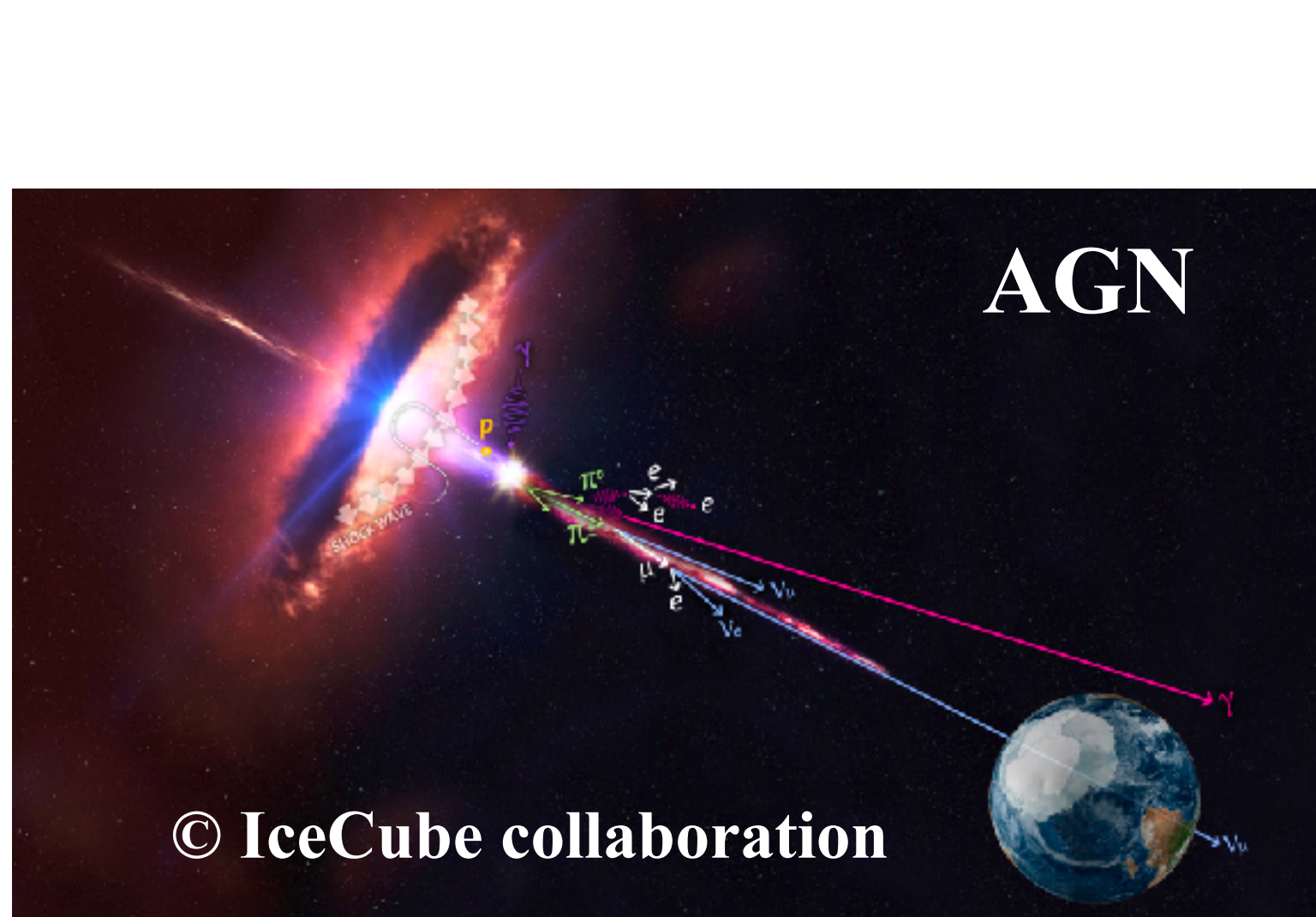
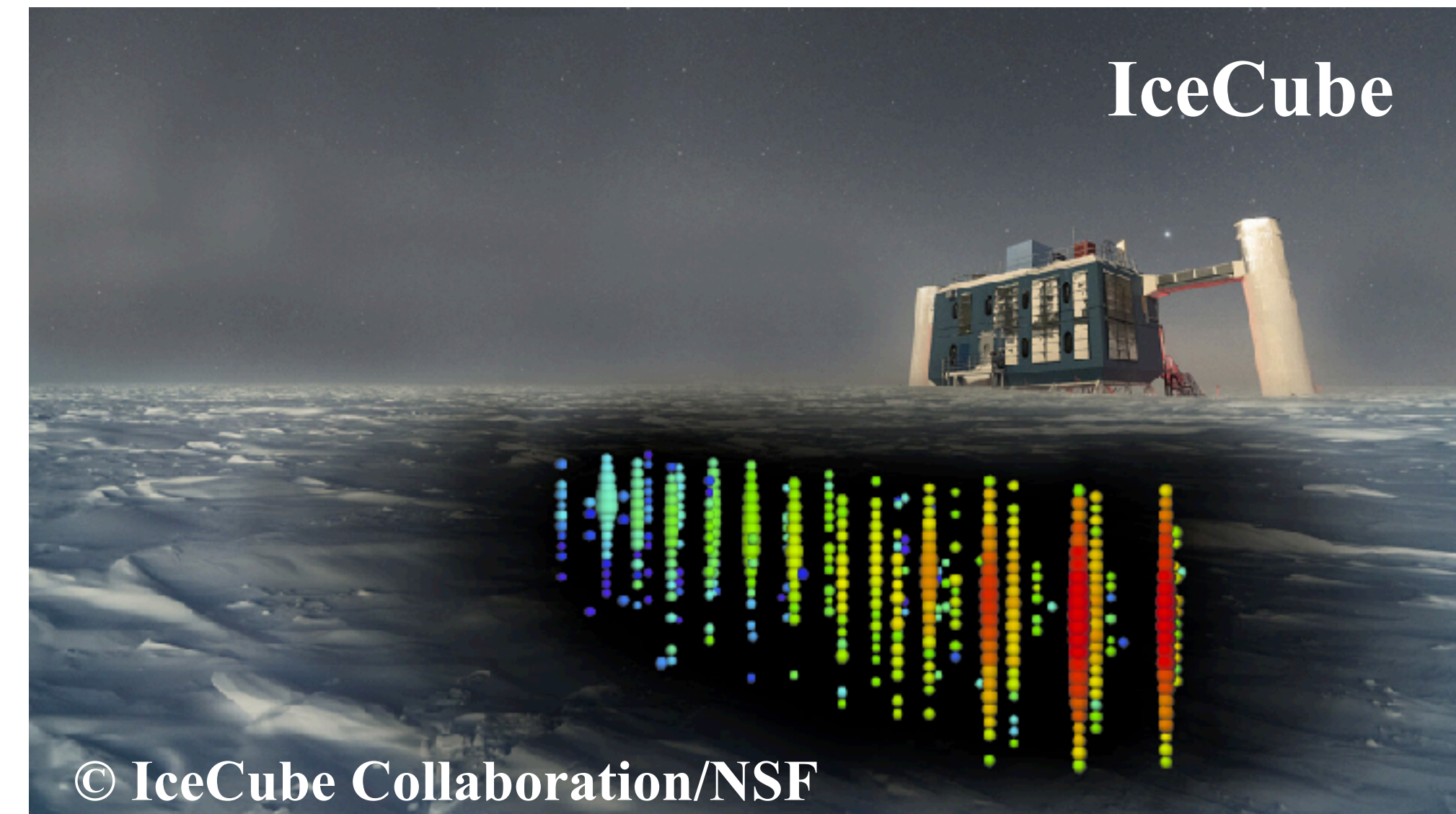
大局的なブラックホール降着流からの 高エネルギーニュートリノ放射

川島 朋尚 (東大宇宙線研)

共同研究者：浅野勝晃 (東大宇宙線研)

IceCubeによる高エネルギーニュートリノ観測

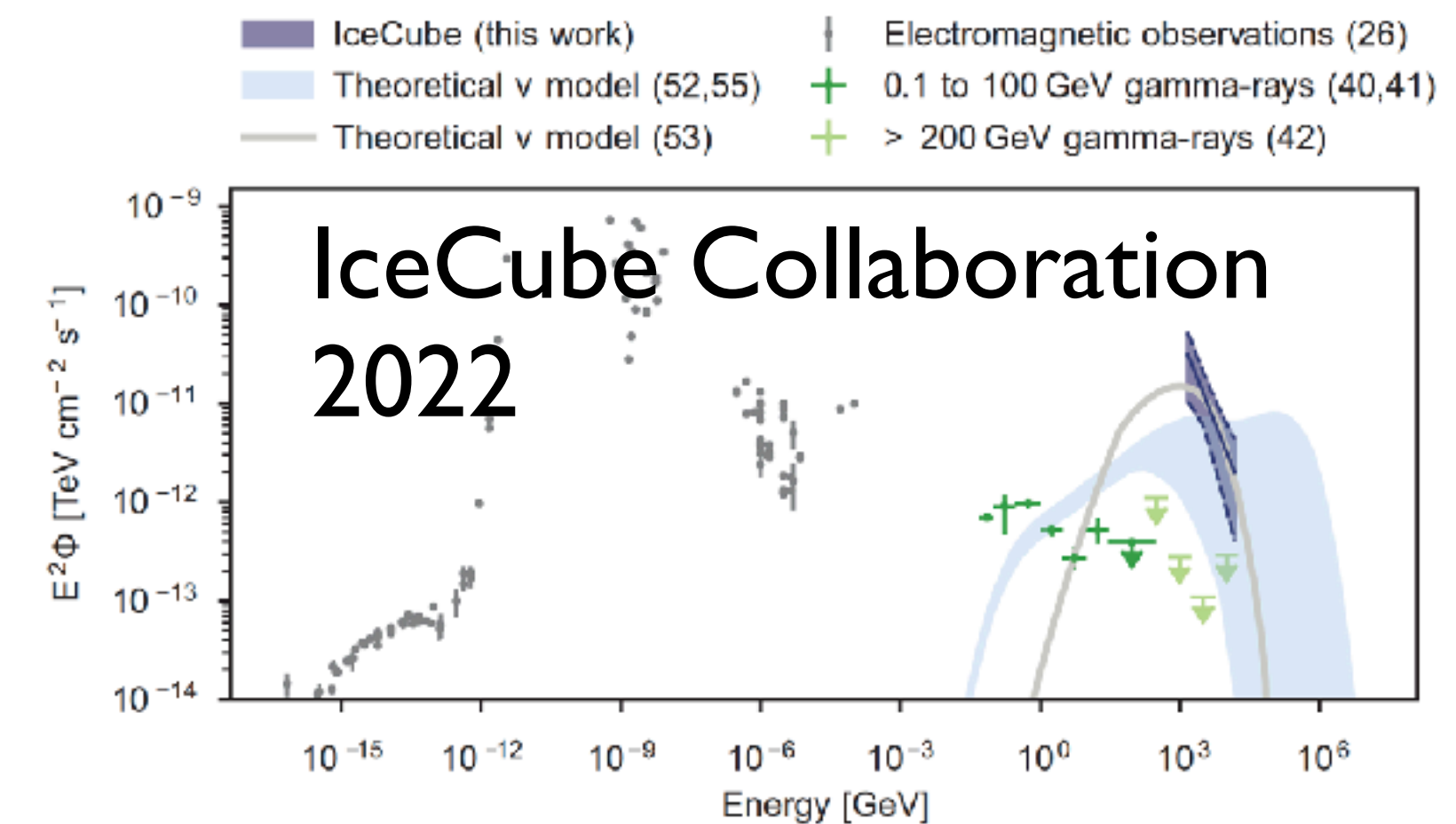
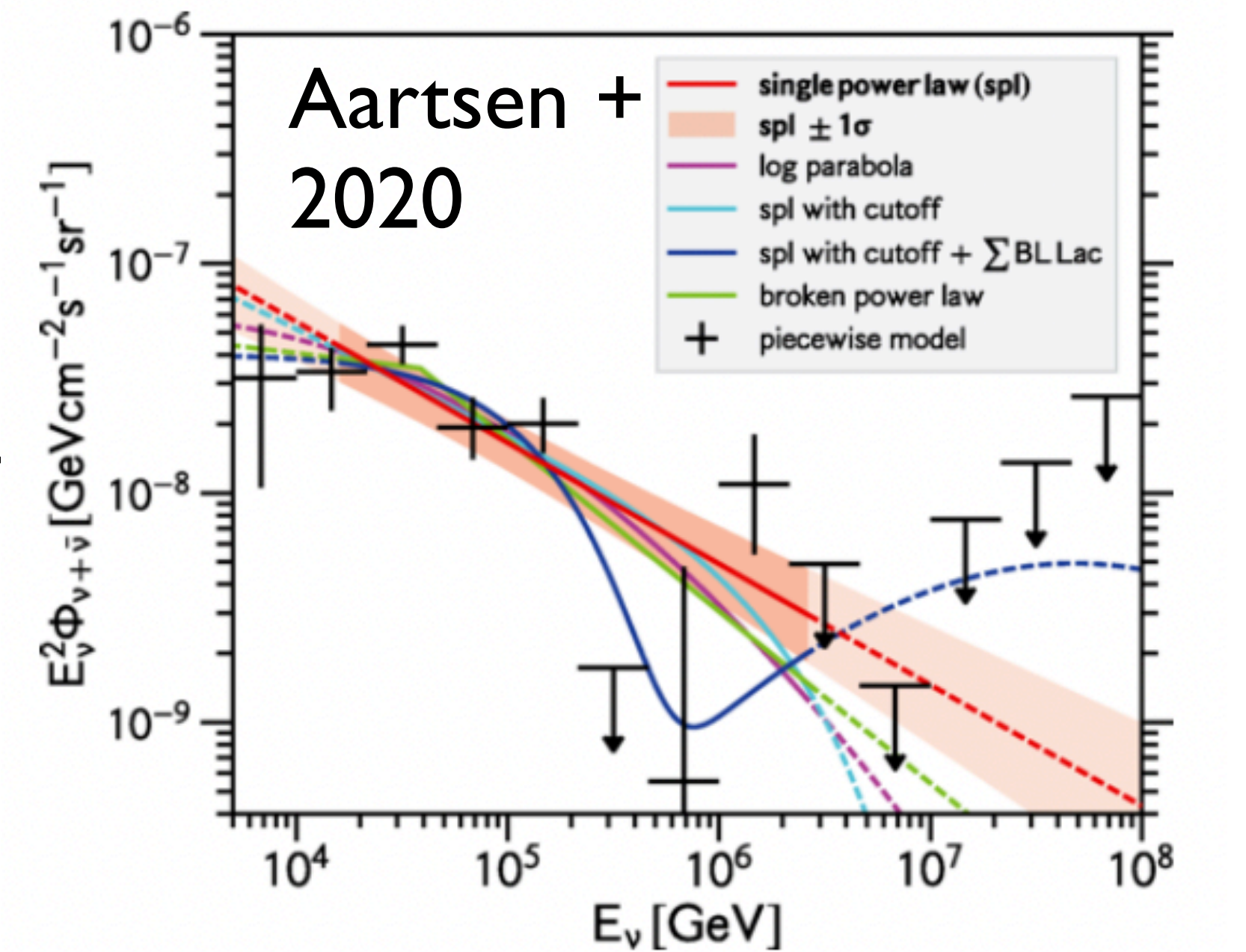
- 高エネルギーニュートリノは宇宙線加速現場の謎を探る上で重要なメッセンジャー
- IceCube観測されるニュートリノ放射源は未同定
 - ✓ 活動銀河中心核(AGN)
 - ✓ 銀河団
 - ✓ スターバースト銀河
 - ✓ 低光度ガンマ線バースト



IceCubeで観測されるニュートリノのSED

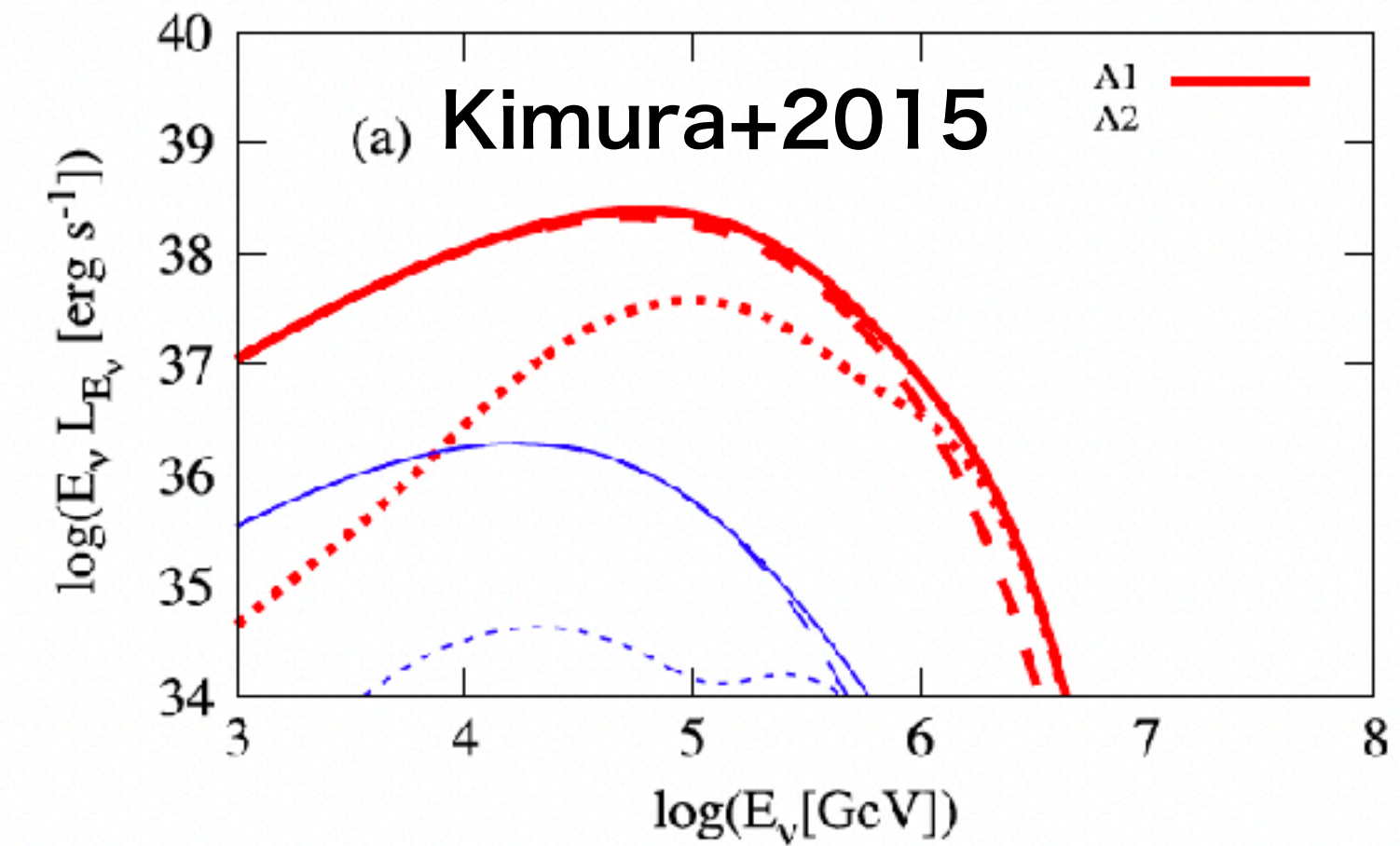
- Diffuseニュートリノ：ややフラットなSED (Aartsen + 2020 等)
- 10年サーベイデータから、NGC 1068でホットスポットも検出 steep(冪指数~3)なSED (Aartsen + 2020, IceCube Collaboration 2022)
→ 様々なニュートリノSED？
- ニュートリノ放射の起源には様々な説
 - ✓ 降着流モデル (Kimura + 2015等)
 - ✓ 円盤コロナモデル (Inoue Y. + 2020, Murase + 2020)
 - ✓ ウィンドモデル (Inoue S. 2022)

今回は降着流に着目



Cosmic Ray (CR) Acceleration Model in Accretion Flow

- 磁気リコネクション (e.g., Hoshino + 2013)
- Izone近似に基づく運動論的乱流 (e.g., Kimura + 2015)



本研究：

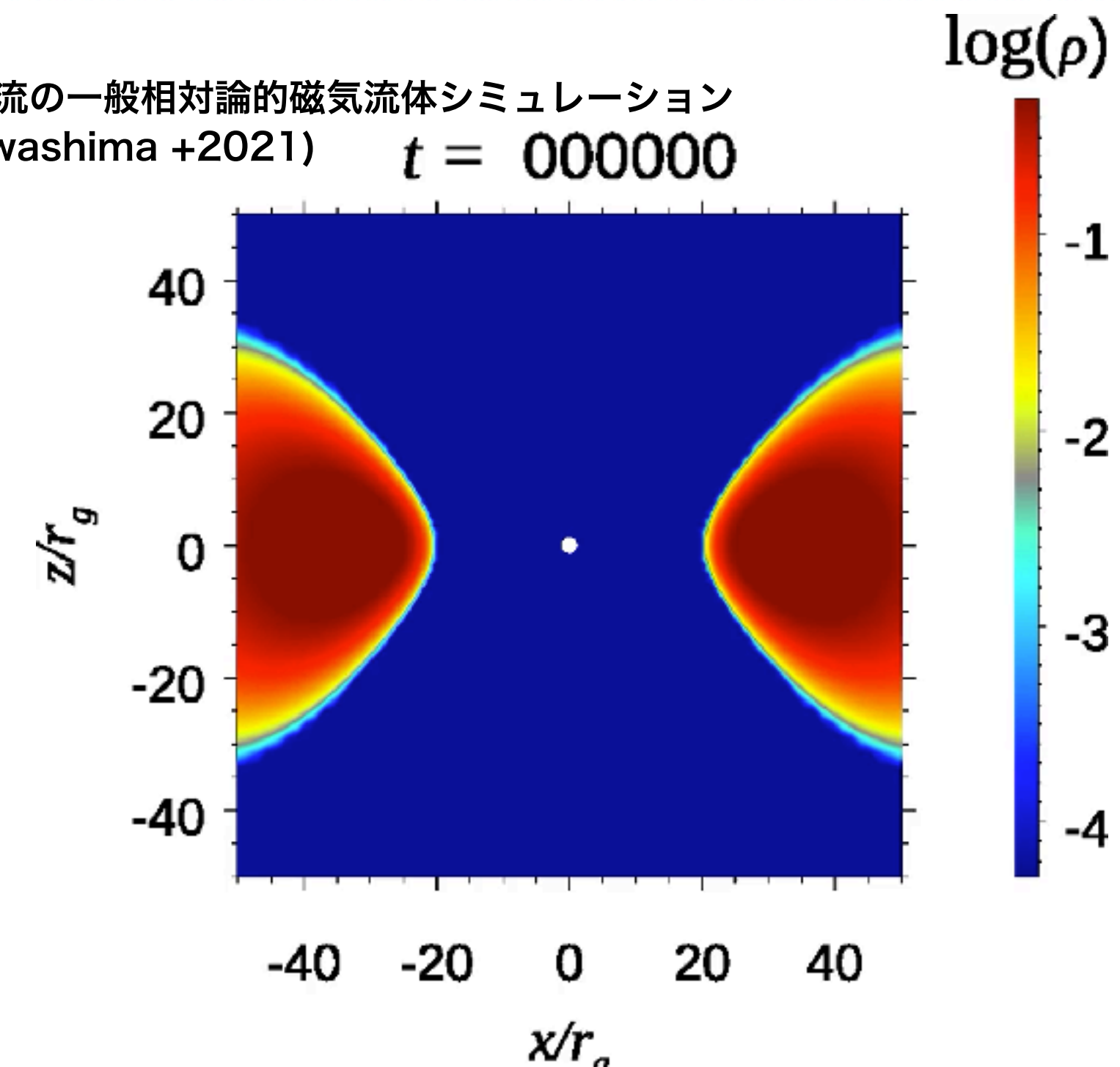
3次元一般相対論的磁気流体(GRMHD)降着流

+ 粒子加速・ニュートリノ放射計算計算コード

「 ν -RAIKOU (ニュー来光)」

→ **大局的な**低密度降着流における微小スケール乱流による宇宙線陽子加速・ニュートリノ放射を計算。(BH質量： $10^8 M_\odot$, 質量降着率 $10^{-2} L_{\text{Edd}}/c^2$)

降着流の一般相対論的磁気流体シミュレーション
(Kawashima +2021) $t = 000000$



計算手法

(1) 3次元GRMHDデータを用いた宇宙線陽子(ラグランジュ粒子)の軌道計算

- RAIKOUの測地線ソルバーでKerr時空での流線に沿った陽子軌道計算。

(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

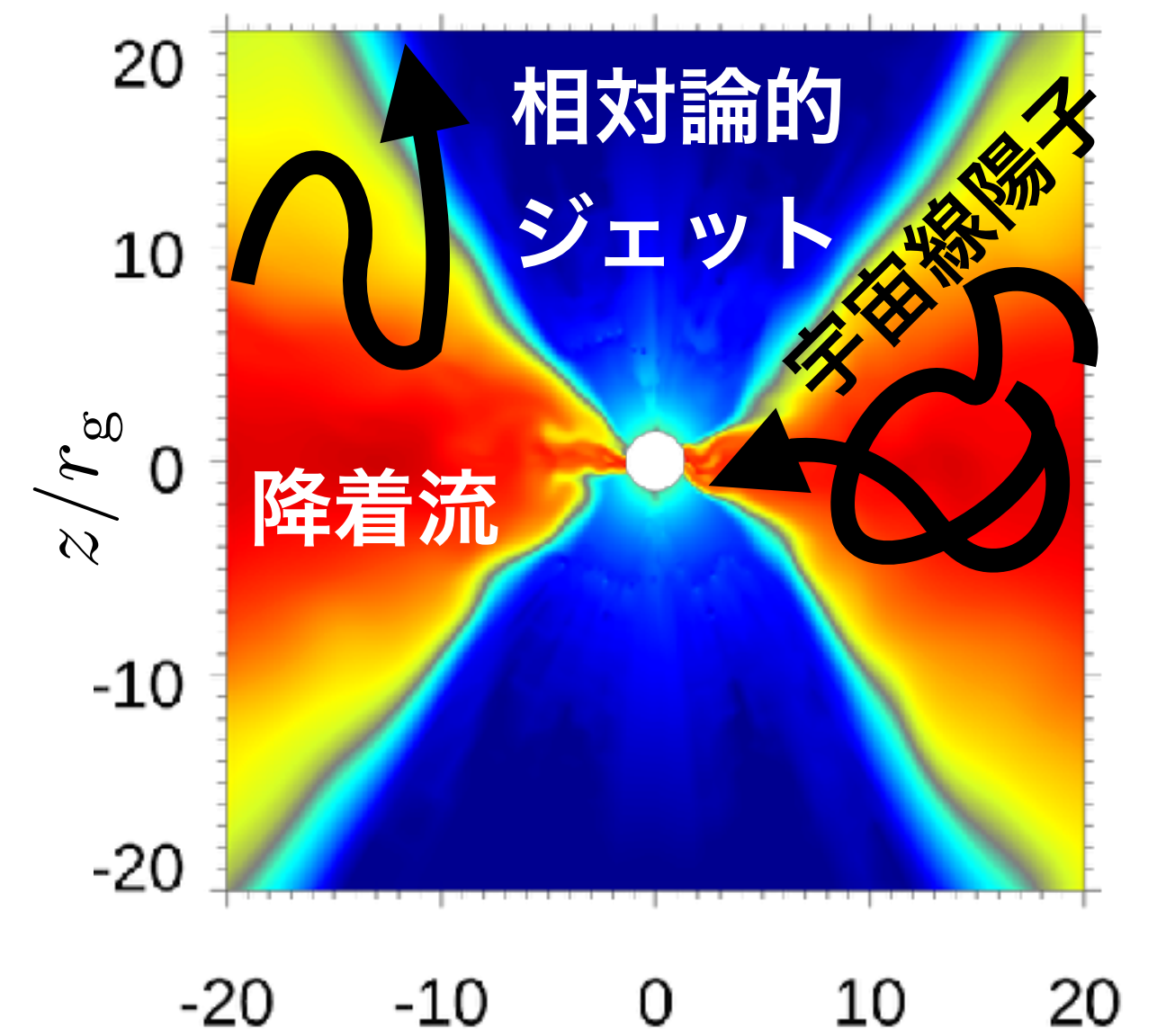
- 流体静止系で各位置での宇宙線陽子注入と圧縮を考慮したFokker-Planck方程式を解く。

- 拡散項はGreen関数(Becker+2006)で時間発展を解く。

($D(\epsilon) = K \epsilon^2$ すなわちHard Sphereモデルを仮定)

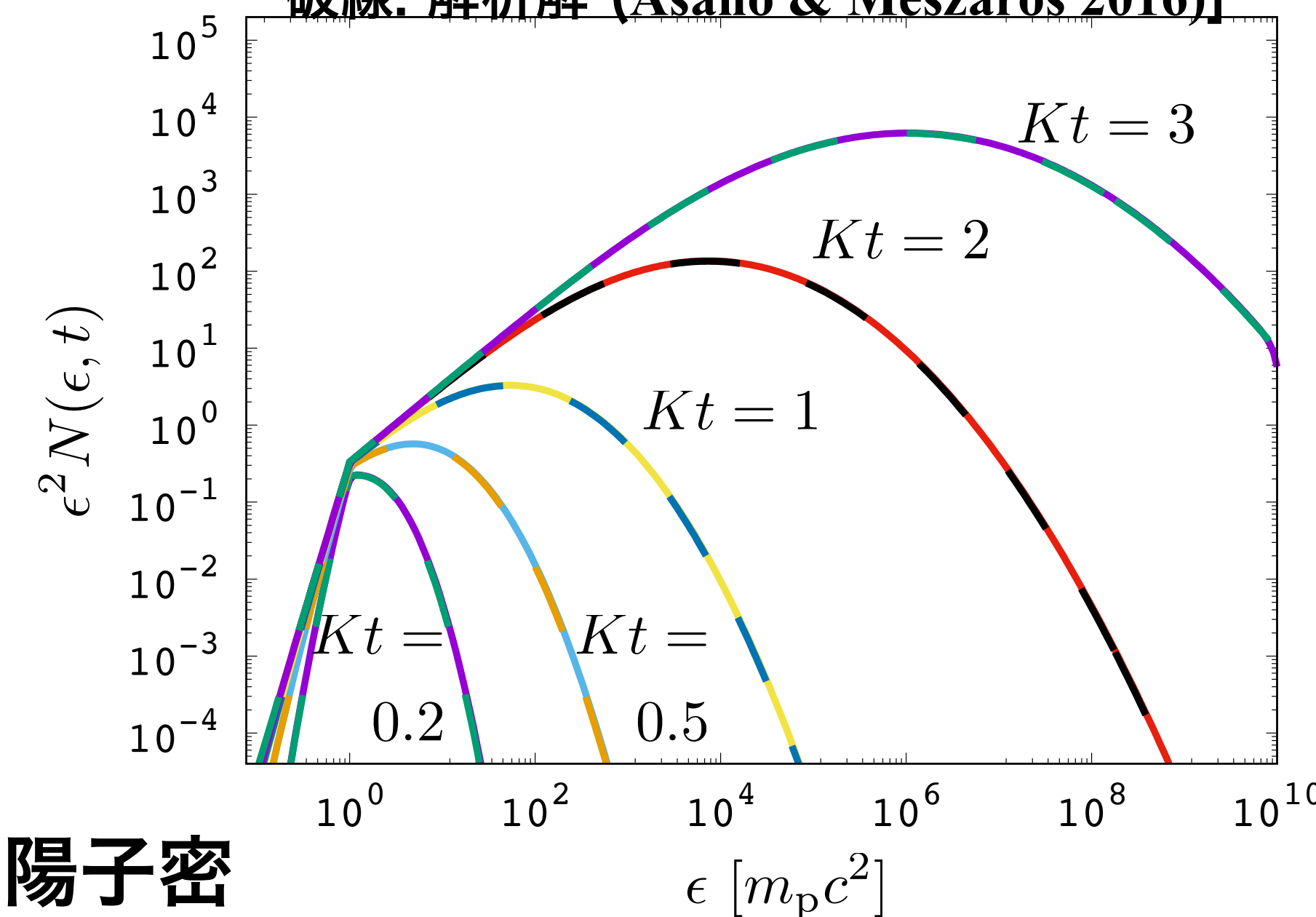
(3) ニュートリノSED計算

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

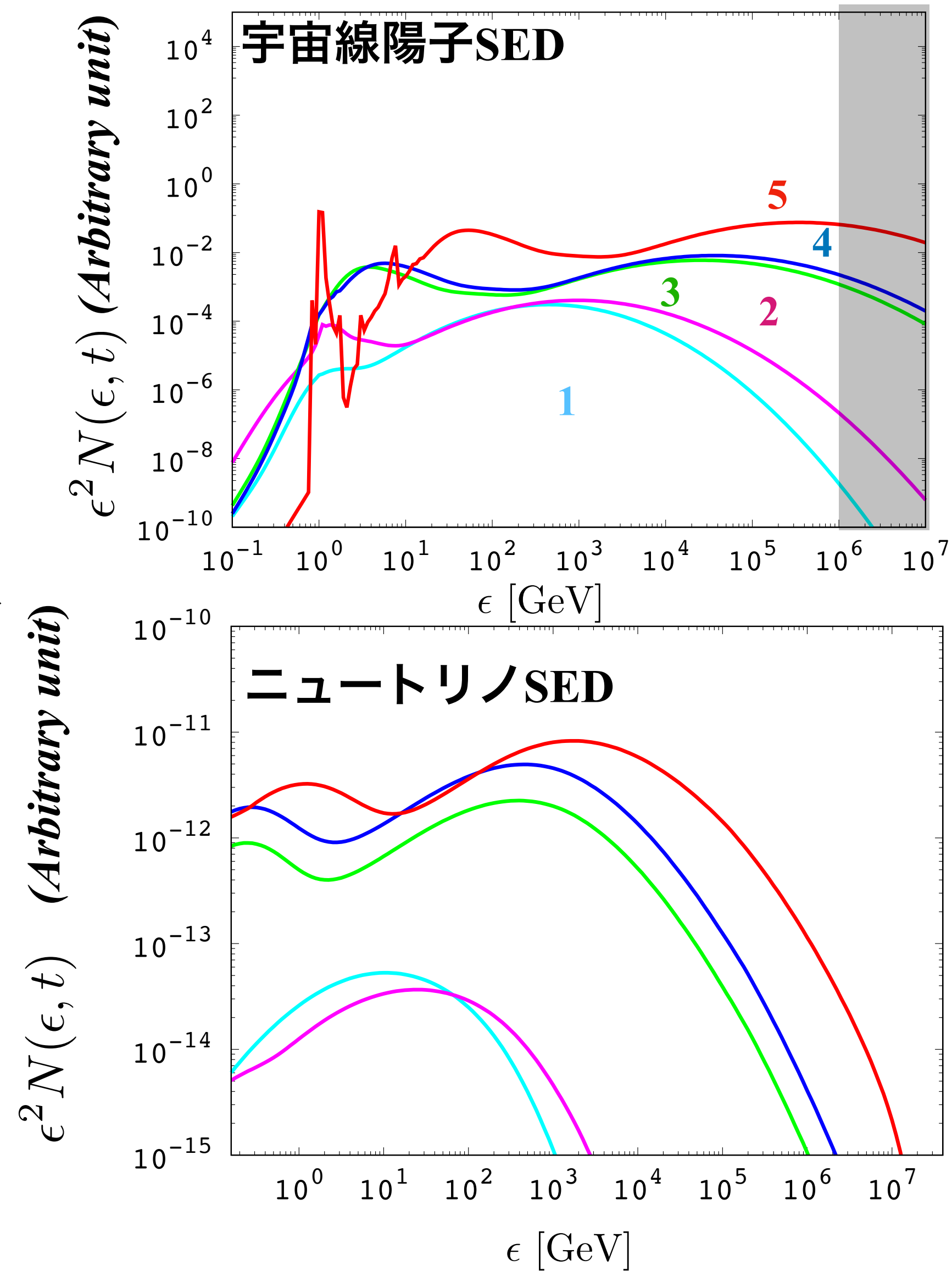
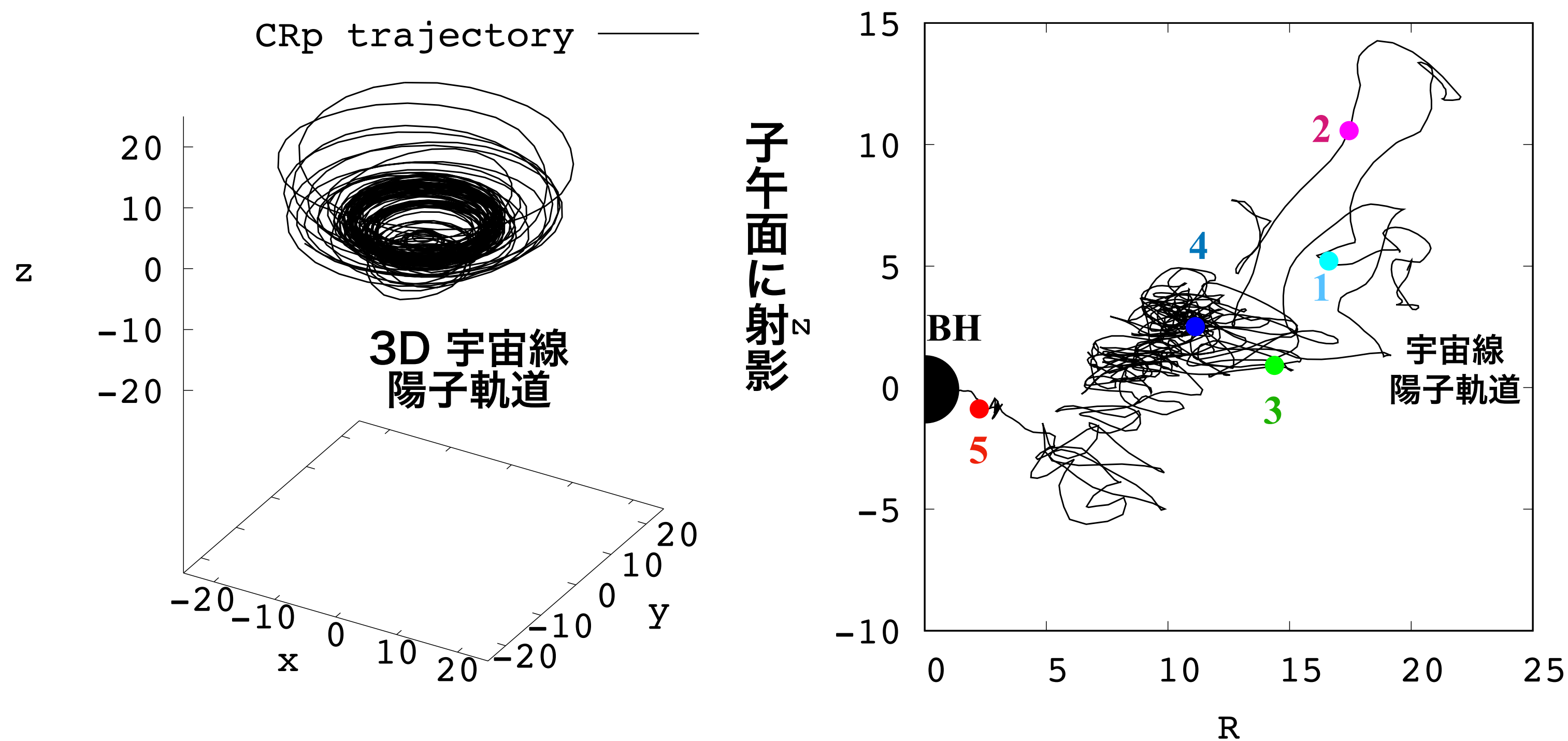
破線: 解析解 (Asano & Meszaros 2016)



解析解をよく再現している

計算結果 (概要)

- 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の時間発展を計算 (質量降着率は電波フラックスで規格化)



約20,000宇宙線粒子のニュートリノスペクトルの平均をとる

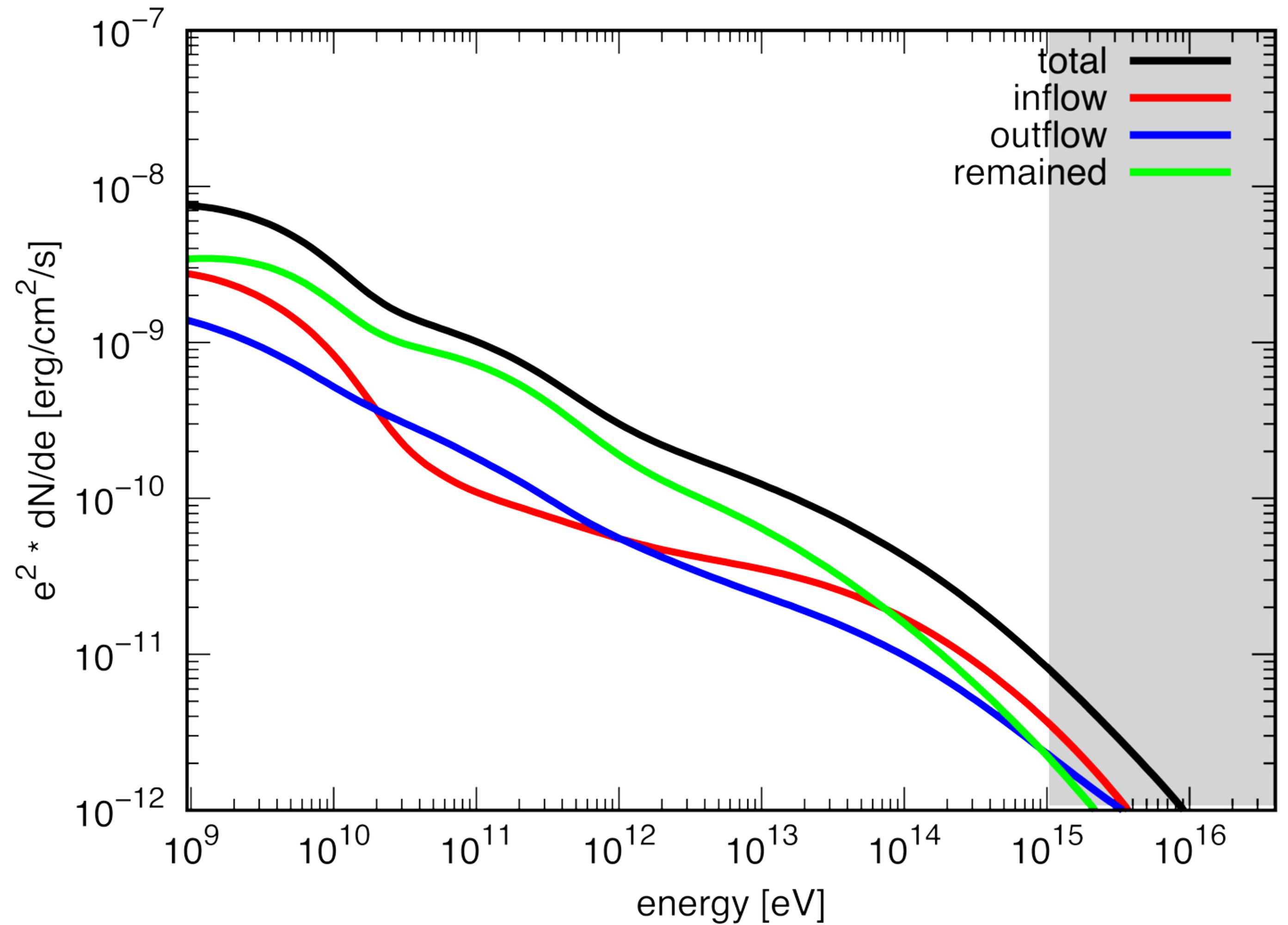
時間平均ニュートリノ・フラックスと観測データとの比較

- 1-zoneモデルに比べflatなスペクトル が得られた。(diffuse fluxと整合的)
- ニュートリノ放射スペクトルを **インフロー**、**アウトフロー**、**残留**となった宇宙線陽子で切り分け
- インフロー宇宙線陽子はアウトフローと同程度寄与。

$$t_{\text{acc}} = v/\dot{v} \quad K = 4\eta/t_{\text{acc}}(U_{\text{th}}/U_{\text{CR}}) \quad \eta = 3 \times 10^{-3}$$

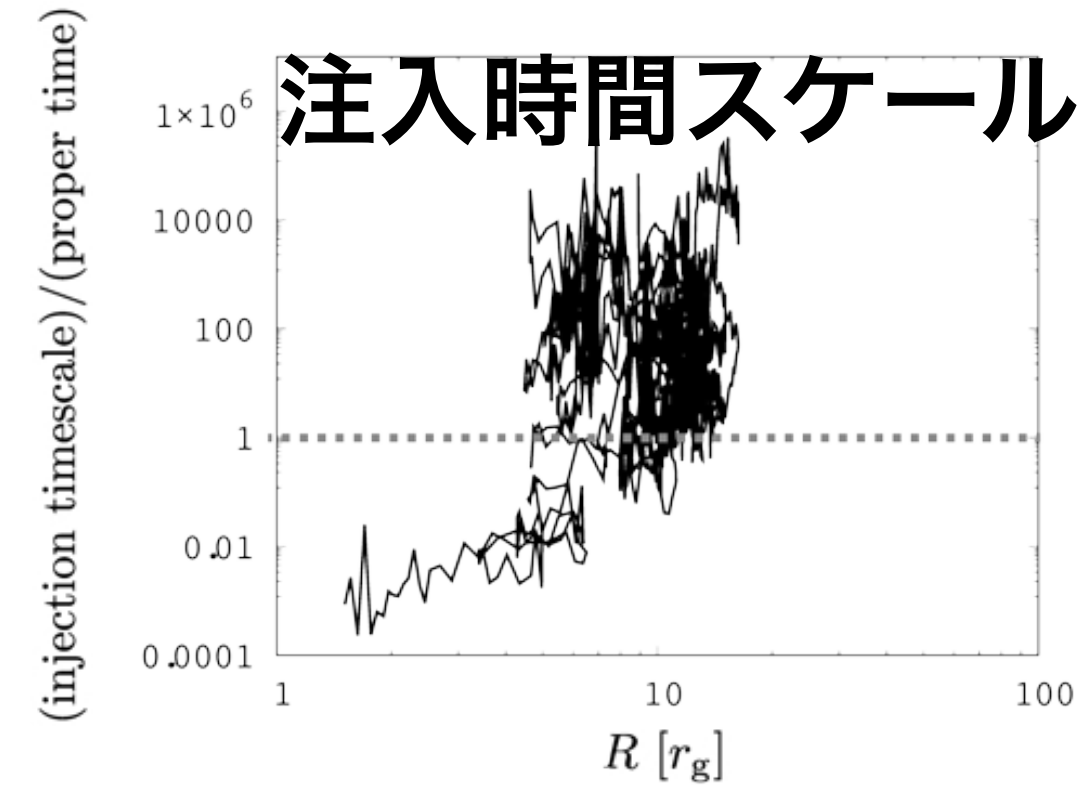
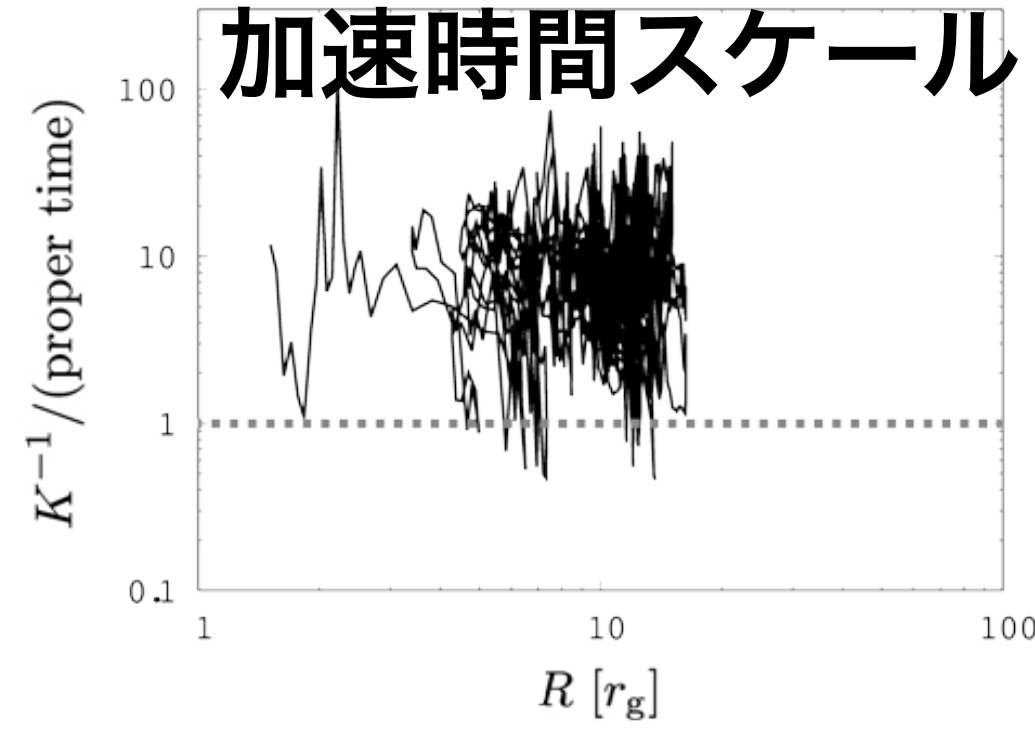
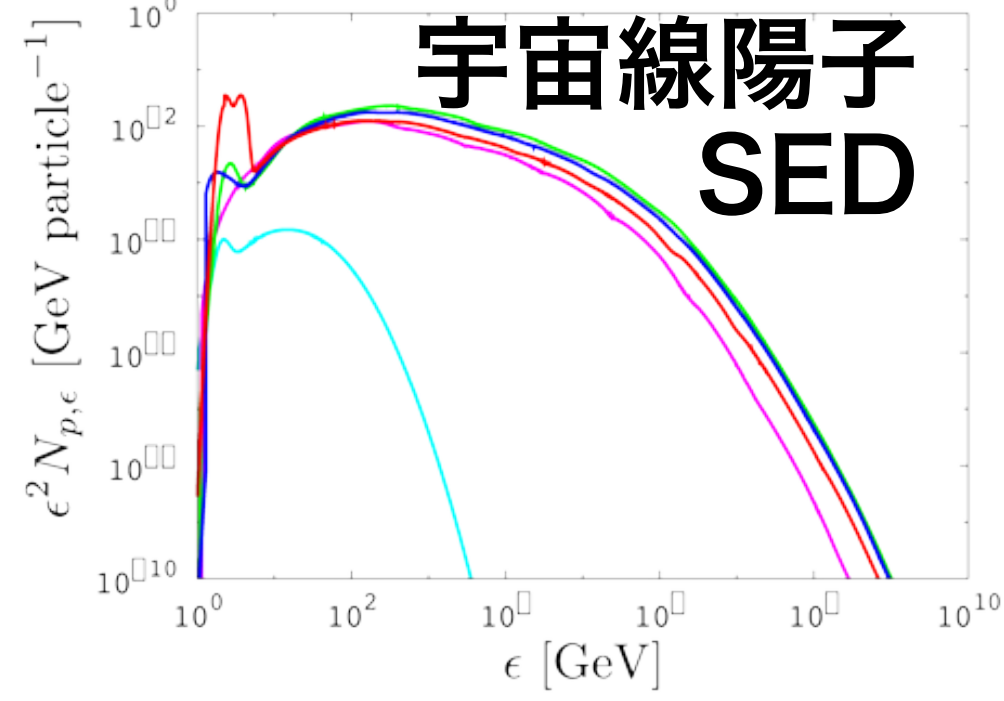
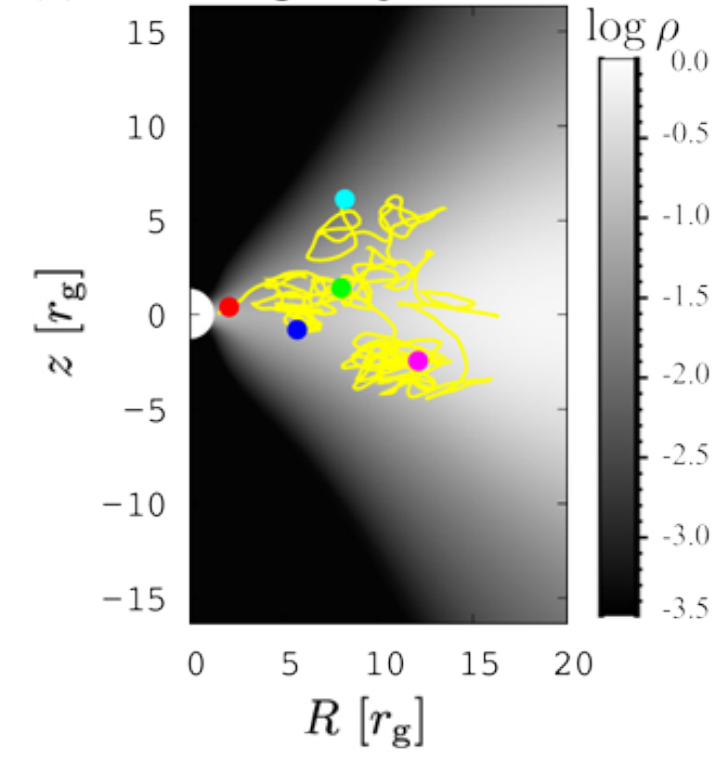
$$t_{\text{inj}} = B/\dot{B} \quad \dot{n}_{\text{inj}} = f_{\text{inj}}/(\beta t_{\text{inj}}) \quad f_{\text{inj}} = 10^{-2}$$

↑ 単位粒子あたりの注入率

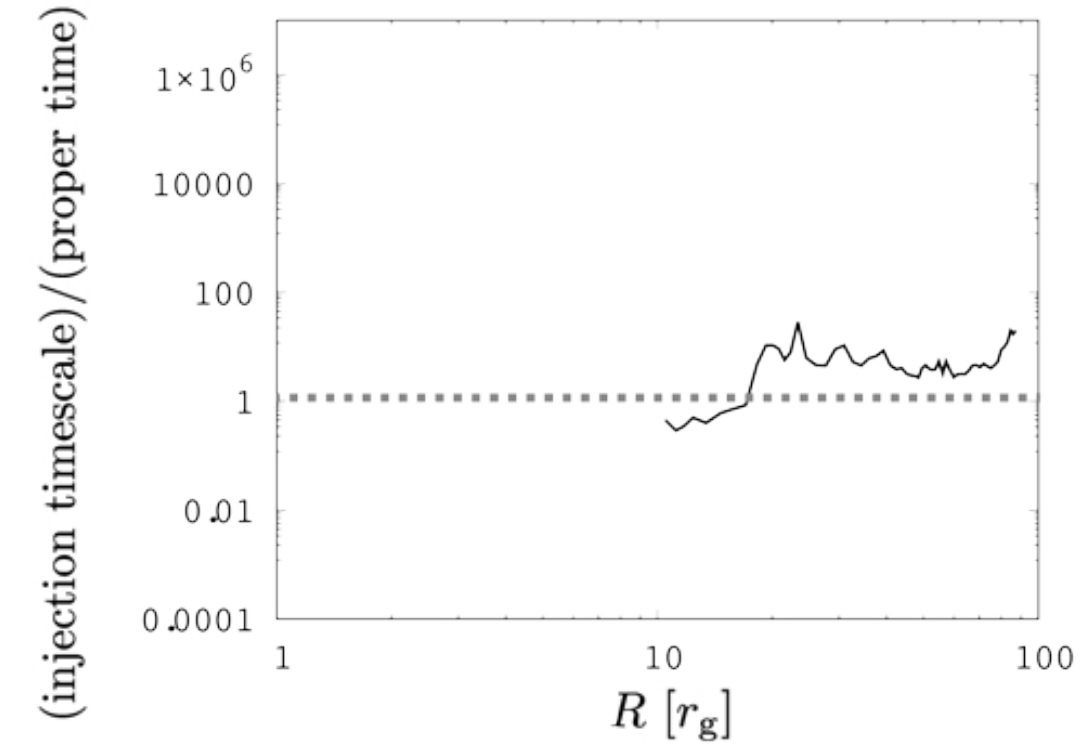
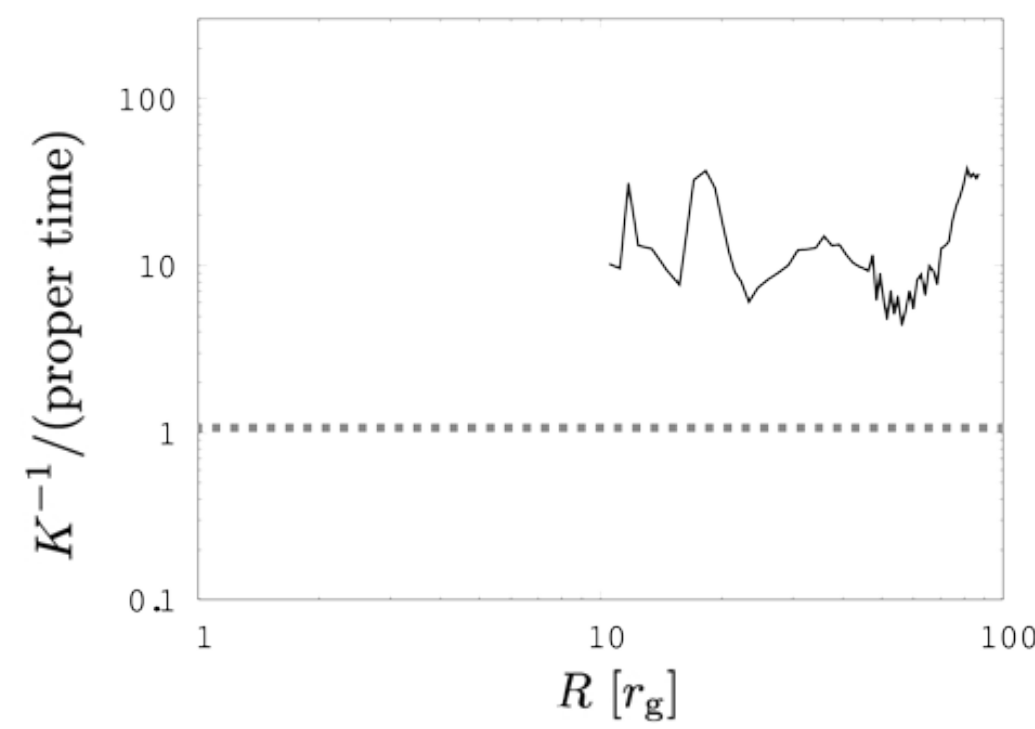
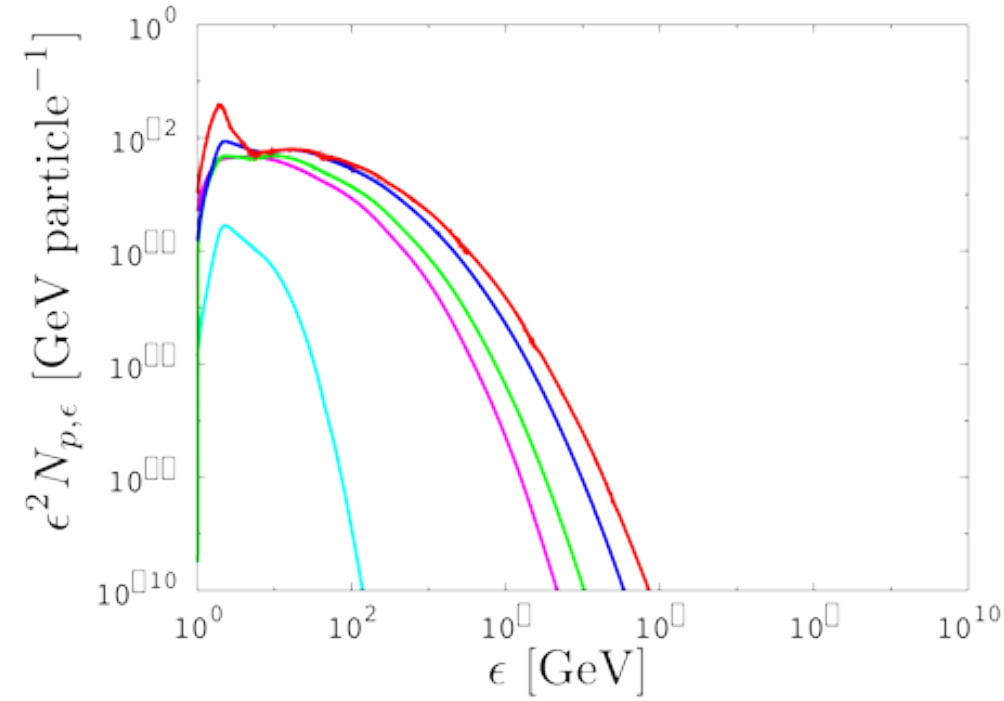
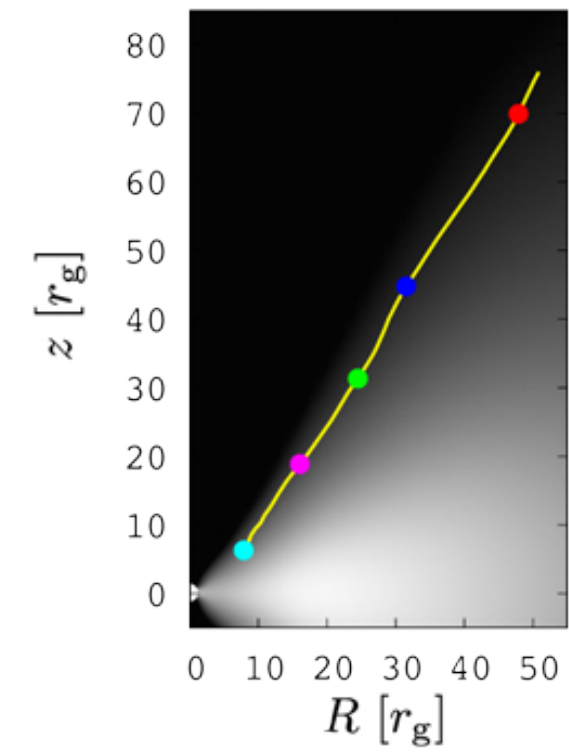


宇宙線軌道とスペクトル例

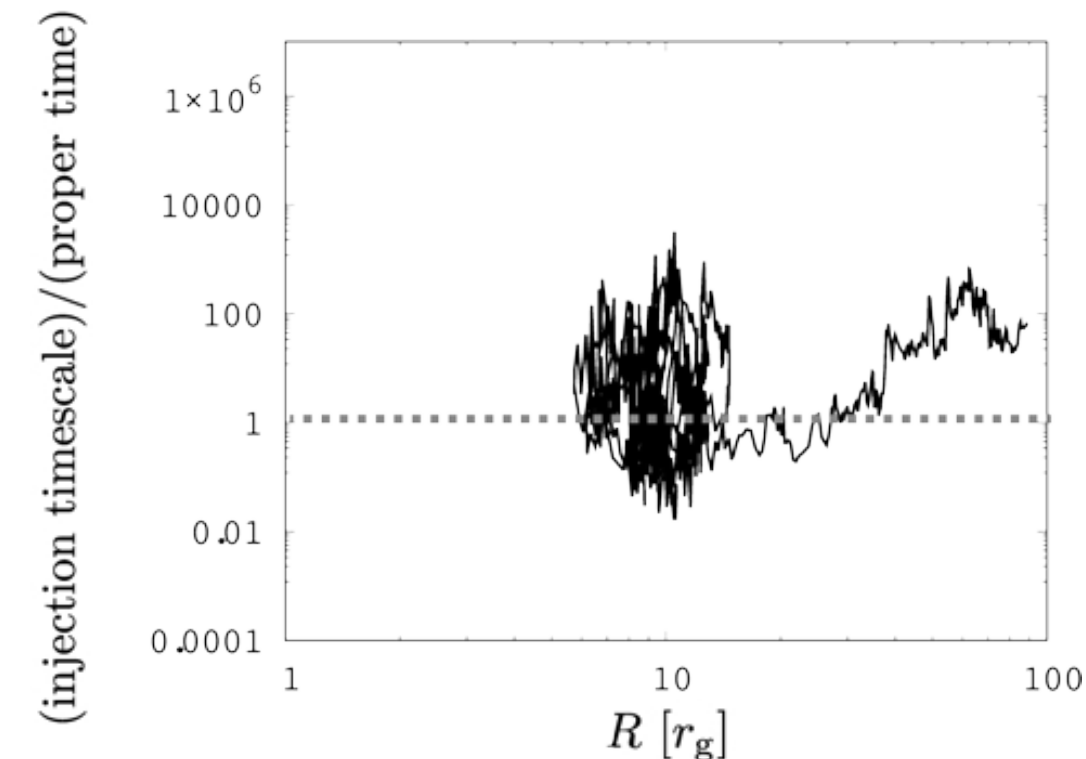
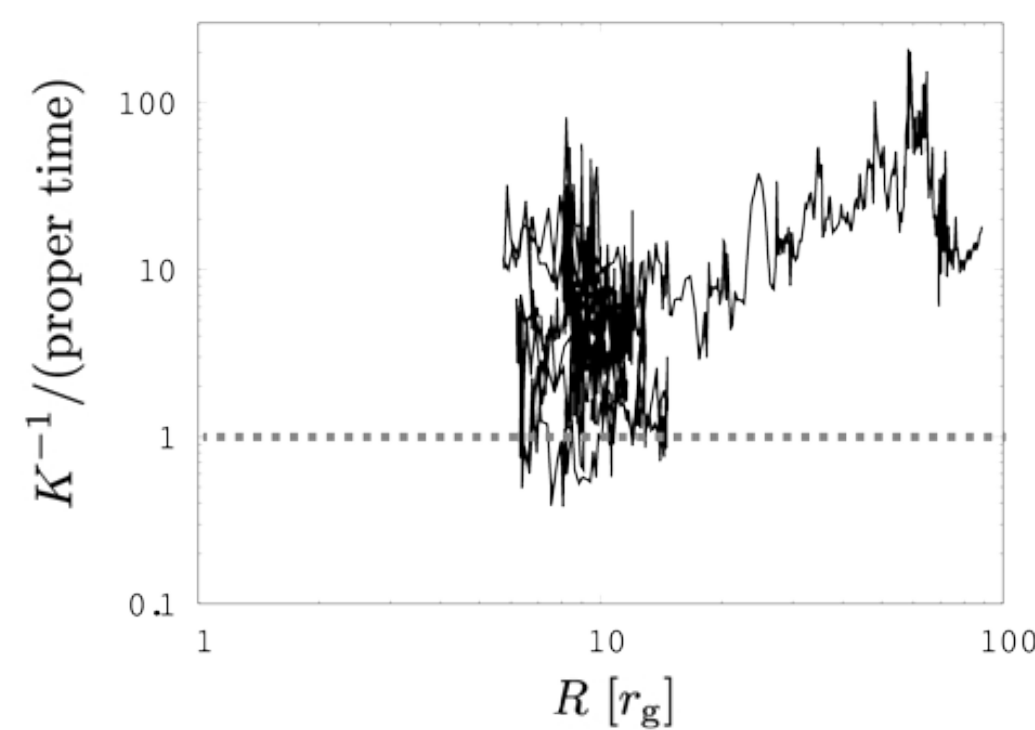
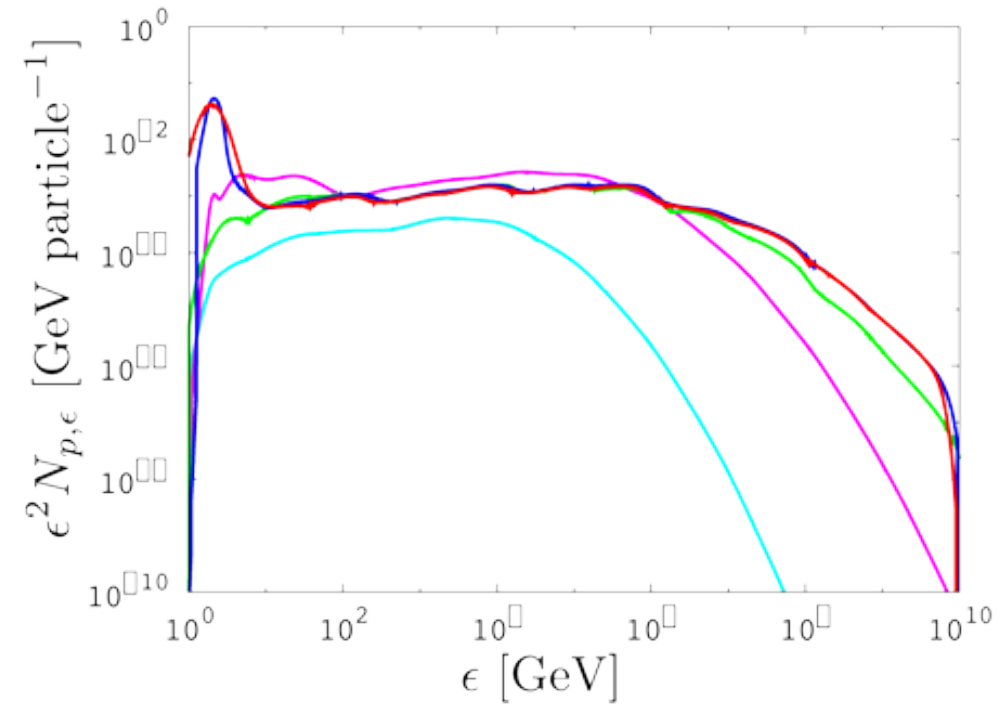
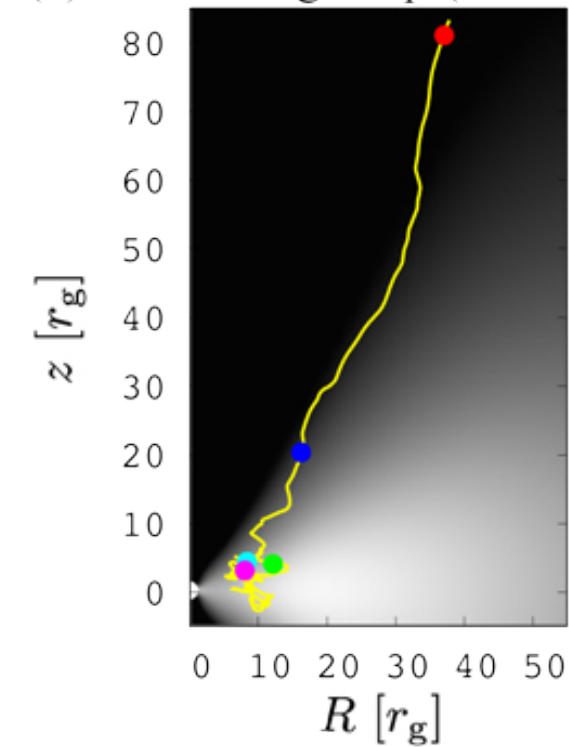
(a) inflowing CRp



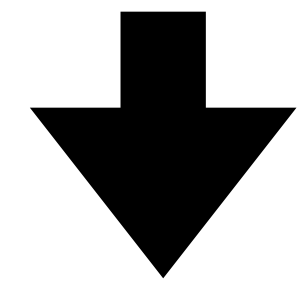
(b) outflowing CRp



(c) outflowing CRp (initially inflowing)



- さまざまな軌道の宇宙線陽子
- 宇宙線SEDも様々 (主に降着流で加速)

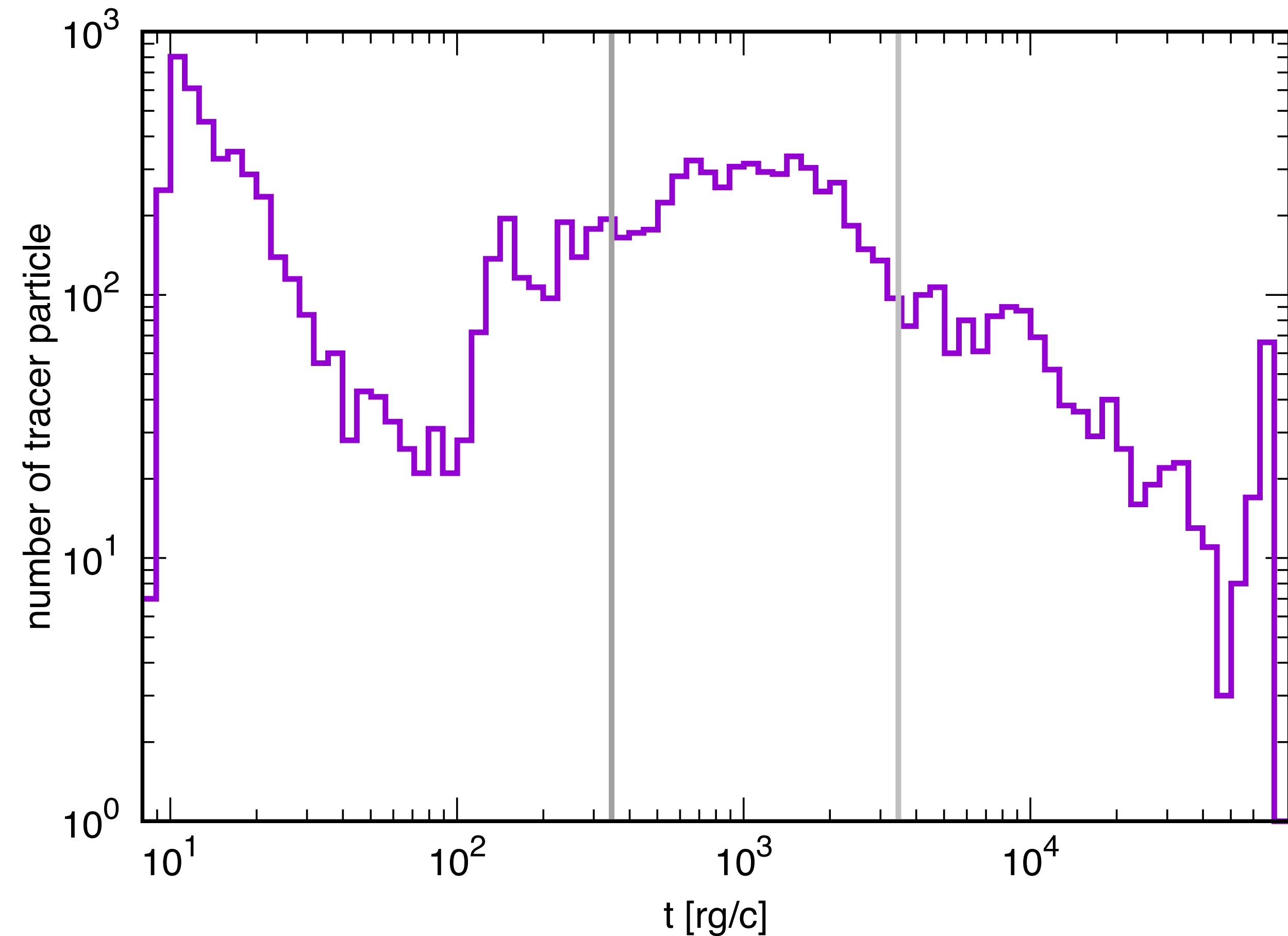


重合せにより
フラットSEDになる

宇宙線・ニュートリノ計算領域($r_H \leq r \leq 100r_g$)の滞在時間

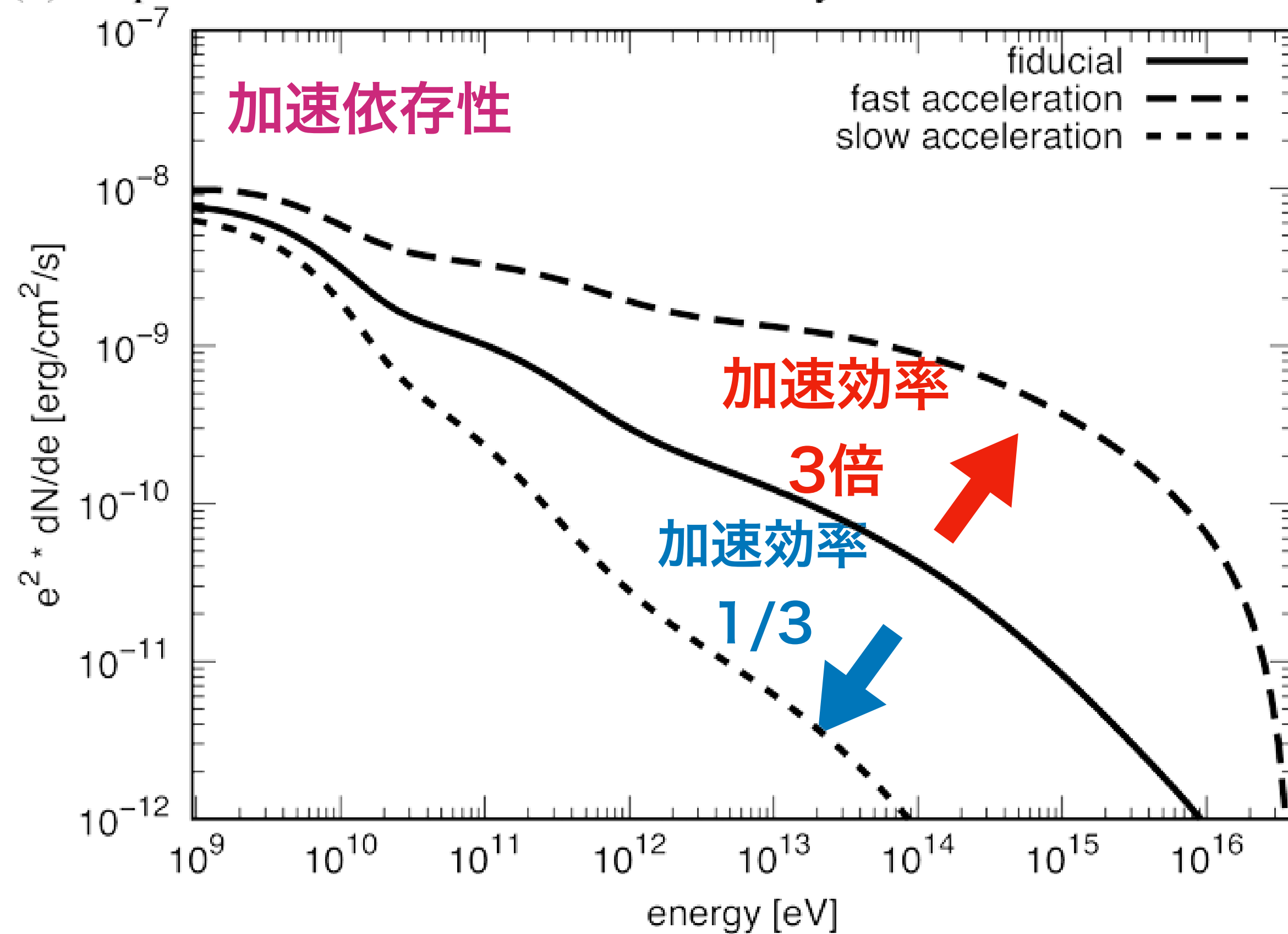
$t_{\text{accr}} (\alpha = 0.1)$ $t_{\text{accr}} (\alpha = 0.01)$

- ・計算領域を脱出するまでの時間(各tracer-particleについて、流体静止系で時間積算)
- ・降着の典型的時間スケールは以下で見積もり.
($\alpha = 0.1, 0.01, R = 10r_g, H = 0.5R, c_s = c/\sqrt{3}$)
- ・大まかには典型的な粘性時間スケールで落下
- ・ごく少数 (1%以下)の粒子は降着流に滞在

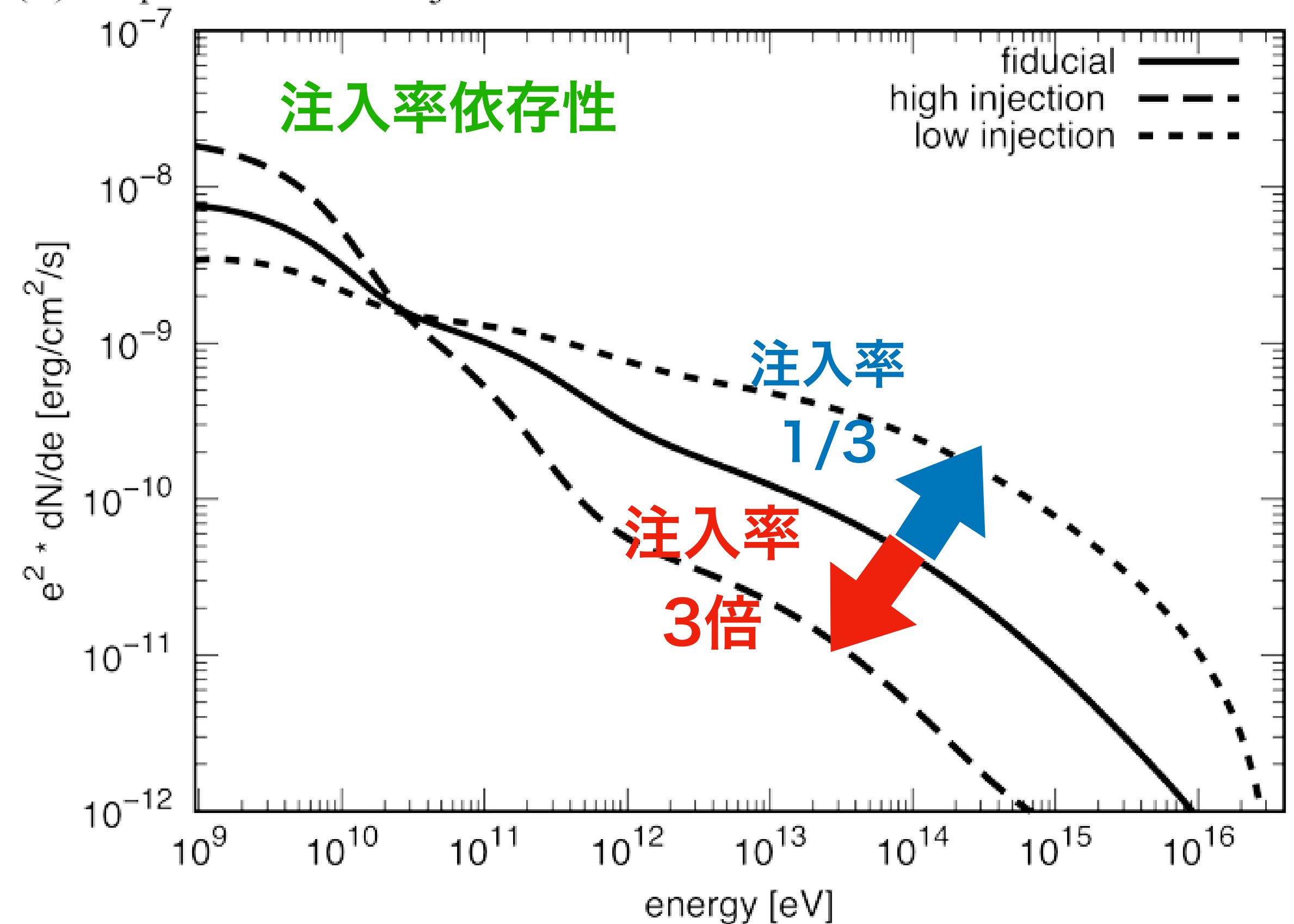


加速効率パラメータ依存性

(a) Dependence on acceleration efficiency



(b) Dependence on injection rate



- **加速効率アップ** → 高エネルギー成分増加
- **注入率アップ** → 高エネルギー成分は減少。
 - ∴ 注入される粒子が多くなり、加速されにくくなるため。

まとめ

- 一般相対論GRMHDシミュレーション・データに基づく宇宙線加速・ニュートリノ放射計算コード ν -RAIKOUで大局的な宇宙線加速+ニュートリノSEDを計算。
- 大局的な効果(様々な位置での注入+加速)でフラットなニュートリノスペクトルが得られた。降着流成分の宇宙線陽子からのニュートリノ放射はアウトフロー宇宙線陽子の寄与と同程度。
- 今後：一般相対論的多波長輻射輸送コードRAIKOUの多波長放射計算と組み合わせ、 $p\gamma$ 過程等も含めた包括的な研究。