

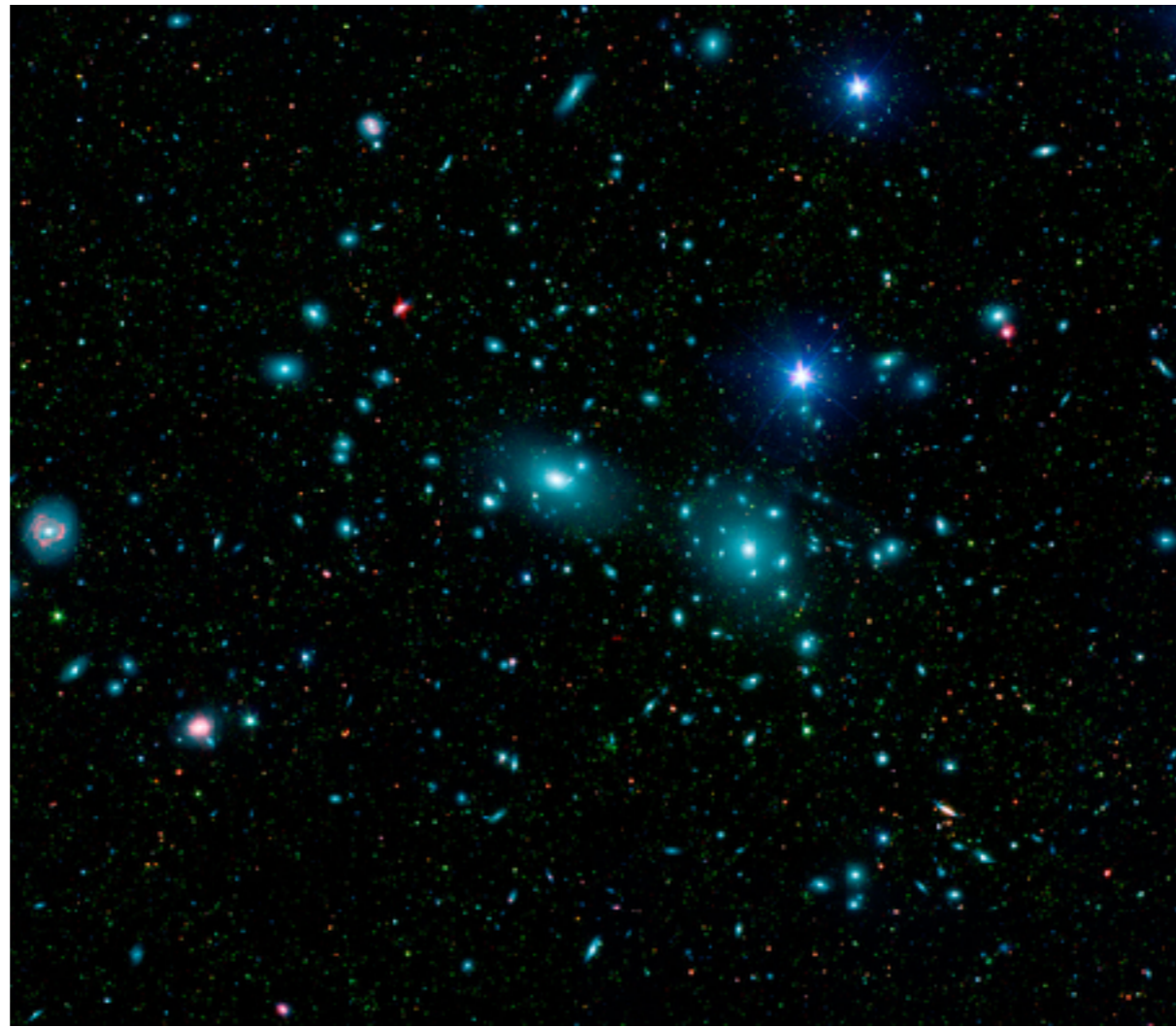
# 現代宇宙論

No. 8

# 銀河団の安定性の謎

かみのけ座銀河団内の銀河運動

ツビッキー：この銀河団が存在できるのはおかしい（1933）

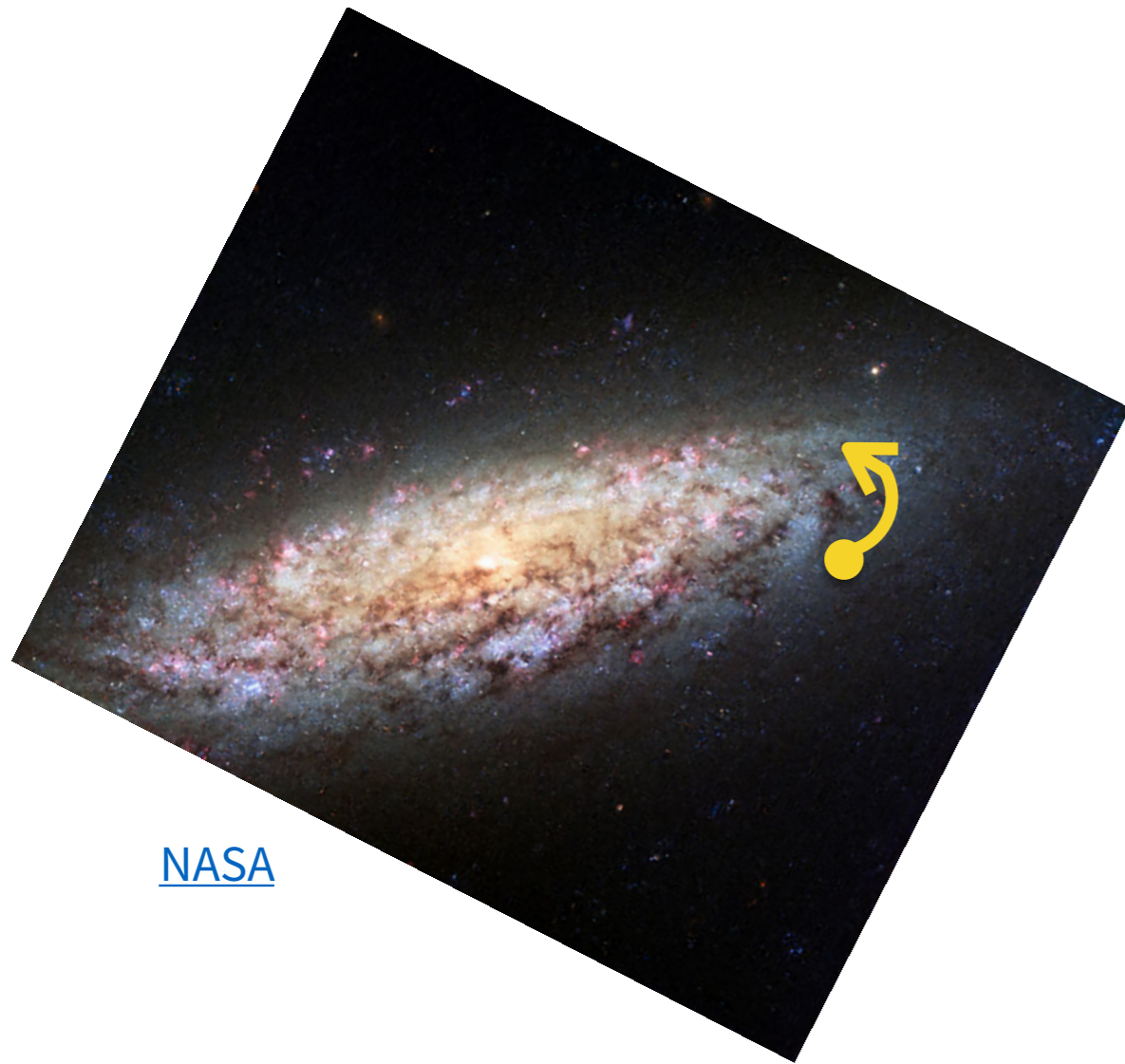


[NASA](#)

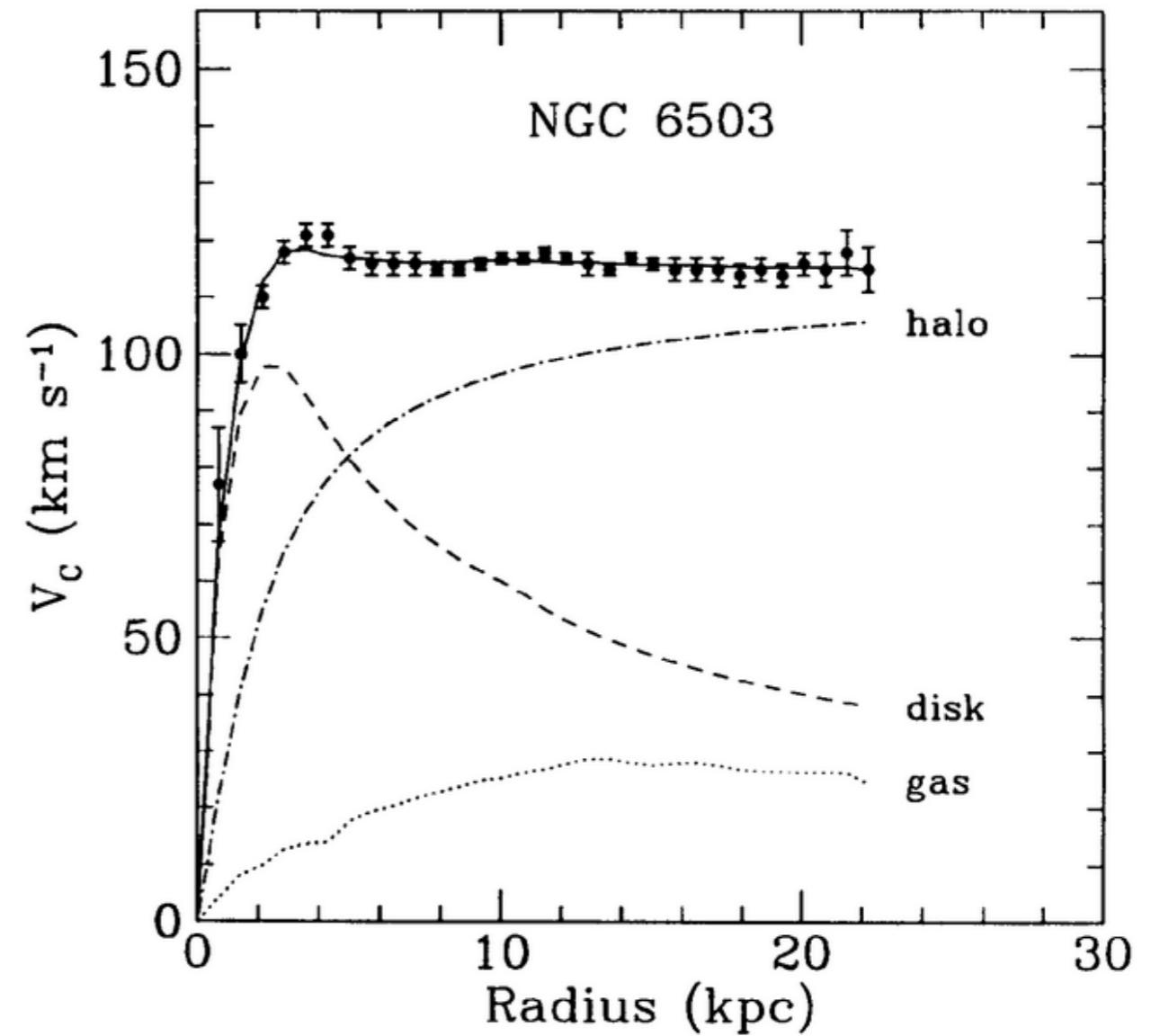
光って見える物質の重力だけで安定にまとまるには、各銀河の速度が速すぎる

# 銀河の回転曲線の謎

渦巻き銀河の周辺部の星の速さを観測



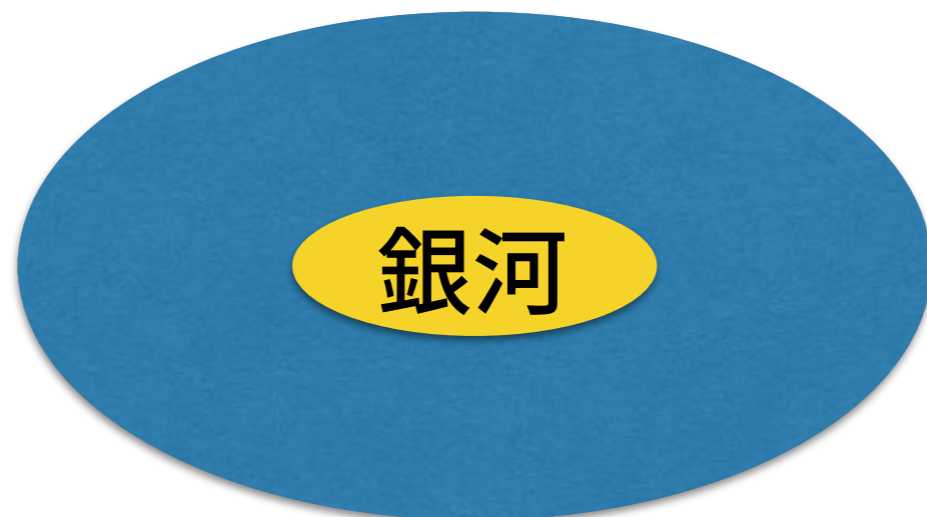
[NASA](#)



[K. Freese, EAS Publ. Ser. 36, 113](#)

# 暗黒物質

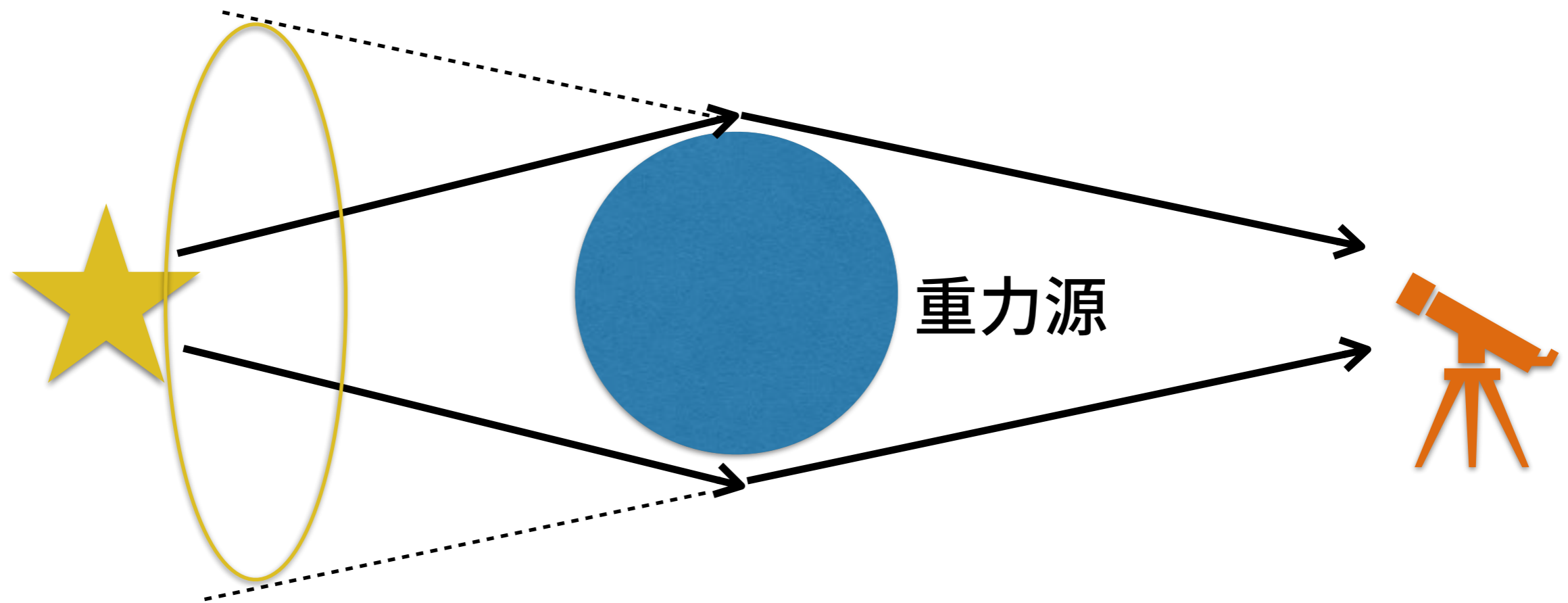
- ★ 光らない（電磁相互作用をしない）物質の存在を仮定すると，これらの問題には説明がつく
  - ★ ”光らない物質”なので**暗黒物質**とよぶ
- ★ 銀河や銀河団を浸してとりまくハローとして存在する
  - ★ 太陽系付近だと約 $0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$





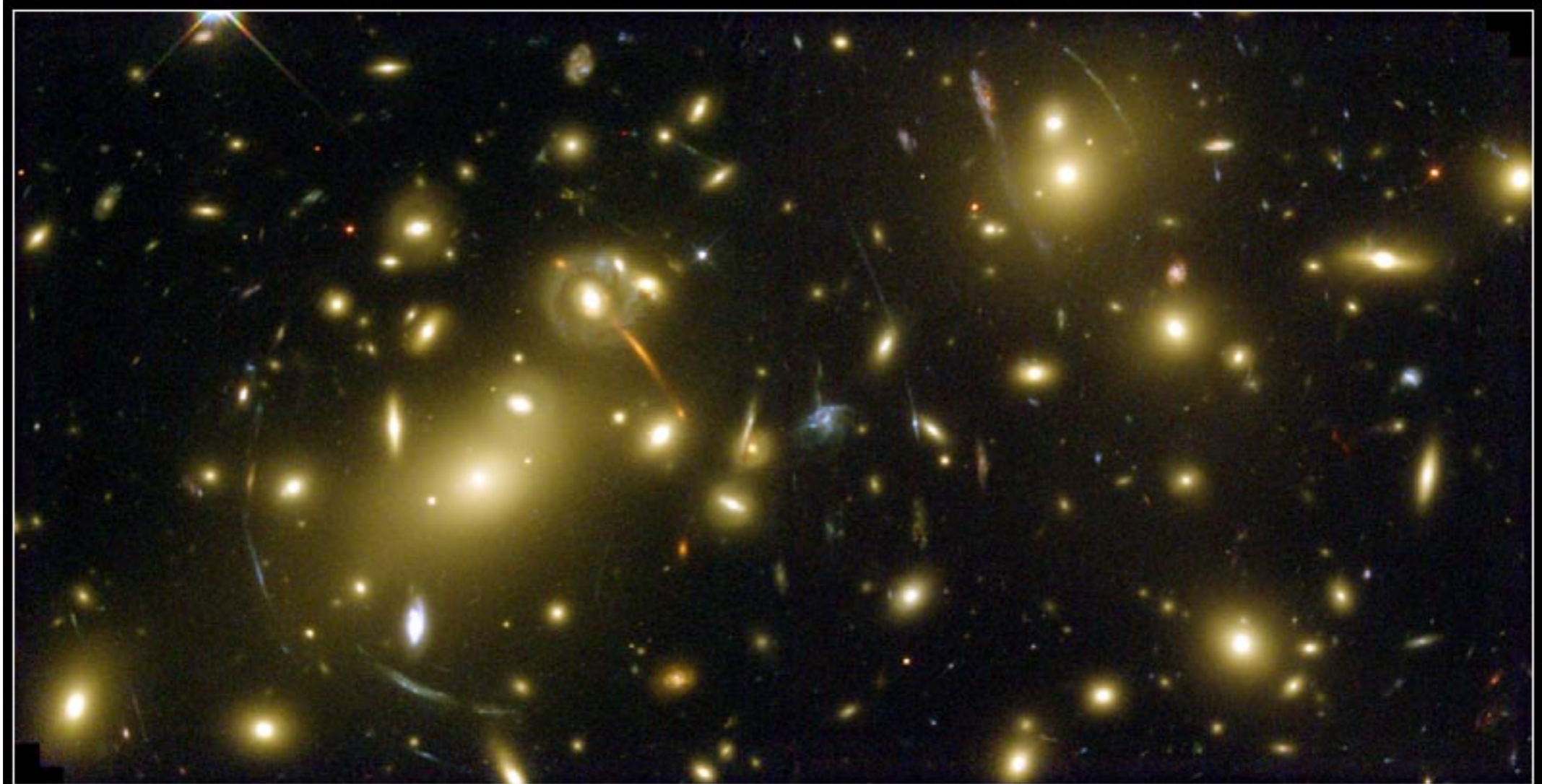
# 重力レンズによる観測

重力により光が曲げられることによる効果



光らない重力源の存在確認ができる

# 重力レンズによる観測



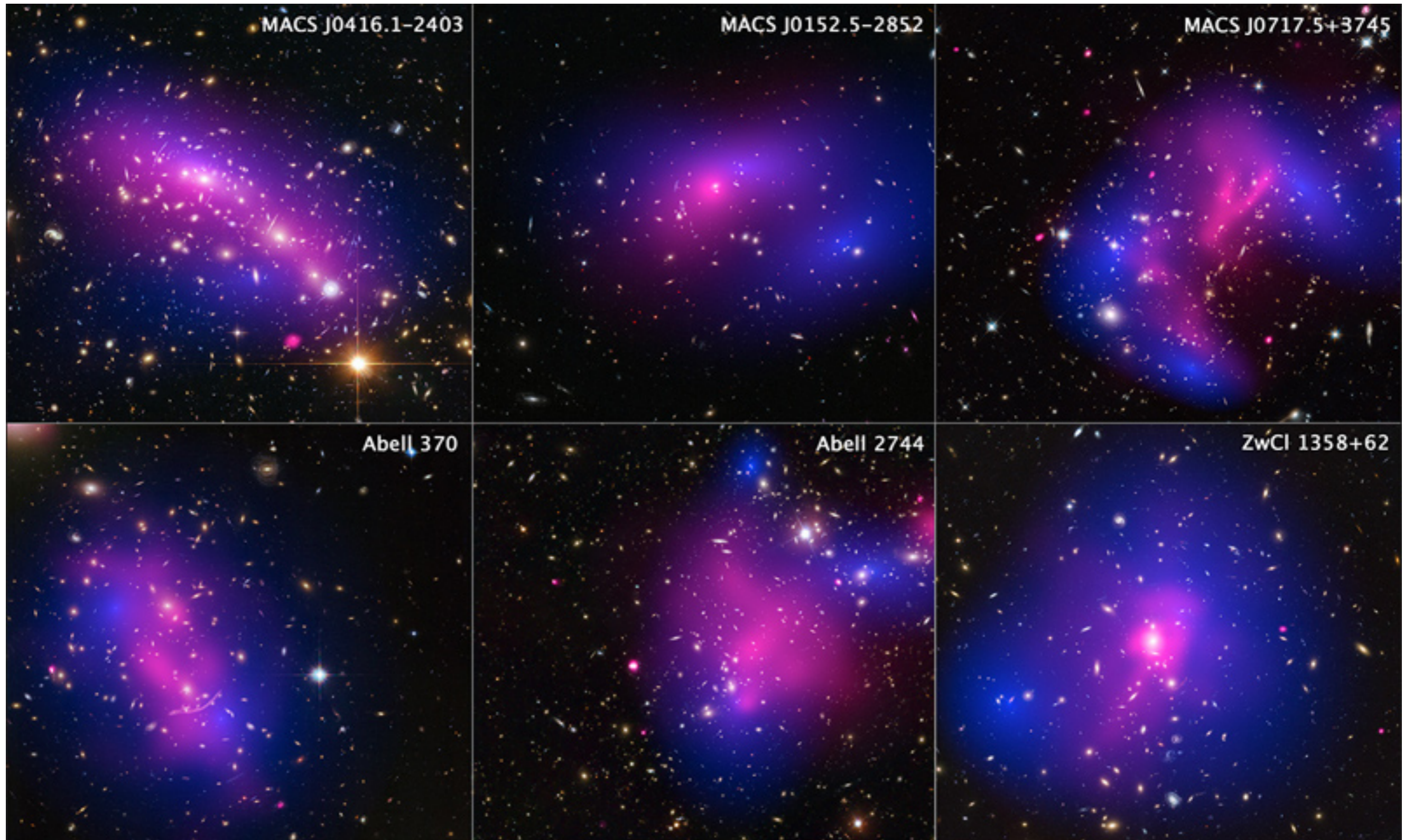
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

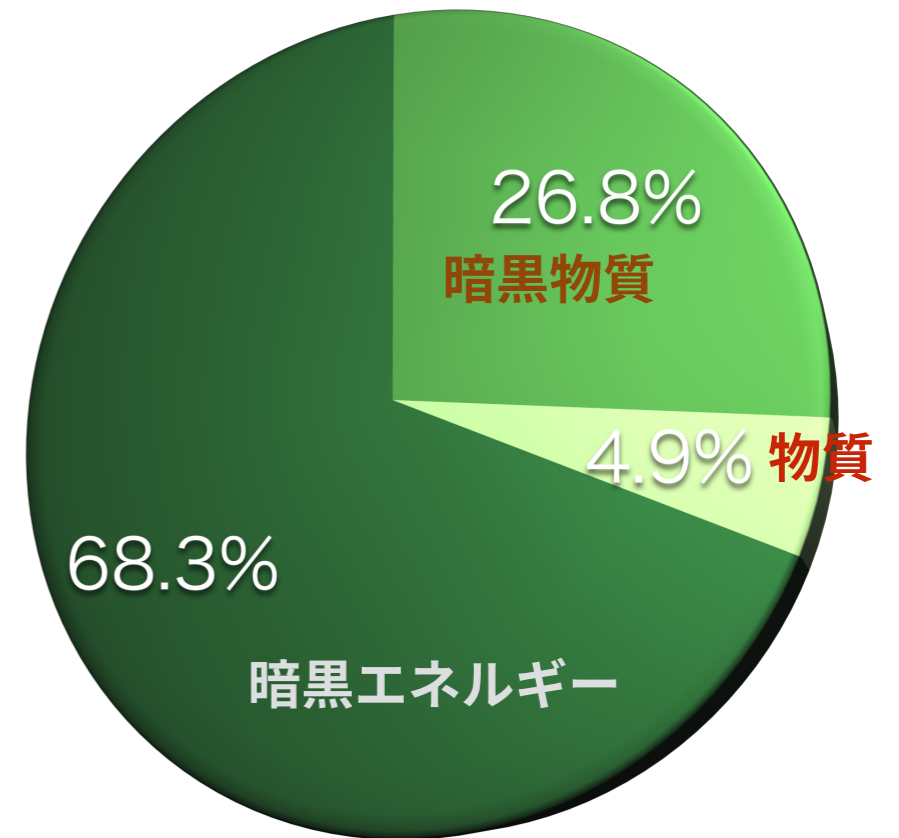
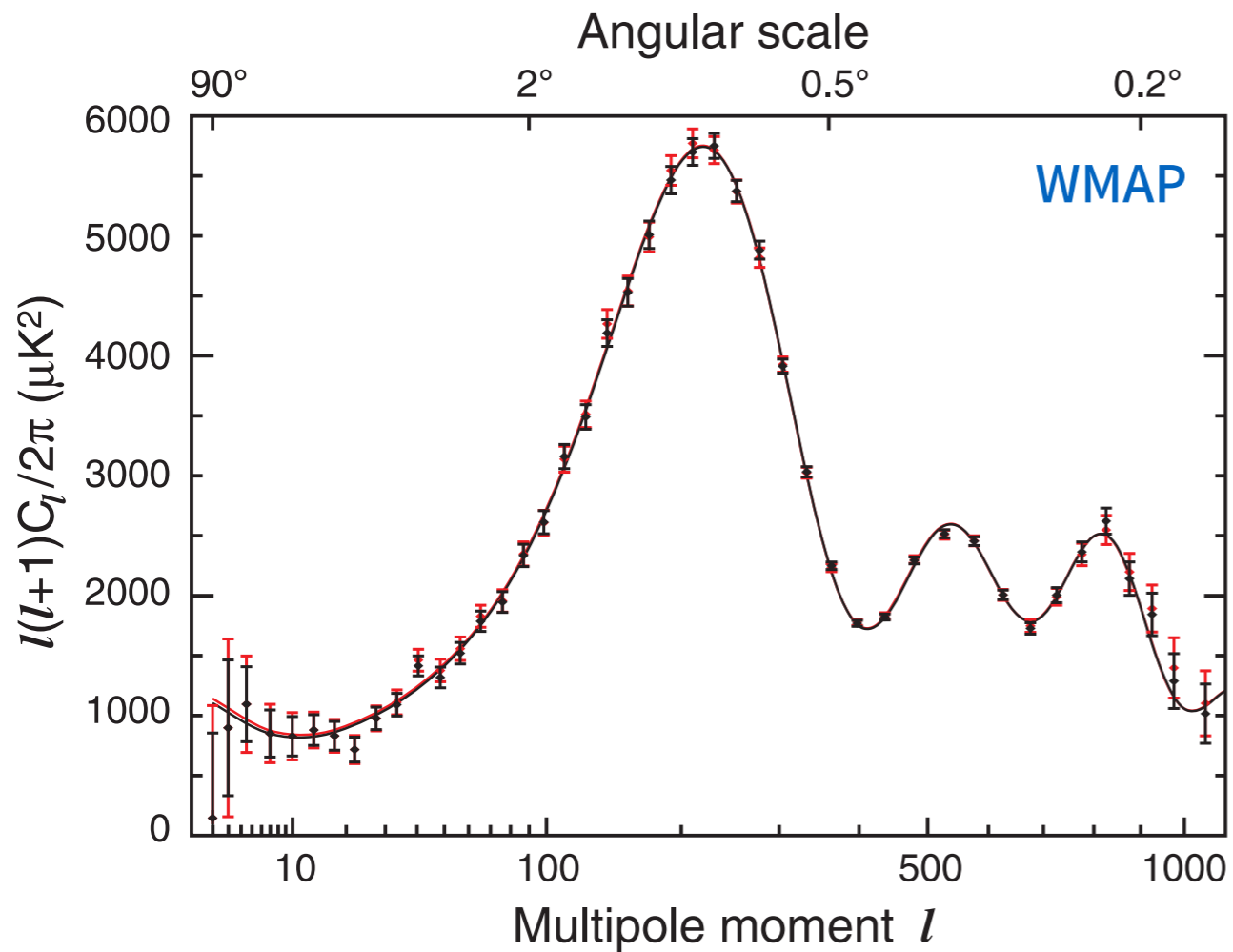
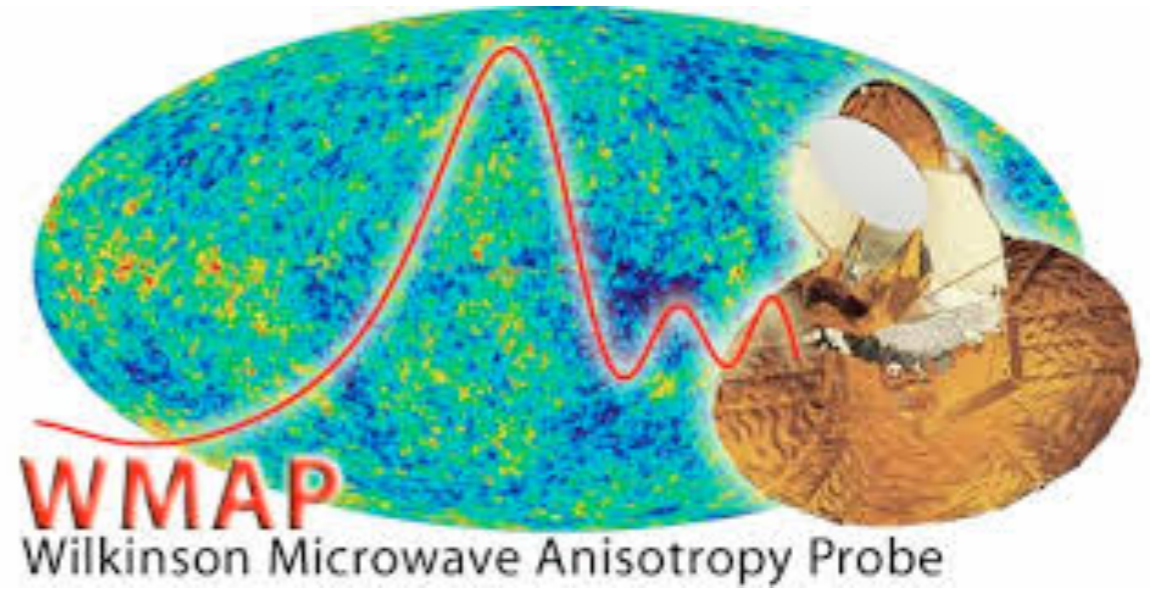
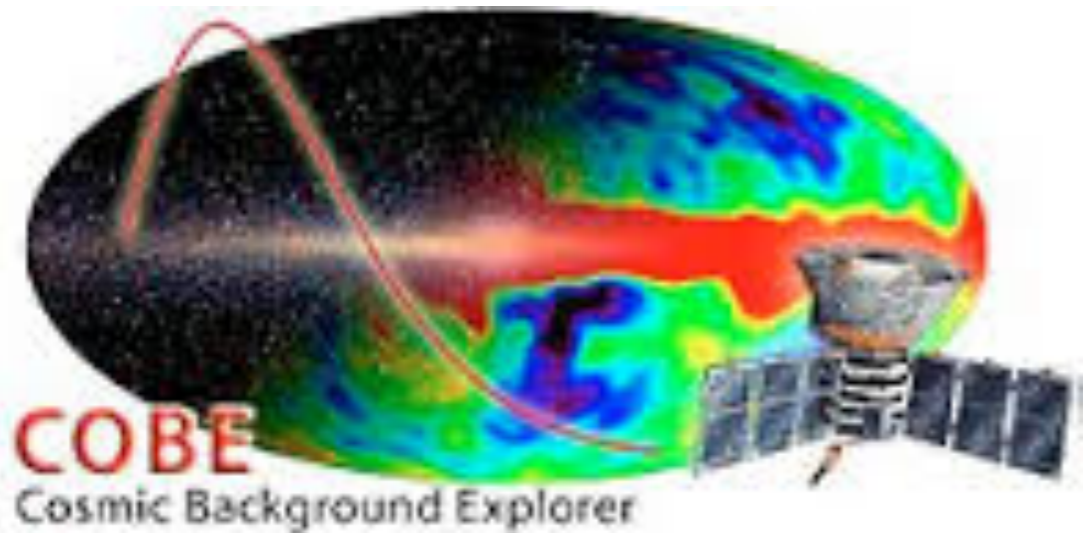


# 銀河団の衝突





# 宇宙背景輻射の観測



# MACHO

Massive Compact Halo Object

要するにあまり光らない星たち

★ 褐色矮星

★ 白色矮星

★ 中性子星

★ ブラックホール

重力レンズを利用した観測で探索



必要な数には全然足りなさそう

残った可能性は、

何かしらの素粒子

原始ブラックホール



# 暗黒物質の性質

- ★ 光らない(電氣的に中性)
- ★ 質量を持つ
- ★ 安定に存在する
  - ★ 少なくとも宇宙年齢程度よりも長い寿命の粒子
- ★ バリオン数を持たない(元素合成に寄与しない)
- ★ 暗黒物質の性質が大規模構造に影響をおよぼす

# 素粒子標準模型

The Nobel Prize in Physics  
1979



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  のゲージ理論

QCD

電弱理論

物質粒子

matter (fermions)

ゲージ粒子

gauge bosons

クォーク  
quarks

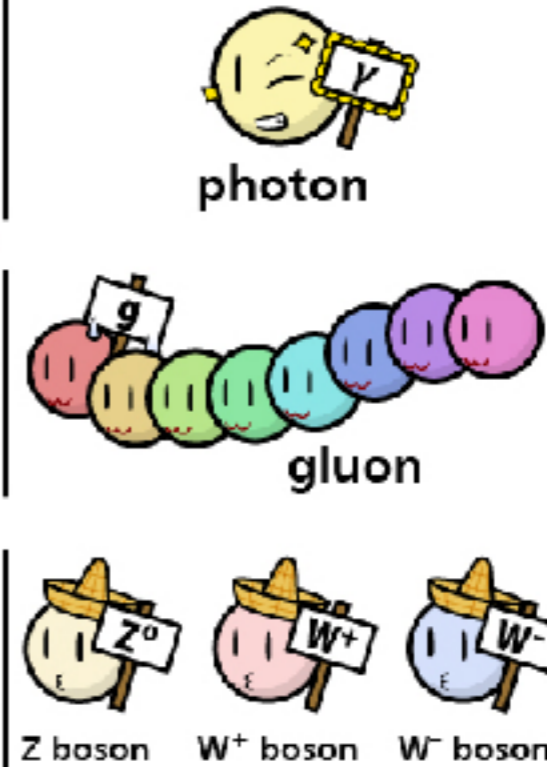
レプトン  
leptons

	I	II	III
up			
down			
electron			
electron neutrino			

電磁気力  
electromagnetic

強い力  
strong

弱い力  
weak



ヒッグス粒子

Higgs bosons



Higgs boson ©higgstan.com

# 熱い暗黒物質 & 冷たい暗黒物質

脱結合時の温度  $>$  質量

速さ  $\sim$  光の速さ

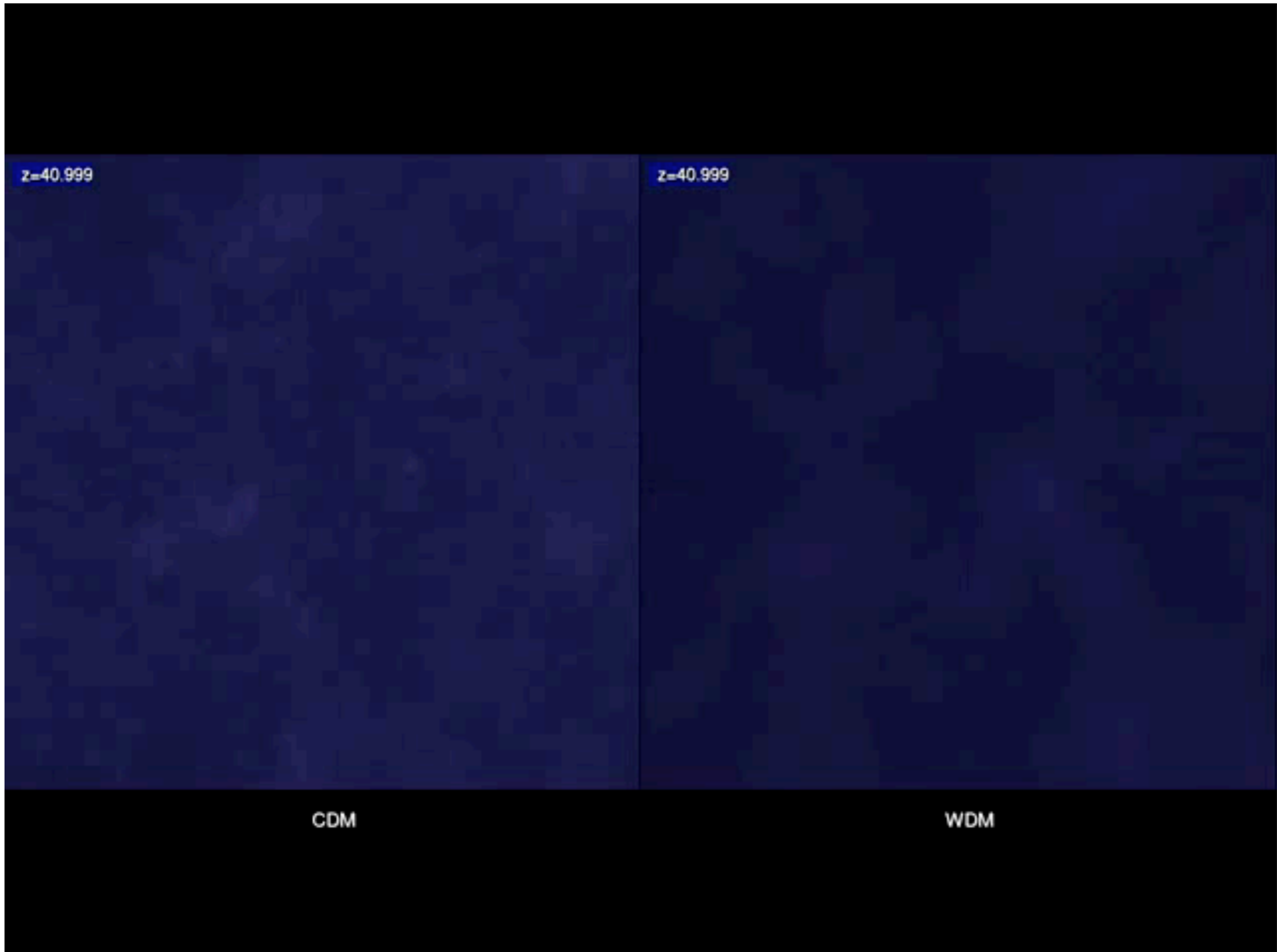
熱い暗黒物質

脱結合時の温度  $<$  質量

速さ  $\ll$  光の速さ

冷たい暗黒物質

# 大規模構造と暗黒物質



# 暗黒物質の性質

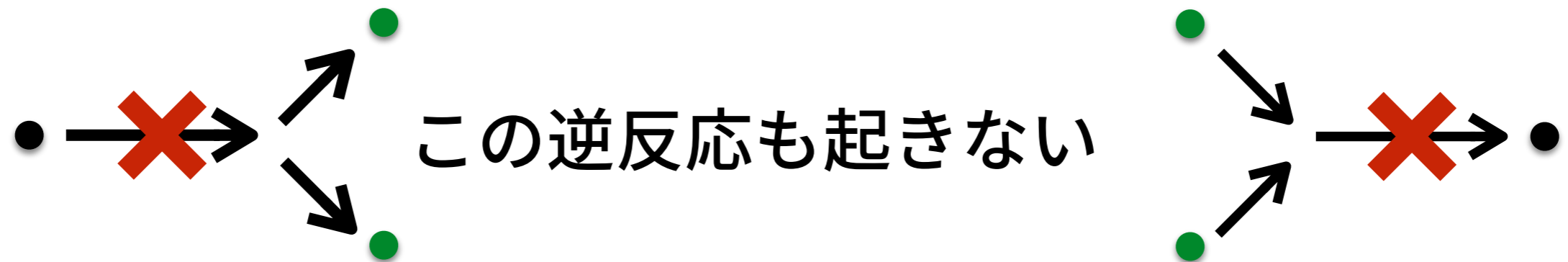
- ★ 光らない(電氣的に中性)
- ★ 質量を持つ
- ★ 安定に存在する
  - ★ 少なくとも宇宙年齢程度よりも長い寿命の粒子
- ★ バリオン数を持たない
- ★ 暗黒物質の性質が大規模構造に影響をおよぼす
  - ★ 冷たい暗黒物質が示唆される

標準模型に該当する候補なし → 未知の新粒子



# 暗黒物質の作られ方

暗黒物質は安定粒子である

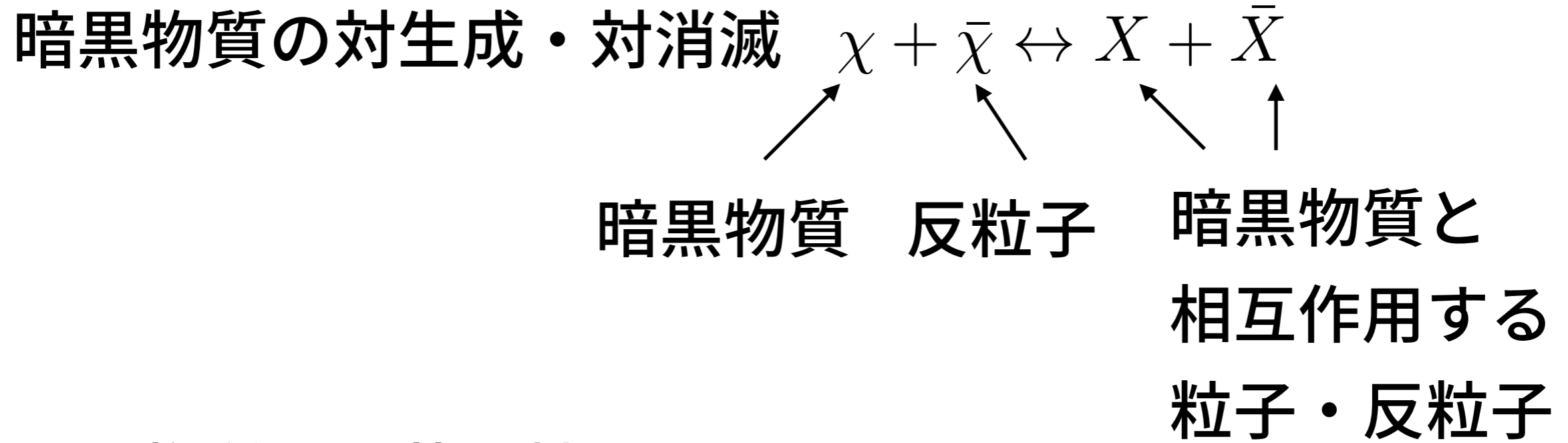


対消滅・対生成は可能



宇宙にたくさんある光子が散乱する際に対生成される  
ただし、対消滅が同じ頻度で起きるので、消えてしまう

# 暗黒物質の残存量



暗黒物質は電荷を持たない



粒子と反粒子が同一の粒子と考えることが多い

ボゾンの場合は実スカラー粒子

フェルミオンの場合はマヨラナ粒子

# ボルツマン方程式

$$A + i + j + \dots \leftrightarrow k + \ell + \dots$$

という反応で粒子数が変化する粒子Aの数密度を $n$ とする

共動体積中の粒子数の変化は  $2a^3 \int d\Pi C$  と書くことにする

$$\begin{aligned} \frac{d(a^3 n)}{dt} = & a^3 \int d\Pi_A d\Pi_i d\Pi_j \cdots d\Pi_k d\Pi_\ell \cdots \\ & \times (2\pi)^4 \delta(P_A + P_i + P_j + \cdots - P_k - P_\ell - \cdots) \\ & \left[ f_k f_\ell \cdots (1 \mp f_A)(1 \mp f_i)(1 \mp f_j) \cdots |\mathcal{M}_{k+\ell+\dots \rightarrow A+i+j+\dots}|^2 \right. \\ & \left. - f_A f_i f_j \cdots (1 \mp f_k)(1 \mp f_\ell) \cdots |\mathcal{M}_{A+i+j+\dots \rightarrow k+\ell+\dots}|^2 \right] \end{aligned}$$

$$d\Pi = \frac{d^3 P}{(2\pi)^3 2P_0} \quad f(\vec{k}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E(\vec{k}) - \mu}{k_B T}\right) \pm 1}$$

+: フェルミオン  
-: ボゾン

# ボルツマン方程式

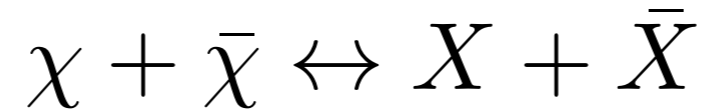
$$\frac{d(na^3)}{dt} = 2a^3 \int d\Pi C$$



$$\frac{dn}{dt} + 3\frac{\dot{a}}{a}n = 2 \int d\Pi C$$

この式を使えば，粒子数密度の変化を定量的に議論できる

# 暗黒物質の脱結合



この反応によって生成・消滅する粒子の残存量を計算する

$X$ は化学ポテンシャル0の熱平衡状態にあると仮定

$$n_X = n_{\bar{X}} = n_X^{\text{eq}}$$

暗黒物質は相互作用が弱い場合は，熱平衡でなくてもよい

ただし，粒子と反粒子で対称であると仮定する  $n_\chi = n_{\bar{\chi}}$

このときのボルツマン方程式は

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3\frac{\dot{a}}{a}n_\chi = -\langle\sigma v\rangle [n_\chi^2 - (n_\chi^{\text{eq}})^2]$$



# 暗黒物質の脱結合

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3\frac{\dot{a}}{a}n_\chi = -\langle\sigma v\rangle [n_\chi^2 - (n_\chi^{\text{eq}})^2]$$

$$x = \frac{m}{T} \quad Y = \frac{n_\chi}{s} \quad Y^{\text{eq}} = \frac{n_\chi^{\text{eq}}}{s} \quad \text{とする。} \quad s = \frac{2\pi^2}{45} \frac{m^3 g_{*,S}}{x^3}$$

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3\frac{\dot{a}}{a}n_\chi = \frac{1}{a^3} \frac{d(n_\chi a^3)}{dt} = \frac{1}{a^3} \frac{d(Y s a^3)}{dt} = s \frac{dY}{dt}$$
$$\frac{d(a^3 s)}{dt} = 0$$

輻射優勢時期に注目する。  $T \propto a^{-1}$  より  $\frac{\dot{T}}{T} = -H(x)$

$$\text{よって} \quad \frac{dY}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dY}{dx} = xH \frac{dY}{dx} \quad H(x) = \sqrt{\frac{4\pi^3 g_*}{45}} \frac{m^2}{m_{\text{pl}} x^2}$$

# 暗黒物質の脱結合

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3\frac{\dot{a}}{a}n_\chi = -\langle\sigma v\rangle [n_\chi^2 - (n_\chi^{\text{eq}})^2]$$



$$\frac{dY}{dx} = -\frac{s}{xH}\langle\sigma v\rangle [Y^2 - Y^{\text{eq}2}]$$

$$\frac{dY}{dx} = -\sqrt{\frac{\pi}{45}}\frac{g_*S}{\sqrt{g_*}}m_{\text{pl}}m\frac{\langle\sigma v\rangle}{x^2} [Y^2 - Y^{\text{eq}2}]$$

初期条件は， $Y(x=0) = Y^{\text{eq}}$

ここで， $\Gamma = n^{\text{eq}}\langle\sigma v\rangle$  とすると，

$$\frac{x}{Y^{\text{eq}}}\frac{dY}{dx} = -\frac{\Gamma}{H}\left[\left(\frac{Y}{Y^{\text{eq}}}\right)^2 - 1\right]$$

# 暗黒物質の脱結合

冷たい暗黒物質の場合を考える

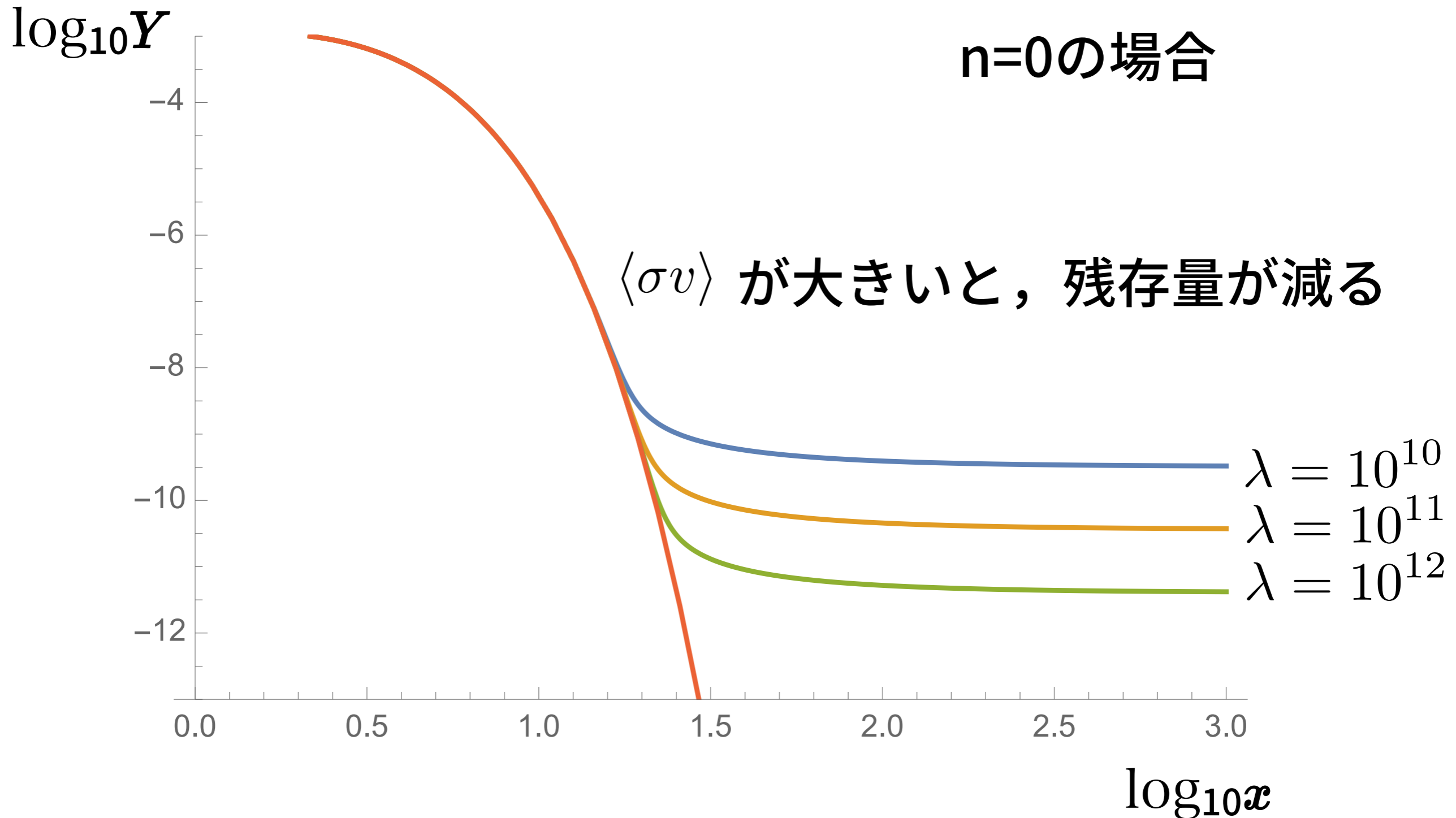
簡単のため、 $\langle\sigma v\rangle \propto T^n$  となる場合に注目する

$$\frac{dY}{dx} = -\frac{s}{xH} \langle\sigma v\rangle [Y^2 - Y^{\text{eq}2}] \longrightarrow \frac{dY}{dx} = -\frac{\lambda}{x^{n+2}} [Y^2 - Y^{\text{eq}2}]$$

$$\lambda \equiv \frac{s}{H} \langle\sigma v\rangle \Big|_{T=m} = m_{\text{pl}} m \sqrt{\frac{\pi}{45}} \frac{g_* S}{\sqrt{g_*}} \langle\sigma v\rangle \Big|_{T=m}$$

また、
$$Y^{\text{eq}} = \frac{45}{4\sqrt{2}\pi^{7/2}} \frac{g}{g_* S} x^{3/2} e^{-x}$$

# 暗黒物質の脱結合



# WIMP

Weakly Interacting Massive Particle

100GeVくらいの質量を持ち，標準模型の粒子との結合が電弱相互作用くらいの暗黒物質粒子を考える

$$\langle\sigma v\rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$$

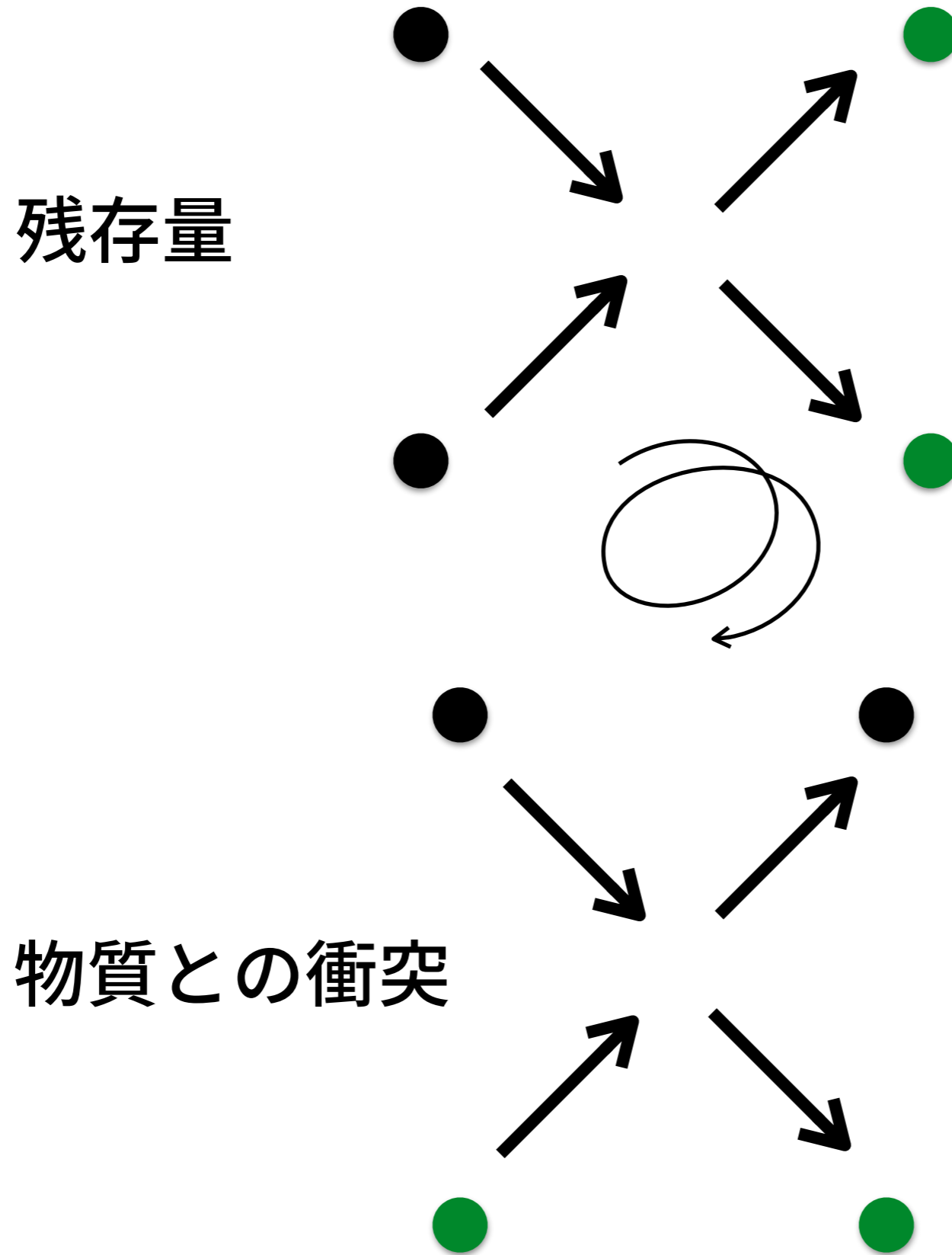


宇宙の観測から分かっている残存量を再現する

”自然”な暗黒物質として，WIMPシナリオは魅力的（だった）

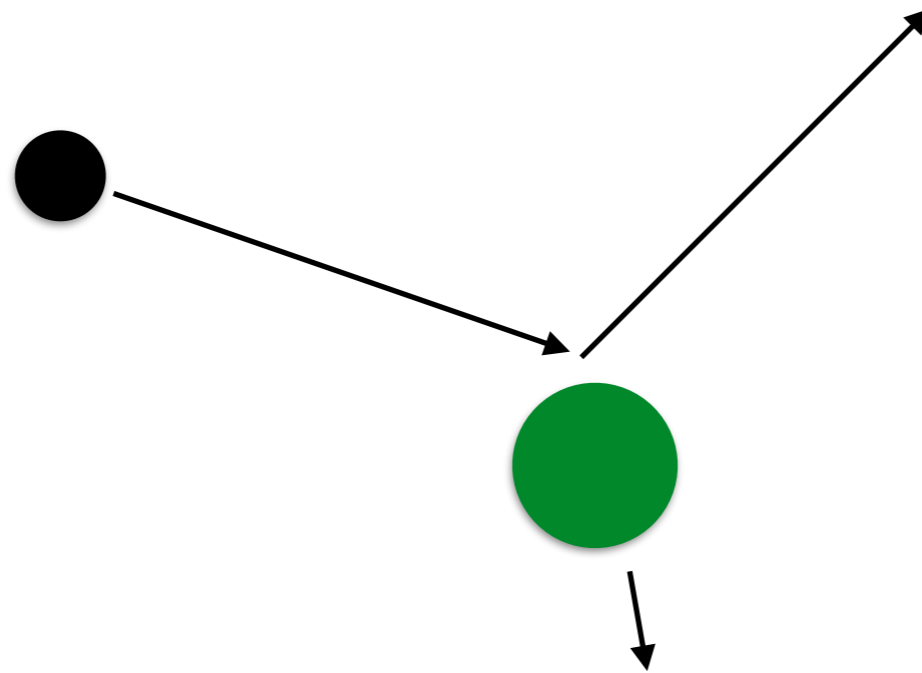


# 暗黒物質の探索



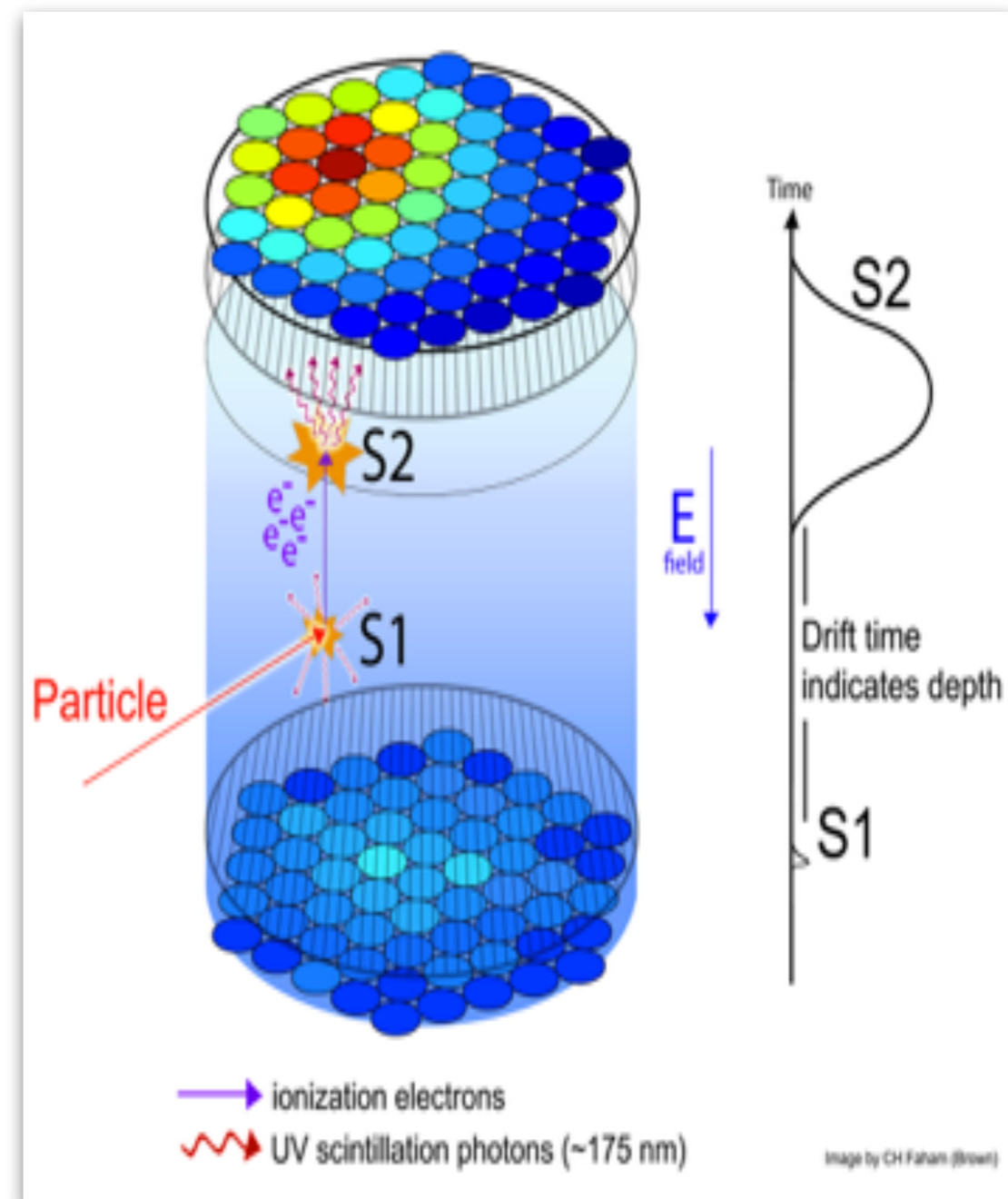
# 暗黒物質の直接探索

原子核と暗黒物質の衝突を，原子核の反跳によって観る



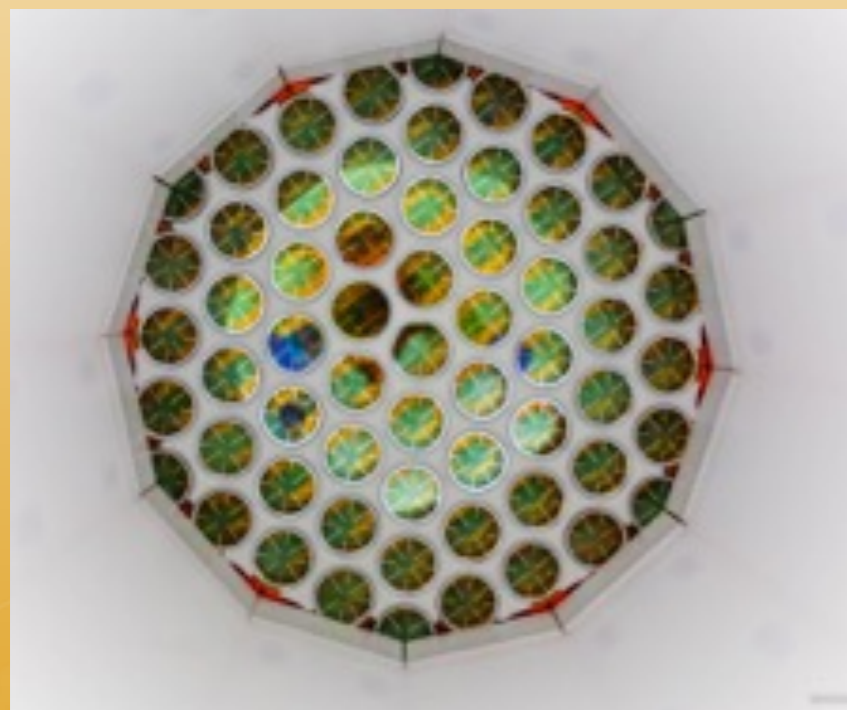
# Liq. Xenon Time Projecting Chamber <sup>6</sup>

- Energy depositions produce light and charge
  - Prompt scintillation (S1)
  - Proportional scintillation (S2): Measurement of the electrons extracted from the liquid to the gas
- 3D Position Reconstruction
  - Depth obtained from the time difference between S1 and S2 - called here drift time
  - XY reconstructed from the S2 light pattern
- Ratio of charge to light (S2/S1) is a discriminator against backgrounds (>99%):
  - **Nuclear Recoil (NR):** WIMPs and neutrons interact with nuclei - **short, dense tracks**
  - **Electronic Recoil (ER):** axions,  $\gamma$ s and e- interact with the electrons - **longer, less dense tracks**
- TPCs are scalable with improvement of performance

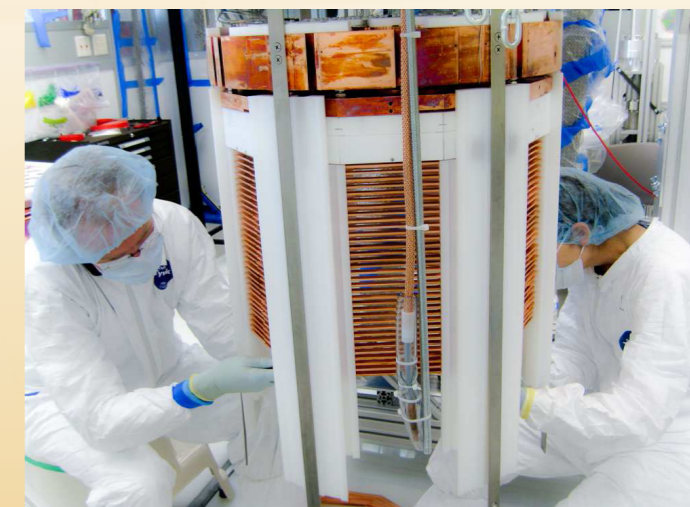
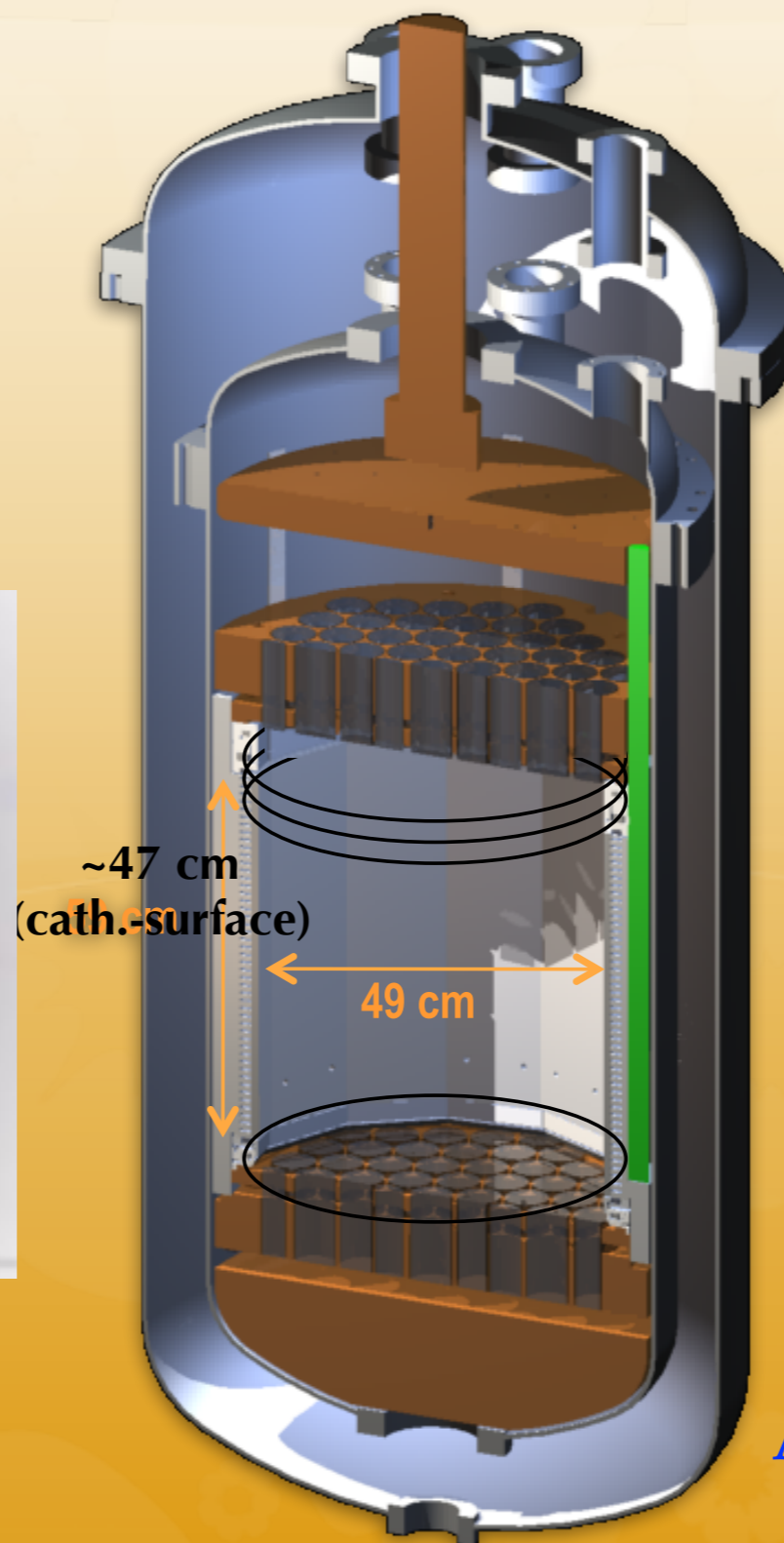


# The LUX Experiment

- 370 kg Liquid Xenon Detector (59 cm height, 49 cm diameter)
  - 250 kg in the active region (with field)



122 ultra low-background PMTs (61 on top, 61 on bottom) observe both S1 and S2



Construction materials chosen for low radioactivity (Ti, Cu, PTFE)



Active region defined by PTFE reflectors (high reflectivity >97%) - high light collection)

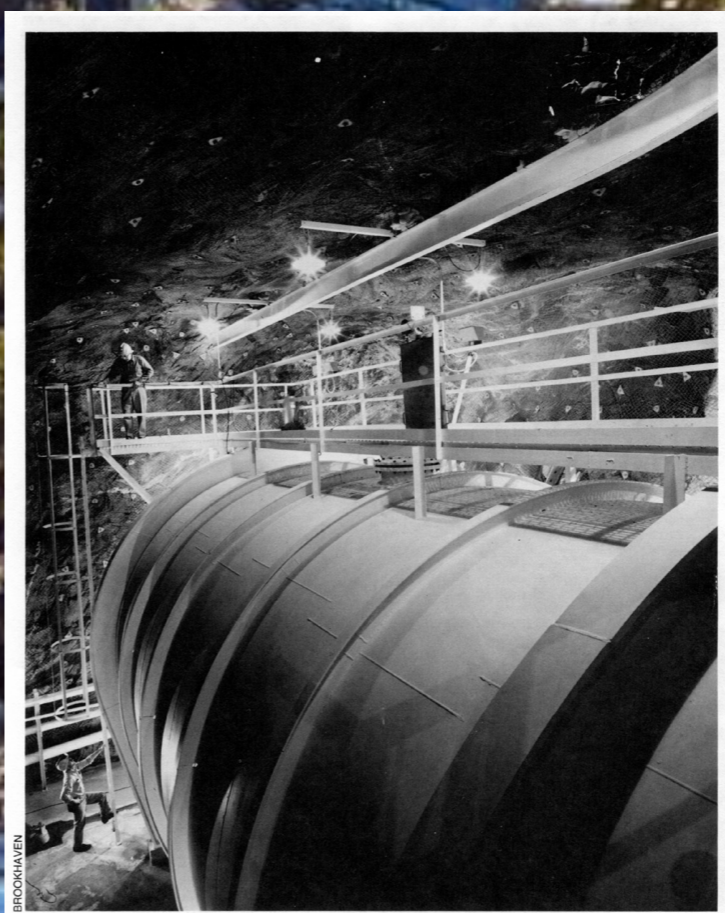


# LUX AT SURF

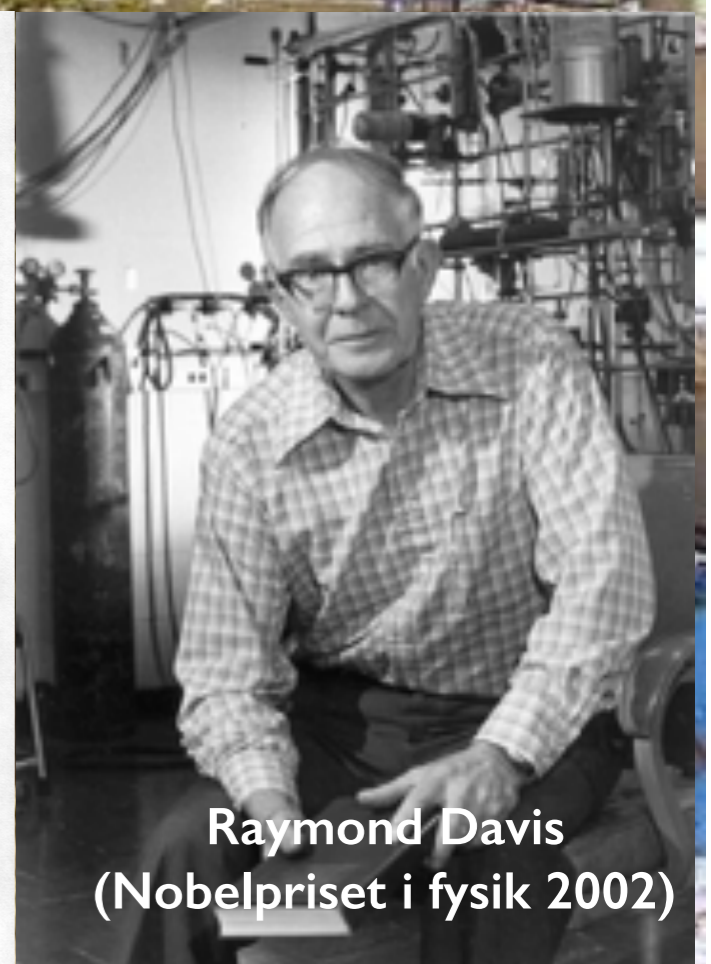
(Sanford Underground Research Facility)



- Sanford Underground Research Facility Lead, South Dakota, USA.
- Former Home of the Homestake Solar Neutrino Experiment 1970-1994
- 1478 m deep (4300 m.w.e.)
- $\mu$  flux reduced  $\times 10^{-7}$  compared to sea level)

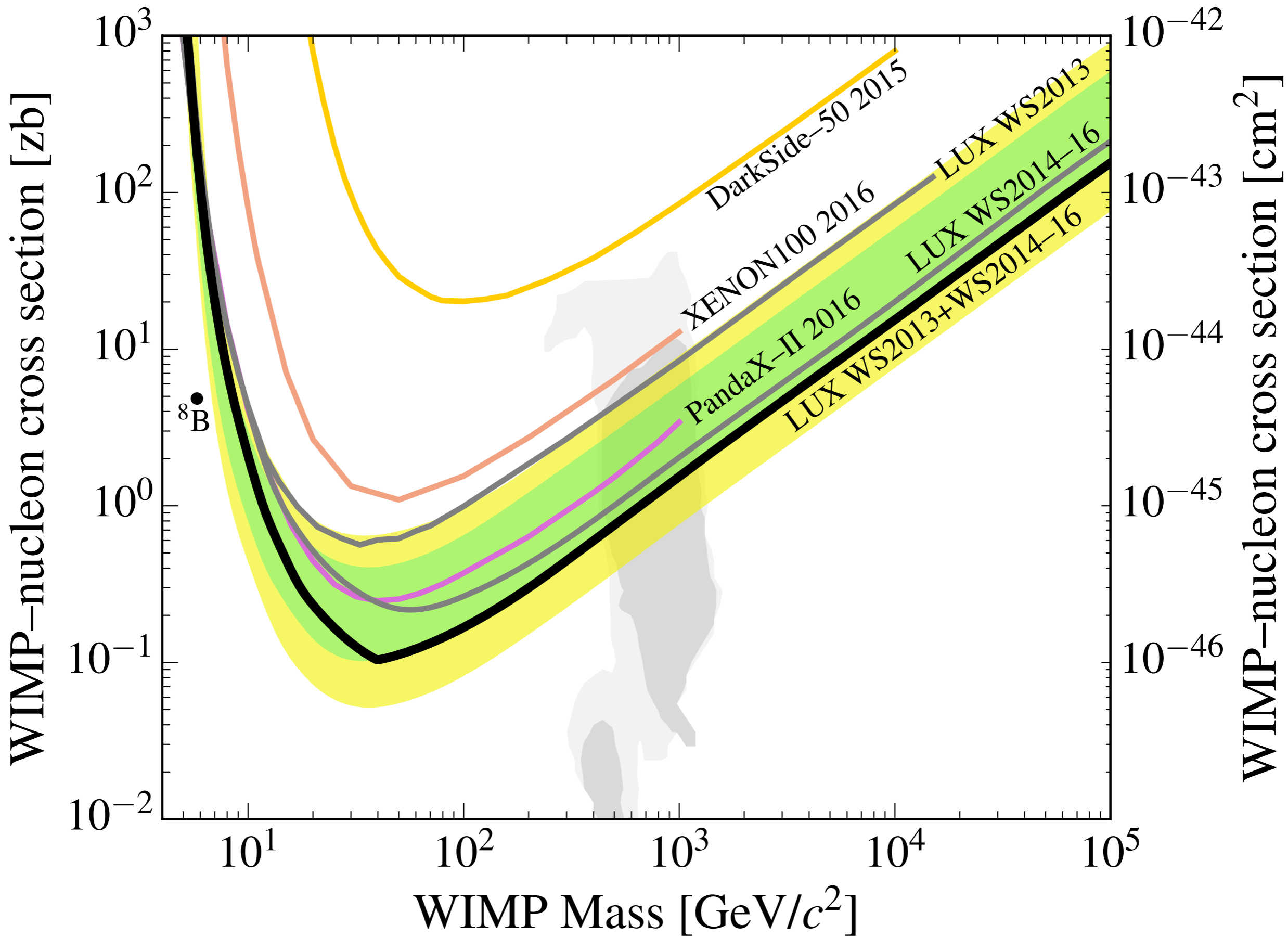


Davis' neutrino detection apparatus one kilometer underground in the Homestake Gold Mine, Lead, South Dakota. The tank contains 400,000 liters of perchloroethylene.



**Raymond Davis  
(Nobelpriset i fysik 2002)**





# The LUX-ZEPLIN Experiment



- Turning on by 2020 with 1,000 initial live-days plan
- In the same location of LUX
- 10 tons total, 7 tons active, ~5.6 ton fiducial
- Unique triple veto system



LXe heat exchanger tower

120 outer detector PMTs

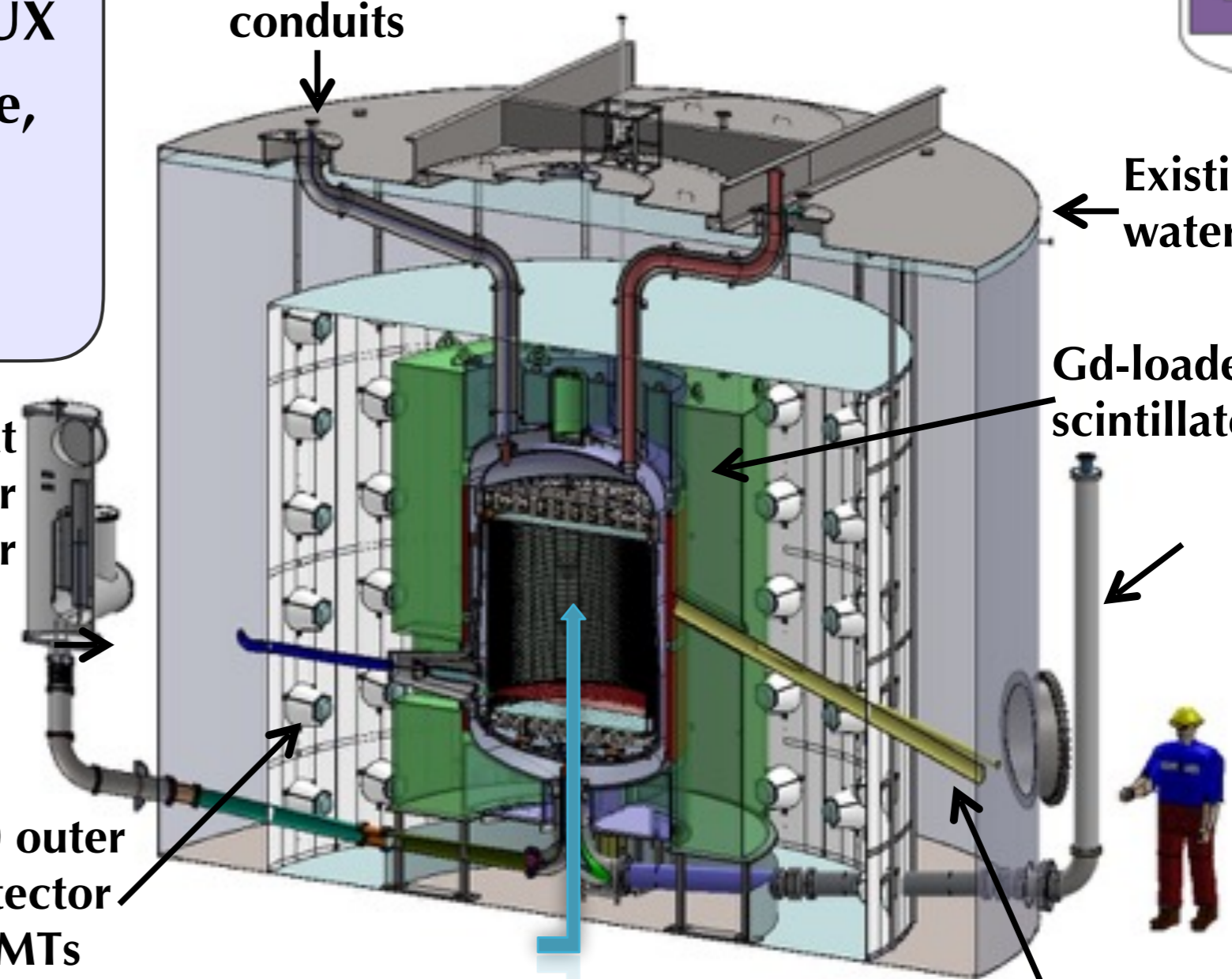
Instrumentation conduits

Existing water tank

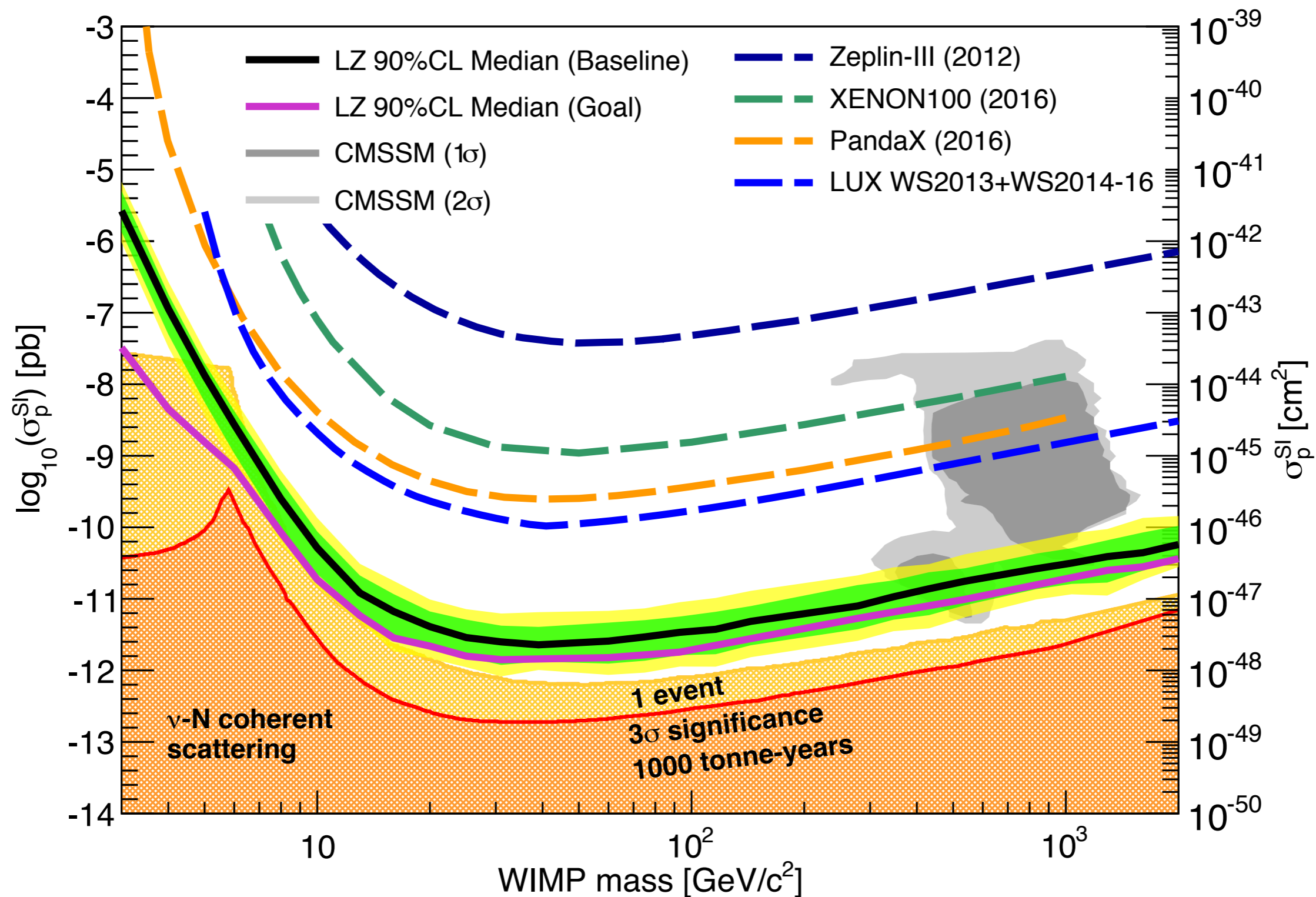
Gd-loaded liquid scintillator

n tubes

(Main Detector)  
2-phase XeTPC  
494 (131) TPC (Xe skin) PMTs



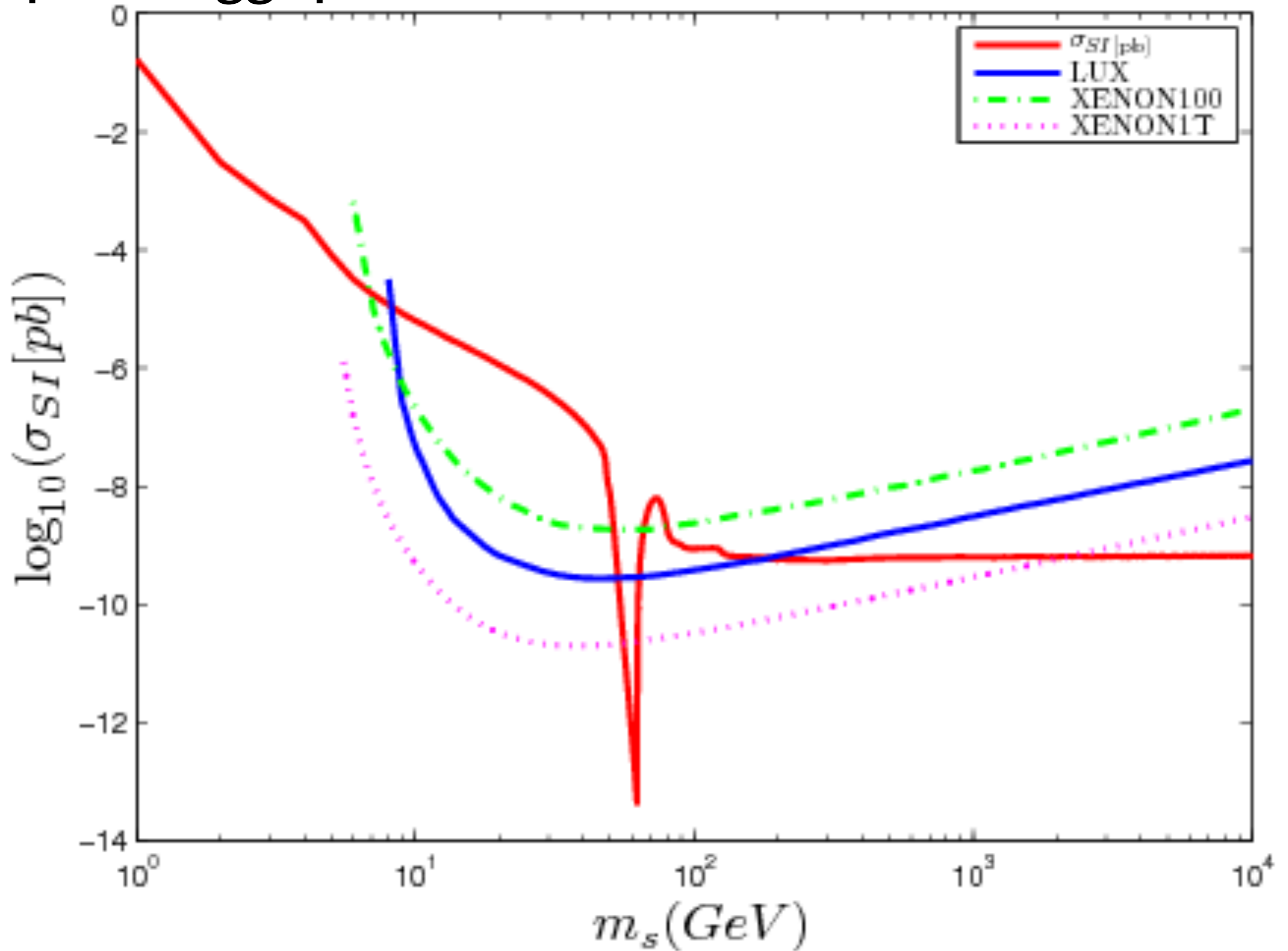
# The LUX-ZEPLIN Experiment



**(LZ 5.6 Tonnes, 1000 live days)**



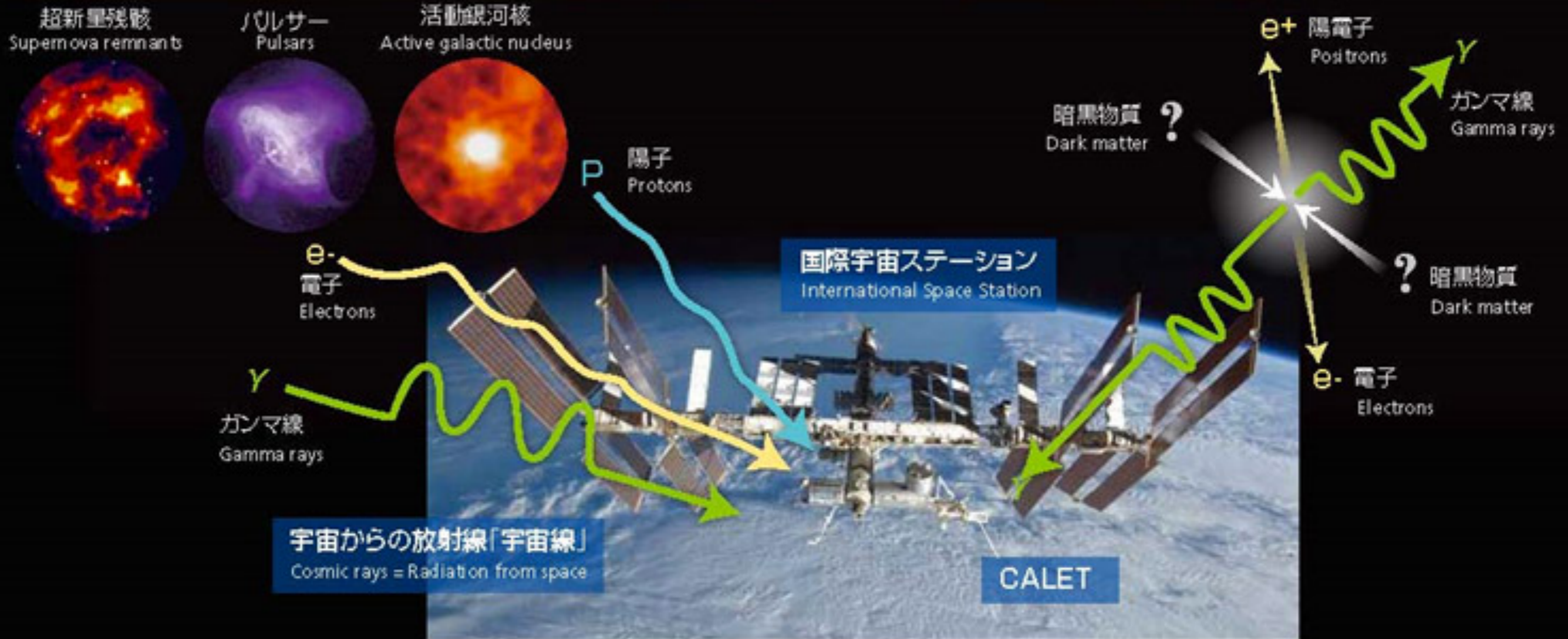
# Simplest Higgs portal DM model



# 暗黒物質間接探索

宇宙線を加速する天体 Celestial bodies accelerating cosmic rays

暗黒物質 Dark matter

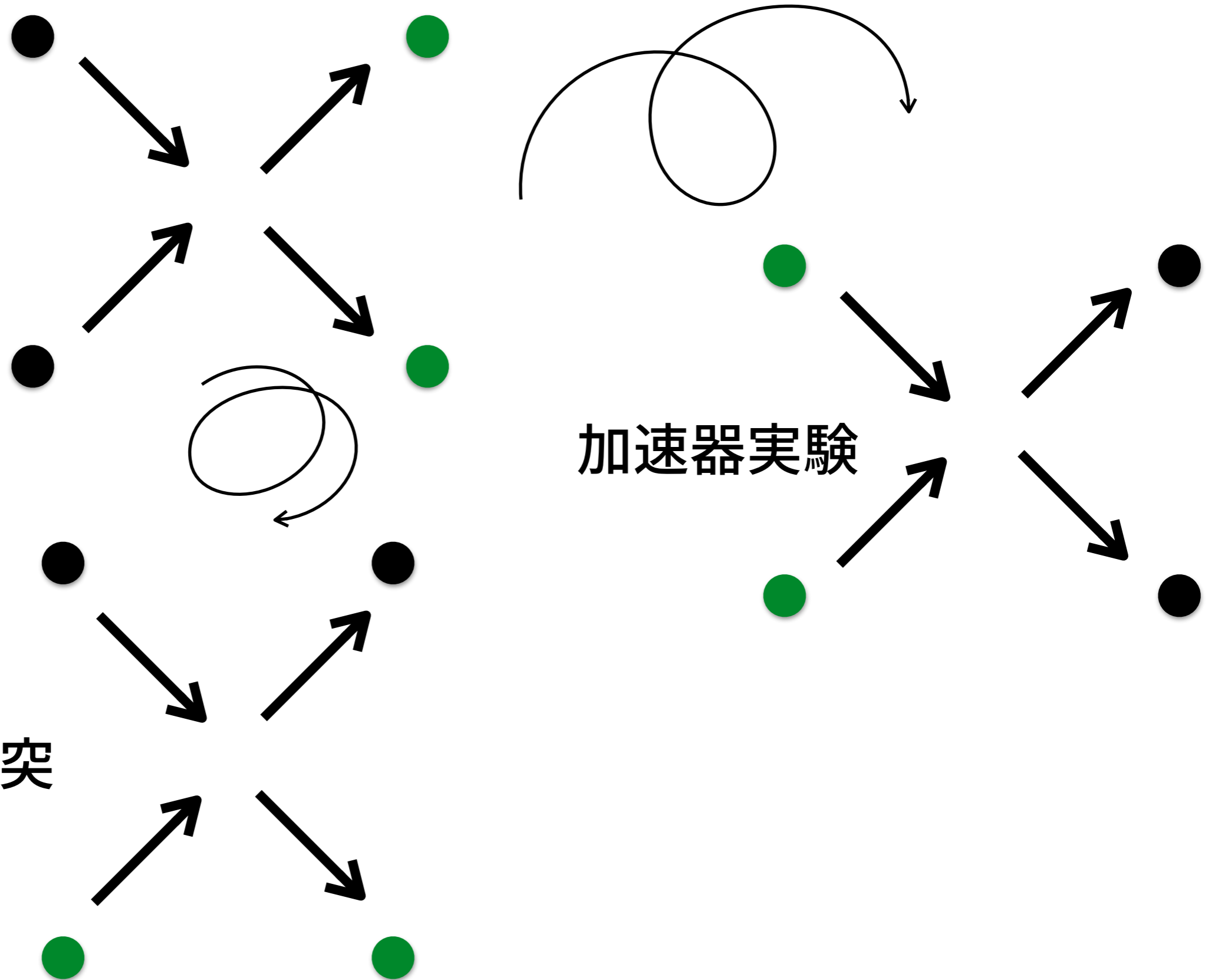


<http://www.jaxa.jp>

銀河中心や太陽中心など，暗黒物質が集中しているところで起きる対消滅などによって発生する宇宙線を見る

# 加速器実験

残存量



加速器実験

物質との衝突



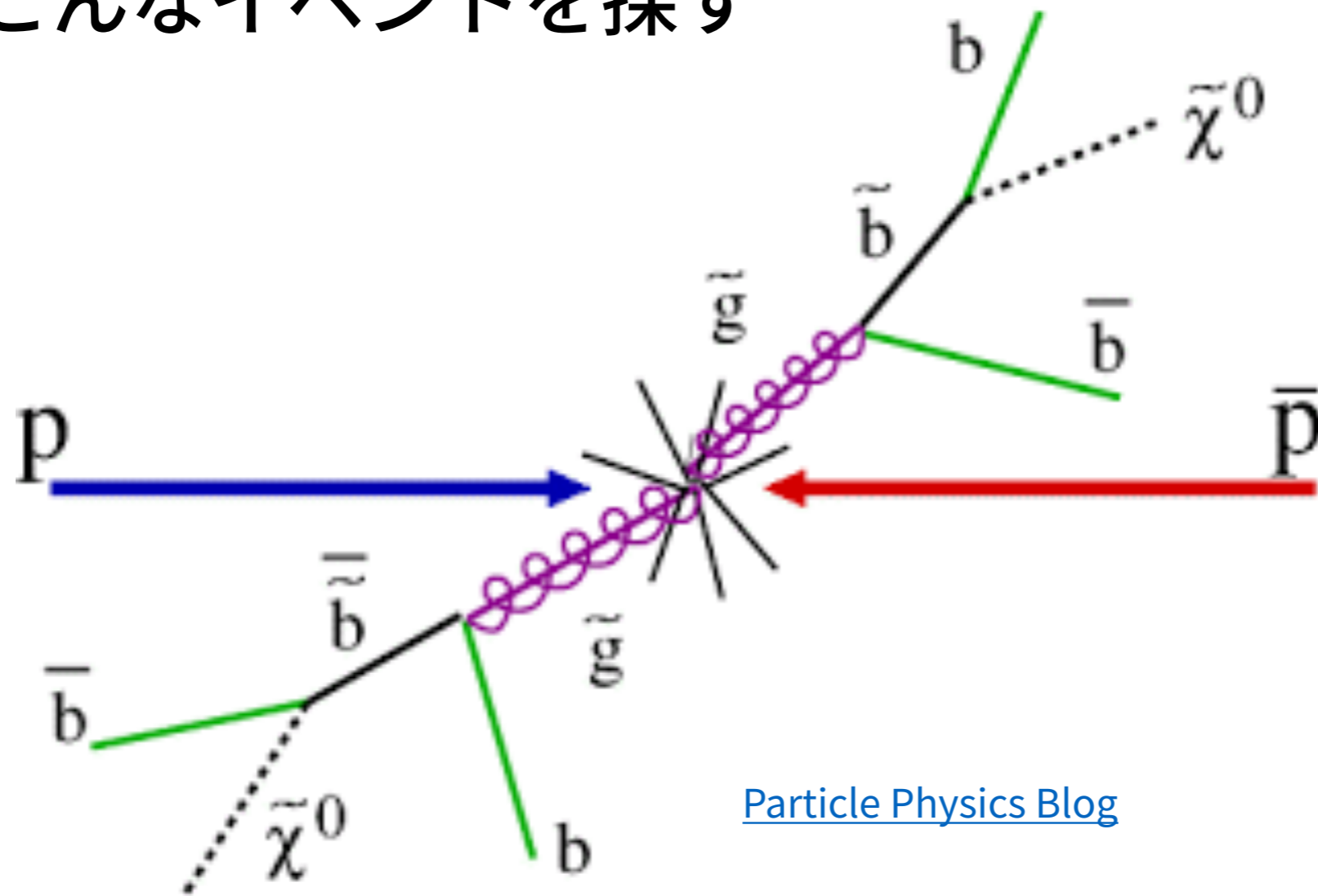
# Large Hadron Collider



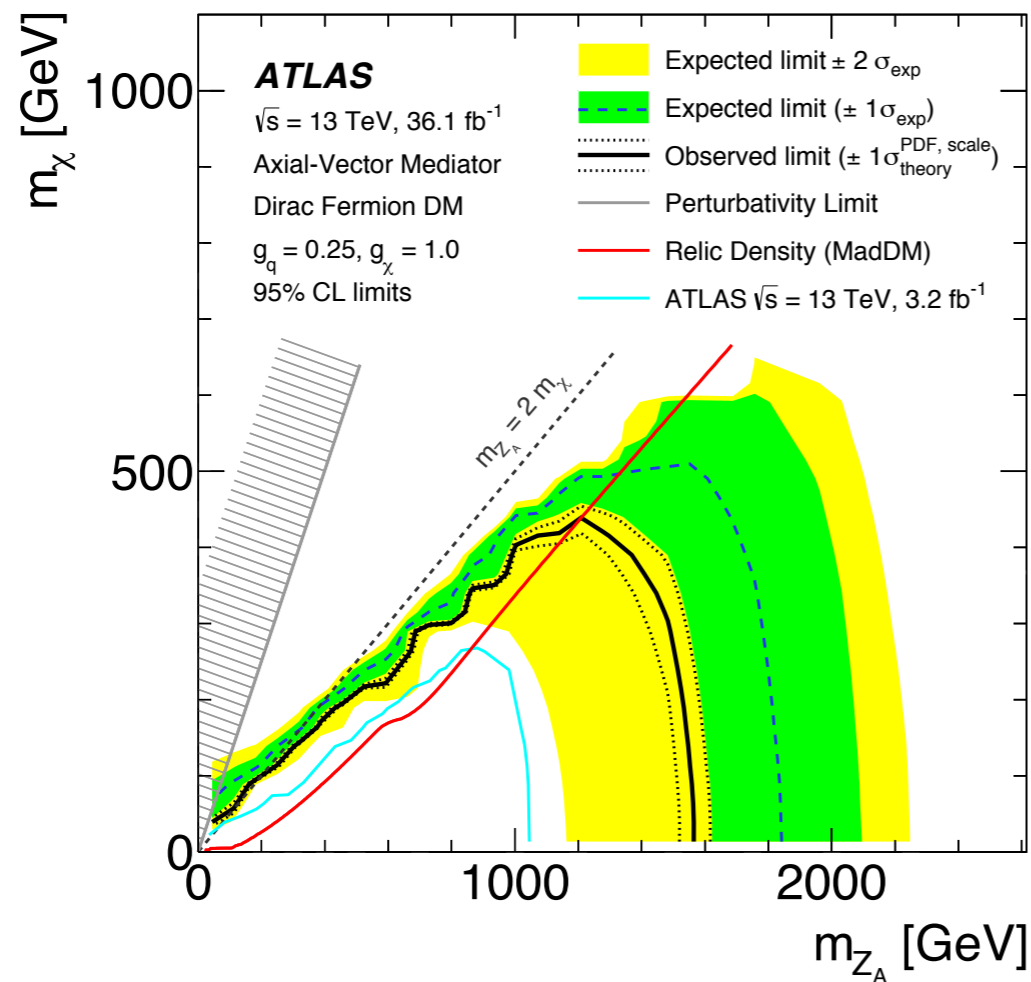


# Large Hadron Collider

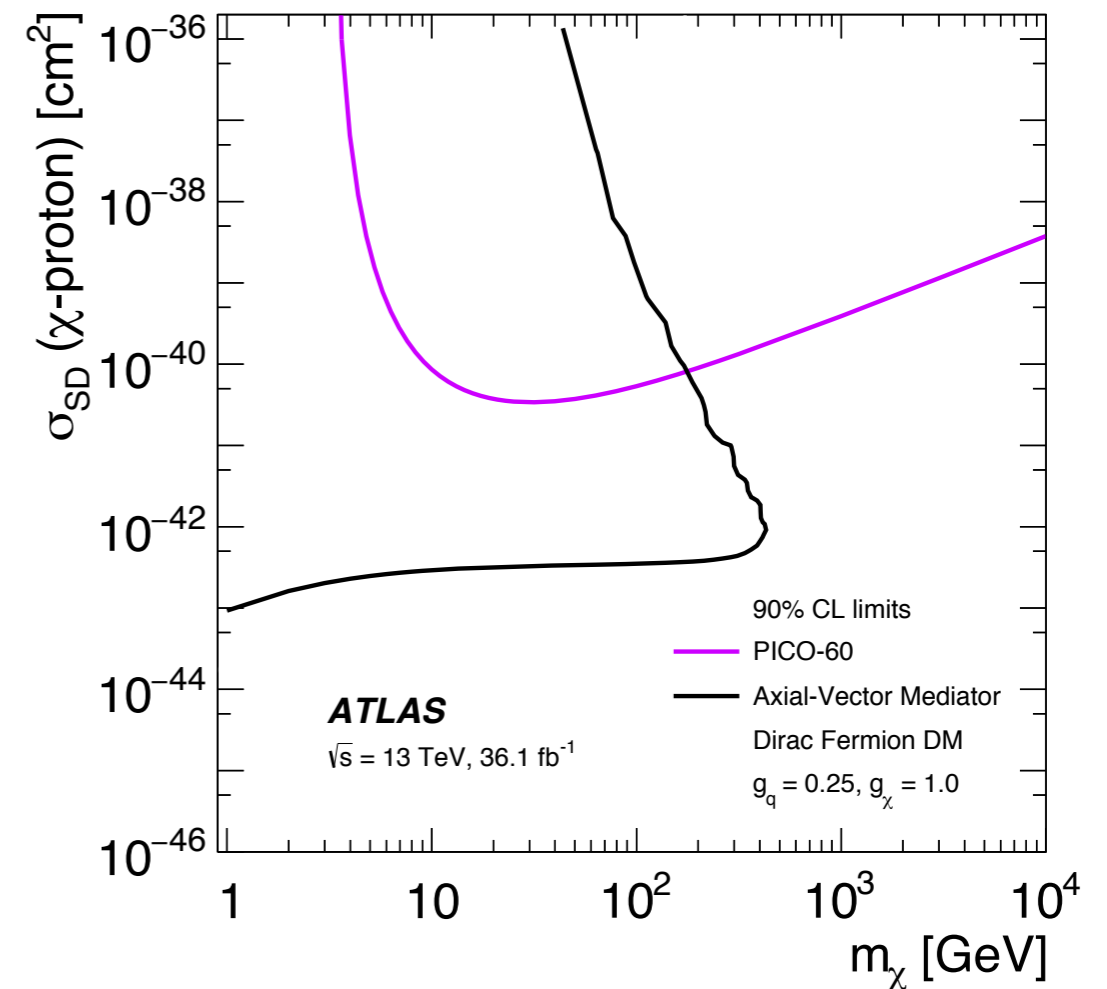
例えばこんなイベントを探す



[Particle Physics Blog](#)



(a)

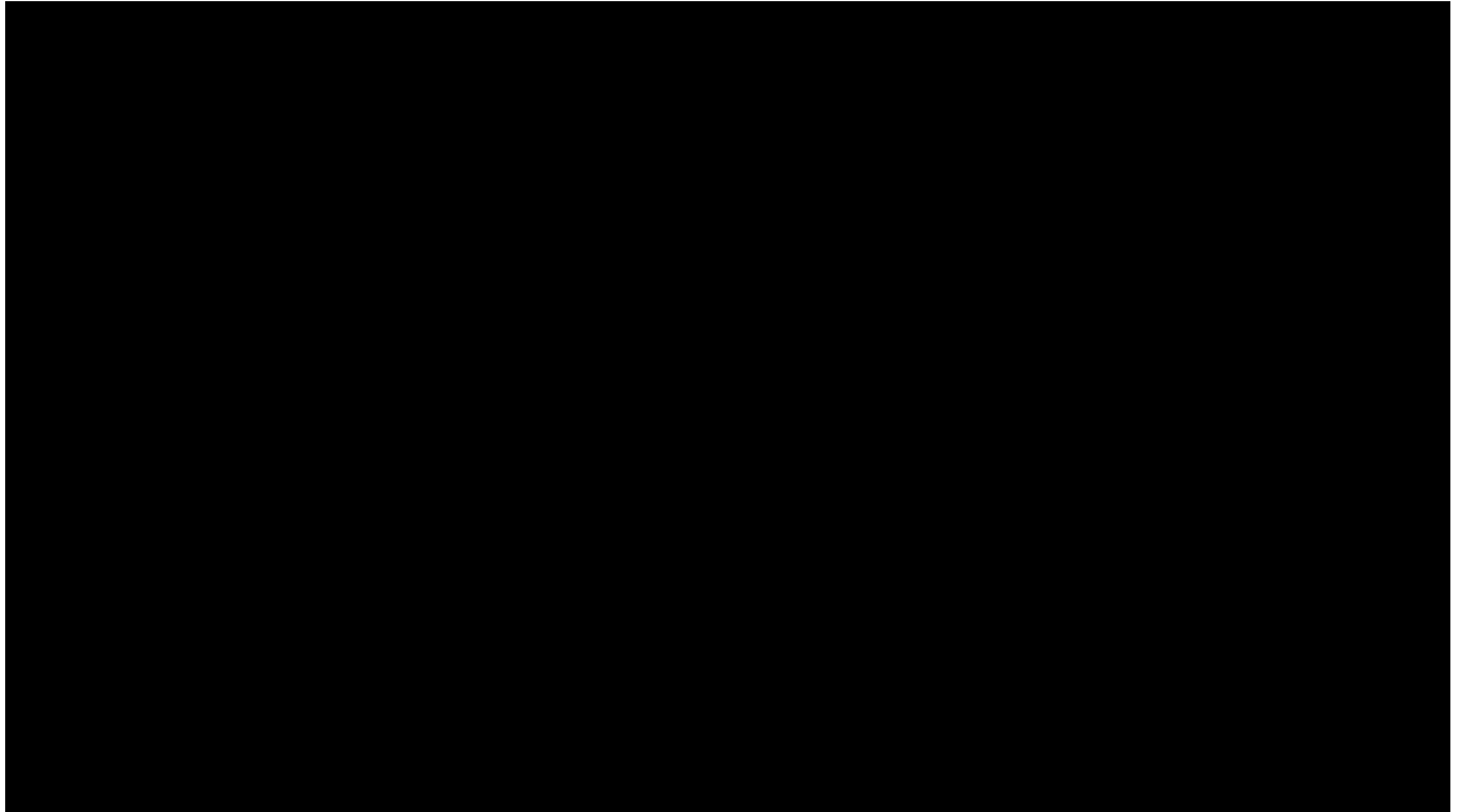


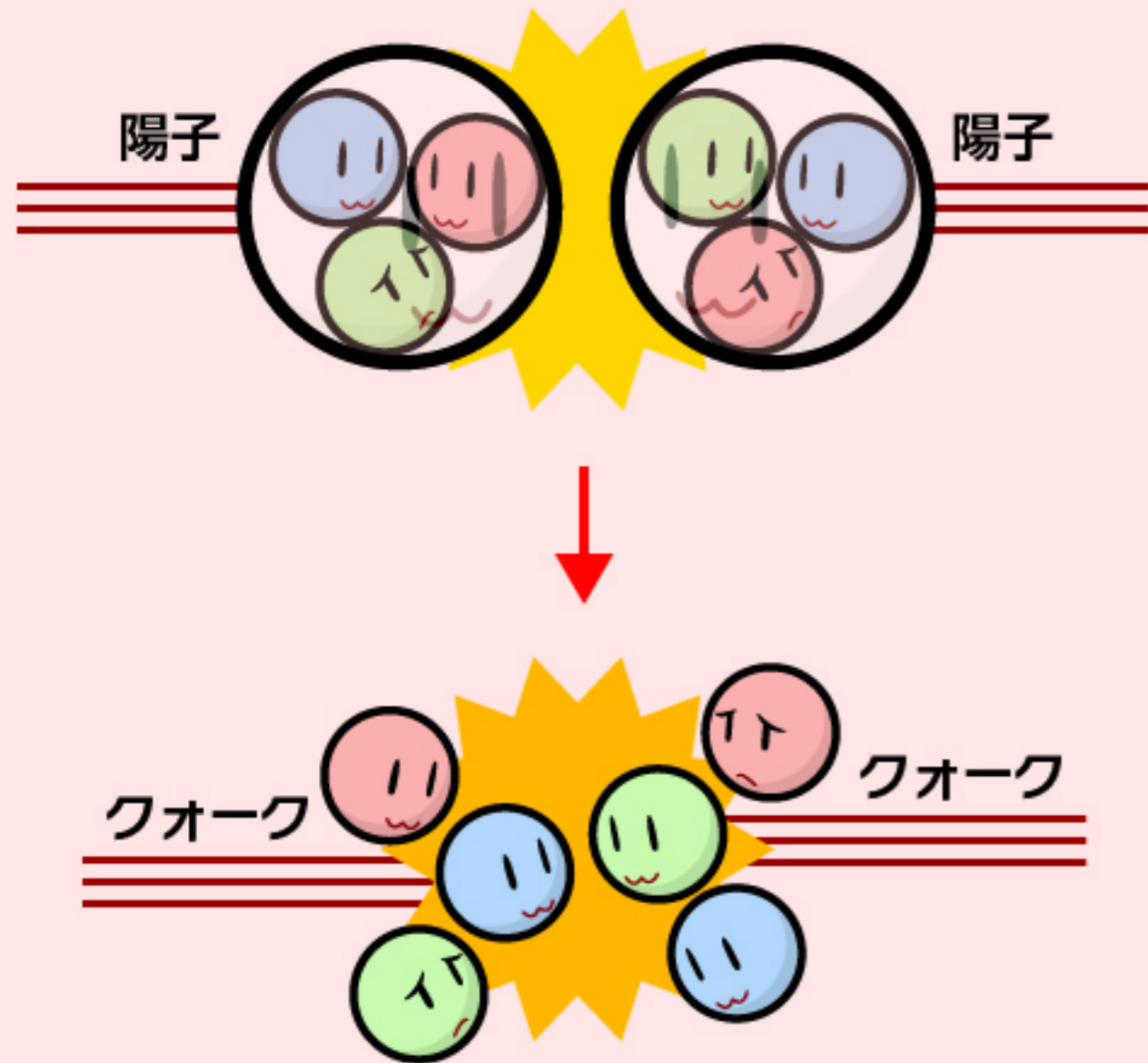
(b)

Figure 5: (a) Axial-vector 95% CL exclusion contours in the  $m_{Z_A}-m_{\chi}$  parameter plane. The solid (dashed) curve shows the observed (expected) limit, while the bands indicate the  $\pm 1\sigma$  theory uncertainties in the observed limit and  $\pm 1\sigma$  and  $\pm 2\sigma$  ranges of the expected limit in the absence of a signal. The red curve corresponds to the set of points for which the expected relic density is consistent with the WMAP measurements (i.e.  $\Omega h^2 = 0.12$ ), as computed with MADDM [94]. The region on the right of the curve corresponds to higher predicted relic abundance than these measurements. The region excluded due to perturbativity, defined by  $m_{\chi} > \sqrt{\pi/2} m_{Z_A}$ , is indicated by the hatched area. The dotted line indicates the kinematic limit for on-shell production  $m_{Z_A} = 2 \times m_{\chi}$ . The cyan line indicates previous results at 13TeV [1] using  $3.2 \text{ fb}^{-1}$ . (b) A comparison of the inferred limits (black line) to the constraints from direct detection experiments (purple line) on the spin-dependent WIMP-proton scattering cross section in the context of the simplified model with axial-vector couplings. Unlike in the  $m_{Z_A}-m_{\chi}$  parameter plane, the limits are shown at 90% CL. The results from this analysis, excluding the region to the left of the contour, are compared with limits from the PICO [95] experiment. The comparison is model-dependent and solely valid in the context of this model, assuming minimal mediator width and the coupling values  $g_q = 1/4$  and  $g_{\chi} = 1$ .



# International Linear Collider



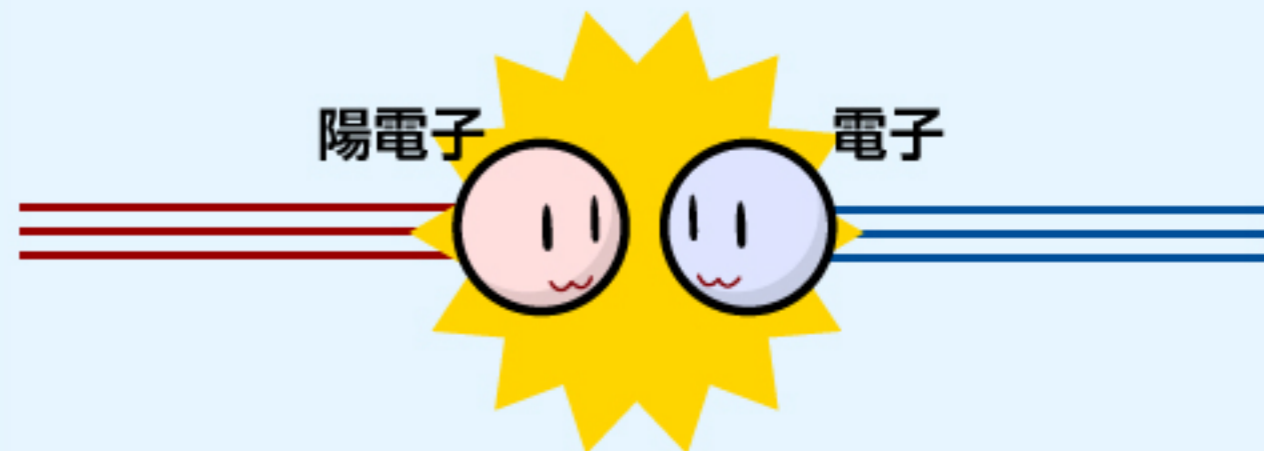


# LHC

## 大型ハドロン衝突型加速器

基本粒子（クォーク）が集まった陽子どうしの衝突

**ちょっと複雑!**



# ILC

## 国際リニアコライダー

基本粒子（レプトン）どうしの衝突

**シンプル!**