

A model explaining the new CDF II W boson mass linking to muon $g-2$ and dark matter

Keiko Nagao

Okayama Univ. of Sci.

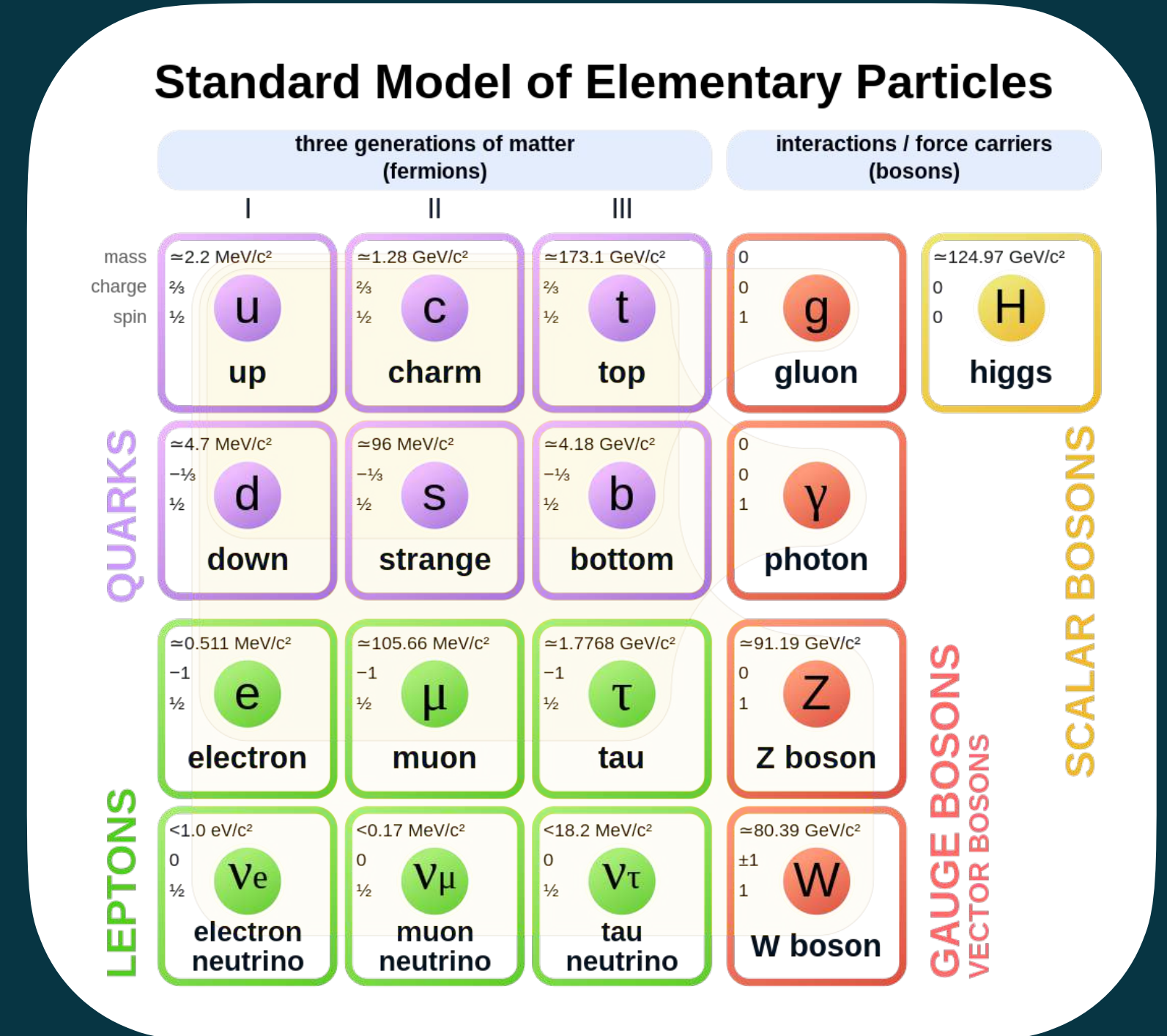
based on collaboration with **H. Okada** and **T. Nomura**

arXiv:2204.07411

c.f. arXiv:2206.15256

素粒子の標準模型

- ほとんどの研究者が（ほぼ）正しいと同意する素粒子の模型
- いろんな実験とほぼほぼ合ってる（！）
- いつから「標準」？…wikipediaによると1970年代半ば
- 説明できないこともある



もっと究極に近い
「標準模型を超えた」理論があるはず



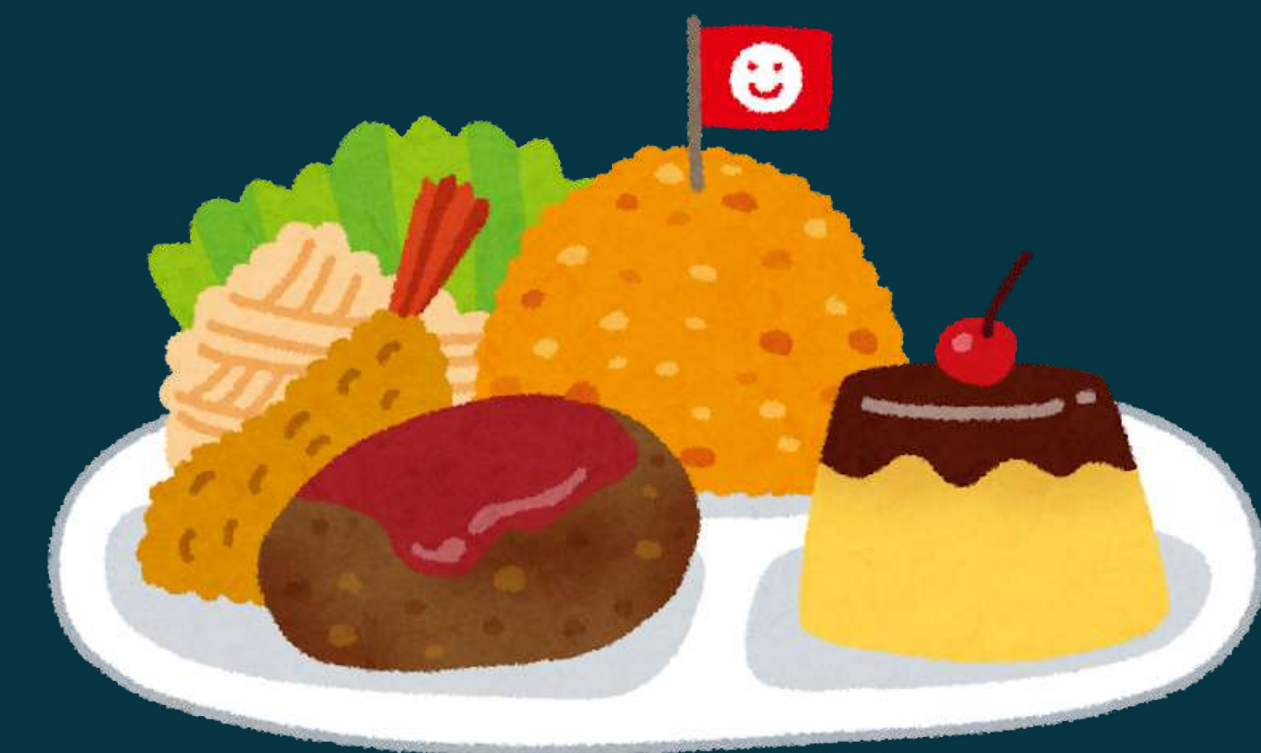
標準模型で説明できないこと

- ニュートリノの質量
- 宇宙のダークマター
- 宇宙のダークエネルギー
- ミューオンの異常磁気能率
- Wボソンの質量異常
- Hubble テンション
- ...
- 粒子数-反粒子数の非対称性
- 力の/物質の統一 (重力?)
- 質量の階層性
- 電荷の量子化
- 強いCP問題
- ...

NEW

Wボソンの質量異常

三島さん講義



「標準模型を超えた理論」で説明できるはず
これらをヒントに、説明できるような理論を作ればいいだろう

目次

1. イントロダクション
2. 模型の紹介
3. 模型の議論
 - A. Obliqueパラメータ
 - B. ミューオン異常磁気能率
 - C. ダークマター
4. 数値計算
5. まとめ

模型の紹介

★ ベクターライクフェルミオン

$$M_\psi \bar{\psi} \psi$$

★ 標準模型のフェルミオン

$$Y_{ij}^e \bar{L}_{L,i} H e_{R,j}$$

	L_L	ℓ_R	L'	E	H	η
$SU(3)_C$	1	1	1	1	1	1
$SU(2)_L$	2	1	2	1	2	2
$U(1)_Y$	$-\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Z_2	+	+	-	-	+	-

● 標準模型 + 新粒子

- ベクターライクな二重項レプトン $L' = \begin{pmatrix} N' \\ E' \end{pmatrix}$

- ベクターライクな一重項レプトン E

- 二重項の不活性スカラー $\eta = \begin{pmatrix} \overset{\text{イナート}}{\eta^+} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_R + i\eta_I) \end{pmatrix}$

ダークマター

N. G. Deshpande and E. Ma, *PRD* 18 (1978) 2574

...

NEW

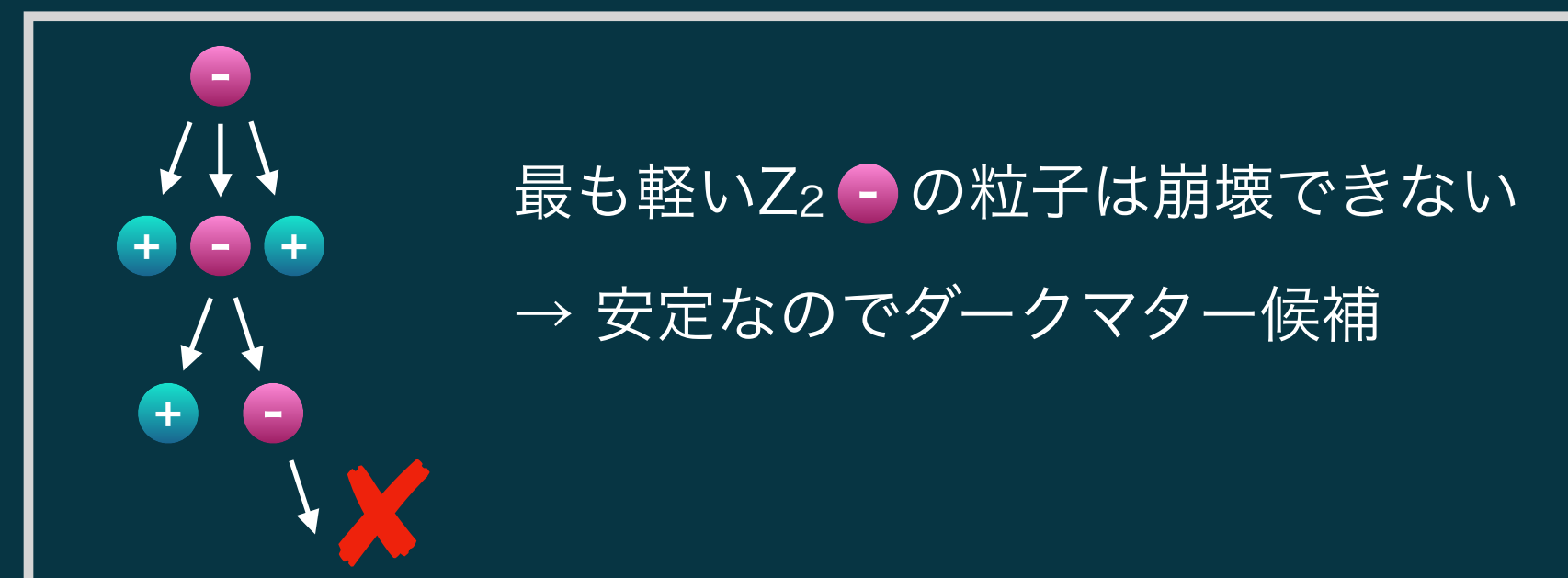
● 対称性

$$-SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times Z_2$$

NEW

● Lagrangian

$$-\mathcal{L}^{\text{lepton}} = y_{l_{ij}} \bar{L}_{L_i} H l_{R_j} + y_{L_i} \bar{E} \eta^\dagger L_{L_i} + y_E \bar{L}'_L H E + M_E \bar{E} E + M_L \bar{L}' L + h.c.$$



ベクターライクレプトン

$$H = \begin{pmatrix} h^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \end{pmatrix} \quad \eta = \begin{pmatrix} \eta^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_R + i\eta_I) \end{pmatrix}$$

● $V = -M_H^2 H^\dagger H + M_\eta^2 |\eta|^2 + \lambda_H (H^\dagger H)^2 + \lambda_\eta |\eta|^4 + \lambda_{H\eta} (H^\dagger H)(\eta^\dagger \eta) + \lambda'_{H\eta} (H^\dagger \eta)(\eta^\dagger H) + \lambda''_{H\eta} [(H^\dagger \eta)^2 + h.c.]$

→ η 成分の質量差: $m_R^2 - m_I^2 = \lambda''_{H\eta} v^2$

$$m_{\eta^\pm}^2 - m_R^2 = -(\lambda'_{H\eta} - \lambda''_{H\eta})v^2$$

● E, E'の質量

$$-\mathcal{L} = y_{l_{ij}} \bar{L}_{L_i} H l_{R_j} + y_{L'_i} \bar{E} \eta^\dagger L_{L_i} + \boxed{y_E \bar{L}'_L H E} + \boxed{M_E \bar{E} E} + \boxed{M_L \bar{L} L} + h.c.$$

$$\supset y_{E\nu} v / \sqrt{2} \bar{E}' E + M_E \bar{E} E + M_L \bar{E}' E' + h.c.$$

$$\mathcal{M}_E = \begin{pmatrix} M_E & y_{E\nu} v / \sqrt{2} \\ y_{E\nu} v / \sqrt{2} & m_E \end{pmatrix} \xrightarrow[\begin{pmatrix} c_c & -s_c \\ s_c & c_c \end{pmatrix}]{\text{対角化}} \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} \begin{matrix} (E, E') \\ (E_1, E_2) \end{matrix}$$

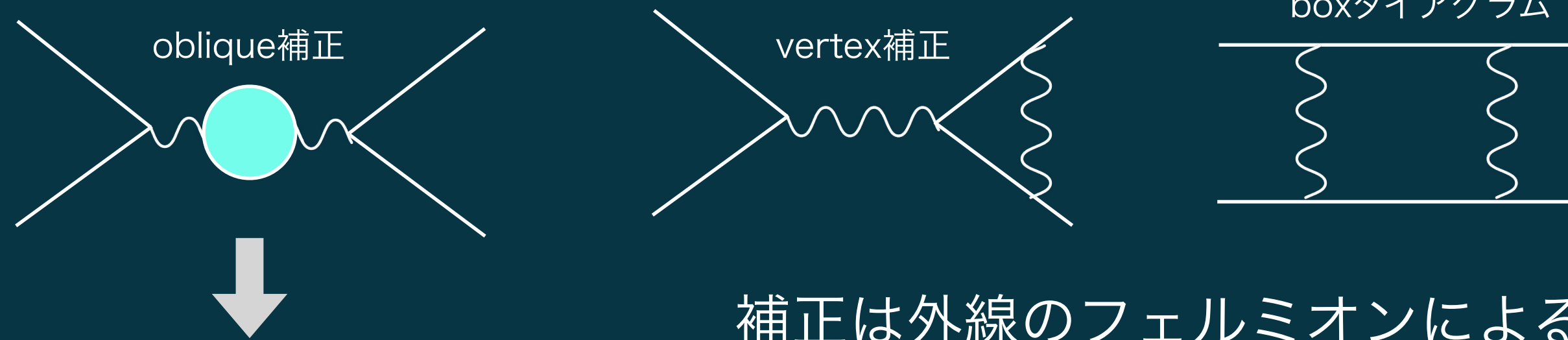
目次

1. イントロダクション
2. 模型の紹介
3. 模型の議論
 - A. Obliqueパラメータ
 - B. ミューオン異常磁気能率
 - C. ダークマター
4. 数値計算
5. まとめ

Obliqueパラメーター

- 電弱精密測定での輻射補正

e.g. $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ を通したZ pole (LEP)



補正は外線のフェルミオンによる

SMの電弱輻射補正に対する
新粒子の影響を見る

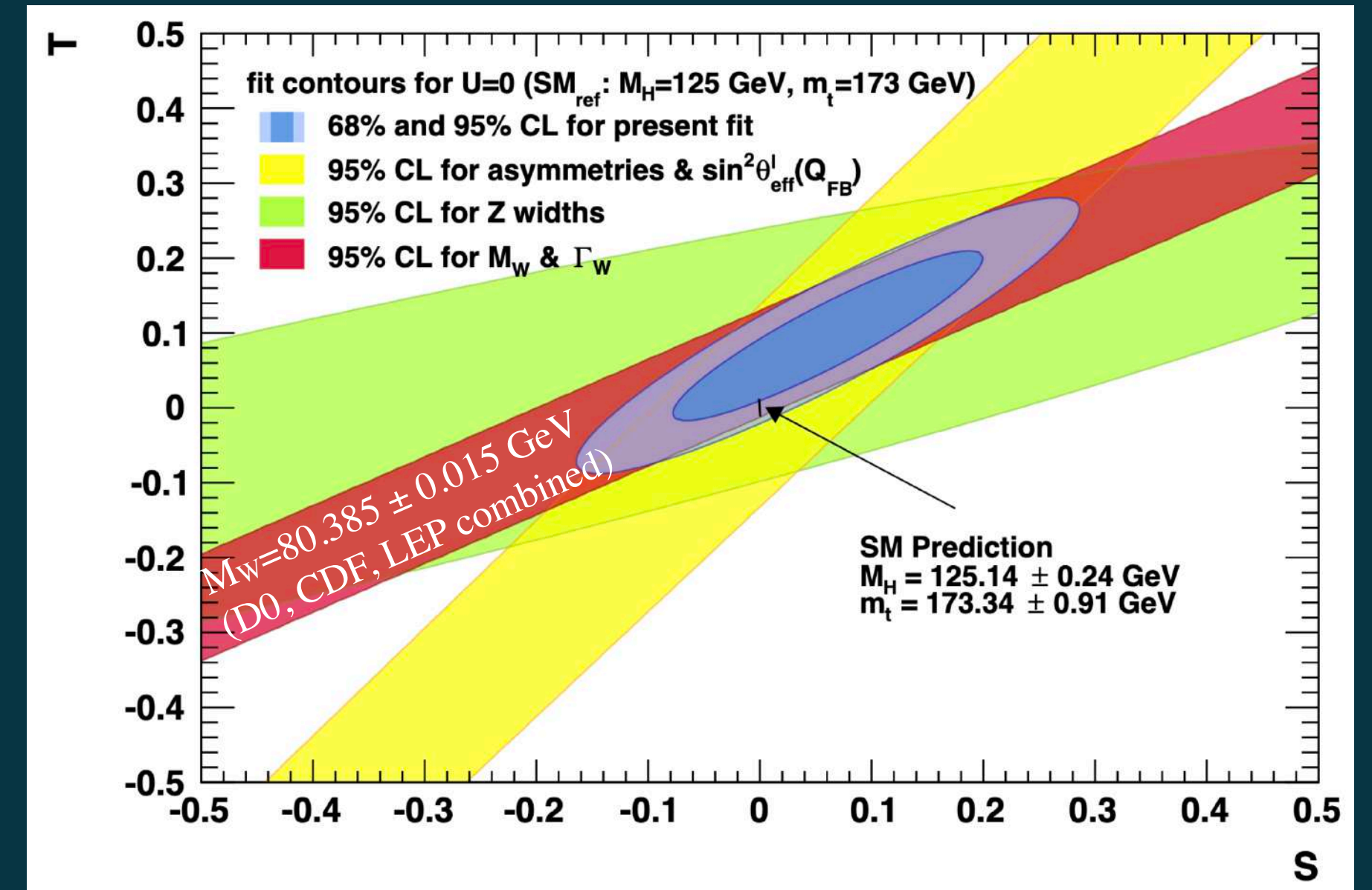
- 補正のパラメトリゼーション

- Peskin-Takeuchi パラメーター (S, T, U)

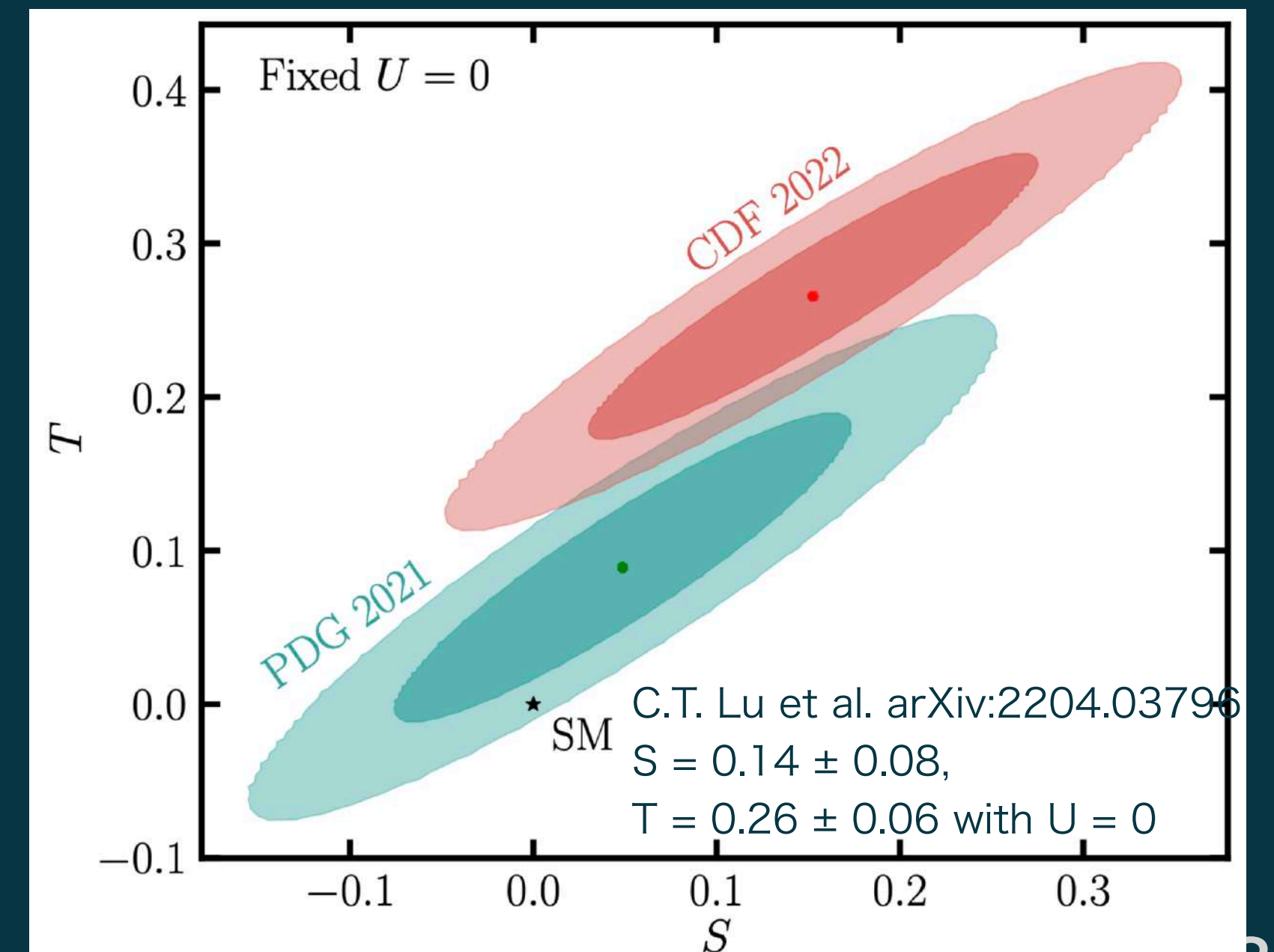
Peskin and Takeuchi, PRL65 (1990) 964

- ϵ パラメーター ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$)

Alterelli and Barbieri, PLB253 (1991) 161



M. Baak et.al (The Gfitter Group), arXiv:1407.3792

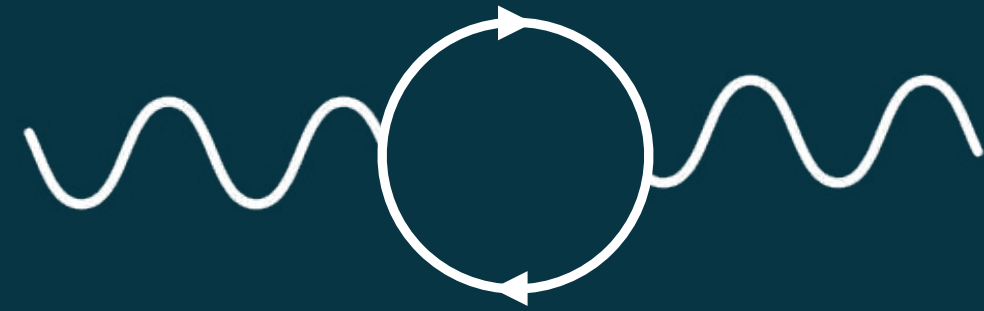


Obliqueパラメーター

Peskin and Takeuchi, PRL65 (1990) 964

$$I \begin{array}{c} \mu \\ \curvearrowright \\ \vec{q} \end{array} \text{PI} \begin{array}{c} \nu \\ \curvearrowleft \end{array} J = ig^{\mu\nu} \Pi_{IJ}(q^2)$$

- ベクターライクなレプトンの寄与



$$\alpha\Delta S = 4e^2 \sum_{\text{VLF}} \left[\frac{d}{dq^2} \Pi_{33}^{\text{VLF}}(0) - \frac{d}{dq^2} \Pi_{3Q}^{\text{VLF}}(0) \right]$$

$$\alpha\Delta T \equiv \frac{e^2}{s^2 c^2 m_Z^2} \left[\Pi_{\pm}^{\text{VLF}}(0) - \Pi_{33}^{\text{VLF}}(0) \right] \quad (\text{VLF} = E_1, E_2, N')$$

- イナートスカラーの寄与



$$\Delta S \simeq \frac{1}{2\pi} \int_0^1 dx \, x(1-x) \ln \left[\frac{xm_R^2 + (1-x)m_I^2}{m_{\eta^\pm}^2} \right]$$

$$\Delta T \simeq \frac{1}{24\pi^2 \alpha v^2} (m_{\eta^\pm} - m_I)(m_{\eta^\pm} - m_R)$$

R.Barbieri et al., arXiv:0603188

$$\begin{aligned} \Pi_{\gamma\gamma}(q^2) &= e^2 \Pi_{QQ}(q^2) \\ \Pi_{Z\gamma}(q^2) &= \frac{e^2}{sc} \left[\Pi_{3Q}(q^2) - s^2 \Pi_{QQ}(q^2) \right] \\ \Pi_{ZZ}(q^2) &= \frac{e^2}{s^2 c^2} \left[\Pi_{33}(q^2) - 2s^2 \Pi_{3Q}(q^2) \right] \\ \Pi_{WW}(q^2) &= \frac{e^2}{s^2} \Pi_{11}(q^2) \end{aligned}$$

ミューオンの異常磁気能率

- スピン磁気能率 $\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_\mu} \vec{S}$
g因子

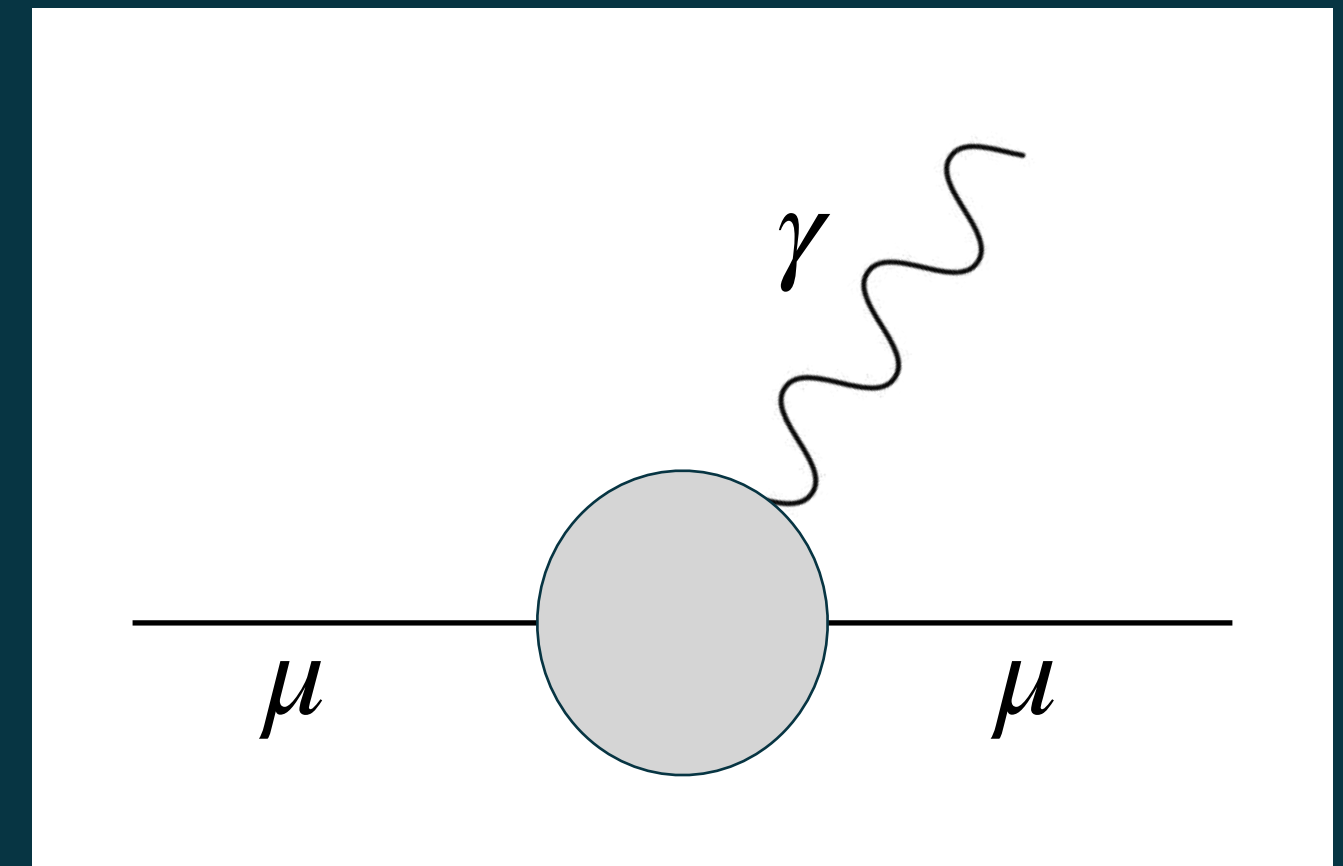
- ミューオン g-2

- tree level : $g=2$

- 量子補正 : $g \neq 2$

- $a_\mu = \frac{g-2}{2}$

- 標準模型から計算される a_μ  実験で求められる a_μ



ミューオン異常磁気能率の異常

- 標準模型

$$a_{\mu}^{\text{SM}} = (11659181.0 \pm 4.3) \times 10^{-10}$$

T. Aoyama et al., arXiv:2006.04822



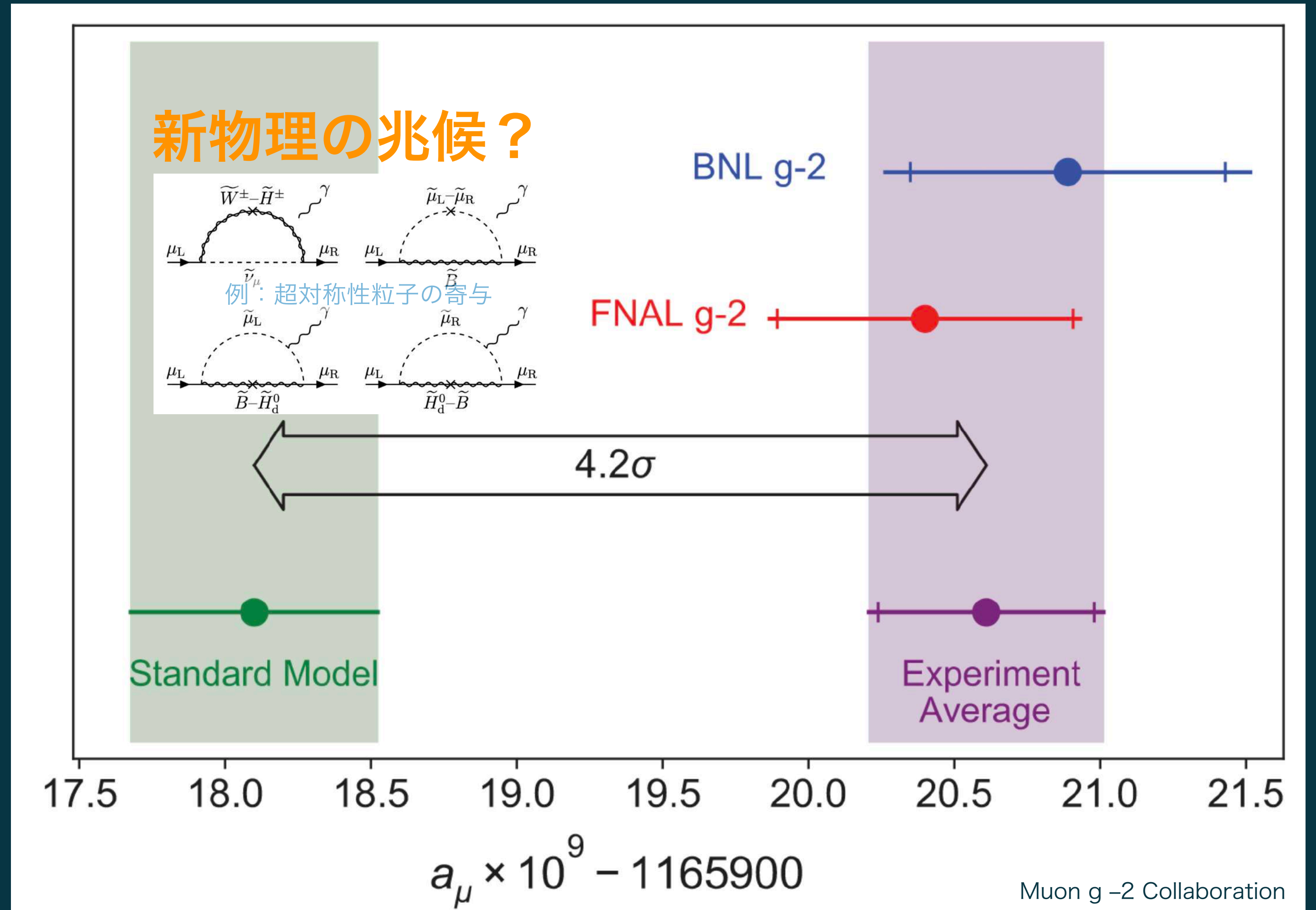
$$\begin{aligned} \Delta a_{\mu} &= a_{\mu}^{\text{exp.}} - a_{\mu}^{\text{SM}} \\ &= (25.1 \pm 5.9) \times 10^{-10} \end{aligned}$$

- 実験

$$a_{\mu}^{\text{BNL+FNAL}} = (11659206.1 \pm 4.1) \times 10^{-10}$$

Muon g -2 Collaboration,

Phys. Rev. Lett. 126, 141801 (2021)



異常磁気能率への新しい寄与

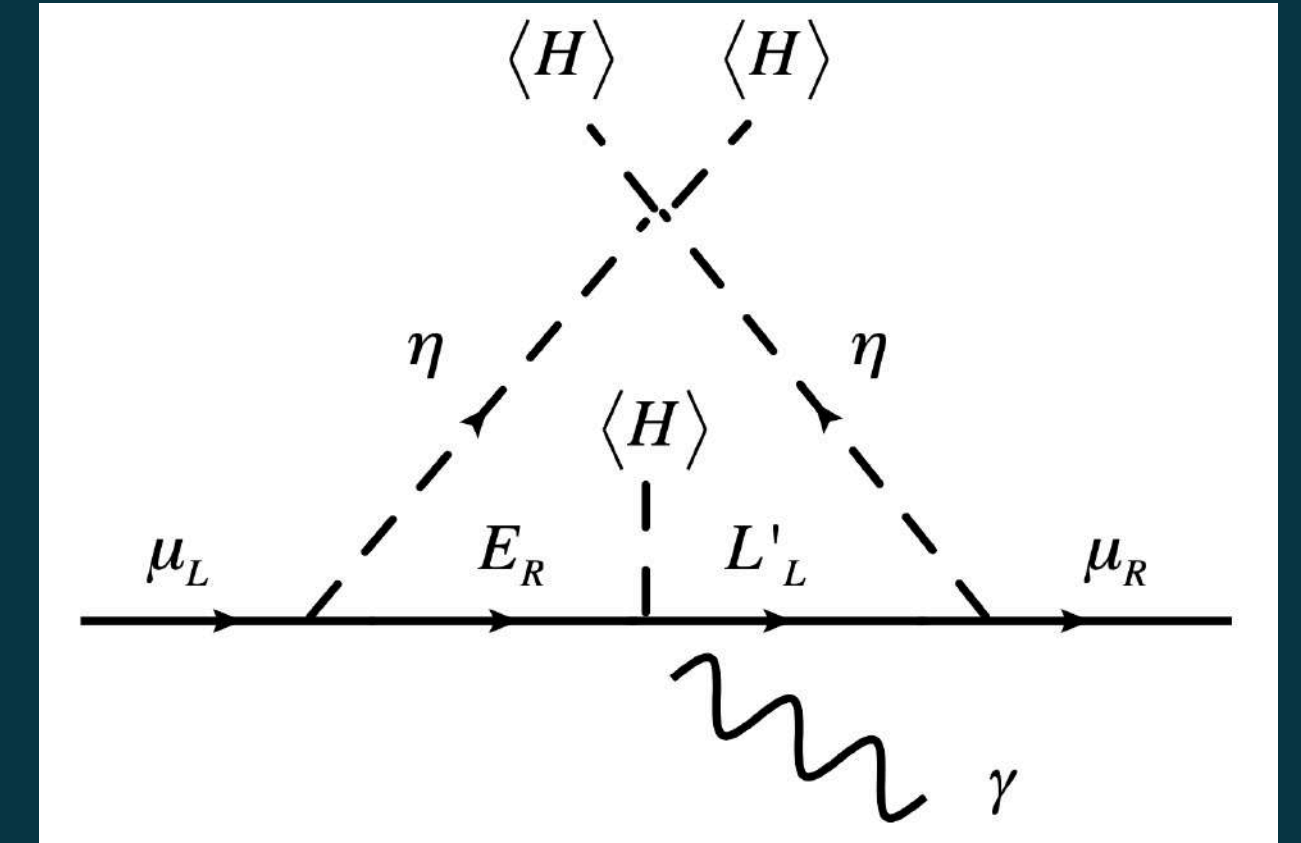
- $$\Delta a_\mu = \frac{m_\mu}{(4\pi)^2} s_c c_c y_{L'_\mu} y_{S_\mu} \sum_{a=1,2} \frac{(-1)^{a-1}}{M_a} [F(q_a, r_{Ra}) - F(q_a, r_{La})]$$

$$F(q, r) \equiv \int_0^1 dx \int_0^{1-x} dy \frac{1-x}{1-x+q^2(x^2-x)+r^2x} \simeq \frac{-1+r^4-2r^2 \ln r^2}{2(-1+r^2)^3} + \mathcal{O}(q^2)$$

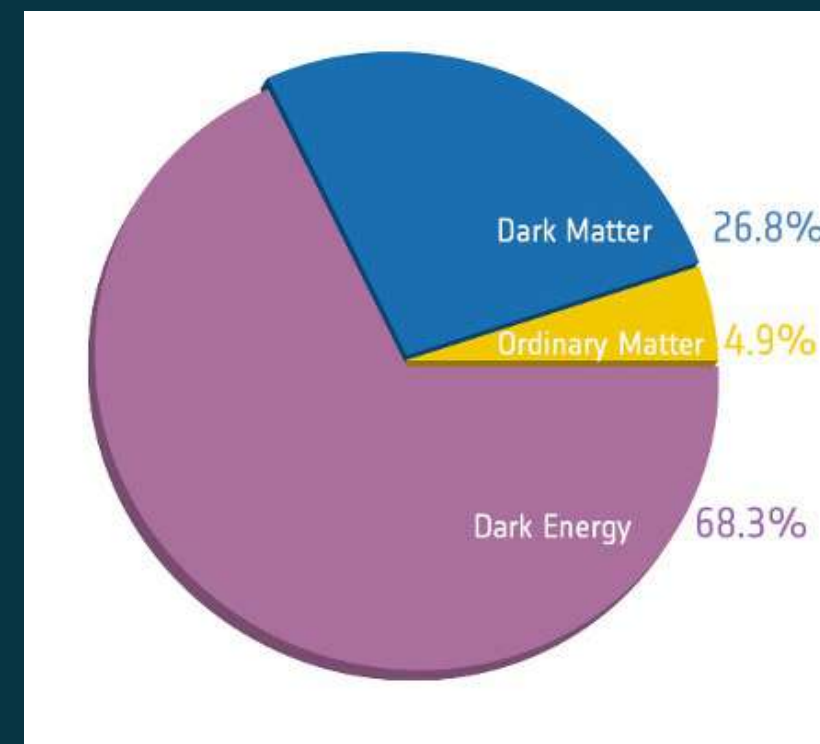
$$q_i \equiv \frac{m_\mu}{M_i} \ll 1$$

$$r_{ai} \equiv \frac{m_a}{M_i} \quad (a = R, I, i = 1, 2)$$

- η_R, η_I の質量差が重要

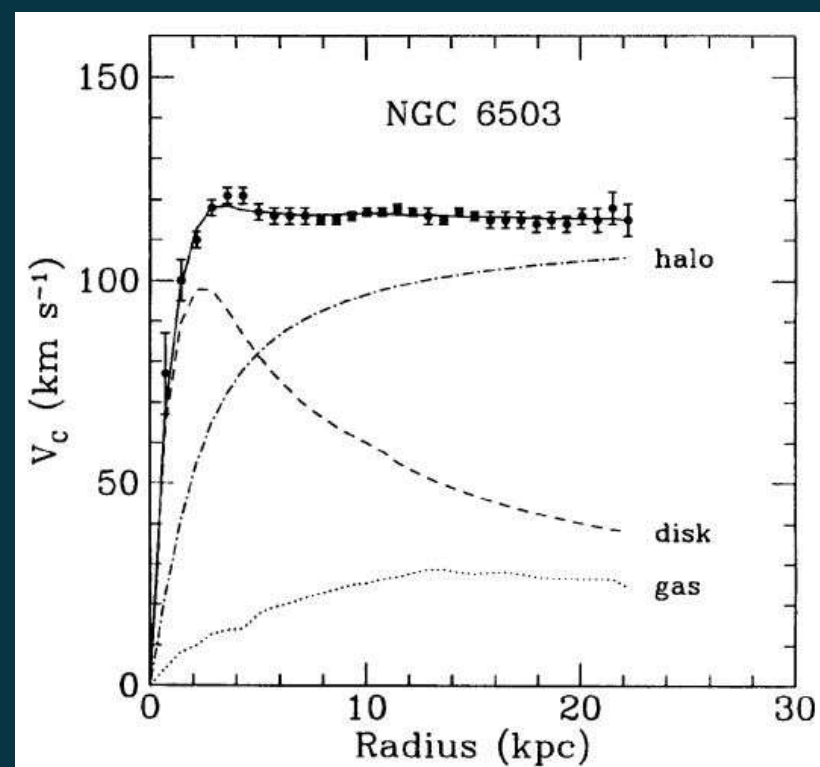


宇宙のダークマター



credit: Planck Satellite

ダークマターの割合

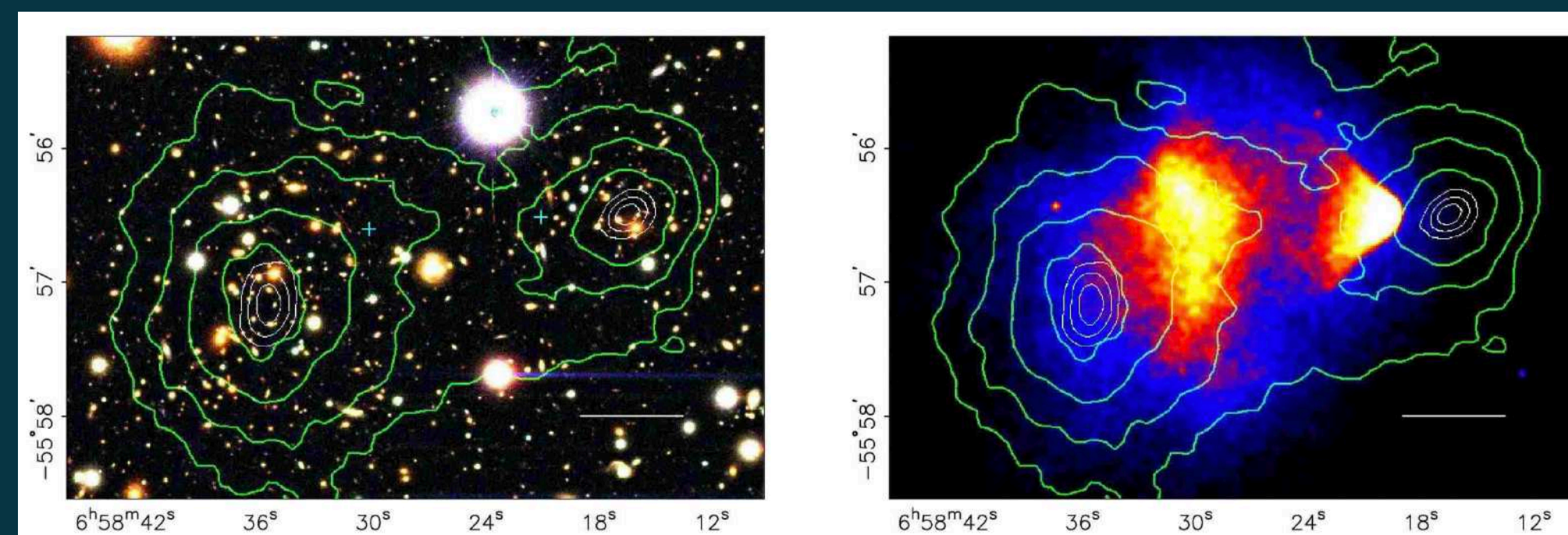


arXiv:0812.4005

銀河の回転曲線

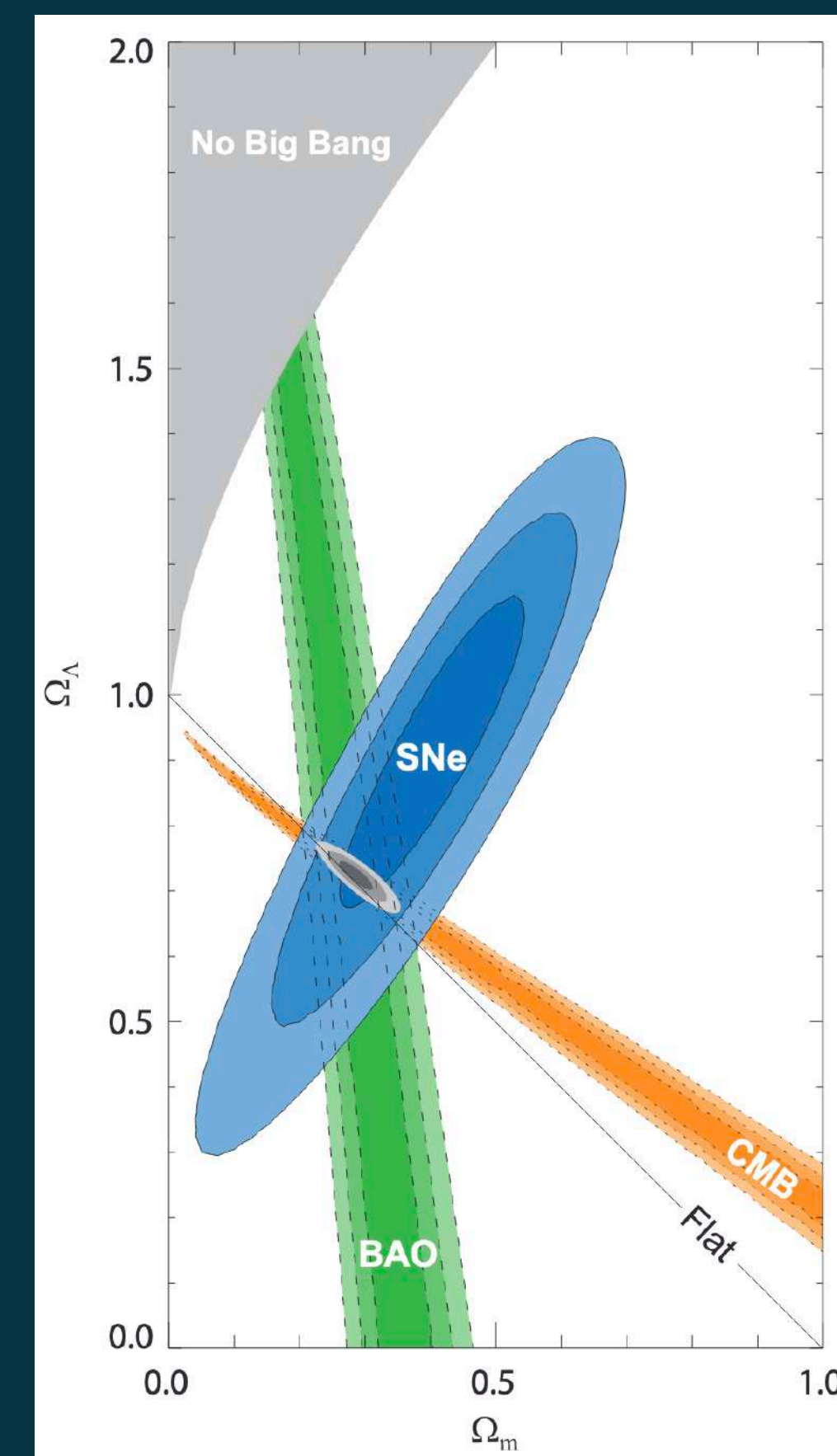
credit: spacetelescope.org; http://ffden-2.phys.uaf.edu/104_2012_web_projects/Dallas_Dominguez/Dark%20Matter.html

重力レンズ効果



astro-ph/0608407

弾丸銀河団での銀河団同士の衝突



arXiv:0804.4142

ダークマターの割合への様々な制限

ダークマターの条件

- 天体的な候補

- ◆ 原始ブラックホール
- ◆ ...

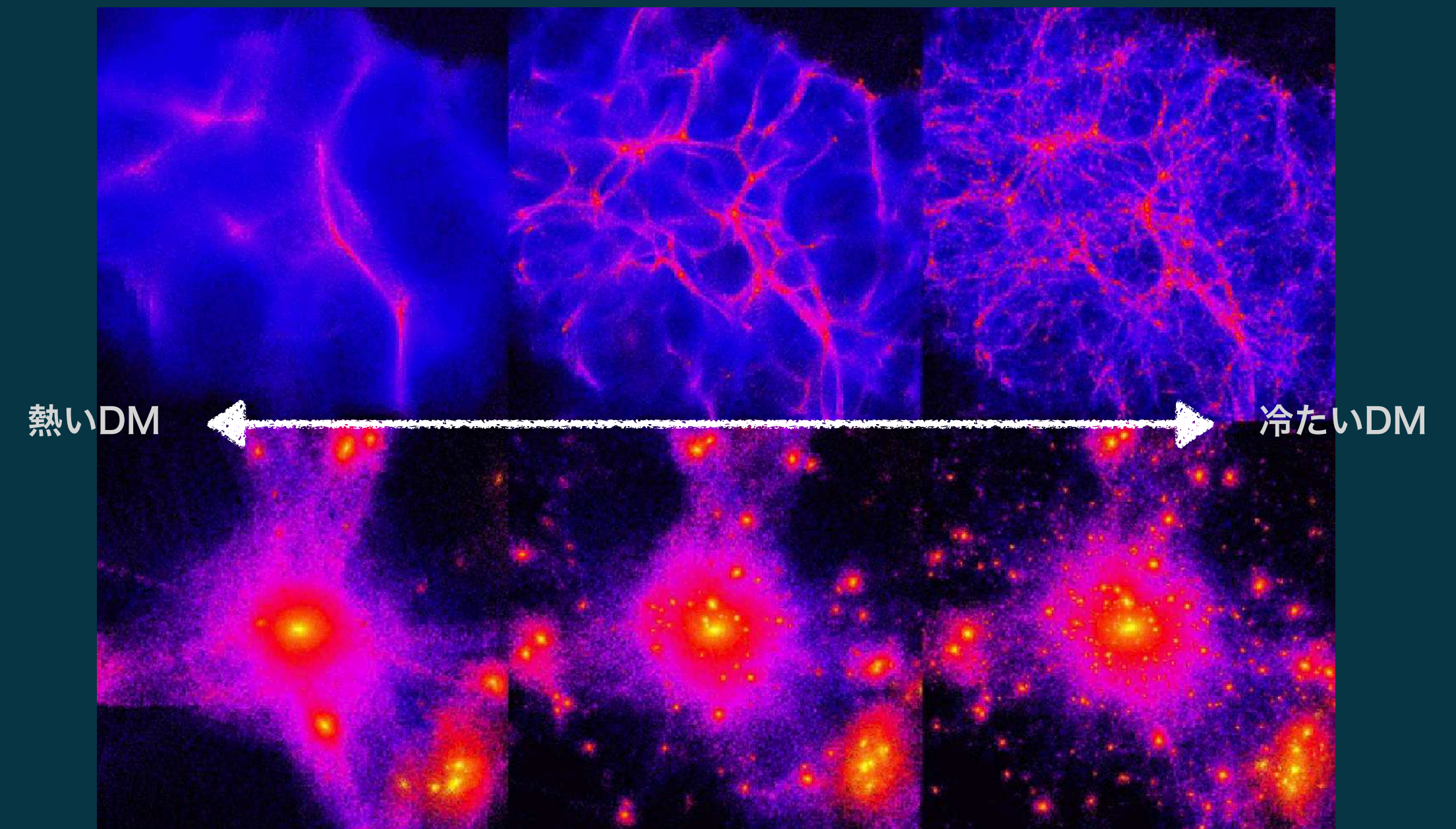
- 素粒子的な候補

- ◆ 弱い相互作用をする重い粒子 (WIMPs)
- ◆ アクシオン・アクシオンの粒子
- ◆ ...

- ✓ 電氣的に中性
- ✓ 安定 (宇宙年齢より寿命が長い)
- ✓ 宇宙のエネルギーの27%を占める
- ✓ 質量が大きい (冷たいダークマター)

標準模型には存在しない

→ 標準模型を超えた物理に含まれる新粒子



WIMPsの熱的生成

- ダークマターの残存量

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = \frac{n_{\text{DM}} m_{\text{DM}}}{\rho_{\text{cr}}} h^2 = 0.11933 \pm 0.00091$$

N. Aghanim et al. (Planck collaboration), arXiv:1807.06209

- どのように宇宙に生まれた？

- 粒子数の推移： Boltzmann方程式

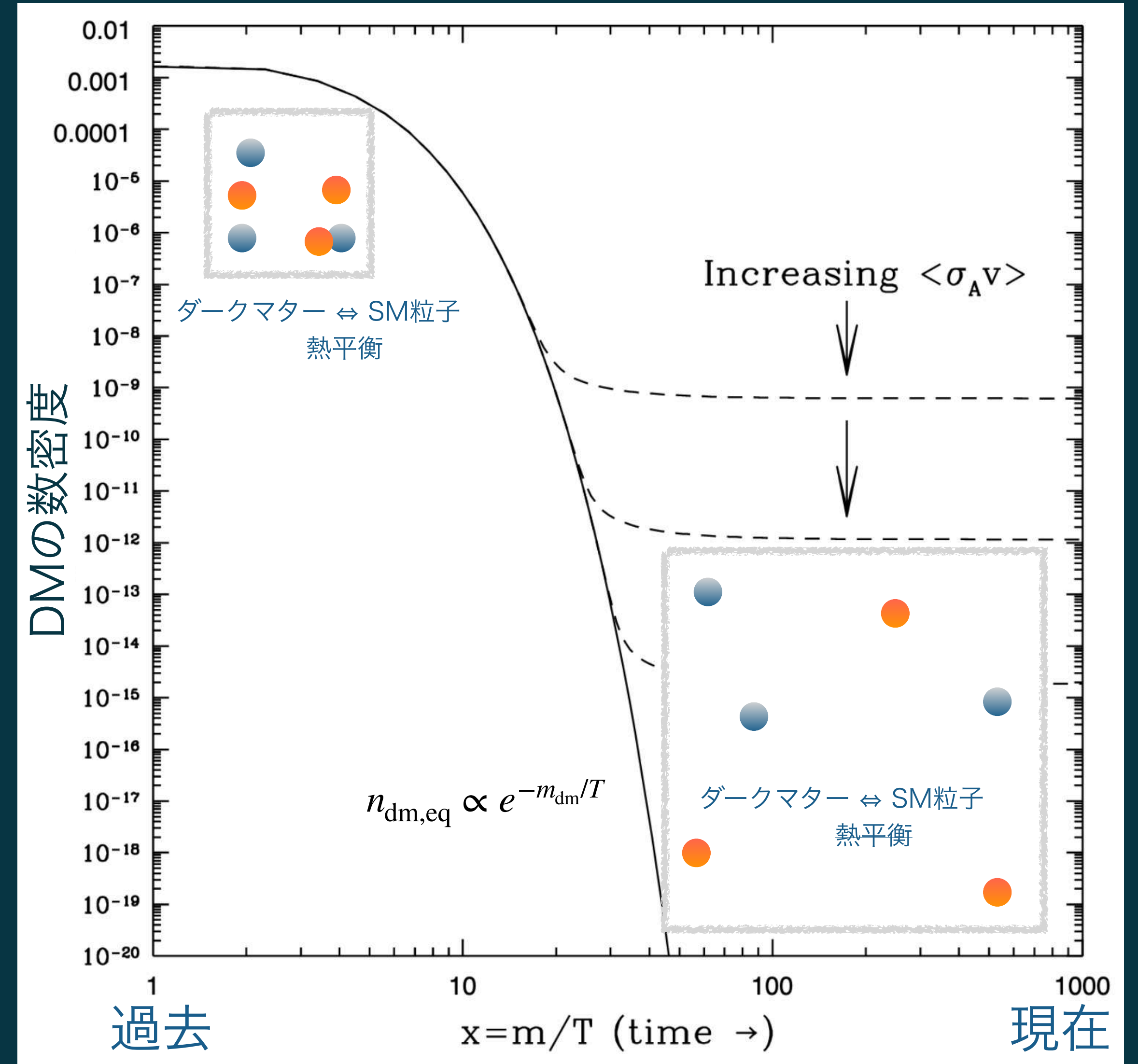
$$\frac{dn_{\text{dm}}}{dt} + 3Hn_{\chi} = - \langle \sigma_{\text{ann.}} v \rangle (n_{\text{dm}}^2 - n_{\text{dm,eq}}^2)$$

宇宙の
膨張率

相互作用の
大きさ

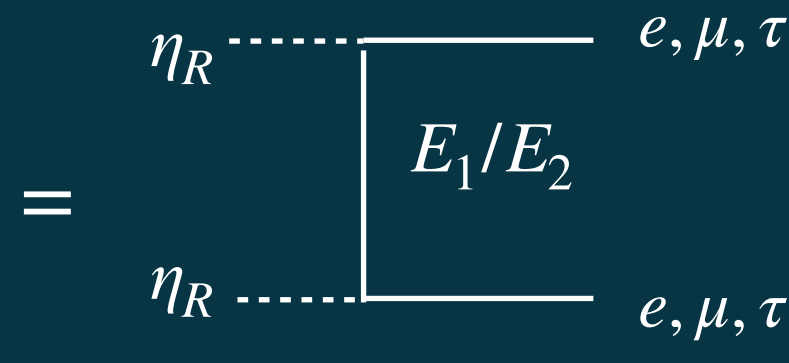
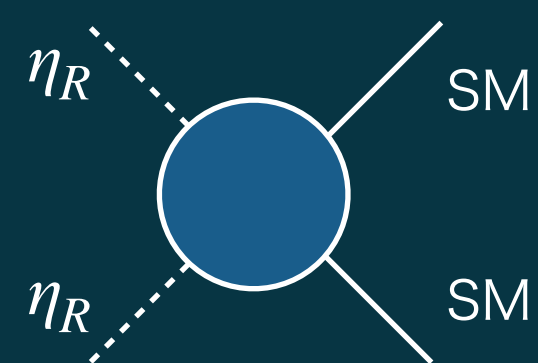
$$\Omega_{\text{dm}} h^2 \simeq 0.1 \left(\frac{m_{\text{dm}}/T}{20} \right) \left(\frac{10^{-26} \text{cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma_{\text{ann.}} v \rangle} \right)$$

ダークマター対消滅過程の散乱断面積



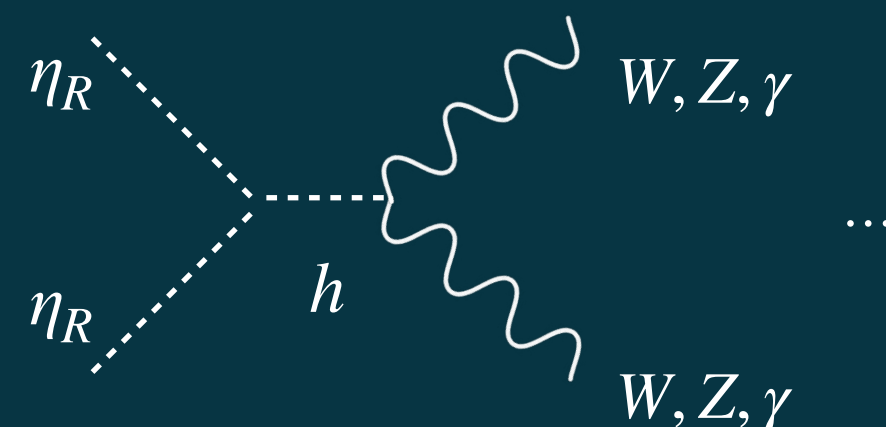
ダークマターへの制限

● ダークマターの対消滅過程

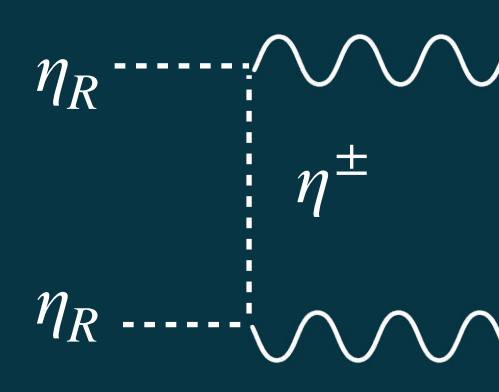


Yukawa関係の相互作用

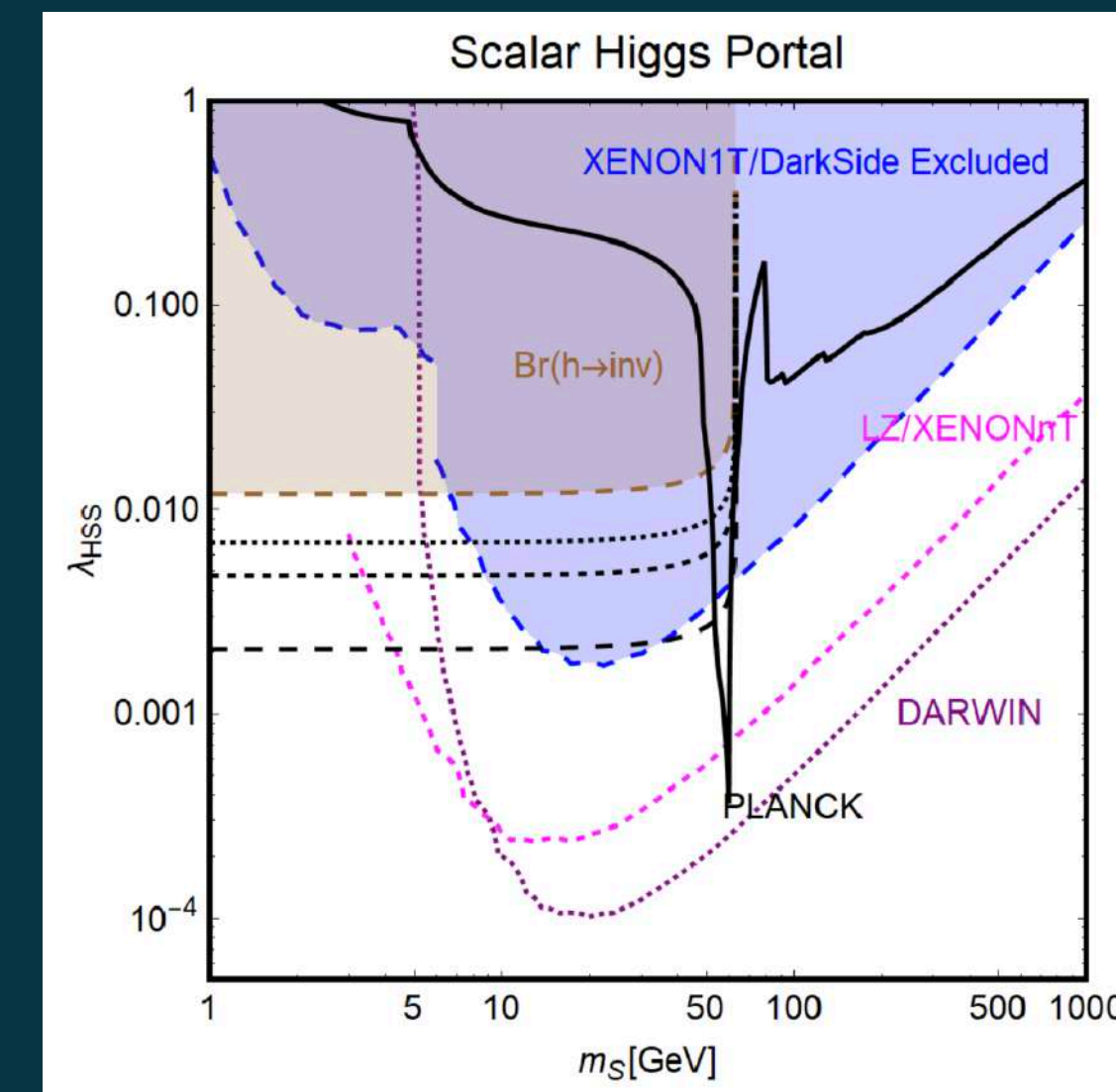
$m_R \simeq m_h/2$ の場合を除き、基本的にゲージ相互作用より小さい。



ヒッグス関係の相互作用



それ以外 (ゲージ相互作用)



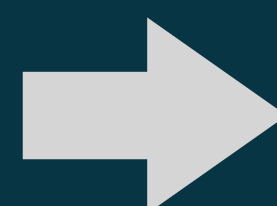
G.Arcadi et al., arXiv:1903.03616

$$\begin{aligned}
 (\sigma v_{\text{rel}})_Y &\simeq \frac{|y_{L'_\mu}|^4}{392\pi} \left[s_c^4 \frac{m_R^2}{(m_R^2 + M_1^2)^2} + c_c^4 \frac{m_R^2}{(m_R^2 + M_2^2)^2} + \frac{m_R^2}{(m_R^2 + M_{L'}^2)^2} \right] v_{\text{rel}}^2 \\
 &+ \frac{|y_{S_\mu}|^4}{392\pi} \left[c_c^4 \frac{m_R^2}{(m_R^2 + M_1^2)^2} + s_c^4 \frac{m_R^2}{(m_R^2 + M_2^2)^2} \right] v_{\text{rel}}^2.
 \end{aligned}$$

T. Hambye et al., arXiv:0903.4010

pure gauge limit
 $m_R = 534 \pm 8.5 \text{ GeV}$

ダークマターの熱的残存量

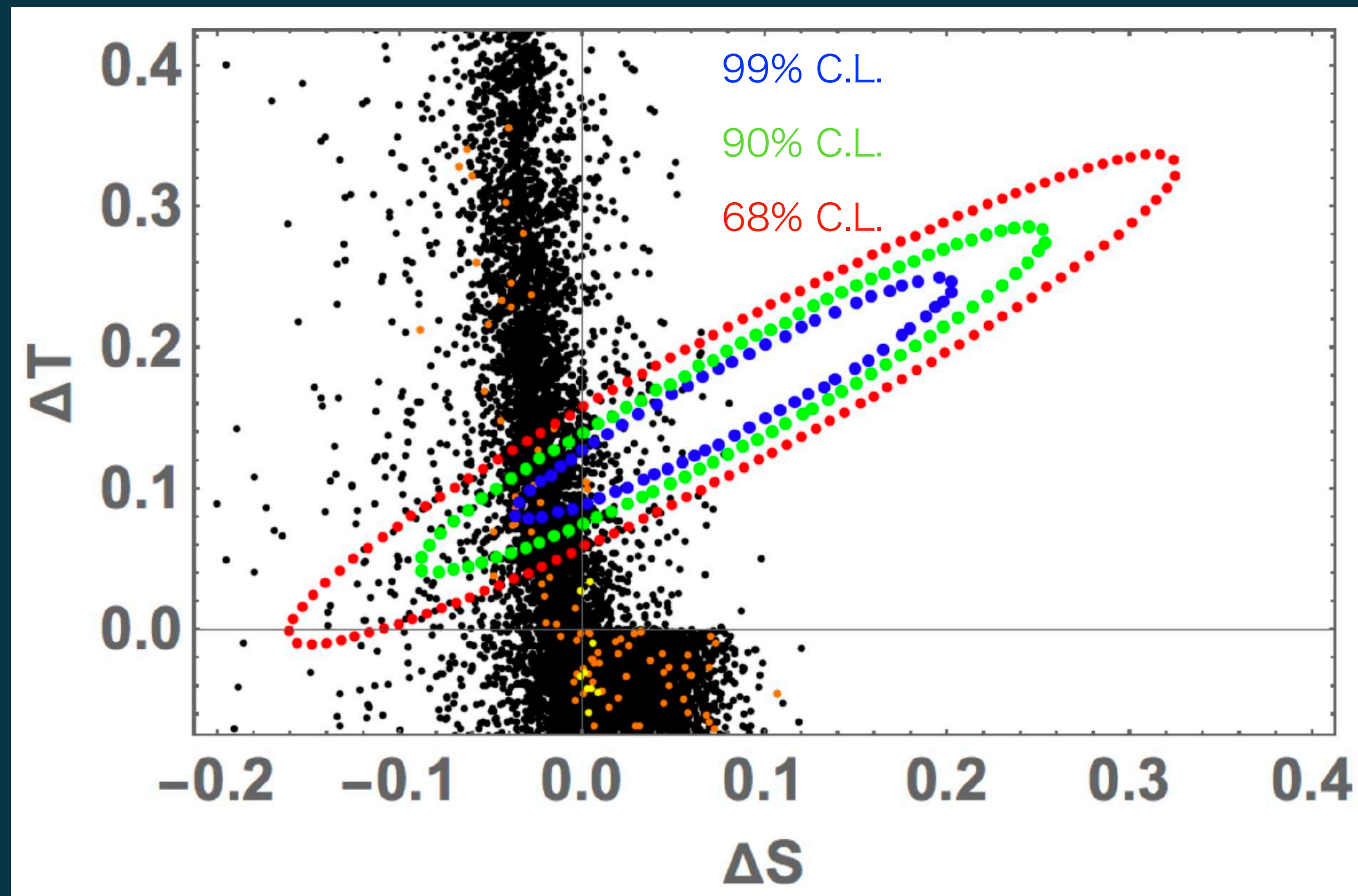


$m_R \simeq 63$ または 534 GeV

目次

1. イントロダクション
2. 模型の紹介
3. 模型の議論
 - A. Obliqueパラメータ
 - B. ミューオン異常磁気能率
 - C. ダークマター
4. 数値計算
5. まとめ

obliqueパラメーター + ミューオン異常磁気能率 + DM



● muon $g-2$ (3σ)

● muon $g-2$ + DM ($m_R = 62.5 - 63$ GeV)

● muon $g-2$ + DM ($m_R = 525.5 - 542.5$ GeV)

$$[y_{L'_\mu}, y_{S_\mu}] \in [0.1, 1], [y_{L'_{\mu,\tau}}, y_{S_{e,\tau}}] \leq 0.001$$

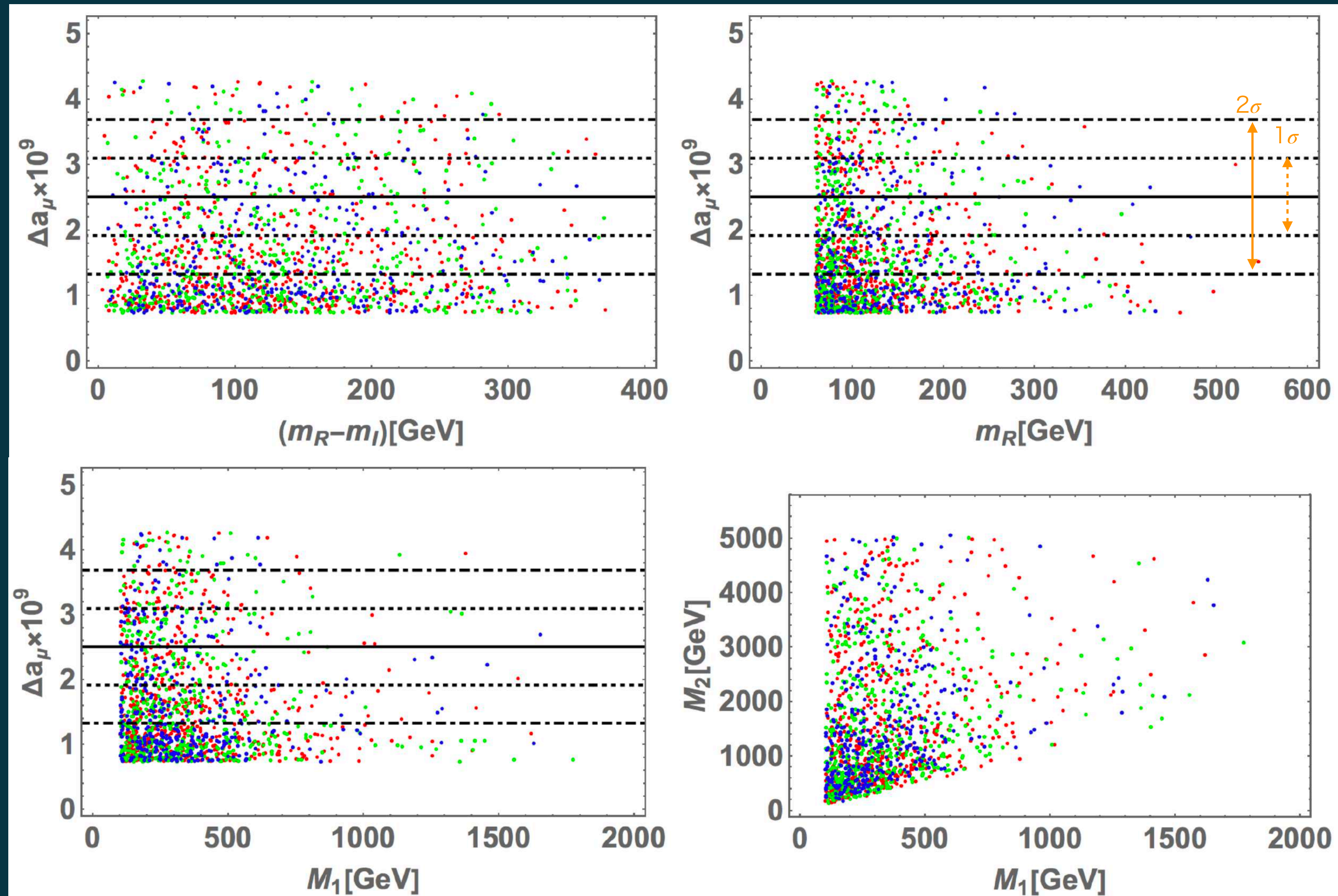
$$m_R \in [60, 550] \text{ [GeV]}, \{M_{E,L'}\} \in [m_R, 5000] \text{ [GeV]}$$

$$m_E \in [10, \sqrt{4\pi v}] \text{ [GeV]}, m_I \in [m_R, \sqrt{m_R^2 + \sqrt{4\pi v^2}}] \text{ [GeV]}$$



obliqueパラメーターとミューオン異常磁気能率からは、軽いDMが好まれる

ミューオン異常磁気能率 + obliqueパラメーター



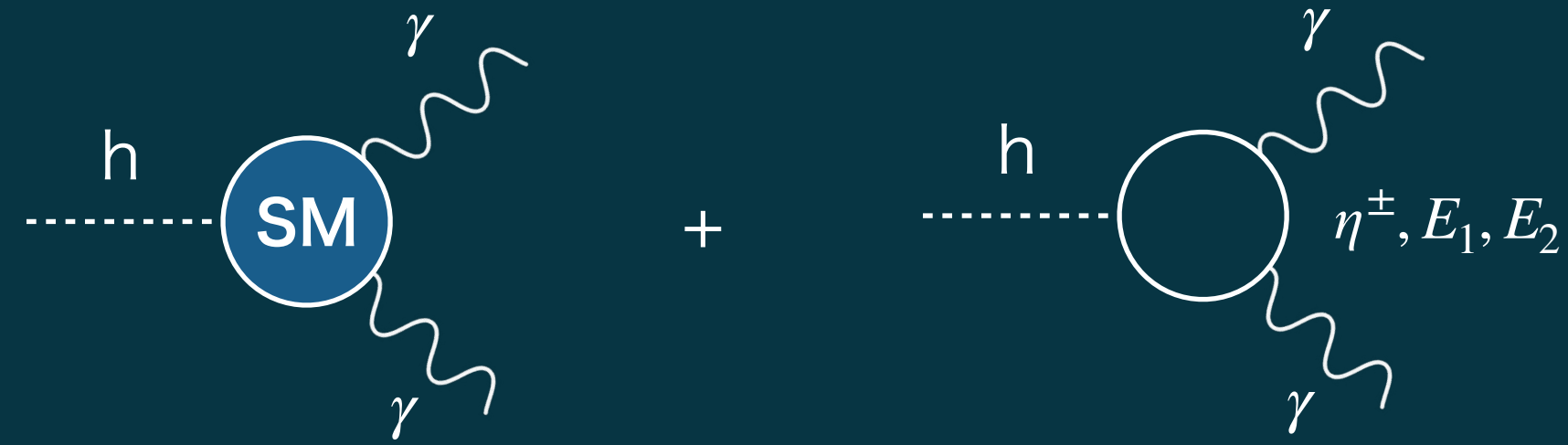
oblique parameters

99% C.L.

90% C.L.

68% C.L.

加速器実験からの制限



- Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊幅 G.Aad et.al (ATLAS Group), arXiv:1908.08215

$$\mu_{\gamma\gamma} = \frac{\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma)_{\text{SM}}} = 1.00 \pm 0.06$$

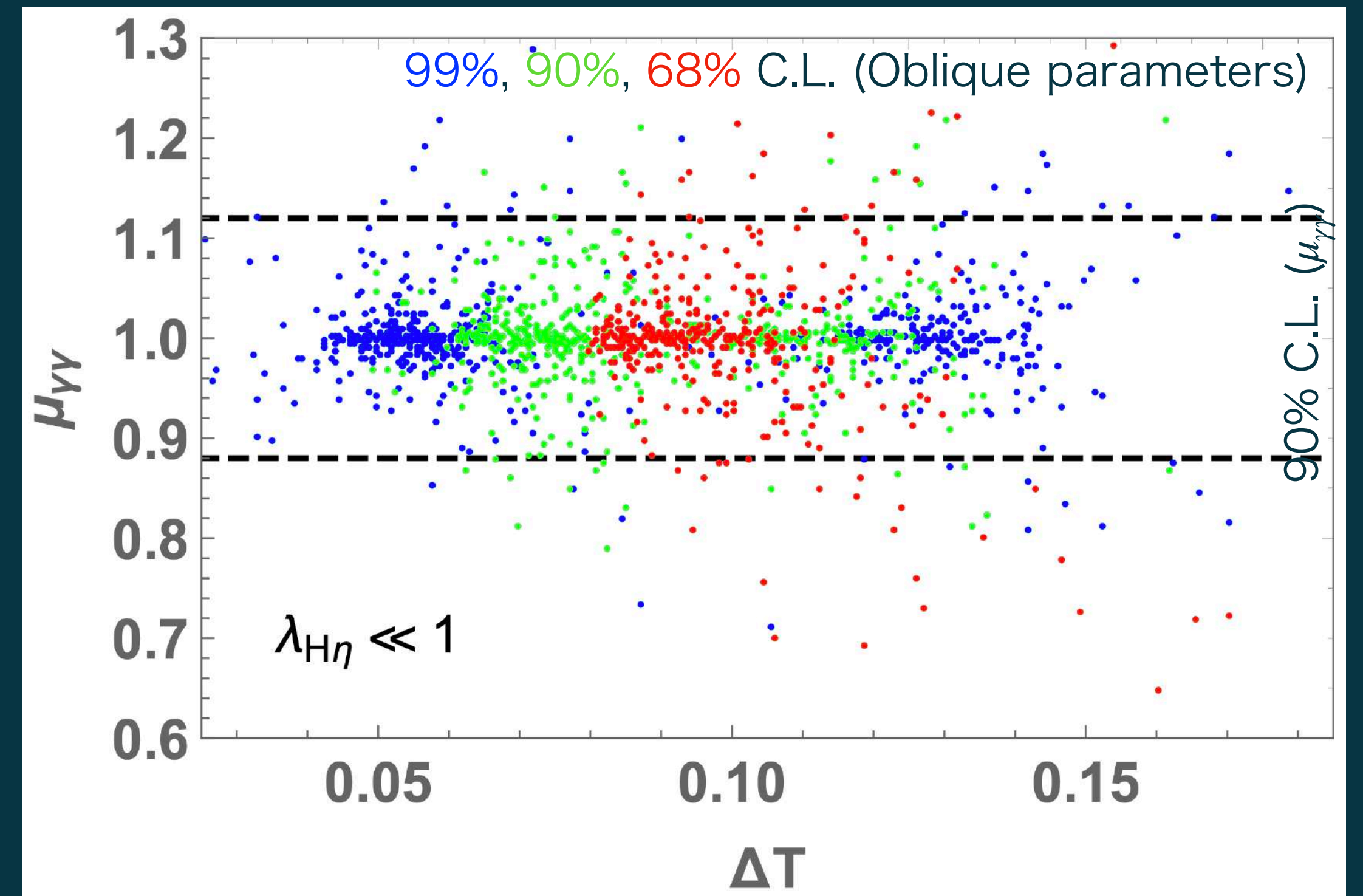
- 新粒子の寄与

$$\mathcal{L} \supset \frac{y_E}{\sqrt{2}} h (\bar{E}'_L E_R + \bar{E}'_R E_L) + \lambda_{H\eta} v h \eta^+ \eta^-$$

$$\mu_{\gamma\gamma} \simeq \left| 1 + \frac{C_E \left(\frac{A_{1/2}(\tau_1)}{M_1} - \frac{A_{1/2}(\tau_2)}{M_2} \right) + \frac{\lambda_{H\eta} v^2}{2m_{\eta^\pm}^2} A_0(x_{\eta^\pm})}{A_1(\tau_W) + \frac{4}{3} A_{1/2}(\tau_t)} \right|^2$$

$$C_E = \frac{s_c^2 c_c^2 (M_E - M_{L'})}{c_c^2 - s_c^2}, \quad A_{1/2}(x) = -2[x + (1-x)f(x)], \quad A_1(x) = 2 + 3x + 3(2x - x^2)f(x)$$

$$f(x) = [\sin^{-1}(1/\sqrt{x})]^2 \quad (x > 1), \quad \tau_X = 4m_X^2/m_h^2$$



まとめ

- Wボソンの質量 → 新物理のヒント？
- **SM + ベクターライクなレプトン・イナートスカラーの模型を考えた**
- obliqueパラメーター・ミューオンの異常磁気能率・ダークマター について矛盾しないパラメータセットがあることを見つけた

Backup

ベンチマークポイント

$[m_R, m_I, m_{\eta^\pm}]/\text{GeV}$	[62.9, 237, 288]
$[M_E, M_{L'}, m_E]/\text{GeV}$	[1101, 124.4, 137.7]
$[M_1, M_2]/\text{GeV}$	[105.4, 1120]
$[y_{L'_\mu}, y_{S_\mu}]$	[0.0194, -0.307]
Δm_{atm}^2	$2.52 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
$(\sigma v_{\text{rel}})_Y \text{ GeV}^2$	1.29×10^{-14}
Δa_μ	9.73×10^{-10}
ΔT	0.100
ΔS	0.00248
$\mu_{\gamma\gamma}$	0.93

satisfying DM constraints
muon $g - 2$ at 3σ interval
oblique parameters at 68% CL.