



学術変革「地下稀事象」若手研究会, 2026. 3. 5

FRITZ ZWICKY

- Dark matter was first proposed by Fritz Zwicky in 1933 due to the fact that there is a type of energy in the vacuum that influence the orbit of the planets and the expansion of the universe. Although he proposed this almost a century ago, dark matter is still a mystery nowadays.



## 宇宙論 (屋) からみた暗黒物質問題



早田次郎

神戸大学理学研究科

# 内容

1. 暗黒物質の歴史
2. 暗黒物質問題とは何か？
3. 暗黒物質の証拠 --- 天文学
4. 暗黒物質の証拠 --- 宇宙論
5. 暗黒物質の候補 --- 天体
6. 暗黒物質の候補 --- 素粒子
7. 暗黒物質探査の現状
8. アクシオン研究の拡がり
9. 展望

# 1. 暗黒物質の歴史

# 暗黒物質

観測事実

大域的 暗黒物質の密度パラメータ

$$\Omega_{DM} h^2 = 0.12$$

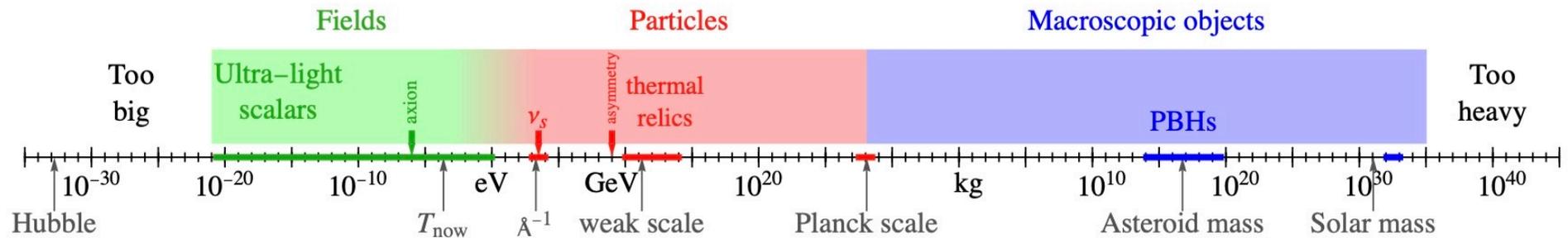
局所的 地球近傍の暗黒物質密度

$$\rho_{DM} = 0.4 \text{ GeV/cm}^3$$

推論の基礎

膨張宇宙原理 + Einstein重力理論 + 場の量子論

広大なパラメータ領域



最初に認識されて100年近く経っても未だ正体は分からず  
まあ、重力波も直接観測まで100年かかった

# 暗黒物質の歴史

Bertone, Hooper, arXiv:1605.04909

- 1933年 ツビッキーが論文「かみのけ座銀河団の赤方偏移」でDunkle Materieの存在を初めて主張
- 1939年 バブコックがアンドロメダ銀河の回転速度を測定。ニュートン力学の修正の可能性を指摘
- 1966年 ゼルドビッチとノヴィコフが、宇宙初期にブラックホールが形成される可能性を初めて指摘
- 1970年 ルービンとフォードがアンドロメダ銀河の回転速度の観測結果を発表  
現在の暗黒物質論の直接的な出発点
- 1971年 ホーキングが原始ブラックホールの形成理論を確立
- 1978年 ルービンらが10個以上の渦巻銀河を観測し、全ての銀河で回転曲線が平坦であることを確認。  
暗黒物質が普遍的であると結論
- 1980年 宇宙論において「暗黒物質」という言葉が一般化し、主要な研究対象となる
- 1982年 ピーブルスらが「冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter)」仮説を提唱
- 1983年 シキヴィエが「アクシオン暗黒物質」の探索方法を提案
- 1984年 ブルーメンソールらによる「Cold Dark Matterに基づいた宇宙の構造」論文  
宇宙の構造形成理論の基礎が完成
- 1985年 グッドマンとウィッテンが、暗黒物質 (WIMPs) を検出器で直接捉えるための理論的計算を提示
- 1986年 パチンスキーが、重力マイクロレンズ効果を利用して暗黒天体 (MACHO) を探索する方法を提案
- 1998年 超新星の観測により宇宙の加速膨張が判明  
暗黒物質と「暗黒エネルギー」が明確に区別されるようになる
- 2003年 WMAP衛星によって宇宙の組成 (暗黒物質23%) が初めて高精度で数値化された
- 2006年 弾丸銀河団の直接証拠 1E 0657-558の観測発表  
修正ニュートン力学 (MOND) に対する暗黒物質の優位性が決定的になる
- 2013年 プランク衛星による高精度観測の結果、宇宙の暗黒物質比率が26.8%に修正
- 2016年 XENON1T稼働
- 2021年 LUX-ZEPLINの稼働

## 2. 暗黒物質問題とは何か？

# 素粒子標準模型を超えて

		物質を作る		
		第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ			
	ダウン			
レプトン	電子			
	eニュートリノ			

力を伝える (ゲージ粒子)	
強い力	
電磁力	
弱い力	
質量を与える	

$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$



大統一理論  
 $SO(10)?$  GUT

Graviton?



超弦理論



gravitino  
moduli  
ALPs

ニュートリノ振動



有質量ニュートリノ

QCDのCP破れ問題



QCDアクシオン

階層性問題  $\rightarrow$  超対称性  
WIMPs

素粒子標準模型を超えて理論を構築すべき示唆はあるが  
暗黒物質は素粒子物理の観点からは必要とされていない

素粒子物理から見ると  
暗黒物質問題は数学におけるフェルマーの定理

# 暗黒物質は宇宙論の問題

宇宙を記述するためには、Einstein 方程式

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

が必要

暗黒物質と暗黒エネルギーの問題は観測とこの理論的記述のミスマッチ

観測と合わせるためには

- ✓ 左辺を変更する → 重力理論の修正 Ex. MOND → 重力起源

この場合、暗黒物質のためだけに修正することは意味がない  
量子重力理論との関係が重要

- ✓ 右辺を変更する → 未知の物質がある → 天文起源、素粒子起源

この場合、天文学、素粒子物理学に動機付けられた物質でないと意味がない  
究極の統一理論（量子重力理論）へとつながる

- ✓ 左辺も右辺も変更する → ???

重力理論の修正の可能性は弾丸銀河団の発見で難しくなったのでほとんど議論しない

# 素粒子・宇宙研究の現状

素粒子の標準模型

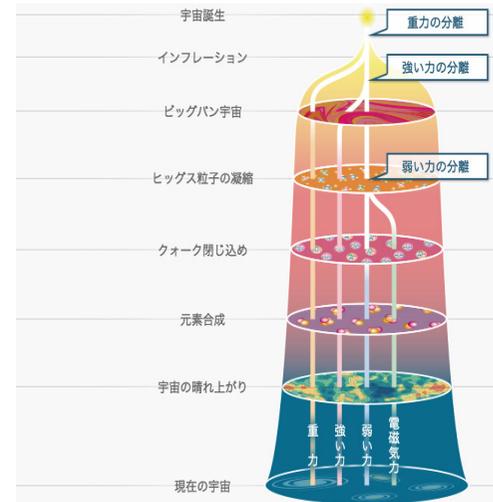
物質を構成する3世代の粒子 (フェルミオン)			力 (相互作用) を媒介する粒子 (ボソン)	
I	II	III	0	1
クォーク u アップ 質量: $\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$ 電荷: $2/3$ スピンの値: $1/2$	クォーク c チャーム 質量: $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: $2/3$ スピンの値: $1/2$	クォーク t トップ 質量: $\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: $2/3$ スピンの値: $1/2$	グルーオン 質量: 0 電荷: 0 スピンの値: 1	ヒッグス 質量: $\approx 125 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: 0 スピンの値: 0
クォーク d ダウン 質量: $\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$ 電荷: $-1/3$ スピンの値: $1/2$	クォーク s ストレンジ 質量: $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ 電荷: $-1/3$ スピンの値: $1/2$	クォーク b ボトム 質量: $\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: $-1/3$ スピンの値: $1/2$	光子 質量: 0 電荷: 0 スピンの値: 1	ヒッグス
レプトン e 電子 質量: $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 電荷: $-1$ スピンの値: $1/2$	レプトン $\mu$ ミューオン 質量: $\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ 電荷: $-1$ スピンの値: $1/2$	レプトン $\tau$ タウ 質量: $\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: $-1$ スピンの値: $1/2$	Zボソン 質量: $\approx 91 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: 0 スピンの値: 1	ヒッグス
レプトン $\nu_e$ 電子ニュートリノ 質量: $< 2 \text{ eV}/c^2$ 電荷: 0 スピンの値: $1/2$	レプトン $\nu_\mu$ ミューニュートリノ 質量: $< 2 \text{ eV}/c^2$ 電荷: 0 スピンの値: $1/2$	レプトン $\nu_\tau$ タウニュートリノ 質量: $< 2 \text{ eV}/c^2$ 電荷: 0 スピンの値: $1/2$	Wボソン 質量: $\approx 80 \text{ GeV}/c^2$ 電荷: $\pm 1$ スピンの値: 1	ヒッグス

宇宙の理解

素粒子と宇宙の統一的理解

素粒子の理解

ニュートリノの質量  
QCDアクシオン  
インフラトン  
未発見粒子・graviton  
素粒子大統一理論



暗黒エネルギー  
暗黒物質  
宇宙背景ニュートリノ  
原始ブラックホール  
原始重力波  
インフレーション

量子重力理論

素粒子と宇宙の究極理論  
宇宙初期特異点  
ブラックホール情報損失  
情報と重力の謎 (AdS/CFT)  
量子と重力の謎

### 3. 暗黒物質の証拠 --- 天文学

# 銀河団の質量

ツヴィツキーの発見

ビリアル定理  $\langle E_{\text{kin}} \rangle = -\frac{1}{2} \langle E_{\text{pot}} \rangle \longrightarrow M = \frac{5 \langle v^2 \rangle}{3 G} R$

かみのけ座銀河団  $\langle v^2 \rangle^{1/2} \sim 1000 \text{ km/s}$   $R \sim 10^{24} \text{ cm}$   $\longrightarrow M \sim 1.3 \times 10^{14} M_{\odot}$   
800個の銀河からなる

銀河の平均光度  $L_{\text{gal}} \sim 10^9 L_{\odot}$

銀河の高度は典型的には太陽程度の質量の星が担っているとする

$$\frac{M_{\text{gal}}}{M_{\odot}} \sim \frac{L_{\text{gal}}}{L_{\odot}}$$

光っている部分の質量は

$$M_{\text{lum}} \sim 800 M_{\odot} \left( \frac{L_{\text{gal}}}{L_{\odot}} \right) \left( \frac{M_{\text{gal}}/M_{\odot}}{L_{\text{gal}}/L_{\odot}} \right) \sim 8 \times 10^{11} M_{\odot}$$

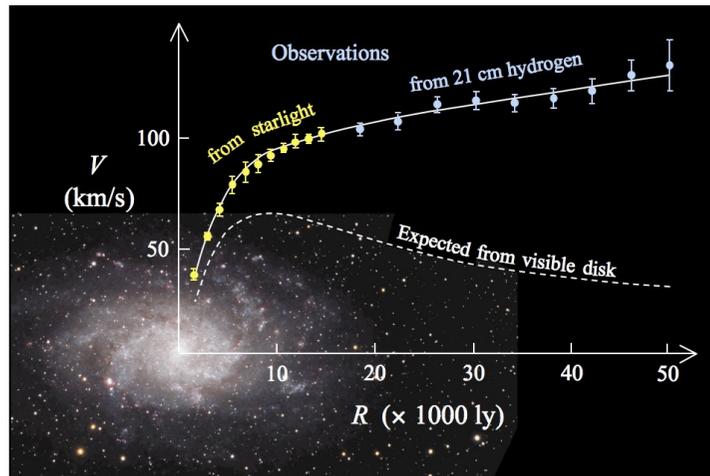
150倍程度の見えない物質が存在する

銀河団ガス 静水圧平衡 + 状態方程式  $M(r) \sim 10^{15} M_{\odot} \left( \frac{r}{\text{Mpc}} \right) \left( \frac{T}{10 \text{ keV}} \right)$

この方法では5~10倍程度の暗黒物質があることがわかる

# 銀河の回転曲線

ニュートン力学  $v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$



ROTATIONAL PROPERTIES OF 21 Sc GALAXIES WITH A LARGE RANGE OF LUMINOSITIES AND RADII, FROM NGC 4605 ( $R = 4$  kpc) TO UGC 2885 ( $R = 122$  kpc)

VERA C. RUBIN,<sup>1,2</sup> W. KENT FORD, JR.,<sup>1</sup> AND NORBERT THONNARD  
Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington  
Received 1979 October 11; accepted 1979 November 29

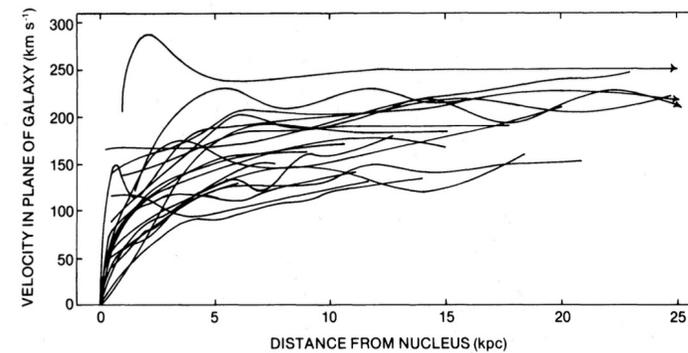


FIG. 6.—Superposition of all 21 Sc rotation curves. General form of rotation curves for small galaxies is similar to initial part of rotation curve for large galaxies, except that small galaxies often have shallower nuclear velocity gradient and tend to cover the low velocity range within the scatter at any  $R$ .

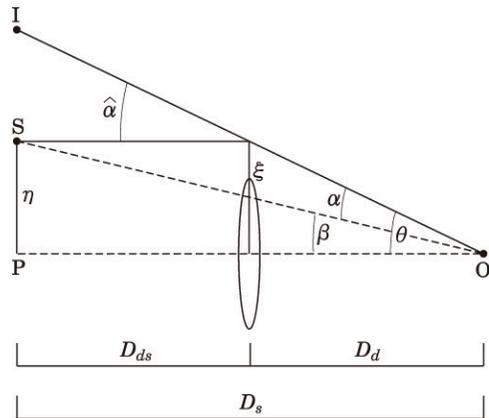
\* Modified Newtonian Dynamics (MOND)

$$a_0 = 1.21 \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$$

$$a = \begin{cases} \frac{GM}{R^2} & \text{for } a \gg a_0 \\ \frac{\sqrt{a_0 GM}}{R} & \text{for } a \ll a_0 \end{cases} \quad v^2 = \begin{cases} \frac{GM}{R} & \text{for } a \gg a_0 \\ \sqrt{a_0 GM} & \text{for } a \ll a_0 \end{cases}$$

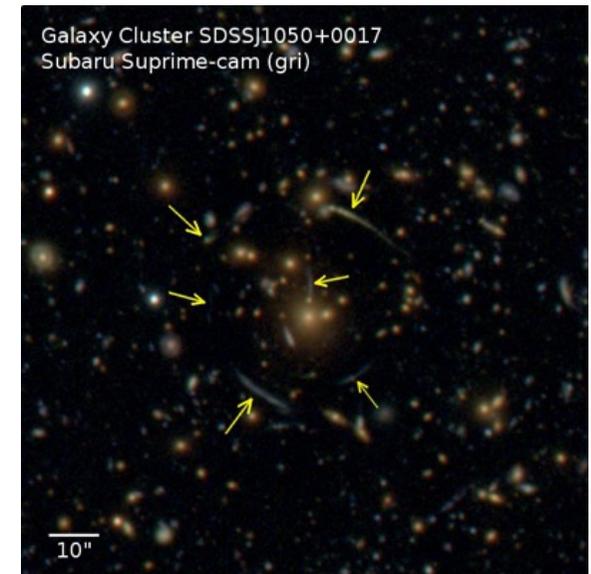
これは弾丸銀河団の観測を説明できない

# 弱い重力レンズ効果



アインシュタイン半径  $\beta=0$  の時の像の大きさ

$$R_E = 0.06 R_\odot \left( \frac{M}{10^{-10} M_\odot} \right)^{1/2} \left( \frac{D_d}{100 \text{kpc}} \right)^{1/2}$$



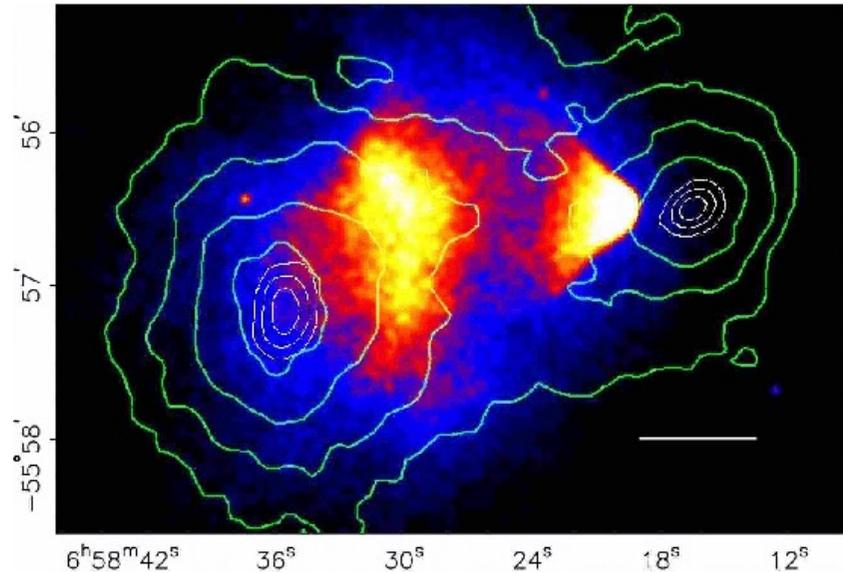
増光と銀河の歪みから、convergenceがわかり、密度分布が決まる

マイクロ重力レンズ効果 増光だけが起こる

増光時間は

$$t_E = \frac{R_E}{v} \approx 34 \text{min} \left( \frac{M}{10^{-8} M_\odot} \right)^{1/2} \left( \frac{D_d}{100 \text{kpc}} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{200 \text{km/s}} \right)^{-1}$$

# 弾丸銀河団



2つの銀河団の衝突の痕跡

赤い部分はガスで取り残されている

重力レンズ(weak lensing)で推定した密度分布の等高線が描かれている  
明らかに暗黒物質がすり抜けたことを示唆している

すり抜ける条件は、暗黒物質の断面積と質量に対して

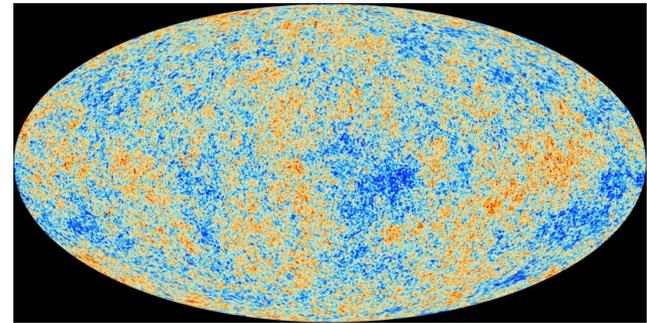
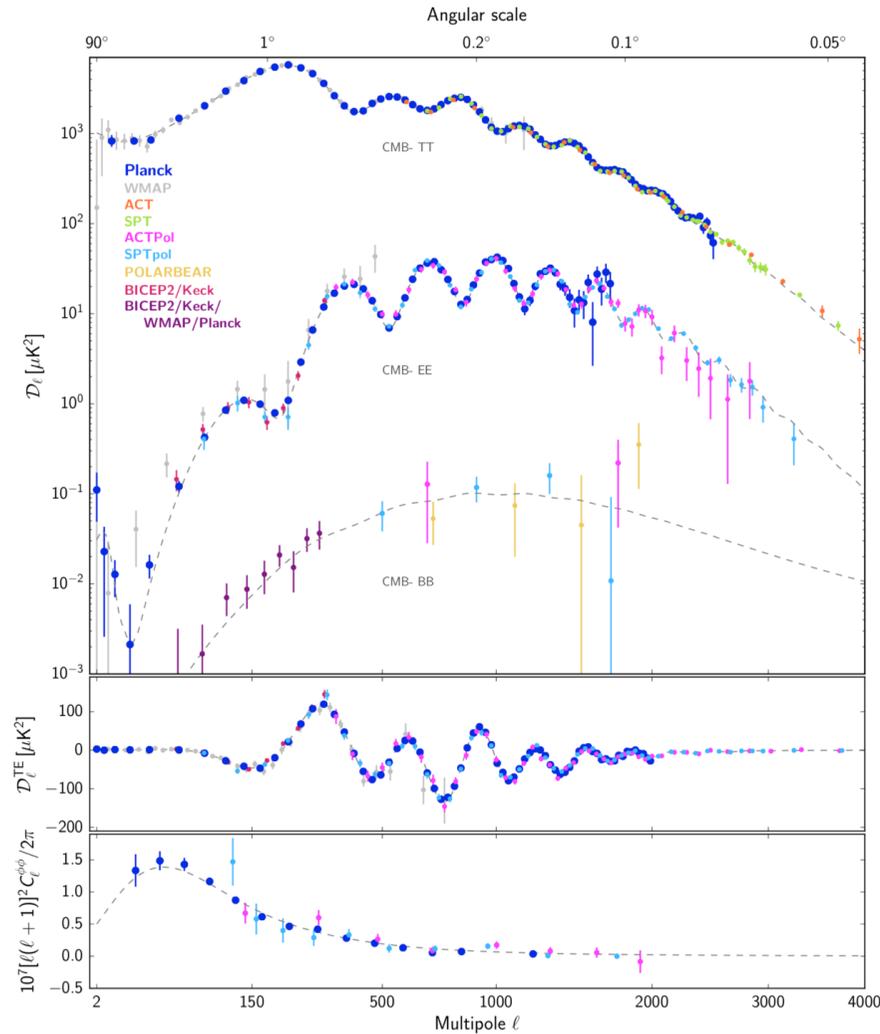
$$\frac{\sigma}{m} \lesssim 10^{-24} \text{cm}^2/\text{GeV}$$

弾丸銀河団の発見は、MONDの可能性を棄却した

- 1E 0657-558 (Bullet Cluster) 2006
- MACS J0025.4-1222
- Abell 2744 (Pandora's Cluster)
- Abell 520 (Train Wreck Cluster)
- DLSC J0916.2+2951 (Musket Ball Cluster)
- ACT-CL J0102-4915 (El Gordo)
- PSZ2 G282.28+49.94 (Planck Bullet)
- MACS J0140.0-0555
- MACS J0416.1-2403
- CIZA J2242.8+5301 (Sausage Cluster)

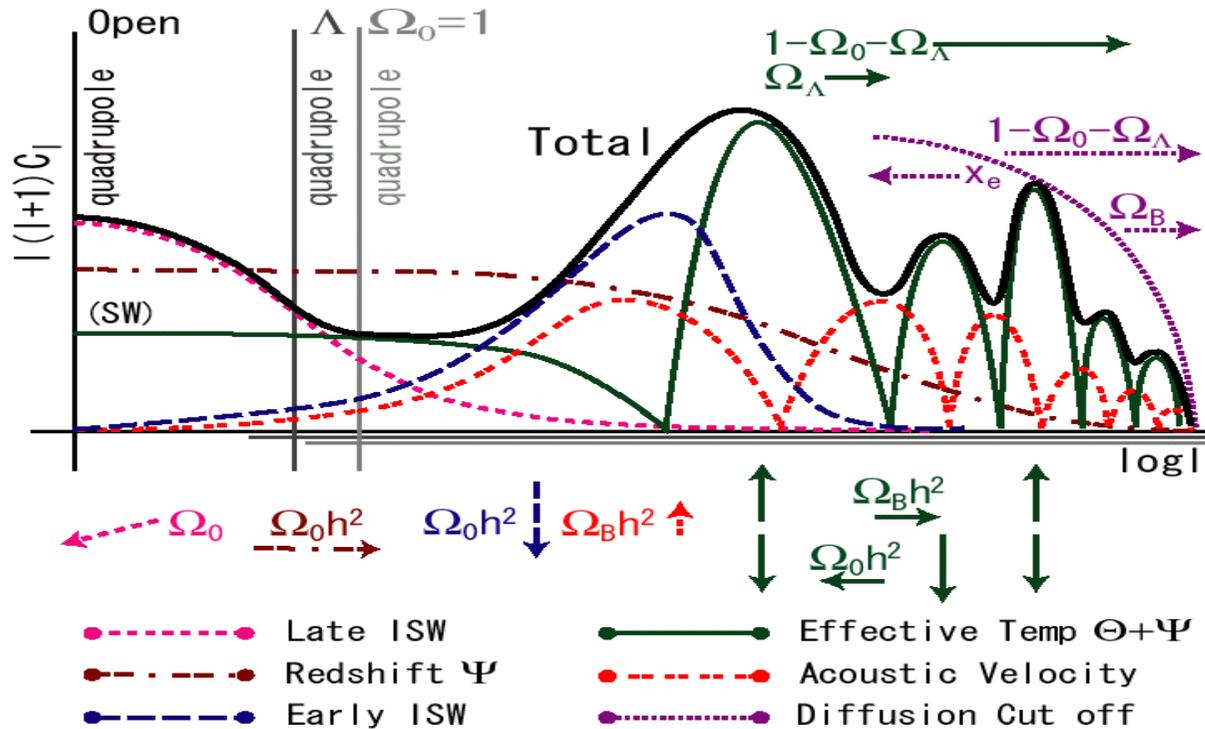
## 4. 暗黒物質の証拠 --- 宇宙論

# 宇宙背景放射のパワースペクトル



**Fig. 18.** A compilation of recent CMB angular power spectrum measurements from which most cosmological inferences are drawn. The upper panel shows the power spectra of the temperature and  $E$ -mode and  $B$ -mode polarization signals, the next panel the cross-correlation spectrum between  $T$  and  $E$ , while the lower panel shows the lensing deflection power spectrum. Different colours correspond to different experiments, each retaining its original binning. Note that for *Planck*, *ACTPol*, and *SPTpol*, the  $EE$  points with large error bars are not plotted (to avoid clutter). The dashed line shows the best-fit  $\Lambda$ CDM model to the *Planck* temperature, polarization, and lensing data. See text for details and references.

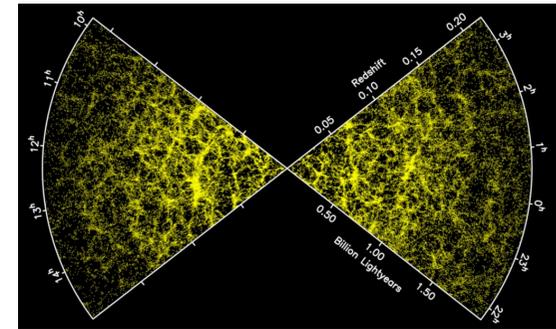
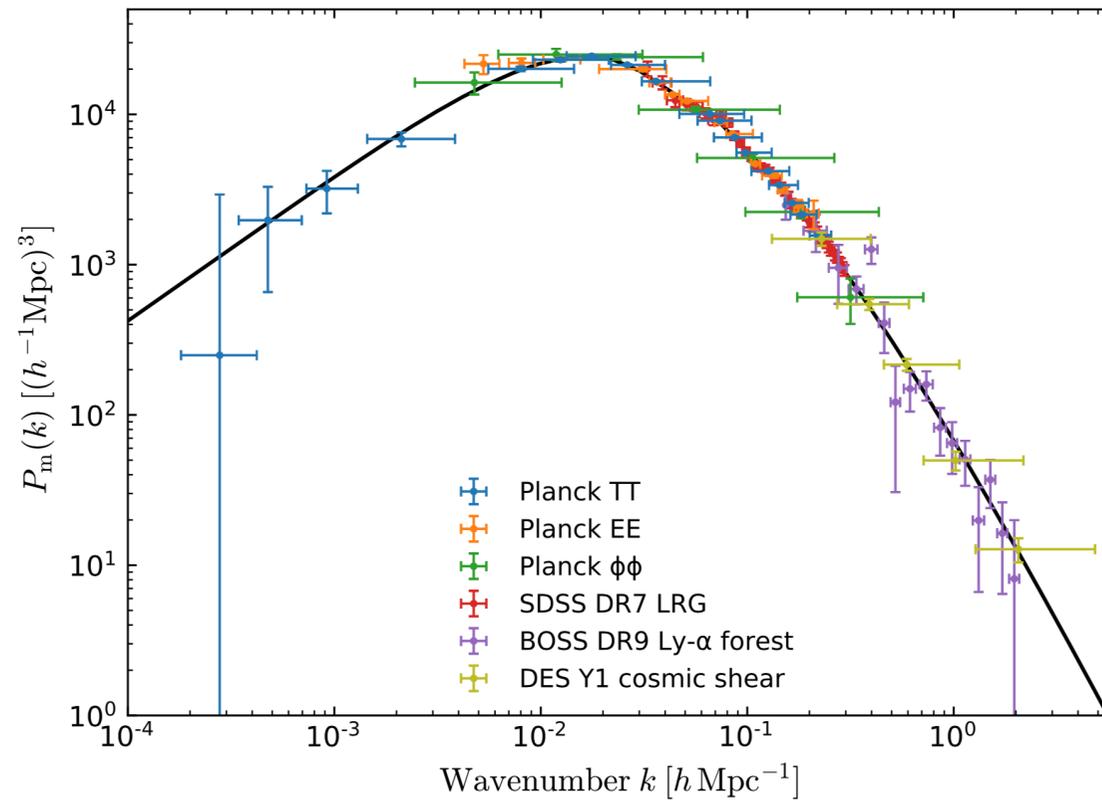
# 宇宙背景放射から分かること



# Planck 2018

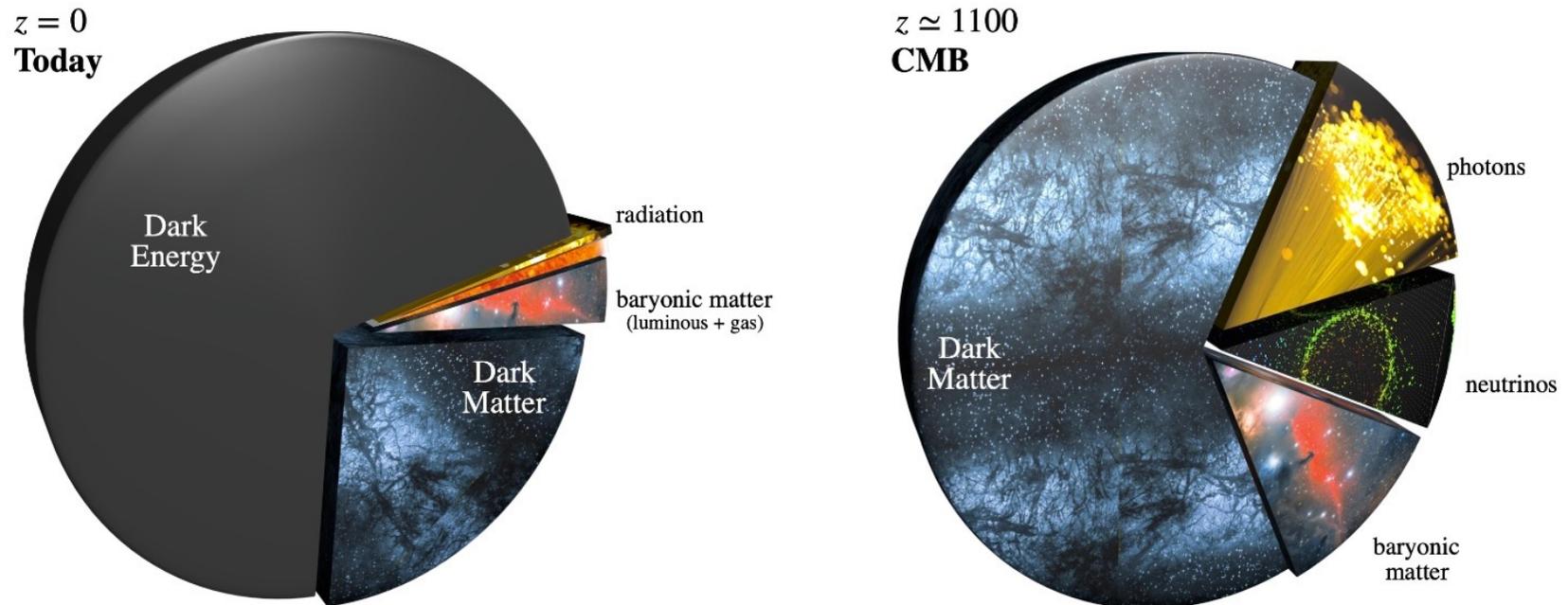
Parameter	<i>Planck</i> alone	<i>Planck</i> + BAO
$\Omega_b h^2$ . . . . .	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02242 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.11933 \pm 0.00091$
$100\theta_{\text{MC}}$ . . . . .	$1.04092 \pm 0.00031$	$1.04101 \pm 0.00029$
$\tau$ . . . . .	$0.0544 \pm 0.0073$	$0.0561 \pm 0.0071$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	$3.044 \pm 0.014$	$3.047 \pm 0.014$
$n_s$ . . . . .	$0.9649 \pm 0.0042$	$0.9665 \pm 0.0038$
$H_0$ . . . . .	$67.36 \pm 0.54$	$67.66 \pm 0.42$
$\Omega_\Lambda$ . . . . .	$0.6847 \pm 0.0073$	$0.6889 \pm 0.0056$
$\Omega_m$ . . . . .	$0.3153 \pm 0.0073$	$0.3111 \pm 0.0056$
$\Omega_m h^2$ . . . . .	$0.1430 \pm 0.0011$	$0.14240 \pm 0.00087$
$\Omega_m h^3$ . . . . .	$0.09633 \pm 0.00030$	$0.09635 \pm 0.00030$
$\sigma_8$ . . . . .	$0.8111 \pm 0.0060$	$0.8102 \pm 0.0060$
$\sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.5}$ . . . . .	$0.832 \pm 0.013$	$0.825 \pm 0.011$
$z_{\text{re}}$ . . . . .	$7.67 \pm 0.73$	$7.82 \pm 0.71$
Age[Gyr] . . . . .	$13.797 \pm 0.023$	$13.787 \pm 0.020$
$r_*$ [Mpc] . . . . .	$144.43 \pm 0.26$	$144.57 \pm 0.22$
$100\theta_*$ . . . . .	$1.04110 \pm 0.00031$	$1.04119 \pm 0.00029$
$r_{\text{drag}}$ [Mpc] . . . . .	$147.09 \pm 0.26$	$147.57 \pm 0.22$
$z_{\text{eq}}$ . . . . .	$3402 \pm 26$	$3387 \pm 21$
$k_{\text{eq}}$ [Mpc <sup>-1</sup> ] . . . . .	$0.010384 \pm 0.000081$	$0.010339 \pm 0.000063$
$\Omega_K$ . . . . .	$-0.0096 \pm 0.0061$	$0.0007 \pm 0.0019$
$\Sigma m_\nu$ [eV] . . . . .	$< 0.241$	$< 0.120$
$N_{\text{eff}}$ . . . . .	$2.89^{+0.36}_{-0.38}$	$2.99^{+0.34}_{-0.33}$
$r_{0.002}$ . . . . .	$< 0.101$	$< 0.106$

# 物質密度のパワースペクトル



# 構造形成の主役は暗黒物質

暗黒物質なしでは構造を作る時間が足りない



## 5. 暗黒物質の候補 --- 天体

# MACHO (Massive Compact Halo object)

WIMP (弱虫) の名前の由来でもある

- バリオンでできた光らないMACHOは元素合成と矛盾する
- マイクロ重力レンズ効果の観測で太陽質量以上のものは棄却

→ ブラックホールしかない



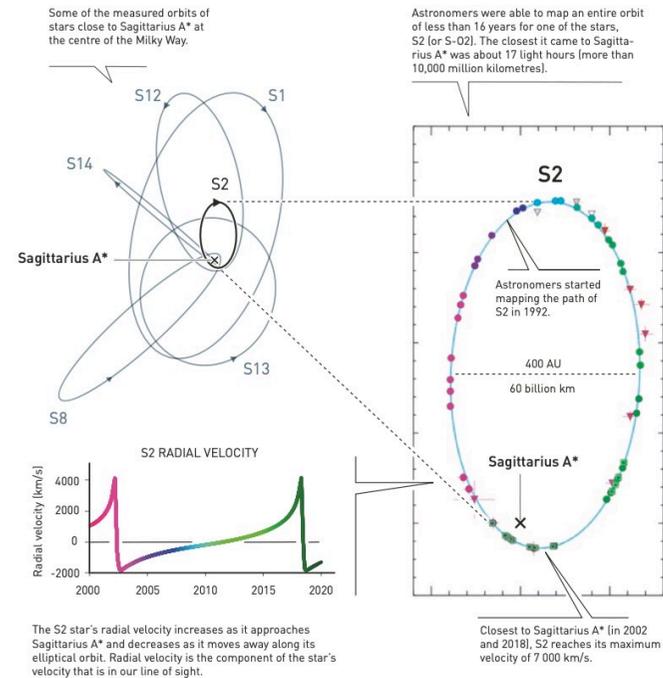
TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by  $(1+z)$  [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

様々な質量のブラックホールの存在が実証された

## Stars closest to the centre of the Milky Way

The stars' orbits are the most convincing evidence yet that a supermassive black hole is hiding in Sagittarius A\*. This black hole is estimated to weigh about 4 million solar masses, squeezed into a region no bigger than our solar system.



The S2 star's radial velocity increases as it approaches Sagittarius A\* and decreases as it moves away along its elliptical orbit. Radial velocity is the component of the star's velocity that is in our line of sight.

Closest to Sagittarius A\* (in 2002 and 2018), S2 reaches its maximum velocity of 7 000 km/s.

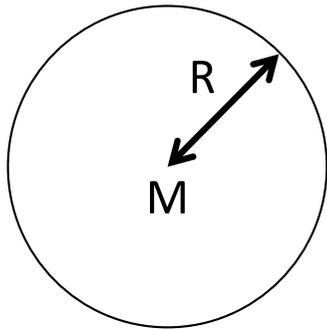
Figure 4. The stars' orbits revealed that something invisible and heavy governed their paths at the heart of the Milky Way.

# 原始ブラックホール

ハッブル方程式

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \sim GE^4$$

$$H = 100 \text{ km / s / Mpc} \sim 10^{-17} / \text{s}$$



宇宙ホライズン半径

$$R = \frac{1}{H}$$

ブラックホールの重力半径

$$2GM = 2G \frac{4\pi}{3} \rho R^3 = H^2 R^3 = \frac{1}{H}$$

宇宙ホライズン内の質量密度が大きくなると必ずブラックホールになる

原始ブラックホール

宇宙の温度が  $E$  GeV の時にできるブラックホールの質量は

$$M = \frac{1}{2GH} \sim \frac{M_p^3}{E^2} \sim 10^{-5} \left( \frac{10^{19} \text{ GeV}}{E} \right)^2 \text{ g}$$

QCD相転移点300MeVくらいでのブラックホール質量

$$M \sim 10^{33} \text{ g}$$

## 6. 暗黒物質の候補 --- 素粒子

# WIMPs

超対称性  $Q|\text{boson}\rangle = |\text{fermion}\rangle$   
 $Q|\text{fermion}\rangle = |\text{boson}\rangle$

## 動機

超対称性は階層性問題を解決

大統一理論を示唆

## 暗黒物質候補

ヴィーノ、ウィーノ、ヒグシーノの混合状態がニュートラリーノ

ニュートラリーノの中で最も軽い粒子 (LSP) が暗黒物質の候補

# WIMPの奇跡

反応  $X + \bar{X} \leftrightarrow f + \bar{f}$        $X$ : dark matter     $f$ : standard model particle

ボルツマン方程式を解くと

$$\Omega_{DM} h^2 \approx \frac{g_*^{1/2} y_d}{g_{*s}} \left( \frac{10^{-27} \text{cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle} \right) \quad g_* \approx g_{*s} \approx 100 \quad y_d = \frac{m_X}{T_d} \approx 20$$

弱い相互作用における断面積は

$$\langle \sigma v \rangle \sim \frac{\alpha_W^2}{m_X^2} \sim 10^{-26} \text{cm}^3/\text{s} \left( \frac{m_X}{\text{TeV}} \right)^{-2} \left( \frac{\alpha_W}{0.03} \right)^2$$

これを代入すると

$$\Omega_{DM} h^2 \approx \mathcal{O}(0.1)$$

WIMPが素粒子論的な動機の高い粒子であることから最も自然な暗黒物質候補  
しかし、超対称性がLHCで見つからなかった。。。

# アクシオンの粒子

## QCD アクシオン

Peccei-Quinn 1977

Weinberg 1978; Wilczek 1979

アクシオン質量  $m_a = 5.70 \mu\text{eV} \left( \frac{10^{12} \text{GeV}}{f_a} \right)$   $f_a$  : 崩壊定数

オリジナルなモデルは実験と矛盾するので“隠れたアクシオン”が必要

DFSZ アクシオン Dine, Fischler, Srednicki 1981; Zhitnitsky 1980

KSVZ アクシオン Kim 1979; Shifman, Vainshtein, Zakharov 1980

## ストリングアクシオン

Arvanitaki et al., 2010

$$m_a \approx \frac{\mu^2}{f_a} e^{-\#\text{moduli}/2}$$

質量は対数的に等間隔で分布

質量と崩壊定数が独立というのが QCD axion とは違う

アクシオン=シフト対称性をもった擬スカラー

# 強い相互作用における CP 問題

QCD action

$$L = \bar{\mathbf{q}}_L m_q e^{i\theta_Y} \mathbf{q}_R + h.c. + \frac{\theta_{QCD}}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_a^{\mu\nu} \quad \mathbf{q} = (u, d, \dots) \quad m_q : \text{quark mass matrix}$$

↑
↑  
 CP violating phase                      angle determining QCD vacuum

chiral phase の再定義  $q_L \rightarrow e^{i\frac{\alpha}{2}} q_L, \quad q_R \rightarrow e^{-i\frac{\alpha}{2}} q_R \quad \longrightarrow \quad \theta_Y \rightarrow \theta_Y - \alpha, \quad \theta_{QCD} \rightarrow \theta_{QCD} + N_f \alpha$

CP violation in QCD  $\theta = \theta_{QCD} + N_f \theta_Y$  違う起源を持った数の足し合わせ

中性子の電気双極子モーメント  $L_{EDM} = -i \frac{d_n}{2} \bar{n} \gamma^5 \sigma^{\mu\nu} n F_{\mu\nu} \quad d_n \approx 3.6 \times 10^{-16} \theta_{QCD} \text{ e} \cdot \text{cm}$

実験からの制限

$$|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$



$$|\theta_{QCD}| < 10^{-10}$$

fine tuning problem

# アクシオンの必要性

もし up quark に質量がなければ、U(1)<sub>A</sub> 対称性がある  
その時  $\theta$  が消せるので、CP問題は無い。しかし、quark に質量はある。

余分な U(1)<sub>A</sub> 対称性が必要。 Peccei-Quinn 1977

高エネルギーでは、U(1)<sub>A</sub> は厳密であるが、  
エネルギースケール  $f_a$  で破れ、アクシオンは NG-boson として現れる。  
 $\theta$  はダイナミカルになる。

$$\frac{\phi}{32\pi^2 f_a} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_a^{\mu\nu} \quad \text{shift symmetry} \quad \phi \rightarrow \phi + \text{const.}$$

$\theta_{QCD}$  はアクシオンのシフト対称性で吸収される

アクシオンのポテンシャルが非摂動効果によって誘導され、極値が

$$\phi = 0$$

となり、強い相互作用におけるCP問題は解決される。

# ストリング理論とコンパクト化

$$S \supset -\frac{1}{2} \int F_{p+1} \wedge *F_{p+1} = -\frac{1}{2(p+1)!} \int d^D x \sqrt{-g_D} F_{\mu_1 \dots \mu_{p+1}} F^{\mu_1 \dots \mu_{p+1}}$$

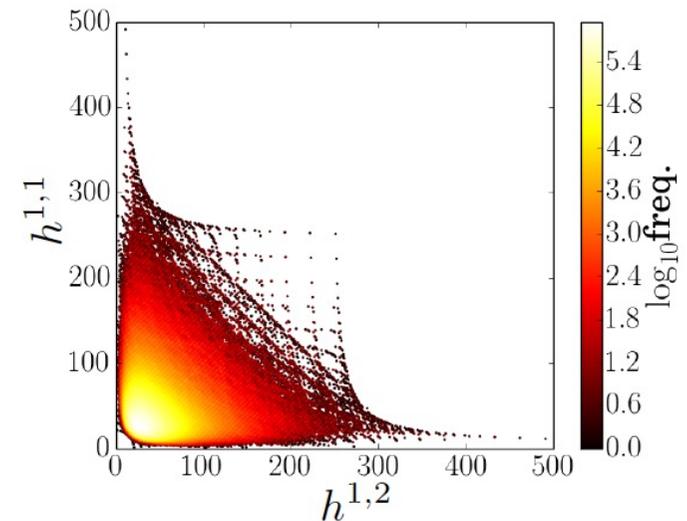
$$A_p = \frac{1}{2\pi} \sum a_i(x) \omega_{p,i}(y) \Rightarrow a_i(x) = \int_{C_{p,i}} A_p \quad C_{p,i} : p\text{-cycles in compact space}$$

3+1 spacetime

compact space

カラビ・ヤオ多様体の場合、p-th ベッチ数は次の2つのホッジ数で決まる

$$h^{1,1} \quad \text{and} \quad h^{1,2}$$



典型的には、30 あるいはそれ以上のアクシオンが存在する

# アクシオン暗黒物質

アクシオンはコヒーレントな振動をしている

$$S = \frac{1}{2} \int d^4x \sqrt{-g} R - \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{1}{2} \nabla^\mu \phi \nabla_\mu \phi + \frac{1}{2} m^2 \phi^2 \right]$$

$$\phi = \phi_0 \cos mt$$

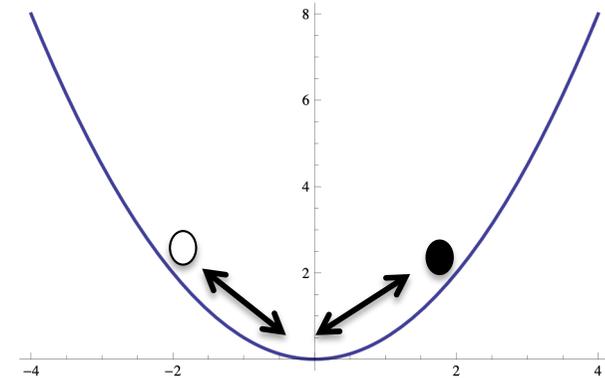
エネルギー密度は

$$\rho_{DM} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m^2 \phi^2 \approx \frac{1}{2} m^2 \phi_0^2$$

空間微分の寄与は小さい

$$(\nabla \phi)^2 \approx k^2 \phi^2$$

$$\rho_{DM}^{osc} \approx \frac{k^2}{m^2} \rho_{DM} \approx v^2 \rho_{DM} \approx 10^{-6} \rho_{DM}$$



圧力は

$$p_{DM} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} m^2 \phi^2 \approx -\frac{1}{2} m^2 \phi_0^2 \cos 2mt$$

宇宙年齢に比べると圧倒的に早く振動しているので平均するとゼロ  
宇宙論的なスケールではダークマターとして振る舞う

$$\left( \frac{m}{10^{-23} \text{ eV}} \right) \approx \left( \frac{f}{10^{-8} \text{ Hz}} \right)$$

$$H_0 \approx 10^{-33} \text{ eV}$$

すなわち、宇宙論的観測でアクシオンだというのは難しい

# アクシオン暗黒物質と構造形成

超軽量アクシオンはCDMの小スケール問題を解決する  
アクシオンのド・ブロイ波長は

$$\lambda_{dB} = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{mv} \approx 3.8\text{kpc} \left( \frac{10^{-3}}{v} \right) \left( \frac{10^{-23}\text{eV}}{m} \right)$$

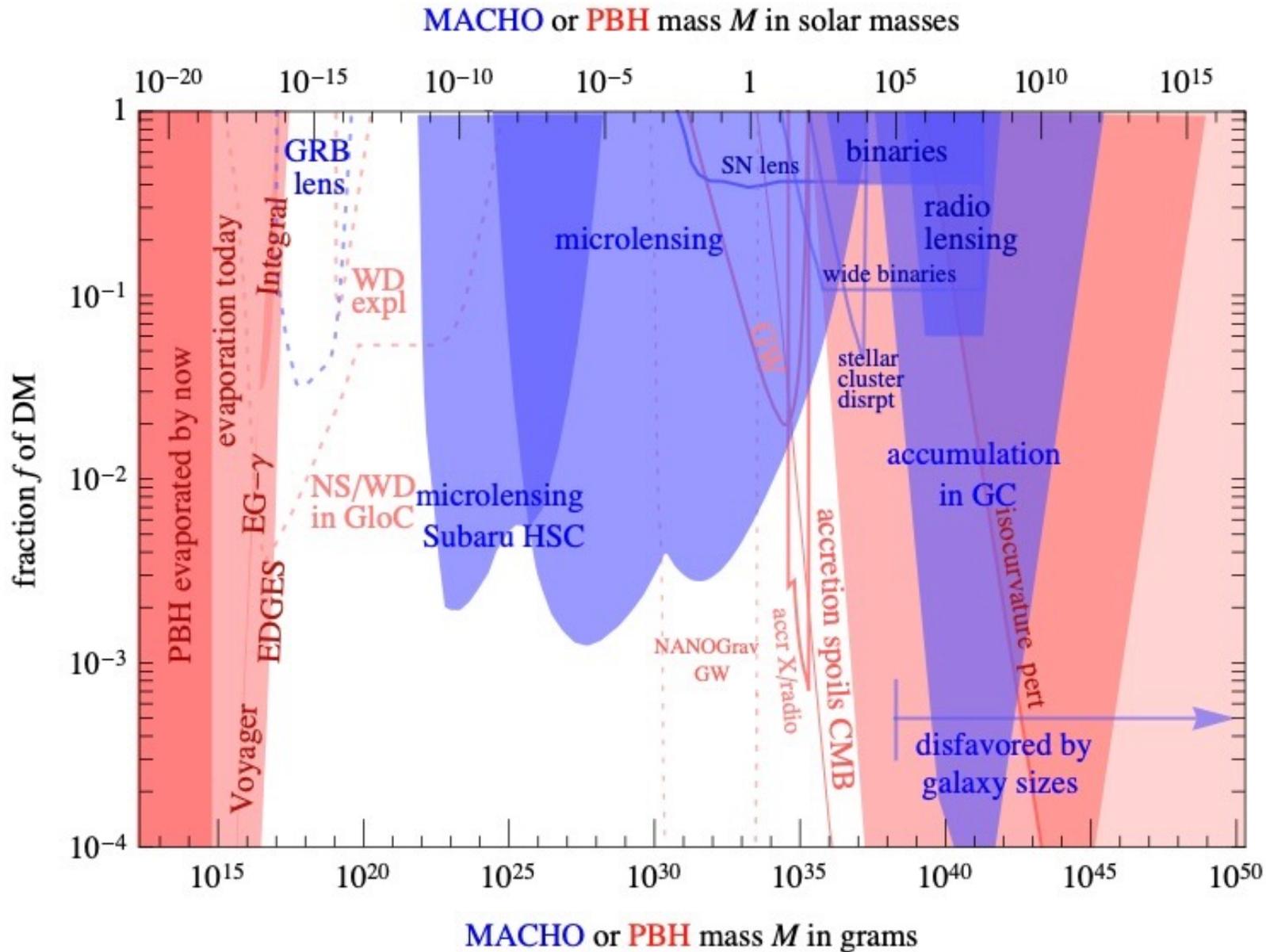
であり、これより小さな構造はかき消される  
これによってCDMのカスプ問題が解決できる

超弦理論には、超軽量アクシオンが多数存在することがわかっており、  
アクシオン暗黒物質の理論的な動機は比較的強い

このような特徴を持つ粒子としては  
アクシオンだけではなく、超軽量ベクトル場などの可能性も考えられる

## 7. 暗黒物質探査の現状

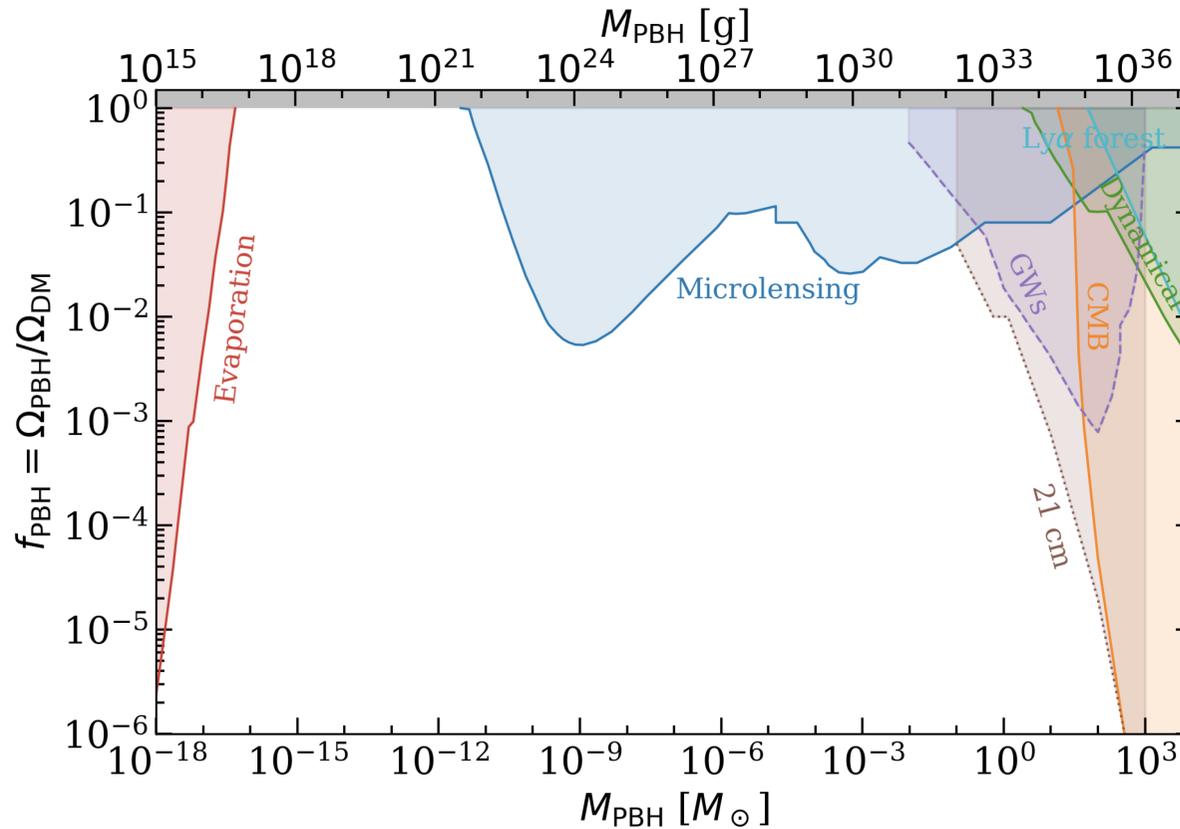
# マイクロレンズ観測からMACHOへの制限



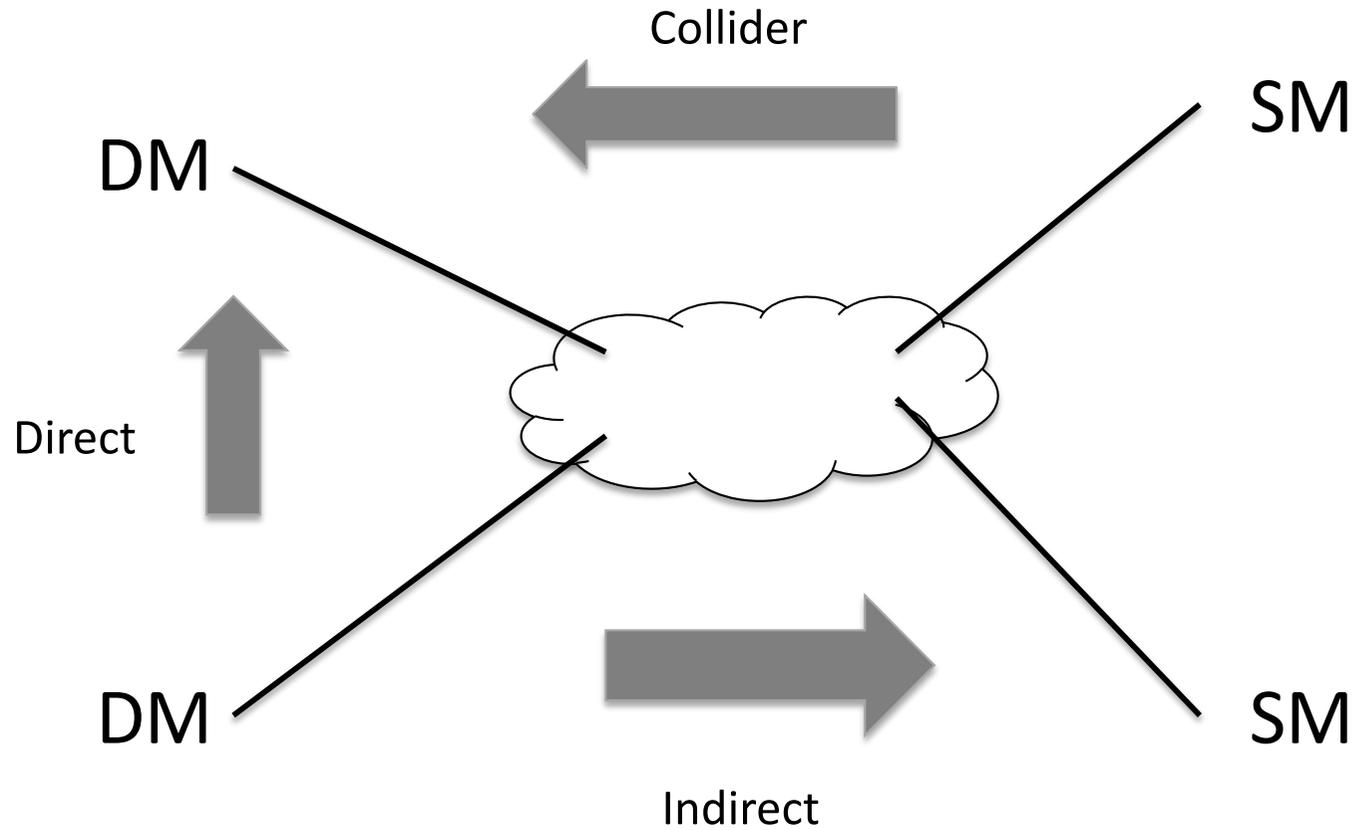
# マイクロレンズ観測からPBHへの制限

重力半径  $r_s = 3 \times 10^{-5} \text{cm} \left( \frac{M}{10^{-10} M_\odot} \right)$

幾何光学近似が使えるのは  $4\pi r_s \geq \lambda$



# 暗黒物質探索



現在まで、どの方法も成功していない

# WIMP直接検出

我々の近傍で  $\rho_{DM} = 0.4 \text{ GeV/cm}^3$

平均速度は  $v \approx 300 \text{ km/s}$

地球上には1平方cmあたり毎秒  $10^5 \left( \frac{100 \text{ GeV}}{m_X} \right)$  個 の暗黒物質が降り注ぐ

典型的な運動エネルギーは  $\frac{1}{2} m_X v^2 \approx 50 \text{ keV}$

なので原子核を壊すような反応は起こせず、弾性散乱としてよい

WIMPの運動量は  $m_X v \approx 30 \text{ MeV}$  なのでド・ブロイ波長は  $\lambda = \frac{2\pi}{p} \approx 4 \times 10^{-12} \text{ cm}$

これは質量数Aの原子核の大きさ  $L \approx 10^{-13} A^{1/3} \text{ cm}$

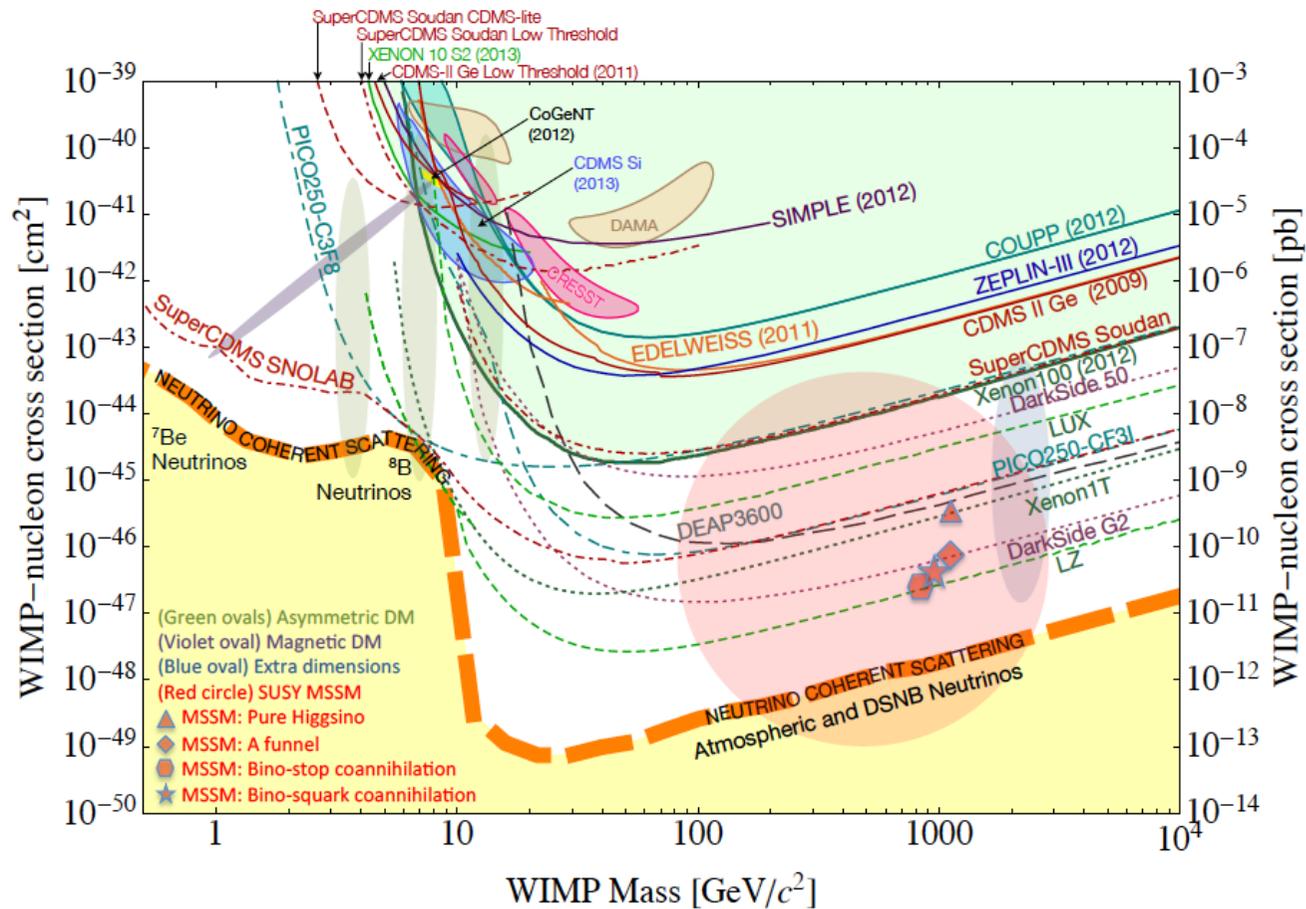
より大きいので、原子核全体とのコヒーレント散乱が起こる

スピンに依存しない散乱弾面積は

$$\frac{d\sigma_X}{dQ} \propto A^2$$

のように大きくなる Goodman&Witten 1985

# 暗黒物質の直接探査



# WIMP間接検出および加速器による検出

## 間接検出

対消滅で生じたニュートリノ、ガンマ線、陽電子、反陽子などを検出し制限を得る

対消滅で生じた粒子が元素合成に与える影響から制限を得る

## 加速器検出

暗黒物質を検出するのではなく、加速器でWIMPを生成してその特性を明らかにする

# アクシオン探索装置：回転ブラックホール

## Super-radiance instability

Penrose 過程がくりかえされて回転エネルギーが引き抜かれる

もし高速回転しているブラックホールがみつければアクシオンはない

エネルギーを得たアクシオンの雲が崩壊して重力波をだす

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \approx \left(\frac{R_s}{3\text{km}}\right) \approx \left(\frac{m}{10^{-10}\text{eV}}\right)^{-1}$$

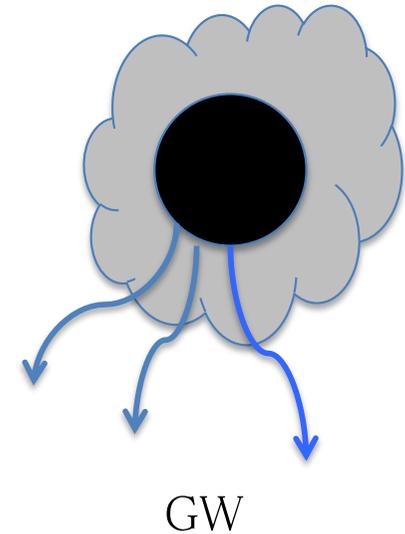
なので

$$1M_{\odot} \leq M \leq 10^{10} M_{\odot}$$

の間に高速で回転するブラックホールが見つければ

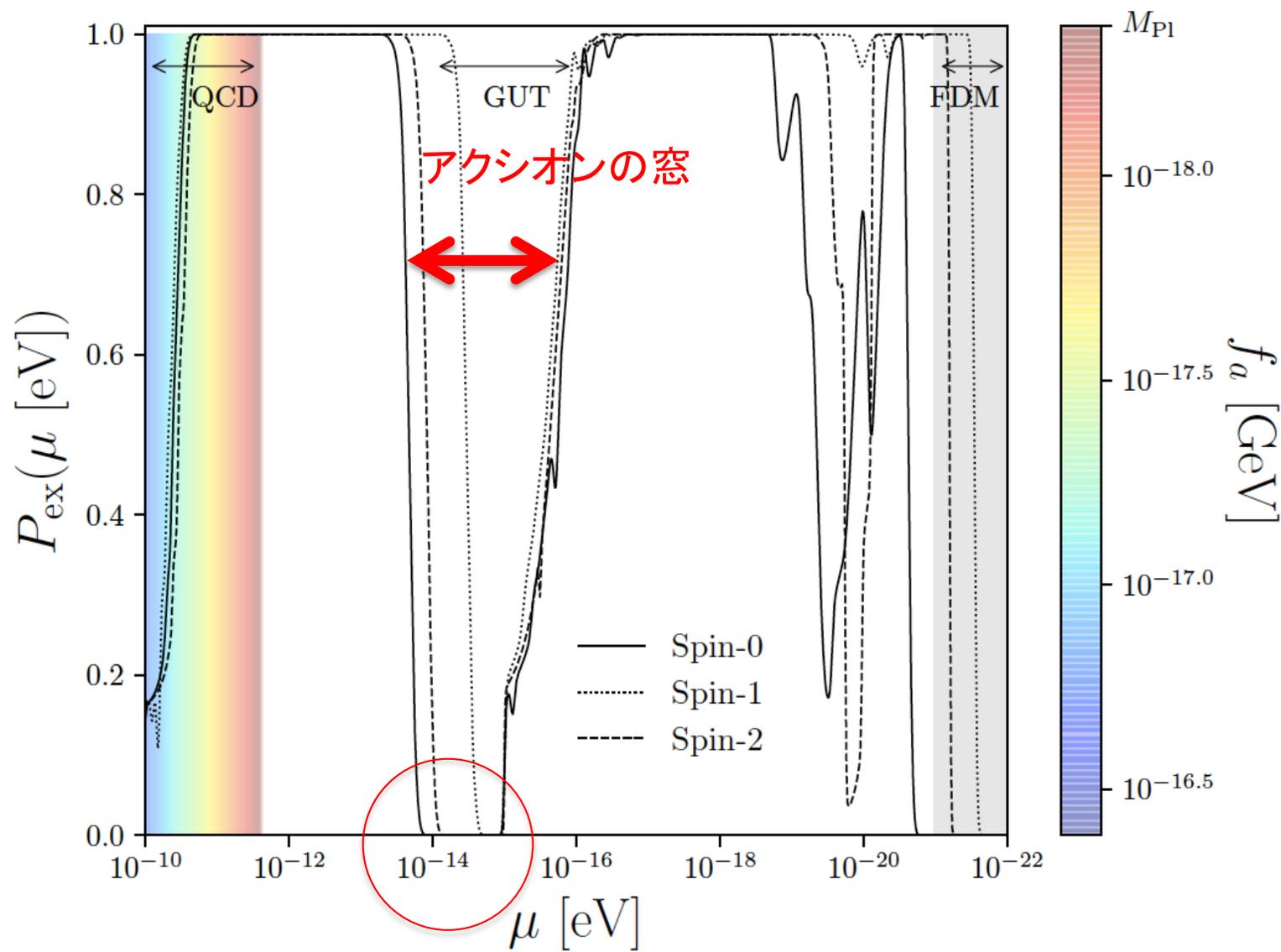
$$10^{-20}\text{eV} \leq m \leq 10^{-10}\text{eV}$$

の対応するアクシオンは存在しない



# BH回転観測からPBHへの制限

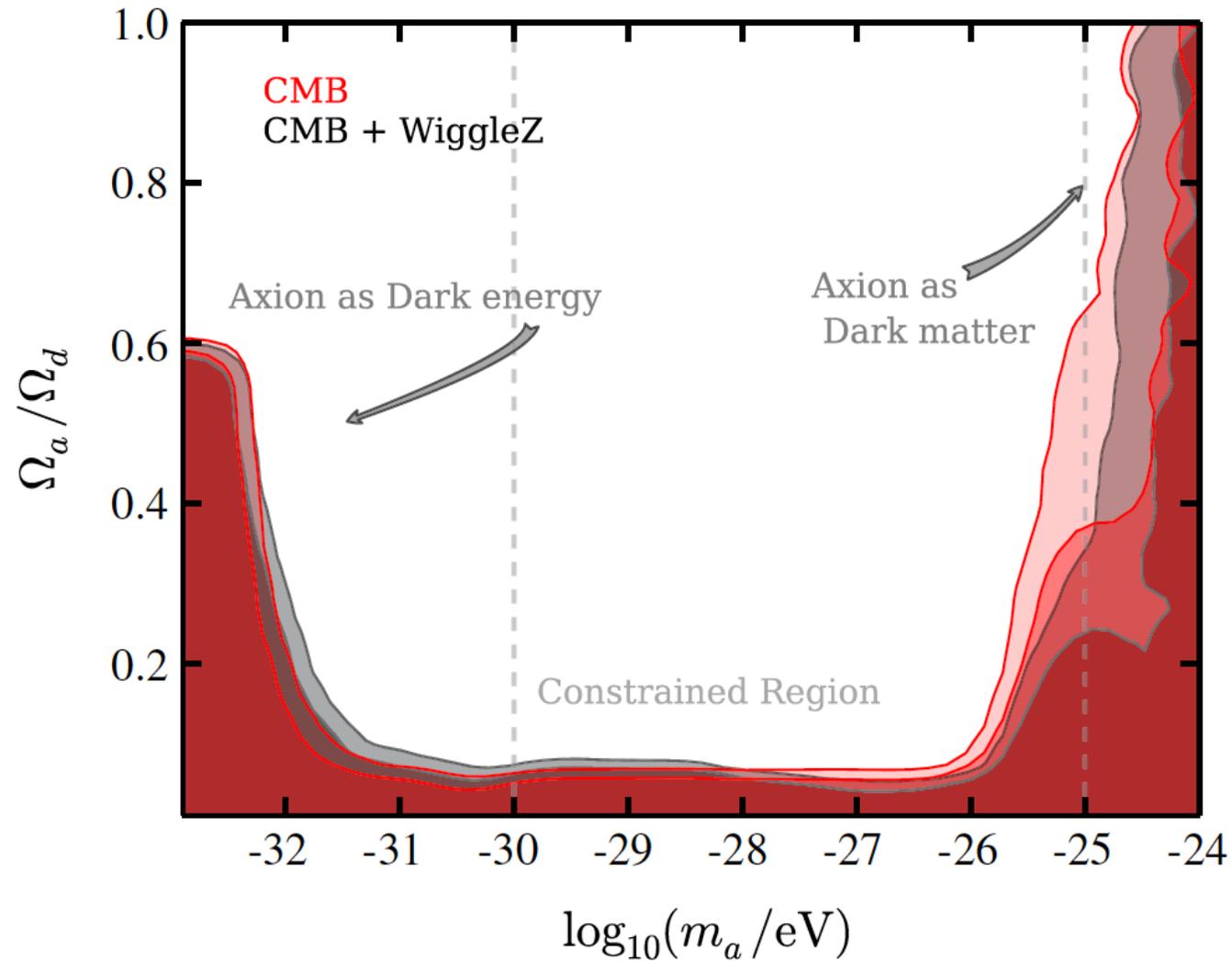
Stott 2020



$m_a = 10^{-14} \text{ eV!}$

# CMBからアクシオンへの制限

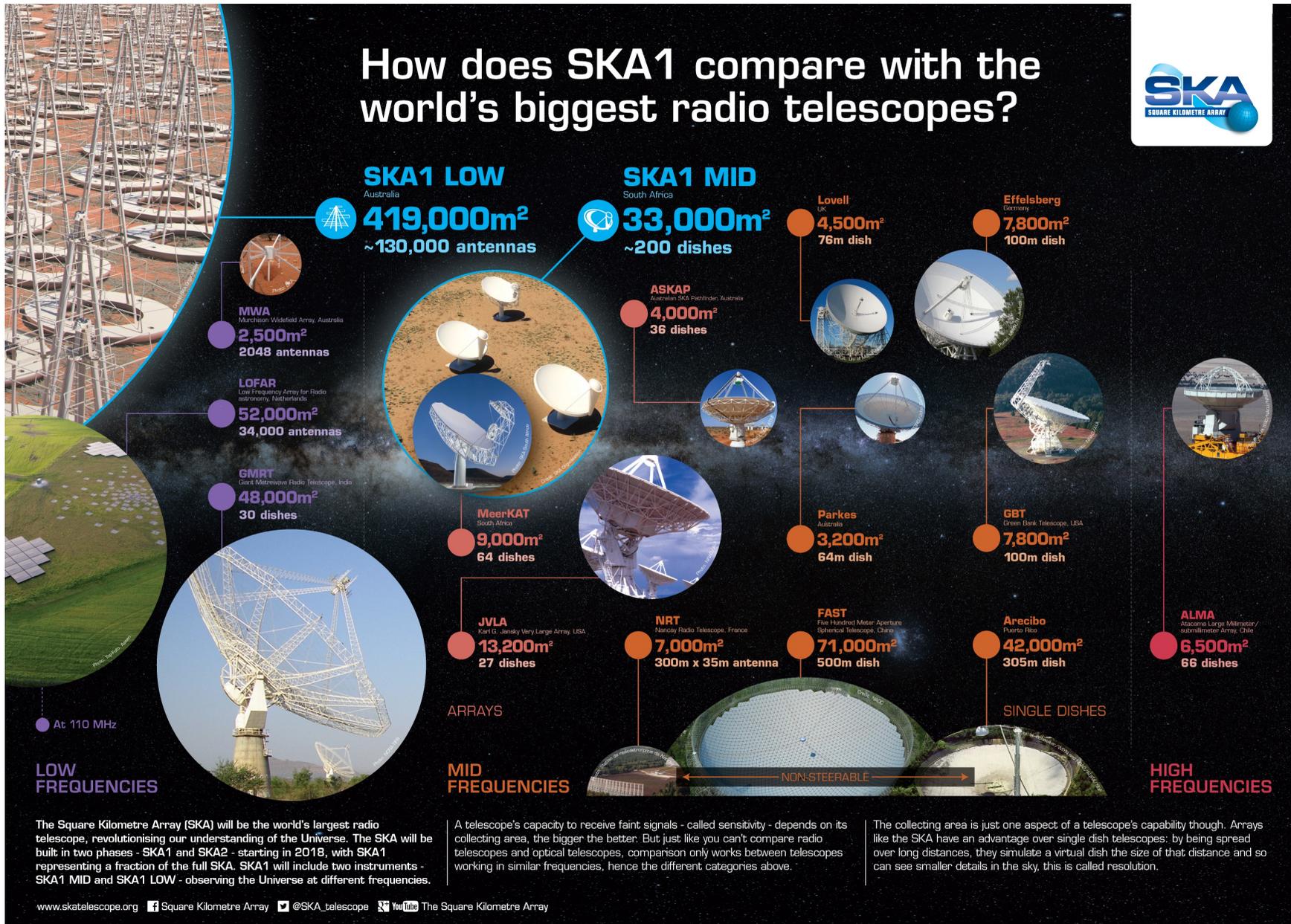
Marsh 2016



# Pulsar timing array 実験



## How does SKA1 compare with the world's biggest radio telescopes?



The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.

A telescope's capacity to receive faint signals - called sensitivity - depends on its collecting area, the bigger the better. But just like you can't compare radio telescopes and optical telescopes, comparison only works between telescopes working in similar frequencies, hence the different categories above.

The collecting area is just one aspect of a telescope's capability though. Arrays like the SKA have an advantage over single dish telescopes: by being spread over long distances, they simulate a virtual dish the size of that distance and so can see smaller details in the sky, this is called resolution.

# 重力ポテンシャルの振動

銀河スケールでは宇宙膨張は無視できる

共形ニュートンゲージでの計量は

$$ds^2 = -(1+2\Psi)dt^2 + (1-2\Phi)\delta_{ij}dx^i dx^j$$

アインシュタイン方程式より

$$R = -6\ddot{\Phi} + 2\nabla^2(2\Phi - \Psi) = -T = \rho_{DM} [1 + 3\cos(2mt)]$$

時間依存性のない部分については

$$\Phi_0 = \Psi_0 \approx -\frac{\rho_{DM}}{2k^2}$$

時間変化は摂動として現れ

$$-6\delta\ddot{\Phi} = 3\rho_{DM} \cos(2mt)$$

$$\delta\Phi = \frac{\rho_{DM}}{8m^2} \cos(2mt) \ll \Phi_0$$

# アクション探索

Khmelnitsky & Rubakov 2014

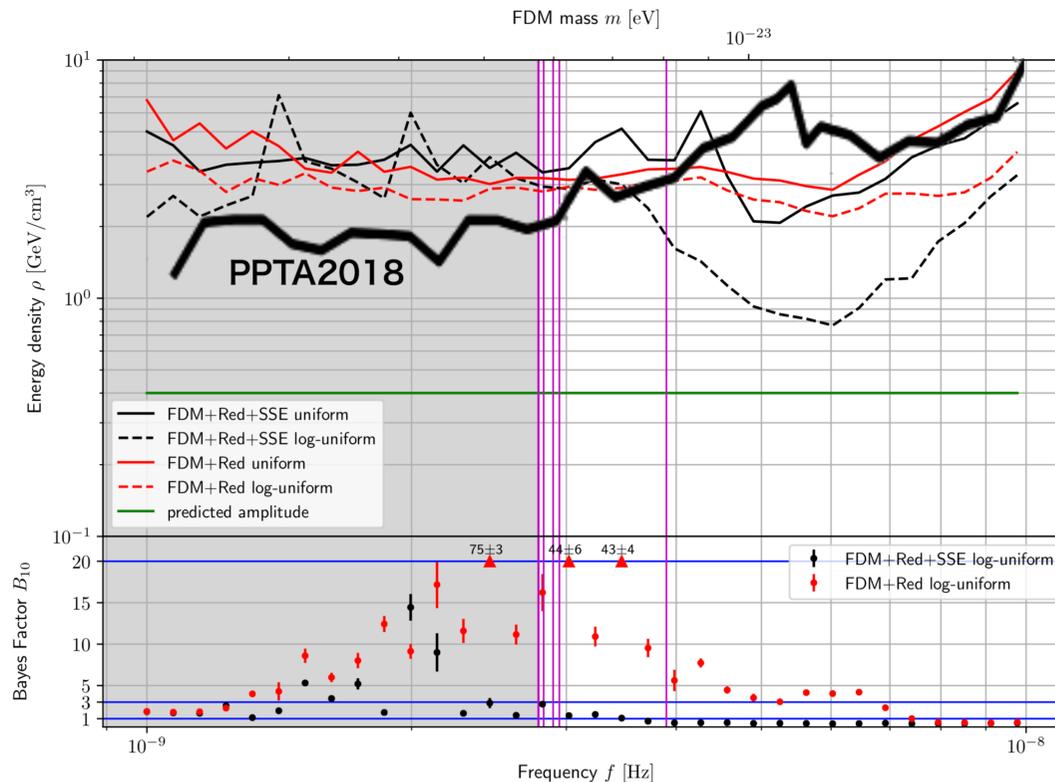
銀河スケールでは宇宙膨張は無視できる

$$ds^2 = -(1+2\Phi)dt^2 + (1-2\Phi)\delta_{ij}dx^i dx^j$$

時間に依存する部分しか関係なくて  $\Phi = \frac{\rho_{DM}}{8m^2} \cos(2mt)$

パルサー周期のズレ

$$\Delta t = -\int_0^t \frac{\Omega(t') - \Omega_0}{\Omega_0} dt' \quad \frac{\Omega(t) - \Omega_0}{\Omega_0} = \Phi(\mathbf{x}, t) - \Phi(\mathbf{x}_p, t')$$

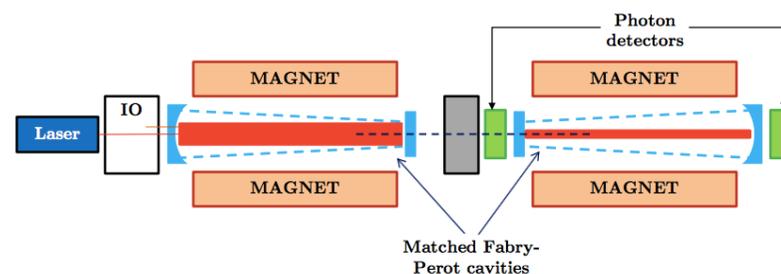
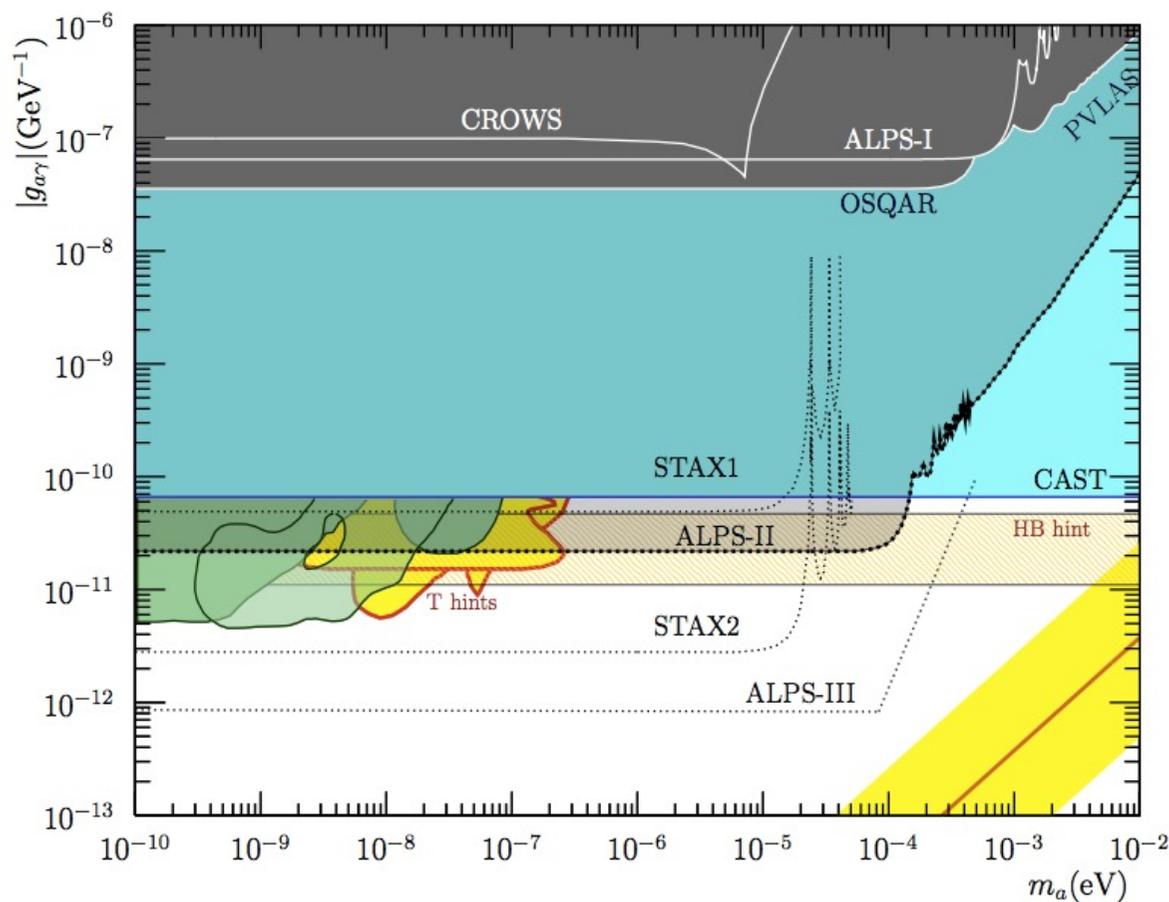


NANOGrav 11year data

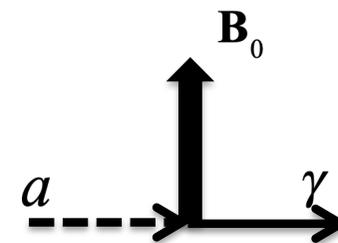
Kato & Soda 2019

# Light-shining-through-wall

Experiment	status	$B$ (T)	$L$ (m)	Input power (W)	$\beta_P$	$\beta_R$	$g_{a\gamma}[\text{GeV}^{-1}]$
ALPS-I [412]	completed	5	4.3	4	300	1	$5 \times 10^{-8}$
CROWS [414]	completed	3	0.15	50	$10^4$	$10^4$	$9.9 \times 10^{-8} (*)$
OSQAR [413]	ongoing	9	14.3	18.5	-	-	$3.5 \times 10^{-8}$
ALPS-II [415]	in preparation	5	100	30	5000	40000	$2 \times 10^{-11}$
ALPS-III [416]	concept	13	426	200	12500	$10^5$	$10^{-12}$
STAX1 [417]	concept	15	0.5	$10^5$	$10^4$	-	$5 \times 10^{-11}$
STAX2 [417]	concept	15	0.5	$10^6$	$10^4$	$10^4$	$3 \times 10^{-12}$



$$L \supset a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}_0 \quad \text{Sikivie 1983}$$



# helioscope

Experiment	references	status	$B$ (T)	$L$ (m)	$\mathcal{A}$ (cm <sup>2</sup> )	focussing	$g_{10}$
Brookhaven	[464]	past	2.2	1.8	130	no	36
SUMICO	[43, 466]	past	4	2.5	18	no	6
CAST	[460, 462, 468, 471, 472]	ongoing	9	9.3	30	partially	0.66
TASTE	[479]	concept	3.5	12	$2.8 \times 10^3$	yes	0.2
BabyIAXO	[480]	in design	$\sim 2.5$	10	$2.8 \times 10^3$	yes	0.15
IAXO	[467, 481]	in design	$\sim 2.5$	22	$2.3 \times 10^4$	yes	0.04

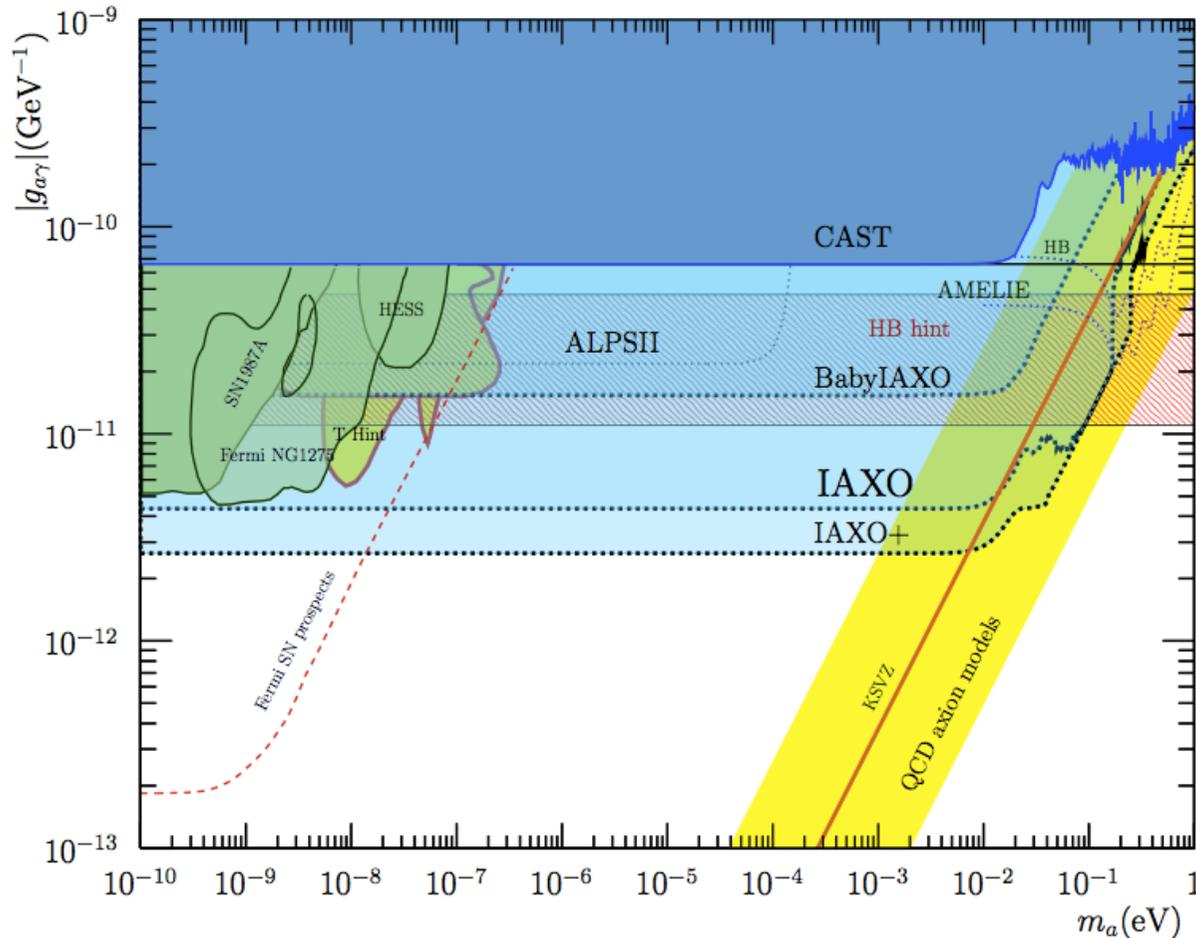
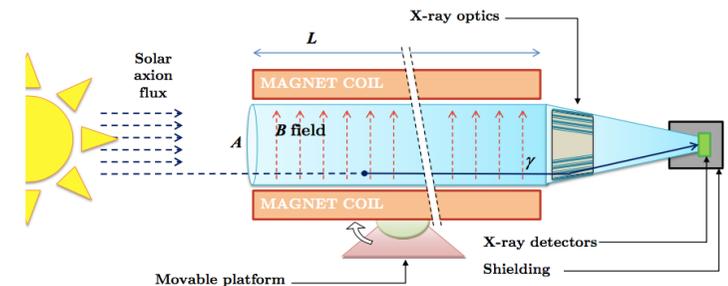
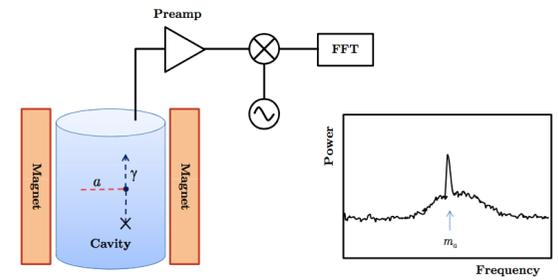
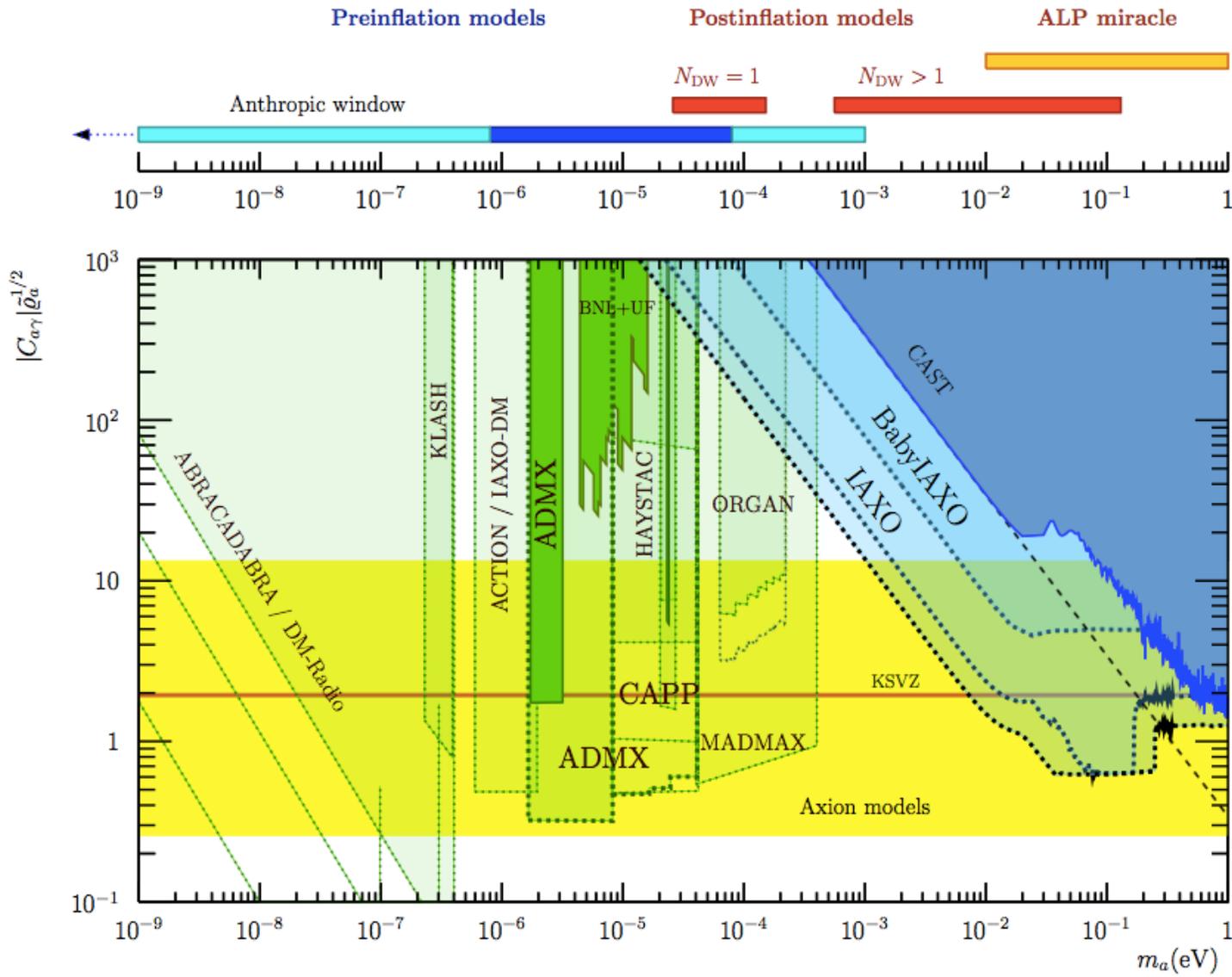


Figure 11: Picture of the CAST experiment at CERN. Credit: M. Rosu/CAST collaboration, CERN



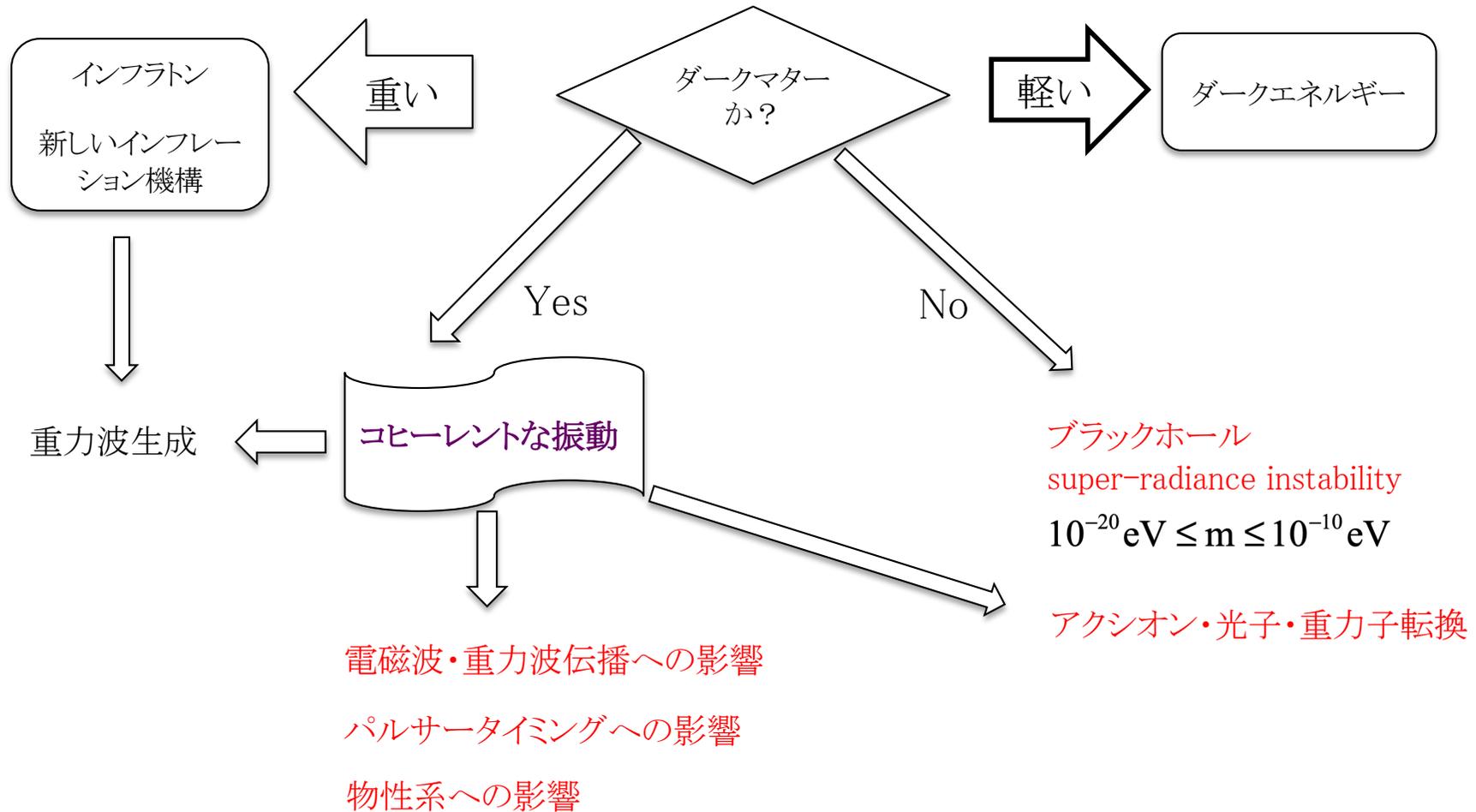
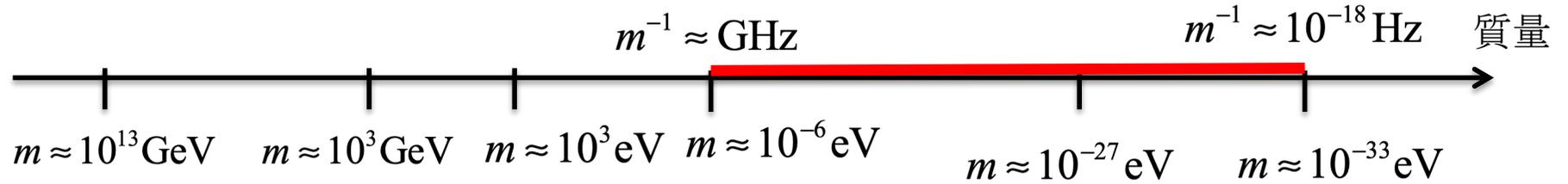
# haloscope



$$C_{\alpha\gamma} = \frac{2\pi}{\alpha} f_a g_{\alpha\gamma}$$

## 8. アクション研究の拡がり

# アクシオンはなぜ面白いのか？



# アクションと重力波の双対性

重力波

アクション

アクション検出に有効な検出装置は  
重力波検出に有効

重力波検出に有効な検出装置は  
アクション検出に有効

重力波干渉計



Aoki & Soda 2016

パルサータイミング



Khmelnitsky & Rubakov 2014

Ito, Ikeda, Miuchi, Soda 2019



マグノン検出器

CMB



CMB

光子・重力子転換



光子・アクション転換

Masaki & Soda 2018

# 量子センシングが解き明かす宇宙

## 量子センシング

- 量子化したエネルギー準位を有する量子状態を利用して物理量を測定（レベル1）
- 量子コヒーレンスを利用して物理量を測定（レベル2）
- 量子もつれを利用して測定感度を向上（レベル3）

## 量子センシングから物理へ

量子センシングによって高精度のデータが得られれば、  
その精度に対応した質的に新しい物理が創出される

宇宙背景放射の精密観測は  
宇宙の原始揺らぎの  
統計的な非ガウス性・統計的非等方性などを示唆し  
多様な量子場が関与したインフレーションモデルを生み出した

## 物理から量子センシングへ

重力子・アクシオン・背景ニュートリノなど存在確度の高い未発見粒子  
の探索には新たな実験が必要とされている

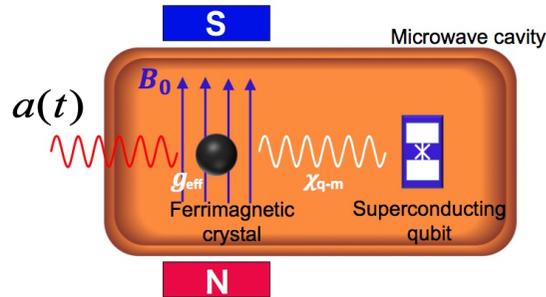
高周波重力波では、  
キャビティ・マイクロ波・マグノン・リユードベリ原子など様々な方法が提案された

dHz領域における原子干渉計重力波検出器の可能性も世界中で検討されている

# マグノンを用いたアクシオン探査

超伝導 Q-bit による読み出し

アクシオンはコヒーレントに振動している



$$a(t) \approx \frac{\sqrt{2\rho_{DM}}}{m_a} \cos m_a t$$

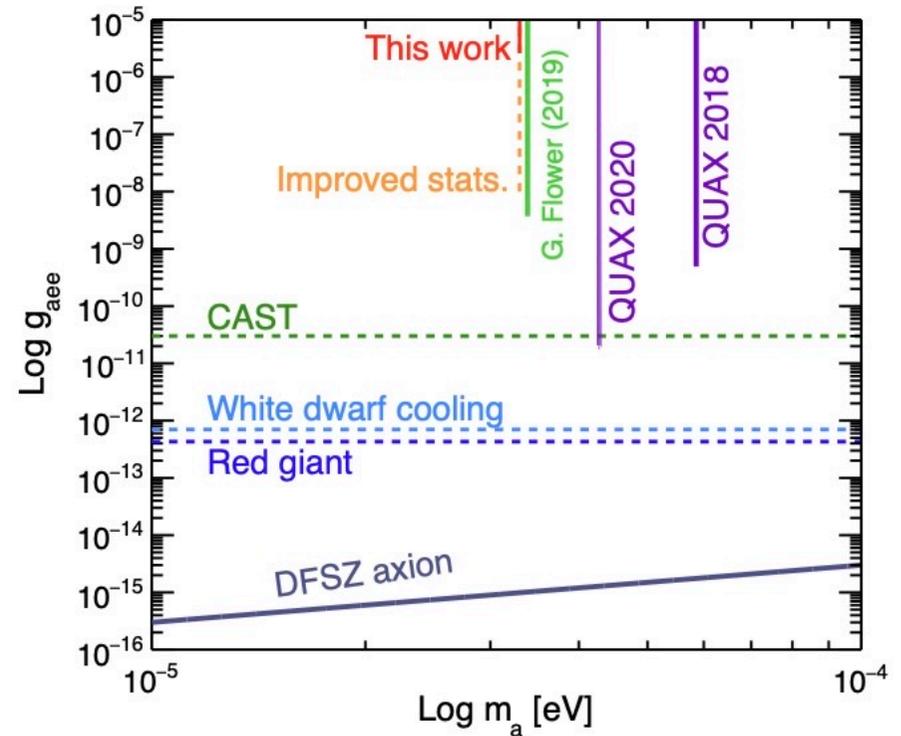
$$B_a = \frac{g_{aee}}{e} \nabla a$$

$$\approx 4.4 \times 10^{-8} g_{aee} \left( \frac{\rho_{DM}}{0.45 \text{ GeV/cm}^3} \right)^{1/2} \left( \frac{v}{300 \text{ km/s}} \right) [\text{T}]$$

マグノンによるアクシオンと電子の結合への制限

$$B_a < 4.1 \times 10^{-14} [\text{T}]$$

$$\longrightarrow g_{aee} < 1.3 \times 10^{-6}$$



Ikeda et al. 2022

# 環境下でのアクシオン光子転換の定式化

背景場

$$\bar{B} = \text{constant}$$

$$\beta = \frac{g\bar{B}}{m}$$

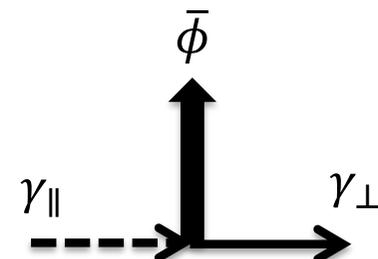
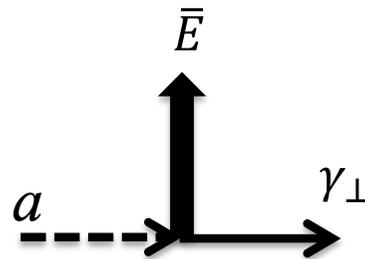
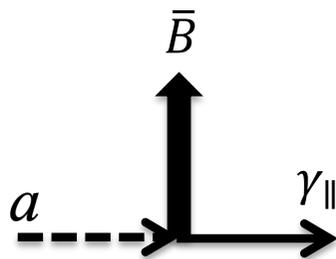
$$\bar{\phi} = \frac{\sqrt{2\rho_{DM}}}{m\Omega} \cos \Omega mt$$

$$\Omega = \sqrt{1 + \beta^2}$$

$$\bar{E} = \frac{\beta\sqrt{2\rho_{DM}}}{\Omega} \cos \Omega mt$$

相互作用ハミルトニアン

$$\delta S_I = \int d^4x \left[ g\bar{B}\phi \frac{\partial A_{\parallel}}{\partial t} - g\bar{E}\hat{B}^i \varepsilon^{ijk} n^k \phi \partial_j A_{\perp} + g\bar{\phi}\hat{B}^i \varepsilon^{ijk} n^k \left( \frac{\partial A_{\parallel}}{\partial t} \partial_j A_{\perp} - \frac{\partial A_{\perp}}{\partial t} \partial_j A_{\parallel} \right) \right]$$



# 轉換確率を増幅させる

Ikeda, Kanno, Soda 2025

アクションのスクイーズ状態

$$|\xi_{\mathbf{k},P}\rangle_g = S_{\mathbf{k},P}(\xi)|0\rangle_g \quad S_{\mathbf{k},P}(\xi) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\xi^* a_P(\mathbf{k})^2 - \xi a_P^\dagger(\mathbf{k})^2\right)\right], \quad \xi = ze^{i\chi}$$

光子のスクイーズ状態

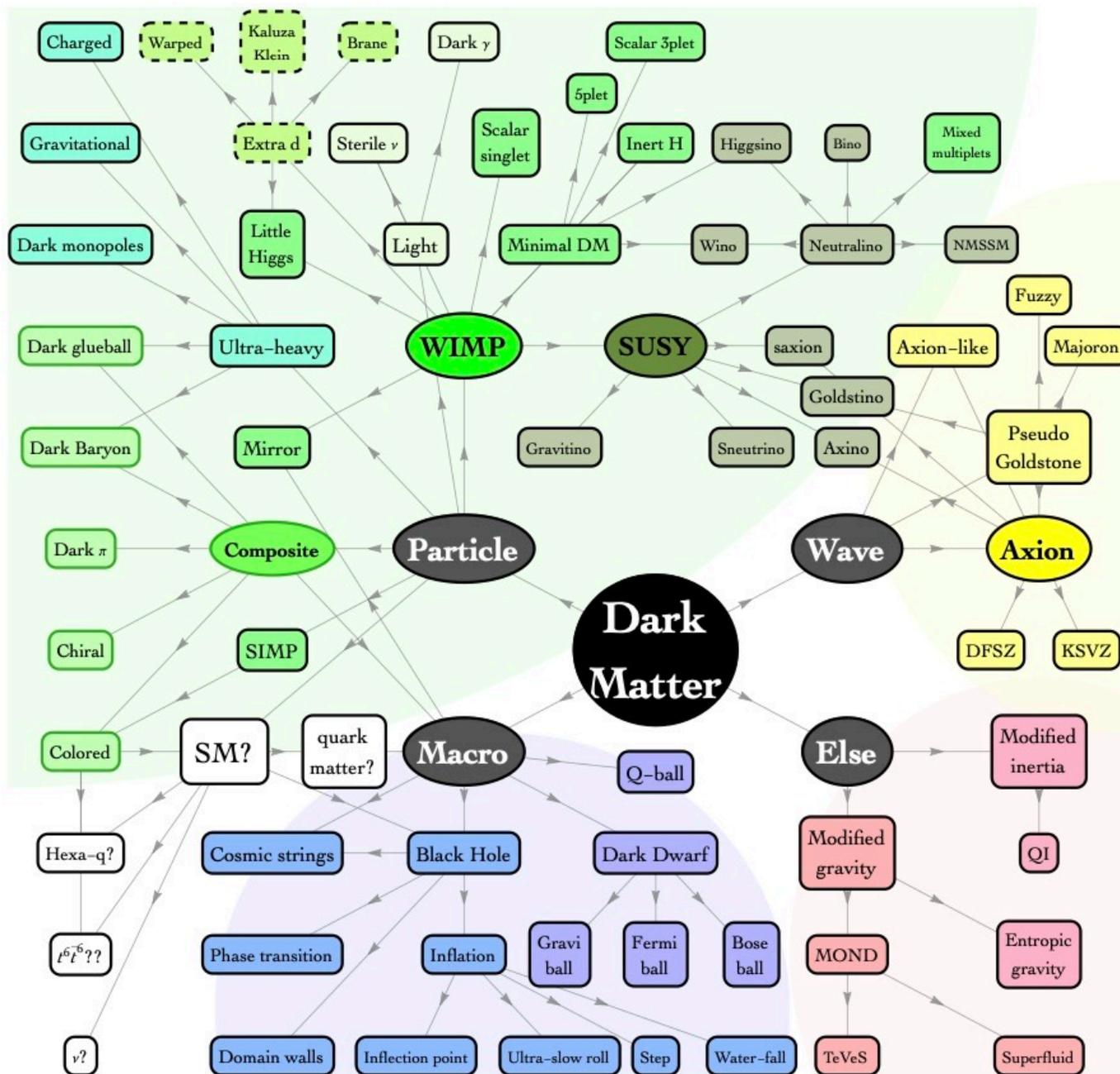
$$|\mathbf{k}_\psi, \zeta, \beta\rangle = Ab_k^\dagger|\zeta, \beta\rangle \quad A = [\cosh^2 r + |\beta|^2 (\cosh 2r + \cos [2 \arg \beta - \varphi] \sinh 2r)]^{-1/2}$$

$$|\zeta_{\mathbf{k}}\rangle = S(\zeta_{\mathbf{k}})|0\rangle \quad S(\zeta_{\mathbf{k}}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\zeta_{\mathbf{k}}^* b_{\mathbf{k}}^2 + \frac{1}{2}\zeta_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{k}}^{\dagger 2}\right] \quad \zeta_{\mathbf{k}} = r_{\mathbf{k}} e^{i\varphi_{\mathbf{k}}}$$

確率の増幅が得られる

$$\begin{aligned} & \left| \langle \xi, \zeta, \beta, k_\phi | \exp\left[-i \int_0^t H_I dt\right] | \xi, \zeta, \beta, k_\psi \rangle \right|^2 \\ &= \left(\frac{1}{2} gB\right)^2 U_k^2 |f|^2 \cosh^2 z [\cosh^2 r + |\beta|^2 (\cosh 2r + \sinh 2r \cos(2\delta - \varphi))]^2 \\ &\propto e^{2z} \times e^{2r} \times |\beta|^2 \end{aligned}$$

# 展望



# 素粒子研究史からの学び

## S行列理論の黄金時代と加速器物理の変遷 (1952-1974)

年	加速器・実験技術の進展	理論物理 (S行列 vs QFT) の動向
1952	強収束 (ストロング・フォーカシング) 原理の提唱。	QFT (場の量子論) が強い相互作用の計算で破綻。
1953	泡箱 (バブルチェンバー) の発明。	高精度な粒子軌跡の観測が可能になり、「粒子動物園」への道が開く。
1959	CERN PS (陽子シンクロトロン) 稼働。GeV領域へ。	S行列理論が台頭。ジェフリー・チュウが「基本粒子」の概念を攻撃。
1961	世界初のコライダー(AdA) 稼働 (伊)。	「核の民主主義」が主流に。粒子の「広がり」と「自己無撞着性」が重視される。
1962	ニュートリノに2種類あることを発見 (BNL)。	レッジ理論 (S行列の複素角運動量) がハドロン散乱の記述に成功。
1964	第4のクォークやCP対称性の破れを示唆する実験。	クォーク模型提唱。しかし、当時はS行列の枠内での「分類用ラベル」扱い。
1968	SLAC (線形加速器) での深非弾性散乱実験。	陽子内に「点状の硬い核 (パートン)」を確認。S行列の「広がり」と矛盾。
1969	加速器データの「双対性」を説明する数式の発見。	ヴェネツィアーノが二元共鳴モデルを発表。これが弦理論の起源となる。
1971	世界初ハドロンコライダー(ISR) 稼働 (CERN)。	ト・ホーフトラによりQFTの「繰り込み」が可能になり、理論界がQFTへ回帰。
1973	泡箱「ガルガメル」が中性カレントを発見。	電弱統一理論 (QFT) が実証され、S行列理論は主流から外れる。
1974	11月革命 (J/ $\psi$ 粒子の発見)。	第4のクォークが確定。QFT (量子色力学: QCD) が完全勝利を収める。

### 「正体不明の氾濫」と「現象論的アプローチ」

・1960年代のS行列: 加速器で未知の粒子が大量に見つかり、QFTで記述しきれず、まずは「散乱データ (S行列)」を整理する手法が先行した

・現代の暗黒物質: 宇宙観測から「未知の質量」の証拠が大量に見つかったが、その正体 (粒子としての場) が特定できていない。現在は「有効理論 (EFT)」などを用いて、正体を問わず「CDM」という現象論 (S行列に近い発想) の段階