

～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

宇宙地球環境研究所 宇宙線研究部
(宇宙線物理学研究室 / CR 研)

2019 年 5 月 7 日

宇宙地球環境研究所 (ISEE) の紹介

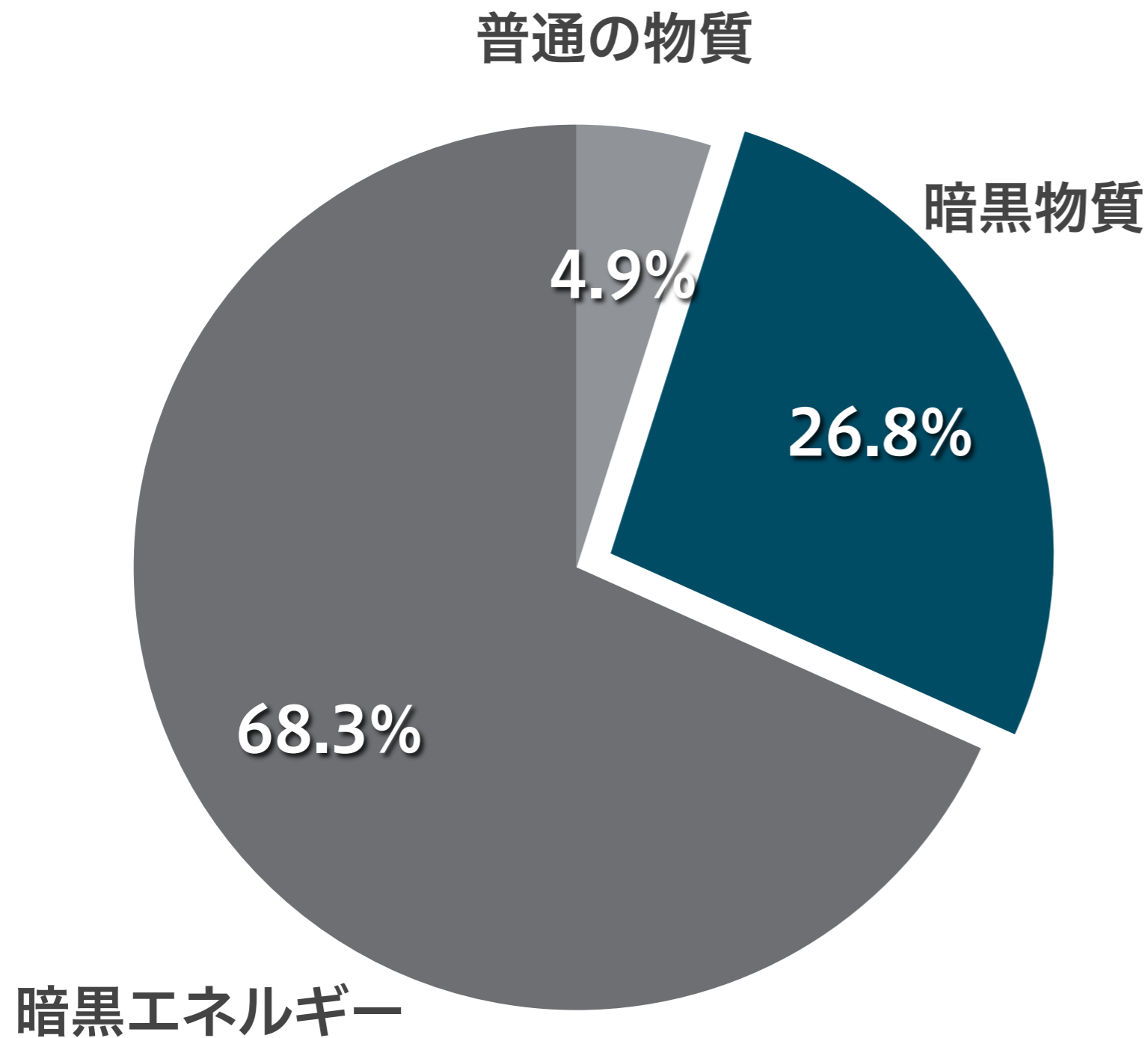


- Institute for Space–Earth Environmental Research (アイシー ISEE)
- 名古屋大学の附置研究所のひとつ（2015年に改組）
- 基礎研究部門のうち、**宇宙線研究部**は物理学教室の宇宙線物理学研究室（CR研）として4年生と大学院生を受け入れ
- CR研では複数の宇宙線実験プロジェクトを行なっている
 - ▶ CTA、Fermi/LAT、LHCf/RHICf、SK/HK、XMASS/XENONnT、太陽中性子望遠鏡、屋久杉 (^{14}C)、MOA 望遠鏡などを幅広く（教員 10 名）
 - ▶ <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/>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



<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~okumura/files/190507DM.pdf>

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

- ▶ 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

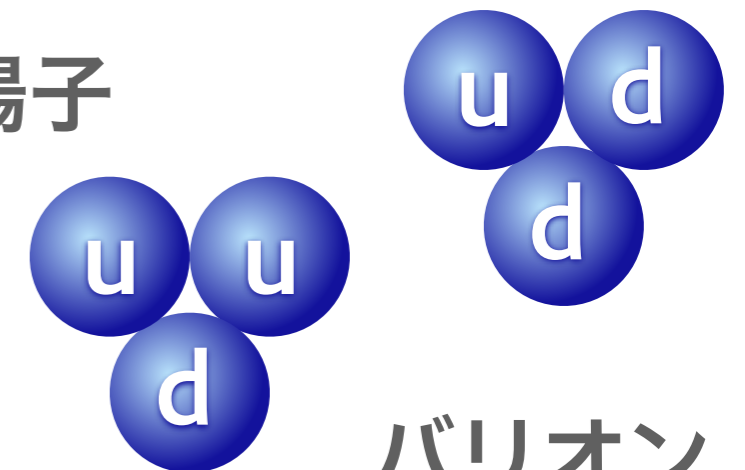
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muon neutrino

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

$\approx 80.38 \text{ GeV}/c^2$
0
1
W
W boson

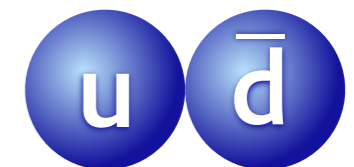
中性子

陽子



バリオン

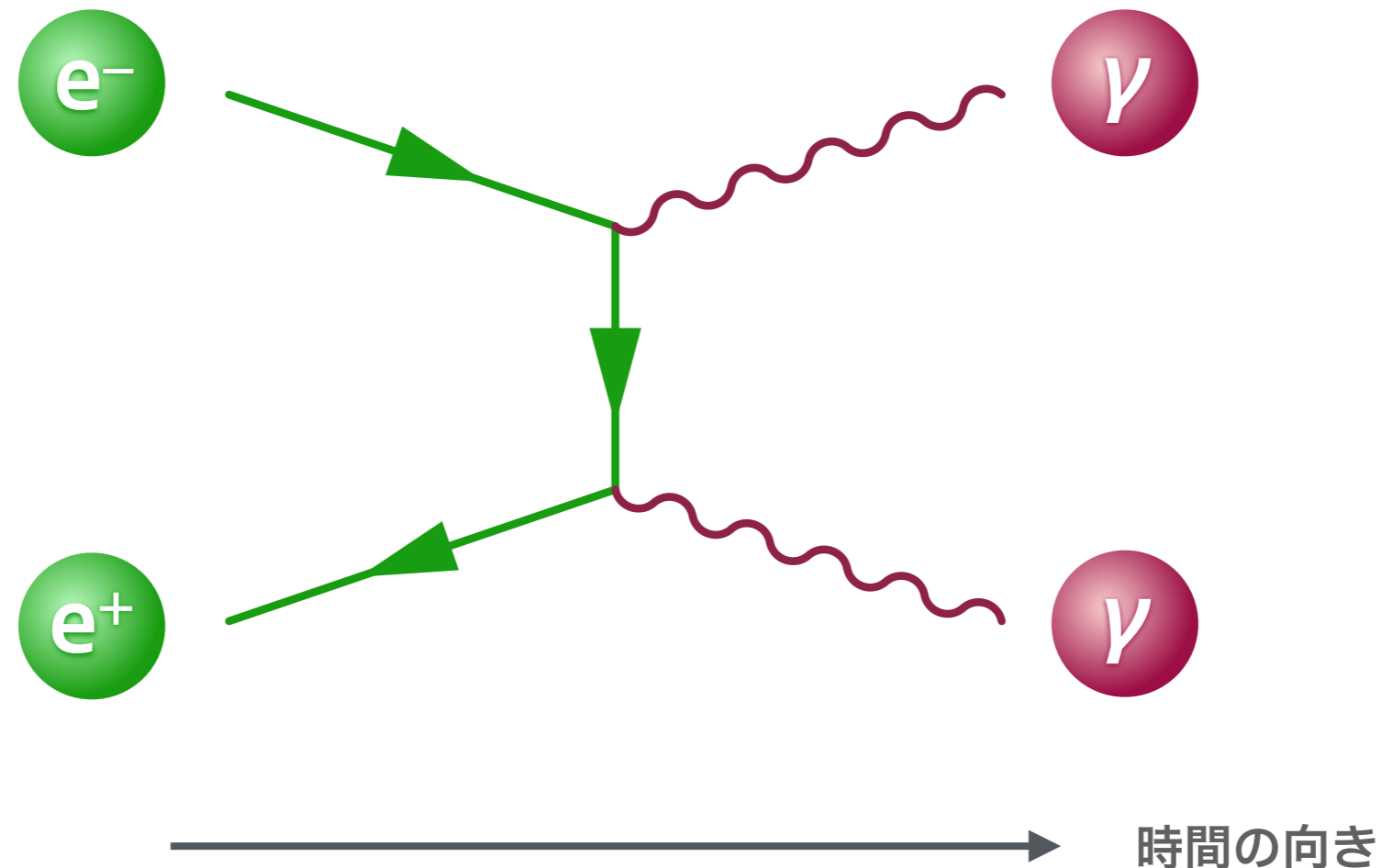
π^+ 中間子



レプトン

電磁相互作用の例

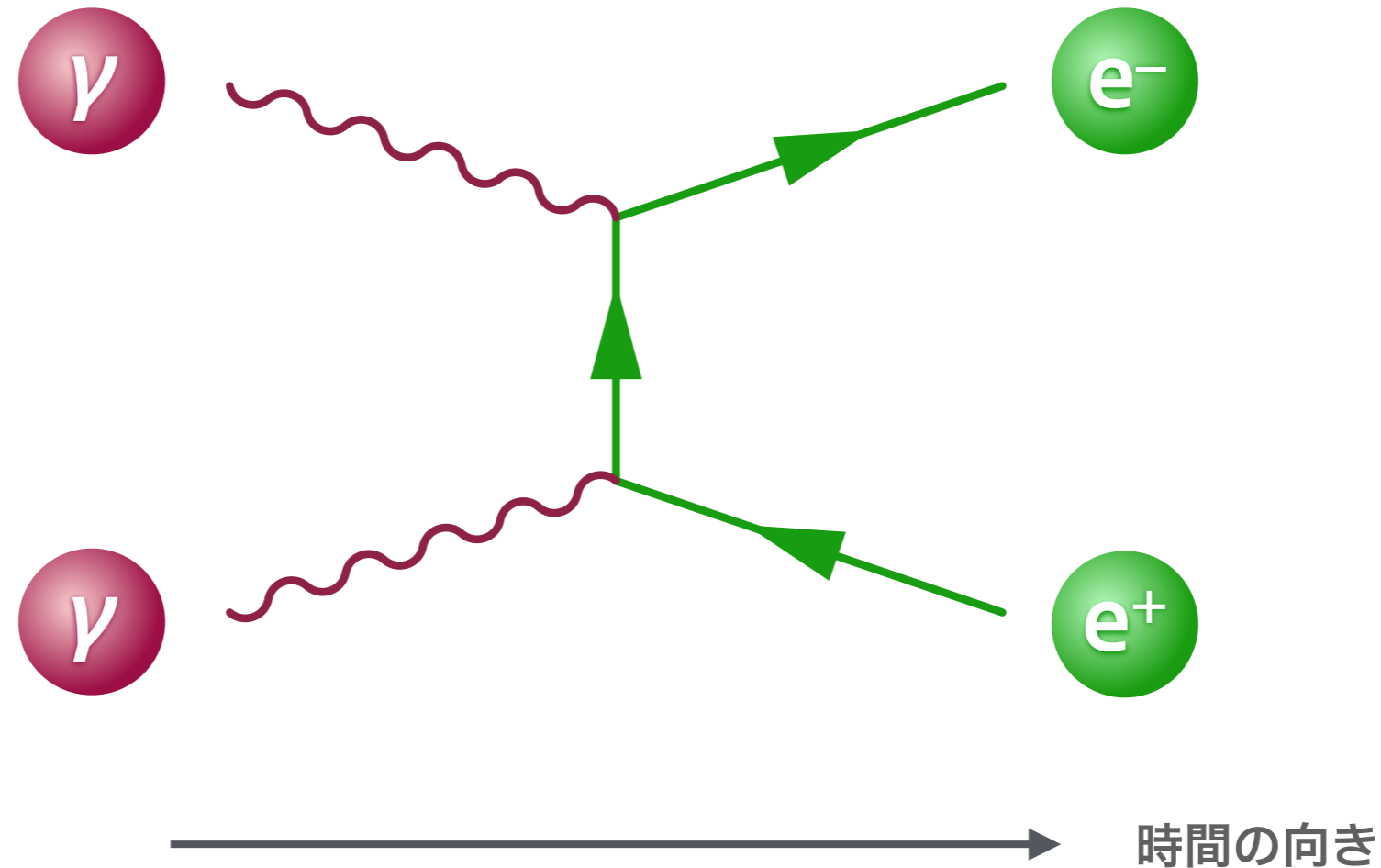
電子対消滅 (pair annihilation)



- 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

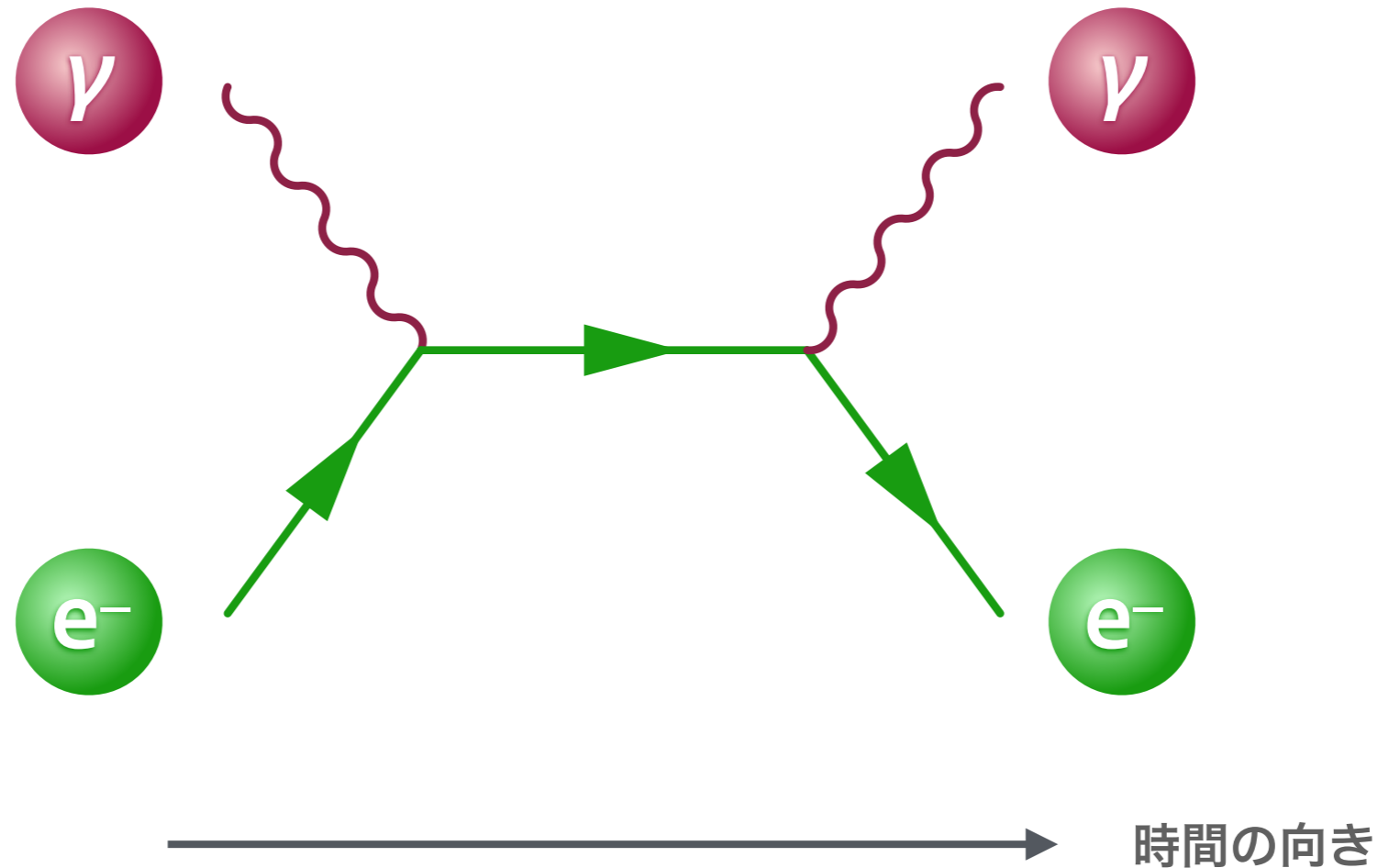
電子対生成 (pair production)



- 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

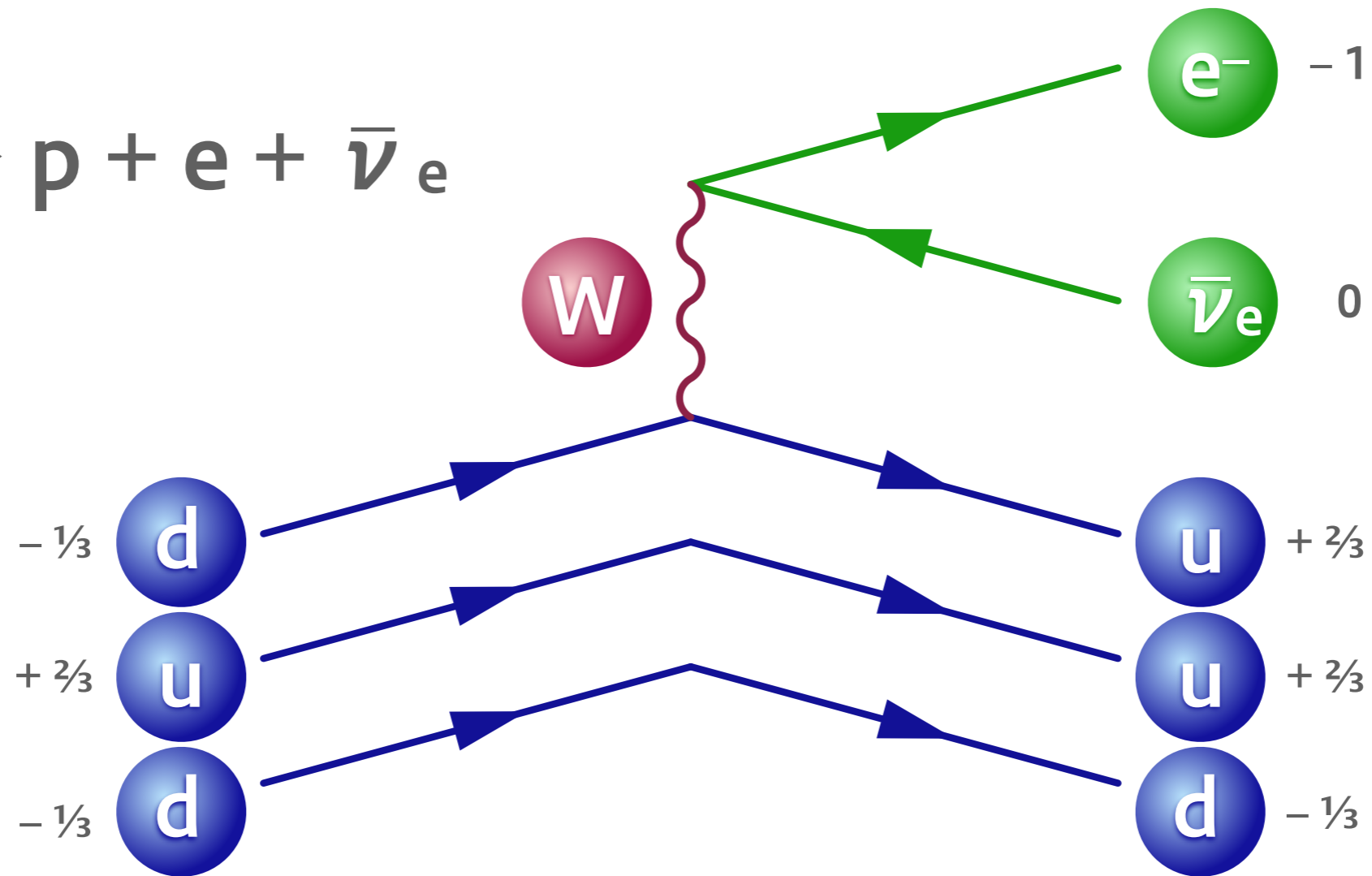
トムソン/コンプトン散乱 (Thomson/Compton scattering)



- 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/Z が媒介粒子

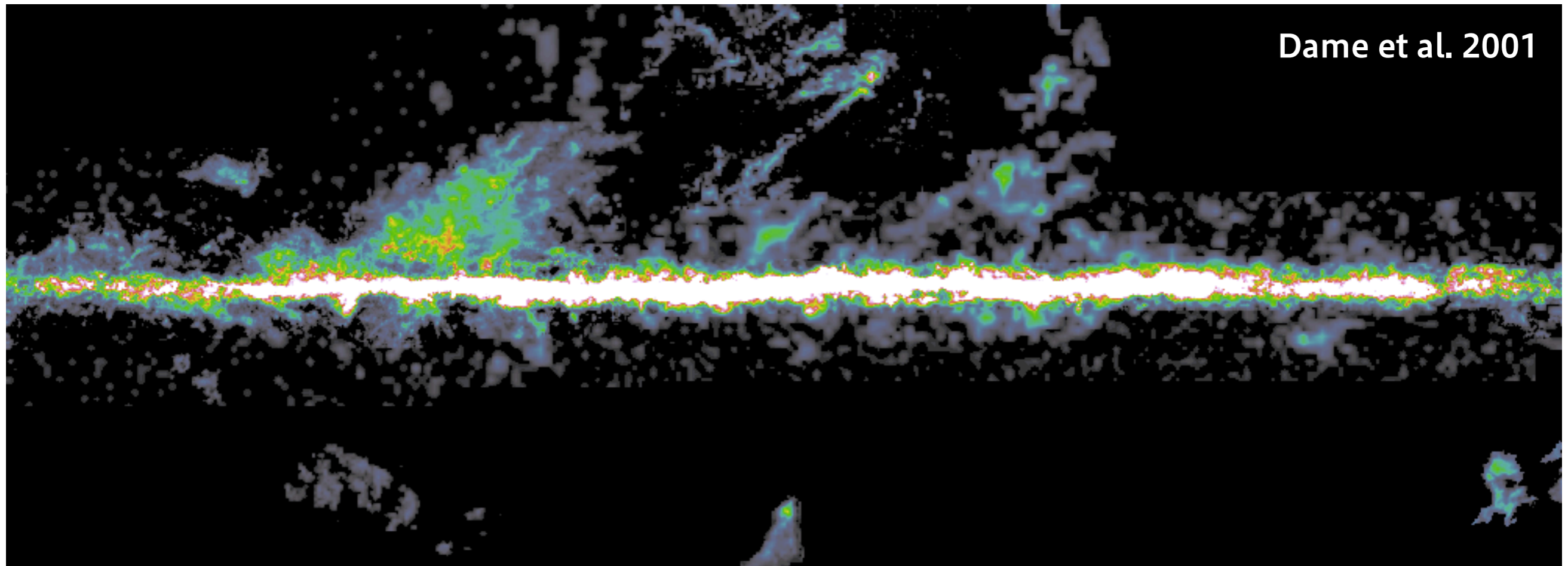
電磁相互作用で観る宇宙（可視光）

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）

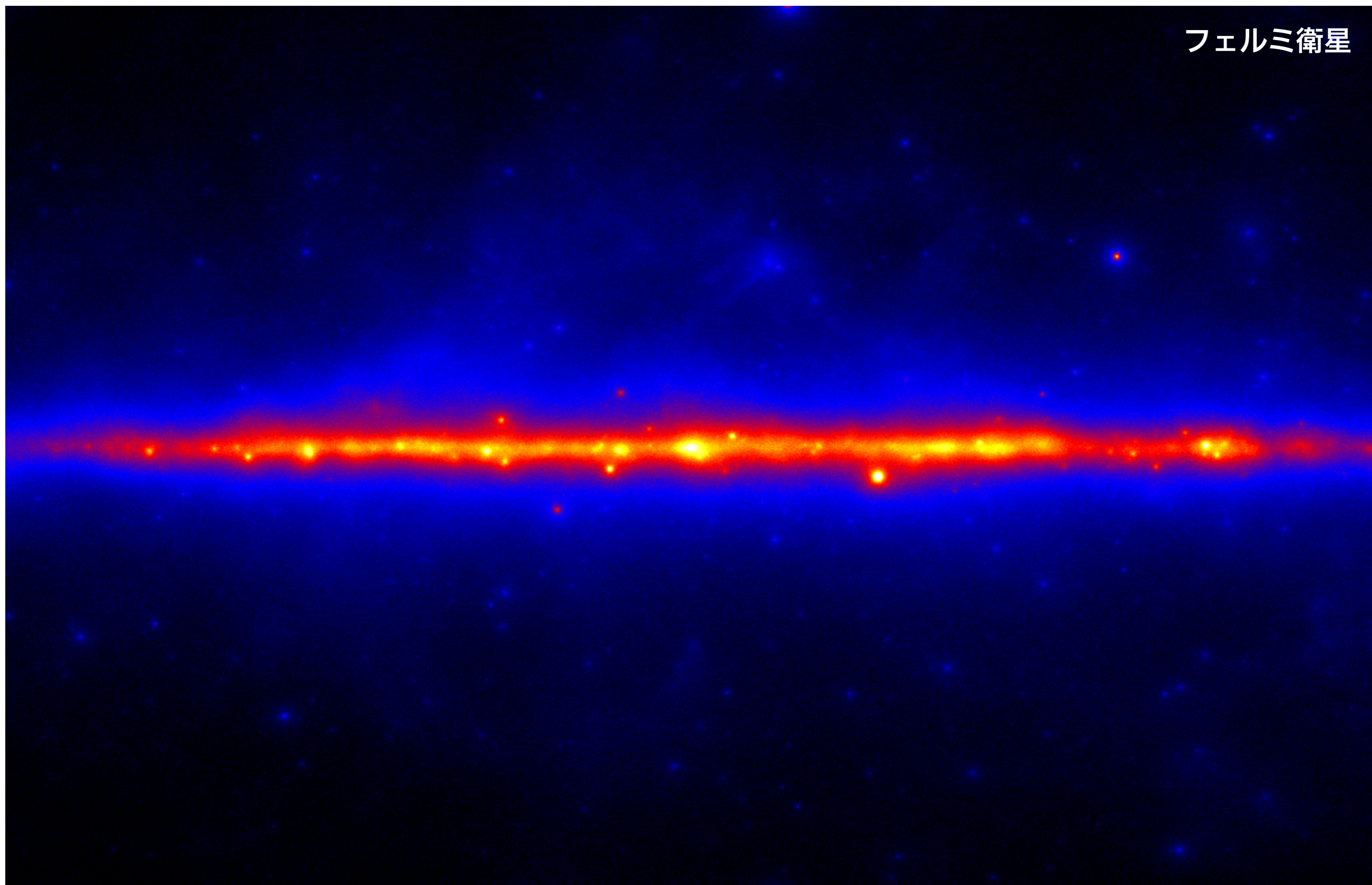
電磁相互作用で観る宇宙（電波）



- 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



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。

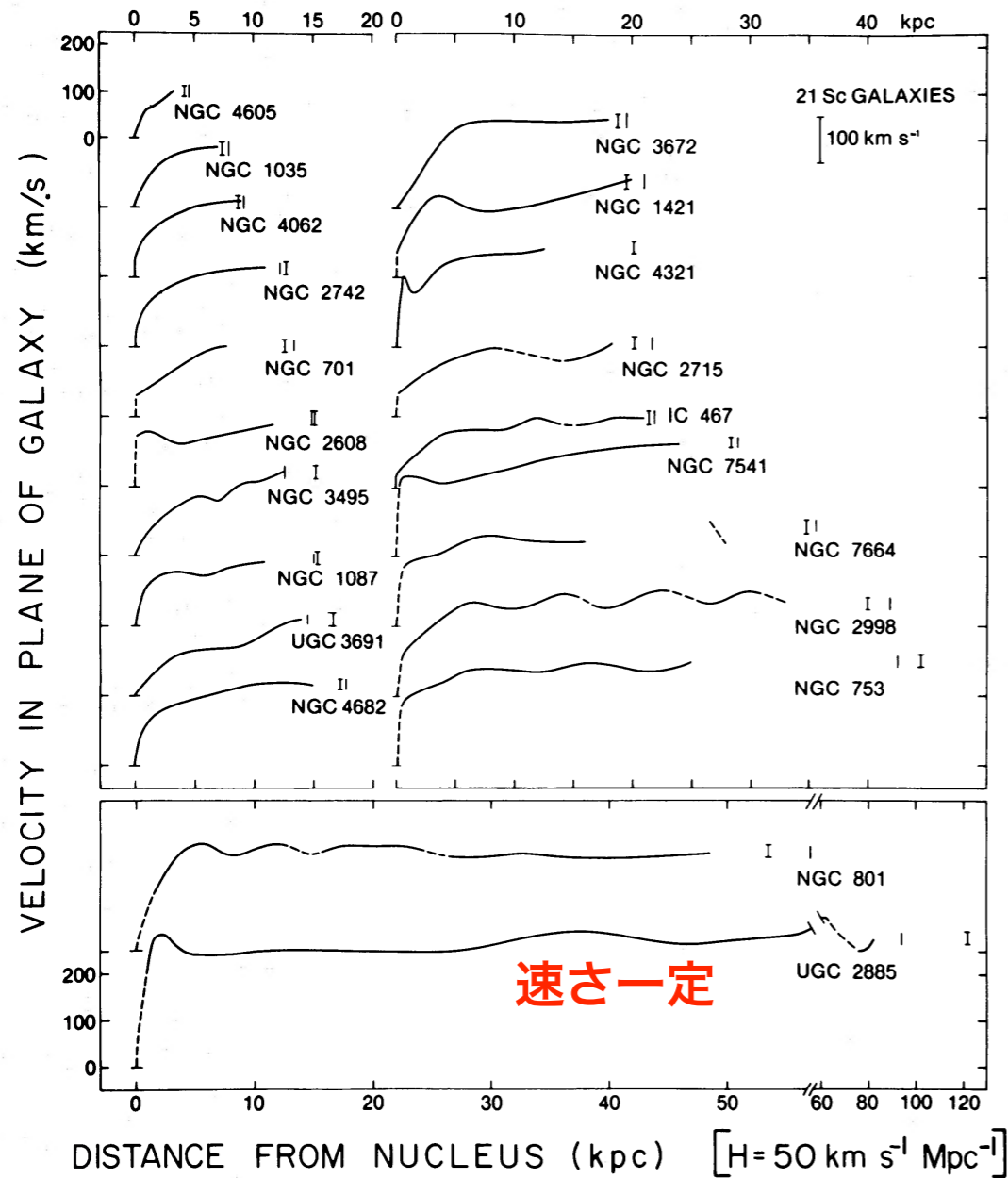
~230 km/s

~2.5 万光年

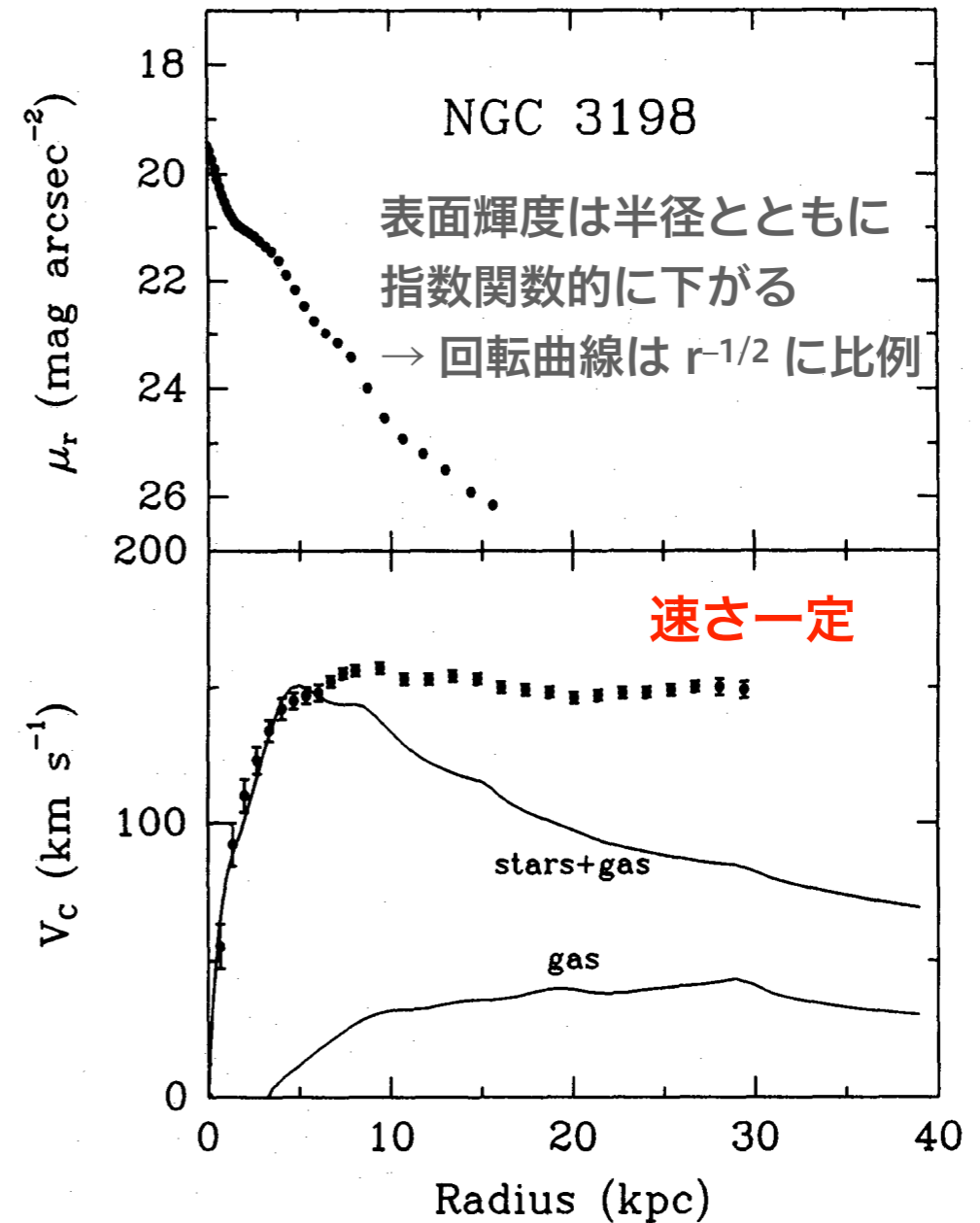
太陽系

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

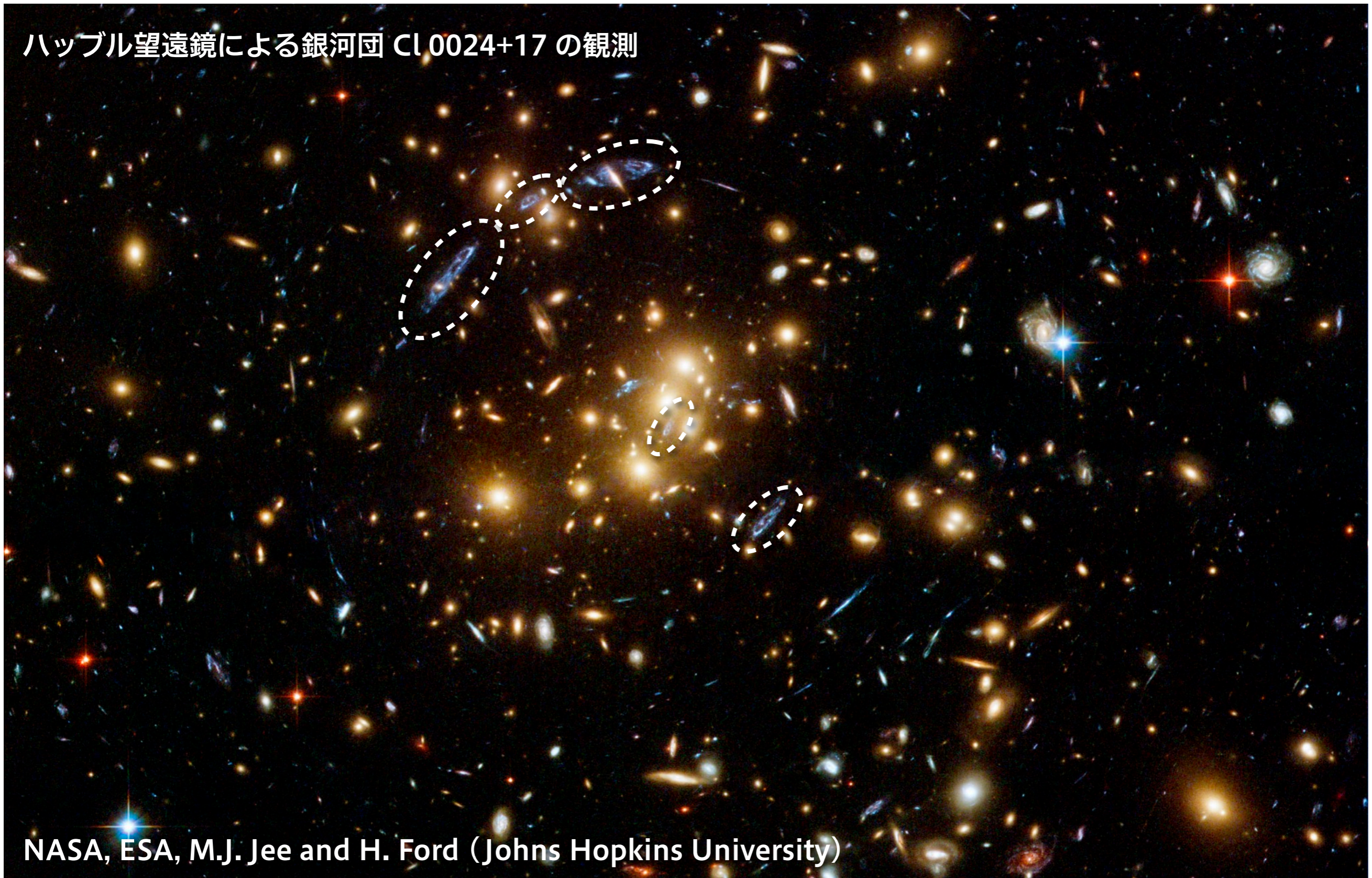
$$v(r) = \text{const.}$$

$$M(r) \propto r$$

これは何だ？

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)

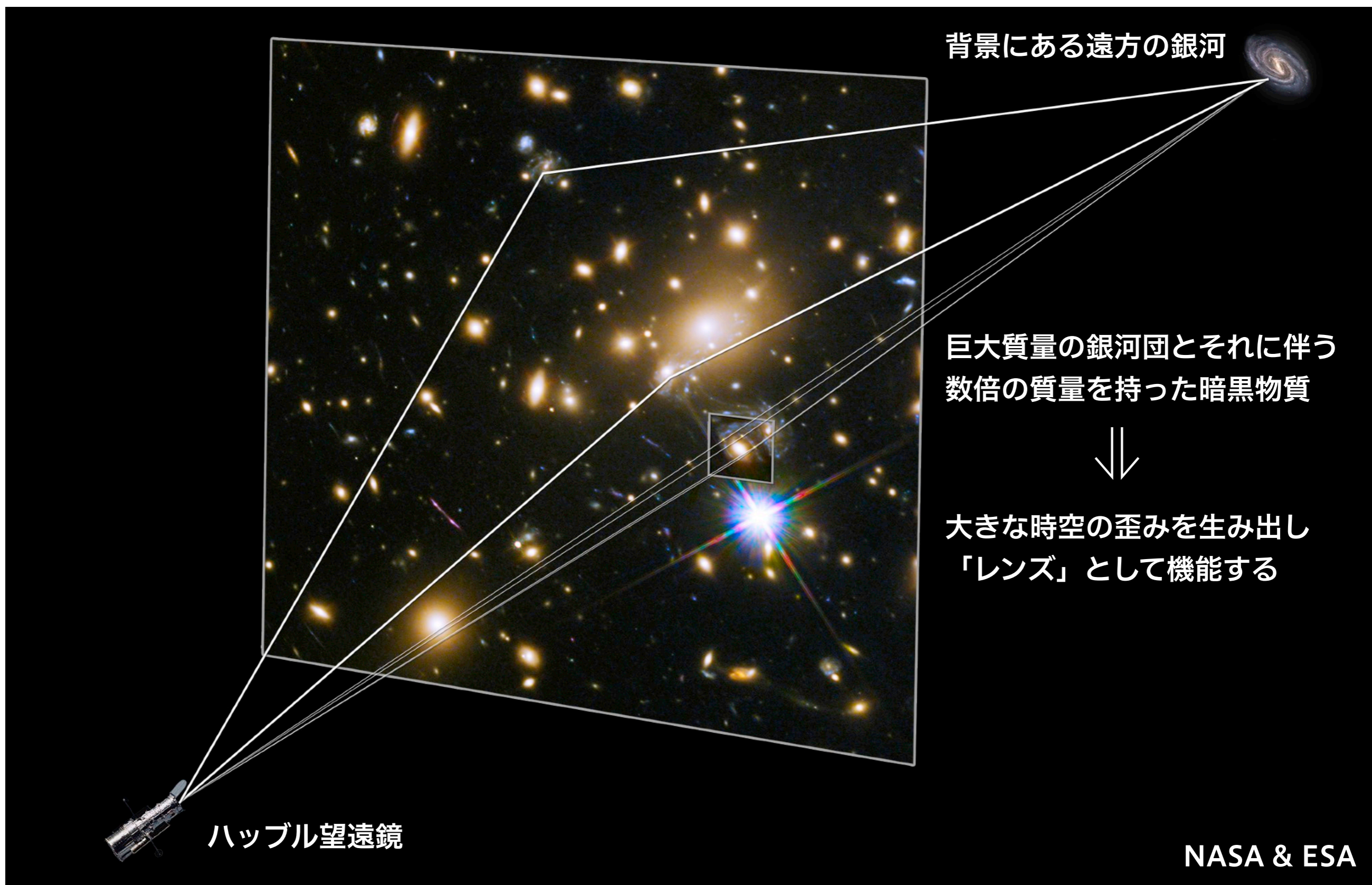
暗黒物質存在の証拠 (2) 重力レンズ効果

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 (2) 重力レンズ効果



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



暗黒物質

物質

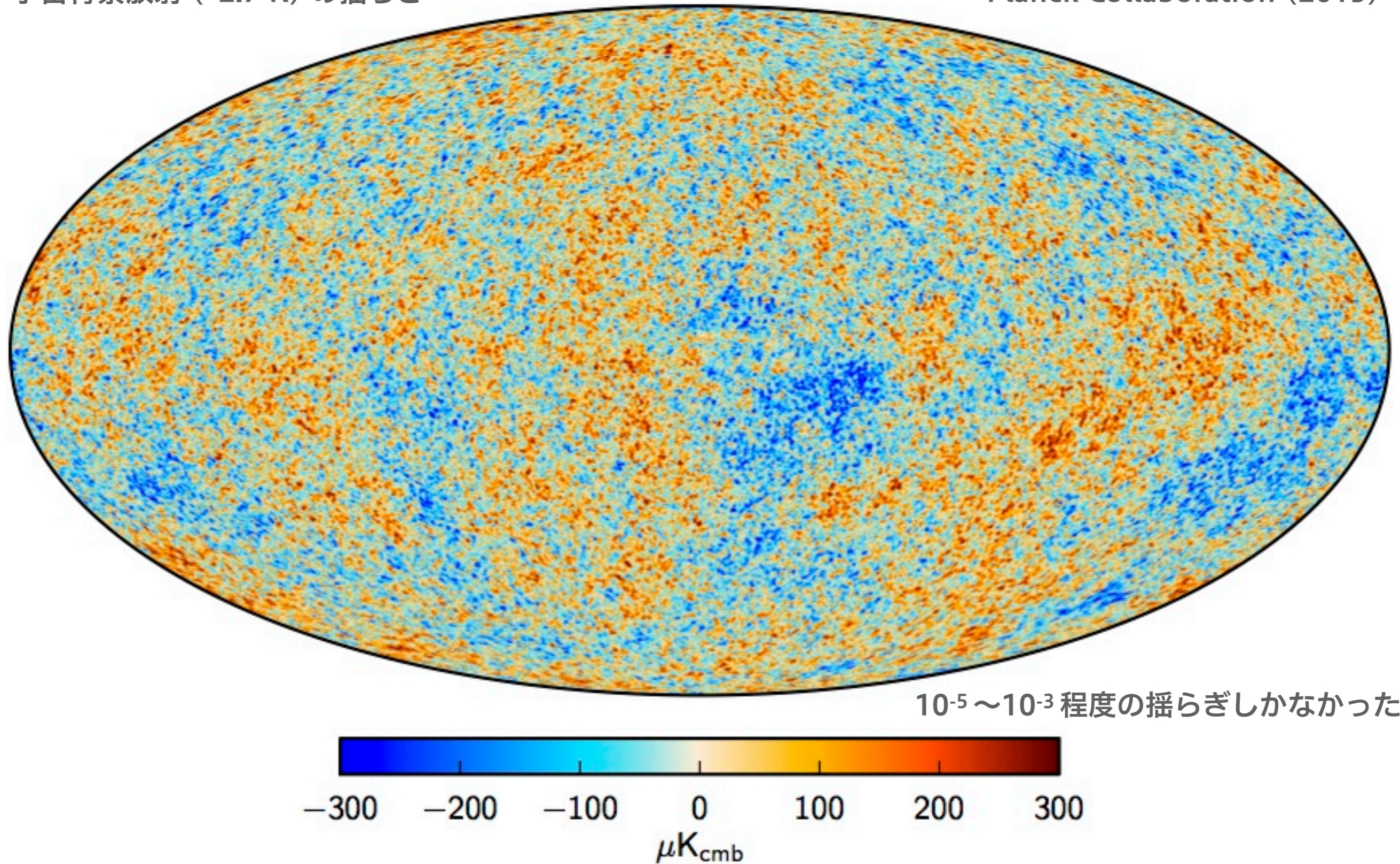
暗黒物質

暗黒物質 (銀河団質量の主成分)
は衝突することなく、すり抜ける

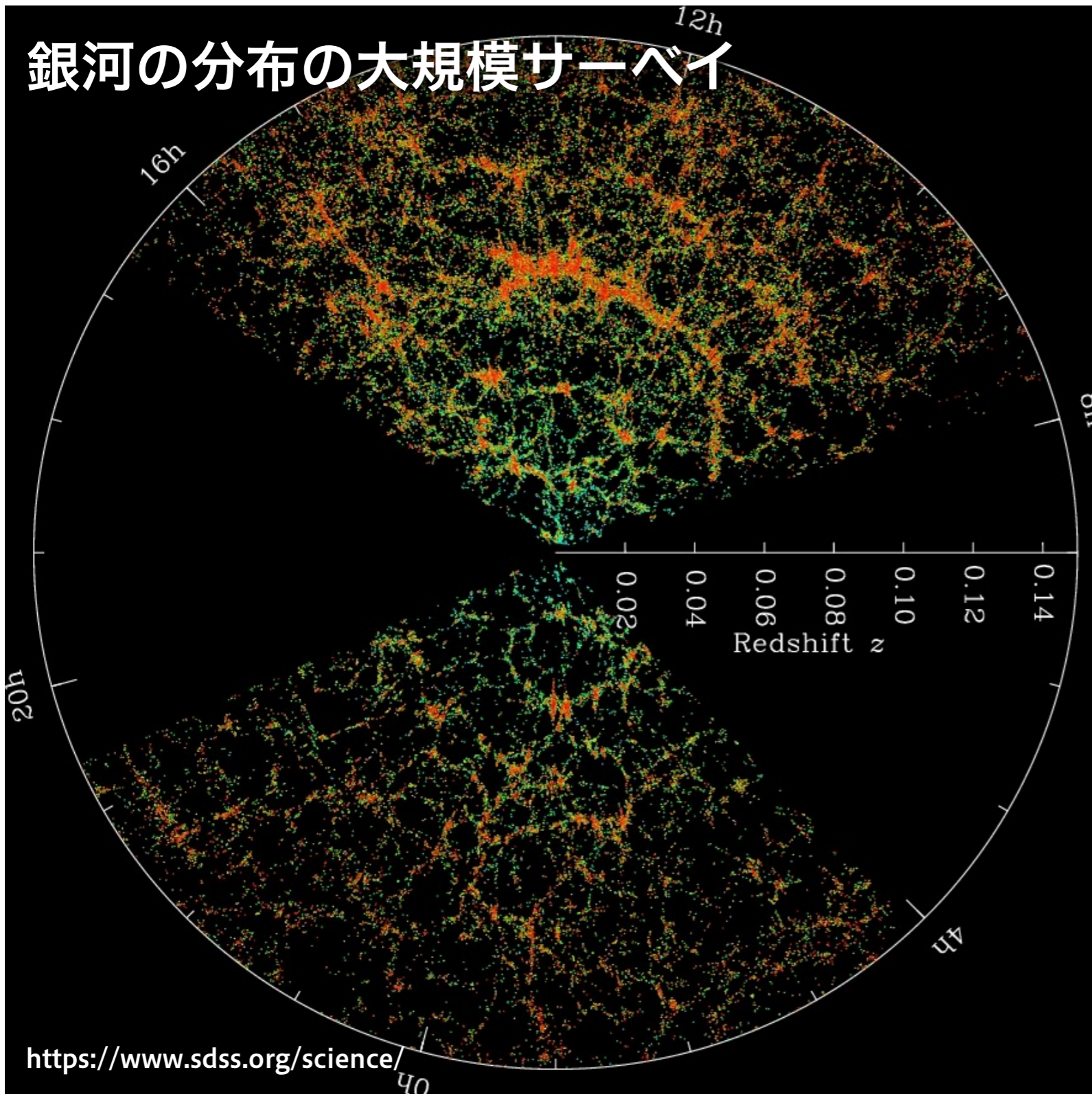
暗黒物質存在の証拠 (4) 宇宙の構造

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

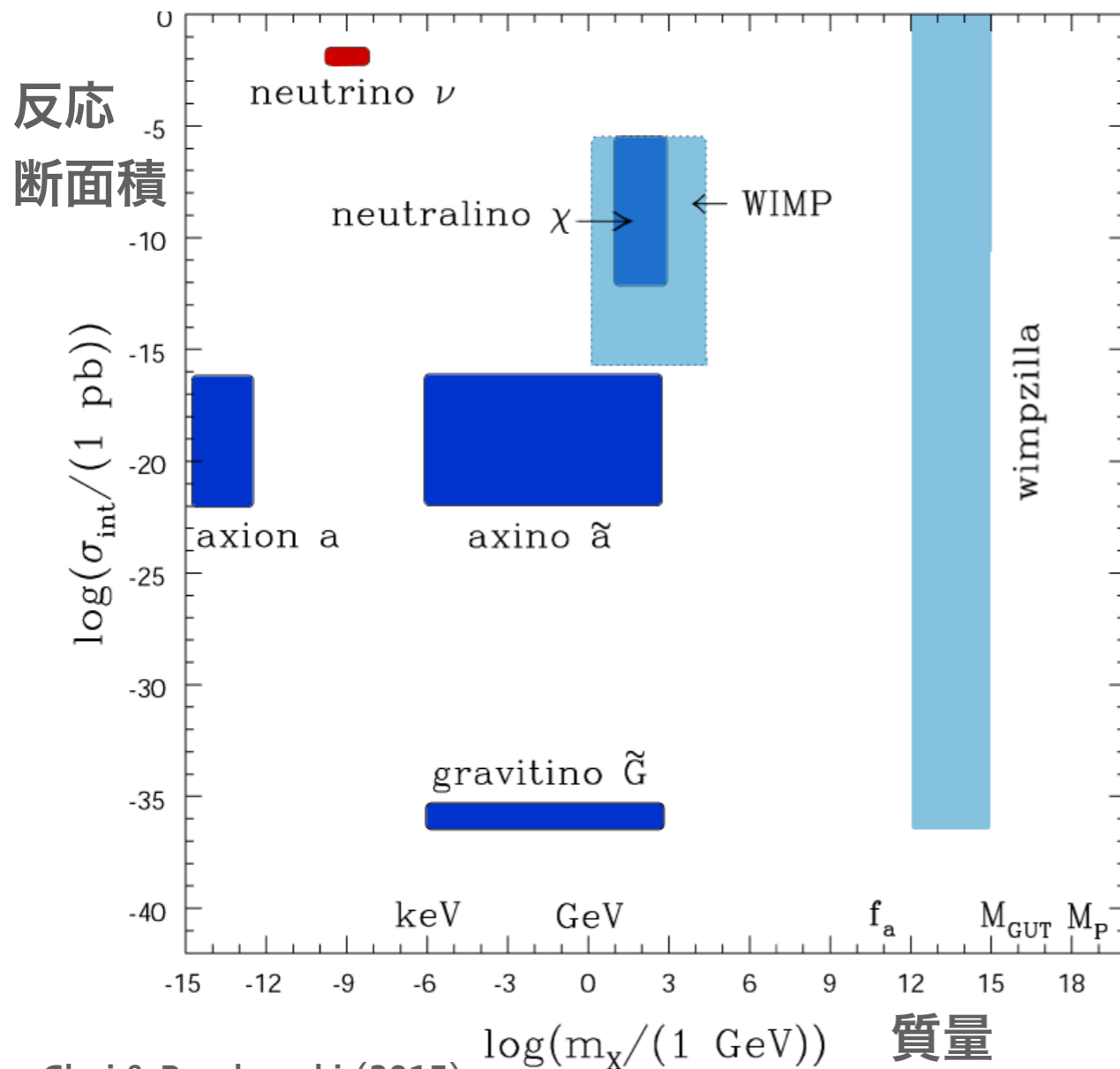


- ビッグバン直後のわずかな質量密度分布（バリオン密度分布）の揺らぎが、大きな揺らぎへと進化
- 暗黒物質の存在がこの進化を説明する
- 暗黒物質の密度揺らぎにより質量が集まり始め、そこにバリオンがさらに集められる
- 背景放射の観測結果などから、宇宙論パラメータが決定される
 - ▶ バリオン密度
 - ▶ 質量密度 (= バリオン + 暗黒物質)
 - ▶ 真空のエネルギー密度

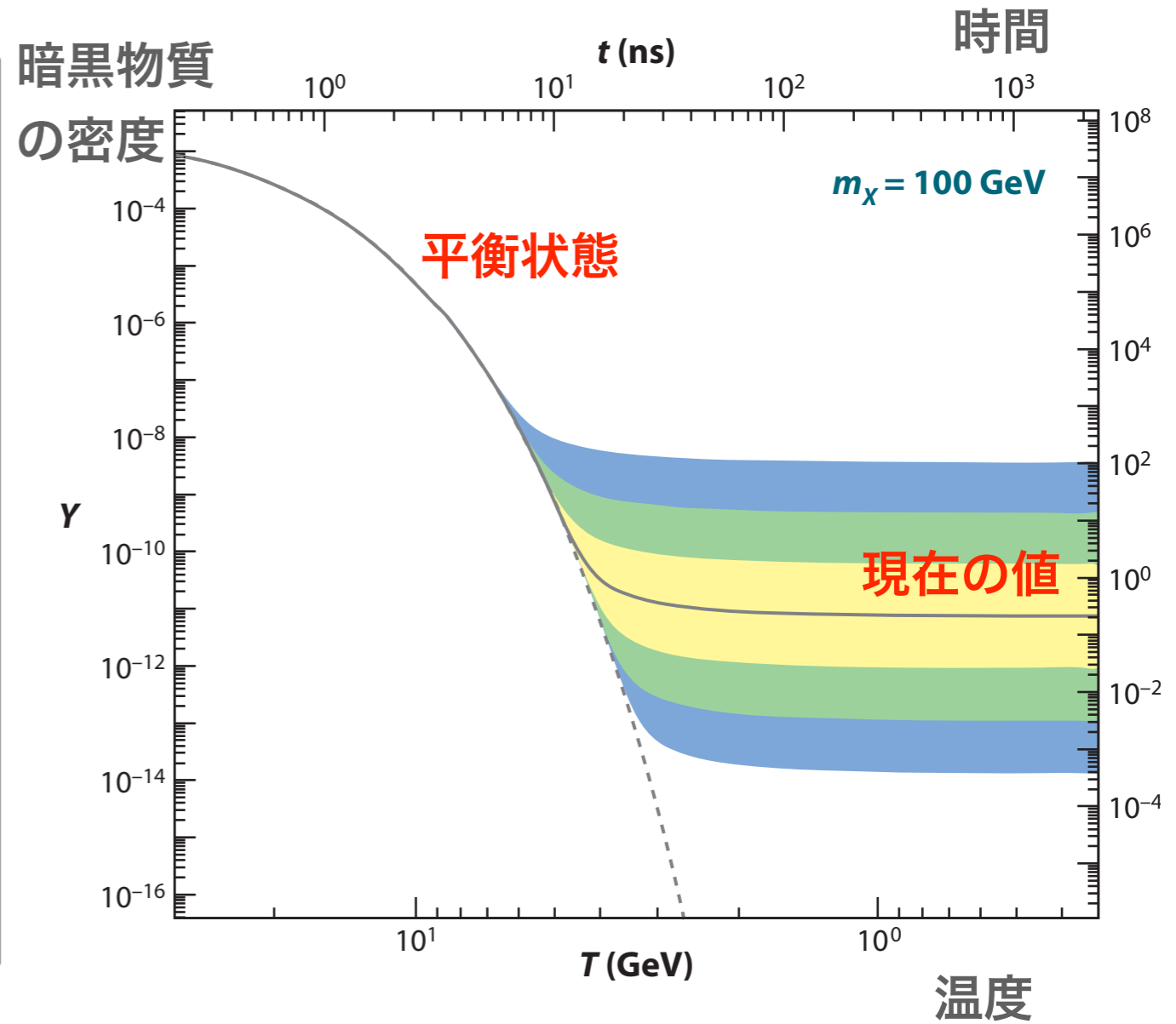
暗黒物質の正体は何か？

- 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



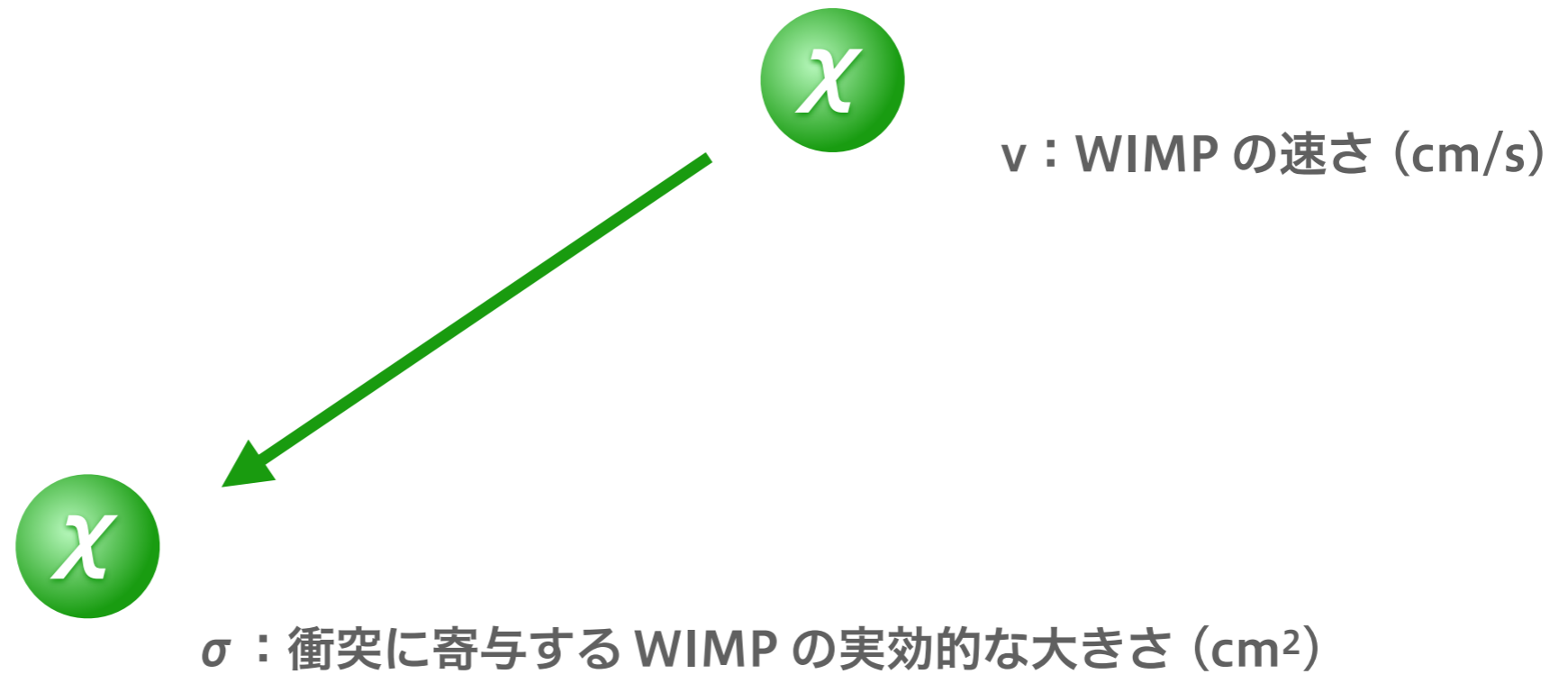
Choi & Roszkowski (2015)



Feng (2010)

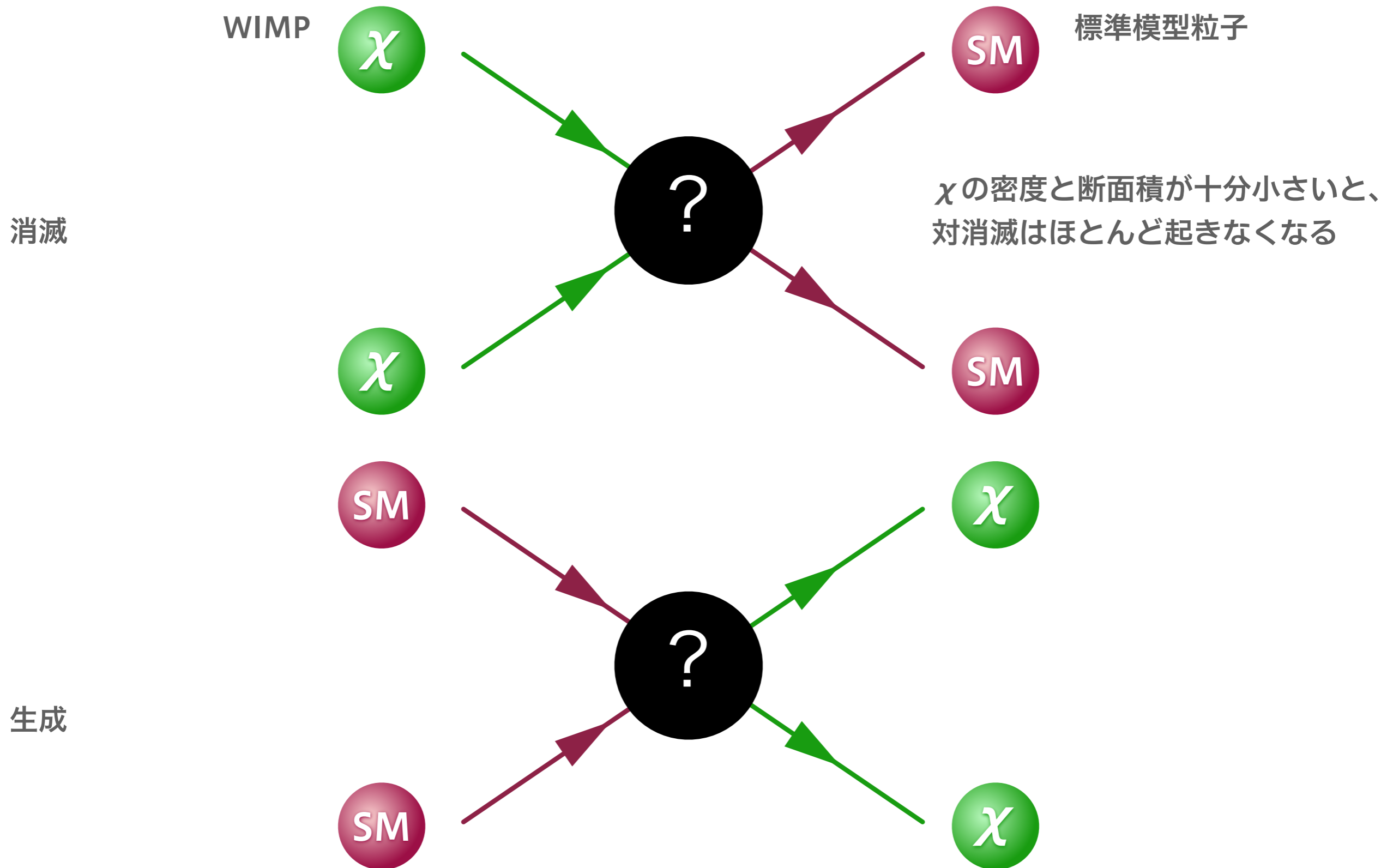
- 100 GeV 程度の質量、 $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ の対消滅断面積を持つと期待
- 超対称性理論 (supersymmetry、SUSY) の予言する粒子質量領域と一致
- 宇宙の膨張とともに、温度と密度が下がる
- 途中までは生成と消滅が平衡状態 → その後、生成できなくなる (freeze out)

反応断面積



- ❖ σ が小さいと、近くを通り過ぎてもしすり抜けてしまう
- ❖ 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

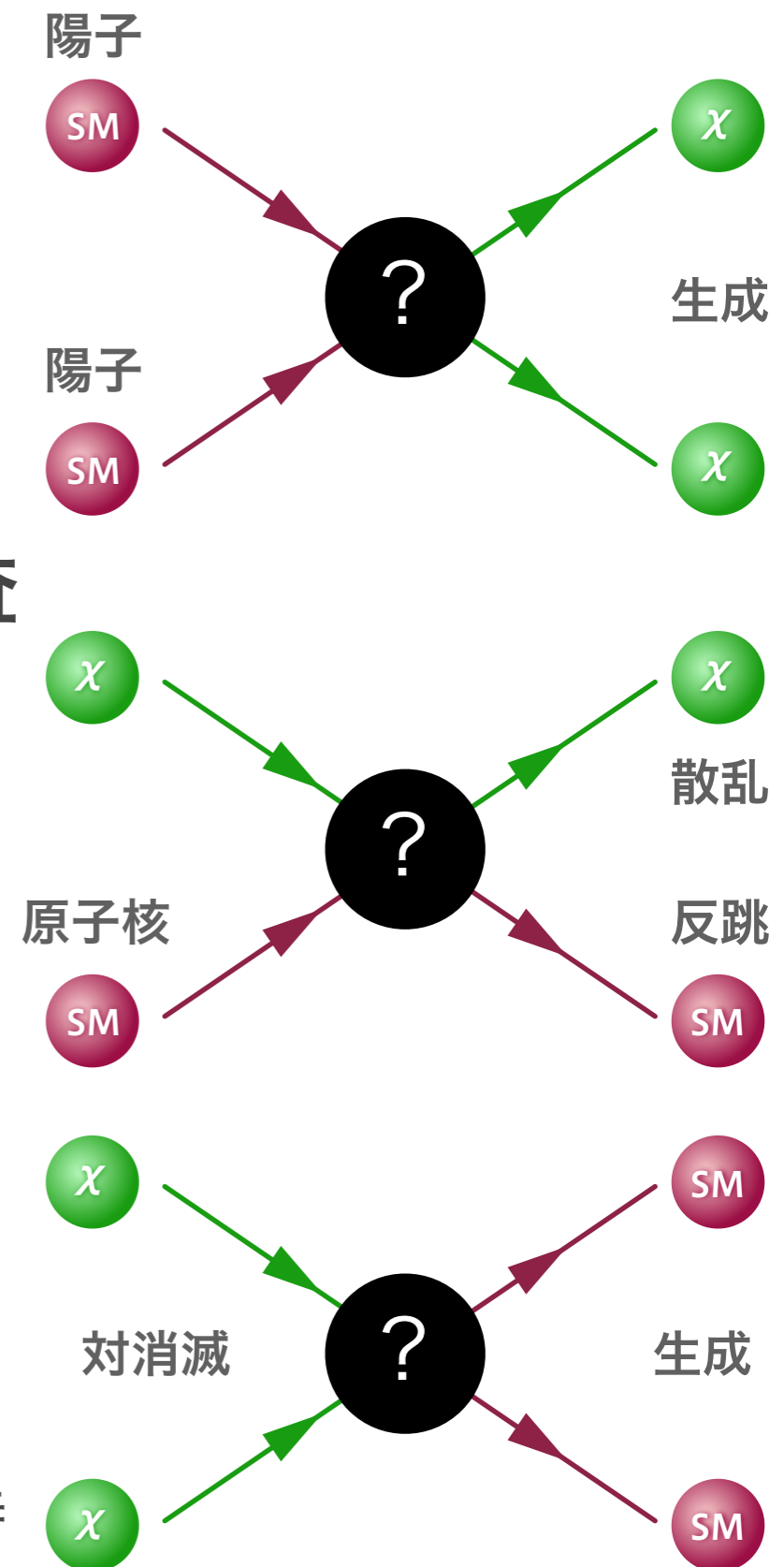
- ▶ CERN の Large Hadron Collider (LHC)
- ▶ 加速エネルギーで、生成可能な質量が決まる
- ▶ 現在のところ観測されていない

■ 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

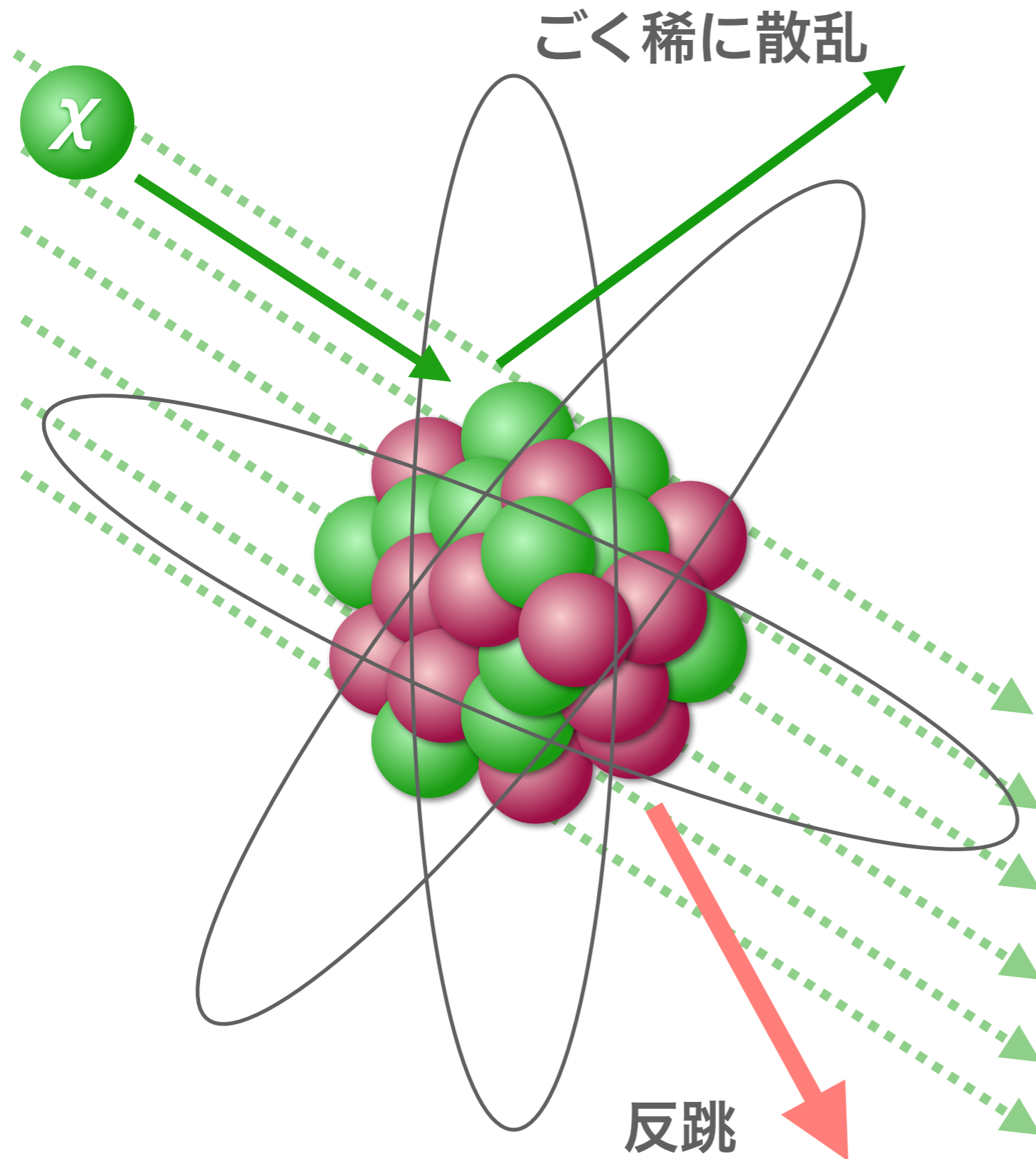
■ 暗黒物質同士の衝突痕跡を探す間接探査

- ▶ 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



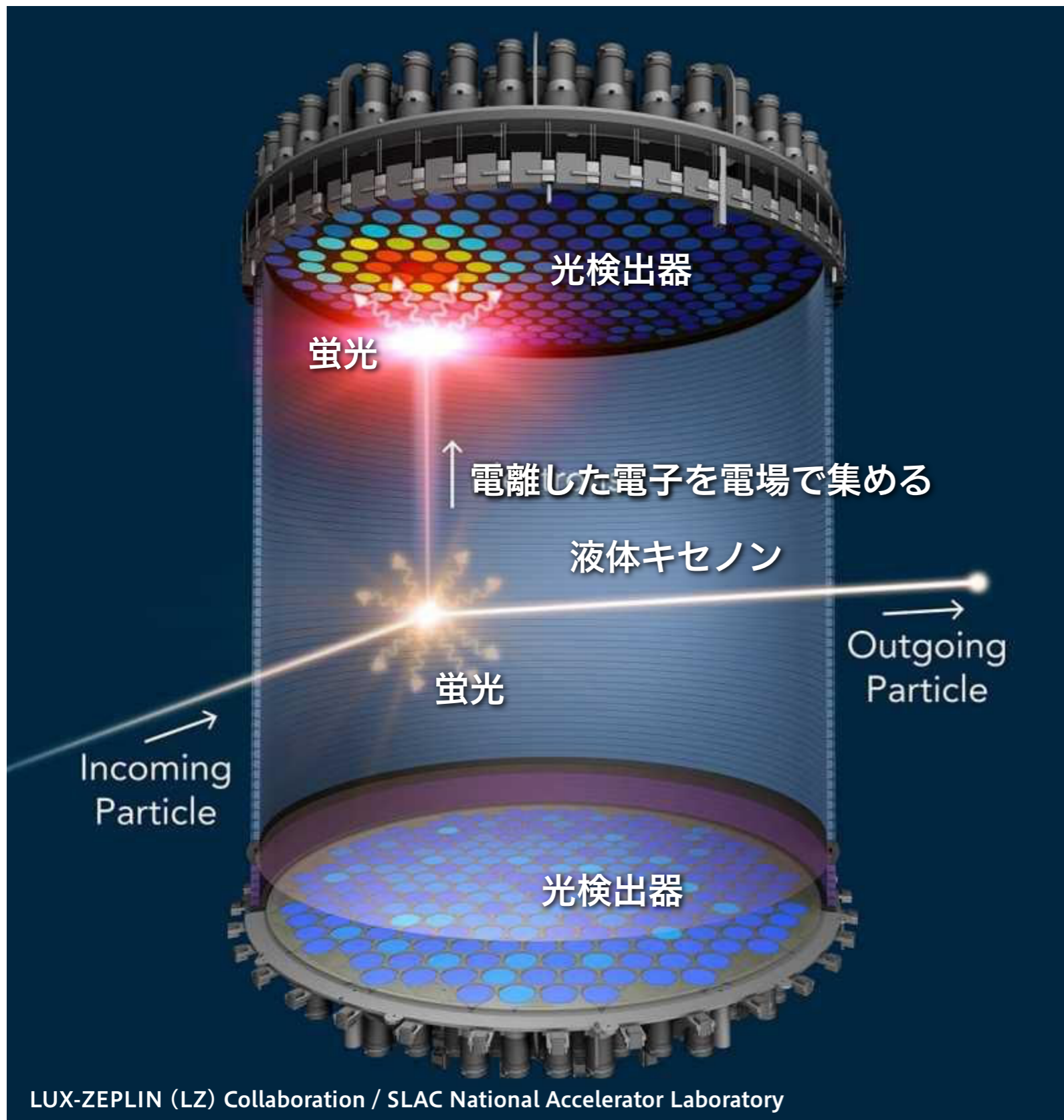
地下実験

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



- 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

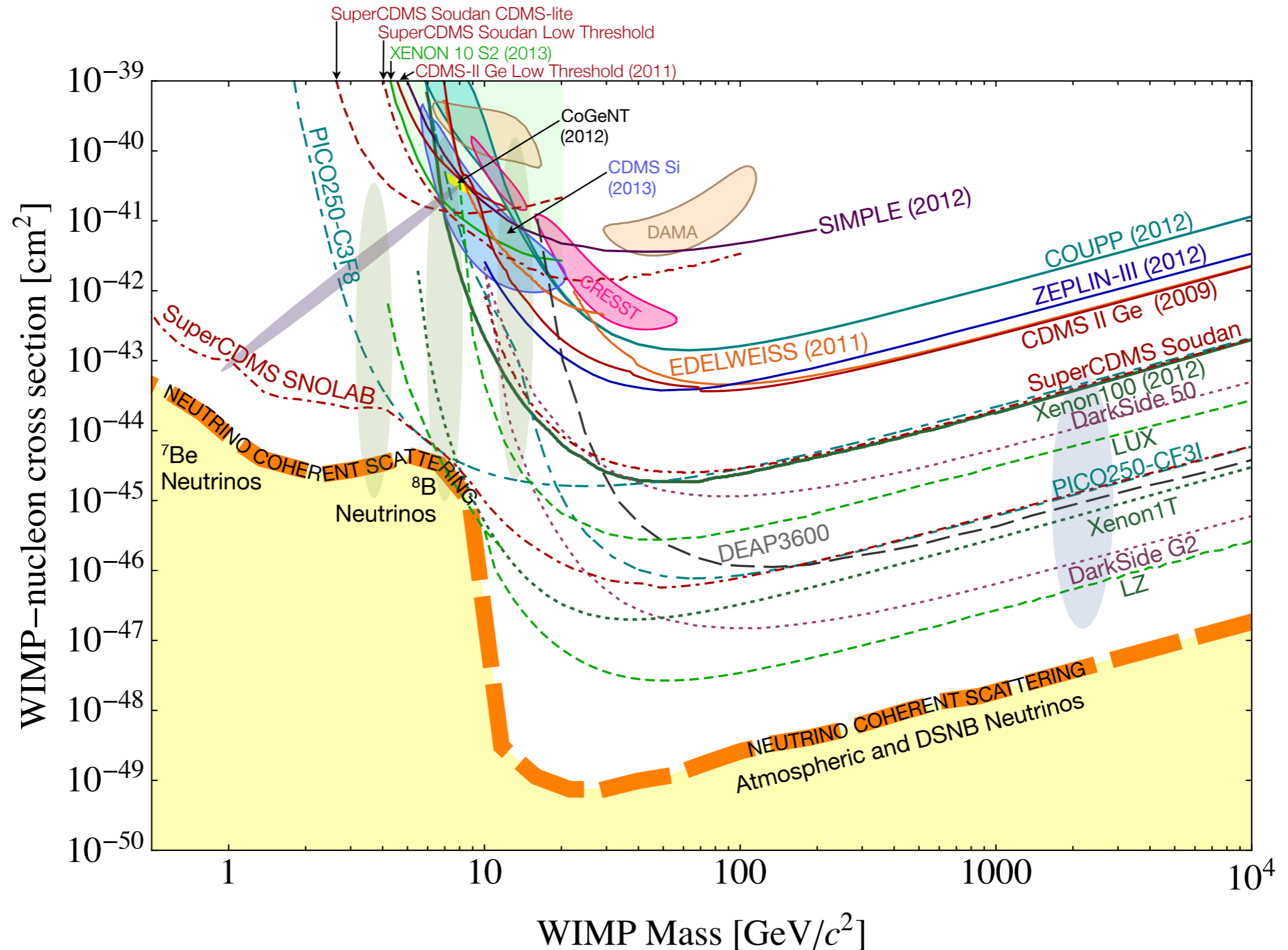
XENON 実験



- XENON10 (14 kg)、XENON100 (62 kg)、ZENON1T (2 ton) と進み、XENONnT (5.9 ton) が 2019 年
- 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

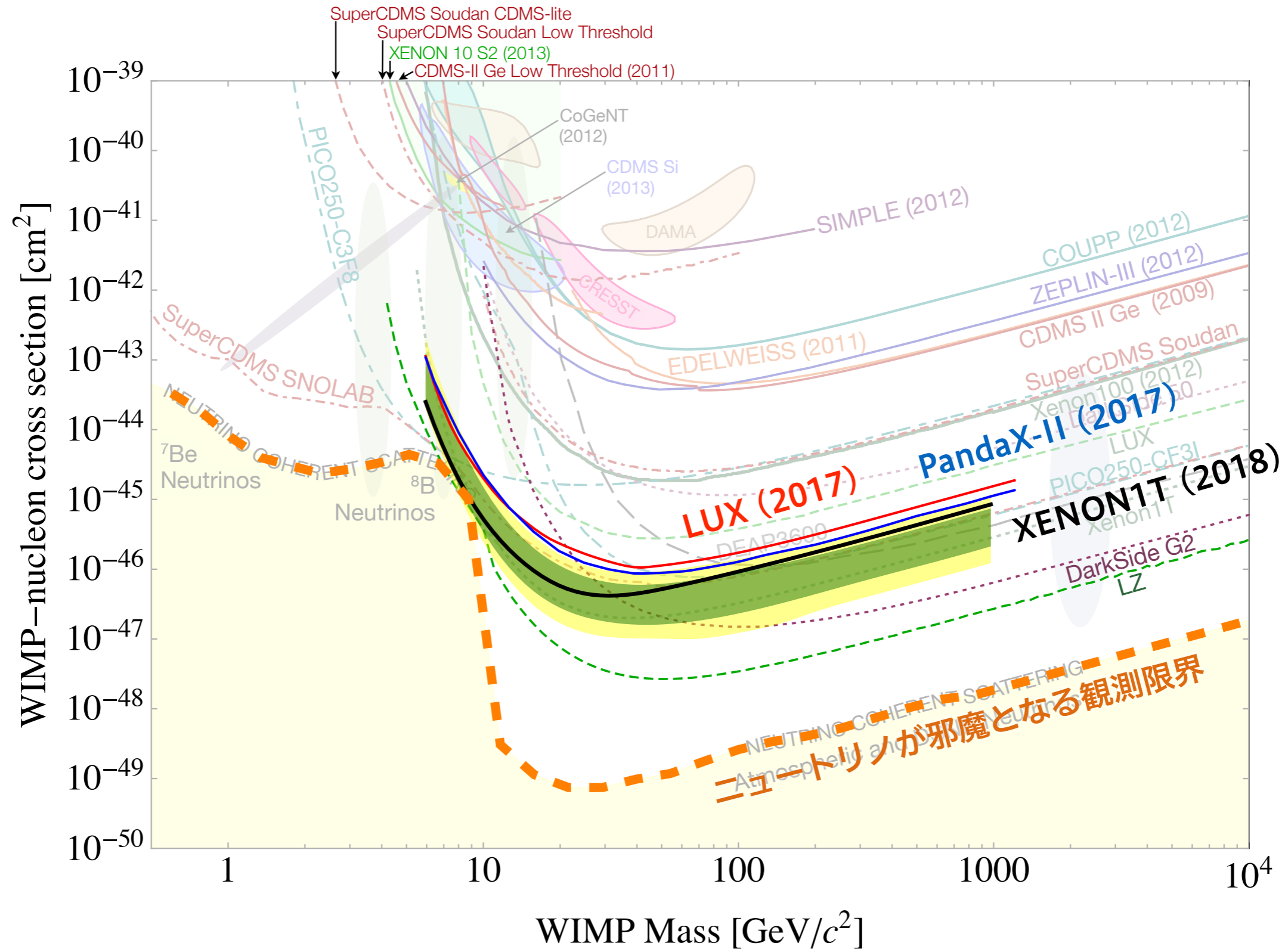
WIMP-核子の衝突断面積の上限値競争

Cushman et al. (2013)

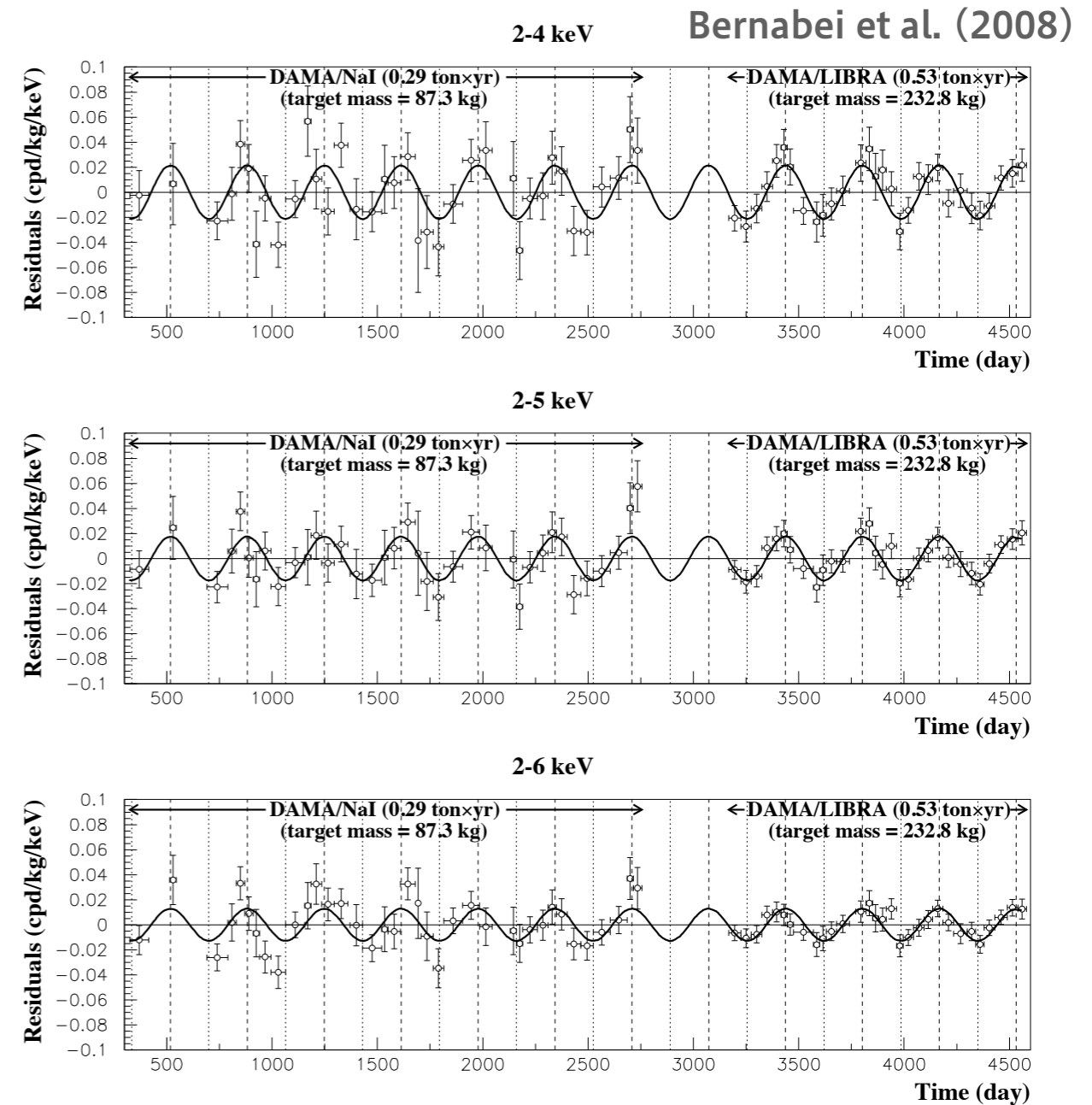
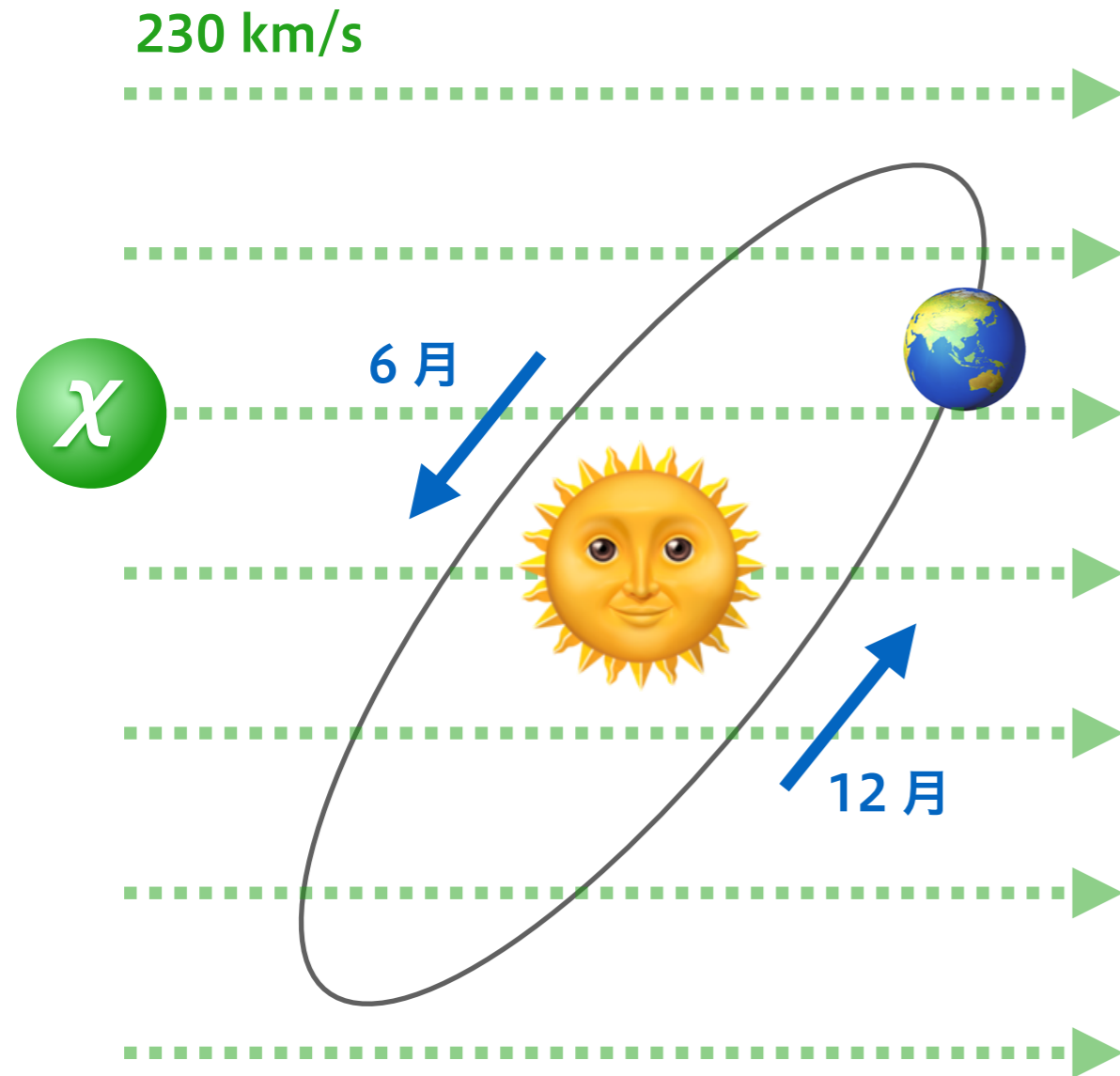


WIMP-核子の衝突断面積の上限値競争

XENON Collaboration (2018)



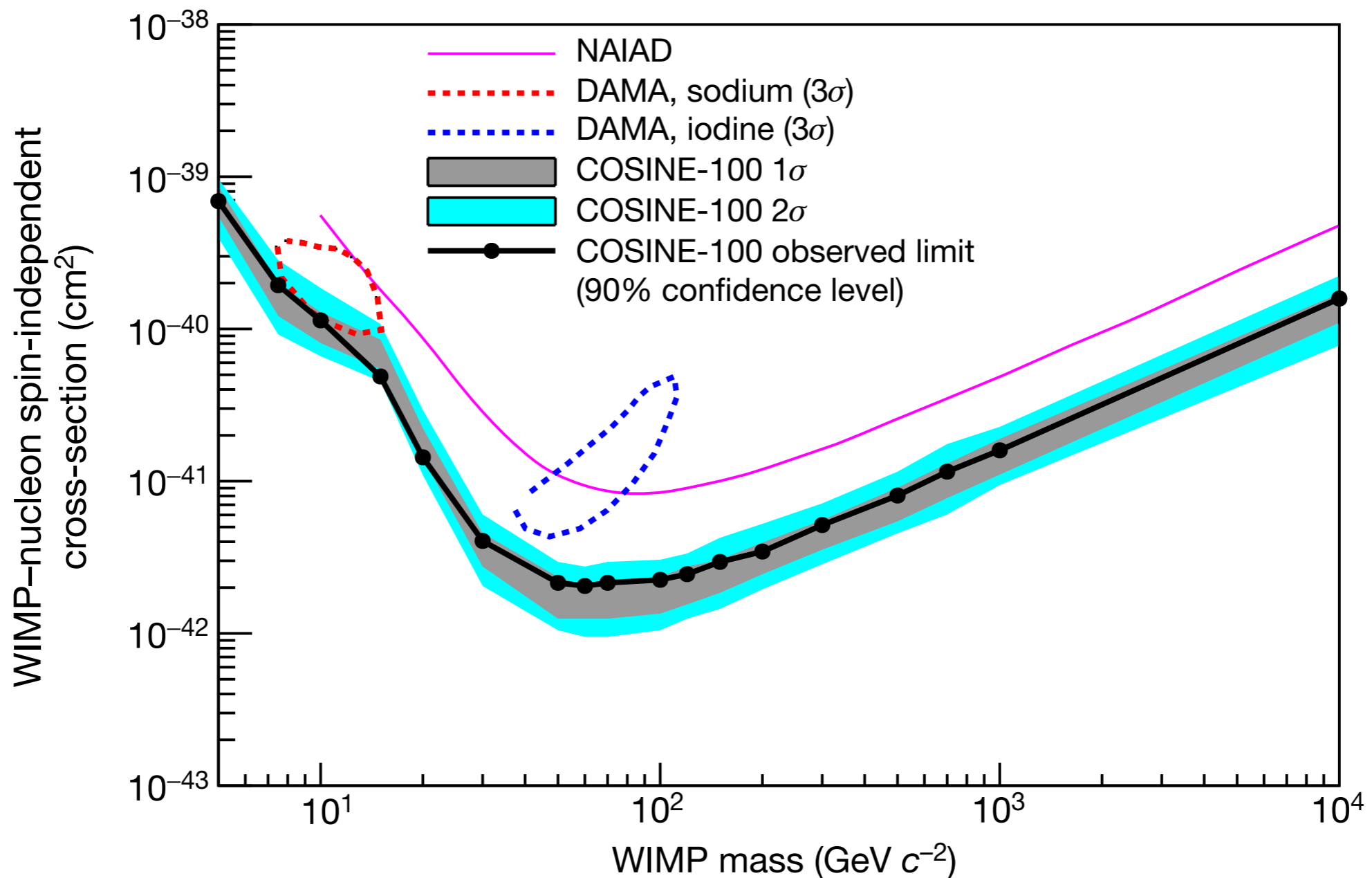
結晶シンチレータ実験による暗黒物質の「発見」



- ❖ 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

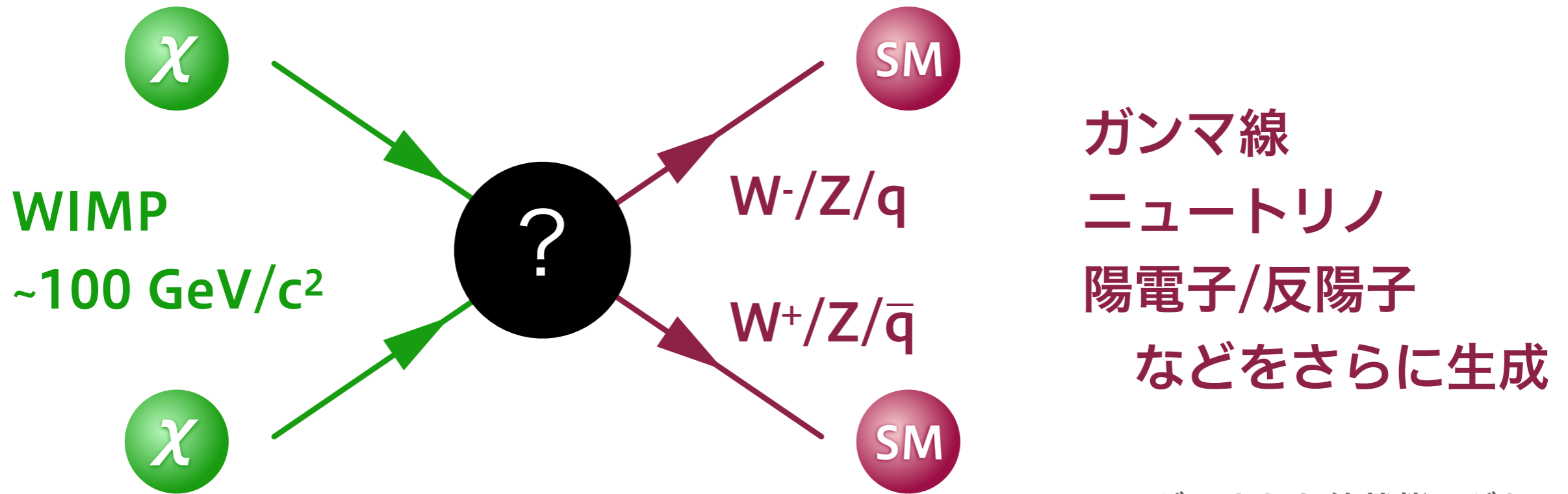
Adhikari et al. (2018)



- 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

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

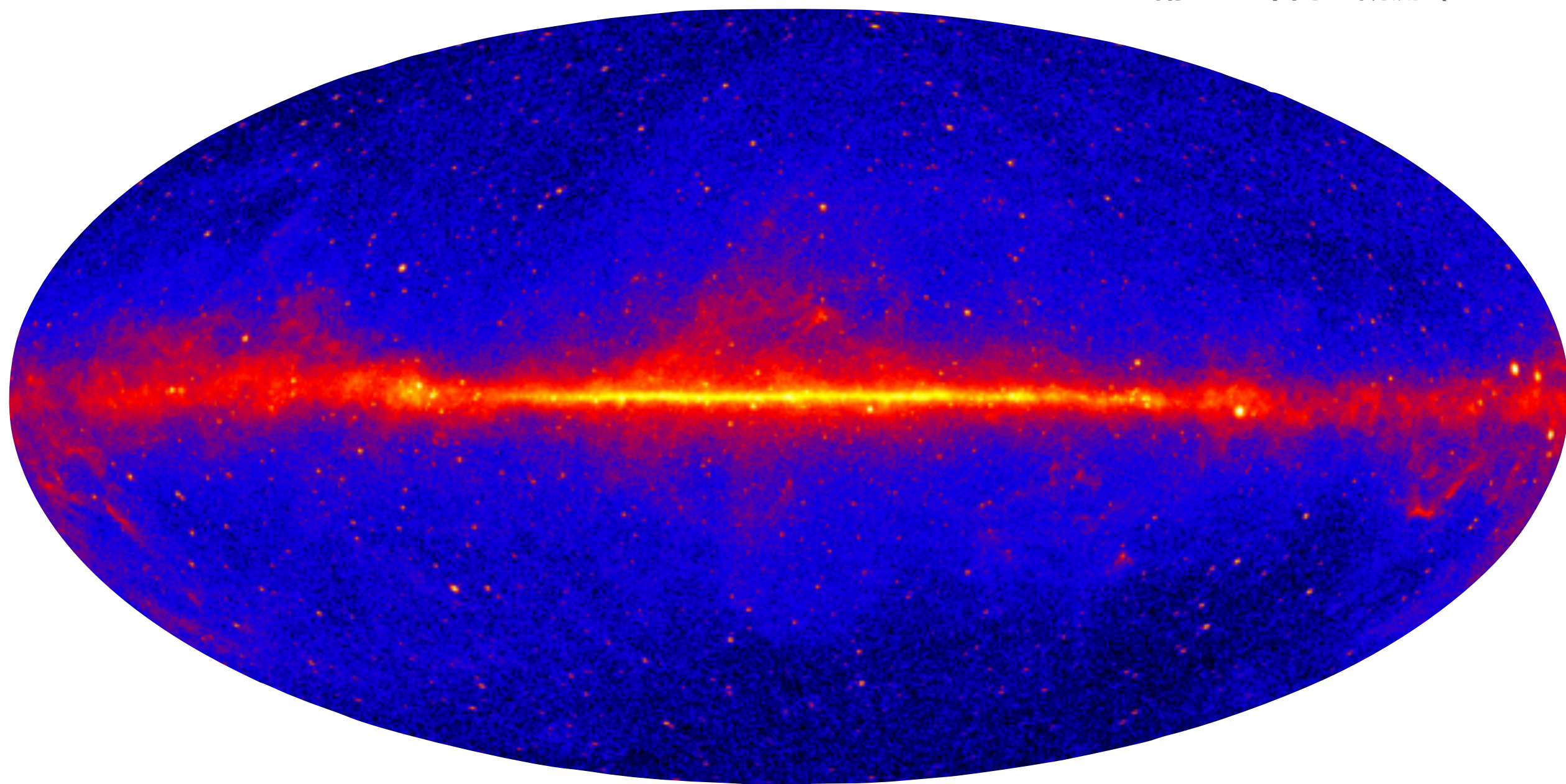
$$\times \int_{\Delta\Omega(\phi, \theta)} d\Omega' \int_{\text{l.o.s.}} \rho^2(r(l, \phi')) dl(r, \phi')$$

暗黒物質の空間分布

密度の二乗に比例

ガンマ線で観た宇宙

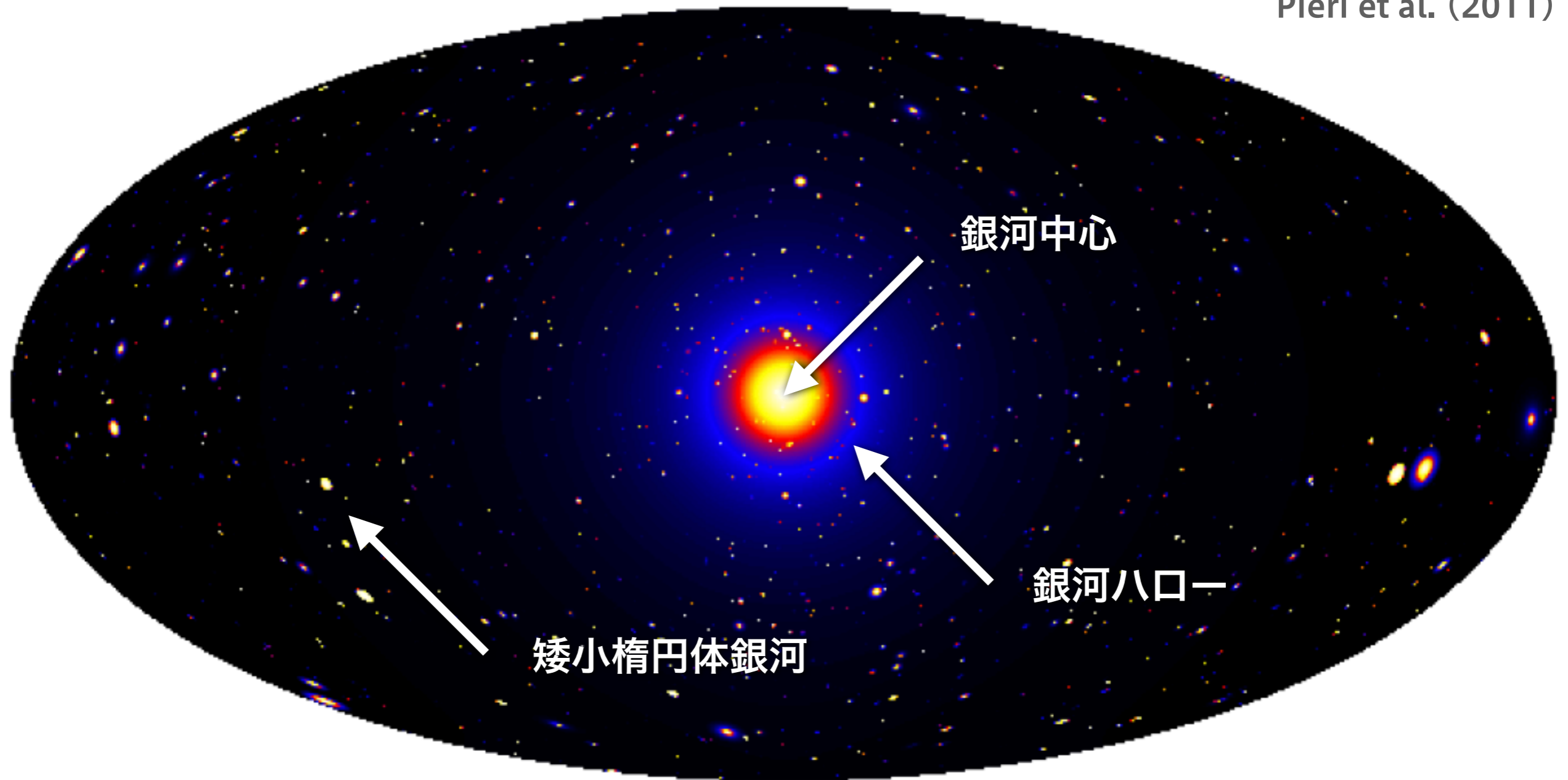
フェルミ衛星 7 年間の観測 ($> 1 \text{ GeV}$)



- 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

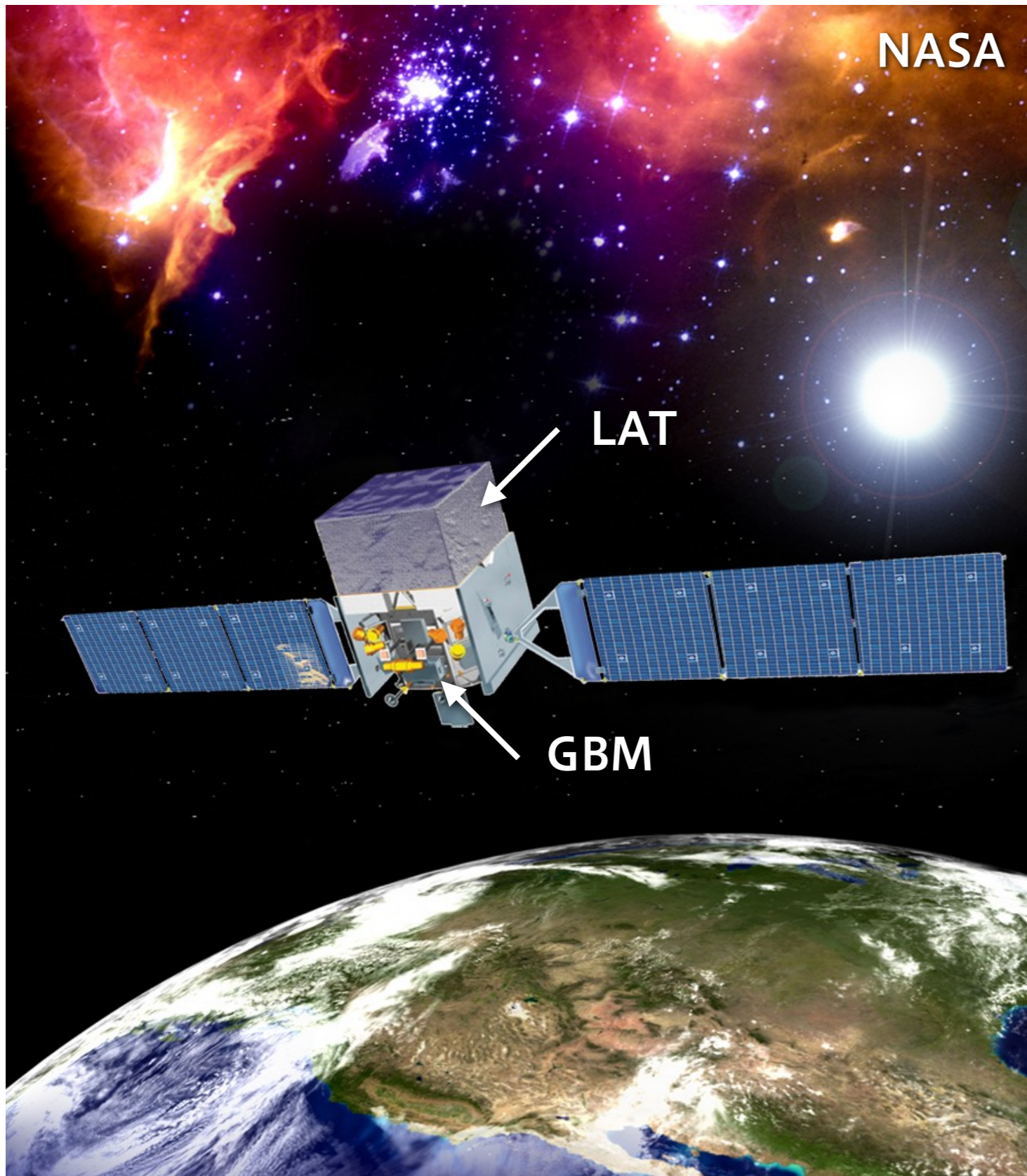
暗黒物質の分布推定

Pieri et al. (2011)



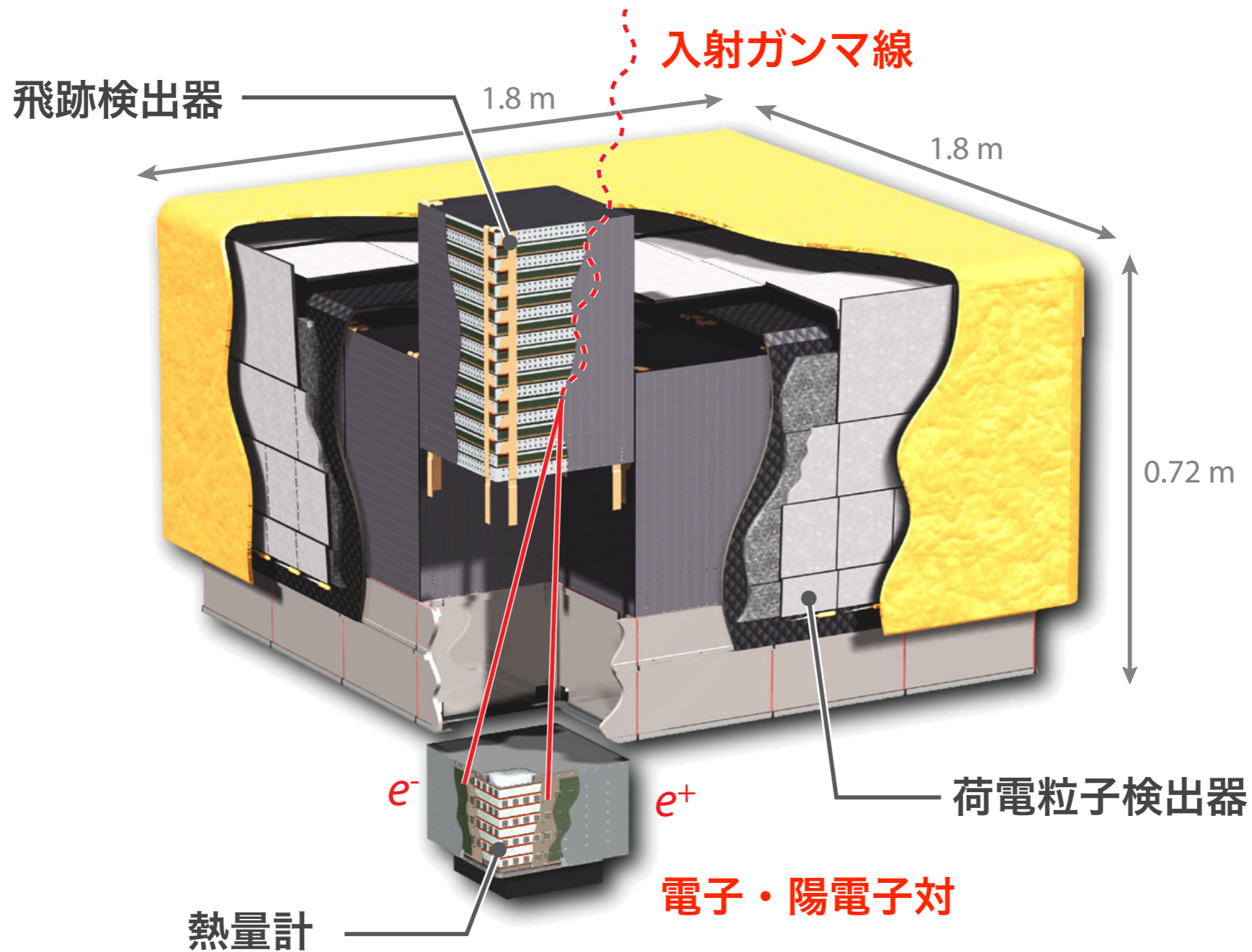
- 銀河中心：高密度の WIMP と高いガンマ線強度が期待、ただし他天体や銀河面からのガンマ線混入が多い
- 銀河ハロー：比較的高密度だが、銀河面からのガンマ線混入が多い
- 矮小楕円体銀河：密度は低いが、自身のガンマ線放射が非常に小さく銀河面からも離れている

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

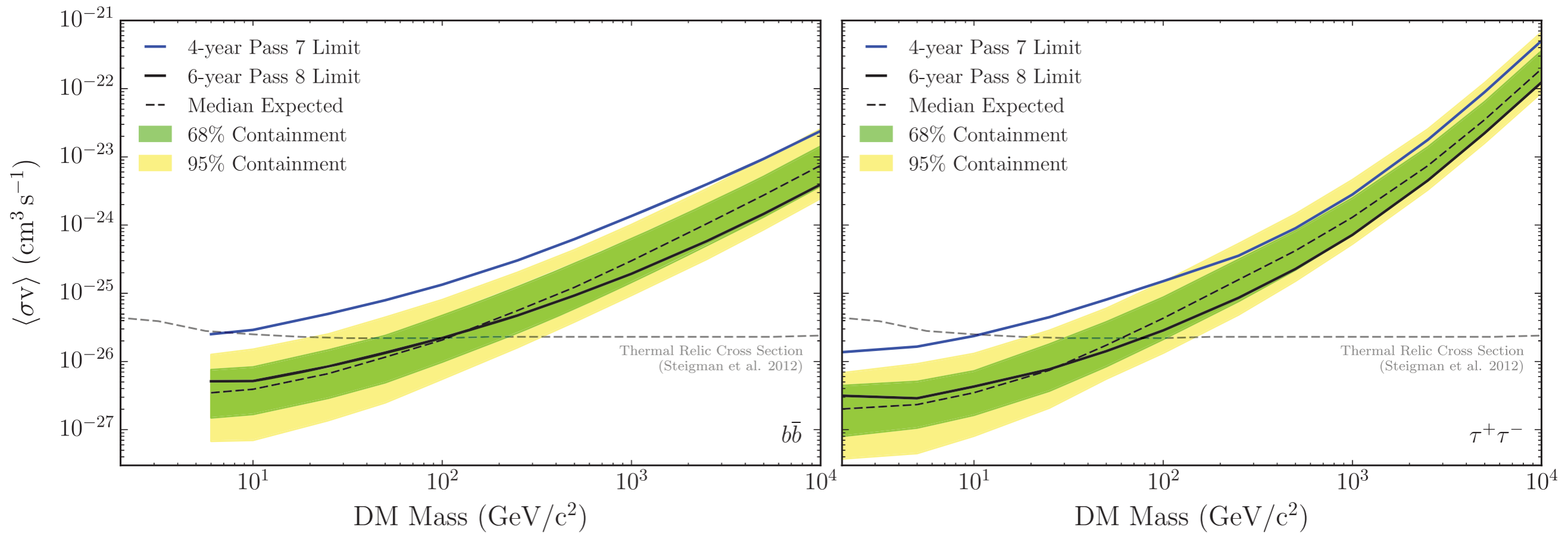
Large Area Telescope (LAT)



- ガンマ線が検出器中の原子核 (の周りの仮想光子) に衝突し、電子・陽電子対を生成する
- 電子・陽電子の飛跡をシリコン半導体検出器が記録し、ガンマ線の入射方向を決定
- 結晶シンチレータの熱量計 (カロリメータ) でエネルギーを光に変換し、エネルギーを決定

LAT による WIMP 対消滅断面積の上限

Ackermann et al. (2015)

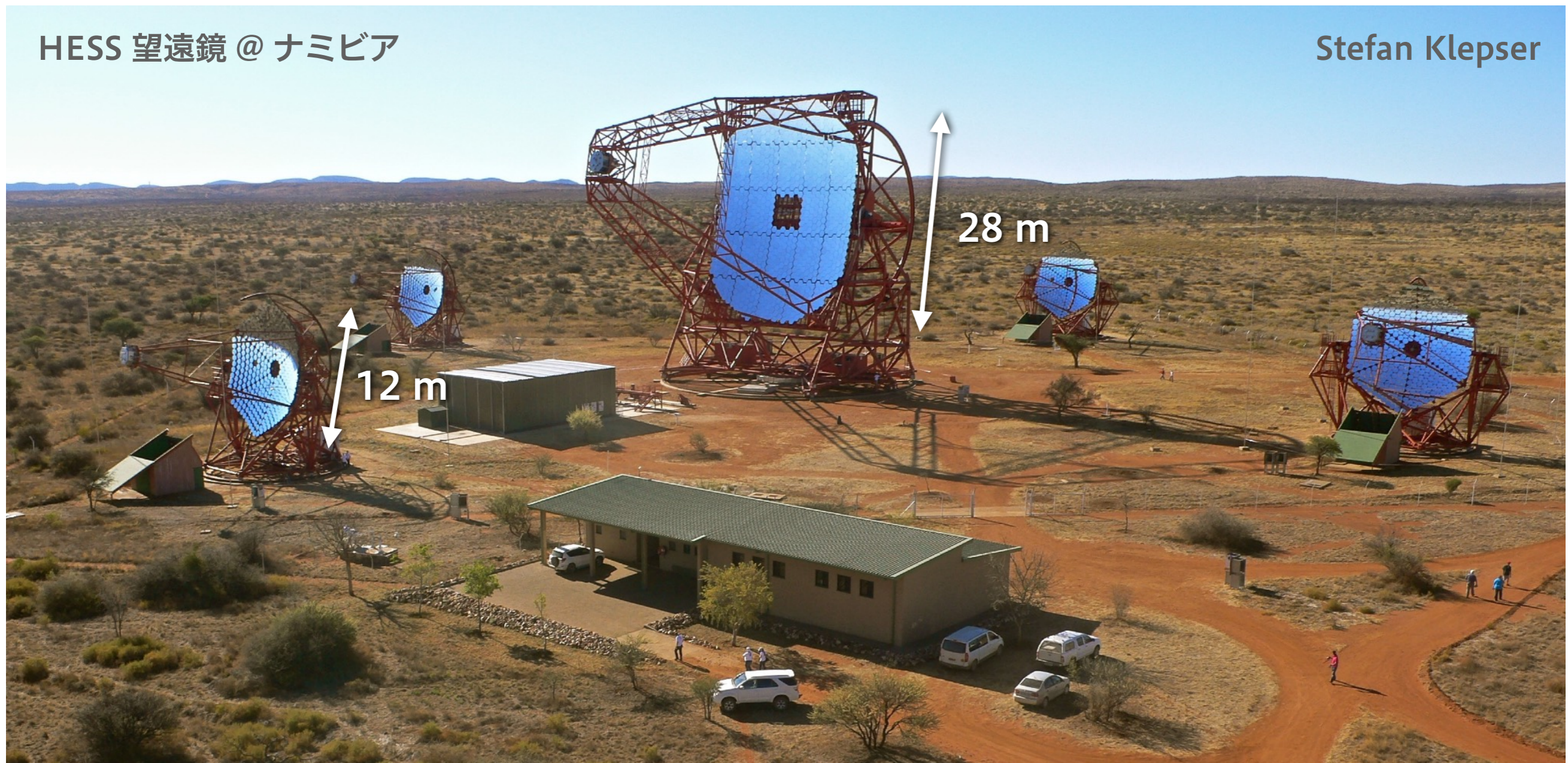


- 15 の矮小楕円体銀河からは有意なガンマ線放射が検出されなかった (対消滅断面積の上限値を与えた)
- WIMP の正体が謎のため、最終的にどのようにガンマ線に行くかが分からない
- $b\bar{b}$ 、 $\tau^+\tau^-$ の終状態の場合などに分けて上限をつける
- すでに、 $100 \text{ GeV}/c^2$ 以下の質量範囲では $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ より強い制限

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

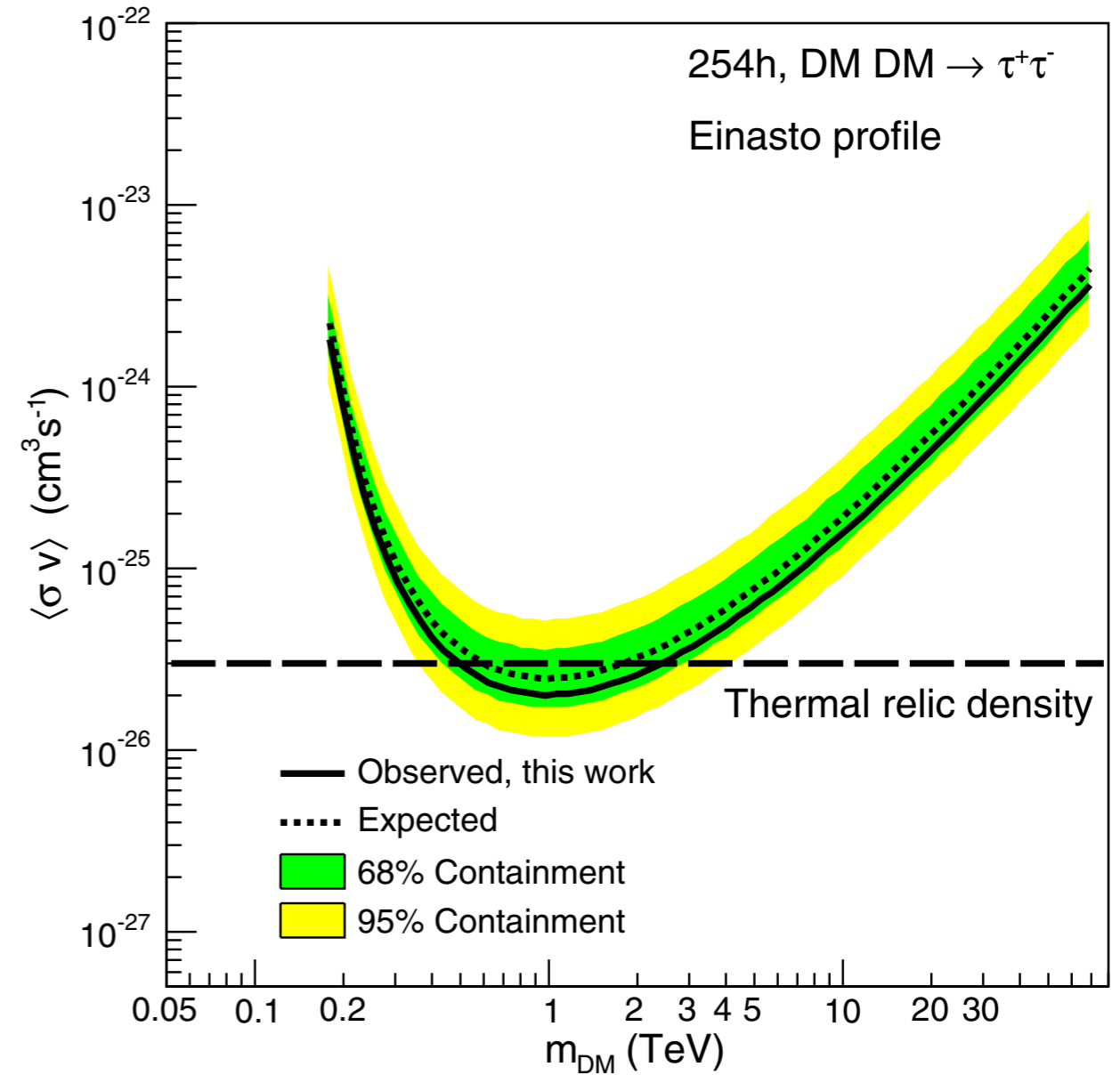
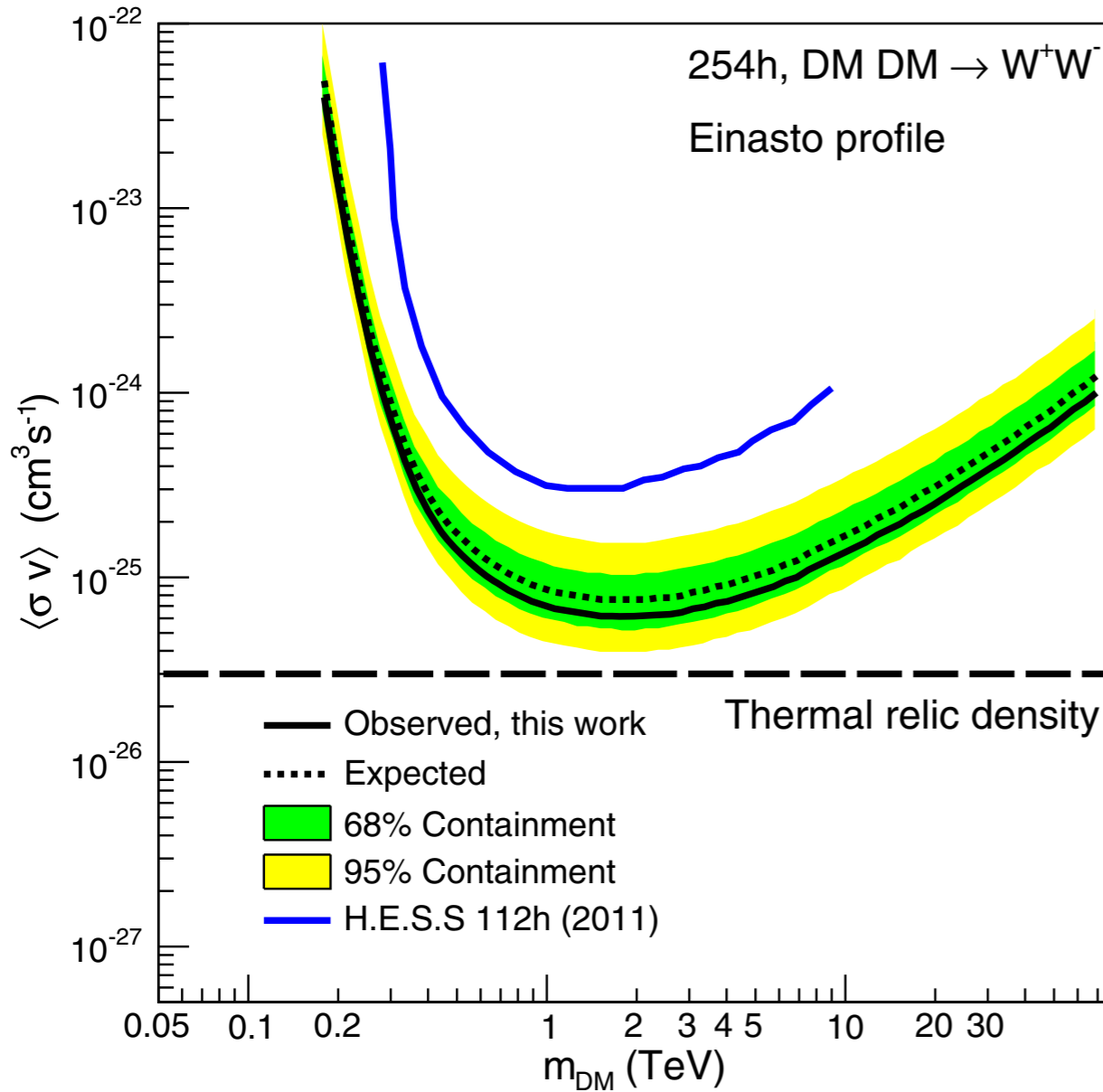
Stefan Klepser



- 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、LAT 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)

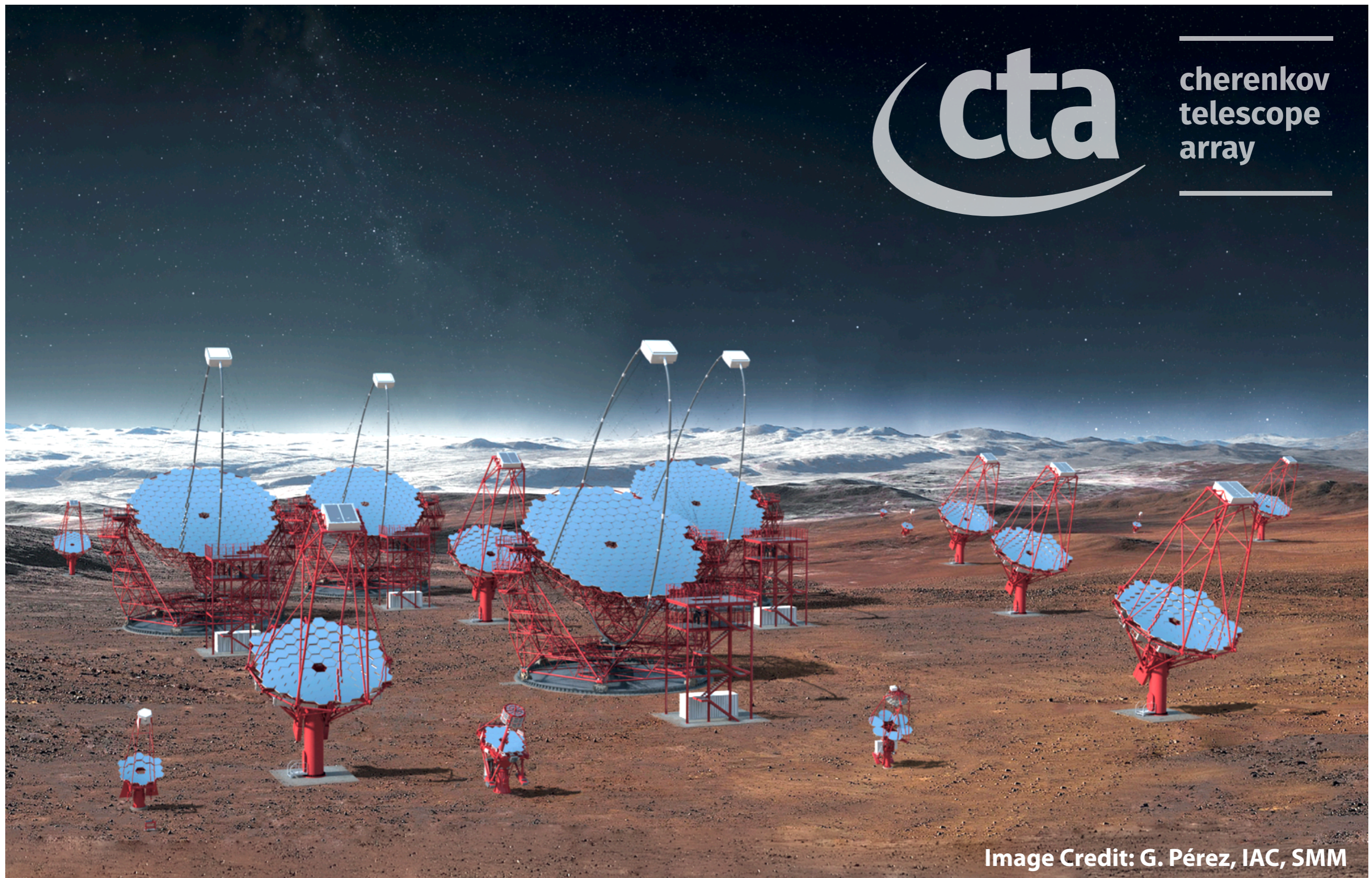


Image Credit: G. Pérez, IAC, SMM

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)

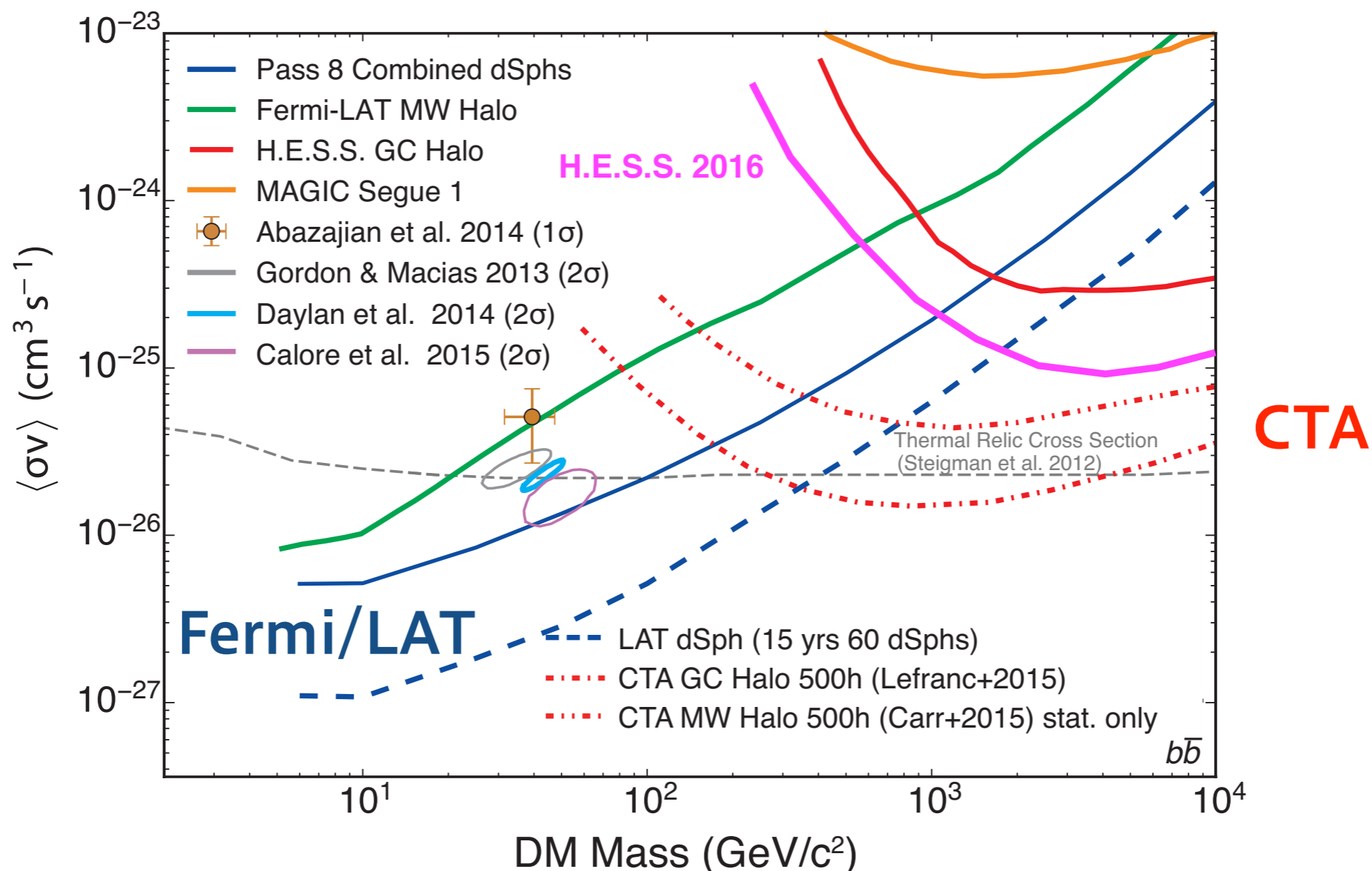
電磁カスケード
(対生成、制動放射)

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. Bernlöhner

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

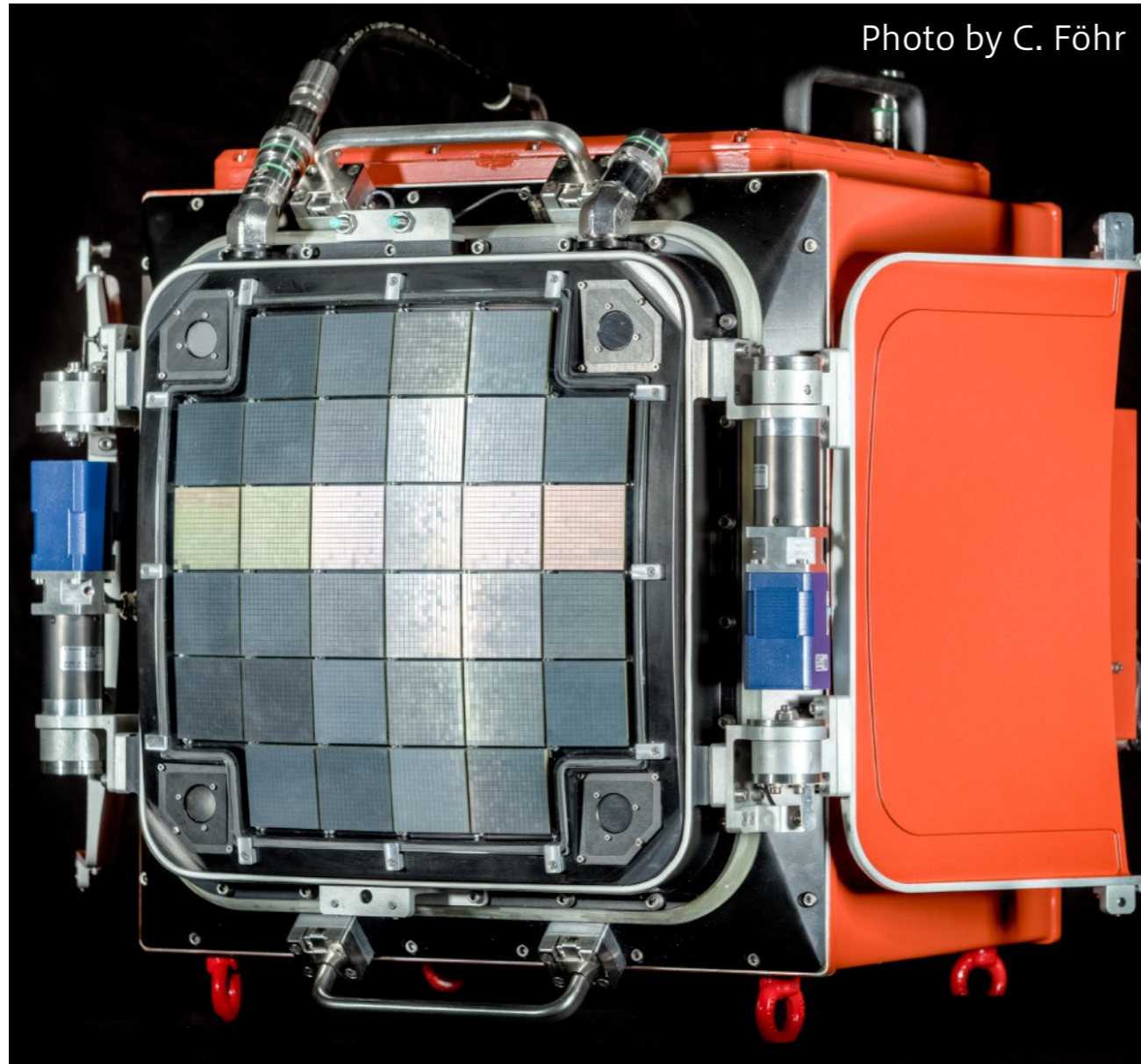
CR 研での CTA 開発

望遠鏡試作機の完成式典

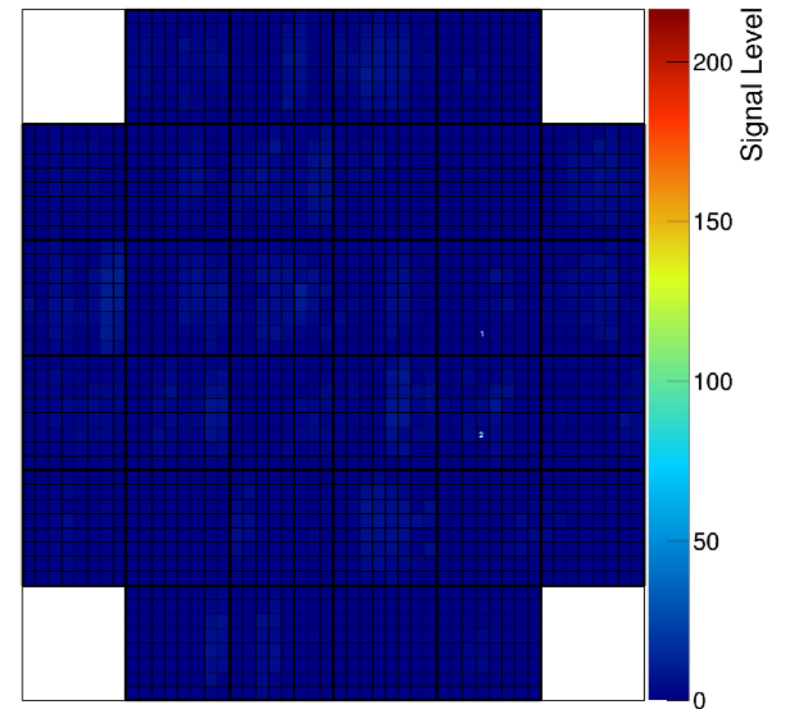
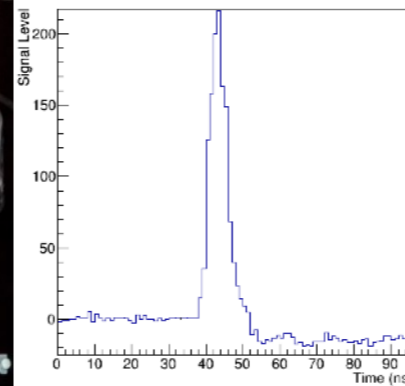
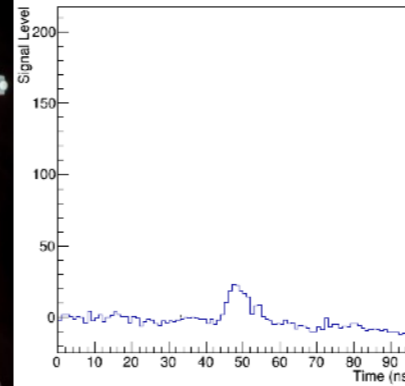


- 1400 人、31 カ国の国際共同研究
- 名古屋大学 CR 研では、焦点面カメラの開発（光検出器、ソフトウェア、エレクトロニクス）、光学系の開発などを担当（奥村、田島）
- 3 種類の異なる口径の望遠鏡開発に参加

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

CTA 大口径望遠鏡 (23 m)



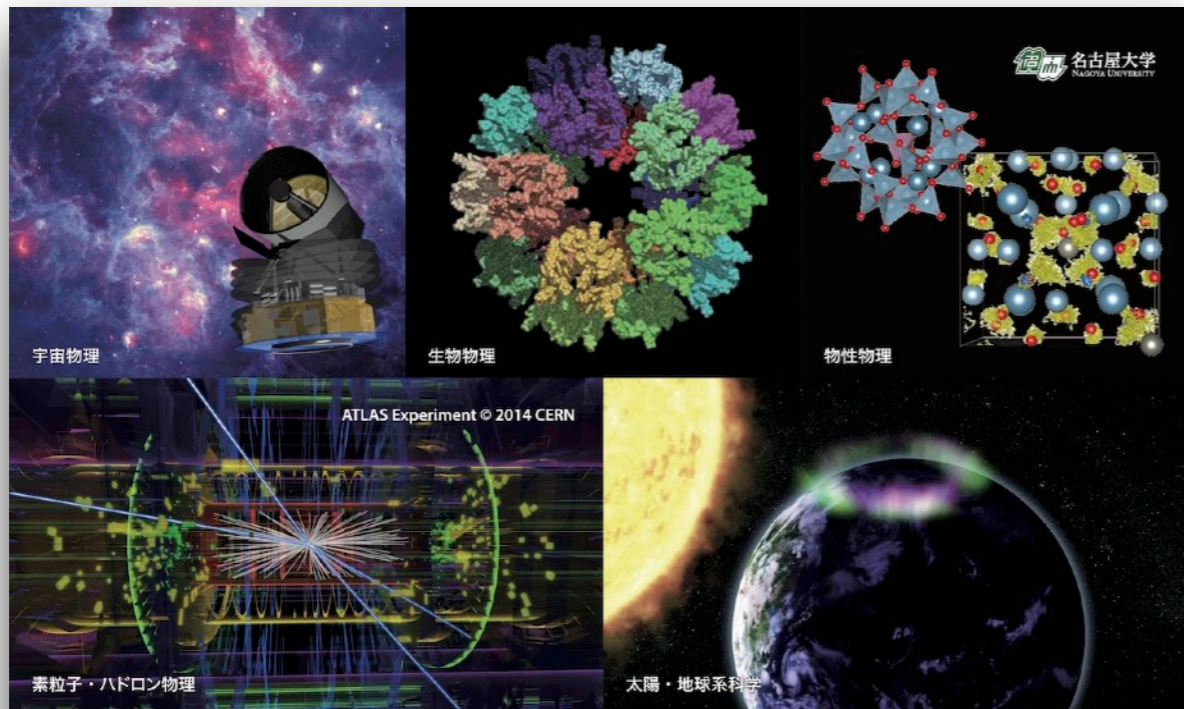
レポート課題

- 本講義で取り上げなかった、暗黒物質の存在を示唆する証拠をもう1つ自分の言葉で解説せよ
 - ▶ ヒント：「銀河団」「速度分散」などを手掛かりにせよ
 - ▶ 簡単な数式とともに、暗黒物質の存在がなぜ示唆されるのか解説せよ
- 講義の感想
 - ▶ ポジティブなもの（特に興味を持った点など）
 - ▶ ネガティブなもの（改善点、分かりにくかった点など）
 - ▶ 「面白かったです」「つまらなかったです」ではなく、具体的に
 - ▶ 記述の具体性・論理性をもって、講義内容の理解度を採点します
- 提出期限：5月8日（水）17時

採点の基準

- 剽窃などの不正がないこと
 - ▶ 「剽窃について」を参照のこと
<https://oxon.hatenablog.com/entry/2019/01/19/121402>
 - ▶ 不正があった場合は、半期の単位全てが無効となります
 - ▶ 参考にした文献（書籍、論文、website）の一覧がきちんと示されていること
- 提出期限を守っていること
- 内容の正確性
- 講義の理解度
- 講義の理解が不十分な場合、それは講義の問題かもしれないので、辛辣なものも含め忌憚なきご意見を

大学院入試説明会・研究室説明会



2020 年度入学・博士前期課程

大学院生募集

名古屋大学 大学院理学研究科 | 素粒子宇宙物理学専攻
| 物質物理学専攻 (物理系)

大学院入試説明会・研究室別説明会

2019/6/1 (土) 入試説明会 13:00~13:30
研究室別説明会 13:30~18:00

自己推薦入試

願書受付 **6/24** (月) ~ **28** (金)

面接試験 **7/13** (土) ~ **14** (日)

一般選抜入試

願書受付 **7/29** (月) ~ **31** (水)

一般選抜試験 **8/21** (水) ~ **23** (金)

入試説明会会場は名古屋大学東山キャンパスの坂田・平田ホール (理学南館) です。研究室別説明会で 4 研究室まで個別に訪問できます。

自己推薦入試では自己推薦書・学部成績・面接による試験で選抜します。物質物理学専攻 (物理系) は若干名の理科教員枠があります。出願前に志望研究室と連絡を取ってください。

出願書類請求・問合せ先

入試説明会に来られない方は、返信用封筒 (角形 2 号に 400 円切手を貼り、返信先住所と宛名を記入したもの) を次の宛先まで送付して出願書類をお取り寄せください。

〒464-8602 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院理学研究科 教務学生係
電話での問合せ: 052-789-2402, 5756

入試情報・研究室情報の詳細:
<https://www.phys.nagoya-u.ac.jp/entrance/>



- 6/1 (土) 13:00~
- 主に 4 年生向けですが、過去に高校生が参加したこともあります
- 研究室の研究紹介や、研究室訪問でじっくり研究内容を聴ける良い機会です