

UCLA

理論物理研究室セミナー - TWCU, Japan

ニュートリノのささやきに 耳をすませて

安田 航一朗 (UCLA)

自己紹介 (安田航一朗)



➤ **PhD 2年生 @米国 UCLA**

➤ **YouTuber (趣味) をやっている**

2023年3月、大阪大学理学部物理学科を卒業

➤ **同年9月より UCLA に進学**

→ **Physics & Astronomy の PhD プログラム**

➤ **専門は理論物理学**

→ **素粒子現象論と素粒子宇宙物理**

➤ **日本学生支援機構 (JASSO) 奨学生**

→ **大阪大学国際科経由でサポート継続中(感謝)**



ざっくりと研究の紹介

➤ 素粒子現象論

- 暗黒物質・ニュートリノ質量・Higgs etc
- 新しい物理を含んだ理論モデルを提案

➤ 素粒子宇宙物理 (Astroparticle physics)

- 素粒子物理を道具立てに極限天体周辺の現象を解き明かす
- マルチメッセンジャー 物理の主戦場

興味

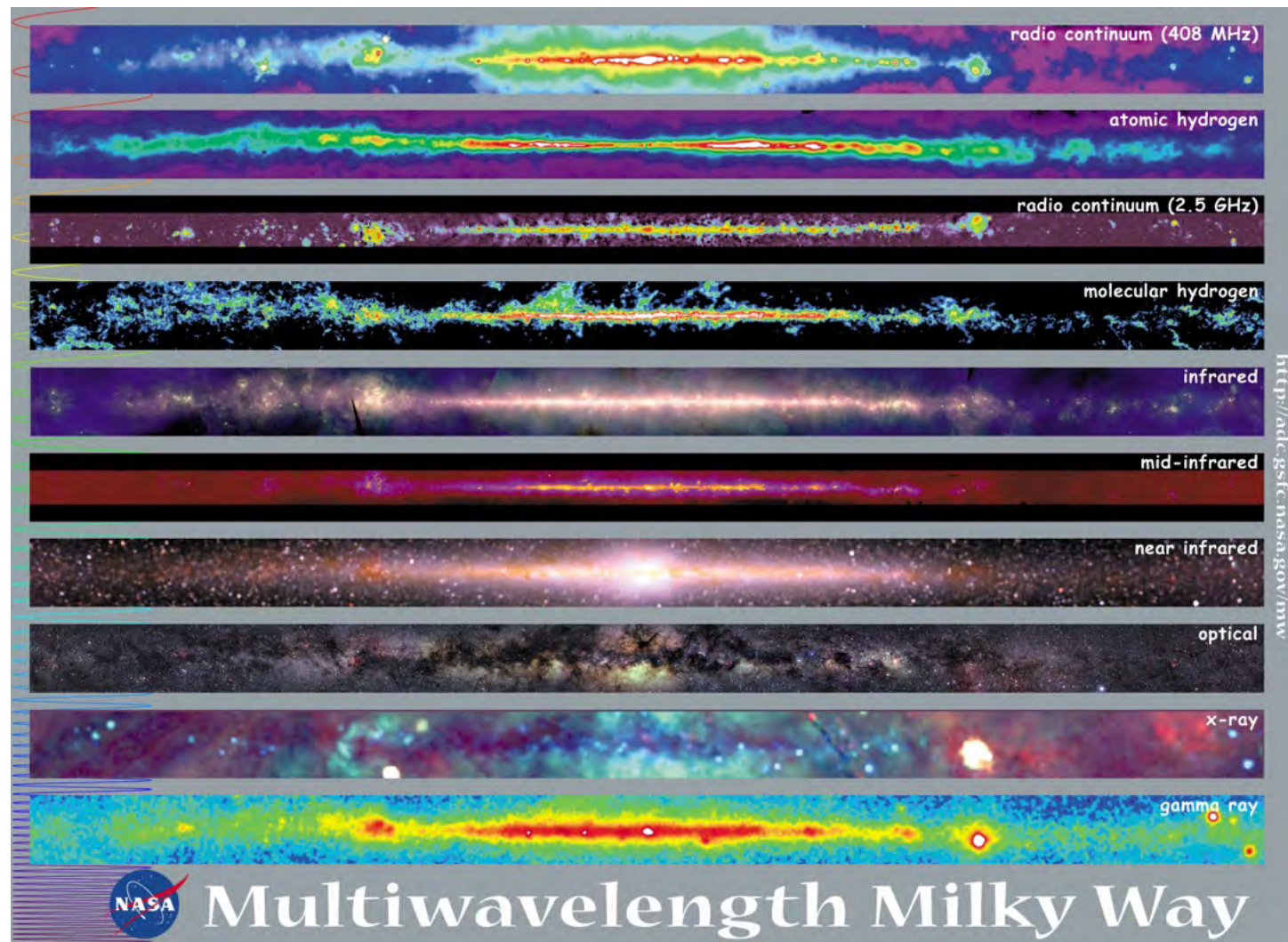
- 「相対論を体感できるか？」
 - 特殊相対論的ゲーム + 電磁場
- 「実験結果だけからニュートリノの分布を引き出せるか？」
 - 将来実験を見据えた「逆問題」の研究
- 「宇宙ニュートリノはどうやって作られているのか？」
 - 超巨大ブラックホールから噴き出すジェットにおける原子核反応をモデル化

「マルチメッセンジャー」とは？

➤ 光を「見る」

→ 波長が変われば景色が変わる

→ 電波 + X線 + ガンマ線



[<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>]

「マルチメッセンジャー」とは？

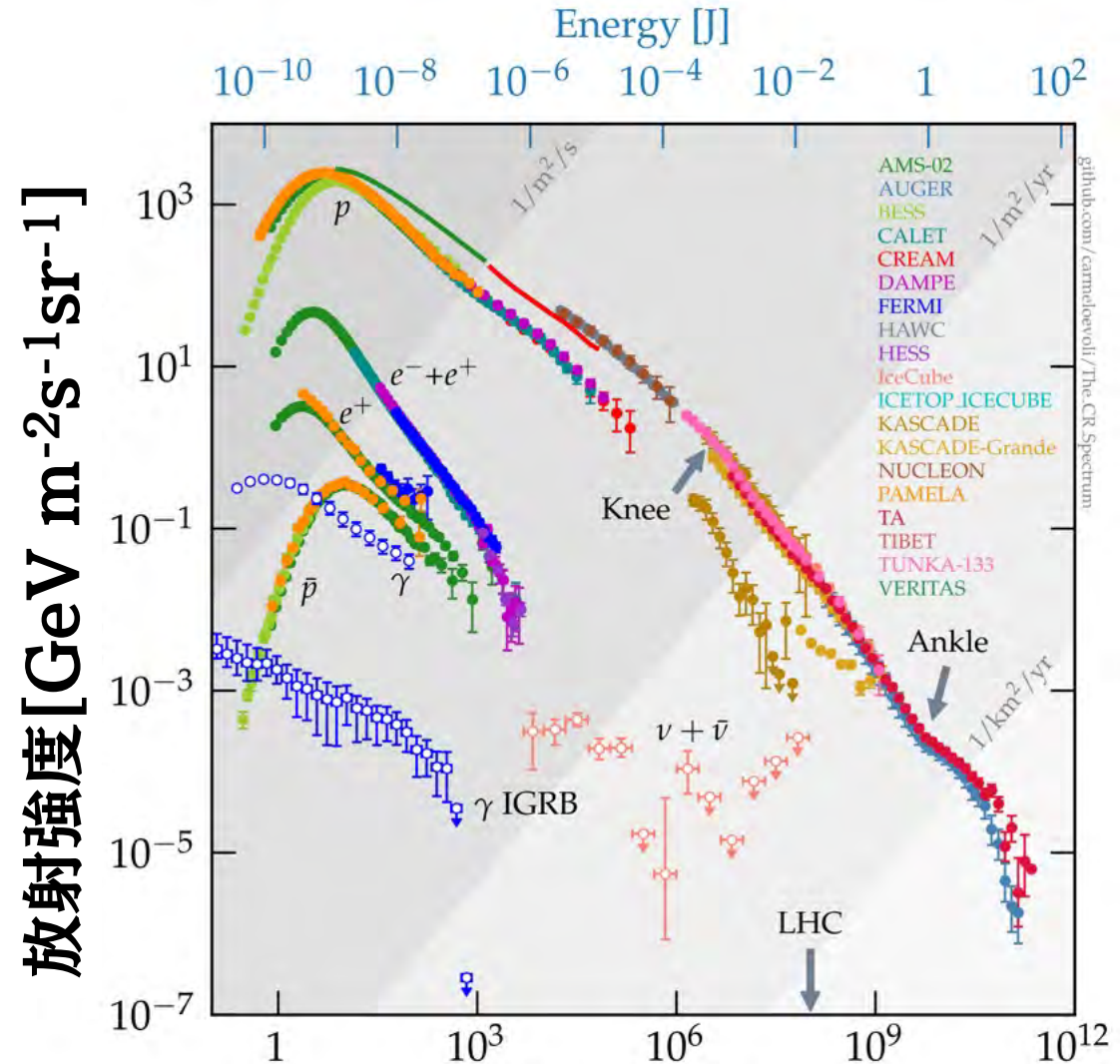
➤ 光を「見る」

→ 波長が変われば景色が変わる

→ 電波 + X線 + ガンマ線

➤ 宇宙線を「捉える」

→ 宇宙最強の加速器はどこ？



[10.5281/zenodo.1468852]

宇宙線のエネルギー [GeV]

「マルチメッセンジャー」とは？

➤ 光を「見る」

→ 波長が変われば景色が変わる

→ 電波 + X線 + ガンマ線

➤ 宇宙線を「捉える」

→ 宇宙最強の加速器はどこ？

➤ ニュートリノを「聴く」

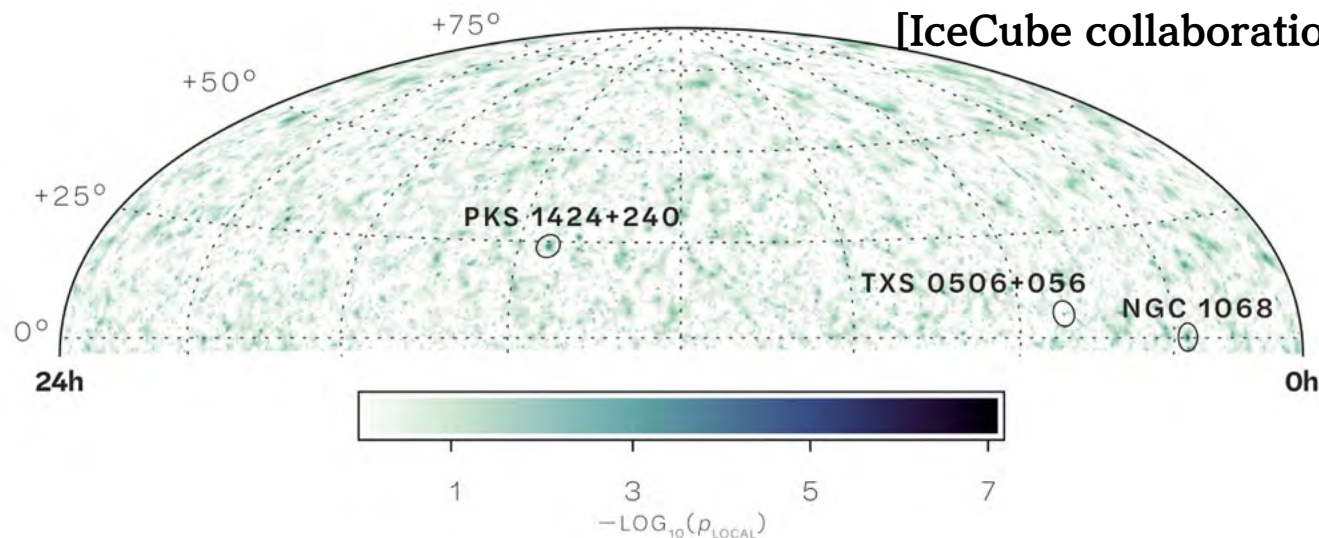
→ 超巨大ブラックホール近傍の反応が直接やってくる



[<https://higgstan.com>]



[IceCube collaboration]



[IceCube collaboration]

「マルチメッセンジャー」とは？

[LIGO collaboration]

➤ 光を「見る」

→ 波長が変われば景色が変わる

→ 電波 + X線 + ガンマ線

➤ 宇宙線を「捉える」

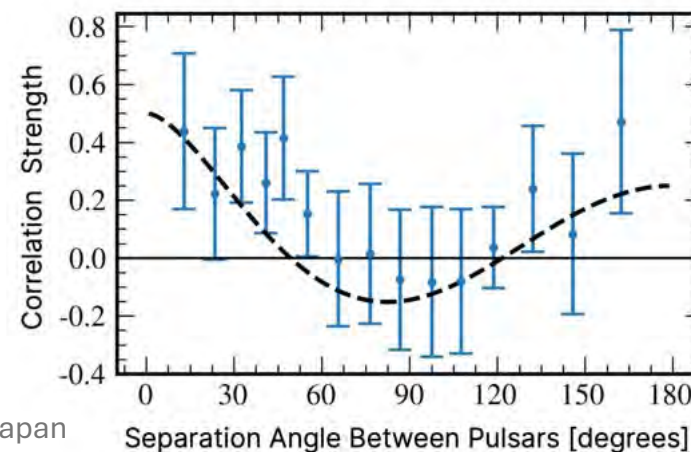
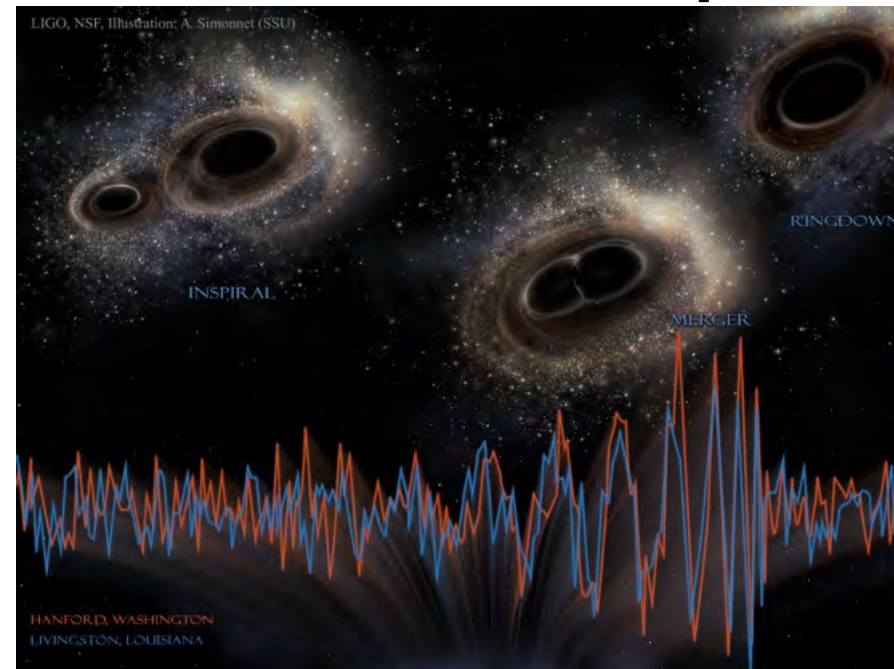
→ 宇宙最強の加速器はどこ？

➤ ニュートリノを「聴く」

→ 超巨大ブラックホール近傍の反応が直接やってくる

➤ 重力波を「感じる」

→ ブラックホール連星の合体史が宇宙論スケールで伝わる



[NANOGrav collaboration]

超巨大ブラックホール(SMBH)はどこに？

➤ クェーサーの研究 (60s-70s)

→ コンパクトな強い電波源？

→ ブラックホールと降着円盤ガスの系

➤ 天の川中心 Sgr A*の研究 (00s)

→ ブラックホールの存在を検証 (Ghez et al. 2008)

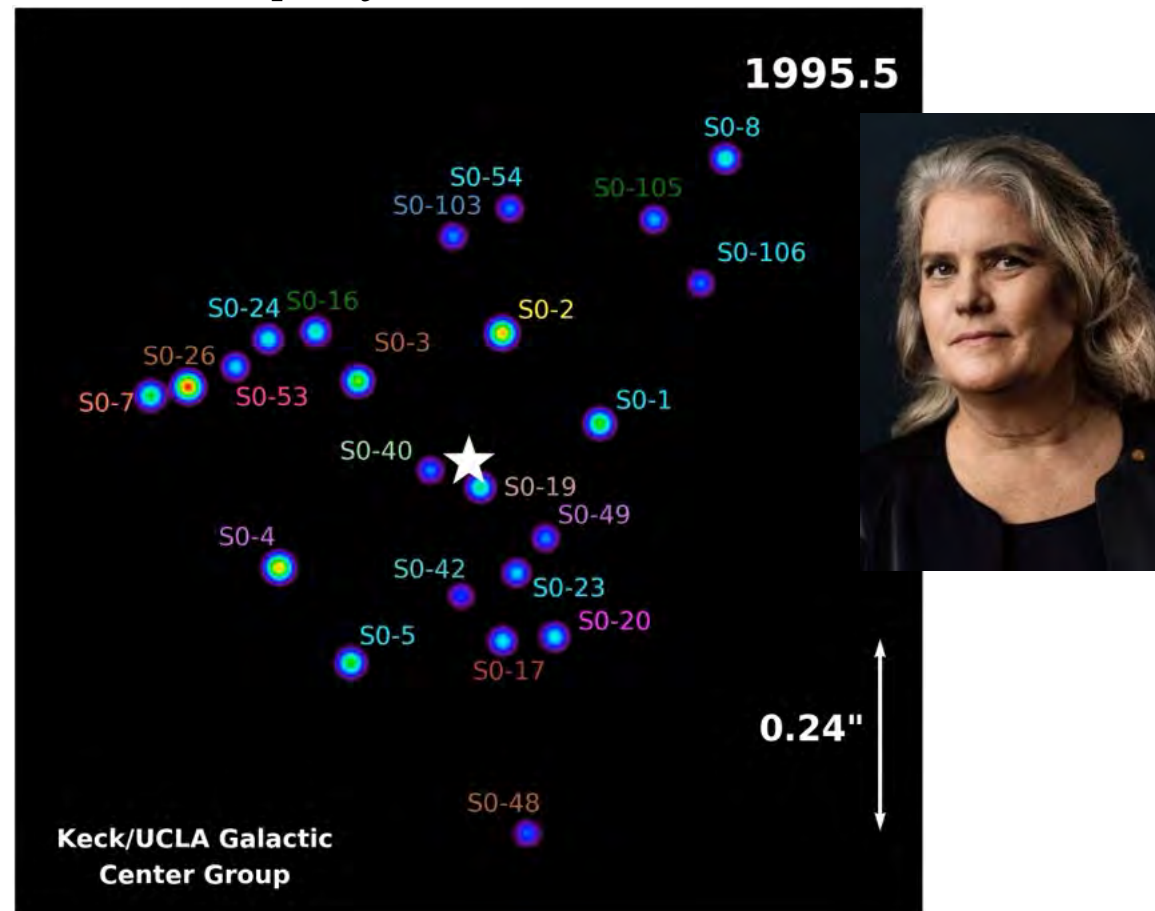
→ ノーベル物理学賞 (2020)

➤ およそ全ての銀河中心にある

→ $10^6 \sim 10^{10}$ 太陽質量のブラックホール

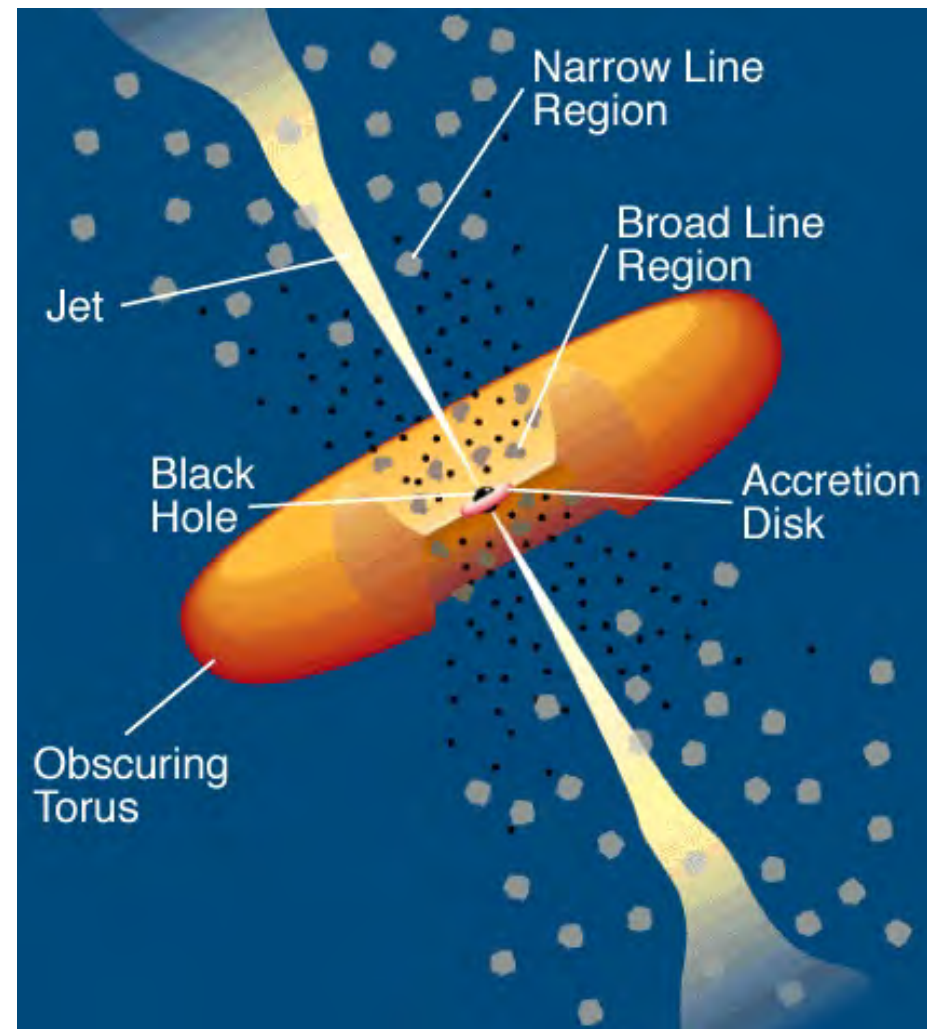
→ 中には動力源となって明るく輝くものも

[<https://jila.colorado.edu/>]

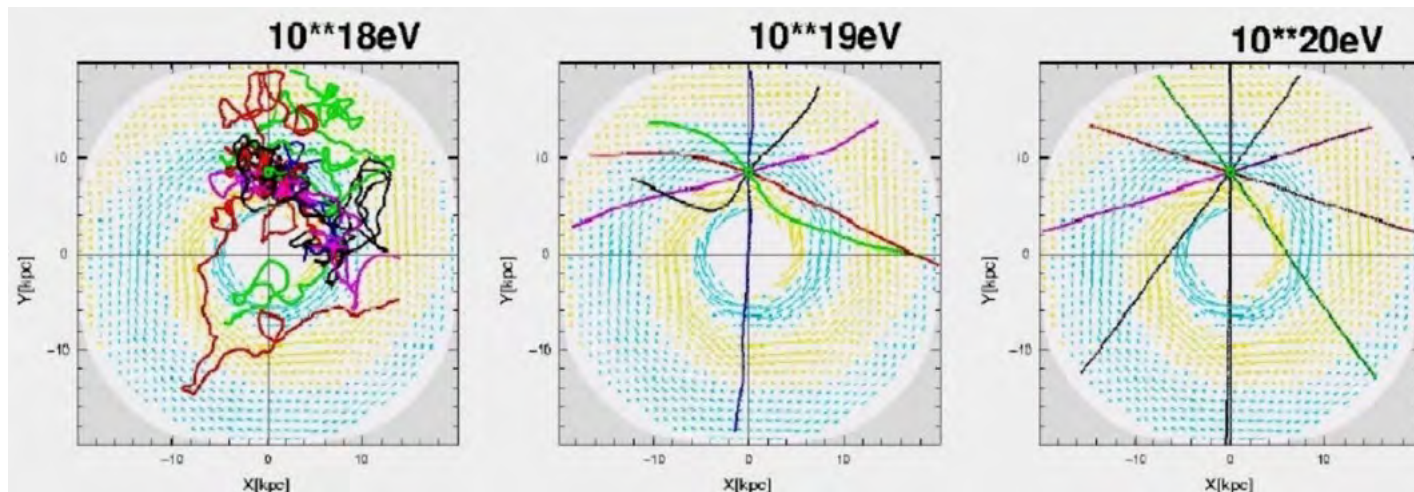


活動銀河核(AGN)とは？

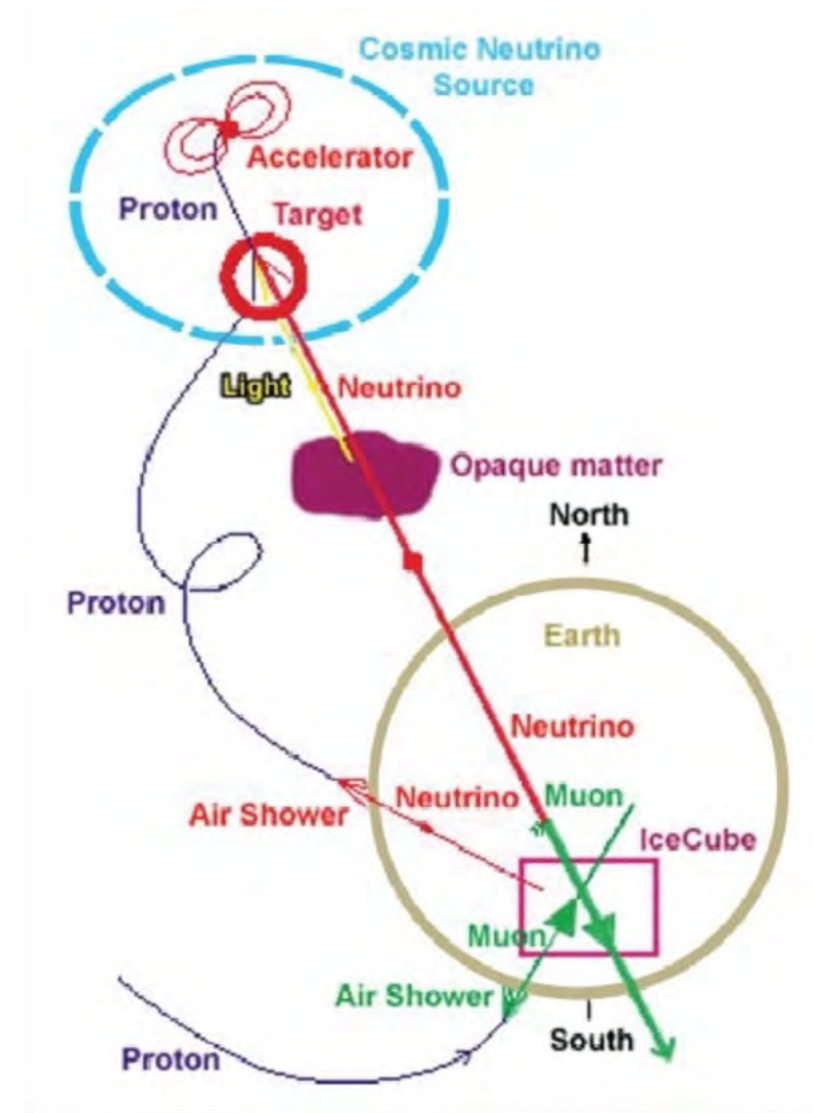
- **SMBHが駆動する銀河中心領域**
 - 強力な重力場から莫大なエネルギー放射
- **降着円盤+ダストトーラス**
 - 中心部へ落ち込む過程で起こる摩擦熱
- **細く絞られた高速流(ジェット)**
 - プラズマの回転運動が磁場を螺旋状に
- **宇宙最強の加速器**
 - 磁気圧の解放・衝撃波で荷電粒子を発射



ニュートリノの利点



- 10^{19} eV 以下だと銀河磁場で宇宙線の軌道が曲がる
→ 宇宙線は方角情報を失っている
- 光は途中の吸収体に阻まれやすい
- ニュートリノはすり抜ける(反応しにくい)
→ ニュートリノは発生源の情報を保持している

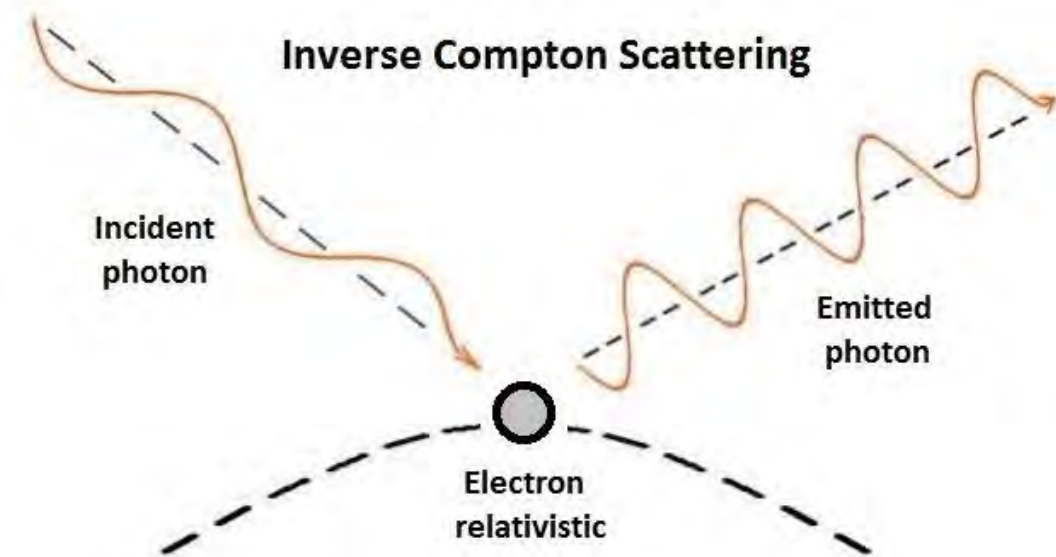


CGS-ガウス 単位系

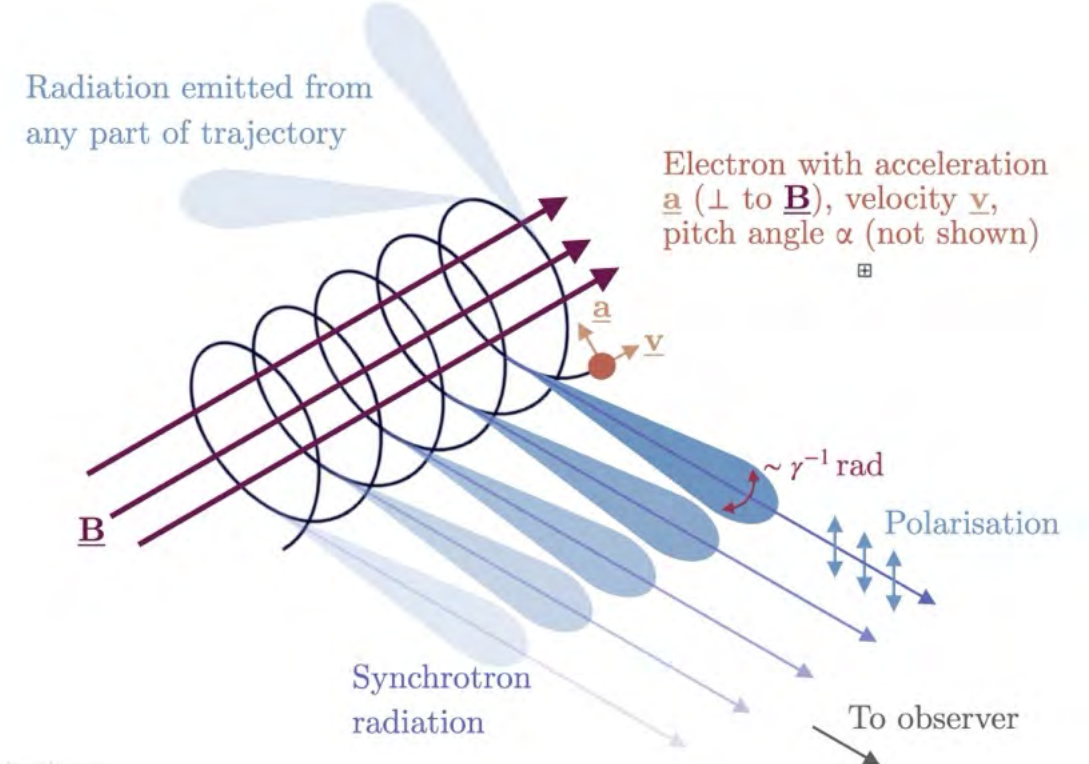
| | SI 単位系 | CGS-ガウス単位系 |
|-------|--------|------------|
| 長さ | m | cm |
| 質量 | kg | g |
| 時間 | sec | sec |
| エネルギー | J | erg (エルグ) |
| 力 | N | dyn (ダイン) |
| 磁場 | T | G (ガウス) |

荷電粒子の相互作用

➤ 逆コンプトン効果



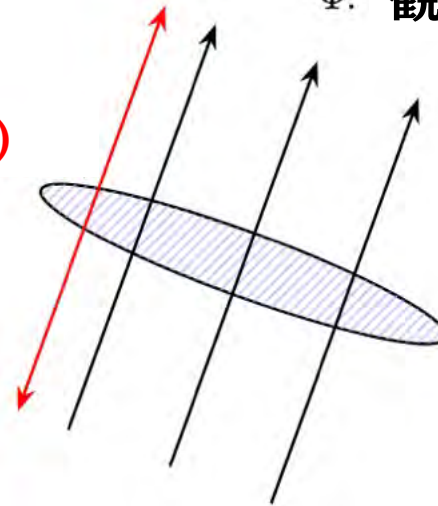
シンクロトロン放射



反応効率を評価する

Φ : 観測量 (エネルギー, 粒子数, etc...)

dT : 測定スピード (時間分解能)



dS : 測定器セル (空間分解能)

| | エネルギーフラックス | 粒子数フラックス | 光度 (パワー) |
|------------|--|---------------------------------|---------------------------|
| SI 単位系 | $J / (m^2 \text{ sec})$ | 個 / $(m^2 \text{ sec})$ | J / sec |
| CGS-ガウス単位系 | $\text{erg} / (\text{cm}^2 \text{ sec})$ | 個 / $(\text{cm}^2 \text{ sec})$ | erg / sec |

反応効率を評価する

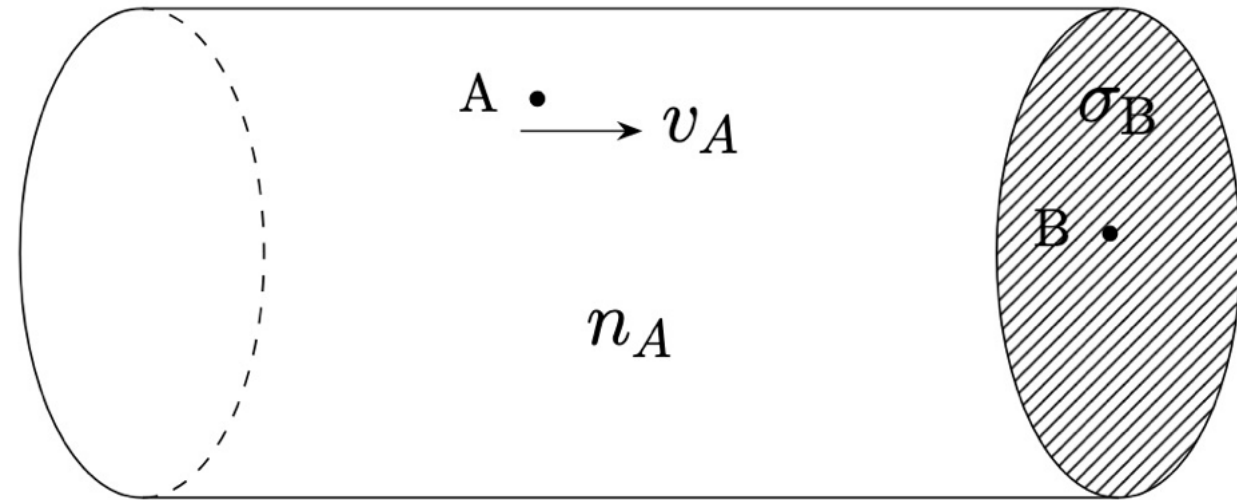
➤ 固定標的Bとの衝突実験を考える

→ 衝突発生率:

$$\begin{aligned} \text{Rate} &= \frac{\#}{(\text{時間})} \\ &\propto (\text{粒子 A の数フラックス}) \\ &= n_A v_A \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\#}{(\text{時間})} = n_A v_A \sigma_B.$$

反応断面積



光学的深さ

➤ 平均自由行程

→ 数密度 n_{photon} と 断面積 σ を用いて

$$\lambda_{\text{free}} = \frac{1}{n_{\text{photon}} \sigma}$$

➤ R_{emission} での光学的深さ

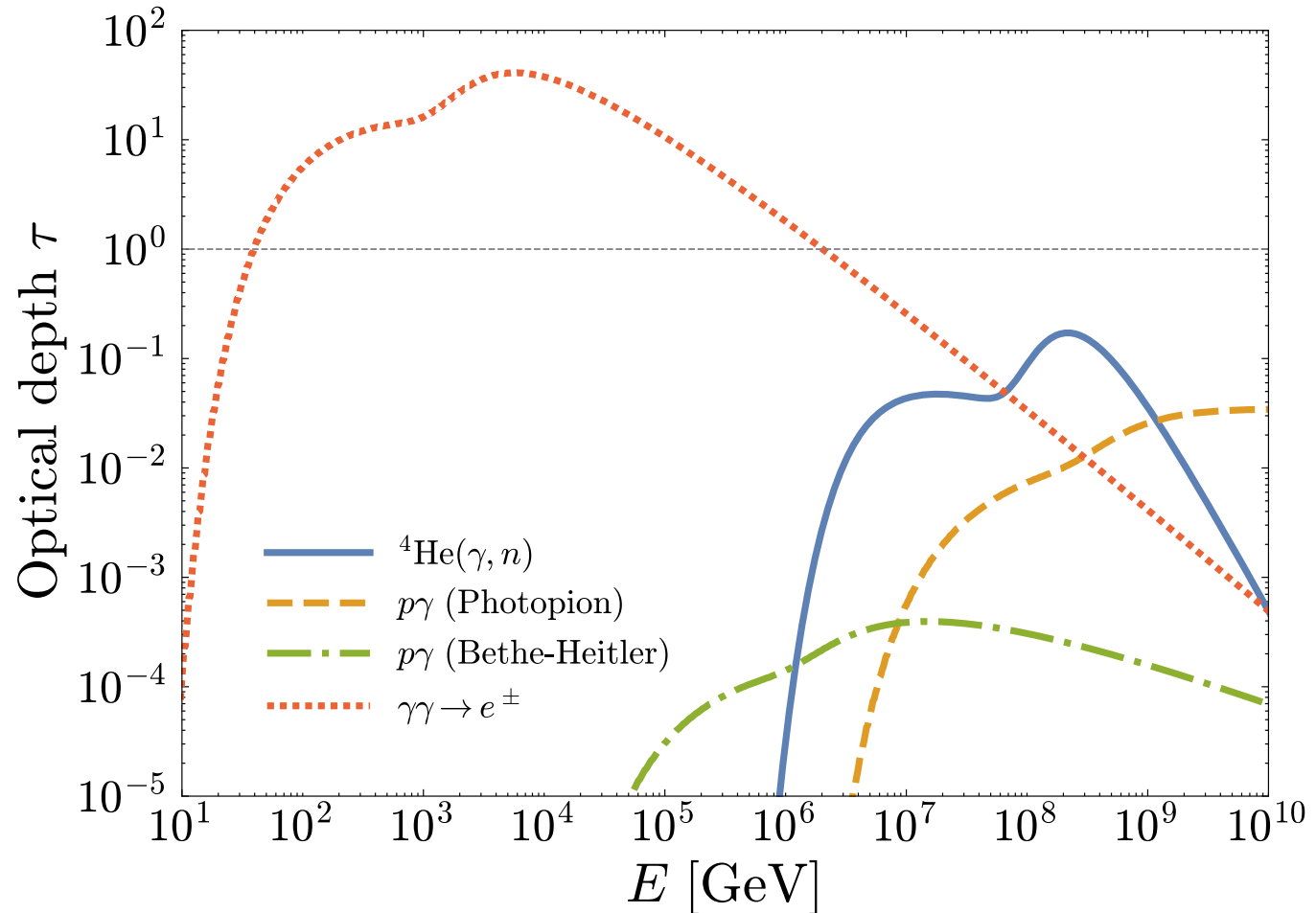
→ 長さの比を取る(無次元量):

$$\tau = \frac{R_{\text{emission}}}{\lambda_{\text{free}}}$$

➤ フラックスの計算

$$\Phi_{\text{escaped}} \equiv e^{-\tau} \Phi_{\text{initial}}$$

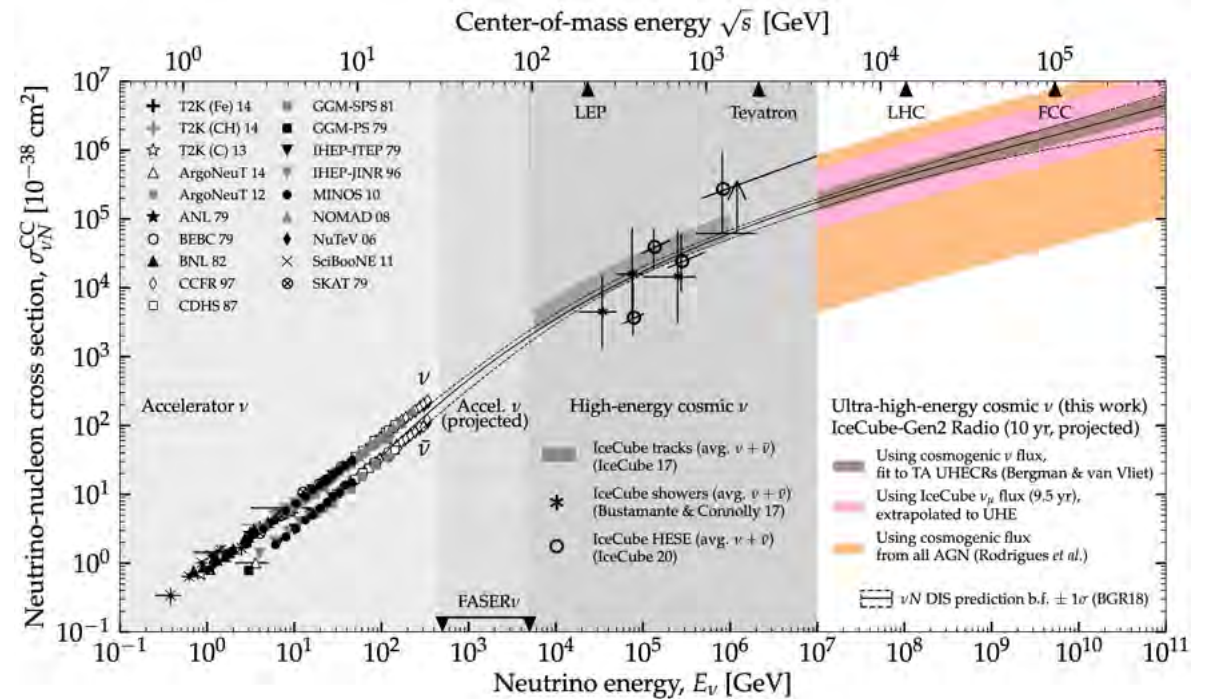
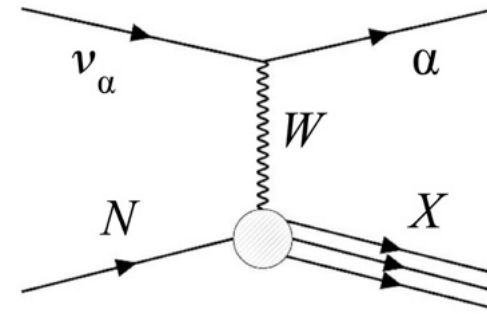
$$\Rightarrow \Phi_{\text{converted}} = (1 - e^{-\tau}) \Phi_{\text{initial}}$$



高エネルギーニュートリノを捉える！

➤ **ざっくり評価してみよう！**

- 典型的なAGN光度: $\sim 10^{45}$ erg/sec
- 距離: ~ 100 Mpc
- 自然界由来のものを使う
→ 水 (密度: ~ 1.0 g/cc)



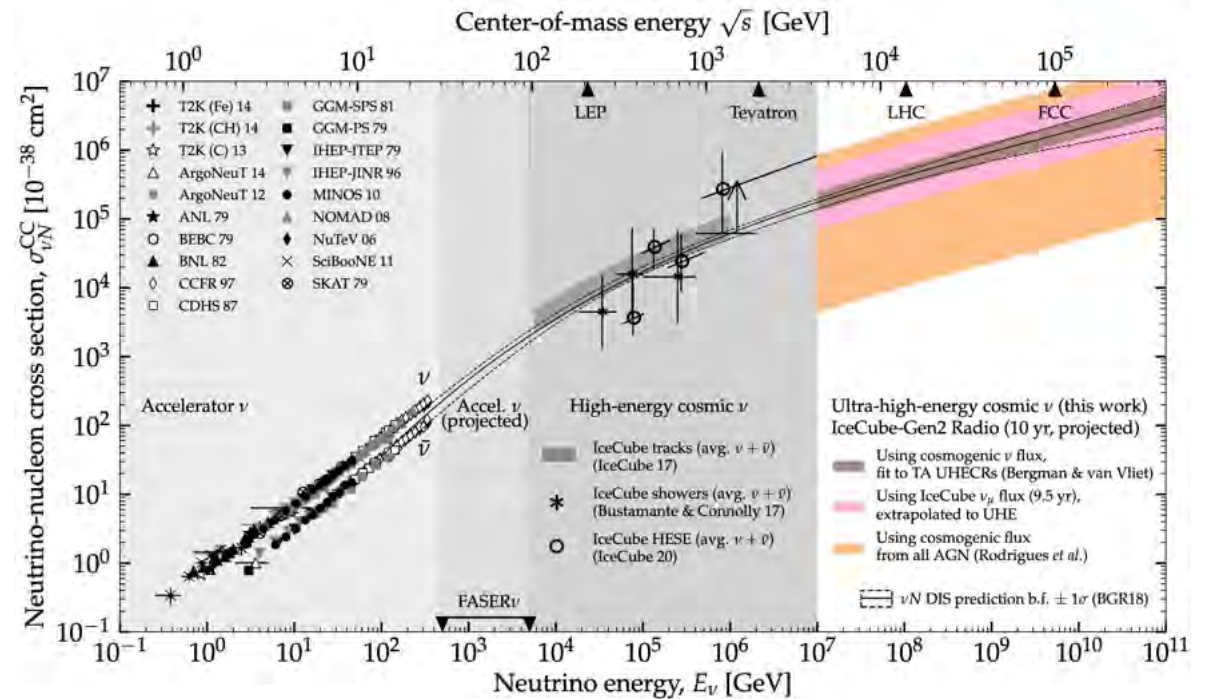
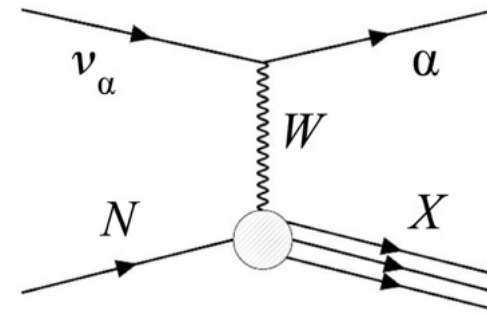
高エネルギーニュートリノを捉える！

➤ **ざっくり評価してみよう！**

- 典型的なAGN光度: $\sim 10^{45}$ erg/sec
- 距離: ~ 100 Mpc
- 自然界由来のものを使う
→ 水 (密度: ~ 1.0 g/cc)

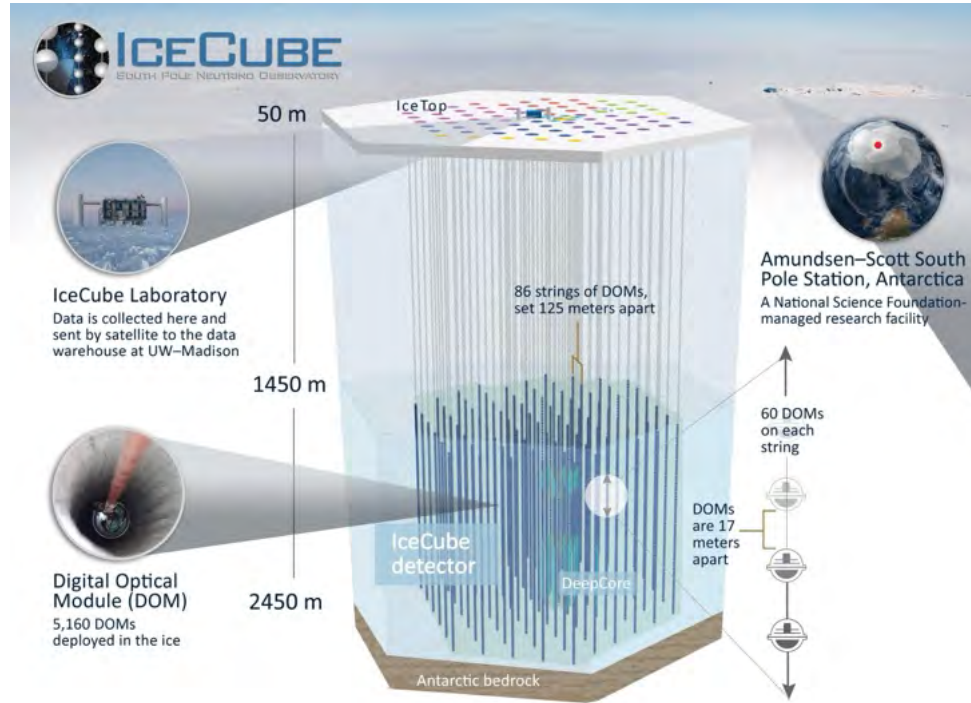
➤ **巨大な検出器を用意すればいい！**

→ $> 1 \text{ km}^3$

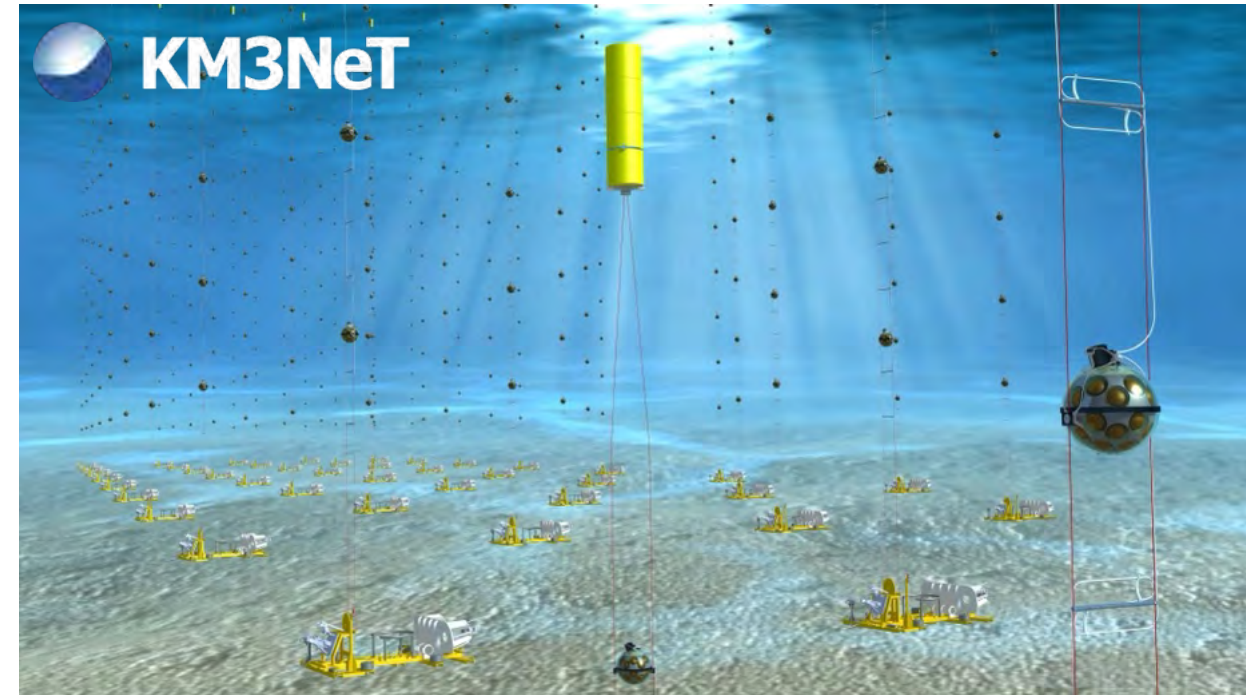


氷と海水、どう違う？

➤ IceCube 実験 [IceCube collaboration]



➤ KM3NeT [KM3NeT collaboration]



| | | |
|-------|--------------------------|-----------------------------------|
| ノイズ | 小さい | 大きい (外洋中の天然放射線源 ^{40}K) |
| 均一さ | ダスト層に注意！ (深さ 1km まで気泡あり) | 海流に注意！ |
| 純度 | 高い | 天然放射線源 ^{40}K などの不純物 |
| 角度分解能 | ~ 1° (氷中での散乱長は 30 m) | ~ 0.3° (海水中での散乱長が長いから) |
| 吸収長 | 長い (でも散乱が激しく起こる) | 短い |

前半部のまとめ！

- **マルチメッセンジャー宇宙物理がとっても熱い！**
- **活動銀河核 (AGN)**
 - 銀河中心の超巨大ブラックホールが駆動している
- **反応効率を評価する道具立て**
 - フラックス, 断面積, 平均自由行程, 光学的深さ
- **宇宙ニュートリノ観測**
 - 巨大な装置 (> 1 km³) が必要 (IceCube, KM3NeT)

こんな研究も！



そげぶプロジェクト(相対論的ゲーム部)
with 尾田欣也教授(東京女子大), 中山大樹さん

<https://sogebu.github.io/special-relativity-web/20240810/>

大学の外では

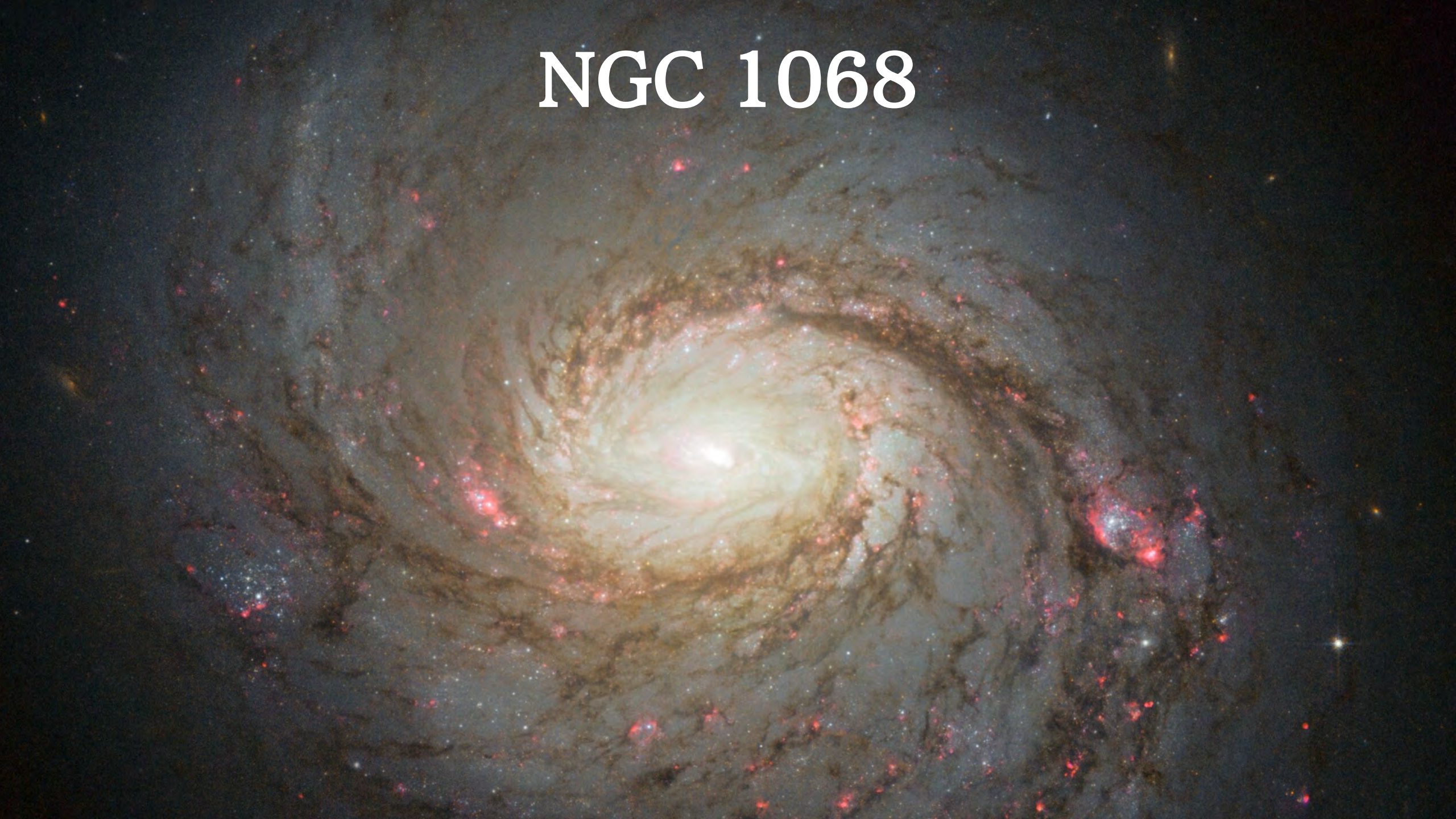
- **ロードトリップで国立公園へ**
 - 指導教官の助言がきっかけ
- **ビーチでサイクリング**
 - 自転車専用の道が整備されている
- **自宅・友人宅で集まって食事**
 - LAはどの国の食材も手に入りやすい
 - みんなのイチオシの映画を見る



高エネルギー宇宙ニュートリノの謎

Based on the collaboration work (Phys. Rev. Lett. **134**, 151005) with
Alexander Kusenko (UCLA, Kavli IPMU),
Yoshiyuki Inoue (Osaka U, iTHEMS, Kavli IPMU)
& Nobuyuki Sakai (Osaka U)

NGC 1068



IceCube が明らかにした謎

➤ ニュートリノの点源

→ 活動銀河核 NGC 1068

→ ジェットと円盤 ⇒ ガンマ線 & ν 's

➤ TeV ニュートリノのパワー

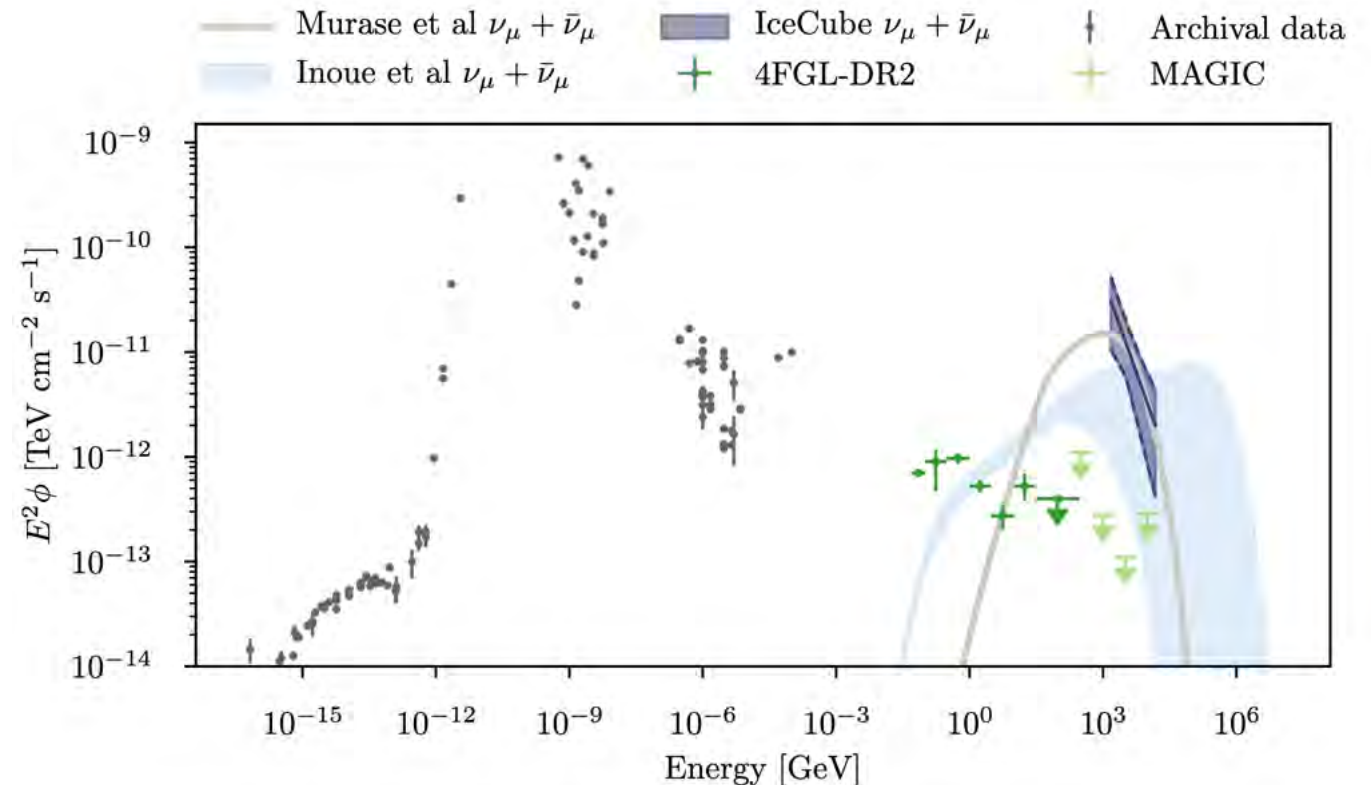
→ $\sim 10^{42}$ erg/sec

➤ GeV-TeV ガンマ線

→ Fermi LAT と MAGIC のデータ

→ ニュートリノシグナルよりも弱い！

→ 従来の理論的予測に矛盾する



[Abbasi et al. (2022) from IceCube collaboration]

ニュートリノはどこから来たのか？

➤ $pp/p\gamma$ 反応

→ パイ中間子の一連の崩壊過程



[Eichmann et al. (2022), Inoue et al. (2022), Murase et al. (2022) etc]

➤ レプトン間相互作用

→ $\mu + \bar{\mu}$ 対生成後の崩壊で出てくる ν_μ 's

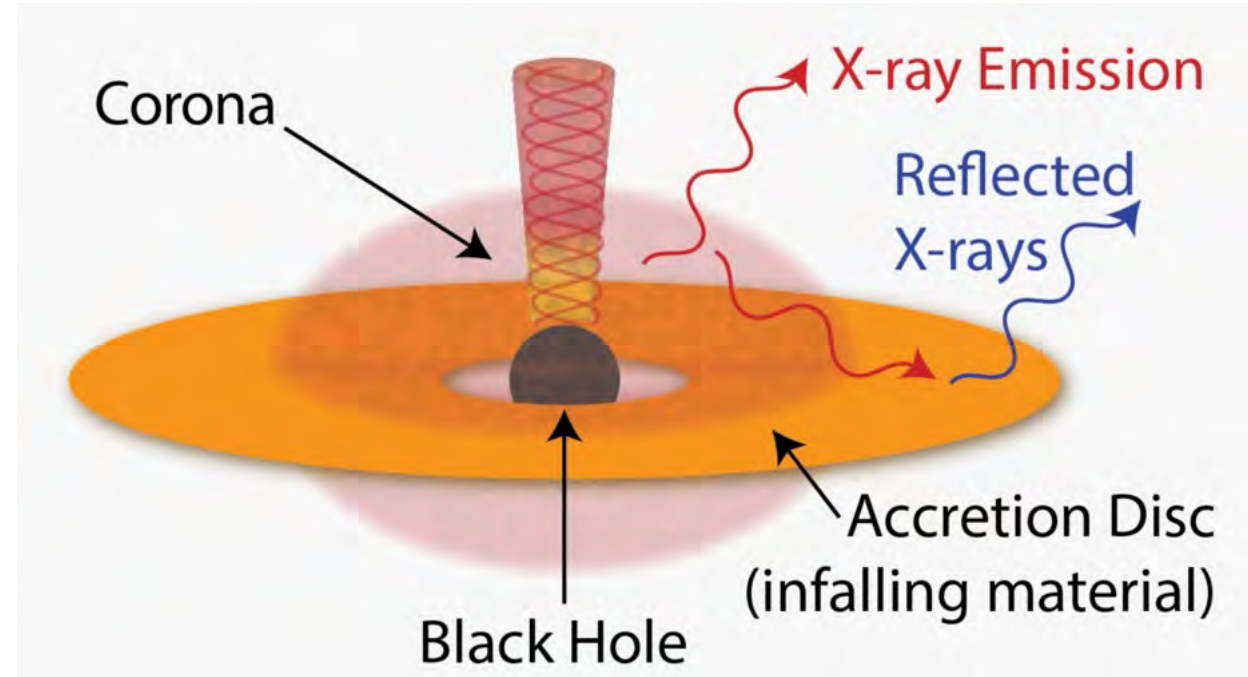
[Bhattacharjee, Sigl (2000), Hooper, Plant (2023) etc]

➤ AGN 円盤・コロナ 模型

→ 高エネルギー過程を駆動する 仮説上の 高温プラズマ領域 [Zdziarski (1986), Kalashev et al. (2015) etc]

(ただし、近年これだけでは粒子パワーが不十分ではないかという指摘がある [Inoue Takasao Khangulyan (2024)])

➤ コロナモデルに依存しない「隠れたニュートリノ源」を提案! β 崩壊!



[<https://danwilkins.net/research>]

本研究のまとめ！

➤ 活動銀河核 NGC 1068 からのニュートリノ

→ ${}^4\text{He}$ の光崩壊 (photodisintegration)

→ 中性子の β 崩壊

➤ ガンマ線放射

→ (β 崩壊 + Bethe-Heitler + photopion) の電子によるIC & シンクロトロン

➤ ニュートリノ振動

→ IceCube ニュートリノフレーバー比

→ 従来の手法と区別可能

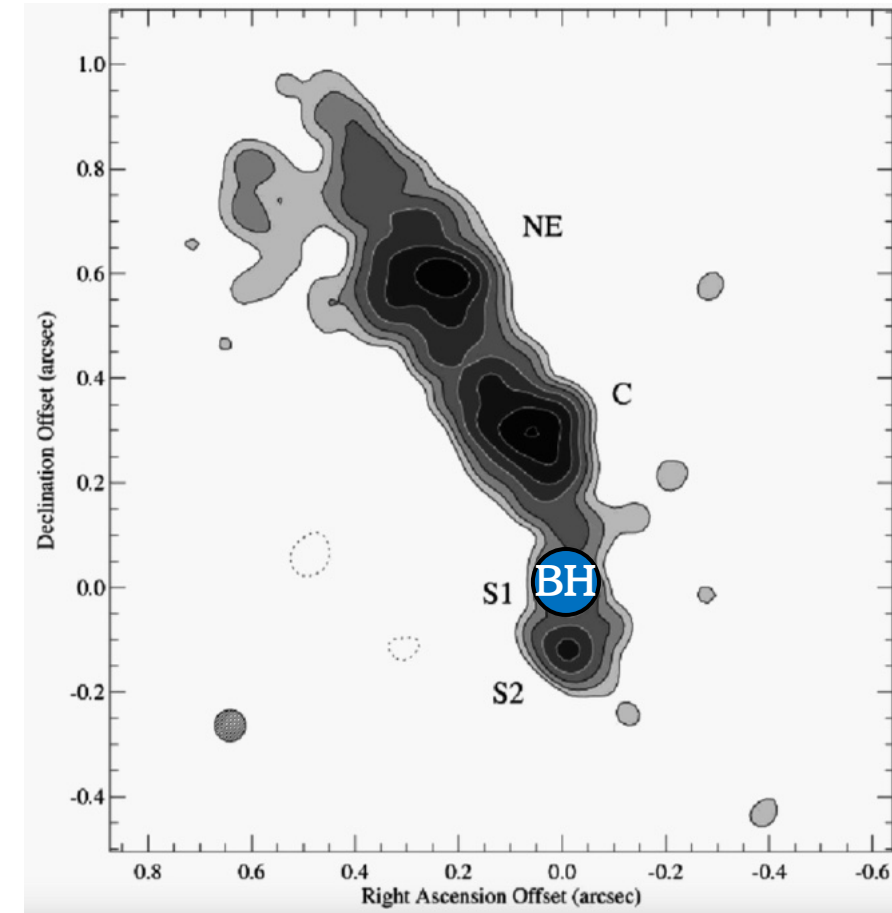
観測事実まとめ

➤ 光子放射を全て合わせたパワー

→ $L_{\text{bol}} \sim (0.4 - 4.7) \times 10^{45} \text{ erg/sec}$ [Pfuhl et al. from GRAVITY]

➤ ジェットの最大パワー

→ $L_{\text{jet}} \approx 10 \times L_{\text{bol}} \sim 10^{46} \text{ erg/sec}$ (放射効率が10%)



[Gallimore et al. (2004)]

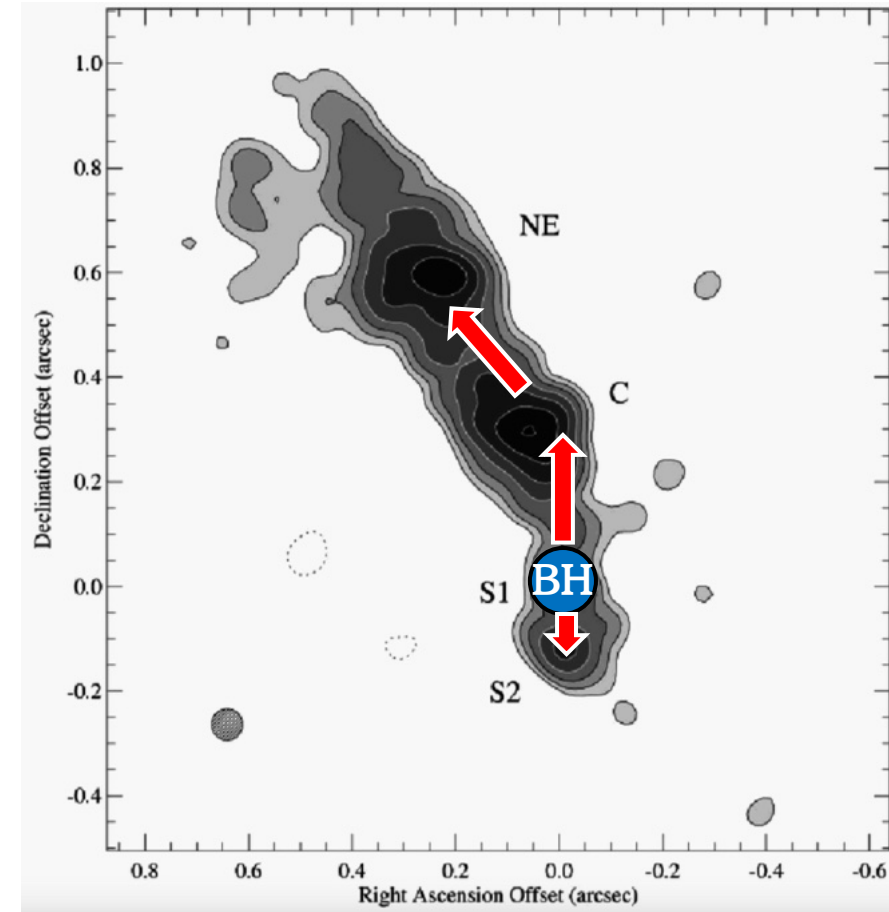
観測事実まとめ

➤ 光子放射を全て合わせたパワー

→ $L_{\text{bol}} \sim (0.4 - 4.7) \times 10^{45} \text{ erg/sec}$ [Pfuhl et al. from GRAVITY]

➤ ジェットの最大パワー

→ $L_{\text{jet}} \approx 10 \times L_{\text{bol}} \sim 10^{46} \text{ erg/sec}$ (放射効率が10%)



[Gallimore et al. (2004)]

観測事実まとめ

➤ 光子放射を全て合わせたパワー

→ $L_{\text{bol}} \sim (0.4 - 4.7) \times 10^{45} \text{ erg/sec}$ [Pfuhl et al. from GRAVITY]

➤ ジェットの最大パワー

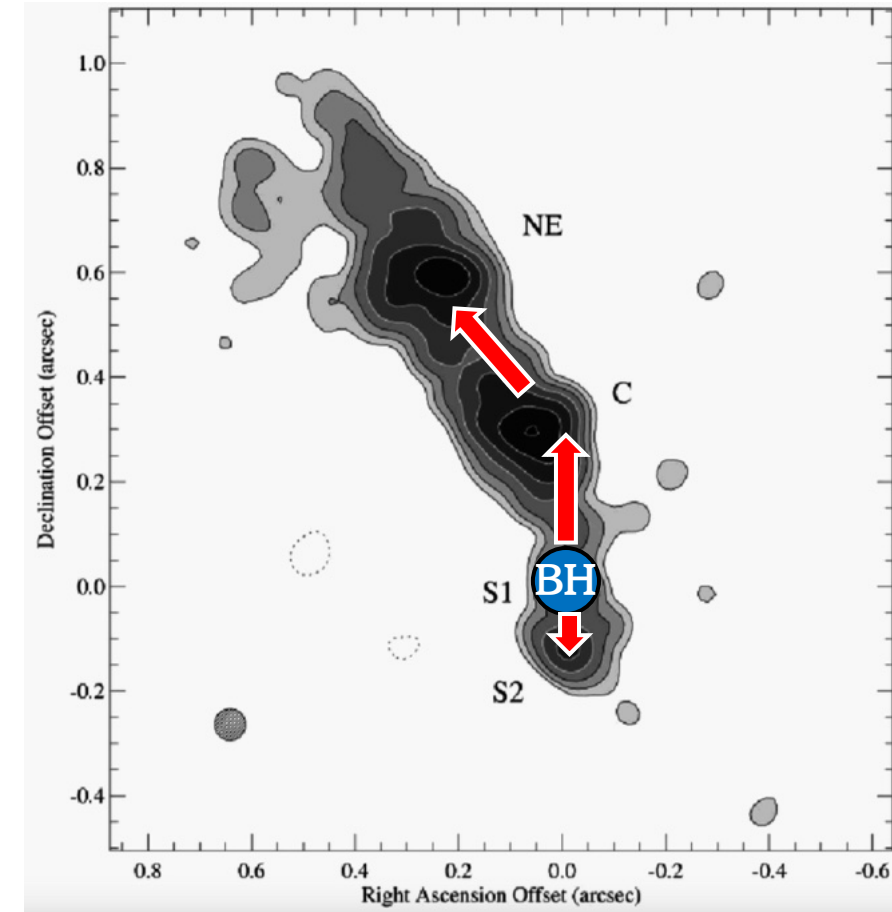
→ $L_{\text{jet}} \approx 10 \times L_{\text{bol}} \sim 10^{46} \text{ erg/sec}$ (放射効率が10%)

➤ 放射サイズ

→ $R_{\text{emission}} = 0.8 \text{ pc}$ と設定 (分子雲と当たるよりもずっと前)

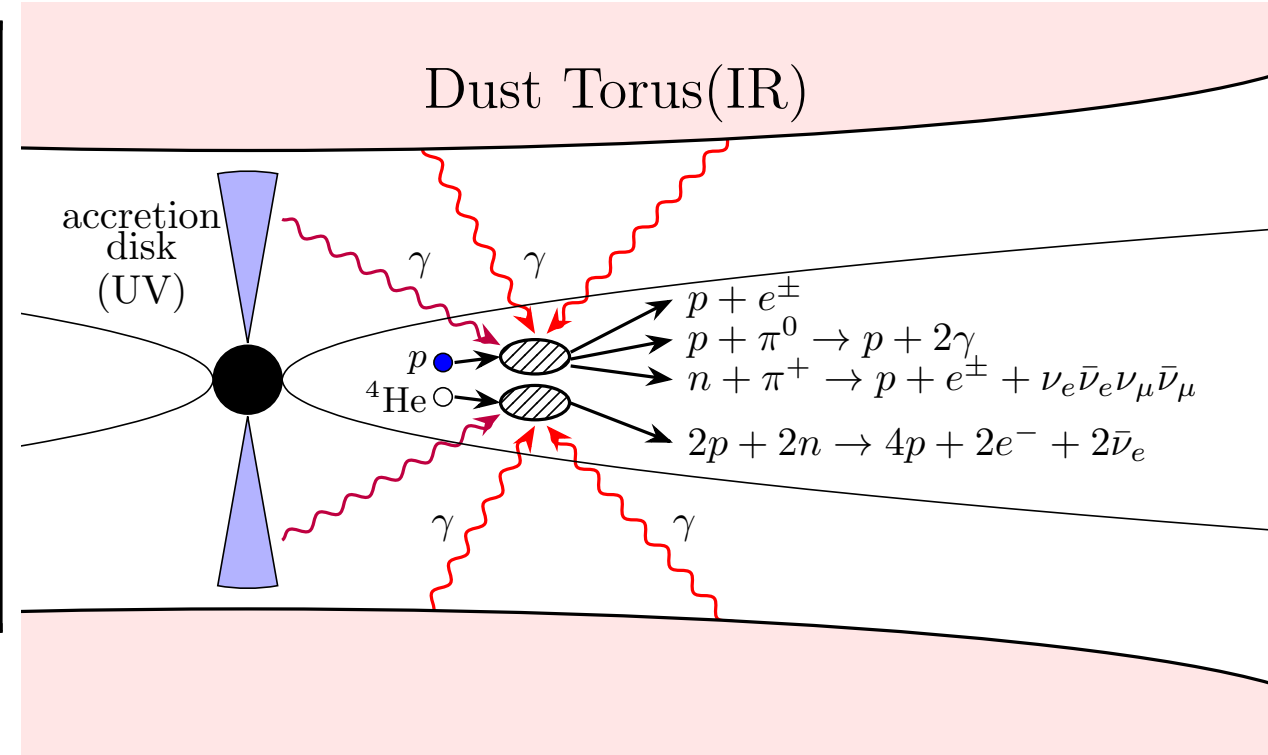
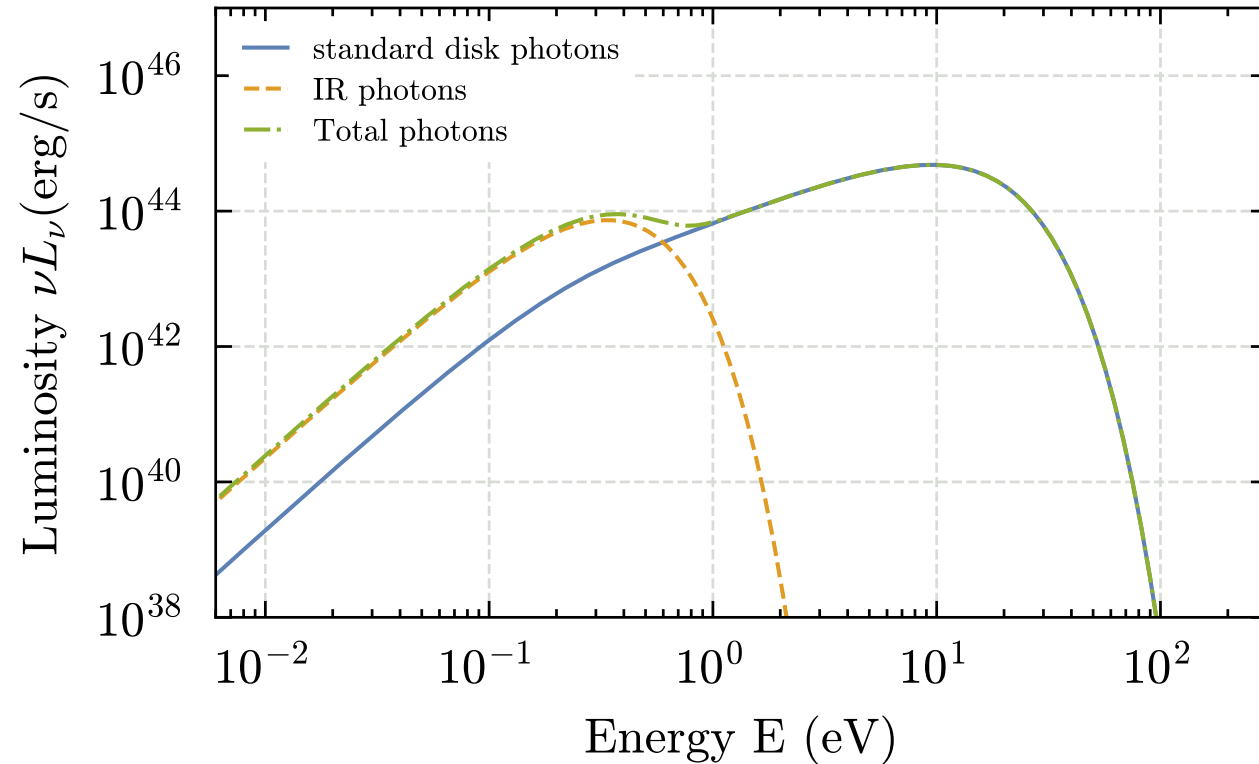
➤ AGN 磁場

→ 0.8 pc で $\sim 0.01 \text{ G} \sim 10 \text{ G}$ [Rodrigues et al. (2024)]



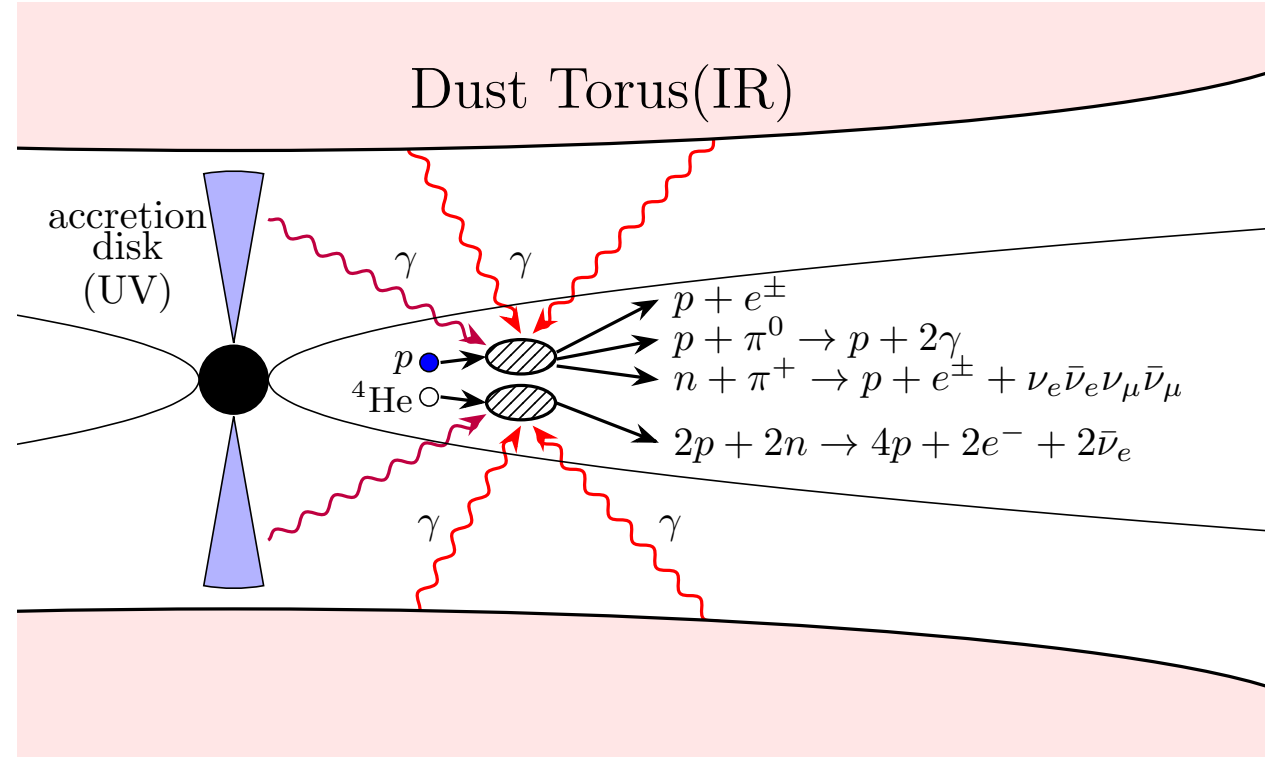
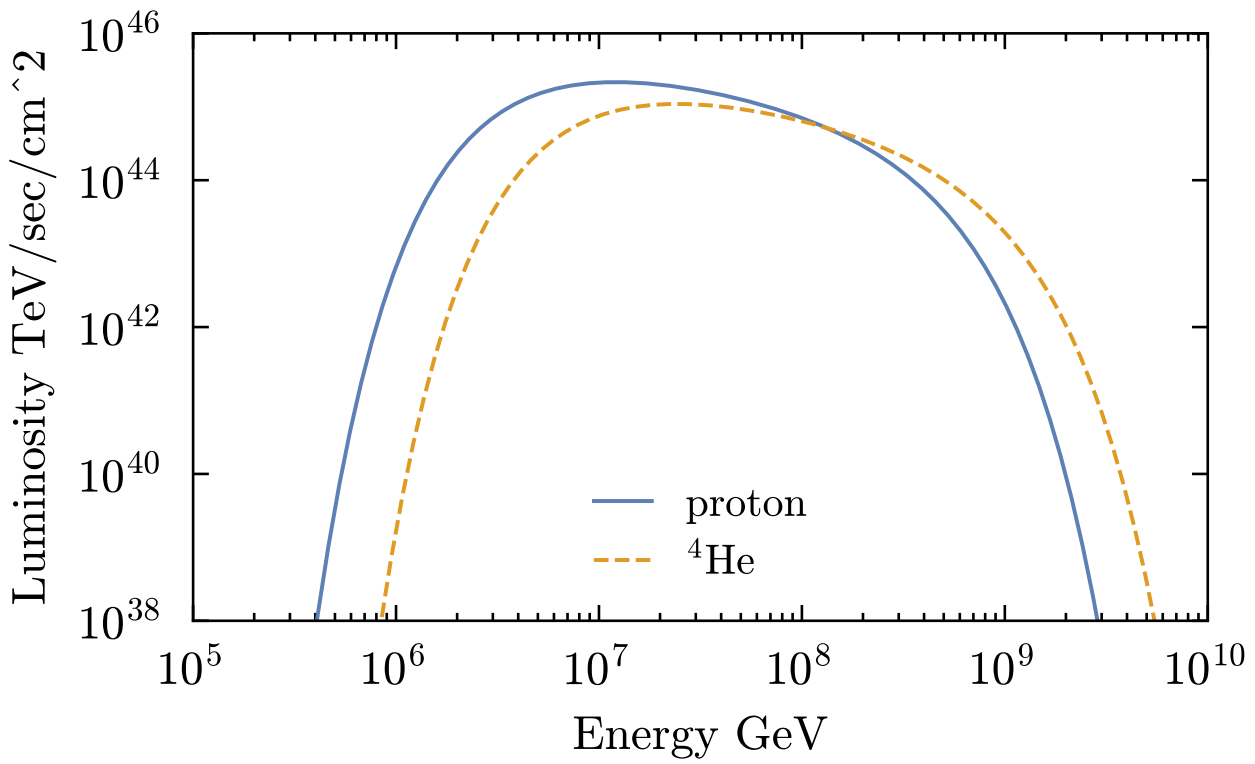
[Gallimore et al. (2004)]

光子源の設定



標準降着円盤モデル (光学的に厚く、幾何学的に薄い) + **ダストトーラス放射** (単温度黒体放射)

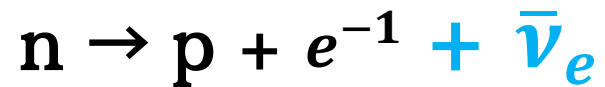
ジェット中の陽子 & ^4He の設定



$$p = 2.6, \quad E_{C,p}^{low} = 8 \text{ PeV}, \quad E_{C,p}^{high} = 200 \text{ PeV}, \quad \gamma \sim 10^6$$

^4He の光崩壊

- 中性子の β 崩壊が伴う



- ジェット中のPeV ^4He

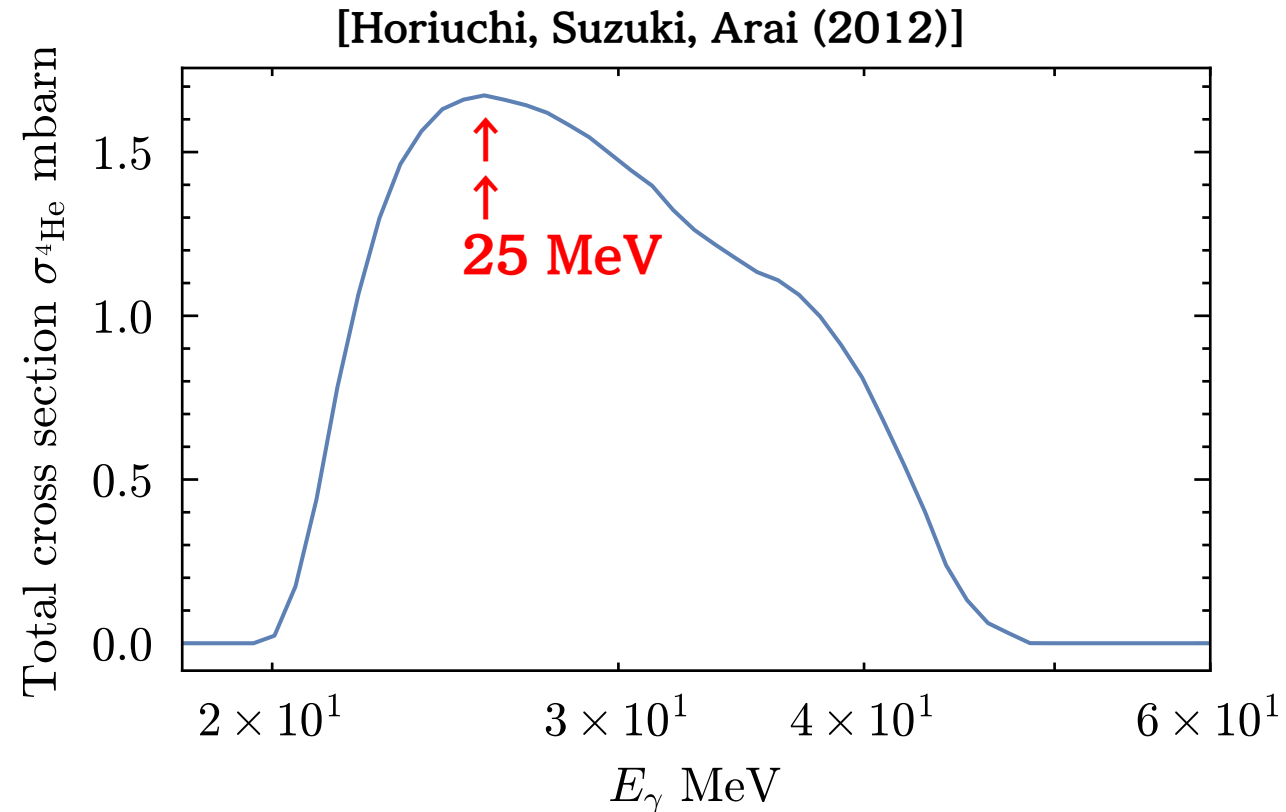
→ $\gamma_{\text{He}} \geq 10^6$

- ^4He の静止系での円盤光子

→ 元の UV 光子: 10-40 eV

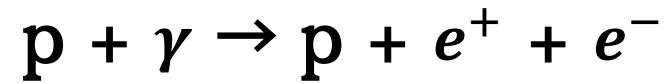
→ 円盤光子がブーストされる ($\times \gamma_{\text{He}}$)

→ ブースト後: $E_{\text{boosted}} > 10 \text{ MeV}$

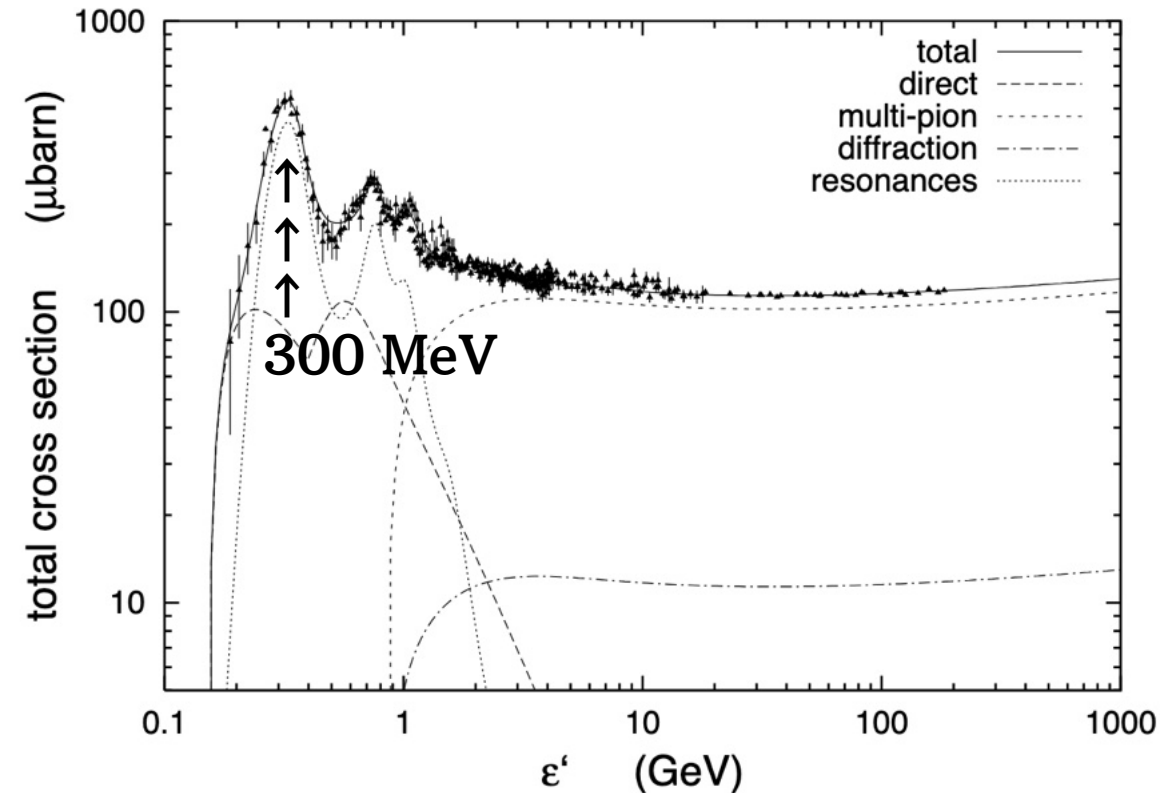
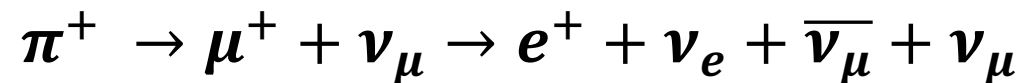
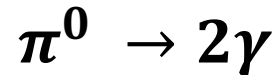
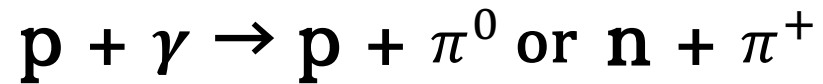


ジェット中のハドロン過程

➤ Bethe-Heitler 対生成



➤ photo-pion 過程



[Rachen, Stanev (1998)]

光学的深さ

➤ 平均自由行程

→ 数密度 n_{photon} と 断面積 σ を用いて

$$\lambda_{\text{free}} = \frac{1}{n_{\text{photon}} \sigma}$$

➤ R_{emission} での光学的深さ

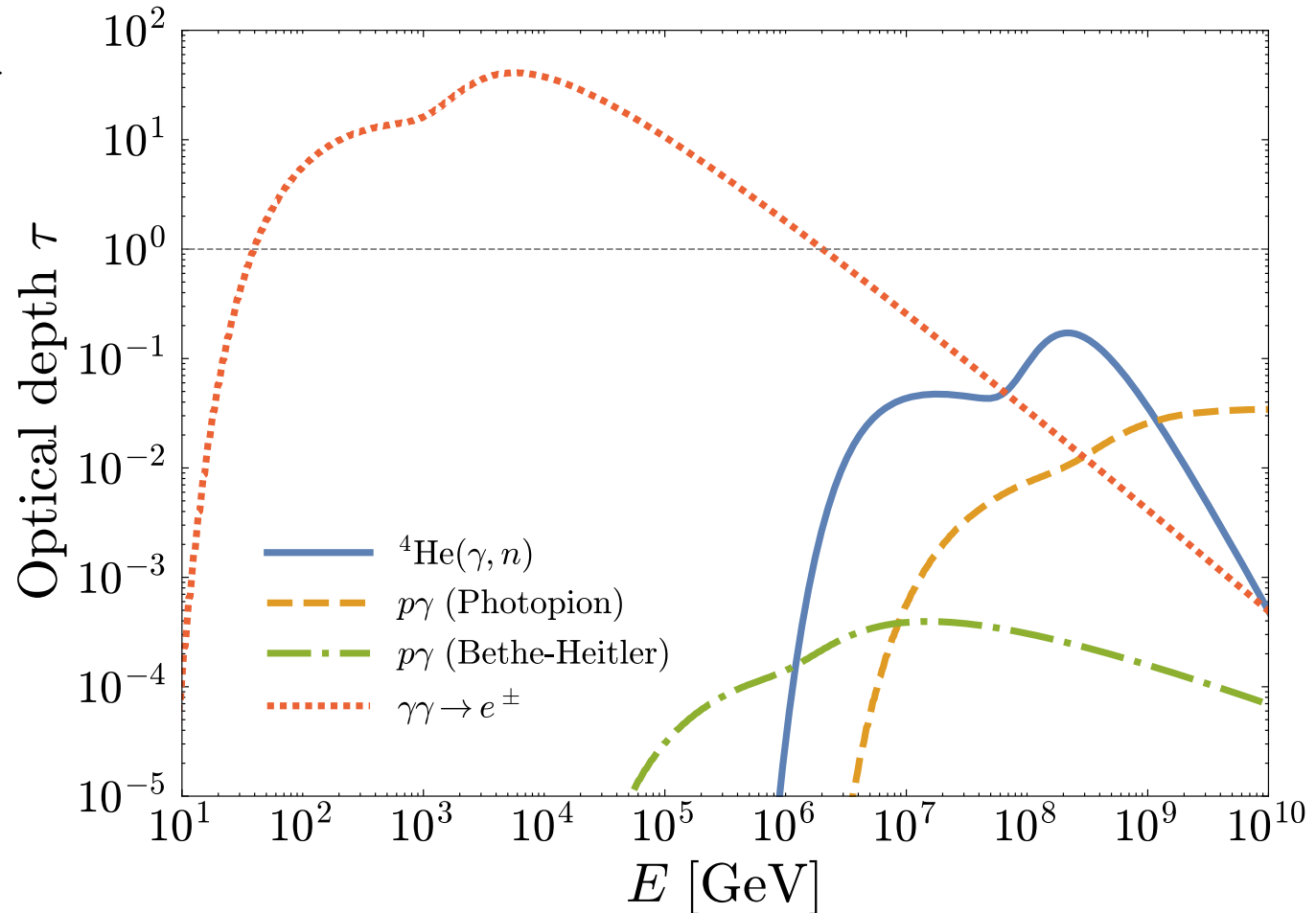
→ 長さの比を取る(無次元量):

$$\tau = \frac{R_{\text{emission}}}{\lambda_{\text{free}}}$$

➤ フラックスの計算

$$\Phi_{\text{escaped}} \equiv e^{-\tau} \Phi_{\text{initial}}$$

$$\Rightarrow \Phi_{\text{converted}} = (1 - e^{-\tau}) \Phi_{\text{initial}}$$



荷電粒子によるガンマ線放射

➤ 逆コンプトン効果 (IC)

- 低エネルギーターゲット光子を高エネルギー荷電粒子で叩き上げる
- 高エネルギー電子になるに従って効果が抑制 (Klein-仁科 効果)

荷電粒子によるガンマ線放射

➤ 逆コンプトン効果 (IC)

- 低エネルギーターゲット光子を高エネルギー荷電粒子で叩き上げる
- 高エネルギー電子になるに従って効果が抑制 (Klein-仁科 効果)

➤ シンクロトロン放射

- 磁場中の荷電粒子が螺旋状に運動することに伴う放射

荷電粒子によるガンマ線放射

➤ 逆コンプトン効果 (IC)

- 低エネルギーターゲット光子を高エネルギー荷電粒子で叩き上げる
- 高エネルギー電子になるに従って効果が抑制 (Klein-仁科 効果)

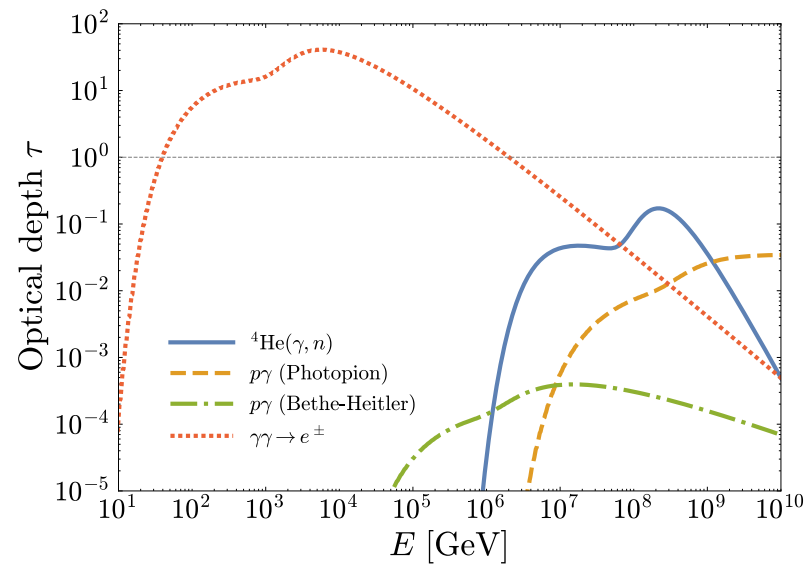
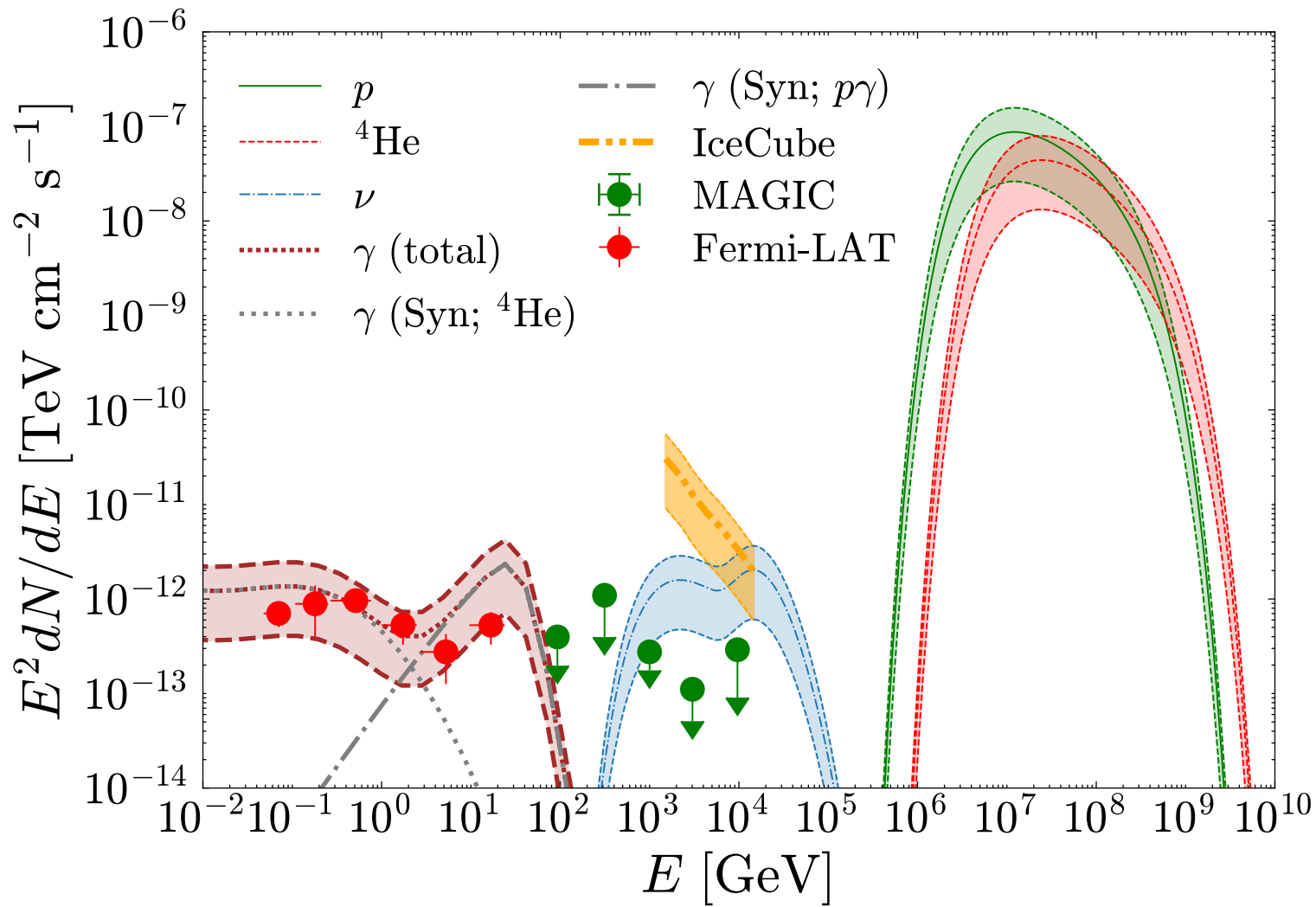
➤ シンクロトロン放射

- 磁場中の荷電粒子が螺旋状に運動することに伴う放射

➤ **naima**

- 公開 python コードパッケージ
- 相対論的粒子分布の計算
- シンクロトロン + IC

結果



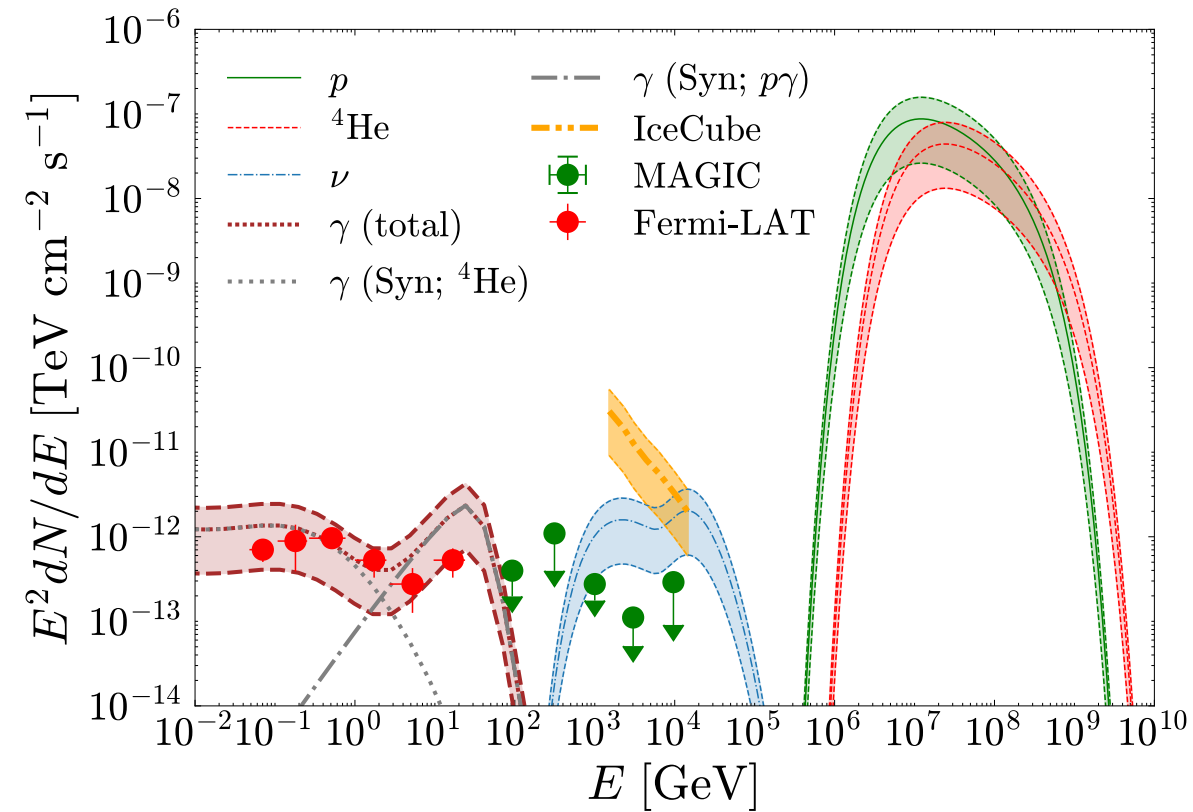
$$\Phi_{\text{escaped}} \equiv e^{-\tau} \Phi_{\text{initial}}$$

考察と展望

➤ 初期ニュートリノフレーバー比

→ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$ (β 崩壊)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$ (photopion)



考察と展望

➤ 初期ニュートリノフレーバー比

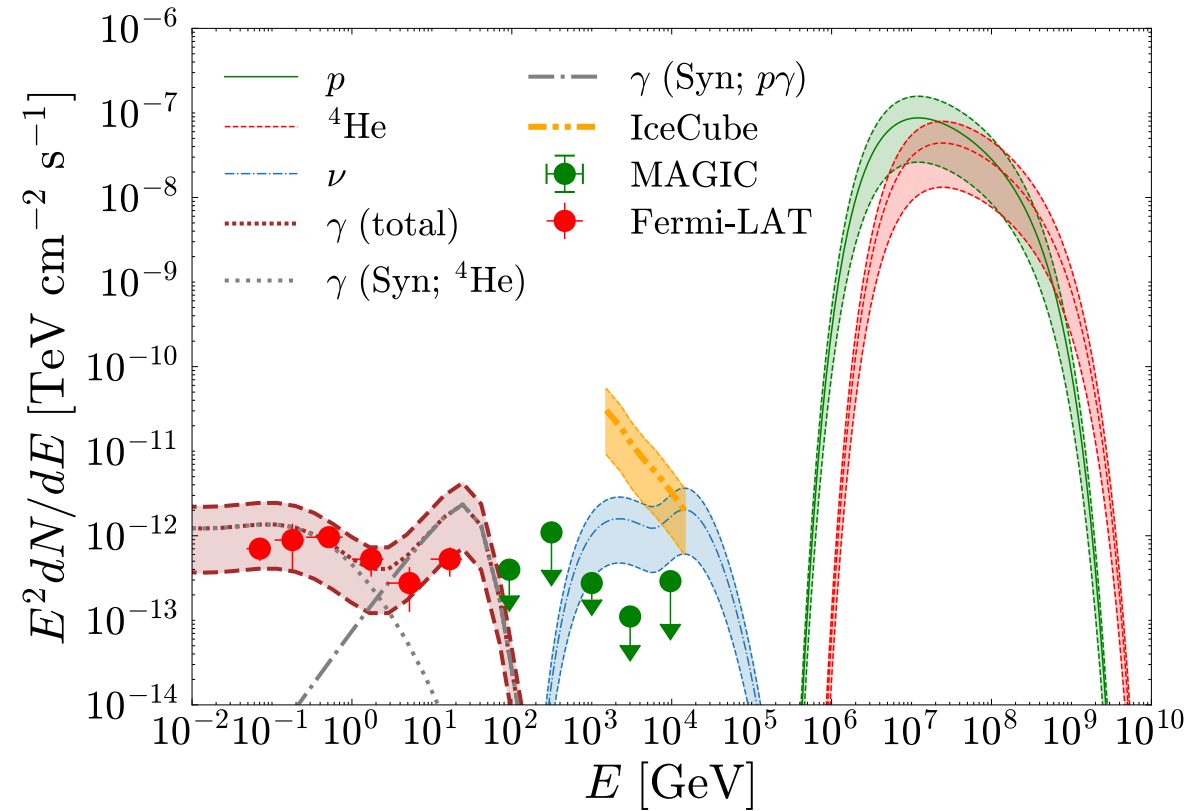
→ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$ (β 崩壊)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$ (photopion)

➤ IceCube で観測されるフレーバー比の研究

→ 観測されるフレーバーの比で検証可能！

[Bustamante, Ahlers (2019)]



考察と展望

➤ 初期ニュートリノフレーバー比

→ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$ (β 崩壊)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$ (photopion)

➤ IceCube で観測されるフレーバー比の研究

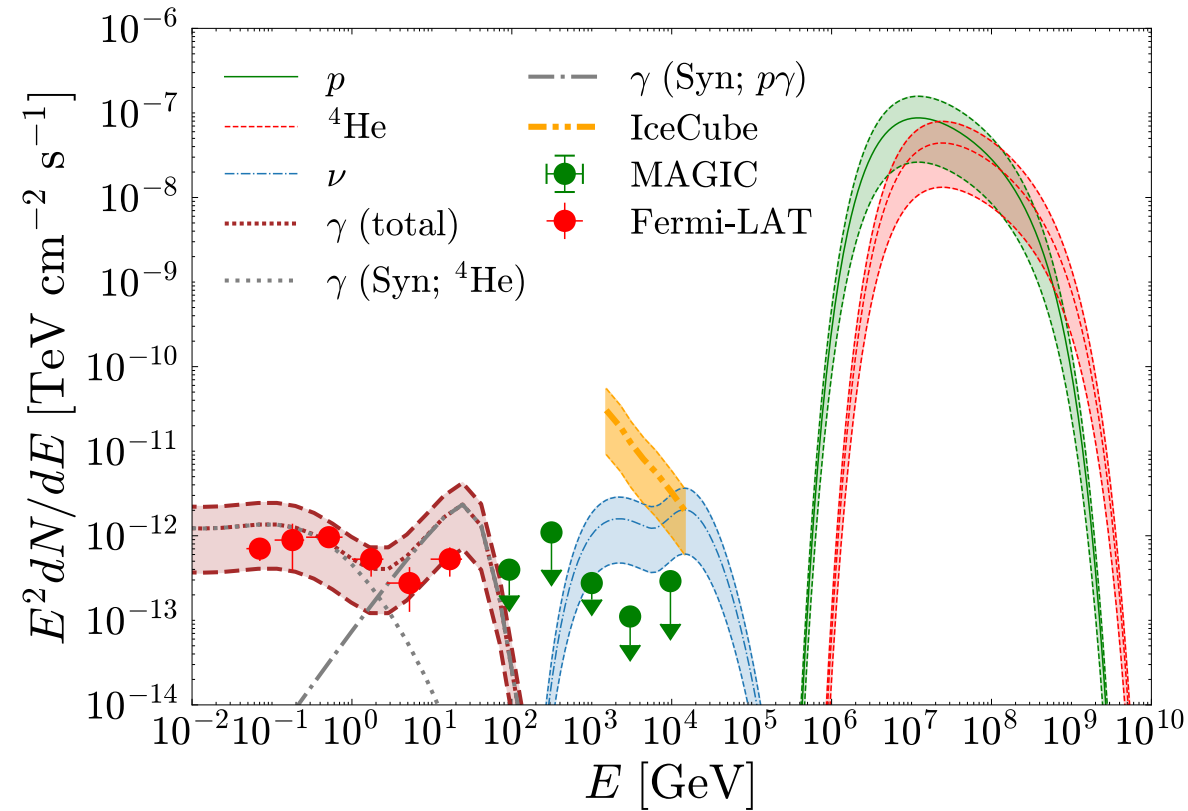
→ 観測されるフレーバーの比で検証可能！

[Bustamante, Ahlers (2019)]

→ ニュートリノ振動の結果期待される比率

$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 5 : 2 : 2$ (β decay)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 1 : 1 : 1$ (photopion)



考察と展望

➤ 初期ニュートリノフレーバー比

→ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$ (β 崩壊)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$ (photopion)

➤ IceCube で観測されるフレーバー比の研究

→ 観測されるフレーバーの比で検証可能！

[Bustamante, Ahlers (2019)]

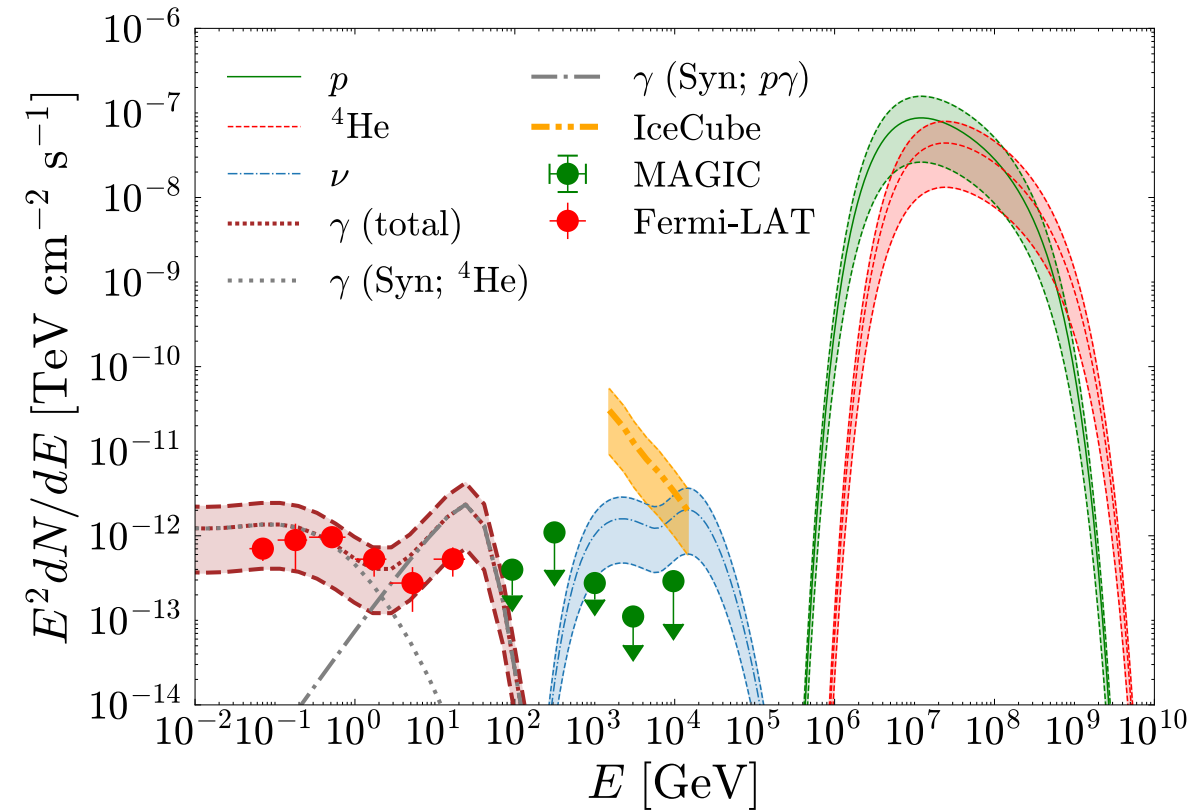
→ ニュートリノ振動の結果期待される比率

$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 5 : 2 : 2$ (β decay)

↔ $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \simeq 1 : 1 : 1$ (photopion)

➤ より詳細なジェットや降着円盤のモデル

→ GeV-TeV 付近の細かい特徴が再現できる



まとめ

➤ 「隠れた」ニュートリノ源

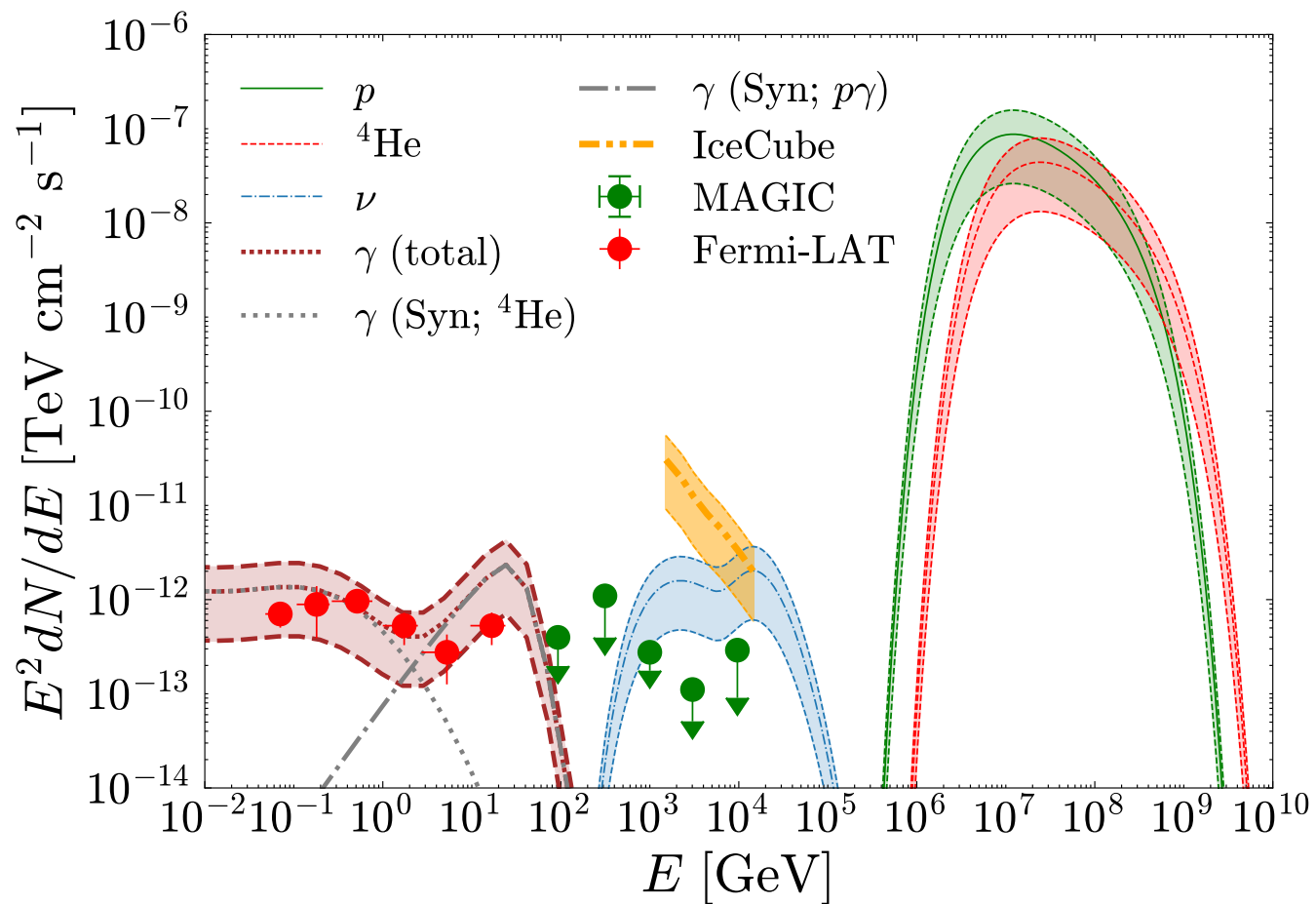
→ ${}^4\text{He}$ の光崩壊

→ 中性子の β 崩壊

➤ ガンマ線放射

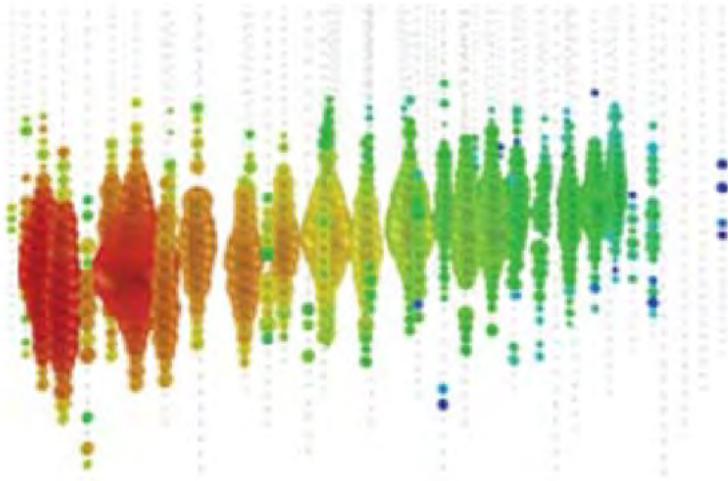
→ (β 崩壊 + Bethe-Heitler + photopion) の電子によるIC & シンクロトロン

➤ より精度良くニュートリノフレーバー比を調べることで検証可能！

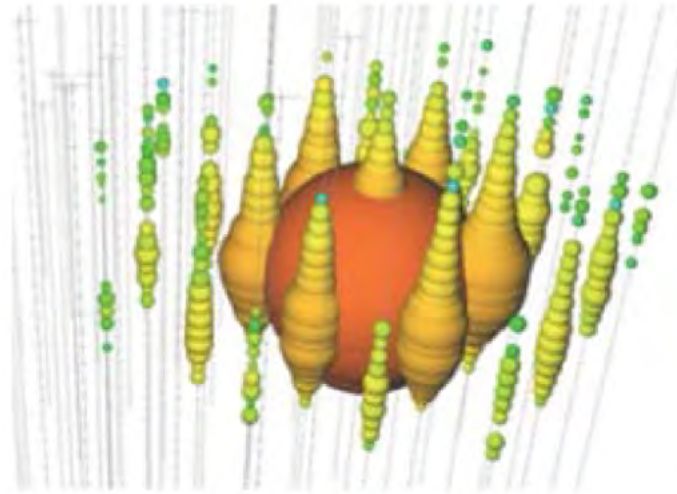


IceCube で観測されるイベント

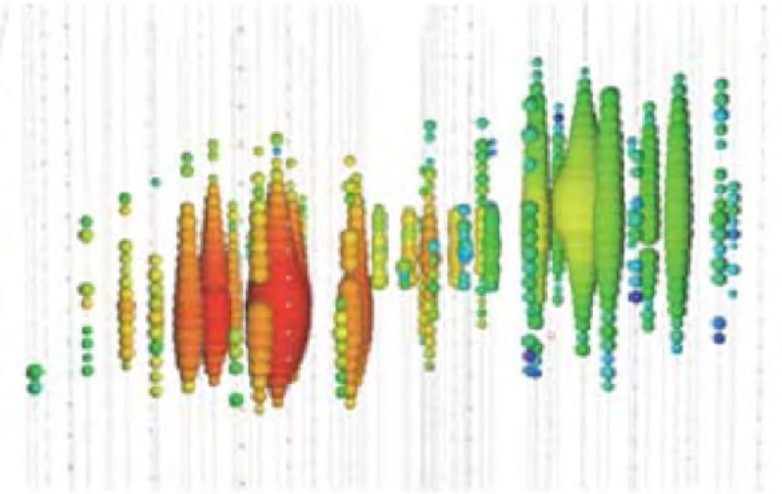
トラック



カスケード



ダブルバンク



[IceCube collaboration]

SMBH の質量推定法

- **ダイナミクスに基づく方法**
 - 恒星・ガス ($H\alpha$ や CO 線) の運動
 - 水メーザー (H_2O) 輝線の精密ドップラー観測
- **時間変動を用いた方法(反響マッピング法)**
 - 降着円盤放射と周囲のプラズマ放射の変化のラグ
- **経験則に基づく間接推定**
 - BH質量と銀河バルジの速度分散の相関
 - バルジ光度 (赤外線など) との相関関係
- **放射スペクトルによるフィッティング**

[Miyoshi et al. (1995)]

