

# 暗黒物質研究の最前線

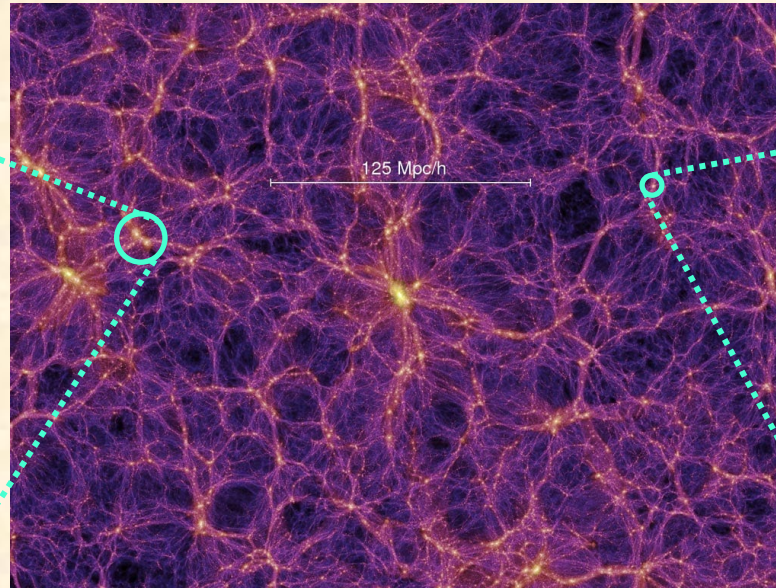
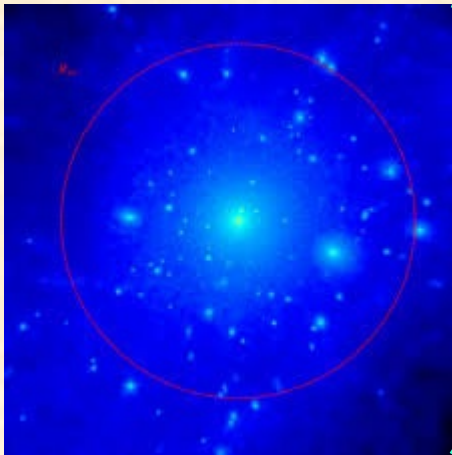
松本 重貴 (Kavli IPMU)

- ✓ 宇宙の暗黒物質問題、これまで得られた知見
- ✓ 高エネルギーガンマ線で探る暗黒物質の正体

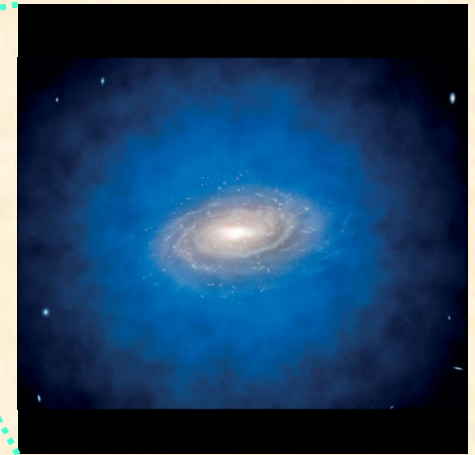
# 宇宙の暗黒物質問題(分かっている事・いない事)

- 我々の宇宙に、暗黒物質と呼ぶべき存在があることは分かっている！  
→ 『フロンティア 最新報告 ダークマターの正体』@ NHK
- 暗黒物質が、現在の宇宙でどう分布しているのか、も分かっている！  
→ 『コスミックフロント ～ダークマターを探せ！～』@ NHK

銀河団



銀河



- 暗黒物質の正体(個々の質量等の微視的特徴)は、分かっていない！  
→ 宇宙の暗黒物質問題(今回のトピック。答えはまだ出ていない。)

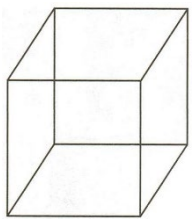
# 宇宙の暗黒物質問題(分かっている事・いない事)

- ✓ 光と“殆ど”反応せず。
- ✓ 通常物質とも殆ど反応せず。
- ✓ 自分同士の反応も確認されず。
- ✓ 十分に安定な物質である。
- ✓ 非相対論的な運動をしている。
- ✓ 平均質量密度は  $10^{-30} \text{ g/cm}^3$ 。



“暗黒”というより“透明”!!

現在暗黒物質は重力源としてのみその存在が確定しているため、質量密度が測定されている。



暗黒物質が1gの物質なら  $(10 \text{万 km})^3$  に一個の割合。

暗黒物質が陽子質量を持つと、  $(1 \text{ m})^3$  に一個の割合。

現在の宇宙において、暗黒物質が持つ典型的なスピードは

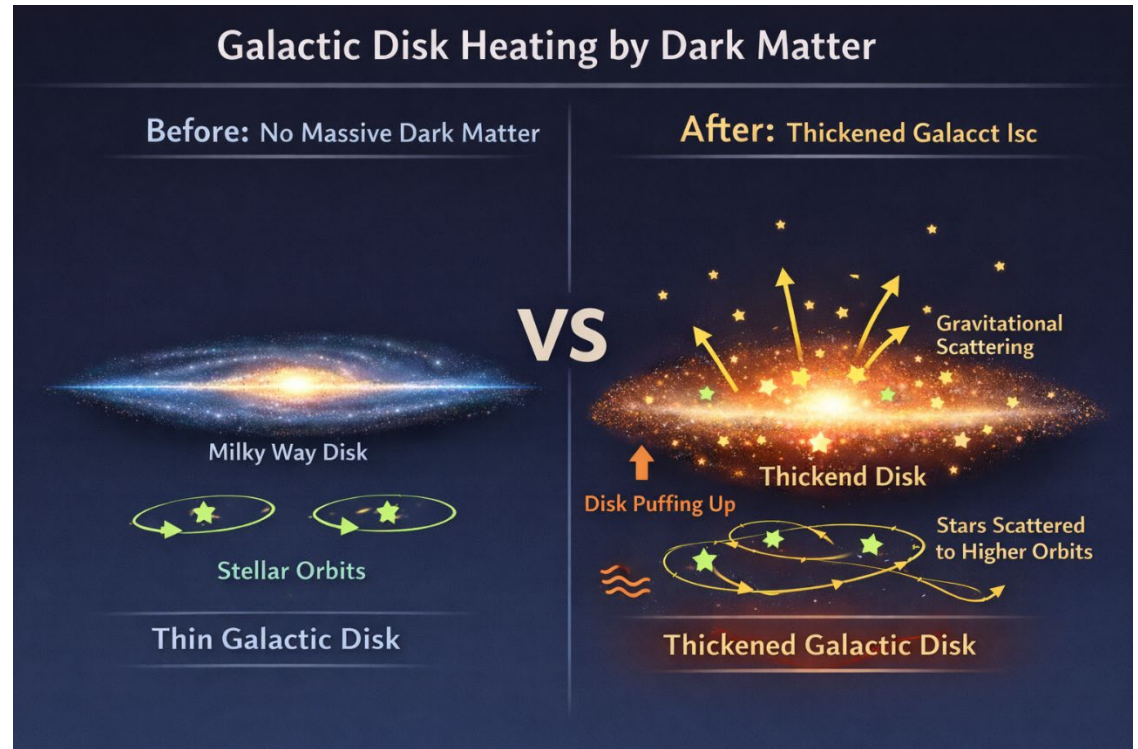
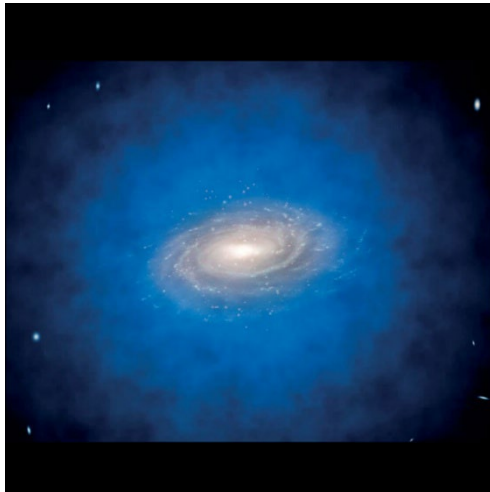
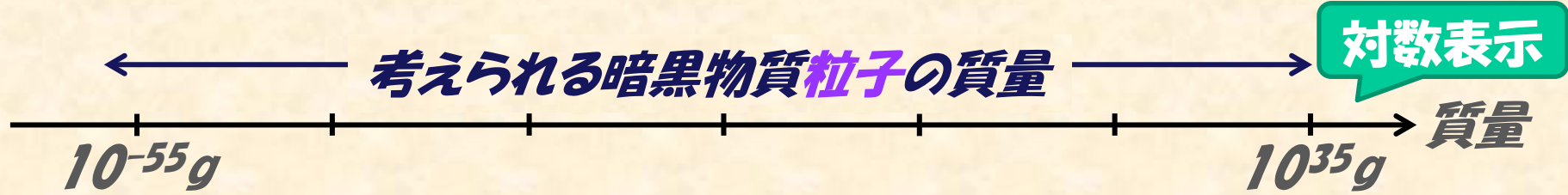
**30-300 km/s**

~ 時速10万-100万 km

これは光速と比べ十分に小さい!

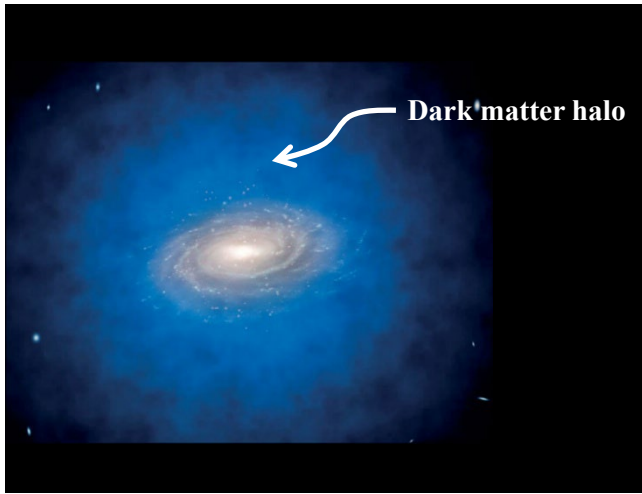
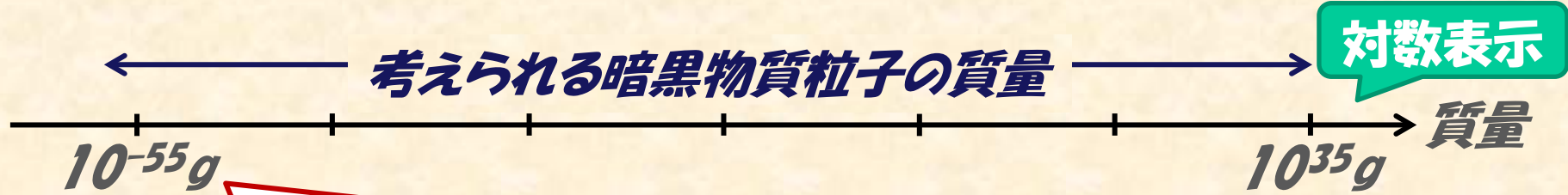
運動エネルギー ≪ 質量エネルギー

# 宇宙の暗黒物質問題(分かっている事・いない事)



**非常に重い暗黒物質によって、星系円盤の過熱が生じていない！**  
**→ 暗黒物質の質量が $10^{35}g$ を超える可能性は考えなくてよい！！**

# 宇宙の暗黒物質問題(分かっている事・いない事)

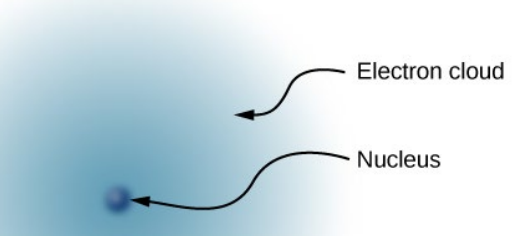


Dark matter halo

量子力学的類似性



水素原子



Electron cloud

Nucleus

暗黒物質間の重力による束縛状態

電子陽子間の電磁気力による束縛状態

量子力学の観点から、あらゆる束縛系には下限となる大きさが存在する。

→ 束縛系の大きさ > ドブROI波長 = プランク定数 / (質量 × 速さ)

一方、銀河の星等の観測からハローサイズや速さ(圧力)は分かっている。

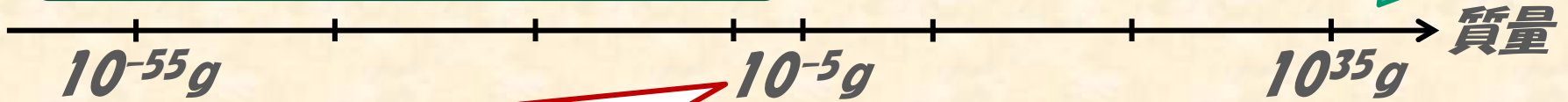
→ ハローサイズ > ドブROI波長 → 暗黒物質質量の下限が求まる。

# 様々な暗黒物質候補と $\gamma$ 線観測を用いた探査

広い質量領域は三つに分かれる

巨視的暗黒物質

対数表示

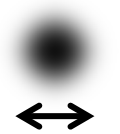


## ブラックホール



素粒子の古典的描像

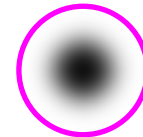
素粒子の量子的描像



$$\text{コンプトン波長} = \text{プランク定数} / \text{質量}$$



シュバルツシルト半径



→ ブラックホール

→ ブラックホール

→ 素粒子のまま

シュバルツシルト半径  $\gg$  コンプトン波長では、もはや素粒子ではない!

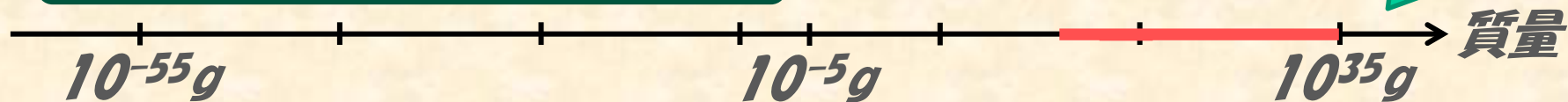
→  $10^{-5}g$ 以上の質量をもつ暗黒物質は、巨視的な物体である。

# 様々な暗黒物質候補と $\gamma$ 線観測を用いた探査

広い質量領域は三つに分かれる

巨視的暗黒物質

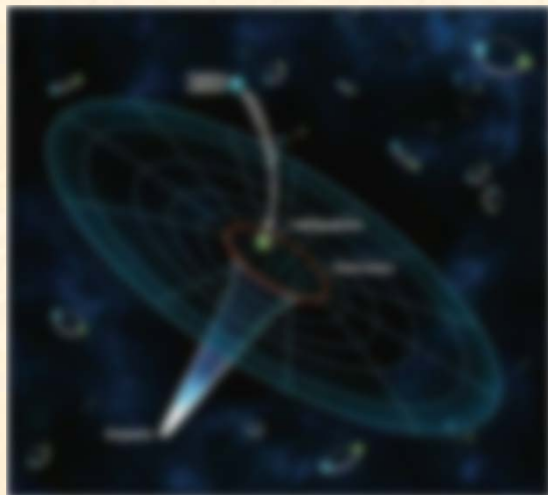
対数表示



## ○ 有力な巨視的暗黒物質候補

### 原始ブラックホール (pBH)

星や銀河などの天体が形成される以前に生成されたブラックホール。  
可能な質量範囲は $10^{14}-10^{35}g$ 。



## ○ 原始ブラックホールをどのように探査する？

### ホーキング輻射によるブラックホールの蒸発

ブラックホールの温度:  $T = 0.1 \text{ GeV} (10^{14} \text{ g} / M_{\text{BH}})$ 。

ブラックホールの寿命:  $\tau = 10^{10} \text{ 年} (M_{\text{BH}} / \text{''})^3$ 。

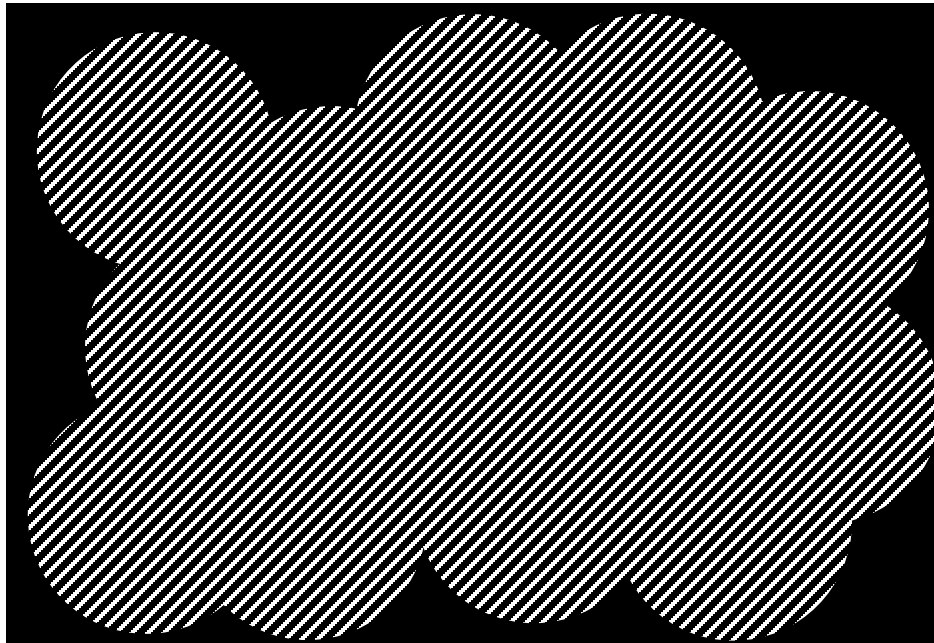
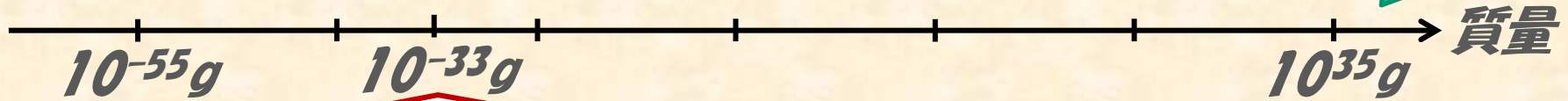
高エネルギー $\gamma$ 線観測  $\rightarrow M_{\text{BH}} > 10^{17} \text{ g}$ の制限!

# 様々な暗黒物質候補と $\gamma$ 線観測を用いた探査

波動的暗黒物質

巨視的暗黒物質

対数表示



✓ ドブROI波長  $\propto 1 / (\text{質量} \times \text{速さ})$

✓ 暗黒物質の数密度  $\propto 1 / (\text{質量})$



暗黒物質間の距離  $\propto (\text{質量})^{1/3}$

質量がある程度以上大きい場合、暗黒物質どうしの平均距離はドブROI波長より十分に大きい。一方、質量が小さくなると、その関係は逆転する。

運動する粒子 = ドブROI波長を持つ波

ドブROI波長  $\gg$  暗黒物質間の平均距離では、粒子的描像は破綻する。

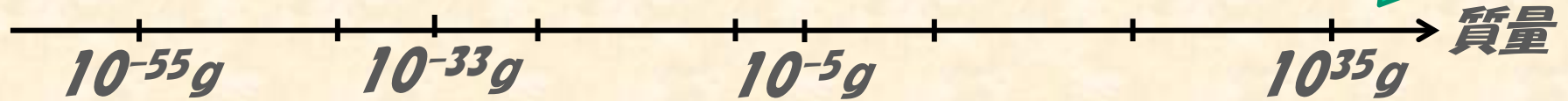
→  $10^{-33}g$ 以下の暗黒物質は、系全体として波のように振る舞う。

# 様々な暗黒物質候補と $\gamma$ 線観測を用いた探査

← 波動的暗黒物質 →

← 巨視的暗黒物質 →

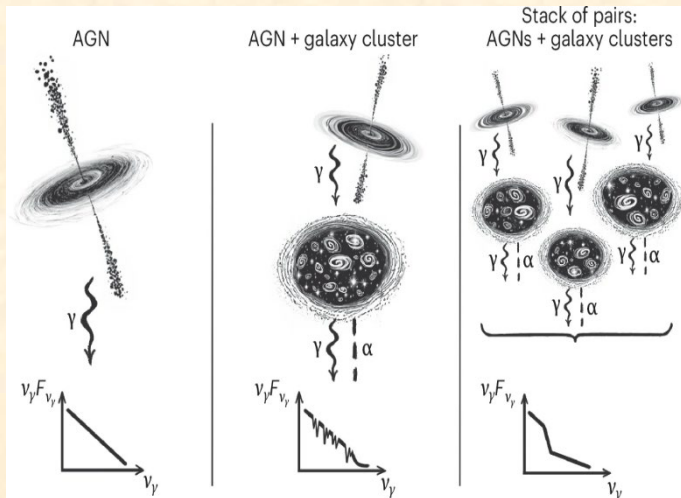
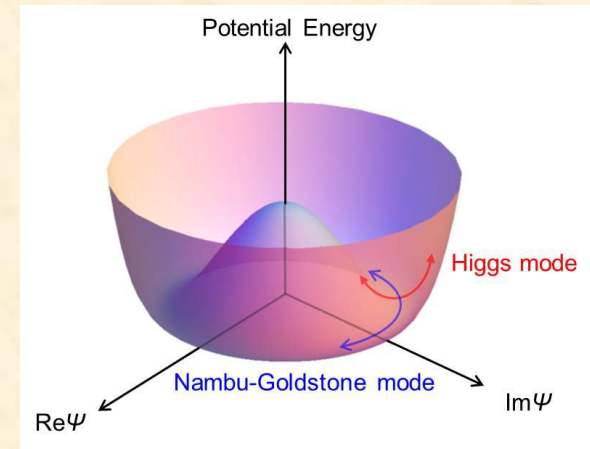
対数表示



## ○ 有力な波動的(場的)暗黒物質候補

アクシオン、アクシオン様粒子 (ALP)

(擬)南部・ゴールドストーン粒子の一つ。真空の相転移に伴い現れ、強い相互作用のCP問題(粒子と反粒子問題)に関連して導入された粒子。



## ○ 波動的粒子(ALP)をどのように探査する？

暗黒物質場中を伝搬するガンマ線の変化

磁場中で、ALPとガンマ線はエネルギーや磁場強度に応じて相互変換する。

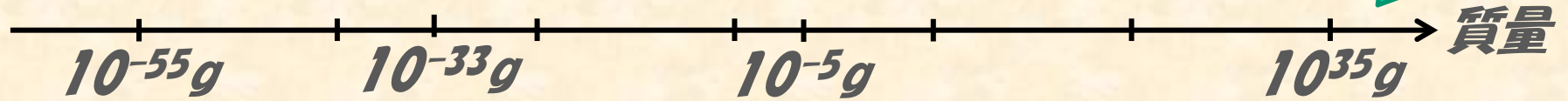
例) 活動銀河核と銀河団のペア観測で探査。

# 様々な暗黒物質候補と $\gamma$ 線観測を用いた探査

波動的暗黒物質   粒子的暗黒物質

巨視的暗黒物質

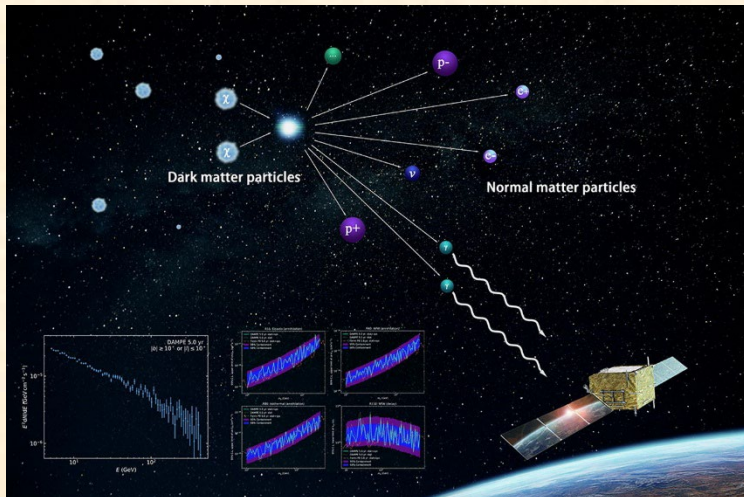
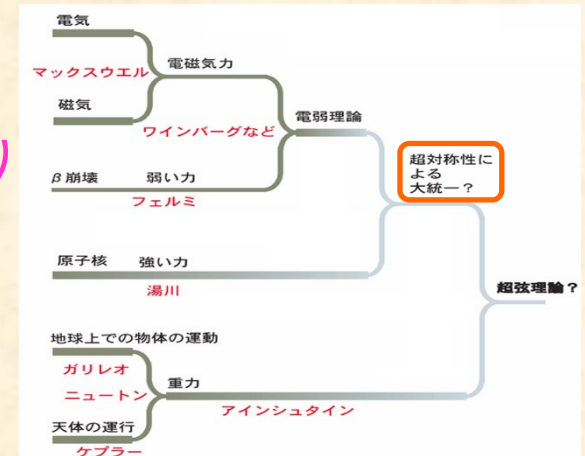
対数表示



## ○ 有力な粒子的暗黒物質候補

*Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)*

大統一理論や超対称性理論などで導入される、安定で中性の重い新粒子。現代宇宙論の成功を支える凍結機構により、初期宇宙で生成される。



## ○ WIMPをどのように探査する？

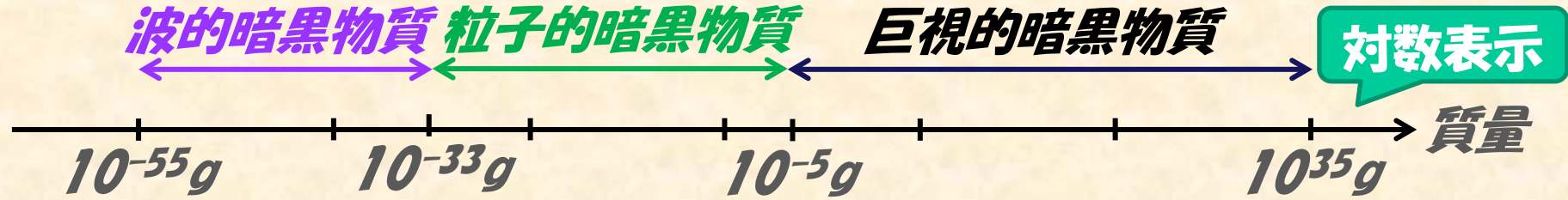
WIMP対消滅で生じるガンマ線の観測

WIMP質量の(殆ど)全てが、対消滅で生じるガンマ線に変換されるため、非常に高エネルギーのガンマ線が生じる。

銀河中心領域の高エネルギー $\gamma$ 線観測

# まとめ

暗黒物質の理論研究の最前線についてお話しさせていただきました！



暗黒物質として探査すべき質量領域は、 $10^{-55}g$ から $10^{35}g$ に及ぶ非常に広大なものですが、有限の範囲に収まってもいます。この広大な質量領域は、**波動的暗黒物質**、**粒子的暗黒物質**、**巨視的暗黒物質**の三つの領域に大別され、それぞれの領域で精力的に研究が進められています。

各質量領域で有力な暗黒物質候補が提案され、例えば、**波動的領域**では**ALP**、**粒子的領域**では**WIMP**、**巨視的領域**では**pBH**が挙げられます。**高エネルギー $\gamma$ 線観測**は、これらの検証に重要な役割を果たしています。

暗黒物質探査は、**ガンマ線観測**に加えて、**原子核・結晶・化学化合物との散乱を標的とする地下実験**、**高エネルギー加速器実験**、**光学・分光天文観測**、**原子時計などを用いた精密測定**等、学際的に発展しています。

# 画像出典一覧

「暗黒物質研究の最前線」講演資料

#	SLIDE	画像 / 出典
1	1	<b>Abell 1689 銀河団</b> — NASA, ESA, N. Benitez et al., ACS Science Team (Hubble/ACS, 2002) <a href="http://hubblesite.org">hubblesite.org</a>
2	2	<b>Millennium Simulation (宇宙の大規模構造)</b> — V. Springel and the Virgo Consortium, MPA / Springel V. et al. (2005) Nature, 435, 629 <a href="http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium">wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium</a>
3	2	<b>N 体シミュレーションによるダークマター分布</b> — Ling, F.-S. et al. (2010) JCAP 掲載図 <a href="http://researchgate.net/publication/45871977">researchgate.net/publication/45871977</a>
4	2	<b>天の川銀河と予想されるダークマターハロー分布</b> — ESO / L. Calçada (eso1217a, 2012) <a href="http://eso.org/public/images/eso1217a">eso.org/public/images/eso1217a</a>
5	4, 5	<b>同上 (#4 と同系統のハロー分布図)</b> — ESO / L. Calçada <a href="http://eso.org/public/images/eso1217a">eso.org/public/images/eso1217a</a>
6	4	<b>銀河円盤加熱の概念図 (Before / After)</b> — 講演者作成 (生成 AI: ChatGPT / DALL·E による概念イラスト。実データ由来ではありません)
7	5	<b>原子の模式図 (電子雲と原子核)</b> — OpenStax / LibreTexts, University Physics <a href="http://phys.libretexts.org/.../1.02:_Electric_Charge">phys.libretexts.org/.../1.02:_Electric_Charge</a>
8	6	<b>ブラックホールの直接撮像</b> — Event Horizon Telescope Collaboration (2019) <a href="http://newsweek.com/event-horizon-telescope-groundbreaking-announcement-1382918">newsweek.com/event-horizon-telescope-groundbreaking-announcement-1382918</a>
9	7	<b>原始ブラックホールのイメージ図</b> — techno-science.net (掲載元に作者記載なし) <a href="http://techno-science.net/en/.../N27204">techno-science.net/en/.../N27204</a>
10	7	<b>ブラックホール周辺の時空構造イラスト</b> — Astronomy.com (© Kalmbach Media) <a href="http://astronomy.com/science/do-black-holes-exist-forever">astronomy.com/science/do-black-holes-exist-forever</a>
11	9	<b>メキシカンハット型ポテンシャル</b> — 松永研究室 (東京大学物性研究所) <a href="http://matsunaga.issp.u-tokyo.ac.jp/researchOld.html">matsunaga.issp.u-tokyo.ac.jp/researchOld.html</a>
12	9	<b>AGN・銀河団スタック解析による観測例</b> — Nature Astronomy (2025) <a href="http://nature.com/articles/s41550-025-02621-8">nature.com/articles/s41550-025-02621-8</a>
13	10	<b>素粒子・力の系統図</b> — 東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) <a href="http://icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/overview/purpose.html">icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/overview/purpose.html</a>
14	10	<b>暗黒物質直接探索実験の概観</b> — Science Bulletin (Elsevier) <a href="http://sciencedirect.com/.../S2095927321007672">sciencedirect.com/.../S2095927321007672</a>