

NGC 1068銀河からのニュートリノは 暗黒物質由来か？

秋田 謙介 (東北大学)

with

Alejandro Ibarra (Technical University of Munich)

Robert Zimmermann (Technical University of Munich & MPA, Garching)

arXiv: 2507.16539

東京理科大学 阿部研究室 セミナー 2026年10月9日

アウトライン

- 暗黒物質のレビュー
- NGC 1068銀河からの高エネルギーニュートリノ
- 暗黒物質によるNGC 1068からのニュートリノイベントの説明

暗黒物質 Dark Matter (DM)



- 暗黒物質は宇宙に存在する未知の物質
- 様々な宇宙観測から、重力を通じて、その存在は裏付けられている。
- しかし、暗黒物質の性質はほとんどわかっていない。
- 暗黒物質の性質の解明は、素粒子物理学と宇宙物理学の最重要課題の一つ。

暗黒物質の証拠となる観測

銀河の回転曲線の観測

球対称な質量分布と円運動を仮定すると

$$\frac{mv(r)^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

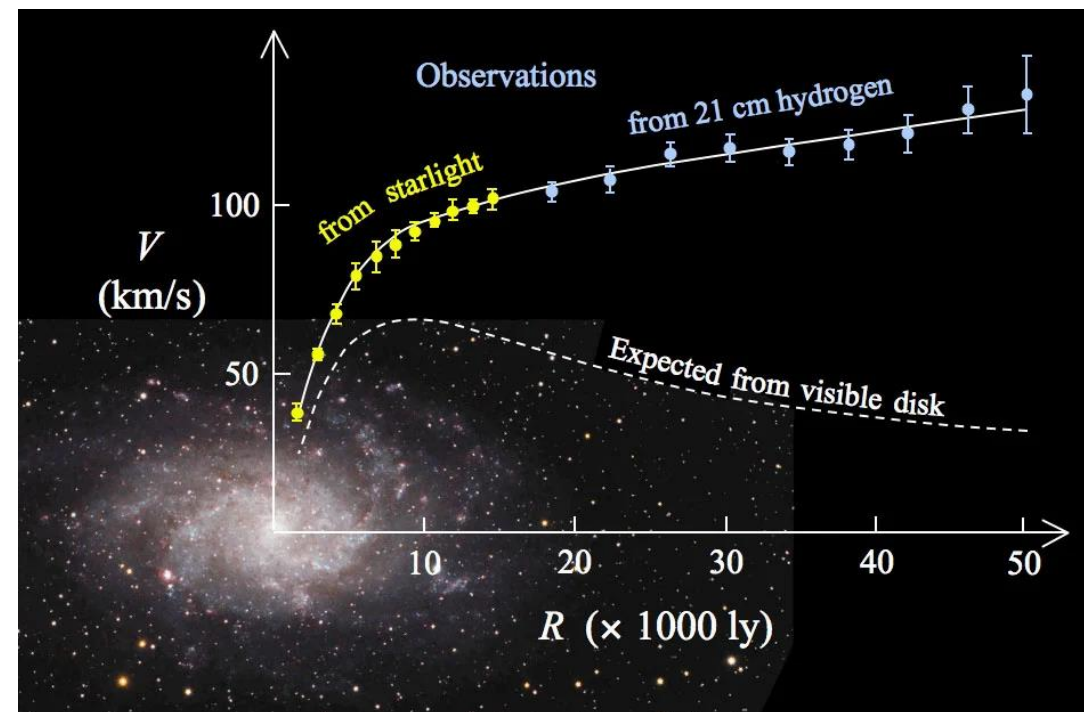
遠心力 重力

$M(r)$:
半径 r 内の総質量

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

光る物質だけでは回転速度が足りない

→ 光っていない質量を持つ **暗黒物質** の存在



Corbelli and Salucci (2000)

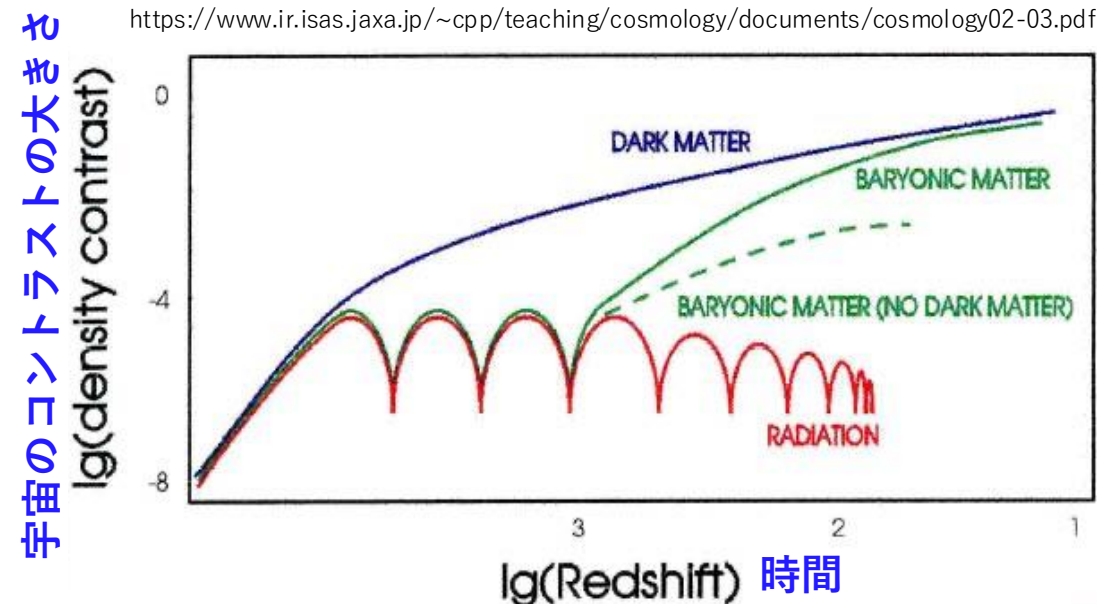
宇宙の構造形成

宇宙には銀河や銀河団という構造が存在。

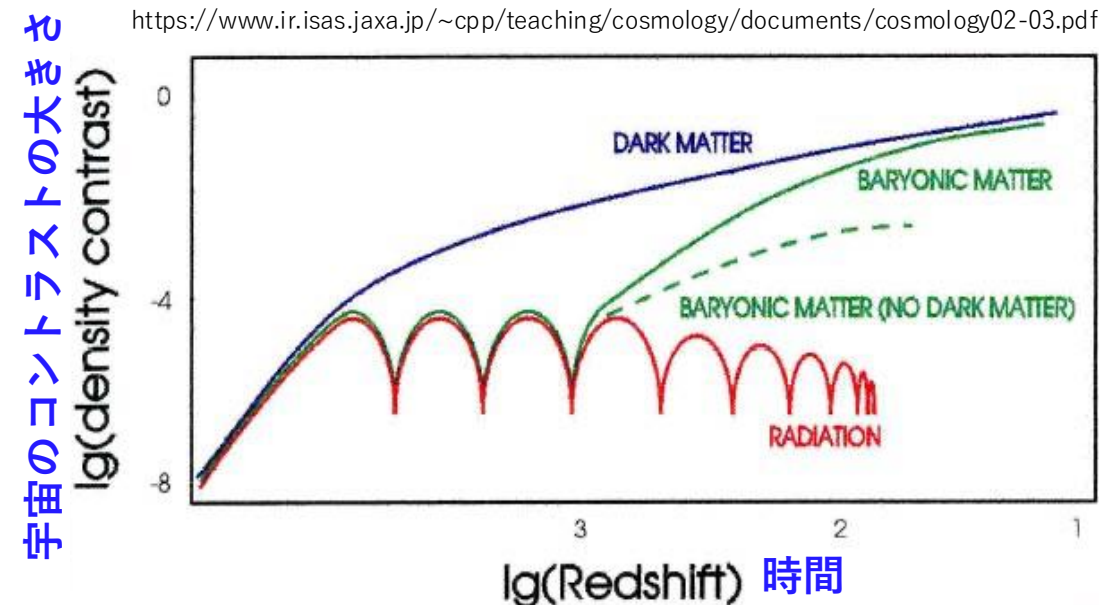
初期宇宙の小さな量子揺らぎが成長して構造が形成されたと考えられている。

軽い相対論的粒子(ニュートリノや光子)はその大きい速度のため、重力的にほぼ束縛されない。

さらに、通常物質(バリオン)は初期宇宙の光子の圧力と散乱によって揺らぎが平され、**観測と合わない！**



宇宙の構造形成



もし光子と相互作用せず、速度が遅い(非相対論的な)のであれば、暗黒物質の揺らぎは成長できる。

宇宙の大部分を占めれば、暗黒物質の重力ポテンシャルに通常の物質が引っ張られ銀河(団)が形成！

宇宙の成り立ちにおいても暗黒物質は重要！

銀河団の衝突

弾丸銀河団の衝突：

2つの銀河団の衝突後の様子

青: 質量分布

(遠方銀河の光の重力レンズにより測定)

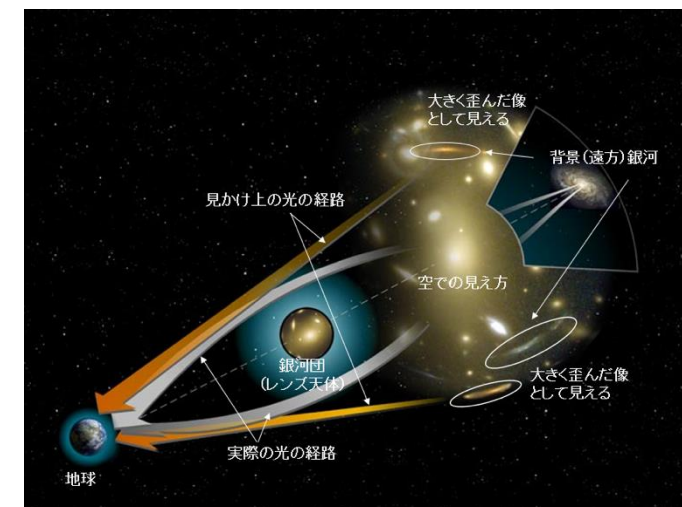
赤: 高温ガスの分布

(X線観測により測定)

電磁相互作用などの強い相互作用をしない
暗黒物質の存在



NASA/CXC/M. Weiss



暗黒物質 Dark Matter (DM)

暗黒物質の存在は様々な宇宙観測を通じて、重力を通じて、裏付けられている

わかっている性質

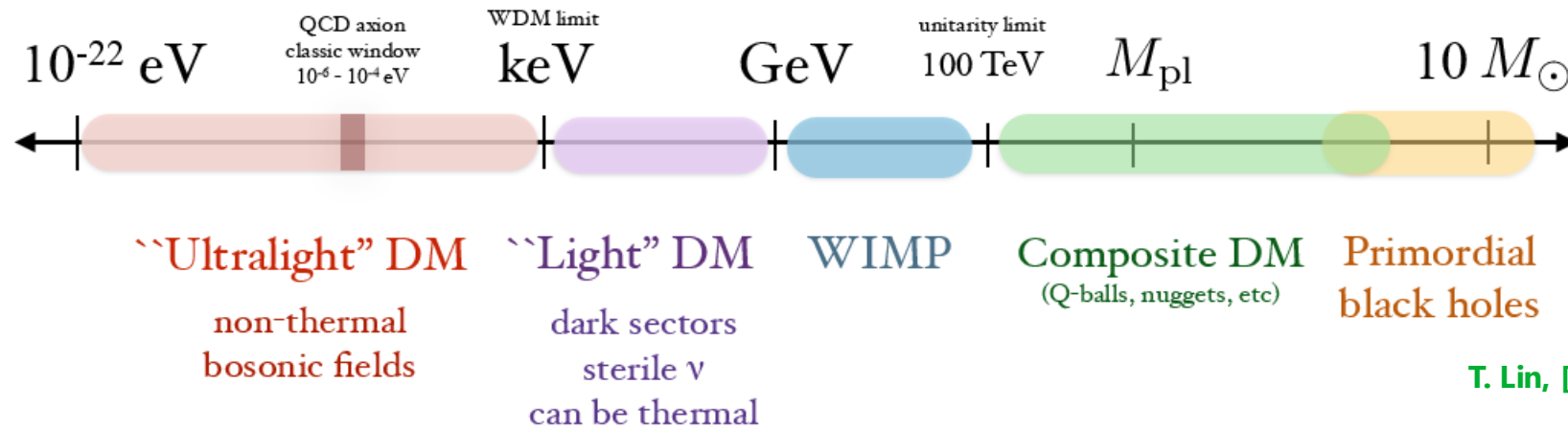
- ・ 宇宙の物質の大部分を占める
- ・ 質量を持ち非相対論的(速度が遅い)
- ・ 安定(現在の宇宙に存在)

知らないことは上記以外の全て
特に、**暗黒物質の質量**



Mass scale of dark matter

(not to scale)



T. Lin, [arXiv:1904.07915]

暗黒物質は広い範囲で許されている。

重力相互作用は非常に弱く、DMの巨視的な総質量しかわからないため。

→重力より強い相互作用によって、DMが通常の物質と相互作用し、
その物質を観測できれば、暗黒物質の質量が大幅に特定できるかもしれない！

暗黒物質のシグナルはどこか？

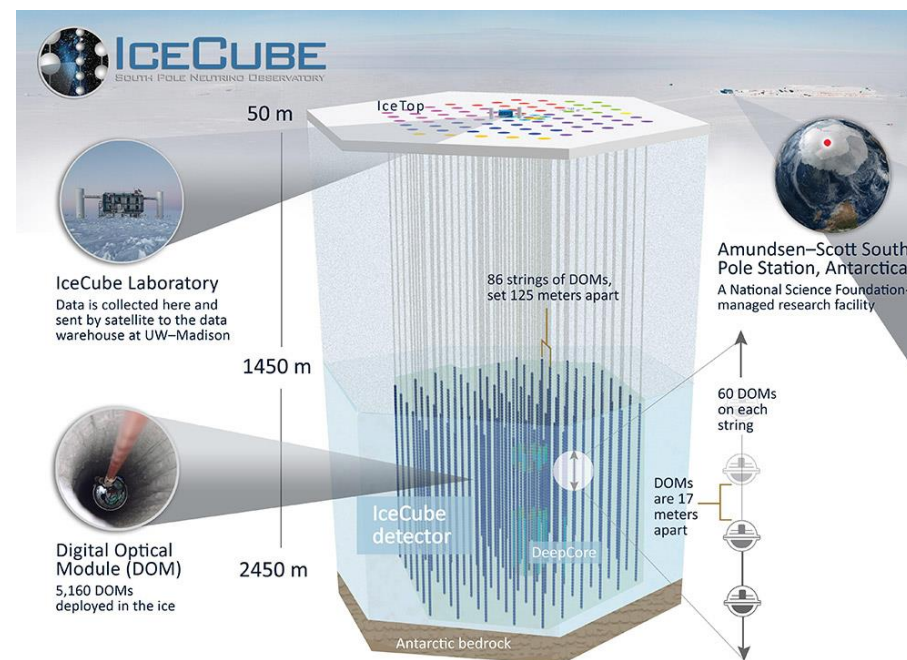
アウトライン

- 暗黒物質のレビュー
- NGC 1068銀河からの高エネルギーニュートリノ
- 暗黒物質によるNGC 1068からのニュートリノイベントの説明

NGC 1068銀河からのニュートリノ

- 南極のIceCube実験は2022年に活動銀河NGC 1068の方向から 4.2σ の超過でニュートリノを観測した。

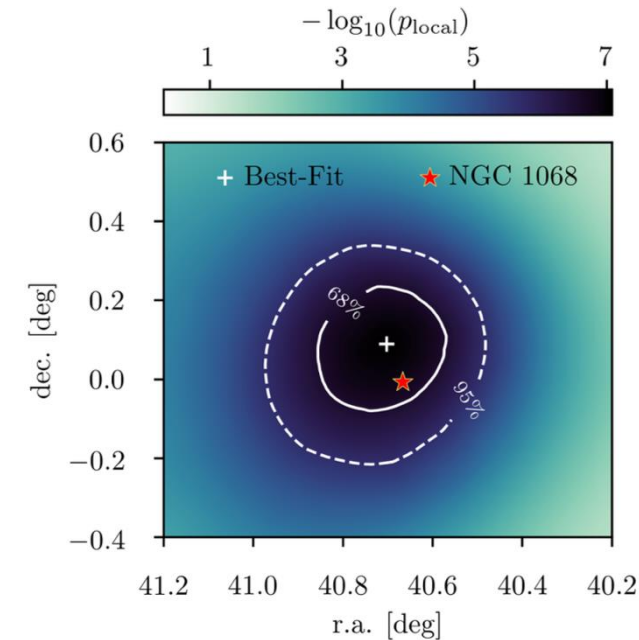
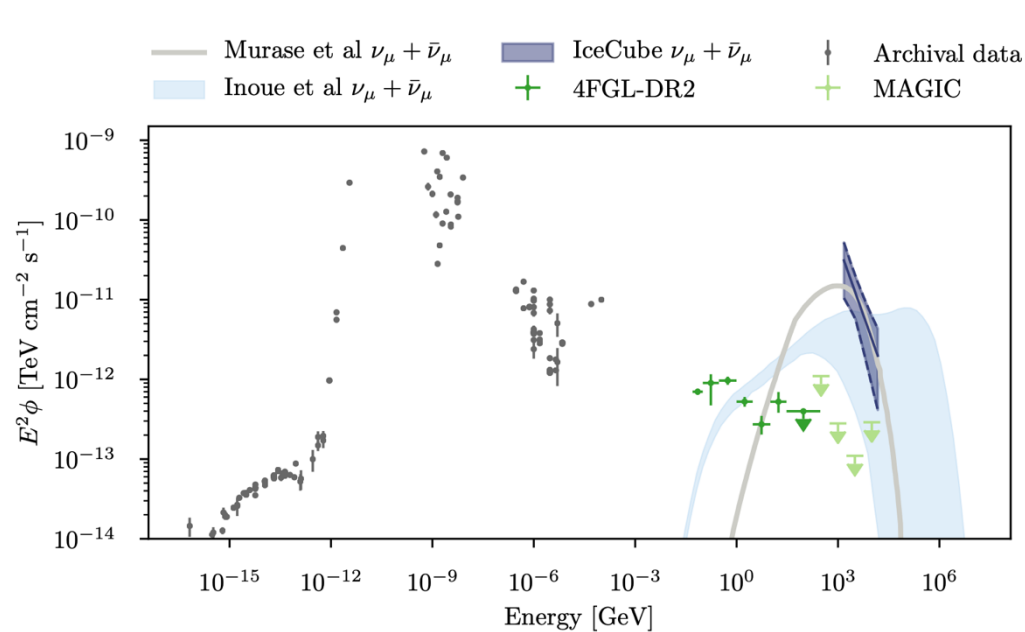
IceCube collaboration
2022



NGC 1068銀河からのニュートリノ

- 南極のIceCube実験は2022年に活動銀河NGC 1068の方向から 4.2σ の超過でニュートリノを観測した。

IceCube collaboration
2022



このシグナルは暗黒物質由来か？

NGC1068ニュートリノの生成機構の標準的説明

- 高エネルギー陽子が高エネルギーニュートリノを生成

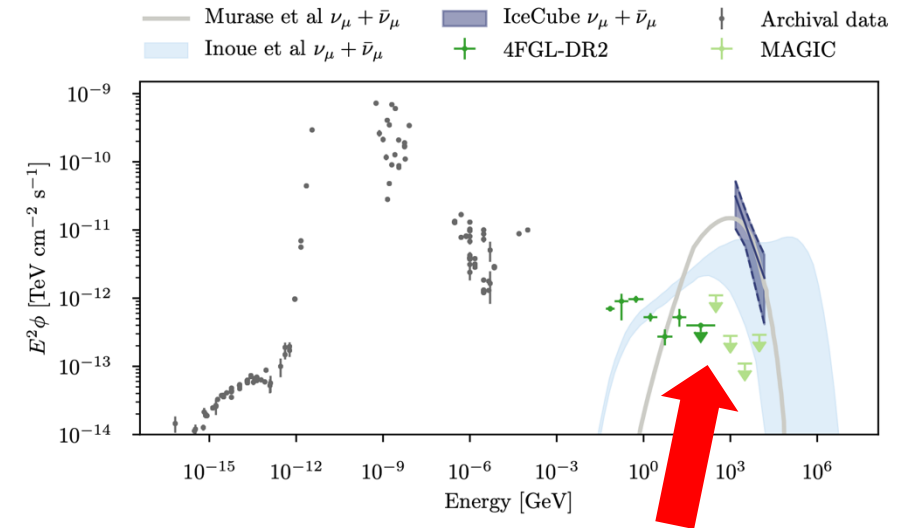
$$p + p, p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm}, \pi^0, \dots$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^- + \nu_{\mu}, \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma, \dots$$

陽子は磁場によって加速されたかもしれない。

- しかし、NGC1068方向からTeVのガンマ線は観測されていない。。。

➡ これはニュートリノとガンマ線が銀河の奥深くで生成され、ガンマ線が散乱していることを示唆



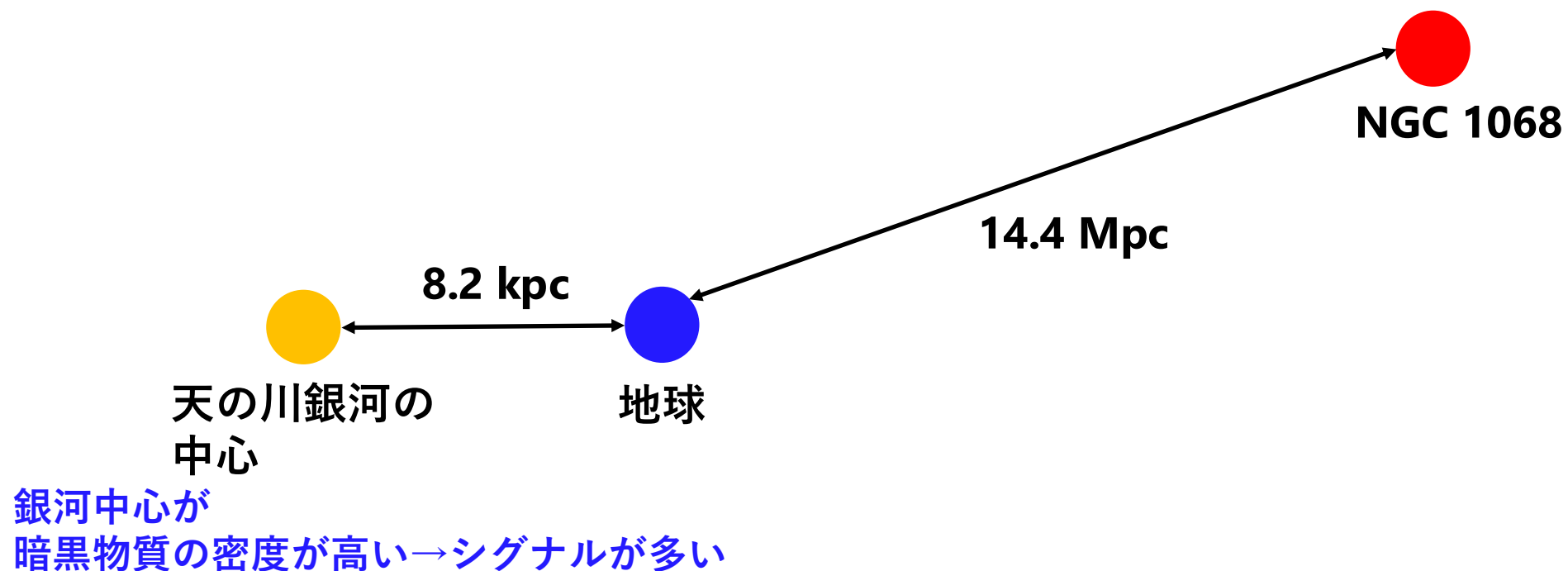
No TeV gamma-ray from NGC 1068

加速された陽子の光度など

この機構はNGC 1068ニュートリノを説明できるが、いくつかのパラメータを矛盾のない範囲で仮定しており、必ずしもこの機構で説明する必要はない。

このシグナルは暗黒物質由来か？

暗黒物質でNGC 1068ニュートリノを説明する問題点



ニュートリノフラックスは $\frac{1}{4\pi d^2}$ で薄められる。

➡ 天の川銀河からのニュートリノシグナルは非常に多くなるだろう

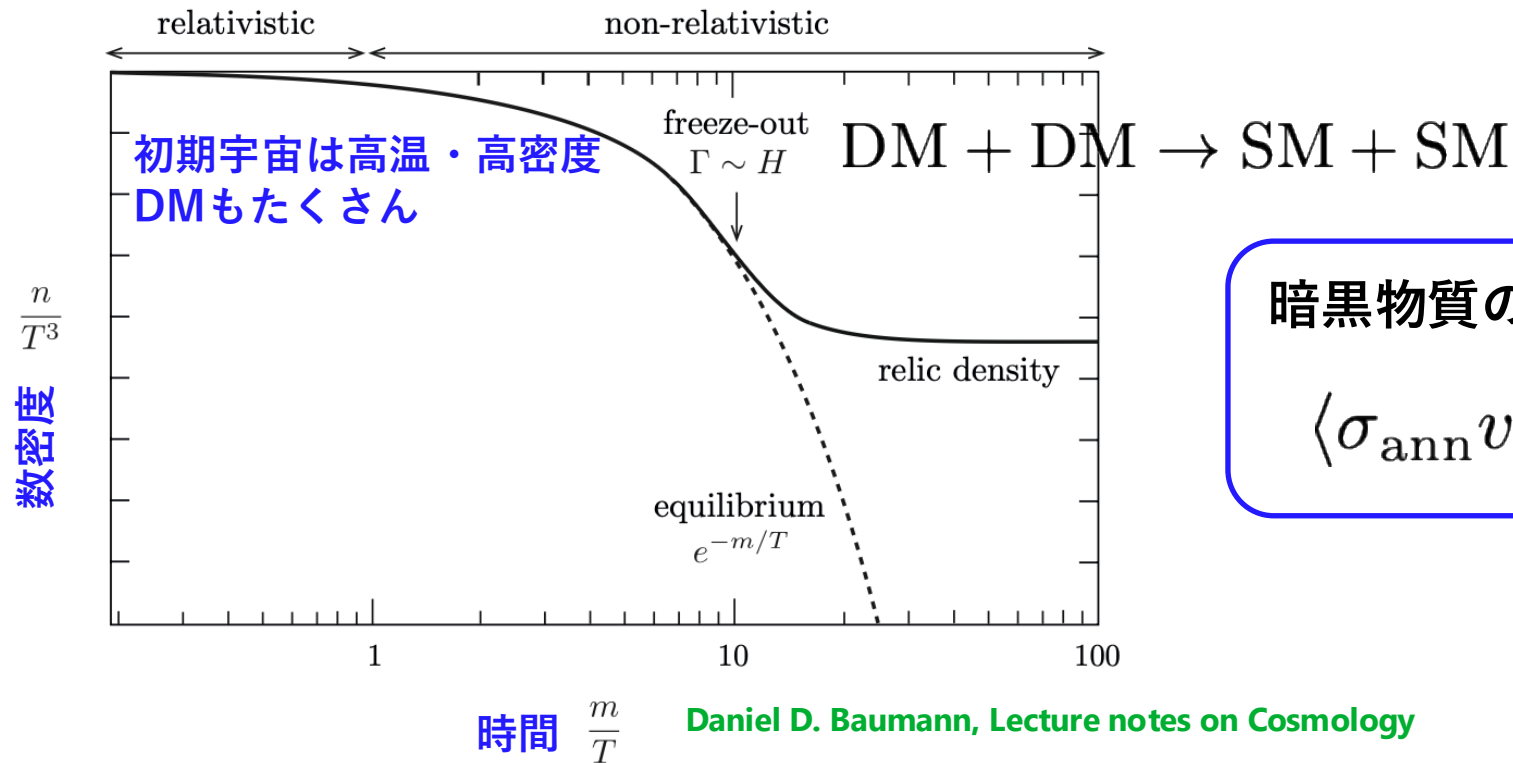
なぜ天の川銀河からニュートリノシグナルを観測していないか？

アウトライン

- 暗黒物質のレビュー
- NGC 1068銀河からの高エネルギーニュートリノ
- **暗黒物質によるNGC 1068からのニュートリノイベントの説明**

本研究で考える暗黒物質のシナリオ

- 最も単純な暗黒物質生成機構の一つである熱的フリーズアウトを考える。



暗黒物質の観測量を説明する対消滅率：

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

- 熱的フリーズアウト機構は暗黒物質の対消滅のシグナルを予言。
暗黒物質のニュートリノへの対消滅シグナルを考える

Daniel D. Baumann, Lecture notes on Cosmology

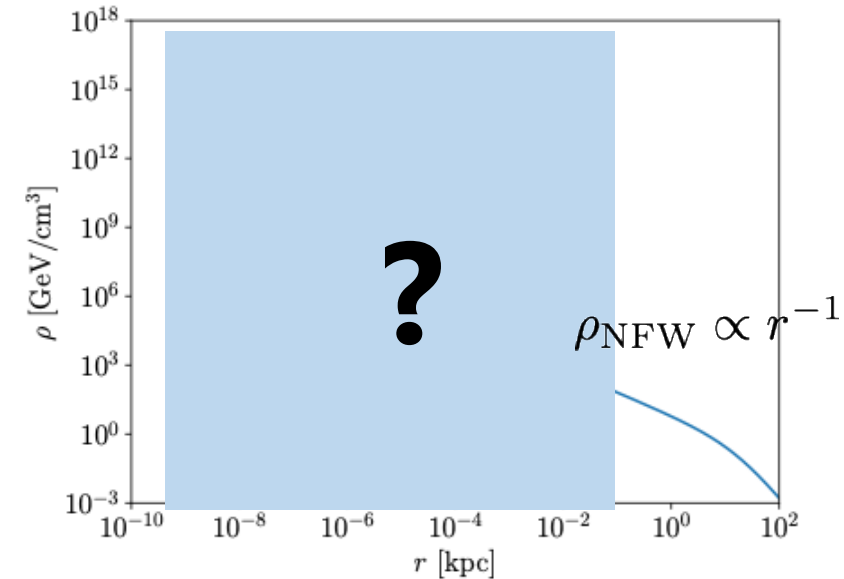
暗黒物質対消滅からのニュートリノフラックス

- ニュートリノフラックス

$$\frac{d\phi_{\nu+\bar{\nu}}}{dE_{\nu}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma_{\text{ann}}v\rangle}{2m_{\text{DM}}^2} \frac{1}{3} \frac{dN_{\nu}}{dE_{\nu}} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_0^{R_{\text{max}}} ds \underline{\rho_{\text{DM}}^2(r)}$$

- シミュレーションと観測がDMハロープロファイルを決定

- しかし、ハローの内側についてはよくわかっていない

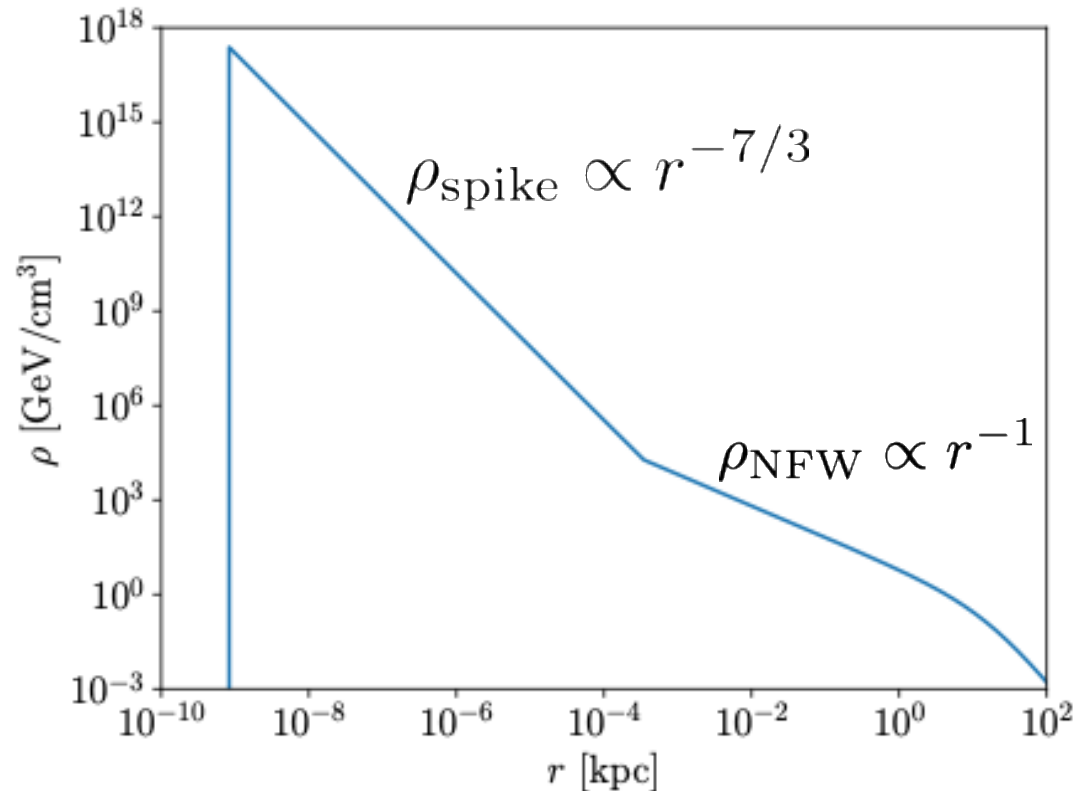


もし内側で $\rho(r) \propto r^{-\alpha}$ ($\alpha > 3/2$) なら、ニュートリノフラックスは増強される。

もしNGC 1068が高密度プロファイルを持ち、天の川銀河が持たないなら、
NGC 1068 neutrino eventは暗黒物質の対消滅によって説明できるかもしれない。

DM spike profile

- ほとんどの銀河はその中心に大質量ブラックホール(Super Massive Black Hole, SMBH)を持つ。
- 大質量ブラックホールの断熱成長は“spike”と呼ばれる高密度プロファイルを生成する。



$\rho_{\text{spike}} \propto r^{-7/3}$ の導出

- 初期密度と質量

$$\rho_i(r) \propto r^{-\gamma_i}$$

$$M_i(< r_i) = 4\pi \int_0^{r_i} dr r^2 \rho_i(r) \propto r_i^{3-\gamma_i}$$

- もし暗黒物質粒子が円運動をしているなら

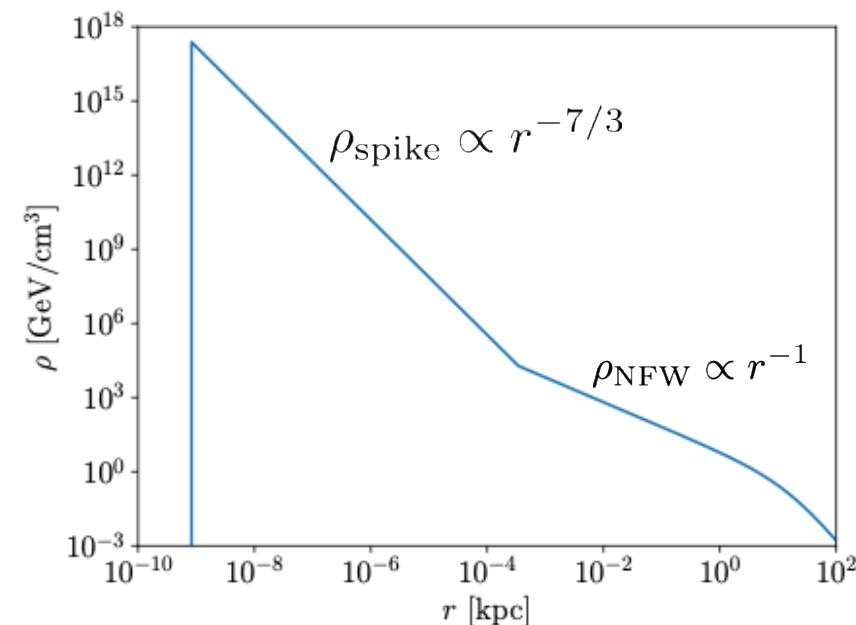
$$v_c^2 = \frac{GM(< r)}{r}$$

角運動量: $L = r v_c$

角運動量保存: $r_i M_i(< r_i) = r_f M_f(r < r_f)$

- もしspikeの内側が大質量ブラックホール優勢なら, $M_f(r < r_f) \simeq M_{\text{SMBH}} \simeq \text{const}$

➡ $r_f \propto r_i^{4-\gamma_i}$



断熱成長



$\rho_{\text{spike}} \propto r^{-7/3}$ の導出

- もし暗黒物質質量がある殻内で保存しているなら

$$M_{\text{DM},f}(< r_f) = M_{\text{DM},i}(< r_i)$$

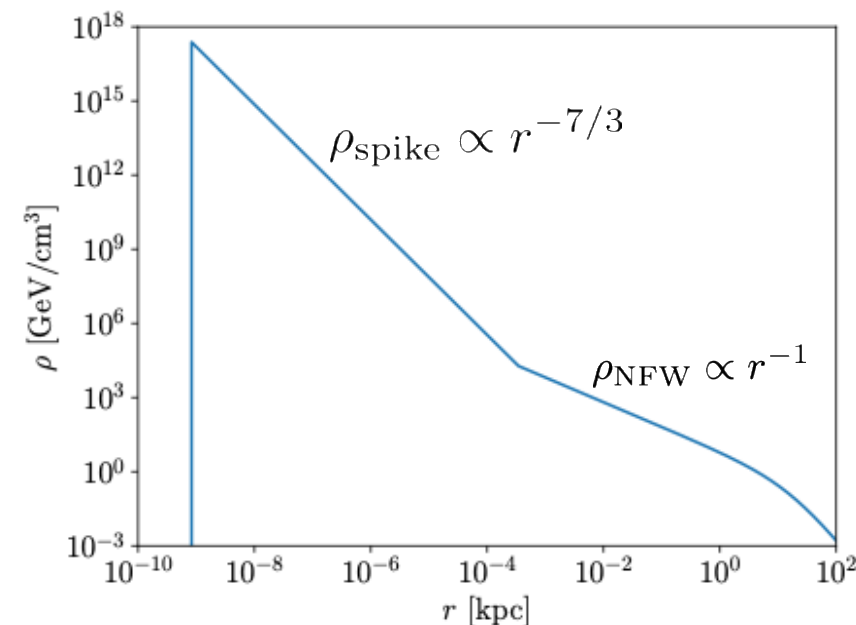
$$\rightarrow M_{\text{DM},f}(< r_f) \propto r_i^{3-\gamma_i}$$

$$\rightarrow M_{\text{DM},f}(< r_f) \propto r_f^{\frac{3-\gamma_i}{4-\gamma_i}} \quad r_f \propto r_i^{4-\gamma_i}$$

- 生成されたDM spike profile $\rho_{\text{sp}}(r) \propto r^{-\gamma_{\text{sp}}}$ と $M_{\text{DM},f}(< r) \propto r^{3-\gamma_{\text{sp}}}$ は

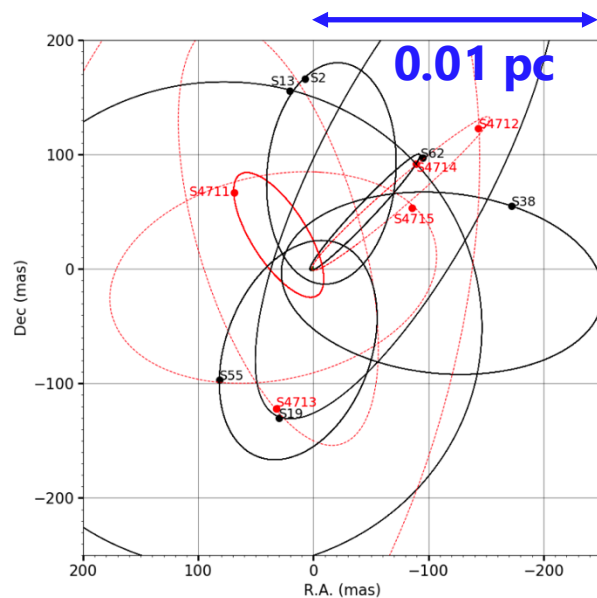
$$\gamma_{\text{sp}} = \frac{9 - 2\gamma_i}{4 - \gamma_i}$$

- 初期の暗黒物質密度がNFW profileの場合 ($\gamma_i = 1$), $\gamma_{\text{sp}} = \frac{7}{3}$.

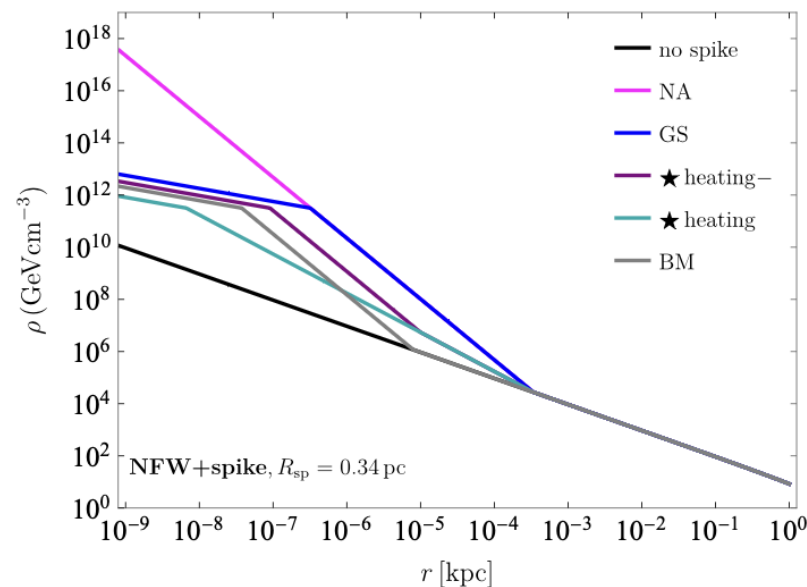


DM spike in the Milky Way

観測から、天の川銀河の大質量ブラックホール付近には星が存在することがわかっている。
恒星加熱(星とDMの重力による散乱)はDM spike profileを平すだろう。



Peißker, Eckart, Zajacek, Ali, Parsa [arXiv: 2008.04764]



Balaji, Sachdeva, Sala, Silk
[arXiv: 2303.12107]

Gnedin, Primack
[arXiv: astro-ph/0308385]

DM spike in NGC 1068

NGC1068銀河は非常に遠いので、その観測は確立されていない。。。

NGC 1068銀河は活動銀河なので、放射成分が多く存在し、中心付近での星形成が抑制されているかもしれない。

一方、天の川銀河は静かな銀河で、星形成が効率良く行われているかもしれない。

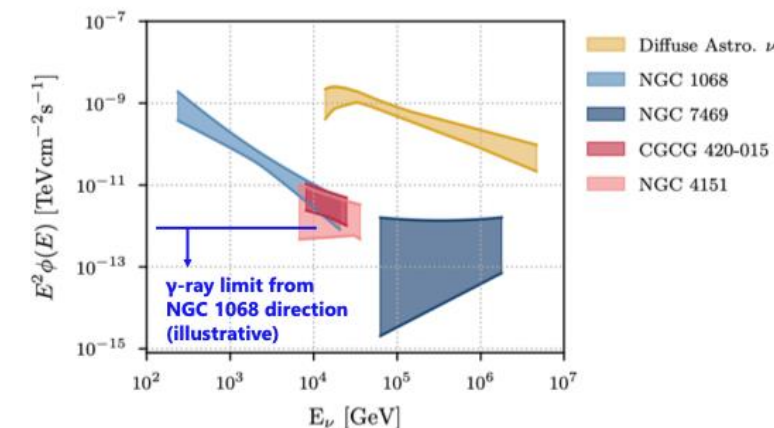
➡ **仮定： MW spikeは抑制されているがNGC 1068 spikeは存在。**

*この仮定はIceCube実験の最近のNGC 7469のような他の活動銀河からの定常的なニュートリノ観測とも整合。

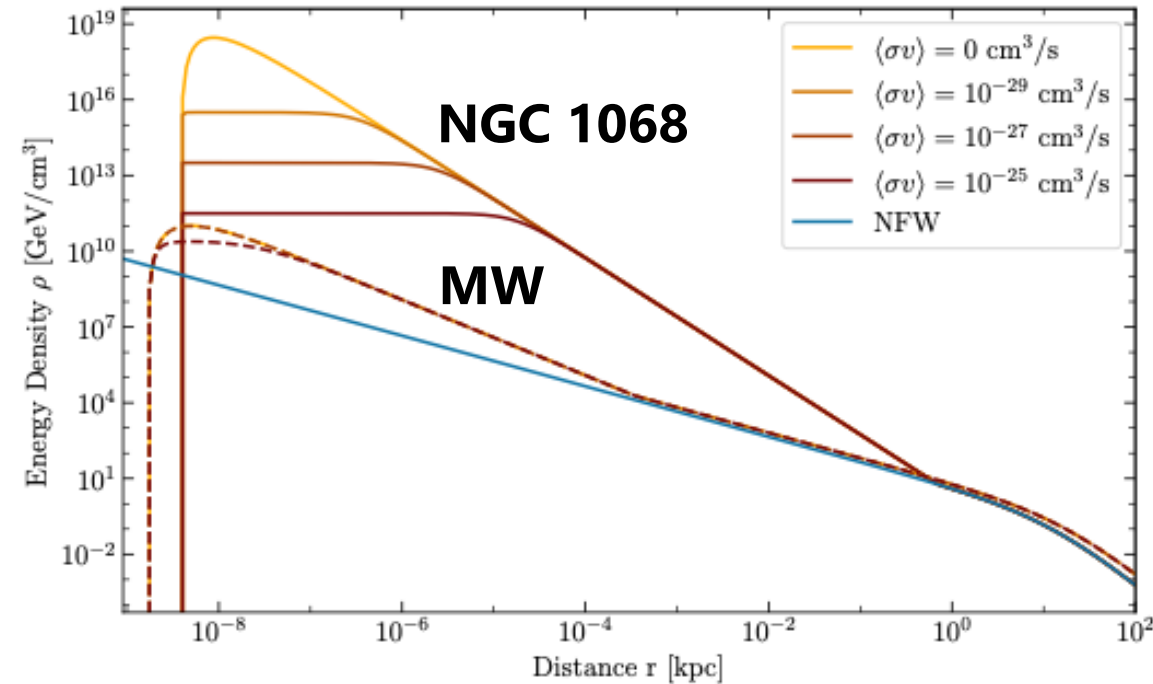
これらからはTeVエネルギーガンマ線も検出されていない。

これは標準的な生成機構とも整合している。

[IceCube Collaboration 2510.13403](#)



DM profiles of NGC 1068 and MW

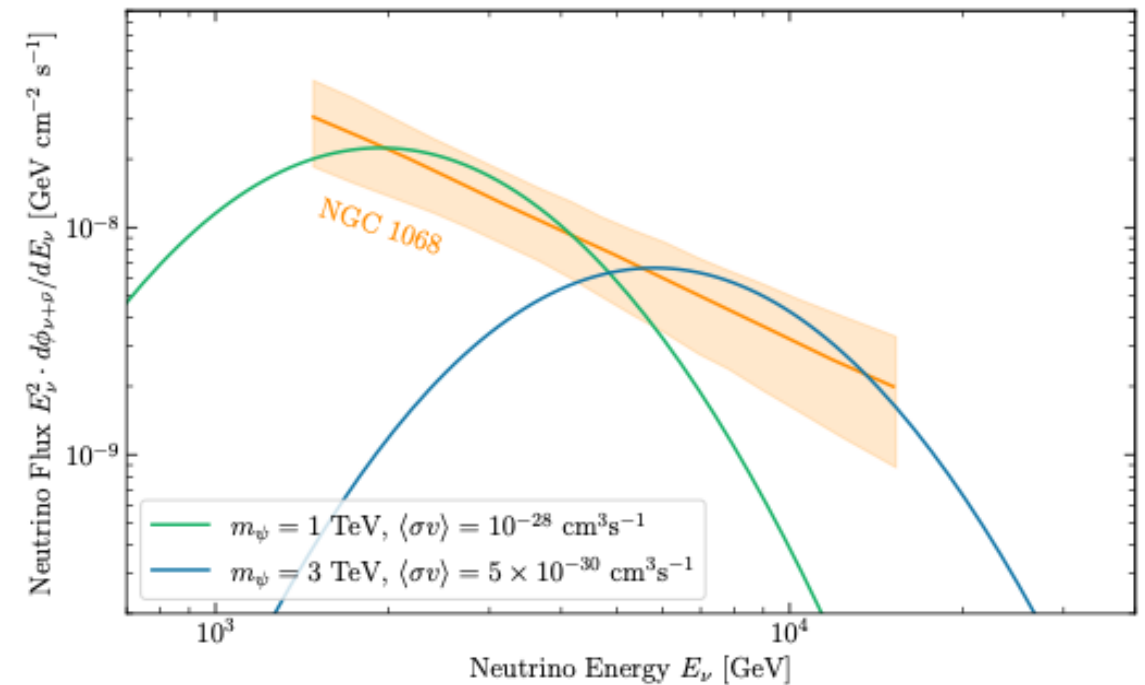
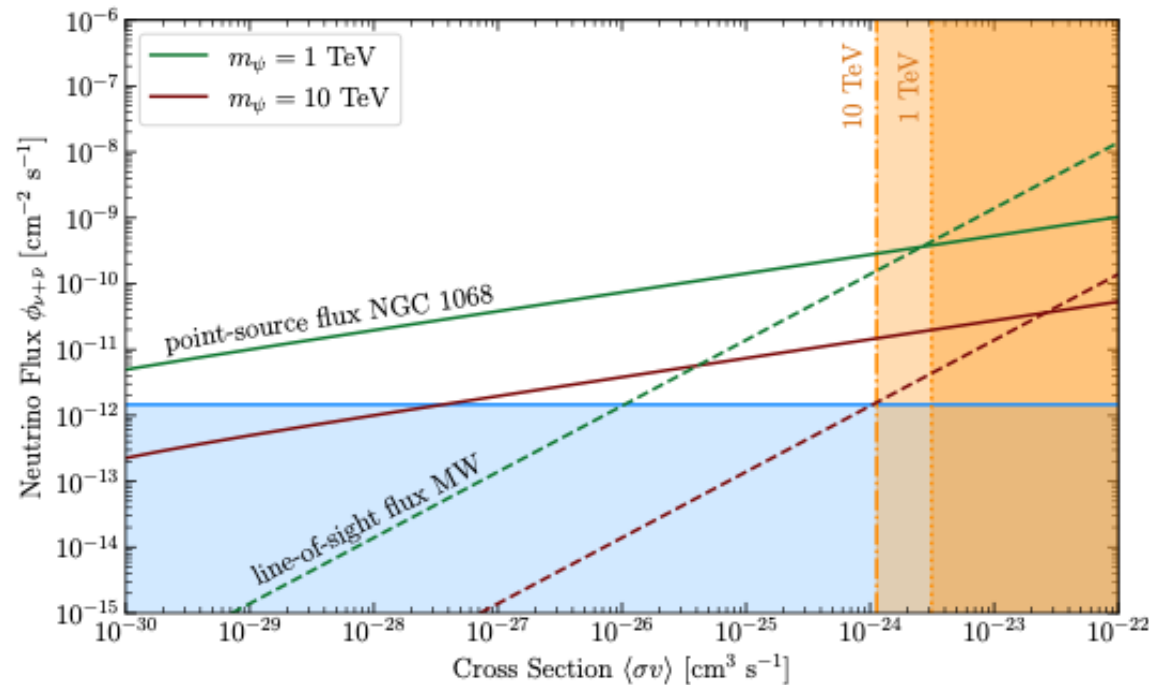


- NGC 1068銀河は(恒星加熱がなく)DM spikeを保持しており、
天の川銀河は(構成加熱があり)DM spikeを保持していないと仮定.
- NGC 1068の暗黒物質密度は天の川銀河のものよりずっと大きい。

*NGC 1068 spikeにおいて、最大限の可能性を考えるため、楽観的な規格化をしている。

$$4\pi \int_0^{r_h} dr \, r^2 \rho_{\text{sp}}(r) \approx M_{\text{BH}} \quad r_h = \frac{GM_{\text{BH}}}{\sigma_*^2} : \text{the BH influence radius}$$

Neutrino flux



- NGC 1068 spikeでの暗黒物質対消滅によって観測されたニュートリノを説明できる。
- 天の川銀河からのニュートリノは抑制。
- 必要な対消滅率は大雑把にはDMの熱的フリーズアウト生成に必要なものと整合。

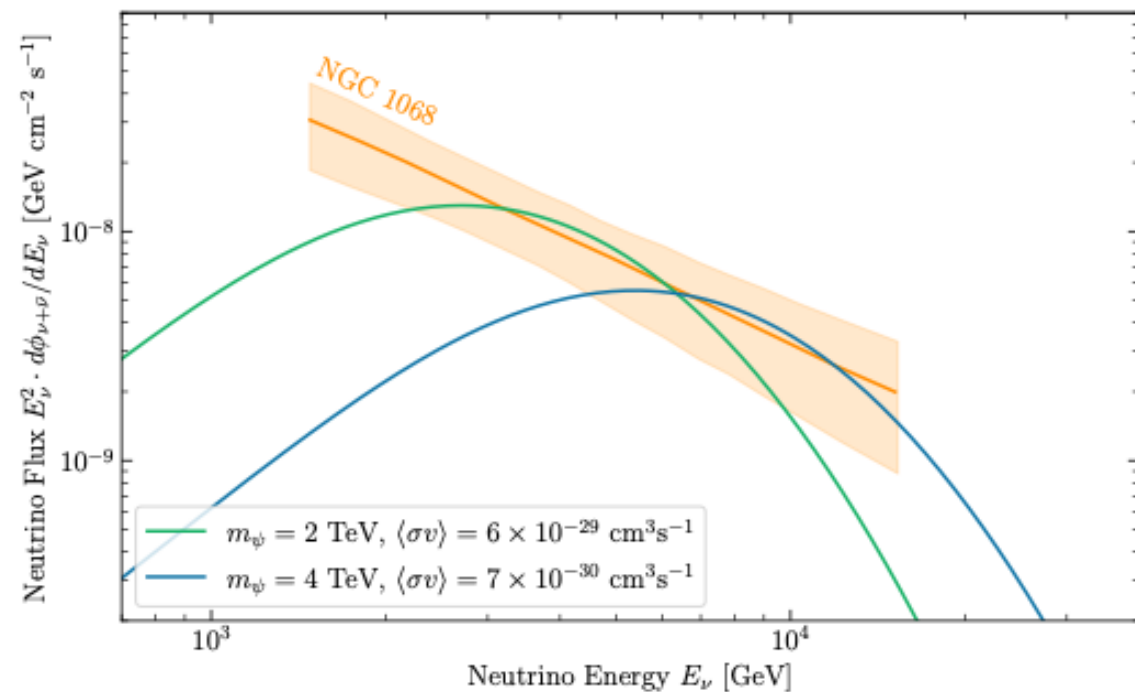
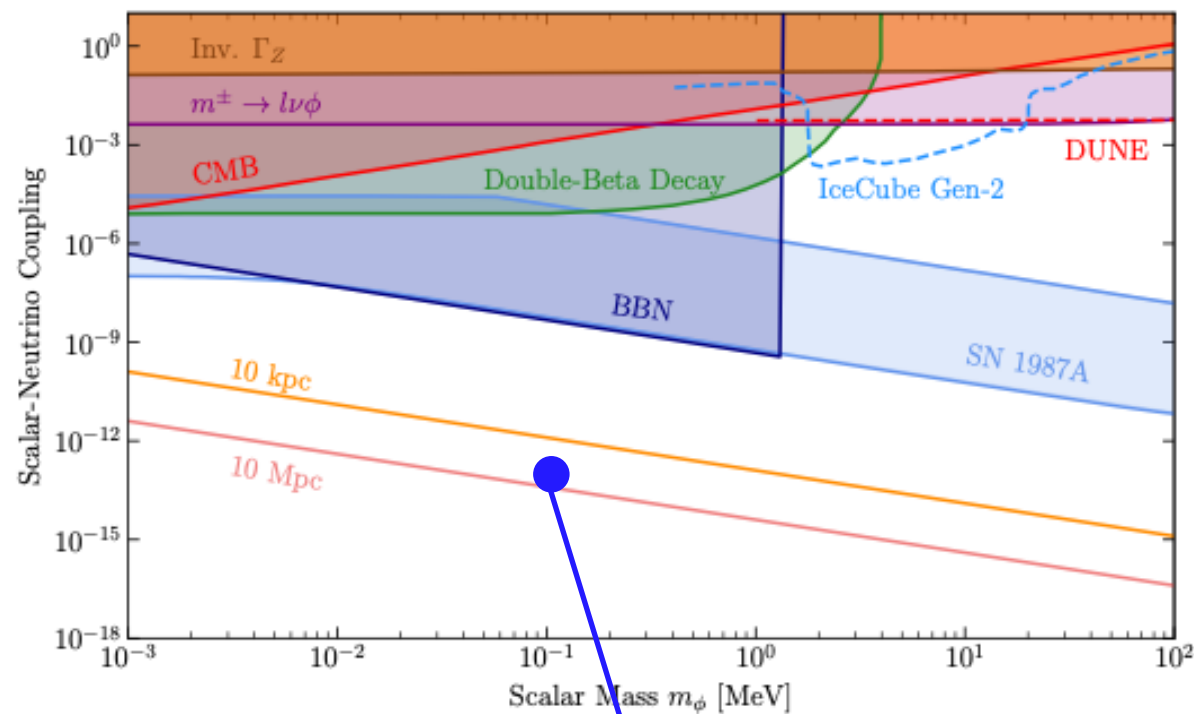
$$\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

素粒子模型における展望

- 暗黒物質は主にニュートリノに対消滅するべきだろう。
- 単純な可能性はレプトン数1を持つ非対称性暗黒物質かもしれない。
- $\text{DM DM} \rightarrow \nu\nu$ は許されるが、 $\text{DM DM} \rightarrow e^+e^+$ は電気的中性から禁止される。
- 暗黒物質は高次の寄与($\text{DM DM} \rightarrow \nu\nu Z \rightarrow \dots$)で $e^\pm/\gamma$ を生成するかもしれない。
しかし、対消滅は銀河の内側の**spike**で起こり、 $e^\pm/\gamma$ は散乱しエネルギーを失うかもしれない。

詳細は今後の課題です。

追加の別の説明



- $m_\phi = 100 \text{ keV}$ and $g = 10^{-12}$ の場合を考える。
- 全ての制限と整合し、このシナリオはNGC 1068 neutrino fluxを説明可能。

まとめ

- NGC 1068銀河からのニュートリノは暗黒物質の対消滅由来かもしれない。
- もしNGC 1068銀河が(恒星加熱がなく)DM spikeを持ち、天の川銀河が(恒星加熱のため)spikeを持たないなら、暗黒物質対消滅はNGC 1068 neutrino fluxを天の川銀河方向から同様のneutrinoを超過せずに説明できる。
- 必要な対消滅率は $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 10^{-29} \text{ cm}^3/\text{s}$ であり、大雑把には、暗黒物質の熱的フリーズアウト生成に必要なものと一致、 $\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。
- 将来、他の活動銀河からのニュートリノ観測により検証が進むかもしれない。

ご清聴ありがとうございます