

概要

これまでに QCD-like SU(3), QED-like U(1) ゲージ相互作用を持つダークセクターによって構成される複合非対称暗黒物質(ADM)模型が提案されている[2]。この模型では、ダークマター以外の余剰なダークセクター粒子を標準模型(SM) 粒子に崩壊、対消滅させるためにU(1) ゲージボソンとしてダークフォトンを導入しているが、その質量は現象論的に矛盾しない値が仮定されていた。ここでは、U(1) ゲージ相互作用をカイラルにすることでSU(3) の閉じ込めスケールで与えられる質量を持つダークフォトンを含む複合ADM模型を紹介する。

非対称暗黒物質(ADM)について

宇宙にはバリオン非対称性が存在する

$$\eta \equiv (n_b - n_{\bar{b}})/n_\gamma \sim 10^{-10}$$

これはバリオジェネシスがなければ10桁落ちる。それにも関わらず、DMとバリオンのエネルギー密度の比は $\mathcal{O}(1)$

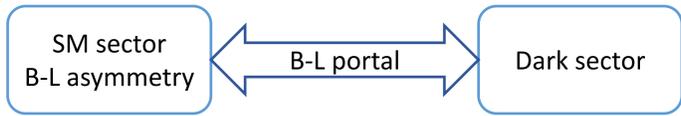
$$\Omega_{\text{DM}}/\Omega_B \approx 5 \sim \mathcal{O}(1)$$

DM残存量もバリオン同様にバリオジェネシスで説明されるなら、上の比も自然に説明される？

→→→→→→→→ → **非対称暗黒物質(ADM)**

ADMでは、SM sector での B-L 非対称性が B-L portal interaction (低温で切れる)で Dark sector (DS)に伝わる

$$\mathcal{L}_{B-L \text{ portal}} = \mathcal{O}_{DS} \mathcal{O}_{SM}/M^n$$



ADM mass range は[3]

$$m_{\text{DM}} \approx 5 \text{ GeV} \times (30 A_{\text{SM}})/(97 A_{\text{DM}}) \sim \mathcal{O}(1) \text{ GeV},$$

$$A_{\text{SM}} \equiv \sum_{i \in \text{SM}} q_{i,B-L}(n_i - \bar{n}_i), \quad A_{\text{DM}} \equiv \sum_{i \in \text{DM}} q_{i,B-L}(n_i - \bar{n}_i)$$

モデル([2]のreview)

SU(3)_D (like QCD), U(1)_D (like QED) ゲージ対称性を持つ dark quark が導入されている

	SU(3) _D	U(1) _D	U(1) _{B-L}
U	3	2/3	1/3
D	3	-1/3	1/3
\bar{U}	$\bar{3}$	-2/3	-1/3
\bar{D}	$\bar{3}$	1/3	-1/3

SU(3)_D の閉じ込めで dark baryon、mesonが形成される

$$p' \propto UUD, \bar{p}' \propto \bar{U}\bar{U}\bar{D}, n' \propto UDD, \bar{n}' \propto \bar{U}\bar{D}\bar{D}$$

$$\pi'^0 \propto U\bar{U} - D\bar{D}, \pi'^+ \propto U\bar{D}, \pi'^- \propto D\bar{U}$$

p' と \bar{p}' 、 n' と \bar{n}' がそれぞれ Dirac mass term を組み、DM となる

複合ADMの利点

- QCD-like SU(3)_D は強結合なので、対消滅が十分起きる。これによりDM残存量を B-L 非対称性を用いて表すことができる
- SU(3)_Dの閉じ込めスケールを $\Lambda_D \sim 10 \times \Lambda_{\text{QCD}}$ とすることで上記の mass range を達成

dark photon は dark Higgs により質量を得る ($\mathcal{O}(10 \sim 100) \text{ MeV}$ を仮定)

kinetic mixing ($\epsilon = \mathcal{O}(10^{-8} - 10^{-11})$) を通して DS の entropy が SM に流れる

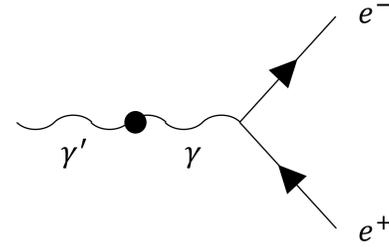
$$\mathcal{L}_{A'-A} = \frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\gamma'}^2 A'_\mu A'^\mu$$

各粒子の質量の大小関係は

$$2 \times m_e < m_{\gamma'} < m_{\pi'} < m_{\text{DM}}$$

なぜ dark photon か？

- 相互作用がシンプル
- kinetic mixing で entropy を簡単に DS から抜くことができる



今回のモデル

[2] の不満な点：

dark photon は dark Higgs により質量を得るけれども、質量が $\mathcal{O}(10 \sim 100) \text{ MeV}$ になる理由や、dark Higgs 自体については何も述べられていない

そこで U(1)_D ゲージ対称性をカイラルにした 3-flavor の dark quark を導入した ($0 < a < 1$)

	SU(3) _D	U(1) _D	U(1) _{B-L}	U(1) _{I'3}	U(1) _{Y'}
U	3	1	1/3	1	1
D	3	-1	1/3	-1	1
S	3	0	1/3	0	-2
\bar{U}	$\bar{3}$	-a	-1/3	-1	-1
\bar{D}	$\bar{3}$	a	-1/3	1	-1
\bar{S}	$\bar{3}$	0	-1/3	0	2

B-L portal interaction の \mathcal{O}_{DS} を作るため、3-flavor にした

$$\mathcal{L}_{B-L \text{ portal}} = (UDS)(LH)/M^3 + (\bar{U}^\dagger \bar{D}^\dagger S)(LH)/M^3 + \text{h.c.}$$

dark quark 凝縮により、カイラルな U(1)_D ゲージ対称性が自発的に破れる

$$\langle U\bar{U} + \text{h.c.} \rangle = \langle D\bar{D} + \text{h.c.} \rangle = \langle S\bar{S} + \text{h.c.} \rangle = \mathcal{O}(\Lambda_D^3)$$

dark photon が SU(3)_D の閉じ込めスケールで決まる質量を獲得する[4]。(π^0 に対応するものが would-be NG boson)

$$m_{A'} = e_D(1-a)f_D \sim e_D(1-a)\Lambda_D$$

SU(3)_D の閉じ込めにより生じる dark baryon (DM になる) は

$$B' = \begin{pmatrix} \Sigma'_3 + \Lambda'/\sqrt{3} & \sqrt{2} \Sigma'_1 & \sqrt{2} p' \\ \sqrt{2} \Sigma'_2 & -\Sigma'_3 + \Lambda'/\sqrt{3} & \sqrt{2} n' \\ \sqrt{2} \Sigma'_2 & \sqrt{2} \Sigma'_1 & -2\Lambda'/\sqrt{3} \end{pmatrix}, \quad \left(B_{\text{SM}} = \begin{pmatrix} \Sigma^0 + \Lambda/\sqrt{3} & \sqrt{2} \Sigma^+ & \sqrt{2} p \\ \sqrt{2} \Sigma^- & -\Sigma^0 + \Lambda/\sqrt{3} & \sqrt{2} n \\ \sqrt{2} \Sigma^- & \sqrt{2} \Sigma^0 & -2\Lambda/\sqrt{3} \end{pmatrix} \right)$$

各粒子の質量の大小関係は

$$2 \times m_e < m_{\gamma'} < m_{\text{meson}} < m_{\text{baryon}}$$

dark baryon は B-L portal を通じて全て decay するが、寿命は宇宙年齢より長く、DM になることができる

$$\tau_{\text{DM}} \gtrsim 10^{21} \text{ sec}$$

参考文献

- [1] M. Ibe, S. Kobayashi and KW, arXiv: 2105.xxxxx
- [2] M. Ibe, A. Kamada, S. Kobayashi and W. Nakano, JHEP 11 (2018) 203
- [3] H. Fukuda, S. Mathumoto and S. Mukhopadhyay, Phys. Rev. D 92 no.1 (2015), 013008
- [4] K. Harigaya and Y. Nomura, Phys. Rev. D 94 no.3 (2016), 035013