

～先端物理学特論～
地下実験とガンマ線で迫る
暗黒物質の謎

奥村 暁^{1, 2}

¹宇宙地球環境研究所 宇宙線研究部

²素粒子宇宙起源研究所 現象解析研究部門
(宇宙線物理学研究室 / CR 研)

2020年7月14日

質問する奴は偉い

https://twitter.com/motcho_tw/status/870589211832795136

質問する奴は偉い

1. 初めに質問する奴は偉い
 - 次の人が続きやすくなる
2. 馬鹿な質問をする奴は偉い
 - 質問の内容のハードルを下げる
3. 関係ない質問をする奴は偉い
 - 話が広がる



質問について

- ❖ 皆さんは研究者の卵です（かもしれない）
 - ▶ 何かを疑問に思うことは大切です
 - ▶ 疑問のまま放置しないことも大切です
 - ▶ **何か質問があれば、気軽に、積極的に質問してください**
 - ※ Zoom の「手を挙げる」機能がチャットで
- ❖ あなたが分からないことは、周りの人も分かりません（教員の説明が悪いかも）
- ❖ あなたが質問すると、他の全員の理解の助けになります
- ❖ 質問で講義を止めることは、迷惑行為ではありません
- ❖ 疑問→質問→答え の習性がつくと物理や世界はもっと面白くなります
 - ※ 世界の誰にも答えられない疑問があれば、物理学者になろう
- ❖ この Zoom は 18 時まで開きっぱなしにするので、あとで質問してもらっても大丈夫です（去年の対面講義では 30 分くらい雑談しました）
- ❖ さらに質問があれば、oxon@mac.com まで
- ❖ 本日の講義中に（質問のための質問ではない）質問をした学生は、**レポートに加点**します

宇宙素粒子物理学 (Astroparticle Physics)

- 宇宙素粒子物理学とは？
 - ▶ 宇宙観測から素粒子を調べる
 - ▶ 素粒子検出・素粒子的性質から宇宙を調べる
- 日本では「**宇宙線物理学** (cosmic-ray physics)」の研究分野がこれに重なる
 - ▶ 宇宙線 (陽子や電子)・ガンマ線・ニュートリノなど
 - ▶ 宇宙線は観測対象でもあり、手段でもある
 - ▶ **宇宙も素粒子も興味のある**欲張りな学生向き (個人的経験)
 - ▶ 名大物理では**宇宙線物理学研究室 (CR 研)**

宇宙線物理学研究室 (CR研)

教員 10 名 + 院生 16 名
+ 4 年生 6 名の大所帯



毛受

奥村

佐藤

田島

松原

山岡

山下

風間

三宅

伊藤

より詳しい情報



The screenshot shows the website for the Cosmic Ray (CR) research group at Nagoya University. The browser address bar displays "Not Secure - www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/". The website header includes navigation links for Home, CR research, Research, Graduate School, Members, News, Contact, and English. The main banner features a cosmic scene with a large geodesic dome structure. Below the banner, there are sections for "New News" and "About the CR Research Group".

新着記事

陽子衝突でのスピ左右非対称性 π^0 中間子生成を発見 (2020年6月23日)

 RHIC実験が、RHIC加速器の陽子陽子衝突での超前方方向でのパイゼロ中間子生成量に陽子スピ方向に対する非対称性の測定結果を発表しました。測定された非対称性は予想よりも大きく、この結果から高エネルギー衝突での粒子生成に関する新たな知見が得られることが期待されます。

山崎里奈さん、UGAP2020にて優秀発表賞に選出 (2020年6月8日)

 博士前期課程2年の山崎里奈さんが、新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」2020年度オンライン領域研究会の発表で、優秀発表賞に選出されました。

CTAの試作望遠鏡 pSCT が「かに」星雲からのガンマ線検出に成功 (2020年6月2日)

 CTA中口径望遠鏡の試作望遠鏡 (pSCT) がガンマ線による「かに」星雲の検出に成功しました。

宇宙線物理学研究室 (CR研) について

名古屋大学宇宙地球環境研究所の宇宙線研究部は、大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻の宇宙線物理学研究室 (通称: 宇宙線研究室、CR研) として大学院生を受け入れています。実験と観測による宇宙線物理学の研究を軸として、素粒子物理学、太陽物理、系外惑星探査、宇宙線による地球環境への影響、ガンマ線天文学と、その研究テーマは多岐にわたります。

研究室の詳細は「[CR研について](#)」をご覧ください。また大学院入試の案内は「[大学院案内](#)」をご覧ください。

<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/>



宇宙地球環境研究所 (ISEE) の紹介



- Institute for Space-Earth Environmental Research (アイシー ISEE)
- 名古屋大学の附置研究所のひとつ (2015 年に開所)
- 基礎研究部門のうち、**宇宙線研究部**は物理学教室の宇宙線物理学研究室 (**CR 研**) として 4 年生と大学院生を受け入れ
- CR 研では複数の宇宙線実験プロジェクトを行なっている
 - ▶ CTA、Fermi 衛星、LHCf/RHICf、SK/HK、XMASS/XENONnT、太陽中性子望遠鏡、屋久杉 (^{14}C)、などを幅広く (教員 10 名)
 - ▶ <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/>
- 宇宙や素粒子に興味のある人はぜひ遊びに来てください

素粒子宇宙起源研究所 (KMI) の紹介



素粒子宇宙起源研究所

- Kobayashi–Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe (**KMI**)
- 名前の通り、ノーベル賞の後に 2010 年に発足
- 基礎理論研究部門（理論系）と現象解析研究部門（実験系）に 40 人超が所属（ISEE や物理学教室との兼任含む）

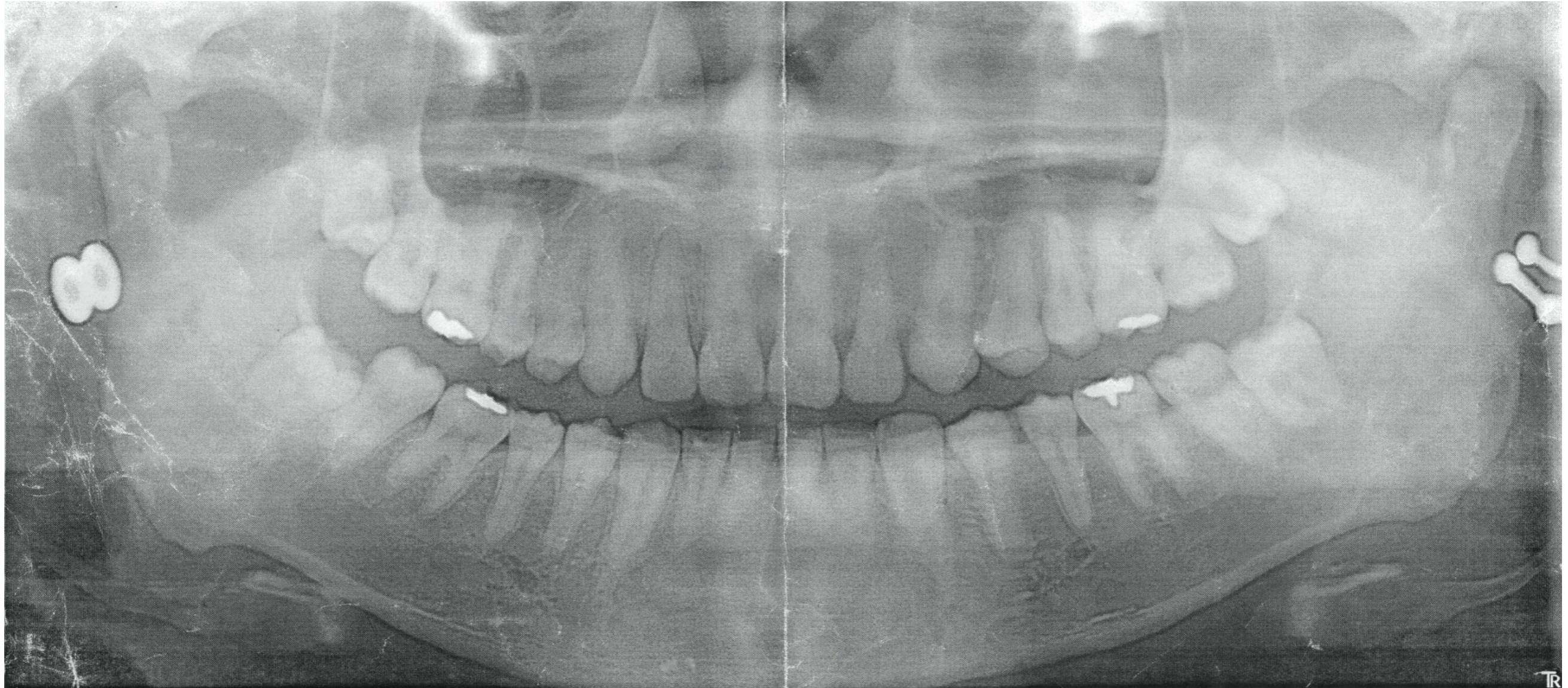


<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~okumura/files/200714DM.pdf>

可視光で観る人間



70 keV の X 線で観る人間 (の顎)

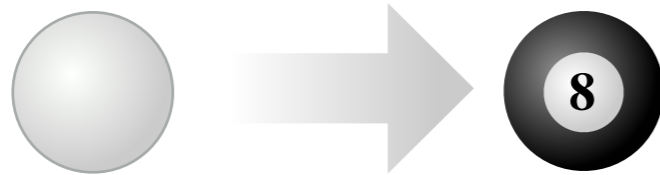


- 波長や粒子が異なると、観える世界が変わってくる
- 相互作用や衝突断面積・散乱弾面積の違い
- 今日の話は、光（電磁波）では観えない暗黒物質について

衝突断面積の大雑把な説明

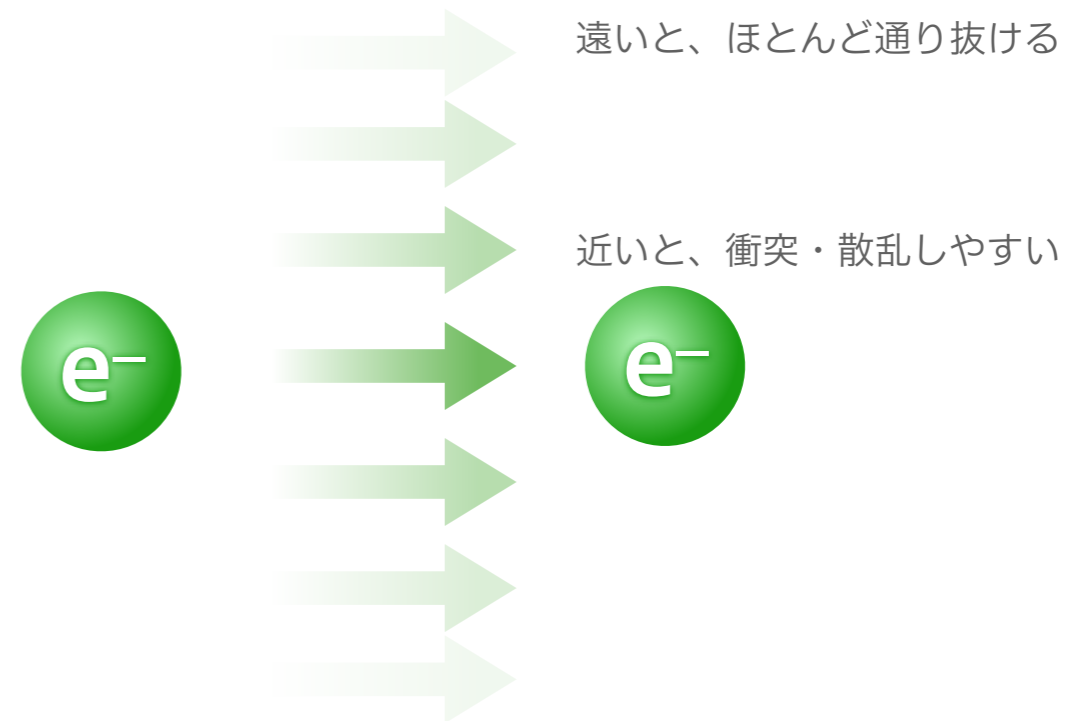
※ 粒子の波動性はこの絵に含まれていない

古典力学的な描像



幾何学的な衝突断面積 $\sigma = \pi(r + r)^2$

半古典的・量子力学的な描像

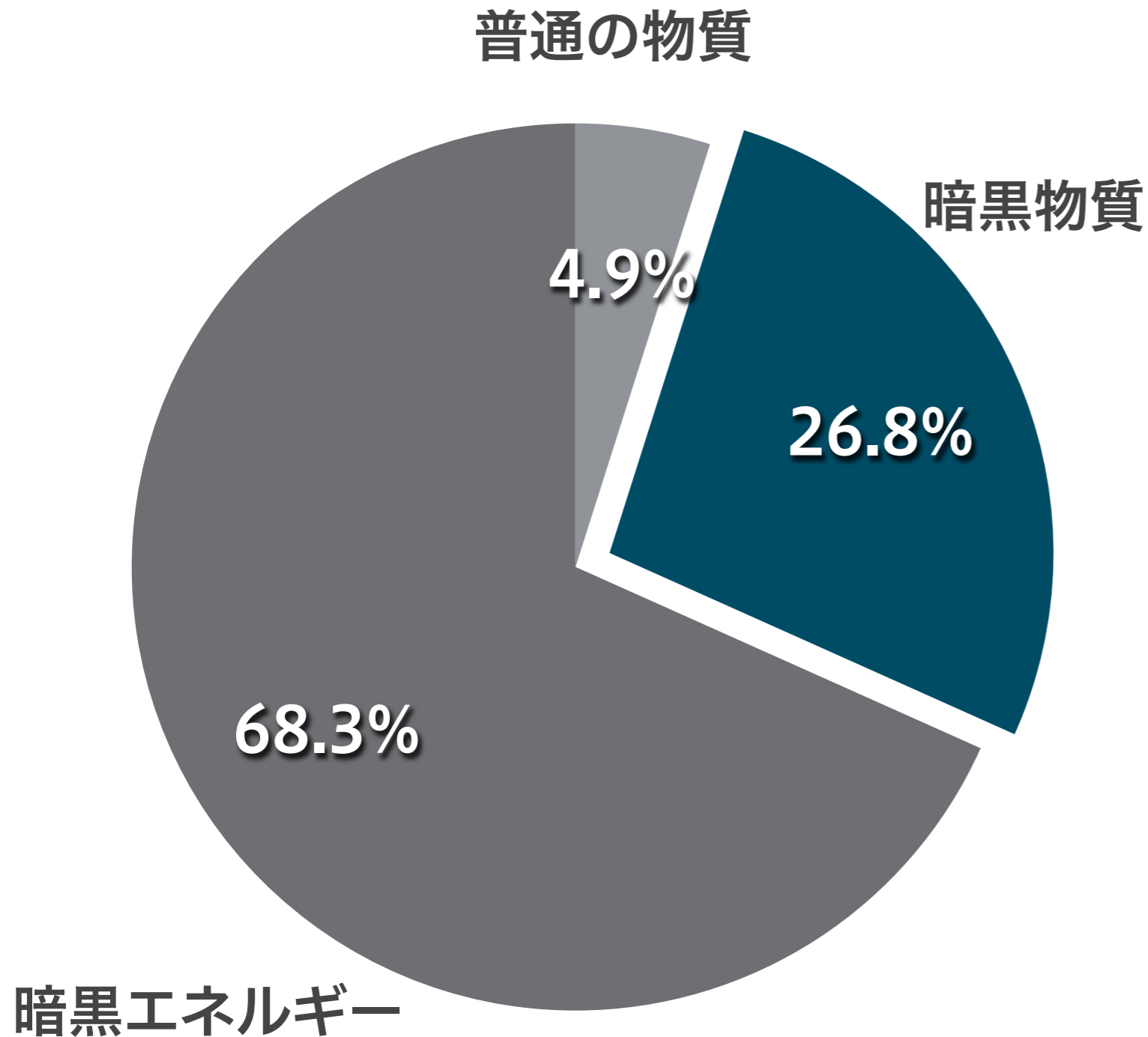


衝突・散乱する確率分布で重み付けした

実効的な衝突断面積 $\sigma = \int dr P(r) 2\pi r$

- ❖ 素粒子は大きさを持たないが互いに衝突する
- ❖ どれだけ衝突しやすいかは、相互作用の強さで決まる衝突断面積による
- ❖ 学部3年あたりの量子力学で、断面積の計算の話が出てくるはず
- ❖ ニュートリノなど、電磁相互作用しない粒子は通りぬけやすい
- ❖ 4つの相互作用：重力・電磁力・弱い力・強い力

宇宙は何からできているか？



Planck 衛星による宇宙背景放射の観測より (2013)

■ 普通の物質

- ▶ 直感的な宇宙の構成要素
- ▶ 恒星や惑星 (太陽、地球など)
- ▶ 星間ガス (水素、ヘリウムなど)
- ▶ 陽子や中性子などのバリオンと、電子などのレプトン

■ 暗黒物質

- ▶ 電磁放射をしない (= 暗黒)
- ▶ 様々な観測から存在は確実視
- ▶ 正体不明だが、多くの理論により素粒子が提案されている

■ 暗黒エネルギー

- ▶ 正体は全く不明
- ▶ 宇宙を加速膨張させる

素粒子標準模型と（普通）の物質（バリオン）

クォーク

ゲージボソン

スカラーボソン

質量
電荷
スピン

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.27 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.0 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluon

$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
0
0
H
higgs

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
photon

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
electron

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muon

$\approx 1.7769 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
0
1
Z
Z boson

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
electron neutrino

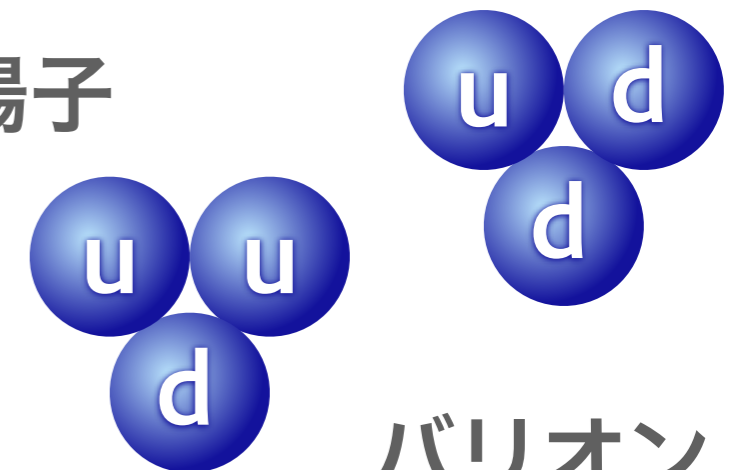
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muon neutrino

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau neutrino

$\approx 80.38 \text{ GeV}/c^2$
 ± 1
1
W
W boson

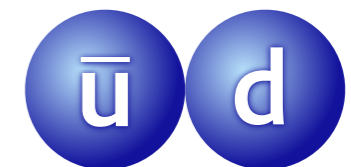
中性子

陽子



バリオン

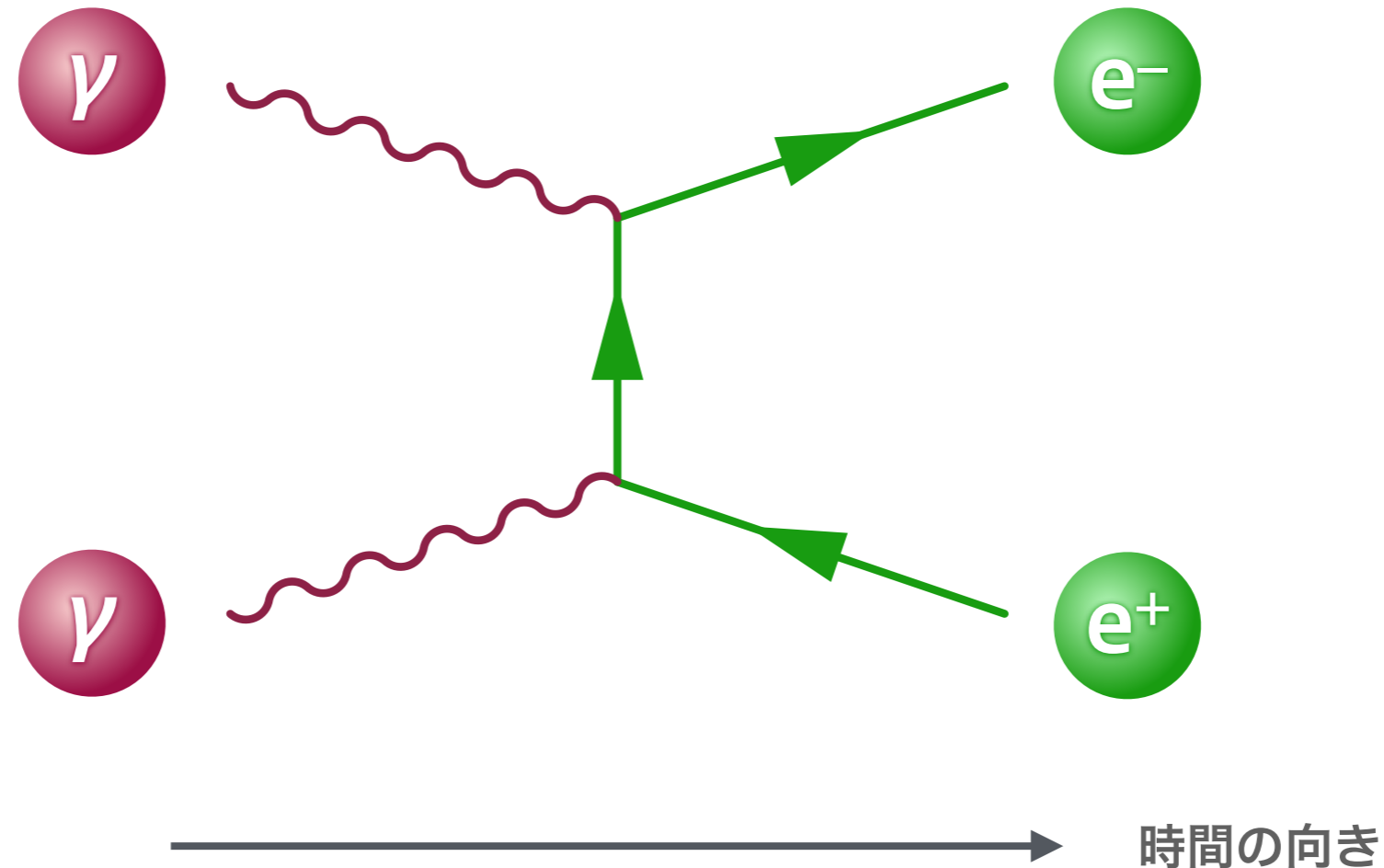
π^- 中間子



レプトン

電磁相互作用の例

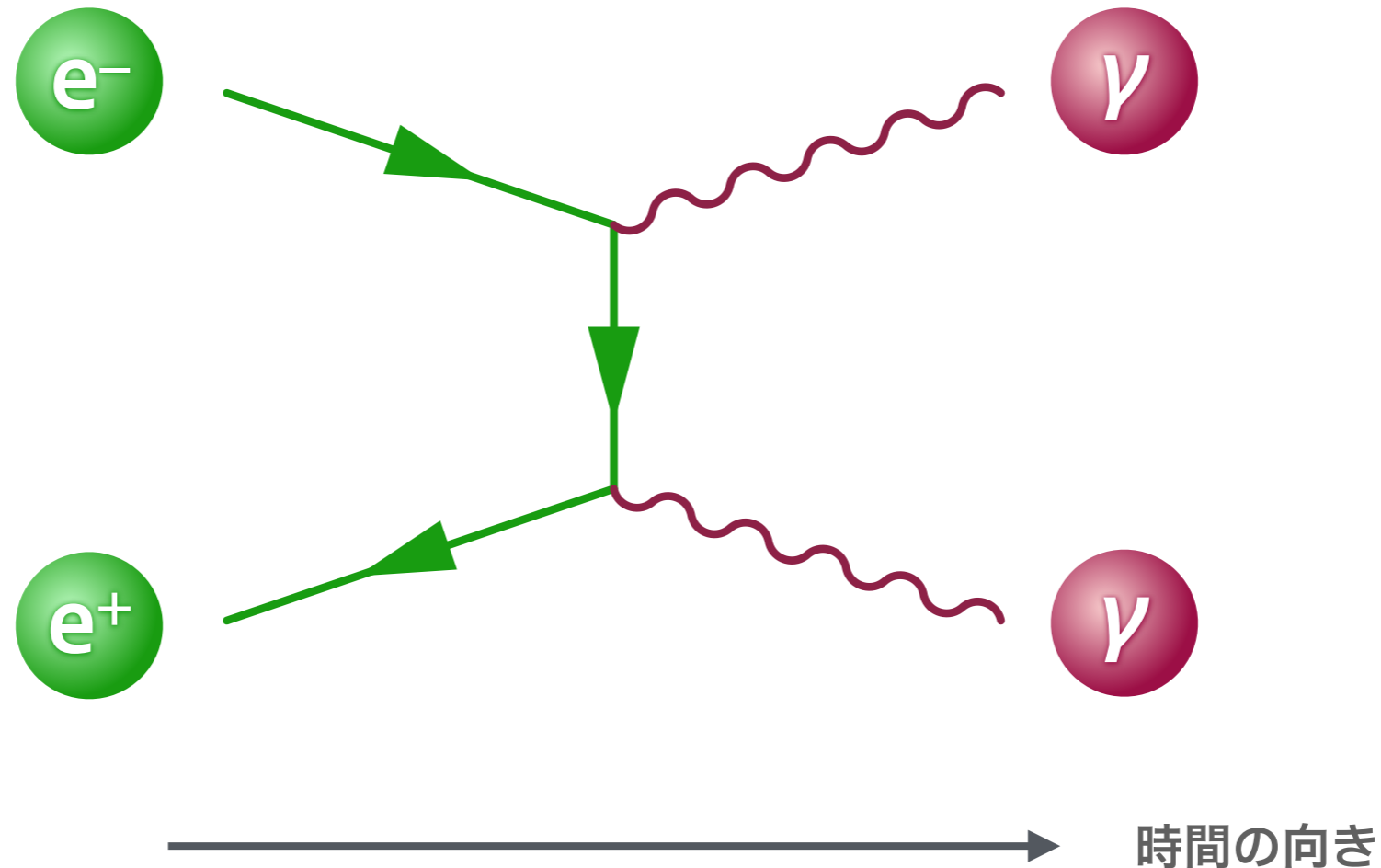
電子対生成 (pair production)



- 電荷を持つ素粒子は電磁相互作用をすることができる
- ファインマン図 (Feynman diagram) の見方によって、反応が変わる
- 光子 (photon) が媒介粒子

電磁相互作用の例

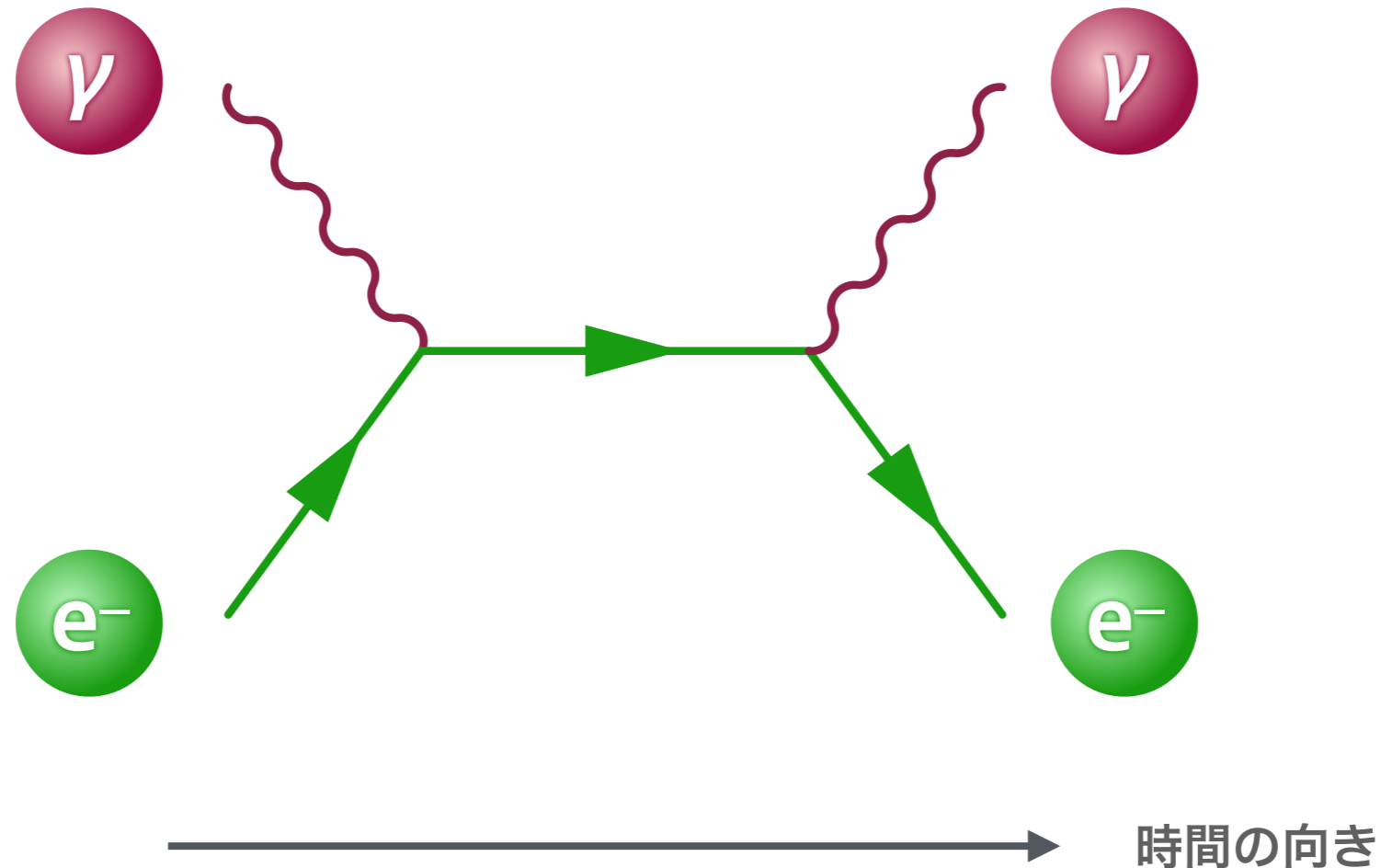
電子対消滅 (pair annihilation)



- 電荷を持つ素粒子は電磁相互作用をすることができる
- ファインマン図 (Feynman diagram) の見方によって、反応が変わる
- 光子 (photon) が媒介粒子

電磁相互作用の例

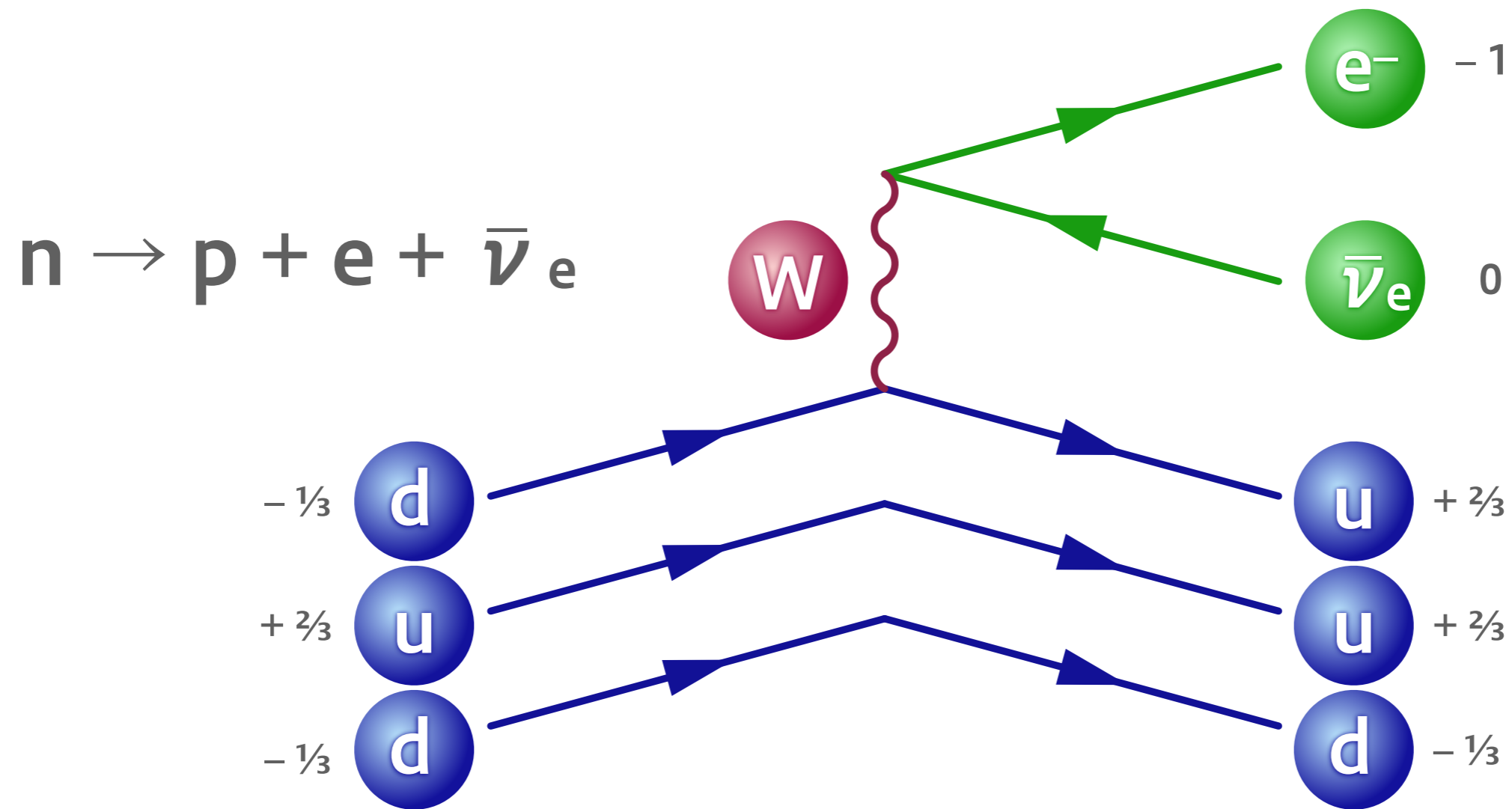
コンプトン散乱 (Compton scattering)



- 電荷を持つ素粒子は電磁相互作用をすることができる
- ファインマン図 (Feynman diagram) の見方によって、反応が変わる
- 光子 (photon) が媒介粒子

弱い相互作用の例

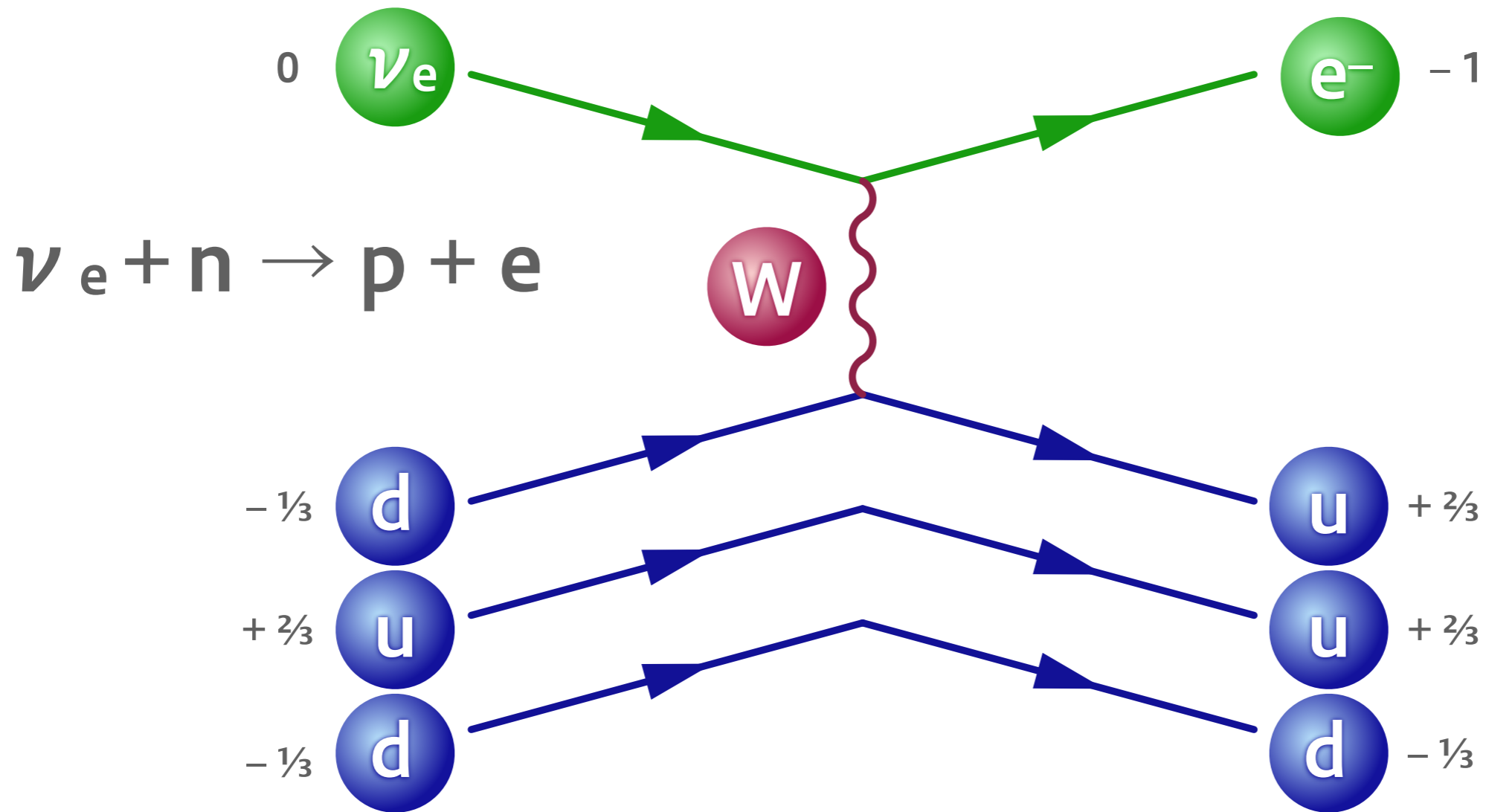
中性子の β 崩壊 (beta decay)



- ❖ 弱い相互作用は粒子の種類を変えることができる
- ❖ ニュートリノが地球をもすり抜けるのは、相互作用が弱いから
- ❖ W^\pm や Z が媒介粒子
- ❖ 相互作用が弱い = 崩壊に時間がかかる or 散乱断面積が小さい

弱い相互作用の例

電子ニュートリノの散乱(neutrino scattering)



- ❖ 弱い相互作用は粒子の種類を変えることができる
- ❖ ニュートリノが地球をもすり抜けるのは、相互作用が弱いから
- ❖ W^\pm や Z が媒介粒子
- ❖ 相互作用が弱い = 崩壊に時間がかかる or 散乱断面積が小さい

課題 1

- パイマイナス中間子 (π^-) が電子 (e^-) と反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) に崩壊するファインマン図を描いてみよ
※写真を送れない学生は、文章で図の概略を説明せよ
- ヒント
 - ▶ π^- は p14 を見よ
 - ▶ p19 の時間の進行方向を変えると π^- はどこに現れるか考えよ
 - ▶ 色々と進行方向を変えても良いことは、p15-17 を参照せよ
- 注意
 - ▶ 実際には π^- の崩壊のほとんどは μ^- と $\bar{\nu}_\mu$ になる

電磁相互作用で観る宇宙（可視光）

Mellinger 2008

銀河は星や星間ガス（陽子、中性子、電子）で構成され、
電磁放射で輝いている（力学的エネルギーを徐々に失う）

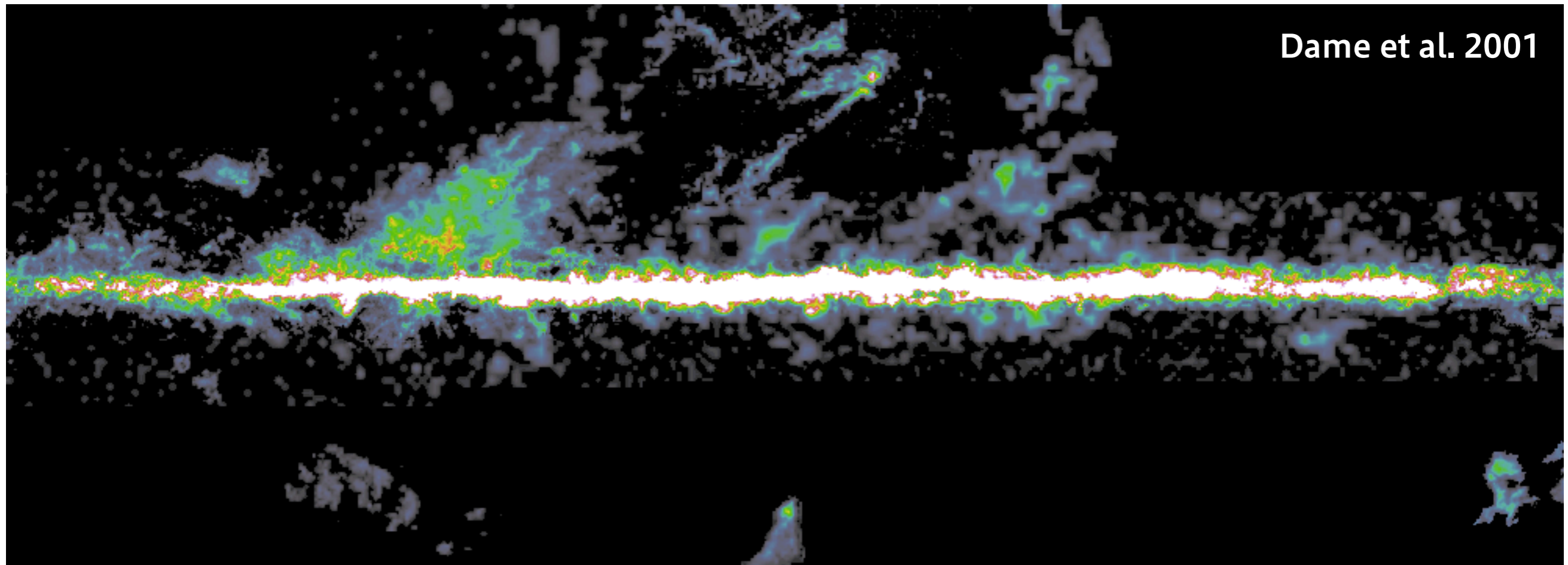
電磁相互作用で観る宇宙（可視光）

Mellinger 2008

暗黒星雲 (dark nebula)

銀河は星や星間ガス（陽子、中性子、電子）で構成され、
電磁放射で輝いている（力学的エネルギーを徐々に失う）

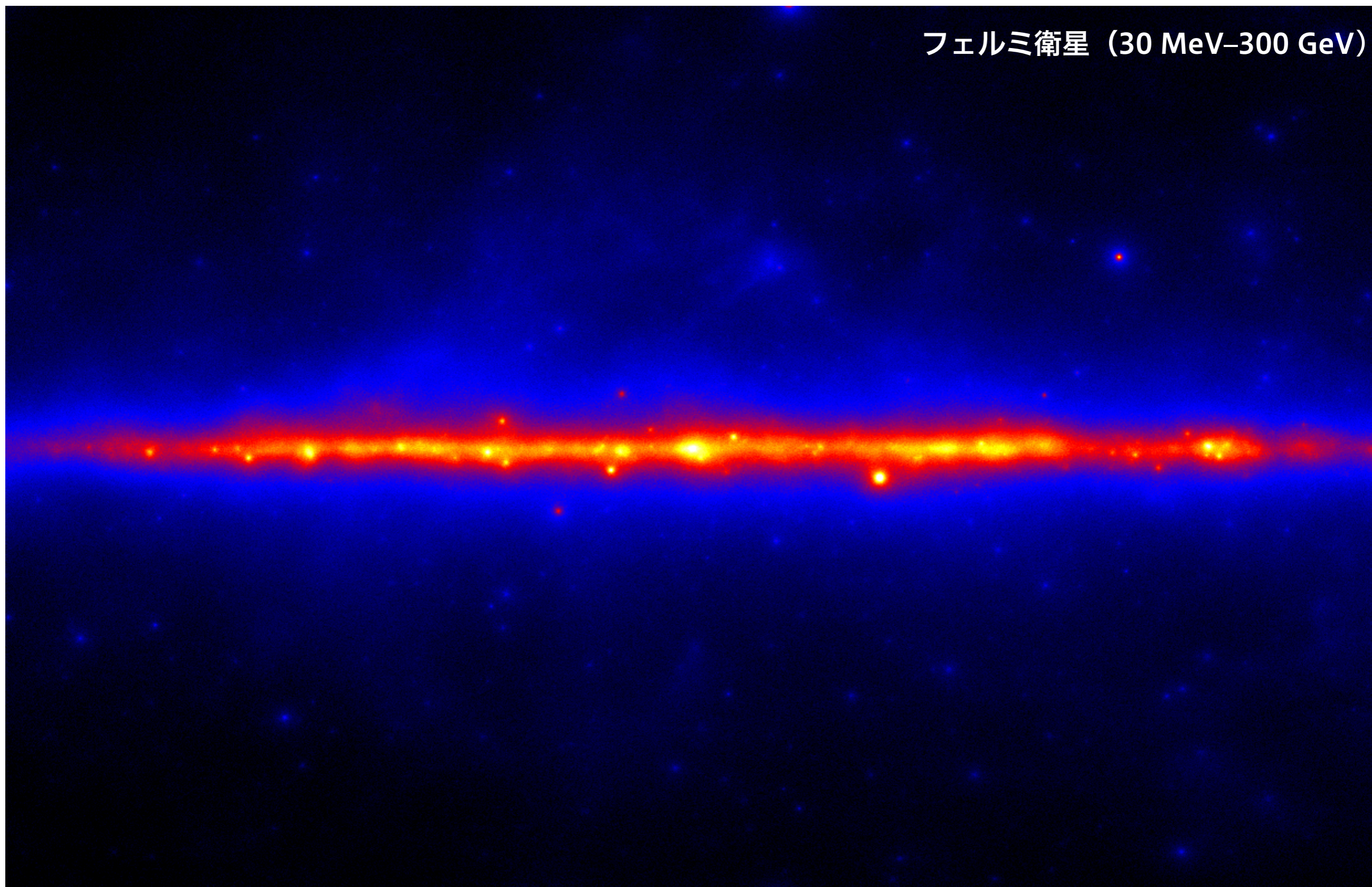
電磁相互作用で観る宇宙（電波）



- ❖ 一酸化炭素（CO）の電波輝線（ $\lambda = 2.6 \text{ mm}$ ）
- ❖ 観測手段を変えることで、観えないものが観えてくる

電磁相互作用で観る宇宙 (ガンマ線)

フェルミ衛星 (30 MeV–300 GeV)

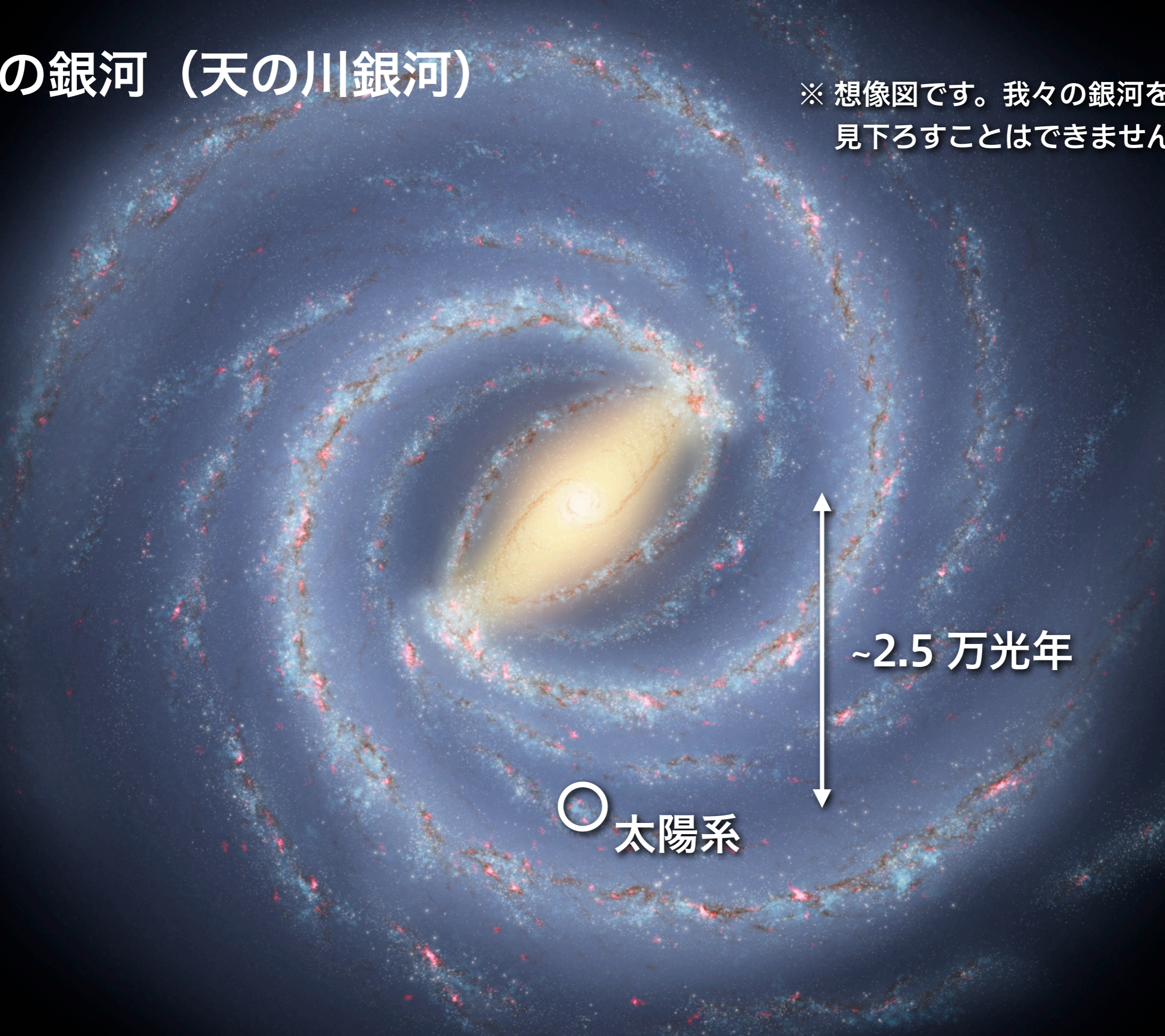


我々の銀河（天の川銀河）

※ 想像図です。我々の銀河を上から
見下ろすことはできません。

我々の銀河（天の川銀河）

※ 想像図です。我々の銀河を上から
見下ろすことはできません。



○ 太陽系

~2.5 万光年

我々の銀河（天の川銀河）

※ 想像図です。我々の銀河を上から
見下ろすことはできません。

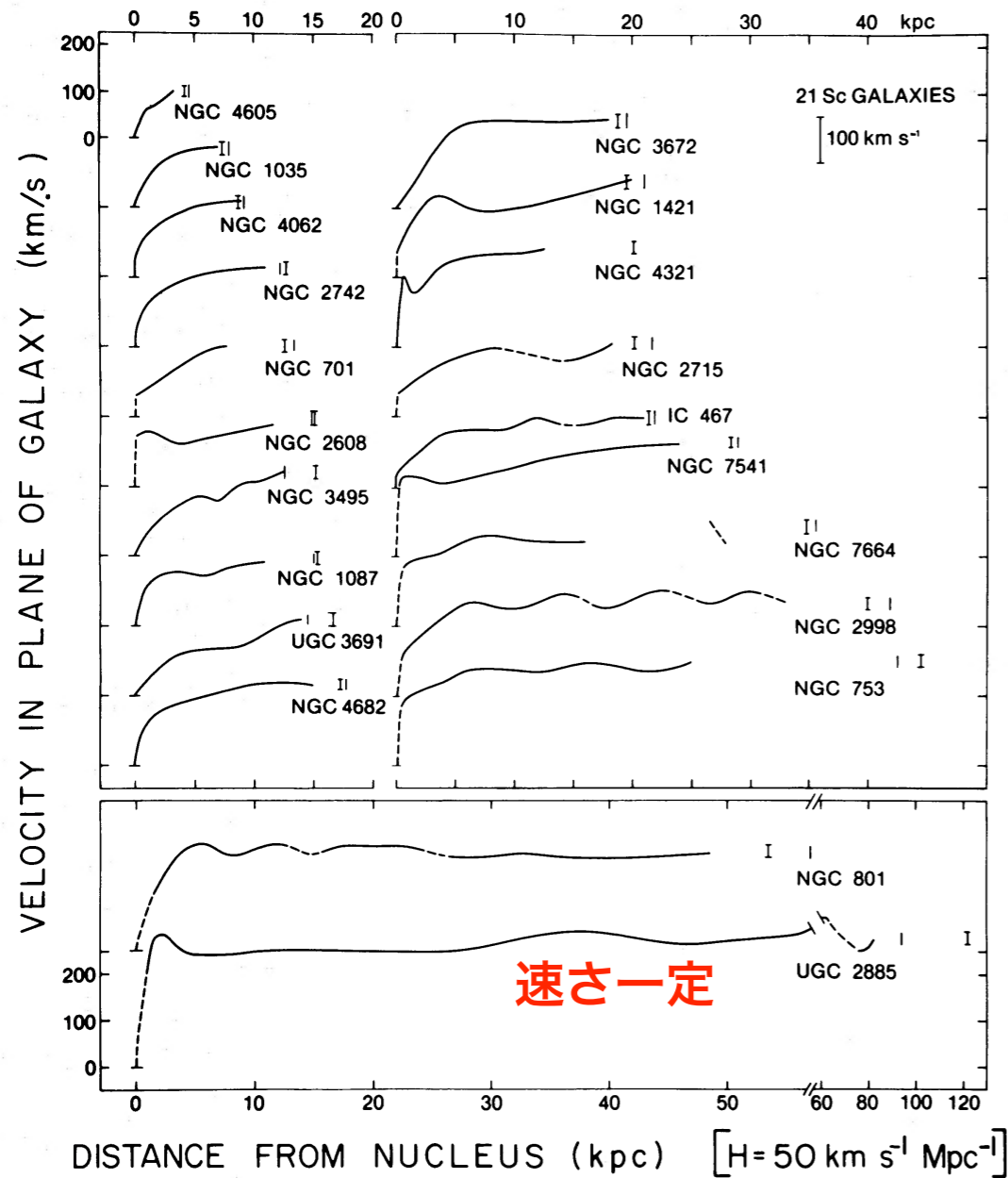
~230 km/s

~2.5 万光年

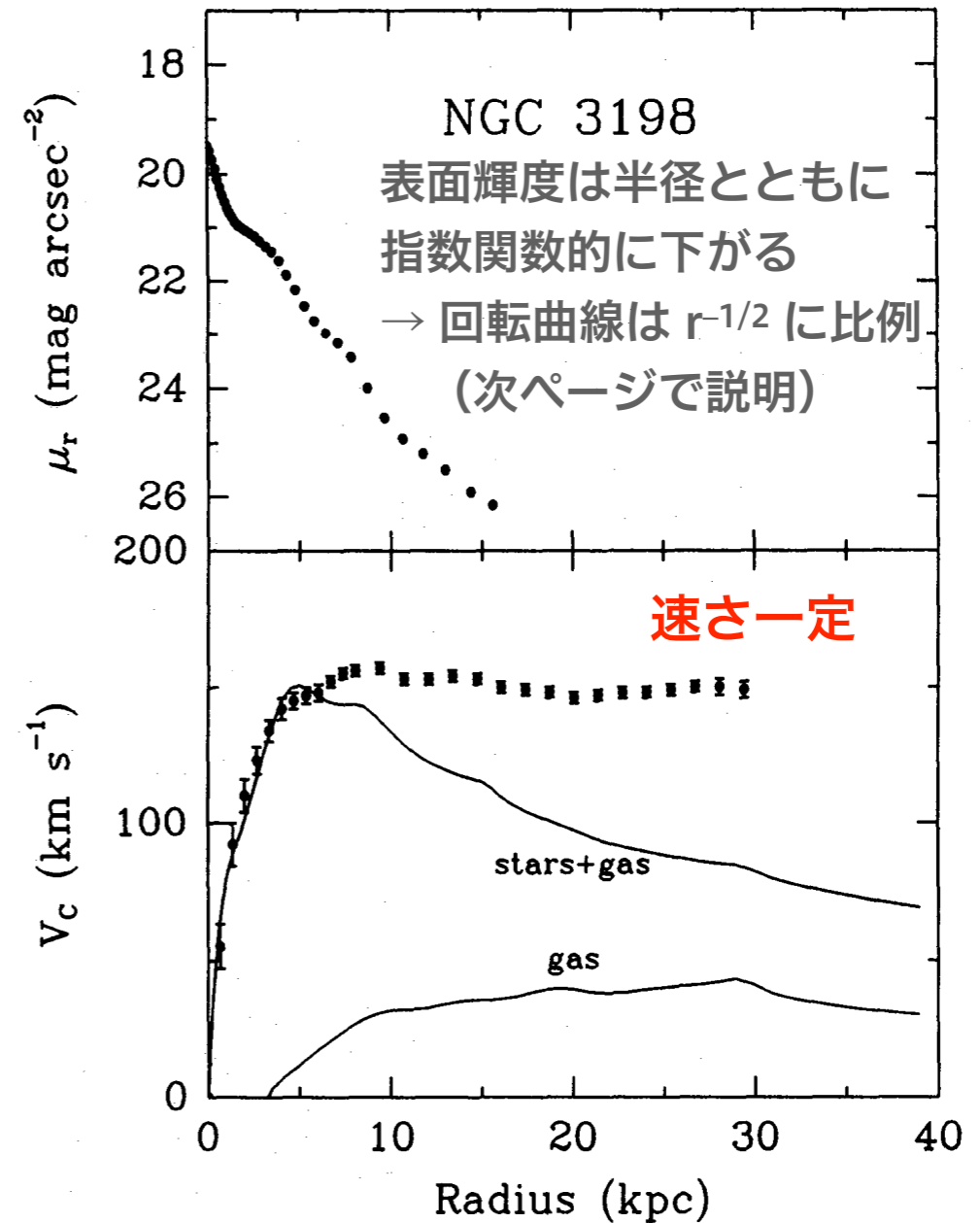
太陽系

暗黒物質存在の証拠 (1) 銀河の回転曲線

Rubin et al. (1980)



Begeman (1989)



- 1980年代までに、多くの銀河の**回転曲線**が電波望遠鏡などで観測された
- 電磁波で観測される物質の分布からは説明ができない
- なんらかの**暗黒** (電磁波で見えない) の質量が存在するか、重力相互作用に修正が必要

暗黒物質存在の証拠 (1) 銀河の回転曲線

- 銀河内の半径 r における力の釣り合い

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

G	万有引力定数
r	銀河中心からの距離
$M(r)$	半径 r までに含まれる質量
$v(r)$	半径 r での回転速度
m	質点の質量

- ある半径で質量分布が途絶えると

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM_{\text{total}}}{r}} \propto r^{-1/2}$$

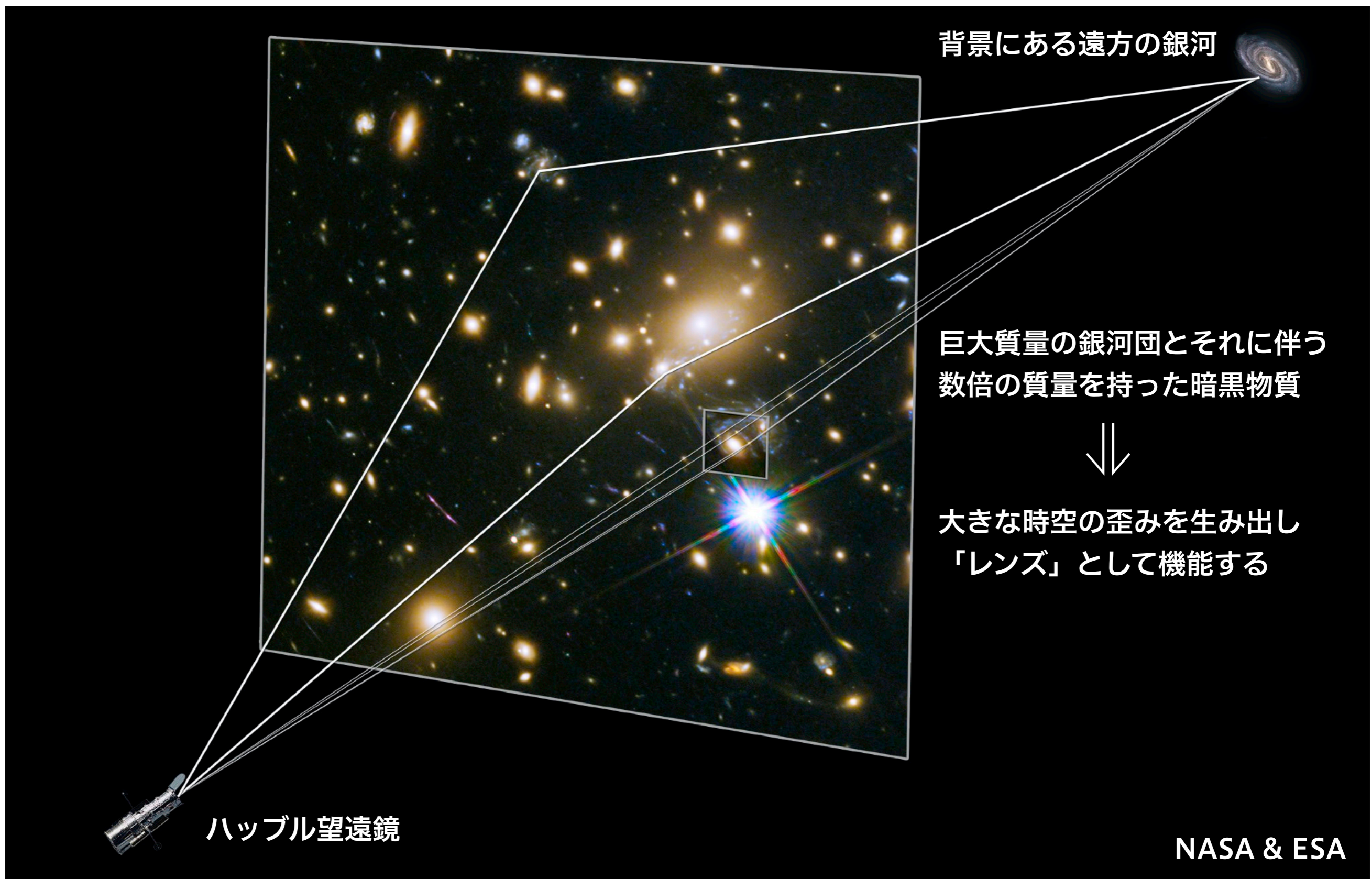
- もし回転速度が一定であるなら

$$v(r) = \text{const.}$$

$$M(r) \propto r$$

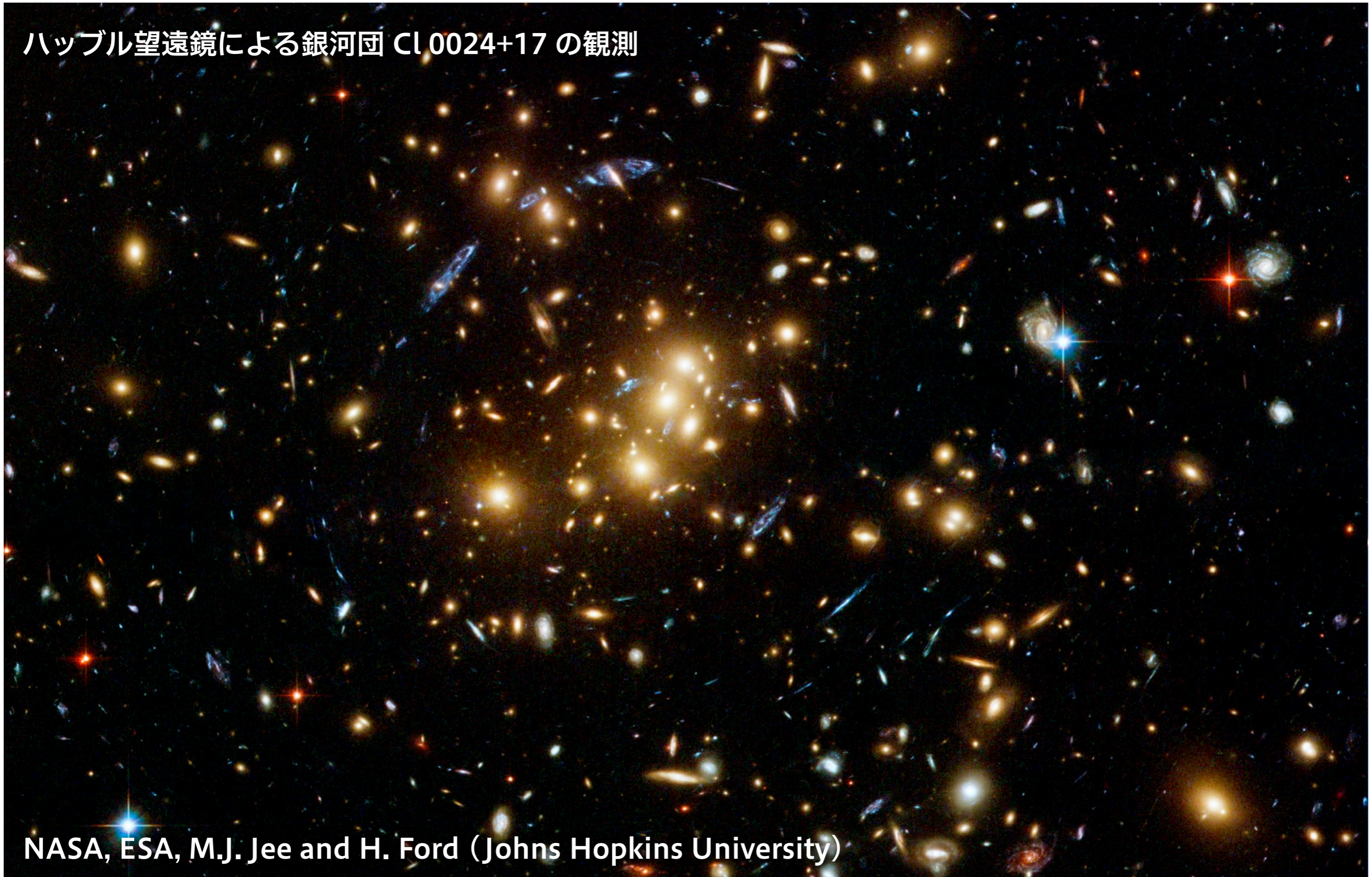
この予期せぬ質量は何だ？

暗黒物質存在の証拠 (2) 重力レンズ効果



暗黒物質存在の証拠 (2) 銀河団による重力レンズ効果

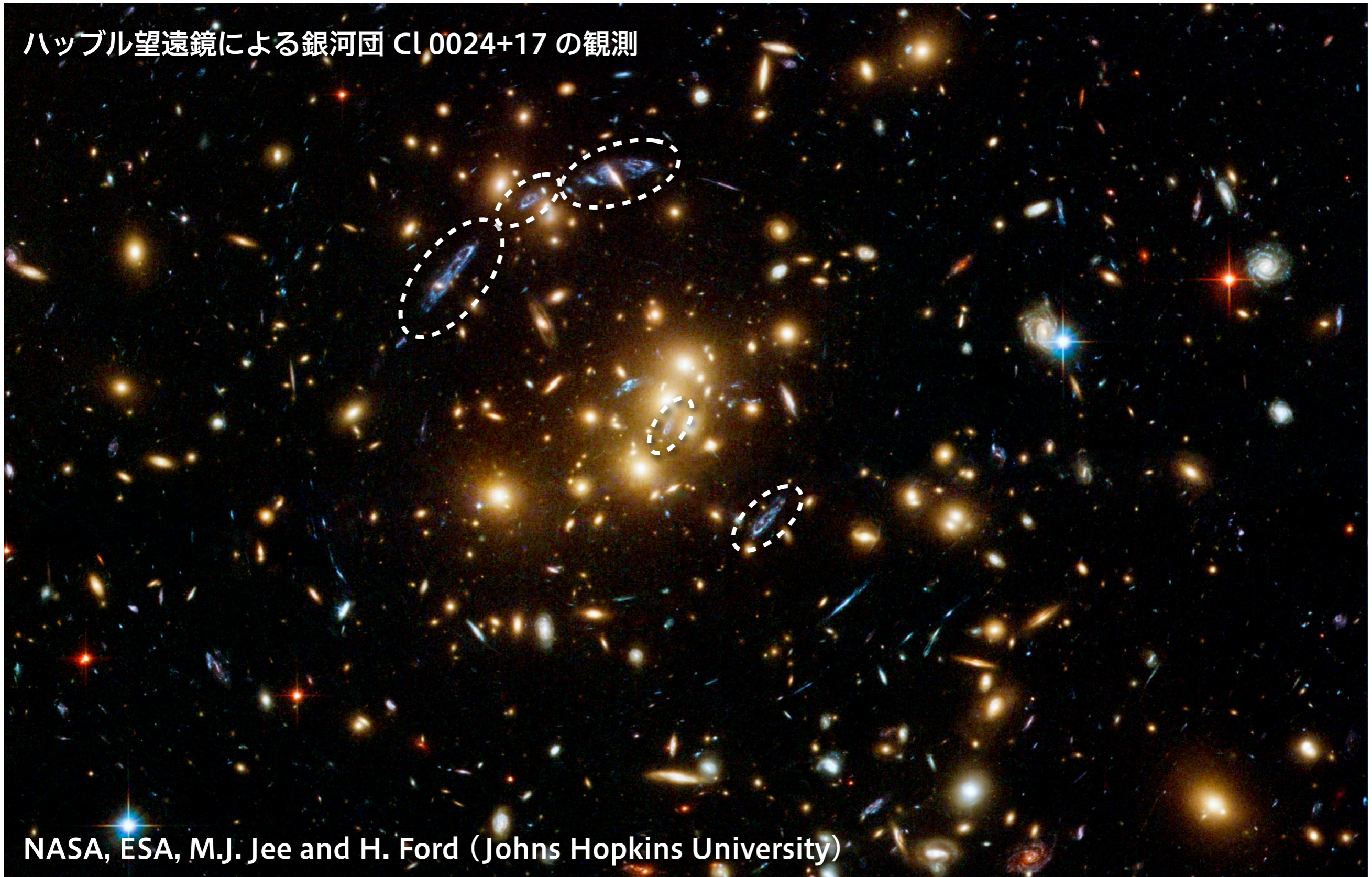
ハッブル望遠鏡による銀河団 Cl 0024+17 の観測



NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford (Johns Hopkins University)

暗黒物質存在の証拠 (2) 銀河団による重力レンズ効果

ハッブル望遠鏡による銀河団 Cl 0024+17 の観測



NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford (Johns Hopkins University)

暗黒物質存在の証拠 (2) 重力レンズ効果

計算で推定された暗黒物質の質量分布



NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford (Johns Hopkins University)

暗黒物質存在の証拠 (3) 銀河団同士の衝突

可視光で観た銀河団

<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>

Optical: NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

暗黒物質存在の証拠 (3) 銀河団同士の衝突

可視光で観た銀河団

<http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>

銀河団

銀河団

Optical: NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

暗黒物質存在の証拠 (3) 銀河団同士の衝突

重力レンズによる質量分布

Lensing: NASA/STSci, ESO WFI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al

暗黒物質存在の証拠 (3) 銀河団同士の衝突

X 線で観た高温プラズマ (電離した H や He = 物質)

衝突



X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.

暗黒物質存在の証拠 (3) 銀河団同士の衝突



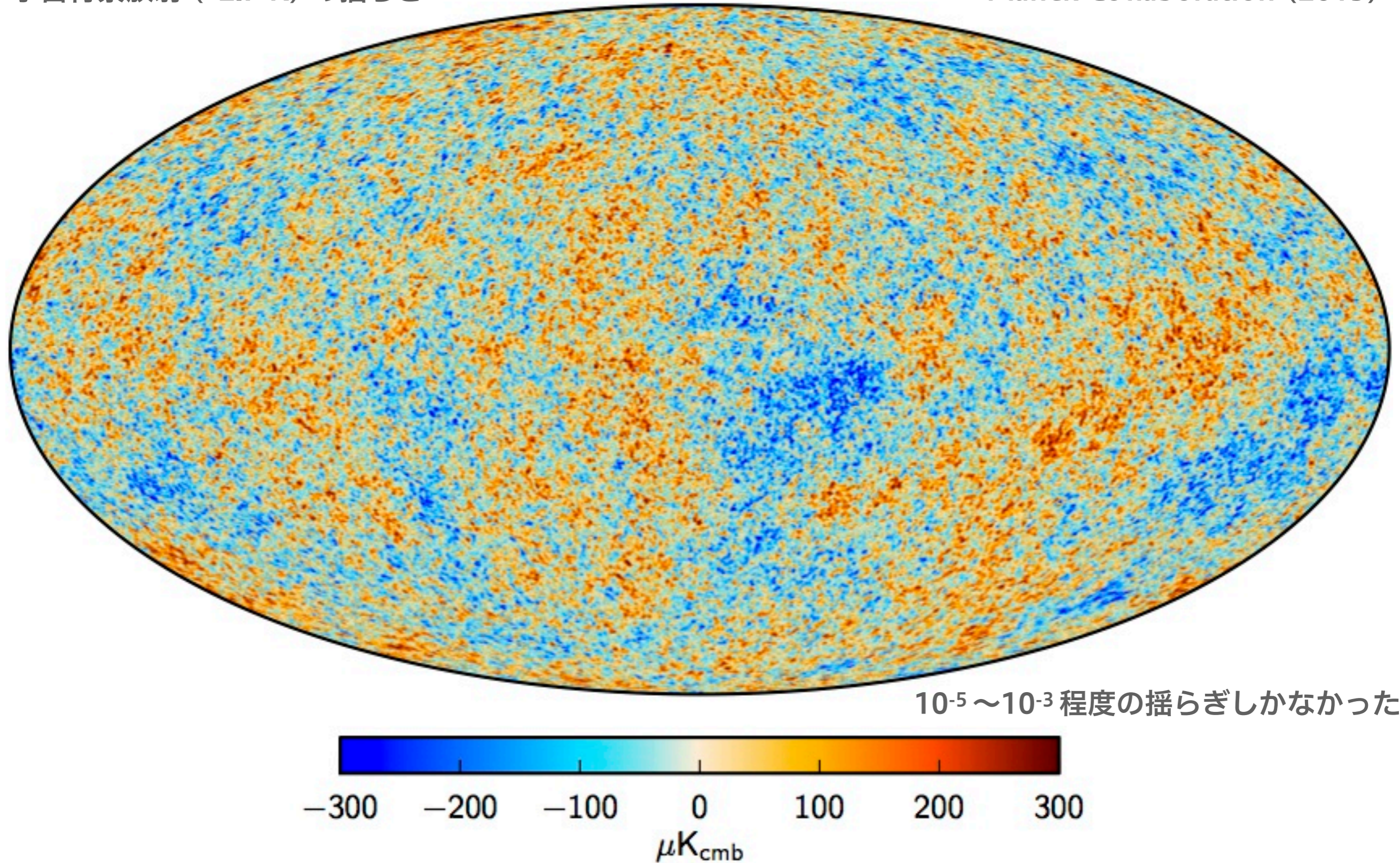
課題 2

- 銀河団の衝突において、その中に含まれる通常の物質同士は非弾性的に衝突し高温プラズマを生成するが、暗黒物質はすり抜けてしまうことを、相互作用の違いや断面積の違いを踏まえ、定性的に説明せよ
- ヒント
 - ▶ p37 の説明を用いて良い
 - ▶ 物質が特定方向に進む運動エネルギーを、ランダムな方向に分布する熱エネルギーに変えるとはどのようなことが考えよ

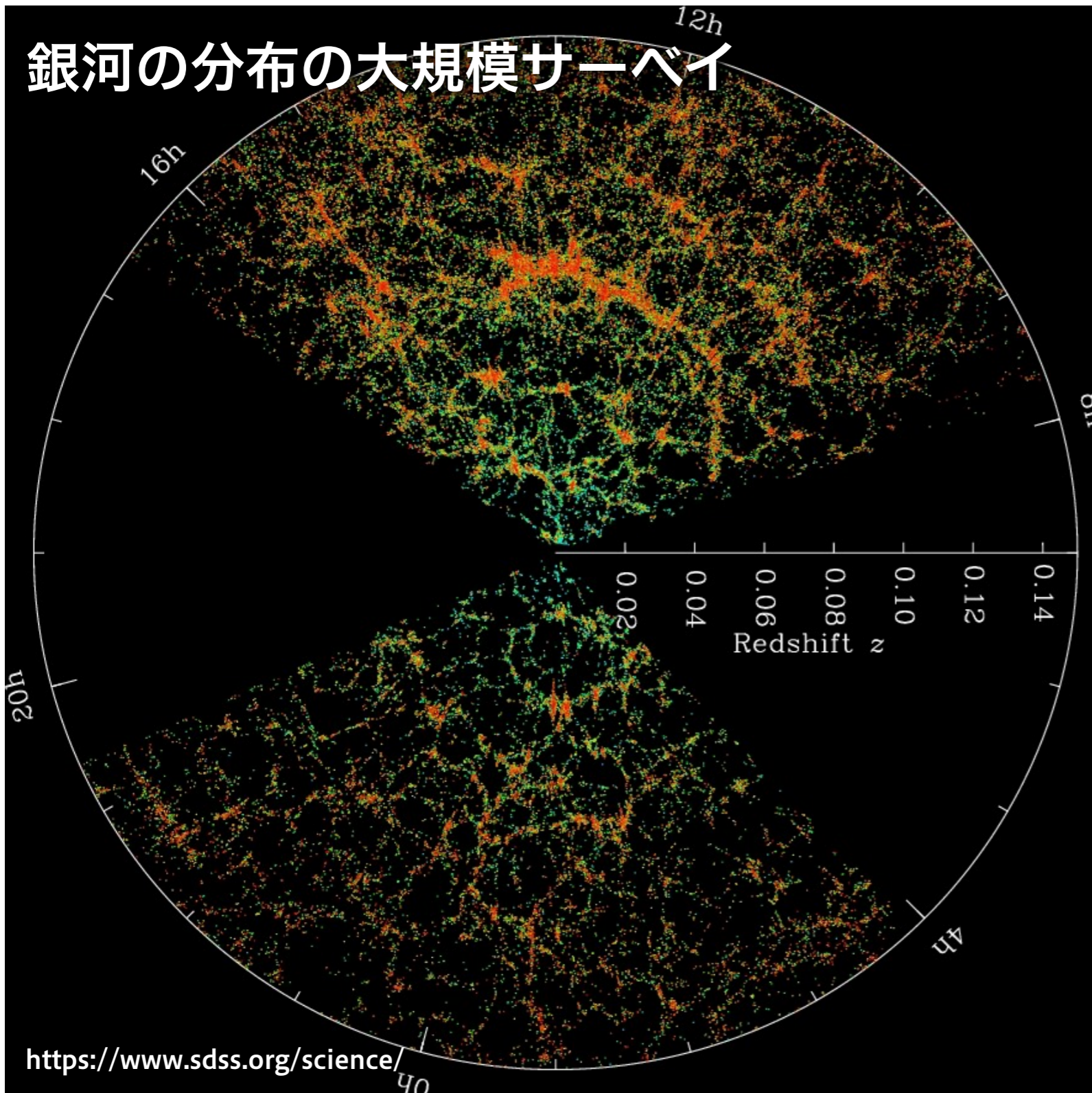
暗黒物質存在の証拠 (4) 宇宙の構造

宇宙背景放射 (~2.7 K) の揺らぎ

Planck Collaboration (2015)



暗黒物質存在の証拠 (4) 宇宙の構造

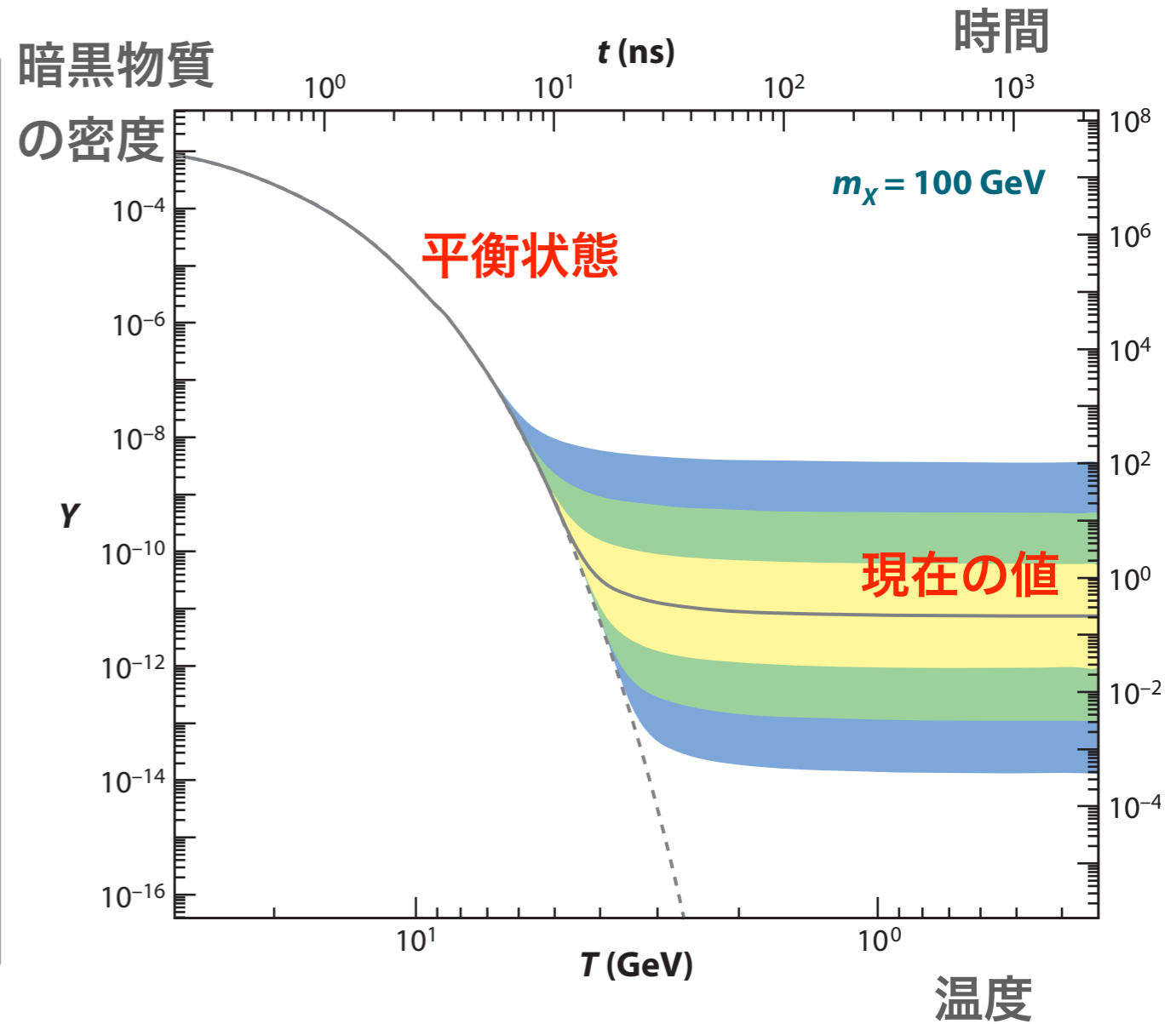
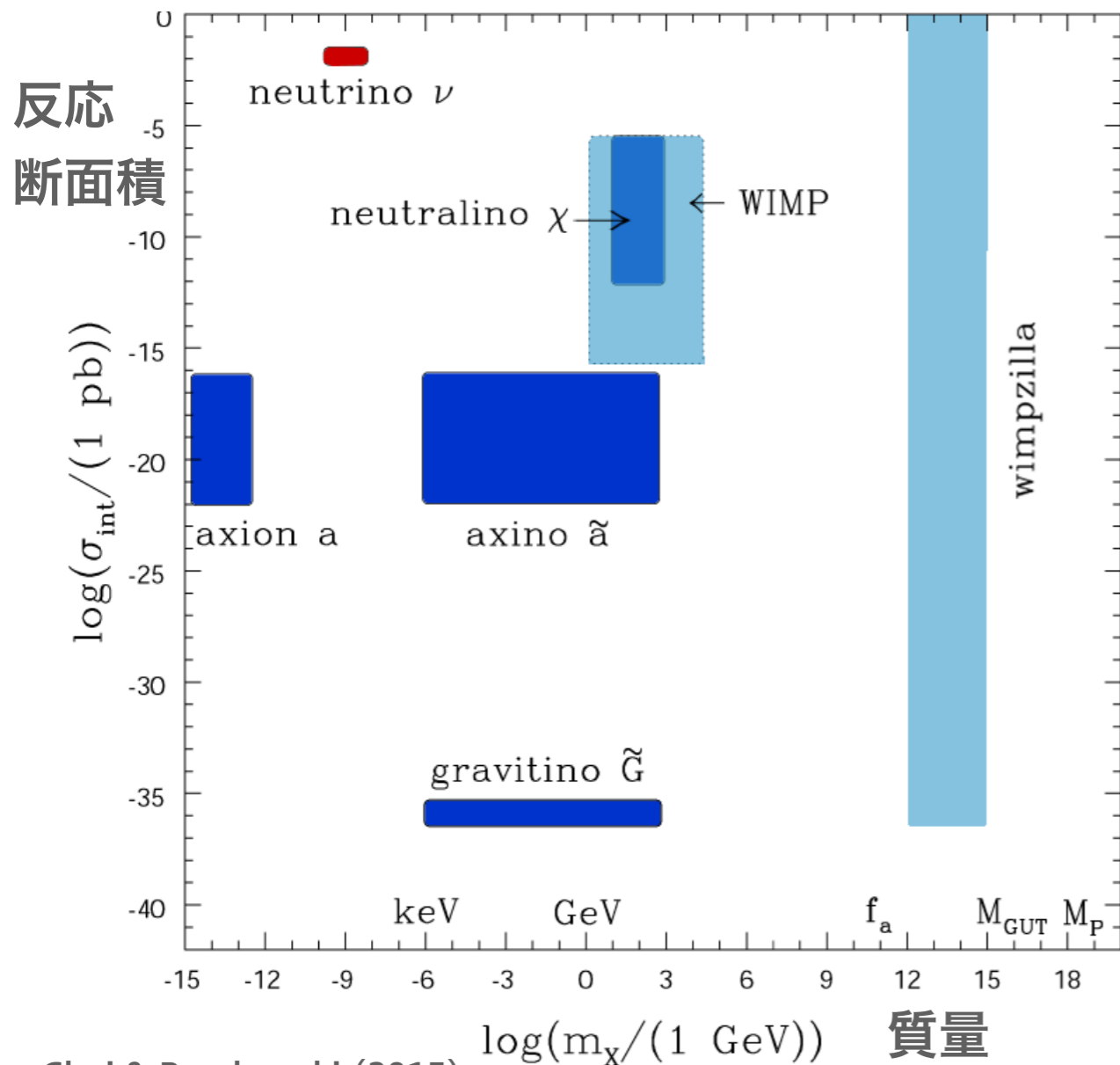


- ビッグバン直後のわずかな質量密度分布（バリオン密度分布）の揺らぎが、大きな揺らぎへと進化
- 暗黒物質の存在がこの進化を説明する
- 暗黒物質の密度揺らぎにより質量が集まり始め、そこにバリオンがさらに集められる
- 背景放射の観測結果などから、宇宙論パラメータが決定される
 - ▶ バリオン密度
 - ▶ 質量密度 (= バリオン + 暗黒物質)
 - ▶ 真空のエネルギー密度

暗黒物質の正体は何か？

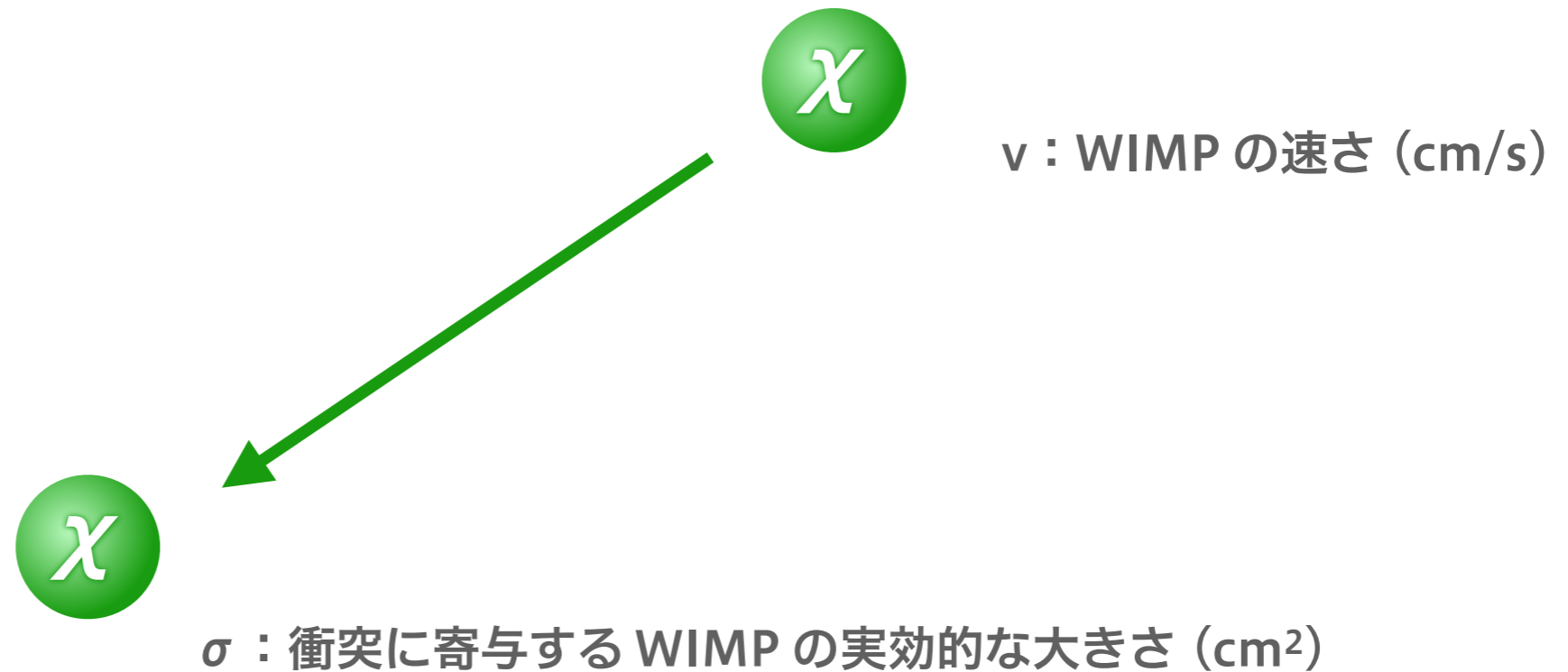
- 重力相互作用をする = 質量を持つ
- 電磁相互作用をしない（銀河団の衝突）
- 宇宙の構造形成の観点から
 - ▶ ニュートリノではない
 - ▶ 重く暗い天体（Massive Compact Halo Objects、MACHO）ではない（重力マイクロレンズ観測からも否定）
 - ▶ 相対論的速度（= 力学的に**熱い**）粒子ではない
→ **冷たい**暗黒物質（cold dark matter、CDM）が支持されている
- 標準模型を超える新素粒子候補？
 - ▶ アクシオン（Axion）
 - ▶ 弱い相互作用をする重粒子（Weakly Interacting Massive Particle、**WIMP**）「弱虫」という意味

WIMP



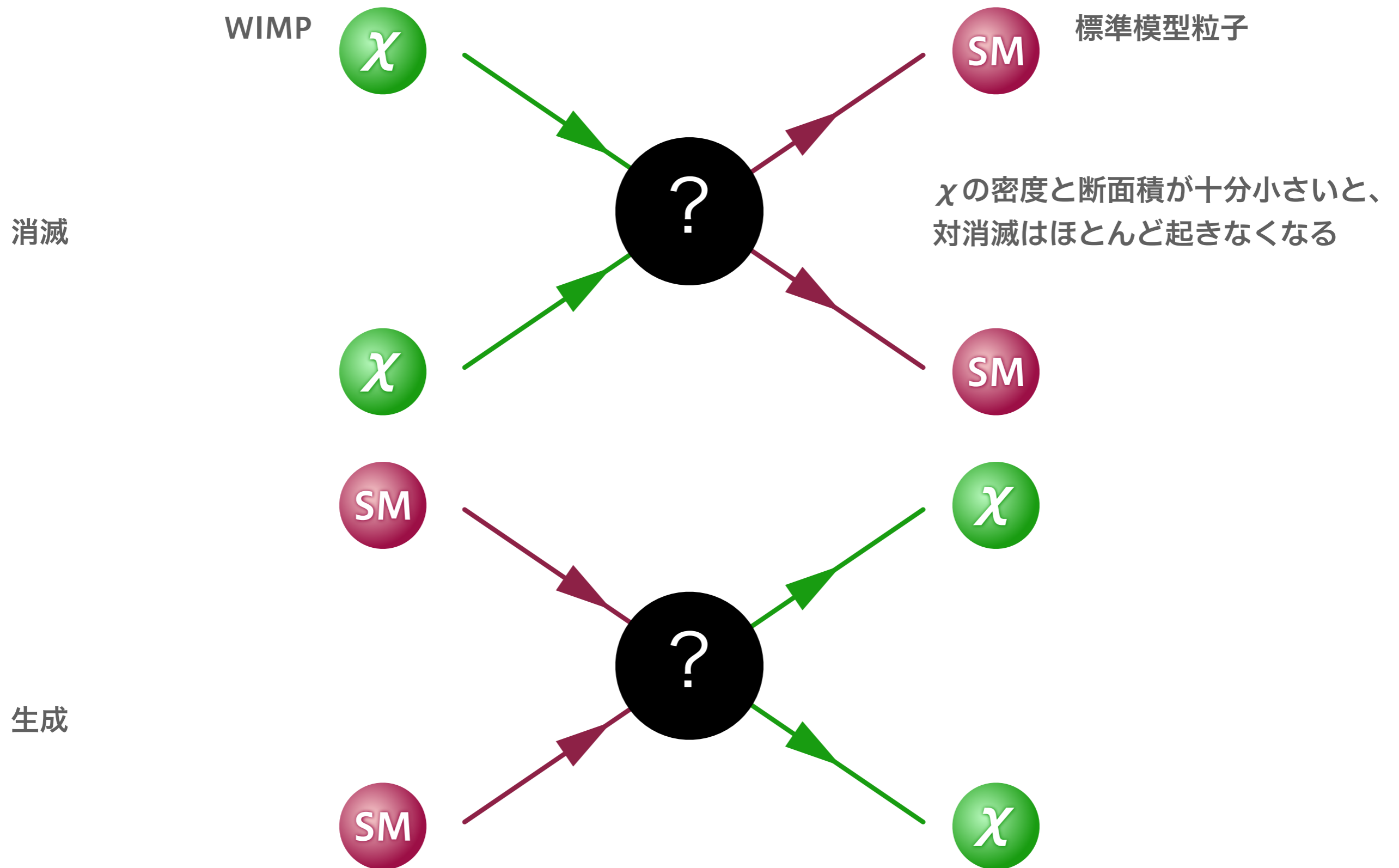
- 100 GeV 程度の質量、 $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ の対消滅断面積を持つと期待
- 超対称性理論 (supersymmetry、SUSY) の予言する粒子質量領域と一致
- 宇宙の膨張とともに、温度と密度が下がる
- 途中までは生成と消滅が平衡状態 → その後、生成できなくなる (freeze out)

WIMP の反応断面積と速さの積



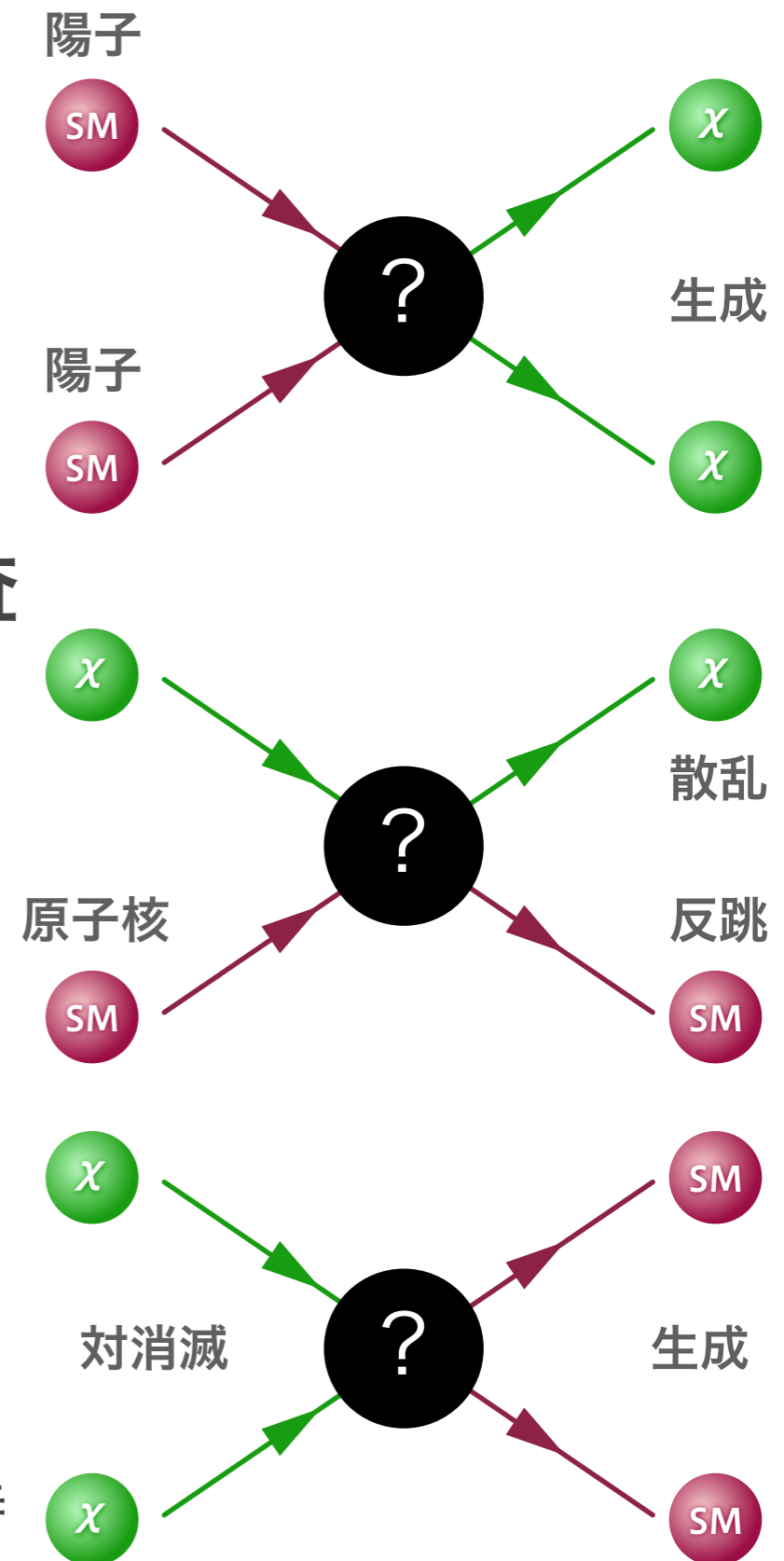
- ❖ σ が小さいと、近くを通り過ぎてでもすり抜けてしまう
- ❖ v が小さいと、暗黒物質がたくさんあっても平均自由行程を走る時間が長くなってしまう
- ❖ それぞれを単独で観測することは困難
- ❖ もし対消滅でなんらかの粒子を放射し、それを観測できるなら、その明るさから積の平均値 $\langle \sigma v \rangle$ が求められる

消滅と生成の平衡状態



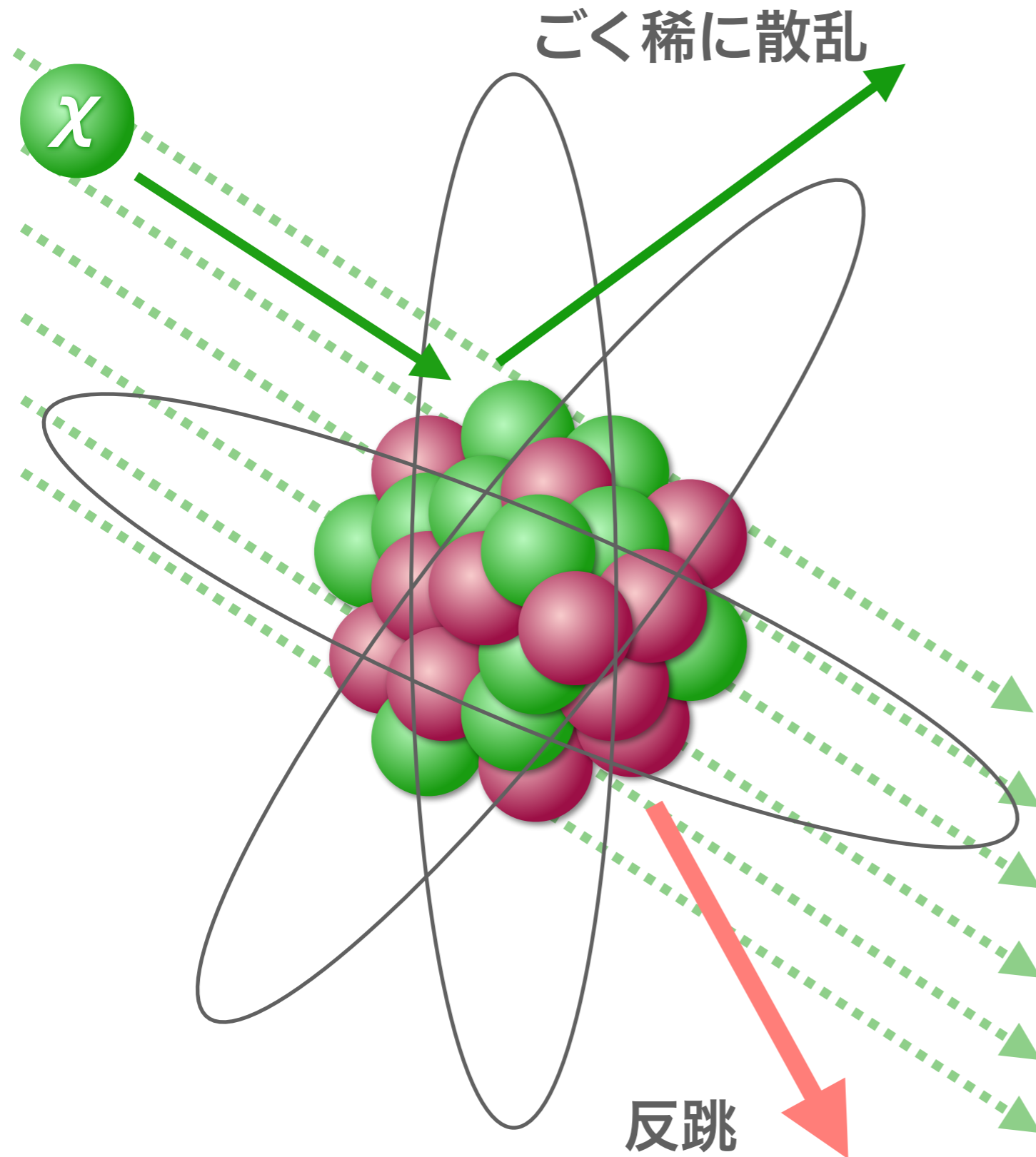
WIMP の探し方 (ただし暗黒物質が WIMP だった場合)

- 粒子加速器による暗黒物質の**生成**
 - ▶ CERN の Large Hadron Collider (LHC)
 - ▶ 加速エネルギーで、生成可能な質量が決まる
 - ▶ 現在のところ観測されていない
- 暗黒物質を地上検出器に衝突させる**直接探査**
 - ▶ 暗黒物質がたまたま原子核に衝突するのを待つ
 - ▶ 液体キセノンを使った観測手法が代表的
 - ▶ 現在のところ観測されていない
- 暗黒物質同士の衝突痕跡を探す**間接探査**
 - ▶ 標準模型粒子が生成・崩壊しガンマ線を出す
 - ▶ 宇宙および地上のガンマ線望遠鏡で探査
 - ▶ 直接探査と相補的、将来計画 ('20 年代) に期待



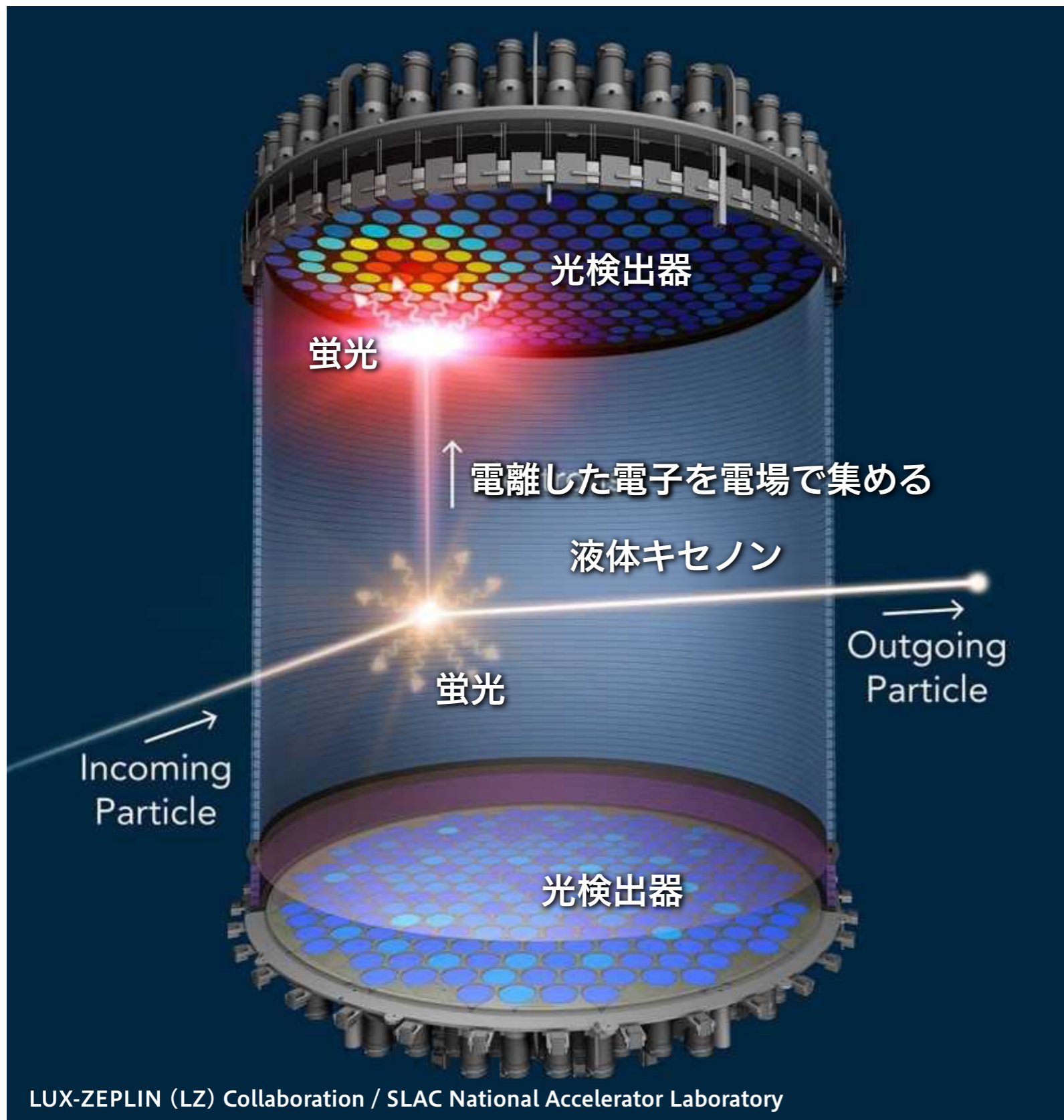
地下実験

WIMP と原子核の衝突



- 太陽系は (= 地球は) 銀河中心のまわりを ~ 230 km/s で移動している
- ~ 0.3 GeV/c²/cm³ の質量密度で WIMP が存在
- WIMP 質量を 100 GeV/c² とすると、69,000 個/cm²/s の WIMP が地球に向かって、すり抜けていく
- たまに原子核に衝突するので、辛抱強くその痕跡を探せば良い
- ただし、宇宙線や検出器中自体から出る放射線も原子核に衝突する

液体キセノンを使った WIMP 検出原理



LUX-ZEPLIN (LZ) Collaboration / SLAC National Accelerator Laboratory

- 大量の液体キセノンへの WIMP の衝突
- 散乱された原子核が周辺の原子核を励起・電離
- 178 nm (真空紫外) の蛍光を発する
- 地下に設置し、宇宙線の影響を取り除く
- 不純物や放射線同位体をできる限り除去して使用
- 比較的高い沸点 -108°C
- $A = 131$ と大きく、衝突断面積 ($\propto A^2$) が大きい
- $Z = 54$ でガンマ線をタンク外周部でよく遮蔽する
- 3次元で衝突位置が分かる

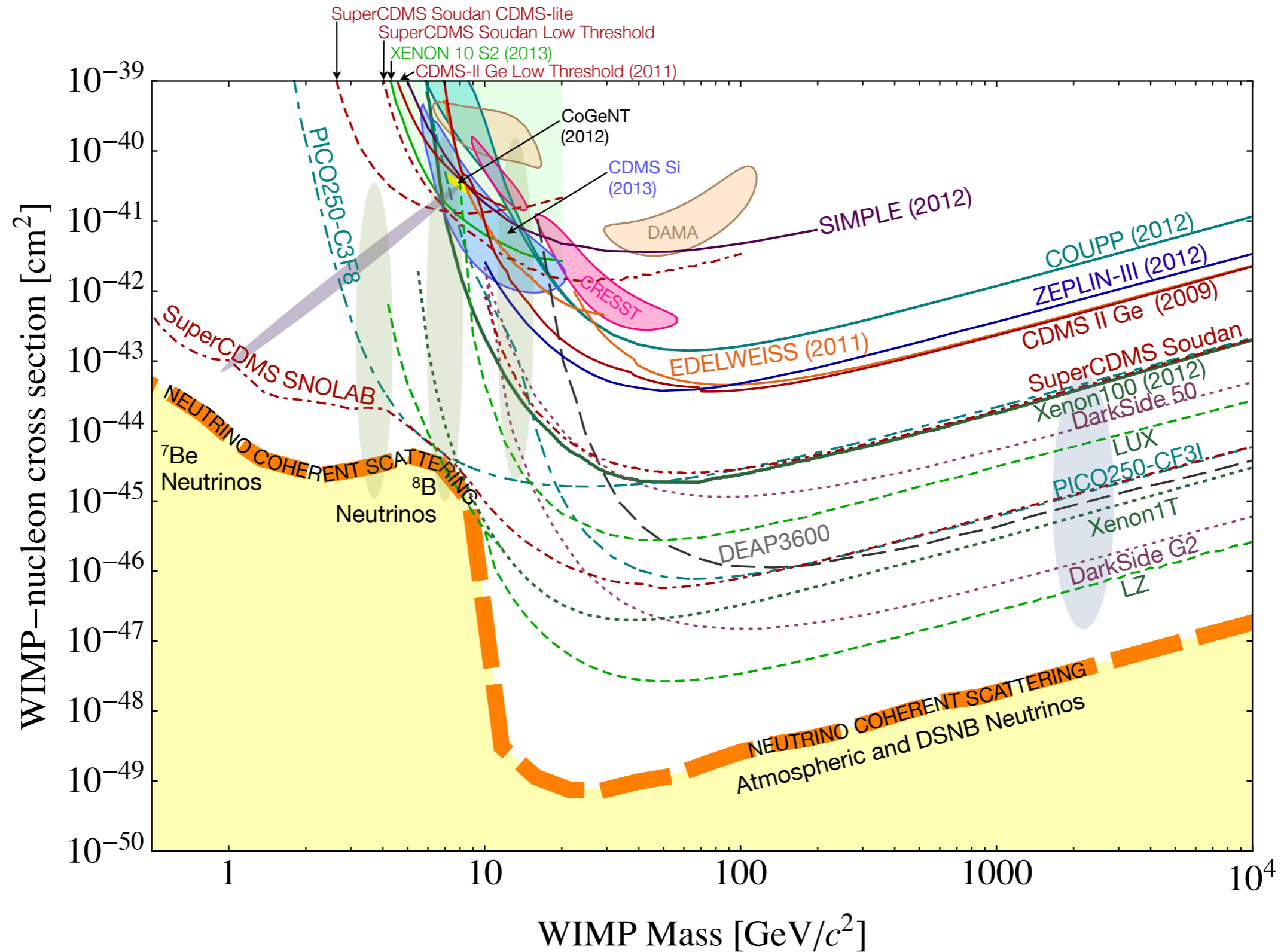
XENON 実験



- XENON10 (14 kg)、XENON100 (62 kg)、ZENON1T (2 ton) と進み、XENONnT (5.9 ton) が 2020 年秋に稼働予定
- 現在、WIMP の間接探査で世界最高感度 (= キセノンの量が多く、放射線除去が良い)
- 名古屋大学も宇宙線物理学研究室 (CR 研) が参加

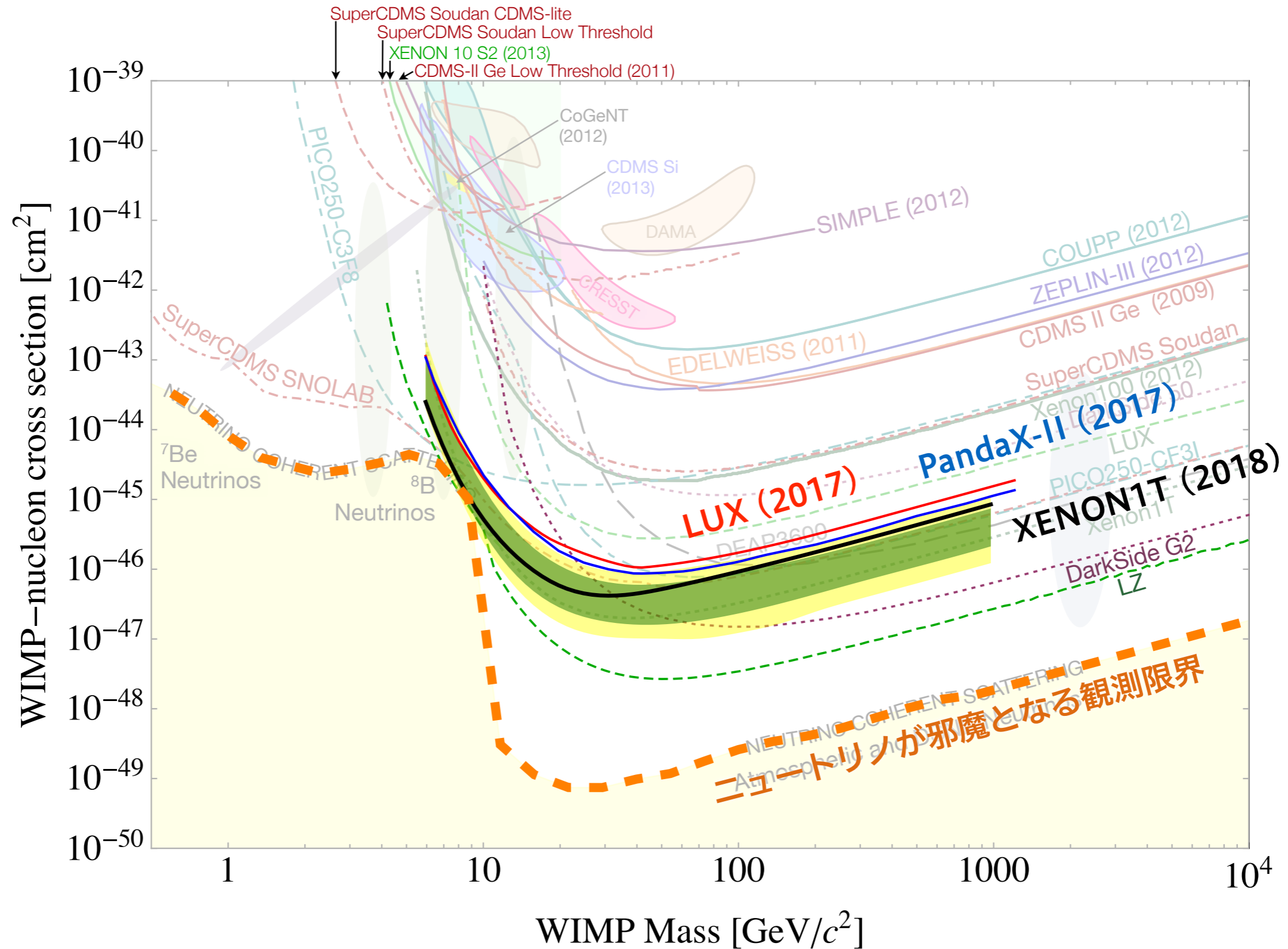
WIMP-核子の衝突断面積の上限値競争

Cushman et al. (2013)

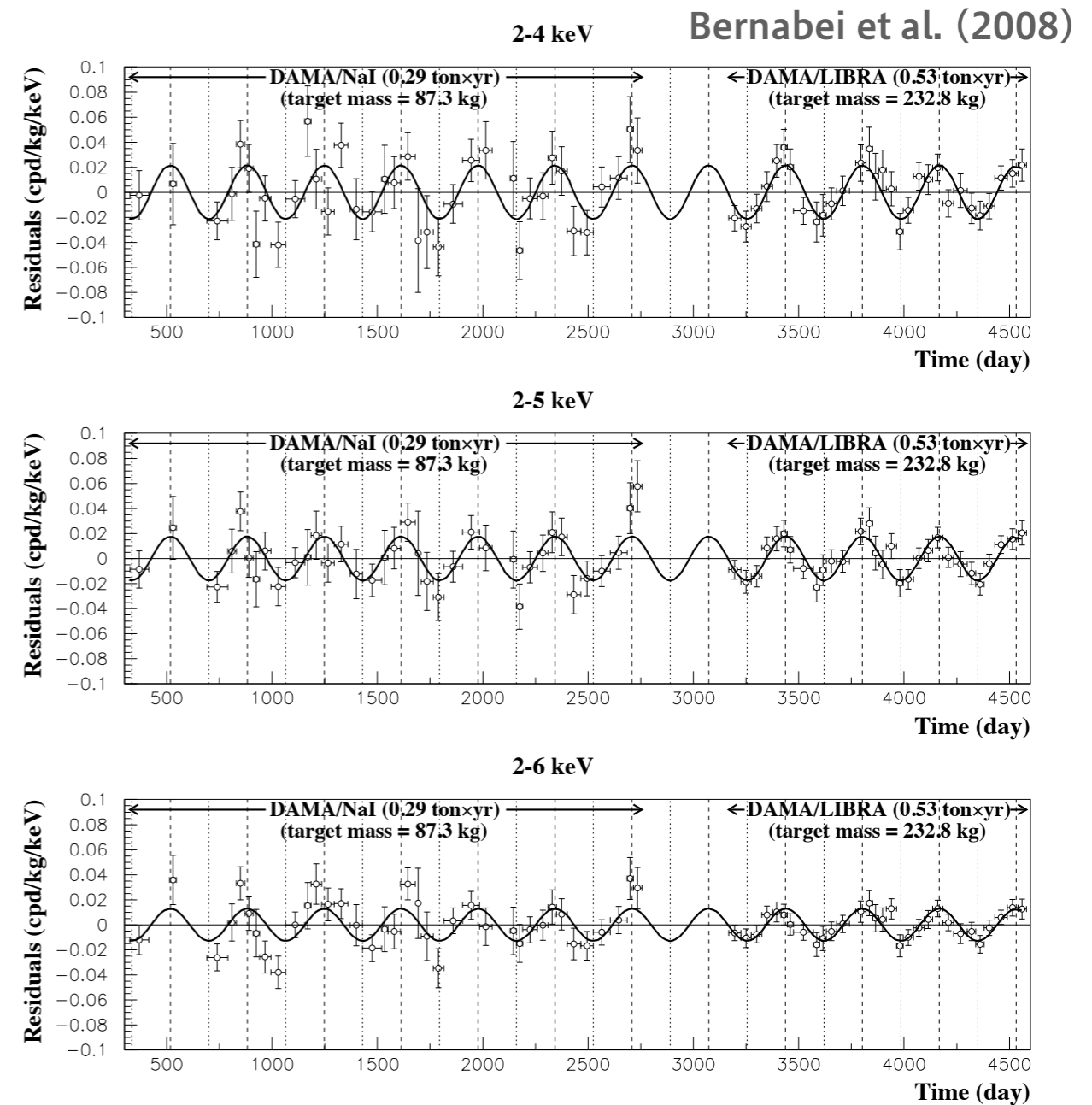
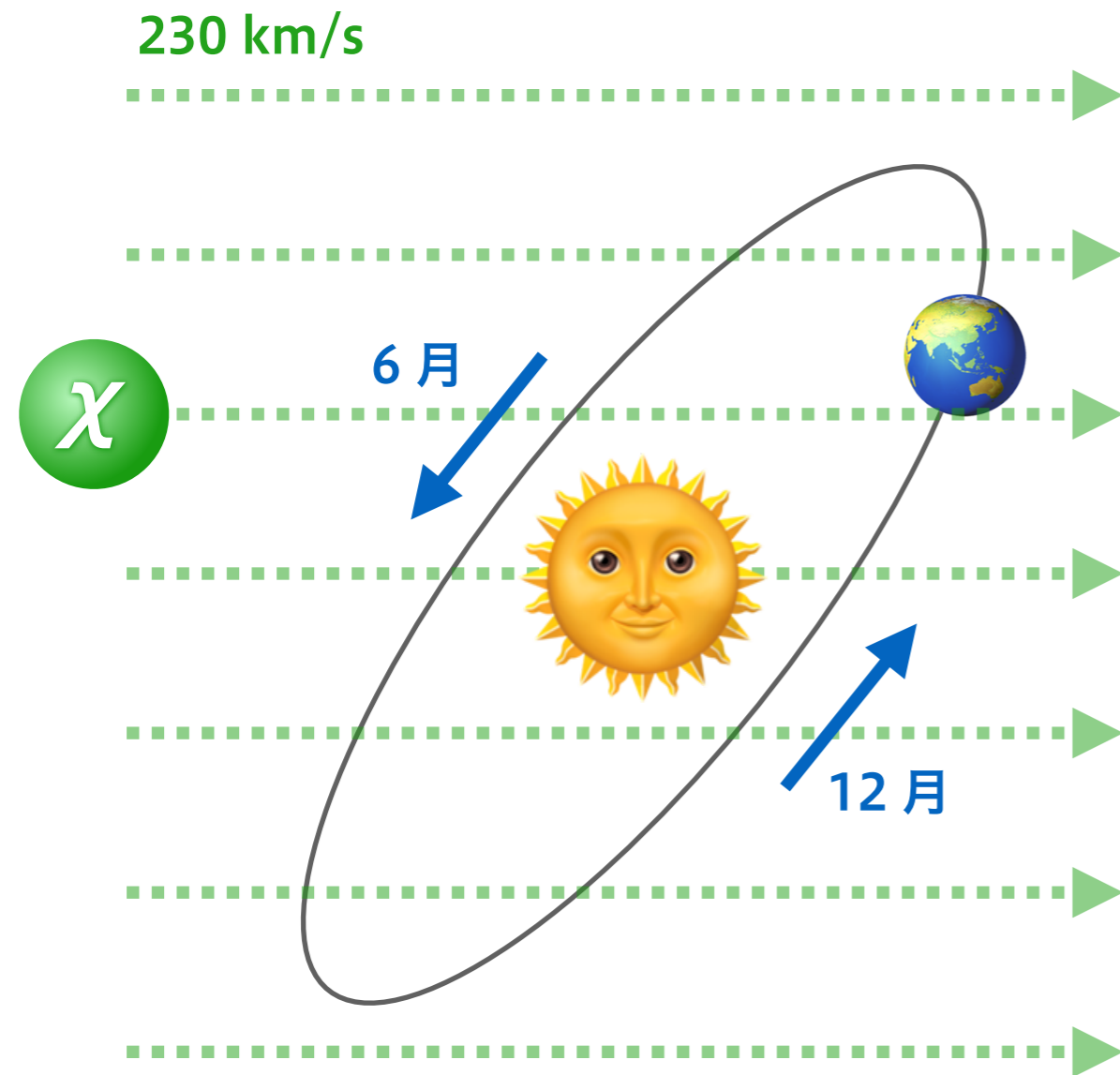


WIMP-核子の衝突断面積の上限値競争

XENON Collaboration (2018)



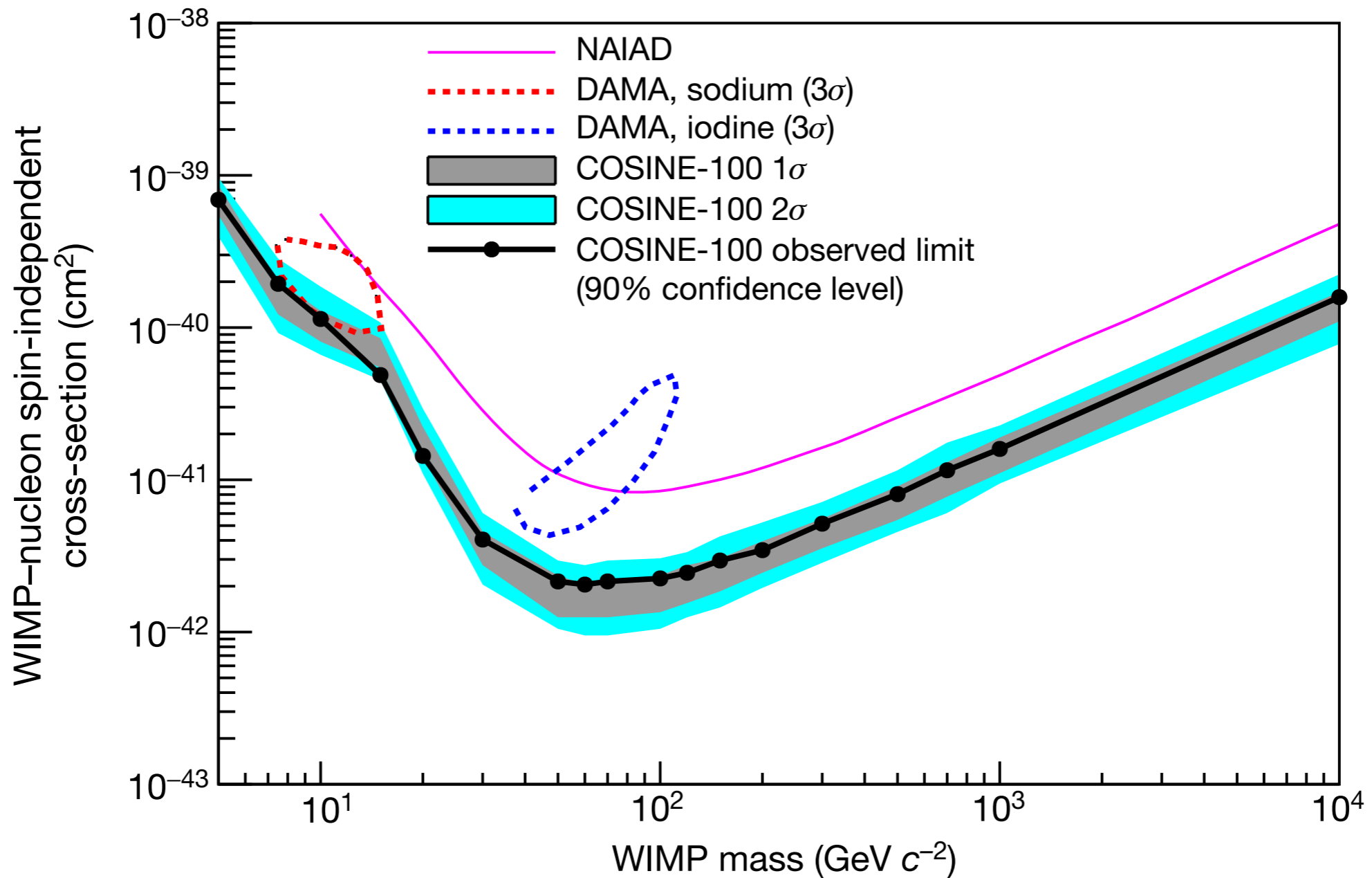
結晶シンチレータ実験による暗黒物質の「発見」



- ❖ 6月のほうが地球とWIMPの相対速度が大きく、反跳エネルギーが大きい
- ❖ 検出のしやすさが季節変動するため、放射線などの引き算が楽（証拠として出しやすい）
- ❖ DAMA/NaI および DAMA/LIBRA 実験によって、検出された何らかの粒子検出数の季節変動が発見された

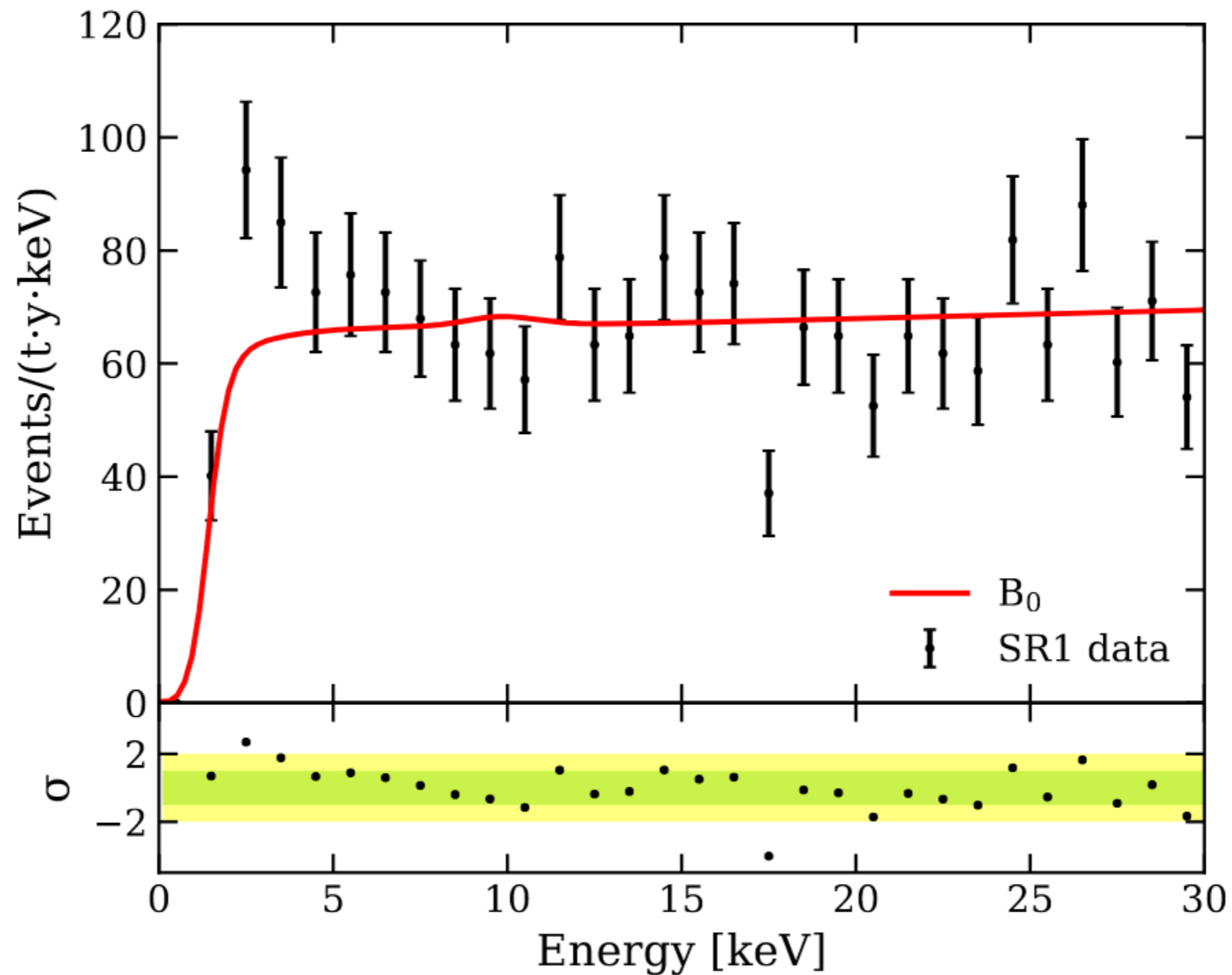
同様の実験による否定的な結果

Adhikari et al. (2018)



- COSINE-100 実験による最近の結果は、DAMA の結果より厳しい上限
- 「先端物理学」だとよくある話

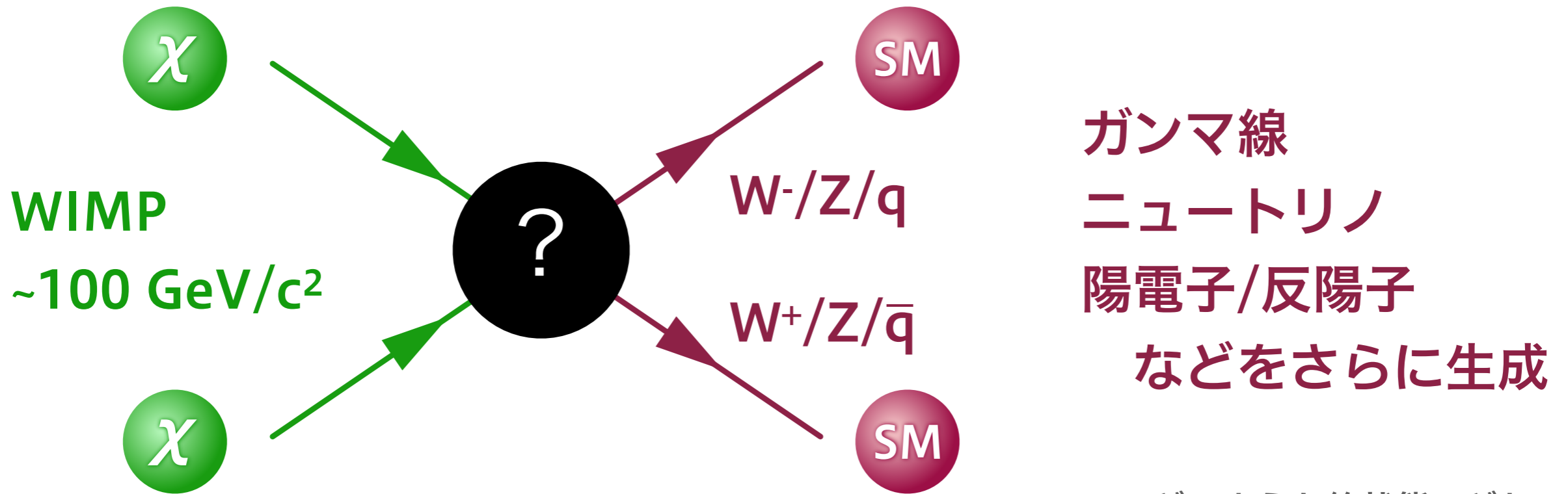
XENON1T による謎の超過事象の発見



- ❖ 低エネルギー (~2.3 keV) に予期されぬ信号を発見
- ❖ 暗黒物質ではないが、太陽からのアクシオンなどの可能性を示唆
- ❖ [KMI のプレスリリース](#) も参照 (2020/6/18)

ガンマ線観測

WIMP 対消滅による標準模型粒子の生成



素粒子物理の計算 縮退している

どのような終状態でどれ
だけガンマ線を出すか

$$\frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma}(E_\gamma, \phi, \theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{\text{WIMP}}^2} \sum_f \frac{dN_{\gamma,f}}{dE_\gamma} B_f$$

単位エネルギーあたりの
ガンマ線放射量

$$\times \int_{\Delta\Omega(\phi, \theta)} d\Omega' \int_{\text{l.o.s.}} \rho^2(r(l, \phi')) dl(r, \phi')$$

暗黒物質の空間分布

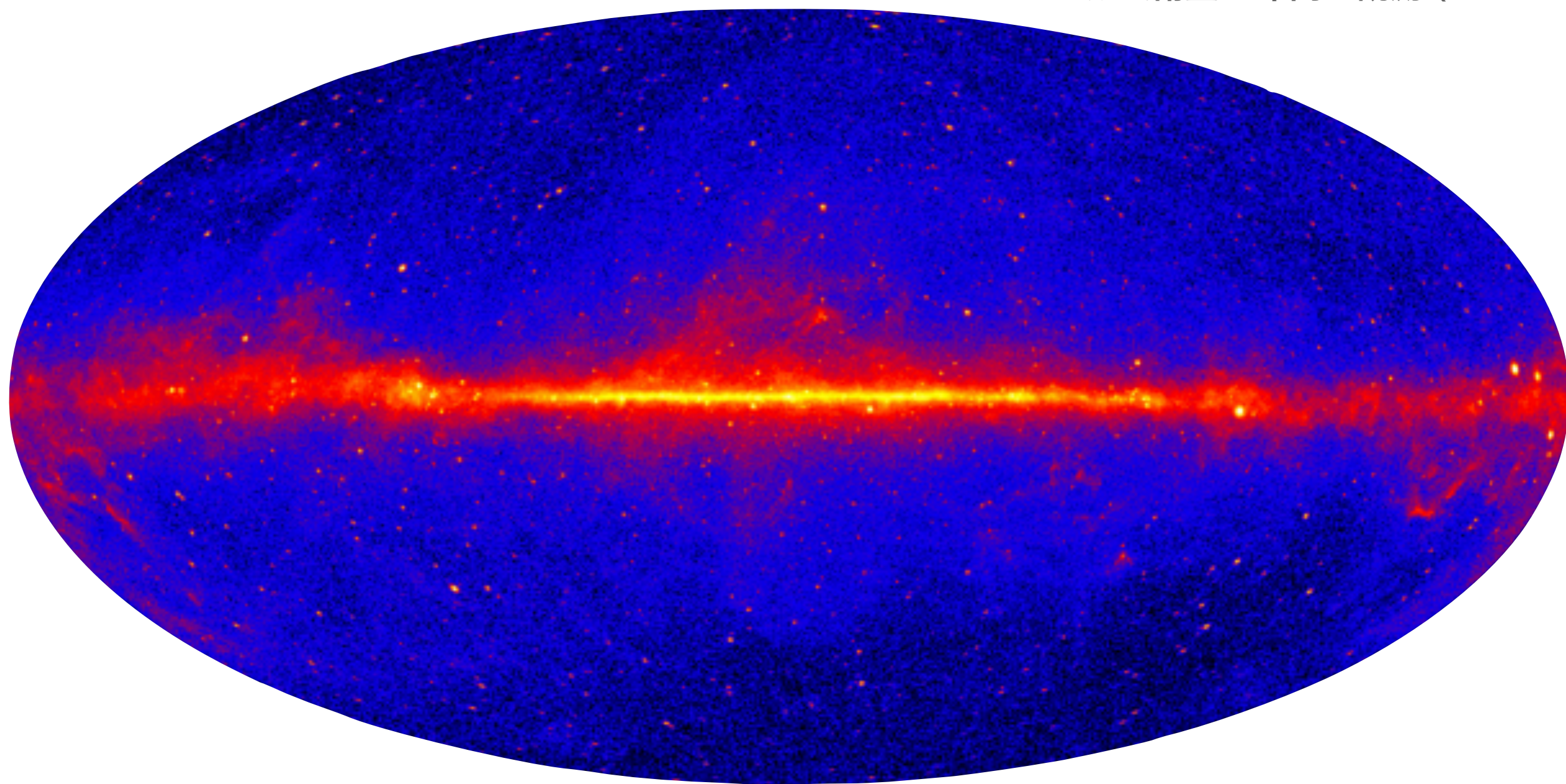
密度の二乗に比例

課題 3

- WIMP の対消滅で期待されるガンマ線の放射強度は、なぜ WIMP 密度の 2 乗に比例するかを、定性的に説明せよ

ガンマ線で観た宇宙

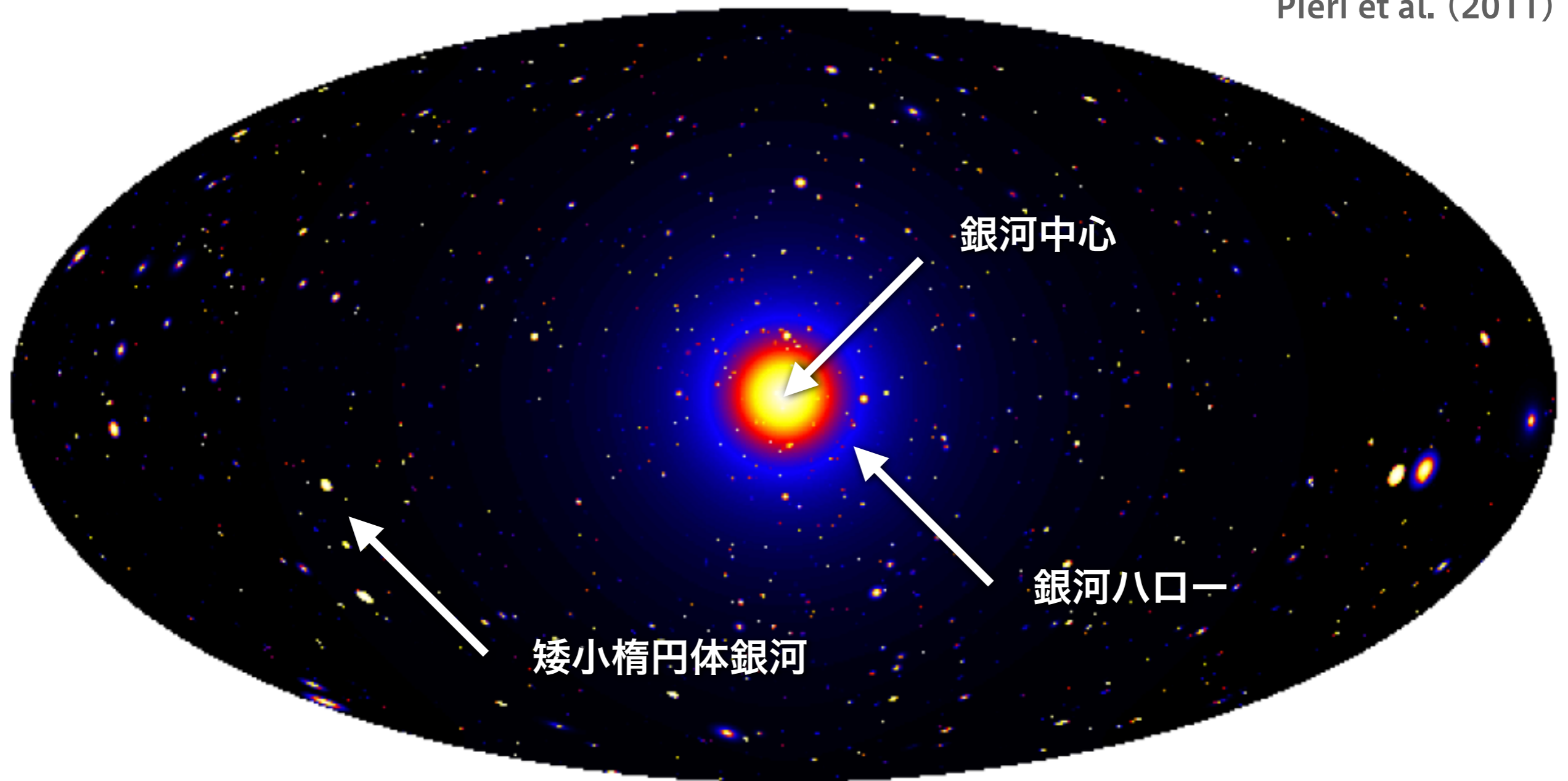
フェルミ衛星 7 年間の観測 (> 1 GeV)



- 数千におよぶ高エネルギー天体（点源）からのガンマ線放射
- 星間ガスと宇宙線陽子の衝突で生じるパイ中間子の崩壊によるガンマ線放射
- WIMP 由来のガンマ線が簡単に観えるほど、宇宙はガンマ線で暗くない

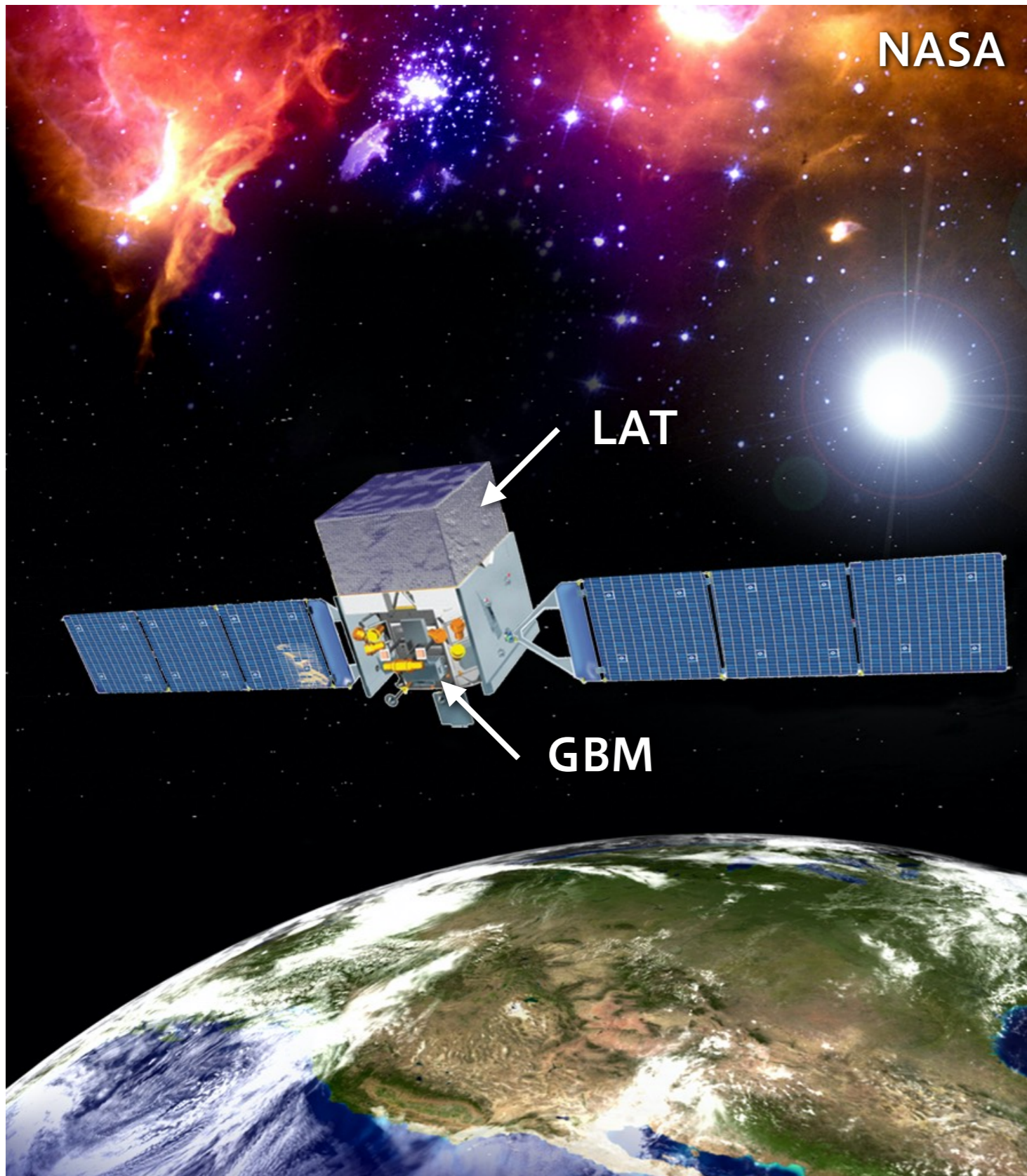
暗黒物質の分布推定

Pieri et al. (2011)



- 銀河中心：高密度の WIMP と高いガンマ線強度が期待、ただし他天体や銀河面からのガンマ線混入が多い
- 銀河ハロー：比較的高密度だが、銀河面からのガンマ線混入が多い
- 矮小楕円体銀河：密度は低いが、自身のガンマ線放射が非常に小さく銀河面からも離れている

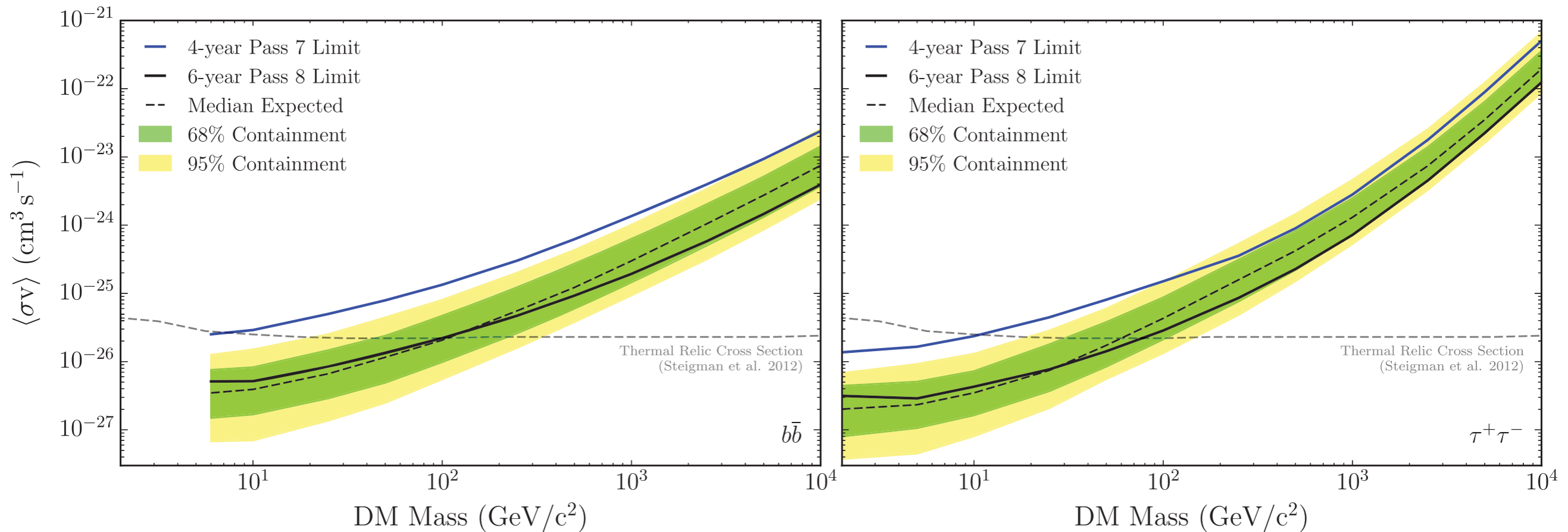
フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡



- 2008年にNASAによって打ち上げられた人工衛星
- 大面積望遠鏡 (Large Area Telescope、LAT) とガンマ線バーストモニター (Gamma-ray Burst Monitor、GBM) の2種類を搭載
- LATは20 MeV~300 GeVのガンマ線を全天サーベイ観測する
- 日米欧の国際共同

LAT による WIMP 対消滅断面積の上限

Ackermann et al. (2015)

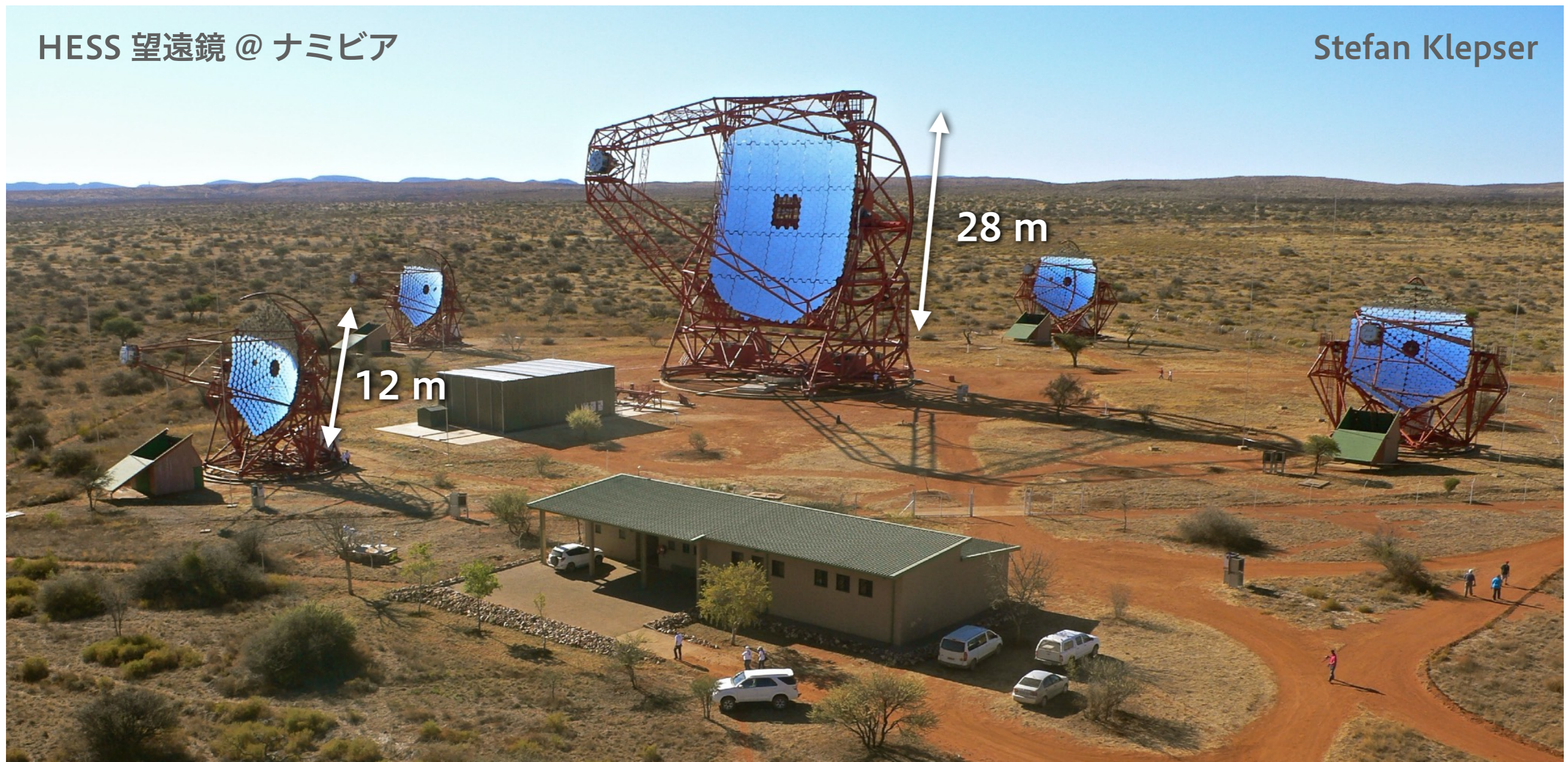


- 15 の矮小楕円体銀河からは有意なガンマ線放射が検出されなかった (対消滅断面積の上限値を与えた)
- WIMP の正体が謎のため、最終的にどのようにガンマ線に行くかが分からない
- $b\bar{b}$ 、 $\tau^+\tau^-$ の終状態の場合などに分けて上限をつける
- すでに、 $100 \text{ GeV}/c^2$ 以下の質量範囲では $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ より強い制限

解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging atmospheric Cherenkov Tel.)

HESS 望遠鏡 @ ナミビア

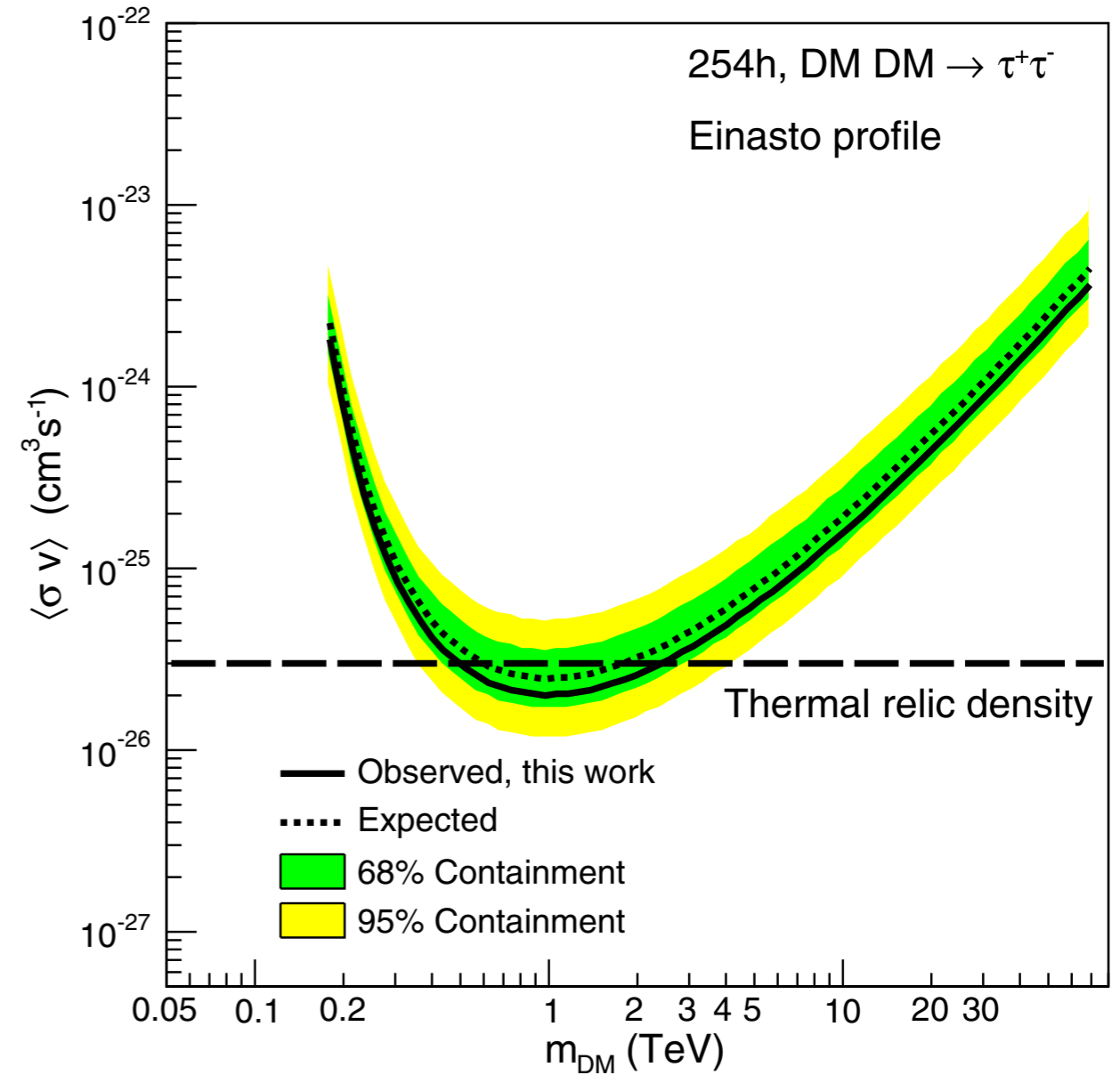
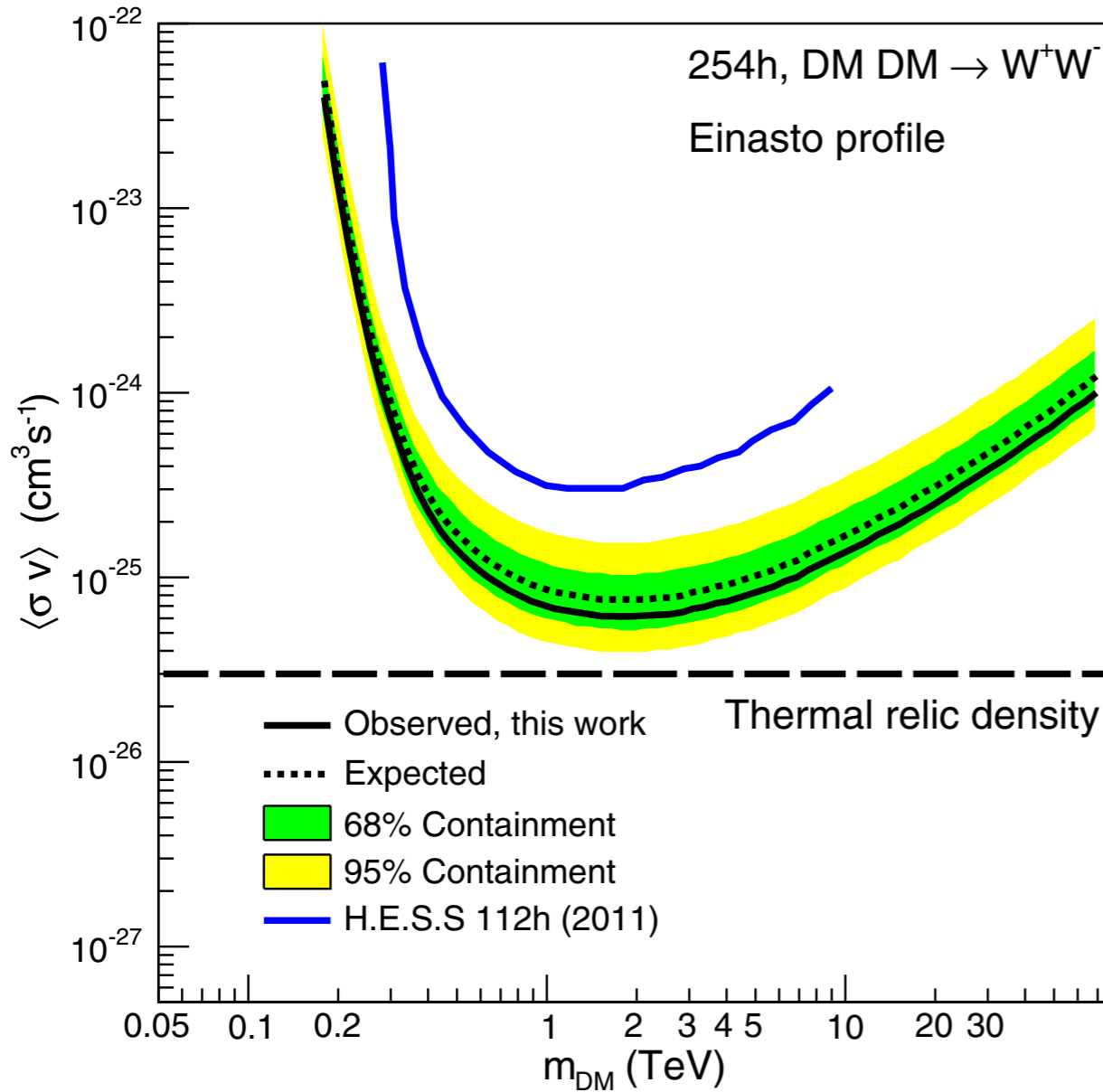
Stefan Klepser



- 超高エネルギーガンマ線が大気中で生じる電磁カスケード（電子・陽電子対とガンマ線で構成、空気シャワー）を観測する
- 空気シャワー中で生じる 300~500 nm の紫外・可視光を巨大望遠鏡で撮影
- 大型のものは HESS 望遠鏡 (4 + 1 台)、MAGIC 望遠鏡 (2 台)、VERITAS 望遠鏡 (4 台) が稼働中

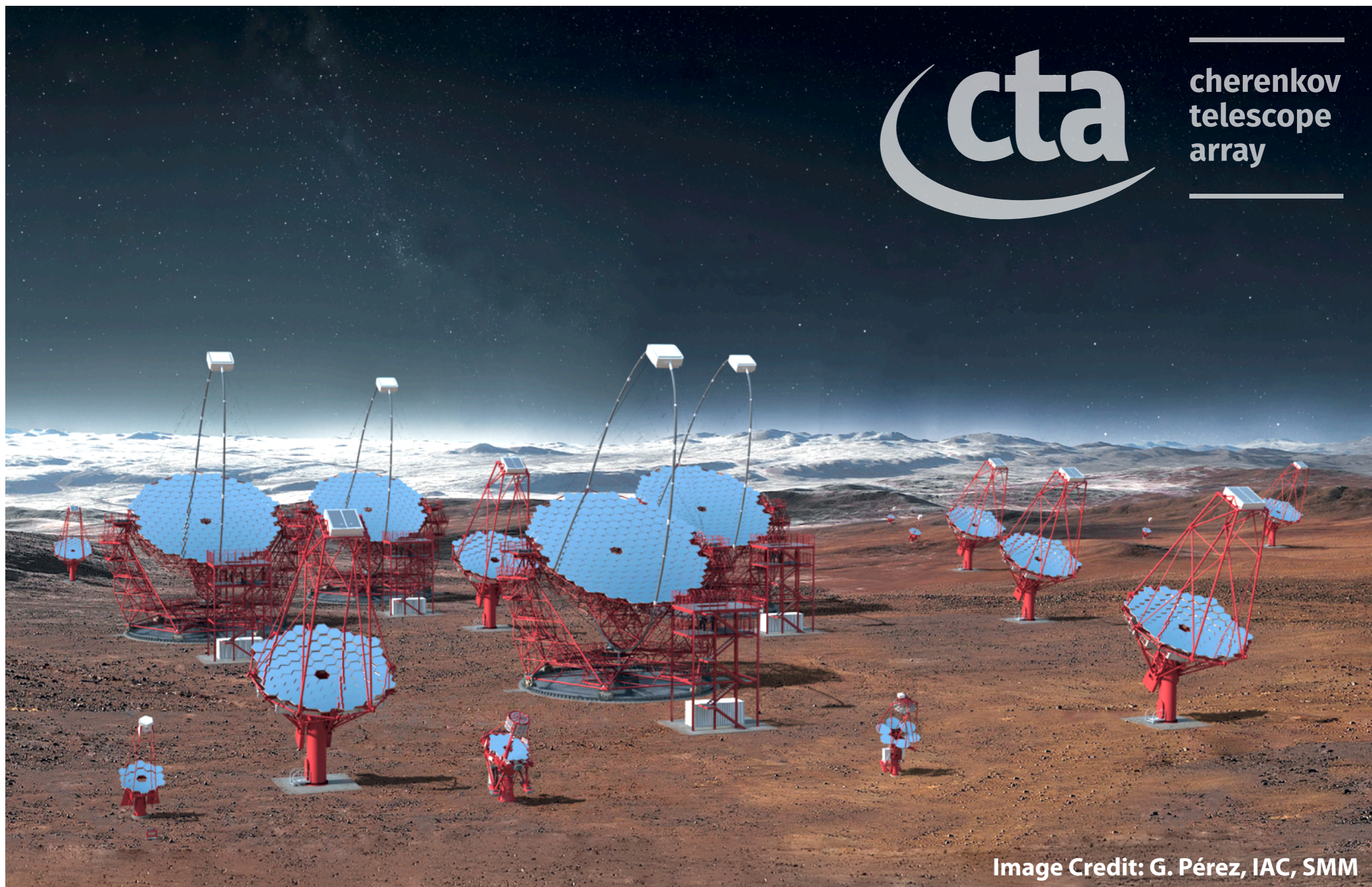
HESS 望遠鏡による WIMP 対消滅断面積の上限

HESS Collaboration (2016)



- ポインティング観測のため、フェルミ衛星ほど多数の矮小楕円体銀河を観測できない → 銀河中心ハローを長時間観測
- TeV/c^2 の質量領域で、 $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ に迫る
- フェルミ衛星の結果と合わせると、 $1 \text{ TeV}/c^2$ 以上の質量が残る領域か？

チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array、CTA)



cta

cherenkov
telescope
array

Image Credit: G. Pérez, IAC, SMM

チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array、CTA)

超高エネルギーガンマ線
(20 GeV ~ 300 TeV)

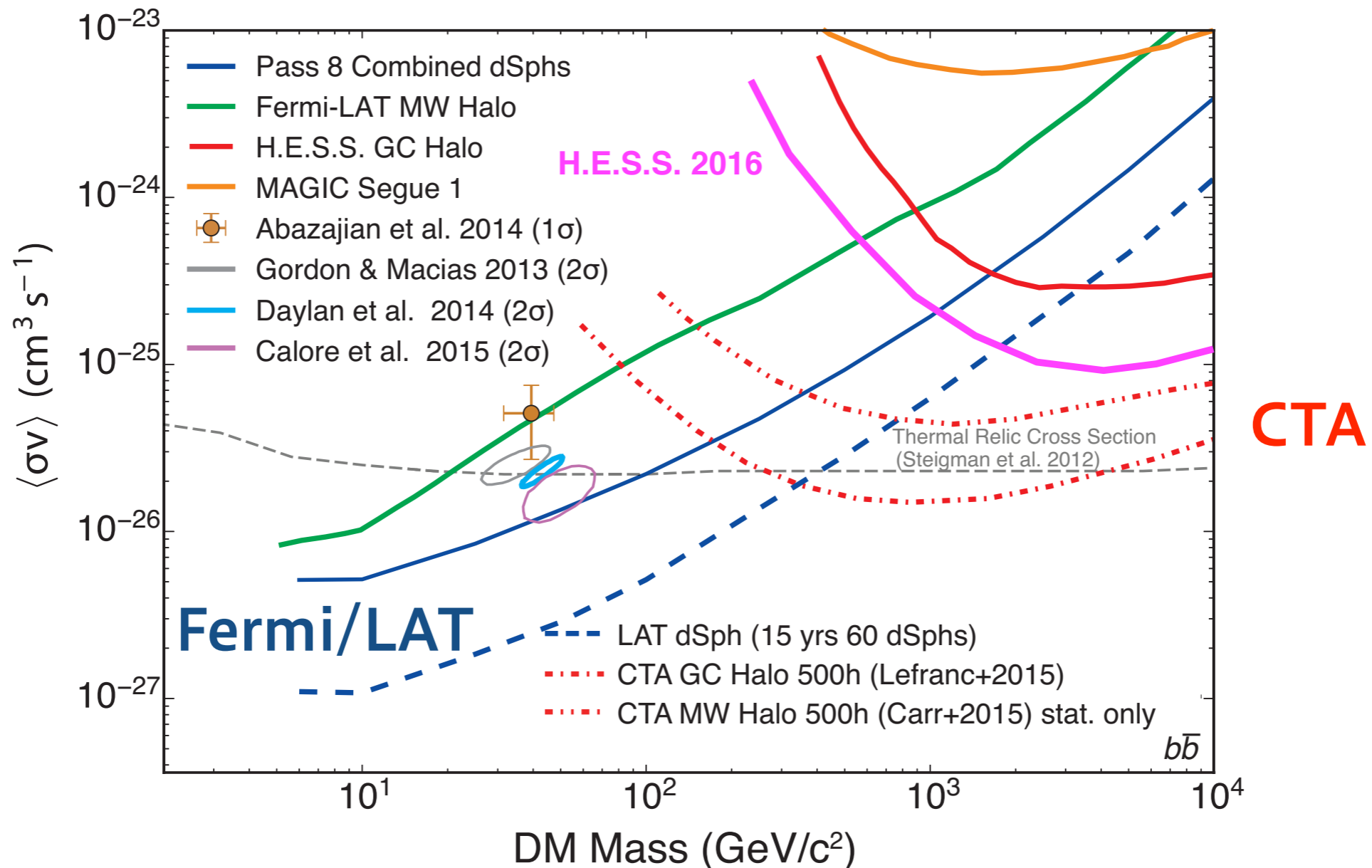
電磁カスケード
(対生成、制動放射)

大気チェレンコフ光の光量 \propto 入射エネルギー
(300~600 nm, 5~20 ns)

R ~ 150 m

K. Bernlöhr

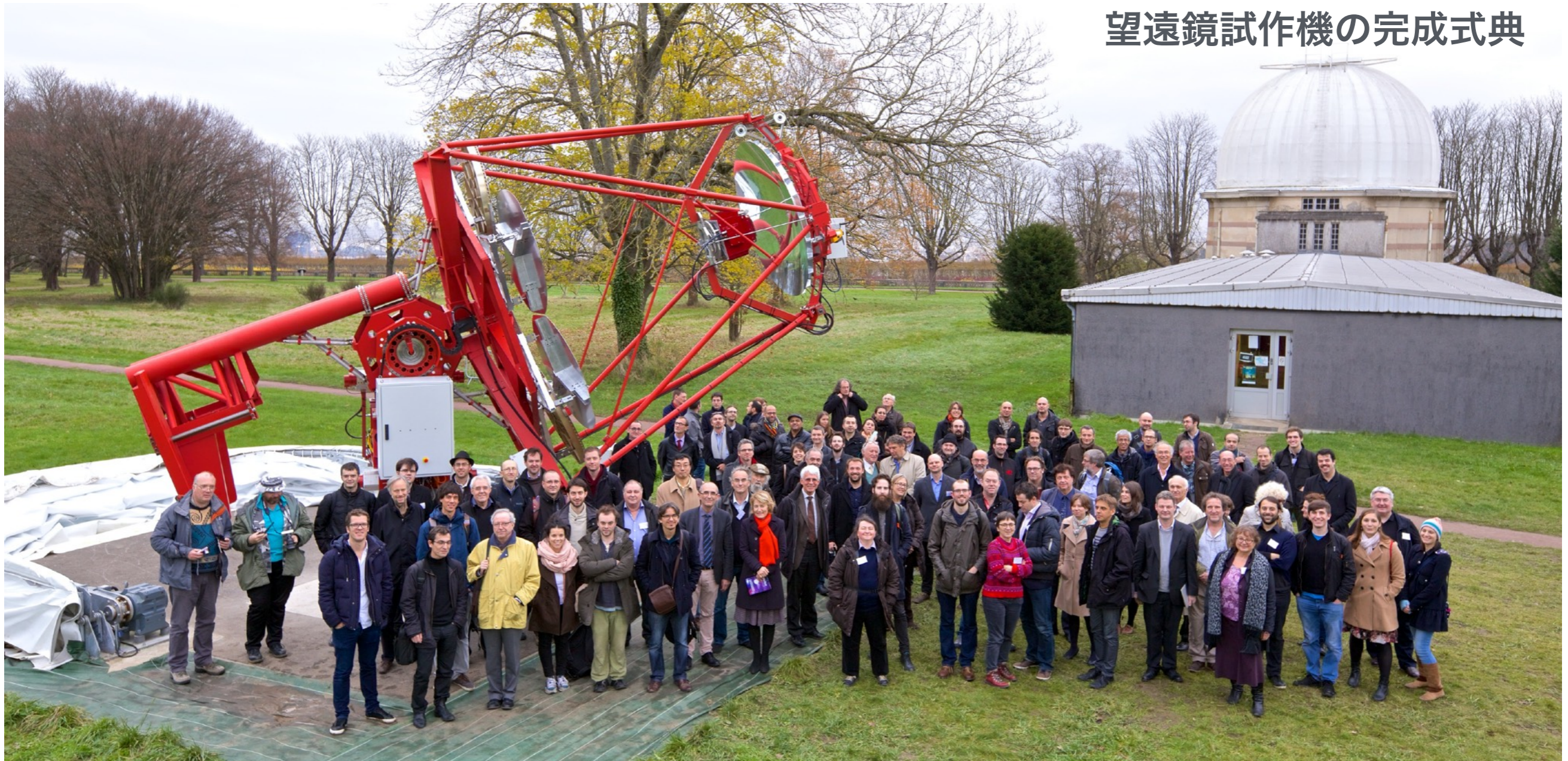
CTA で期待される WIMP の発見



- フェルミ衛星の継続的な観測と、CTA の長時間観測によって、10 TeV/c² の質量範囲まで高感度 WIMP 探査が可能になる (2020 年代)
- CTA では現行の望遠鏡よりおよそ 1 桁感度が向上
- 近年、矮小楕円体銀河も新たに発見され続けている
- WIMP 以外のガンマ線放射の定量的理解が、特に銀河中心周辺で重要

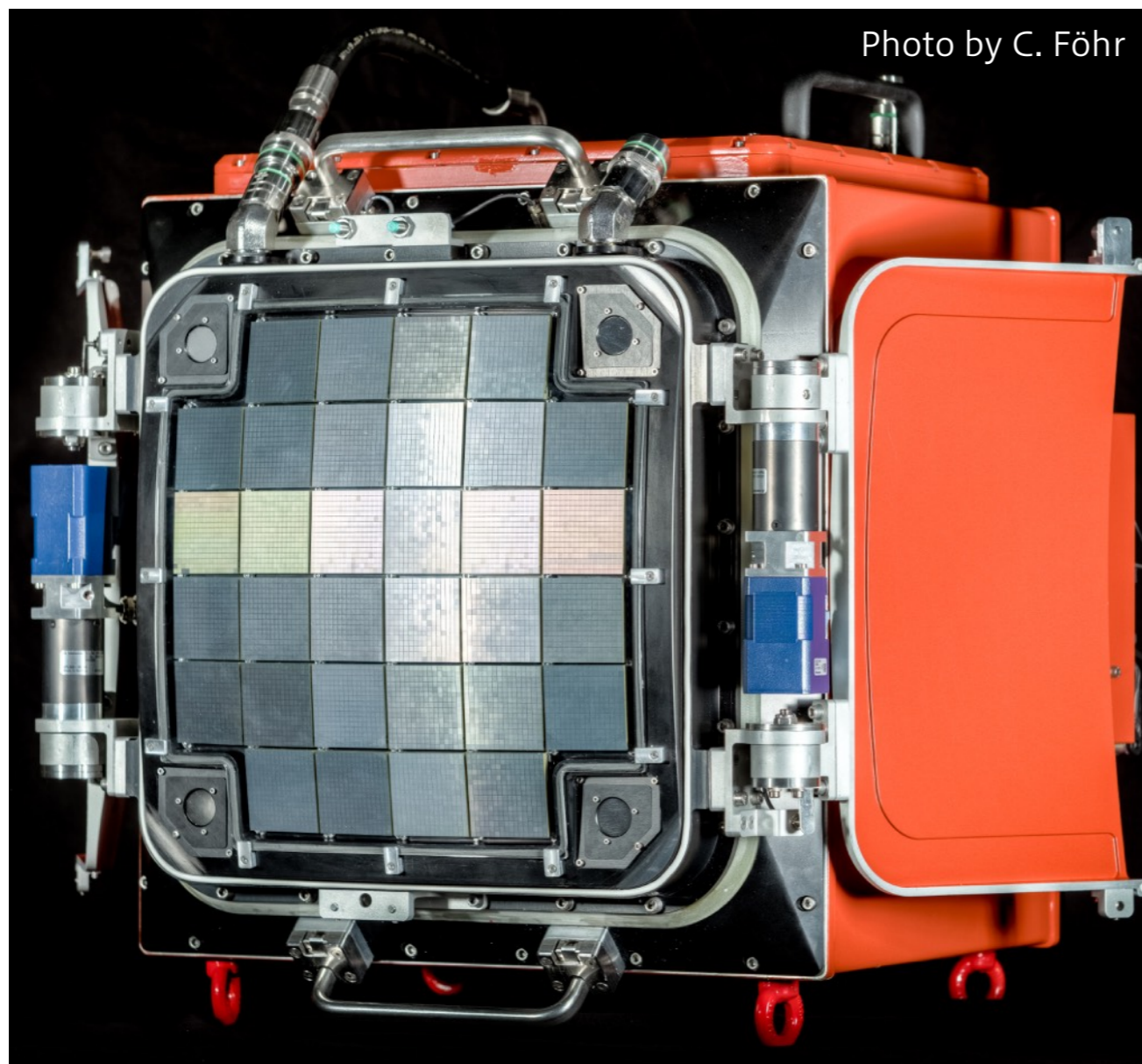
CR 研での CTA 開発

望遠鏡試作機の完成式典

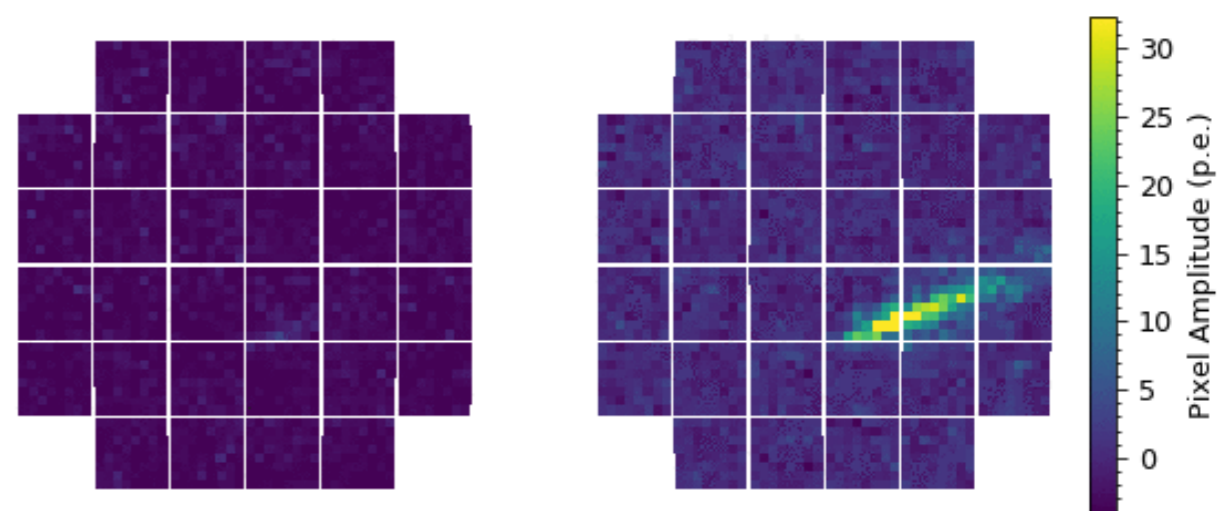


- 1400 人、31 カ国の国際共同研究
- 名古屋大学 CR 研では、焦点面カメラの開発（光検出器、ソフトウェア、エレクトロニクス）、光学系の開発などを担当（奥村、田島）
- 3 種類の異なる口径の望遠鏡開発に参加

10億分の1秒ごとの動画を撮る技術

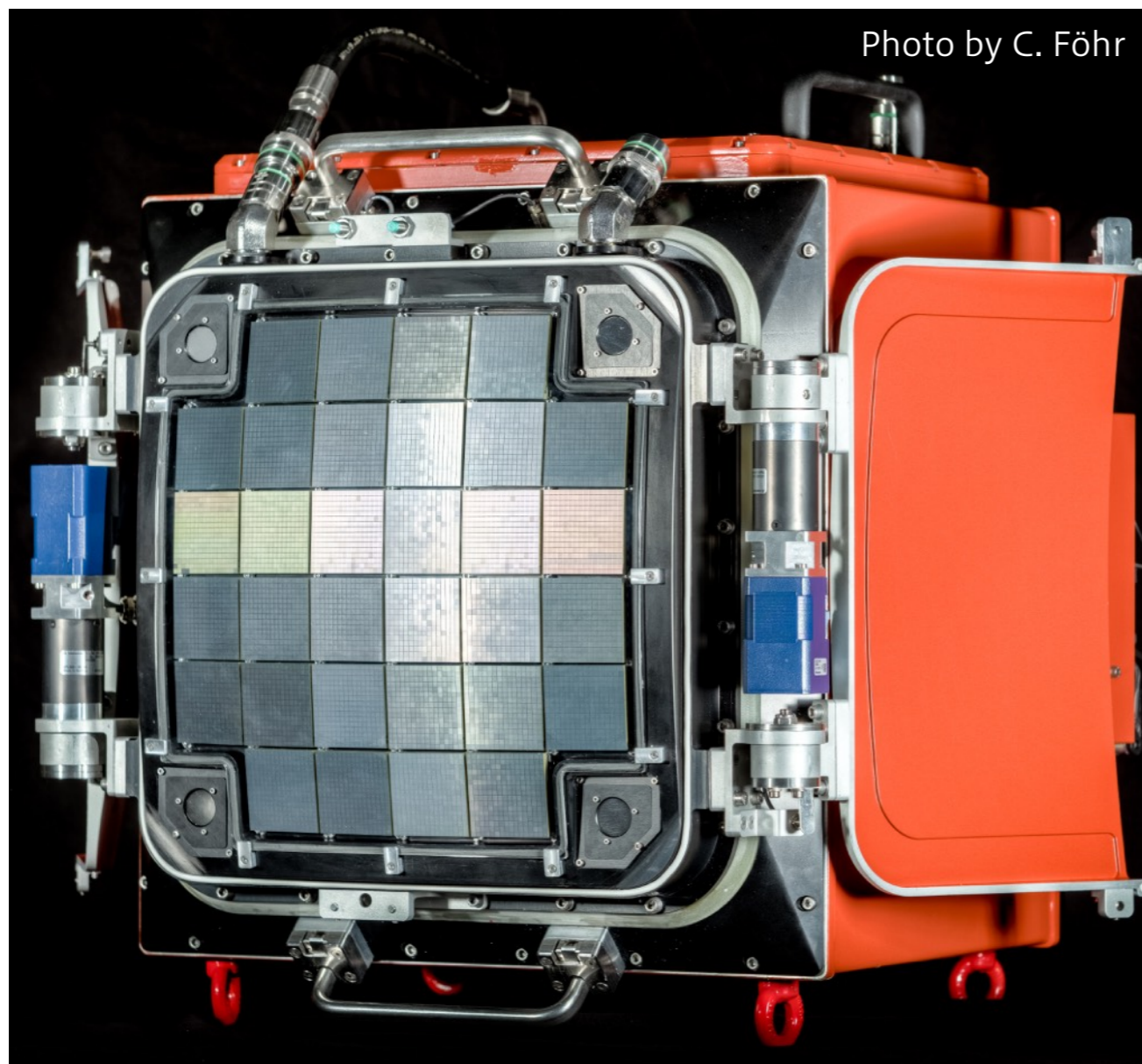


試作カメラでのチェレンコフ光撮影例

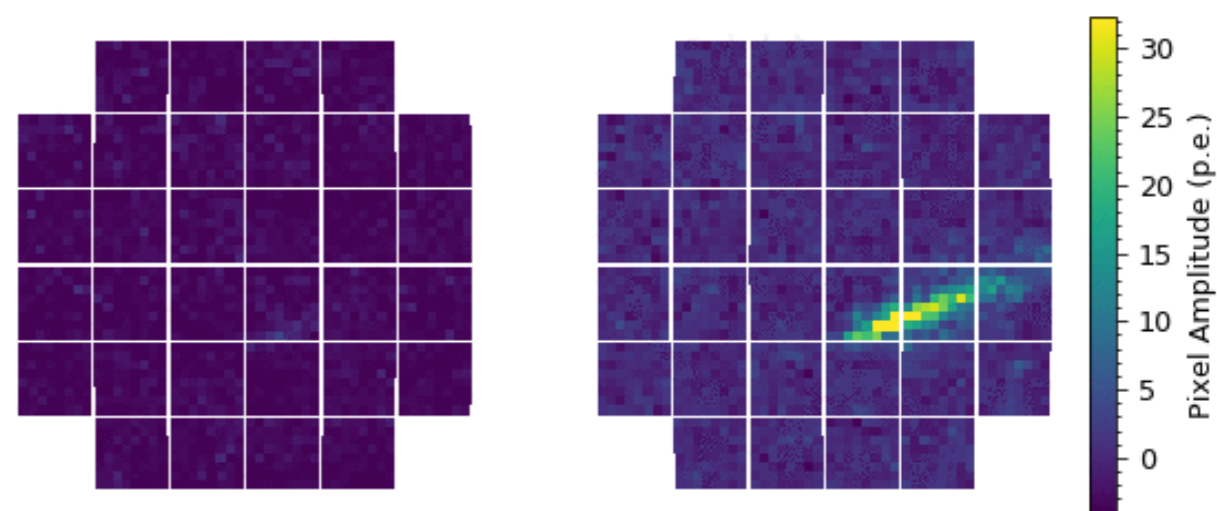


- 5～20 ナノ秒 (ns) しか継続しない大気チェレンコフ光を撮像するには、10億分の1秒 (1 ns) ごとに1フレームを撮影できる高速カメラが必要
- 多チャンネルの半導体光検出器と独自開発の集積回路の組み合わせ
- <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/result/2019/06/28/CHEC-S-First-Light.html>
(リンクをクリックすると、CR研のウェブサイト動画を観られます)

10億分の1秒ごとの動画を撮る技術



試作カメラでのチェレンコフ光撮影例



- 5～20 ナノ秒 (ns) しか継続しない大気チェレンコフ光を撮像するには、10億分の1秒 (1 ns) ごとに1フレームを撮影できる高速カメラが必要
- 多チャンネルの半導体光検出器と独自開発の集積回路の組み合わせ
- <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/result/2019/06/28/CHEC-S-First-Light.html>
(リンクをクリックすると、CR研のウェブサイト動画を観られます)

CTA 大口径望遠鏡 (23 m)



- 低エネルギー（と言っても 20 GeV 以上）のガンマ線を観測する
- すでに 1 台がカナリア諸島に完成し、2~4 台目の建設準備中
- <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/result/2018/11/05/LST-Inauguration.html>

レポート課題

- 途中に示した課題 1～3 (p20、 p34、 p53) を全て提出せよ (採点対象)
 - ▶ あまり難しく考える必要はない
 - ▶ 合計で 20 分以下の所要時間を想定
- 講義中に質問をした人は、念のためそのことを記しておいてください (加
点対象)
- 講義の感想 (**採点対象外**)
 - ▶ 書かなくても良い
 - ▶ ネガティブなものも大歓迎 (改善点、分かりにくかった点など)
 - ▶ コロナ禍での大学対応の不満や (本科目を含む) 講義形式の不満でも良い
 - ▶ 活発な質問が出る講義にするにはどうすれば良いか
 - ▶ 質問したいことがあっても講義中の質問に躊躇してしまう人がいれば、どのよう
にしたら良いかの提案など
- 提出期限：7 月 14 日 (火) 23:59