

2025/10/31

安東研セミナー



**B-L保存宇宙でコジエネシスにより生じる
ダークマターとゲージ不変な重力波について**

**東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士1年
安東研究室 亀田峻**

概要

Wan-Zhe Feng, Jinzheng Li, Pran Nath, and Zong-Huan Ye,
"Gauge-Invariant Gravitational Waves from Cogenesis in a B-L
Conserving Universe", arXiv:2510.13770 [hep-ph] (2025).

を元にセミナーを実施します。

以下このセミナーでは、

上記の論文を原論文と呼びます。



アジェンダ

1. B-Lが保存される宇宙の描像
2. コジエネシスの過程
3. 重力波の生成過程

1. **B-Lが保存される宇宙の描像**
2. コジエネシスの過程
3. 重力波の生成過程

原論文のAbstractより

An analysis of baryogenesis and stochastic gravitational wave production is presented for an extension of the standard model where the dark sector consists of dark matter particles charged under a $U(1)_X$ gauge symmetry, while a subset of dark fields also carry lepton number but no $U(1)_X$ charge.

この論文は、 $B-L$ 保存に対応するゲージ対称性 $U(1)_X$ を仮定して標準模型 (SM) を拡張することで、ダークマター (DM) 生成を理論的に予測し、重力波のシグナルの大きさに制限をつけている論文です。

ゲージ対称性

	U(1)対称性	U(1) \times 対称性
ゲージ場	電磁場	U(1) \times チャージを持たず レプトン数を持つ 暗黒場
ゲージボソン	光子	ダークフォトン (A_x)
チャージ	電荷	U(1) \times チャージ

本質的にはU(1)と同じであるが、原論文では分かりやすさのため、こう書いている

拡張して存在を仮定する粒子たち

←
実在
|
仮定
→

表には入れられないけど
ダークフォトンも仮定してるよ

	L	H	N	ψ	ϕ	X	X'	Φ_x	
									Ax
L No.	+1	0	0	+1	-1	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	
$B - L$	-1	0	0	-1	+1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	
$U(1)_x$	0	0	0	0	0	+1	-1	+1	

チャージのこと

マヨラナ粒子

ディラック場

複素スカラー
ダークマター

ダークマター候補 (2種・反粒子も有) $U(1)_x$ 対称性を持った
ヒッグス場

ダークフォトン

表は原論文より引用

1. B-Lが保存される宇宙の描像
2. コジエネシスの過程
3. 重力波の生成過程

コジェネシスの過程

そもそも、コジェネシス (Cogenesis) とは？



バリオンの非対称性と、ダークマターが
同時に生まれるとする理論のこと

コジネシスの過程

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{SM}} + \lambda_i \bar{N}_i \psi \phi + y_i^\psi \bar{\psi} L_i H + y_x \phi \bar{X}^c X' + h.c. + \frac{1}{2} \bar{N}_i (i\not{\partial} - M_i) N_i \\ & + \bar{\psi} i\not{\partial} \psi - m_\psi \bar{\psi} \psi + |\partial_\mu \phi|^2 - m_\phi^2 \phi^* \phi + \bar{X} (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X + \bar{X}' (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X' \\ & - \frac{1}{4} F_{x\mu\nu} F_x^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{x\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \Phi_x|^2 - V_{\text{eff}}(\Phi_x),\end{aligned}$$

① マヨナラ粒子 (N) が崩壊して、 ψ と ϕ になる
 $N \rightarrow \psi + \phi$

コジネシスの過程

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{SM}} + \lambda_i \bar{N}_i \psi \phi + y_i^\psi \bar{\psi} L_i H + y_x \phi \bar{X}^c X' + h.c. + \frac{1}{2} \bar{N}_i (i\not{\partial} - M_i) N_i \\ & + \bar{\psi} i\not{\partial} \psi - m_\psi \bar{\psi} \psi + |\partial_\mu \phi|^2 - m_\phi^2 \phi^* \phi + \bar{X} (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X + \bar{X}' (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X' \\ & - \frac{1}{4} F_{x\mu\nu} F_x^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{x\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \Phi_x|^2 - V_{\text{eff}}(\Phi_x),\end{aligned}$$

② ディラック場 ψ はレプトンとヒッグスになる
これは現状で観測可能な「可視のもの」

$$\psi \rightarrow L + H$$

ψ は最終的に全てこの反応でレプトンとヒッグスに変換されるので、 ψ 自体は宇宙には残っていない

コジジェネシスの過程

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{SM}} + \lambda_i \bar{N}_i \psi \phi + y_i^\psi \bar{\psi} L_i H + y_x \phi \bar{X}^c X' + h.c. + \frac{1}{2} \bar{N}_i (i\not{\partial} - M_i) N_i \\ & + \bar{\psi} i\not{\partial} \psi - m_\psi \bar{\psi} \psi + |\partial_\mu \phi|^2 - m_\phi^2 \phi^* \phi + \bar{X} (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X + \bar{X}' (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X' \\ & - \frac{1}{4} F_{x\mu\nu} F_x^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{x\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \Phi_x|^2 - V_{\text{eff}}(\Phi_x),\end{aligned}$$

② ディラック場 ψ はレプトンとヒッグスになる
これは現状で観測可能な「可視のもの」

$$\psi \rightarrow L + H$$

この過程により
バリオンの非対称性が生まれた

この後さらに、スファレロン過程により、L数が一部B数に変換される
(ただし、B-Lは保存)
トップクォークが熱浴から脱離する温度でスファレロン過程は終了し、その後はB数とL数は別々に保存

コジネシスの過程

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{SM}} + \lambda_i \bar{N}_i \psi \phi + y_i^\psi \bar{\psi} L_i H + y_x \phi \bar{X}^c X' + h.c. + \frac{1}{2} \bar{N}_i (i\not{\partial} - M_i) N_i \\ & + \bar{\psi} i\not{\partial} \psi - m_\psi \bar{\psi} \psi + |\partial_\mu \phi|^2 - m_\phi^2 \phi^* \phi + \bar{X} (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X + \bar{X}' (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X' \\ & - \frac{1}{4} F_{x\mu\nu} F_x^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{x\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \Phi_x|^2 - V_{\text{eff}}(\Phi_x),\end{aligned}$$

③ スカラーダークマターがDMに変換される
これは現状で観測不能な「暗黒のもの」

$\phi \rightarrow X$ や X'

この過程により
ダークマターが生まれた

最終的に全て崩壊してDMになる

コジェネシスの過程

つまり、

① $N \rightarrow \psi + \phi$

② $\psi \rightarrow L + H$ (バリオン非対称性の生まれ)

③ $\phi \rightarrow X$ や X' (DMの生まれ)

ここを同時に説明するのが **Cogenesis**

コジエネシスの過程

ちなみに、L数に関する非対称性を説明する式がこれ

$$\epsilon_L = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow \psi\phi) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{\psi}\phi^*)}{\Gamma(N_1 \rightarrow \psi\phi) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{\psi}\phi^*)} \simeq -\frac{1}{8\pi} \frac{\text{Im}(\lambda_1^2 \lambda_2^{*2})}{|\lambda_1|^2} \frac{M_1}{M_2},$$

Lの非対称性に寄与するのは、ラグランジアンを表式で係数が複素数の部分のみ
→ λ しか寄与しない。

(ファインマン・ダイアグラムは参考文献の"Baryogenesis from dark matter" を参照)

コジネシスの過程

ちなみに、L数に関する非対称性を説明する式がこれ

$$\epsilon_L = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow \psi\phi) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{\psi}\phi^*)}{\Gamma(N_1 \rightarrow \psi\phi) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{\psi}\phi^*)} \simeq -\frac{1}{8\pi} \frac{\text{Im}(\lambda_1^2 \lambda_2^{*2})}{|\lambda_1|^2} \frac{M_1}{M_2},$$

さらに、実測値からバリオンとレプトンの数密度 (comoving number densities) は以下のような関係になっているはずで、これと他の実験結果を一致させるようにDMの質量などのパラメータが決まっていくはず (?)

$$Y_B = \frac{30}{97} Y_{B-L} = \frac{30}{97} Y_L,$$

コジネシスの過程

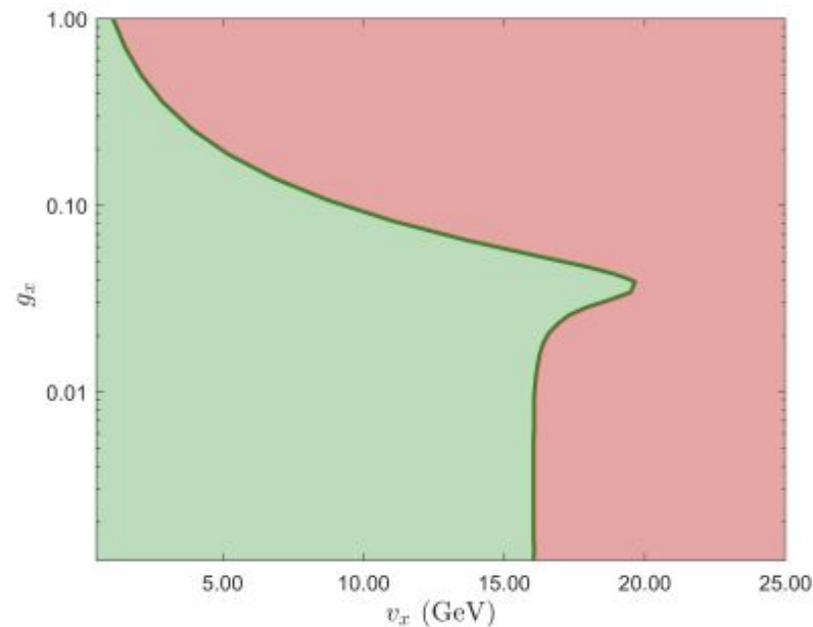
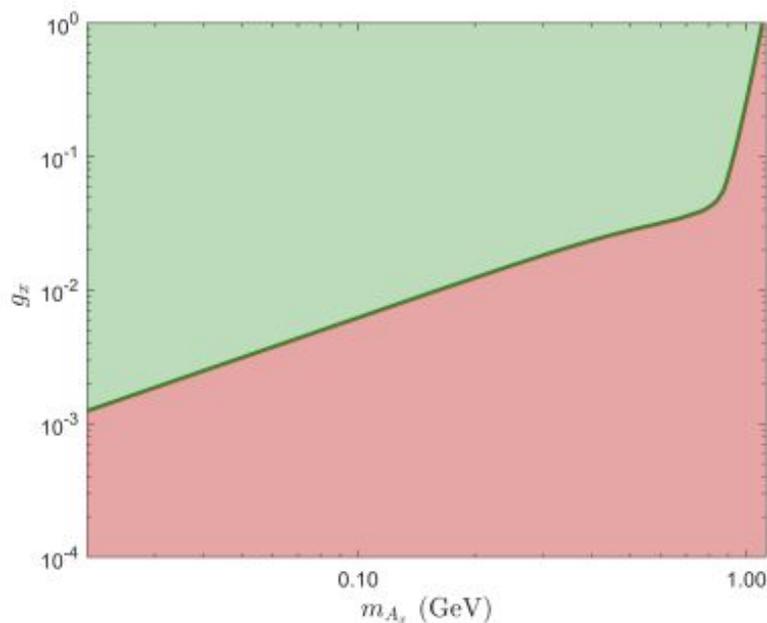
で、なんやかんや計算して「DMの質量は0.85GeVくらいじゃね？」
って言われてる。（陽子の質量は0.938GeV）

ただし、上記の計算はDMの反対称な部分だけが残ると仮定している
（らしく）そのためには、対称な成分がなくなる反応（annihilation
processes）が起きないといけない。

$$\bar{X}X \rightarrow A_x A_x, \quad \bar{X}'X' \rightarrow A_x A_x,$$

コジネシスの過程

annihilation processesが起きるためのパラメタに関する制約がつく

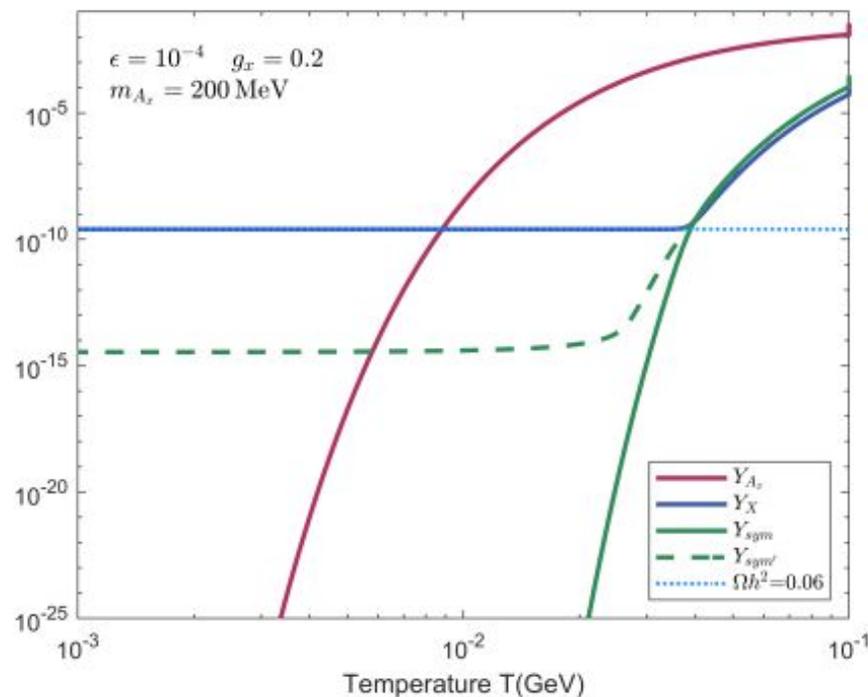
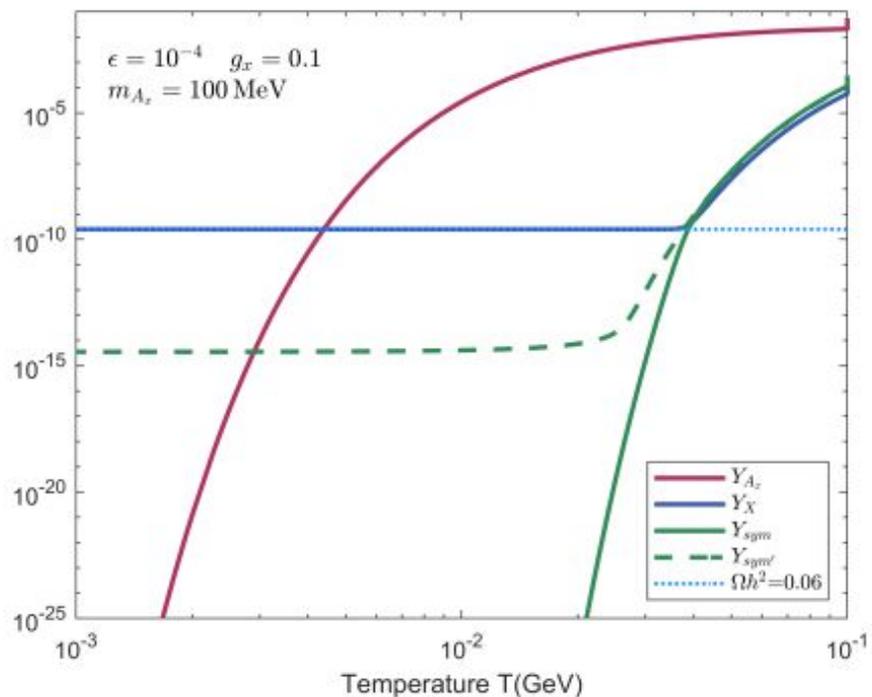


緑の領域ならOK!

図は原論文より引用

コジェネシスの過程

で、実際にパラメタをいくつか指定してボルツマン分布によりシミュレートしてみると、確かに観測値に落ち着くような挙動が見られる



十分低温領域で
青線 (DMの量) が
青点線 (DMの実測) に
落ち着いている

緑線 (対称的なDMの
量?) は青線 (DM量)
より十分に小さい
= annihilation processes
が起きている

図は原論文より引用

アジェンダ

1. B-Lが保存される宇宙の描像
2. コジエネシスの過程
3. **重力波の生成過程**

重力波の生成過程

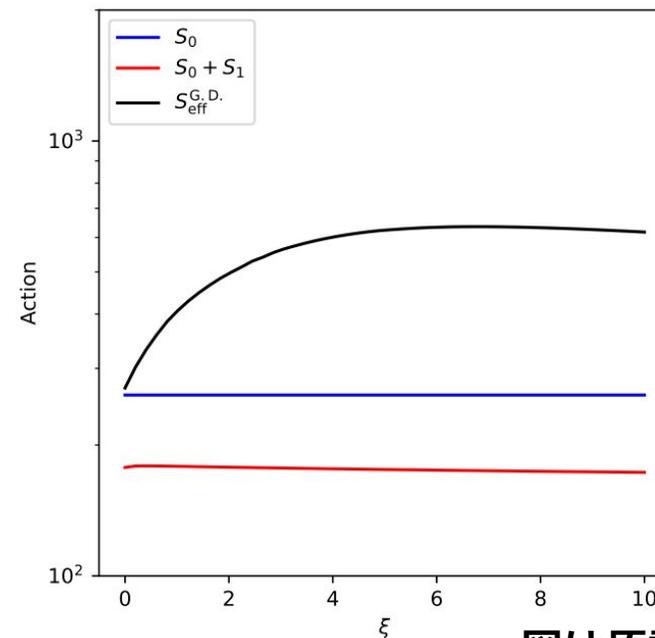
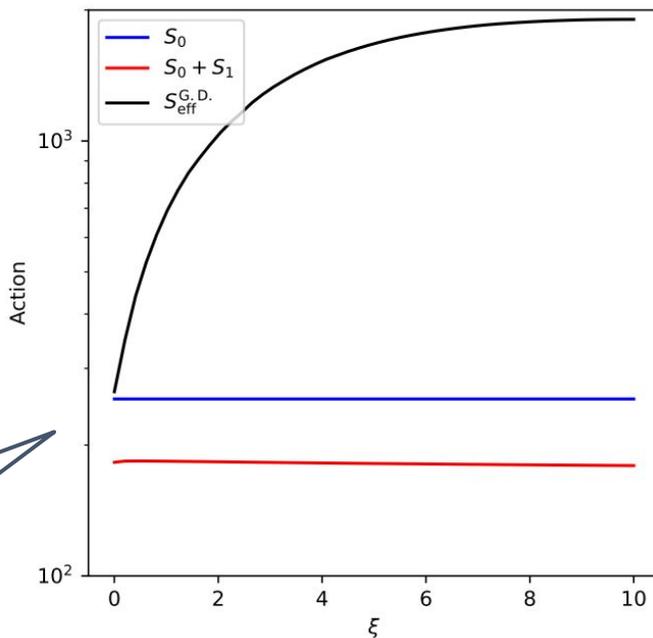
このラグランジアンから、一次相転移 (FOPT) によって生成される確率論的重力波 (stochastic gravitational waves) が予言できる (らしい)

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{SM}} + \lambda_i \bar{N}_i \psi \phi + y_i^\psi \bar{\psi} L_i H + y_x \phi \bar{X}^c X' + h.c. + \frac{1}{2} \bar{N}_i (i\not{\partial} - M_i) N_i \\ & + \bar{\psi} i\not{\partial} \psi - m_\psi \bar{\psi} \psi + |\partial_\mu \phi|^2 - m_\phi^2 \phi^* \phi + \bar{X} (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X + \bar{X}' (i\not{D} - m_{\text{DM}}) X' \\ & - \frac{1}{4} F_{x\mu\nu} F_x^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{x\mu\nu} F^{\mu\nu} + |D_\mu \Phi_x|^2 - V_{\text{eff}}(\Phi_x),\end{aligned}$$

重力波の生成過程

【結論だけ】

重力波に関する作用で、ゲージ依存な作用の場合と非依存な作用な場合を考えてみる。→ゲージ依存の場合はパラメタにより大きく作用の大きさが異なる



青線と赤線は
ゲージ不変の場合。
実際、横ばいになる。

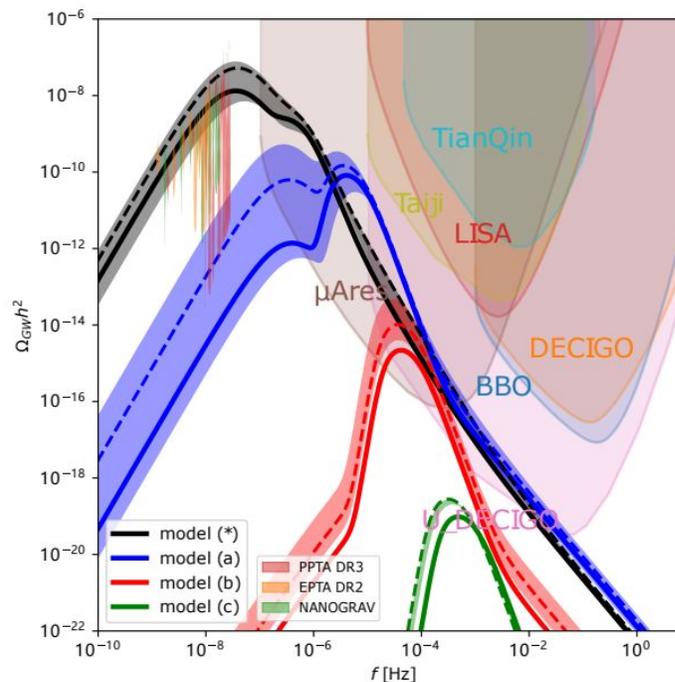
図は原論文より引用

重力波の生成過程

【結論だけ】

重力波に関する作用で、ゲージ依存な作用の場合と非依存な作用な場合を考えてみる→ゲージ依存の場合はパラメタにより大きく作用の大きさが異なる

点線：ゲージ依存 ($\xi=0$)
実線：ゲージ非依存
色塗り：ゲージ依存で ξ を変化

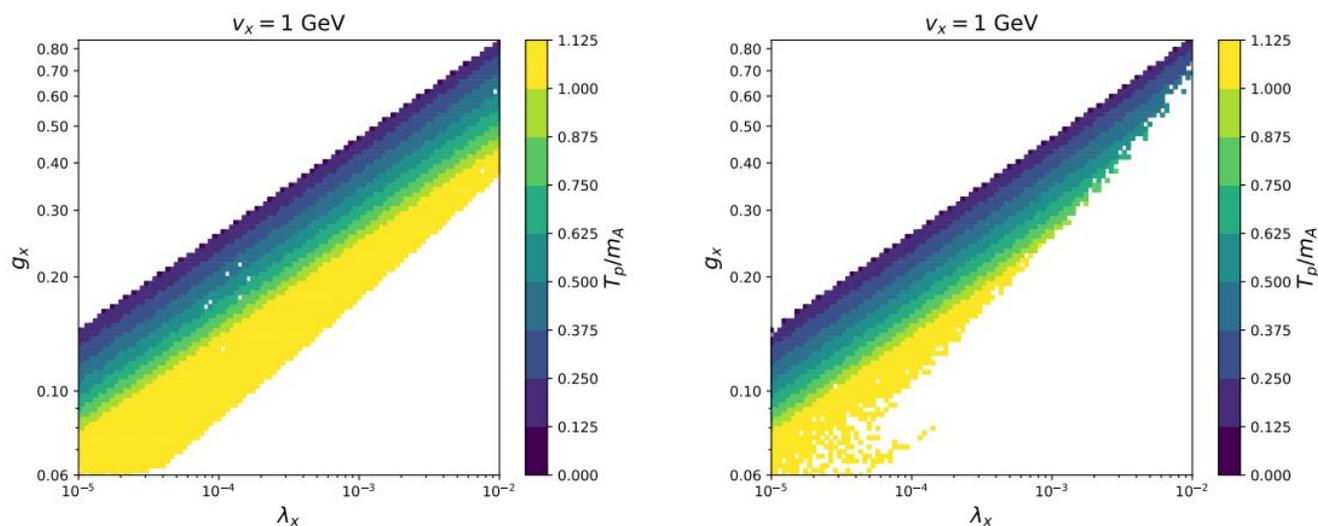


図は原論文より引用

重力波の生成過程

【結論だけ】

$U(1)_X$ の3つの結合定数 (g_X, λ_X, v_X) のうち、 $v_X=1\text{GeV}$ で固定し、残り2つのパラメタをパラメタスキャン。ゲージ不変な手法では、FOPT可能なパラメタ領域が狭くなり、より正確な重力波の波形予測が可能に。

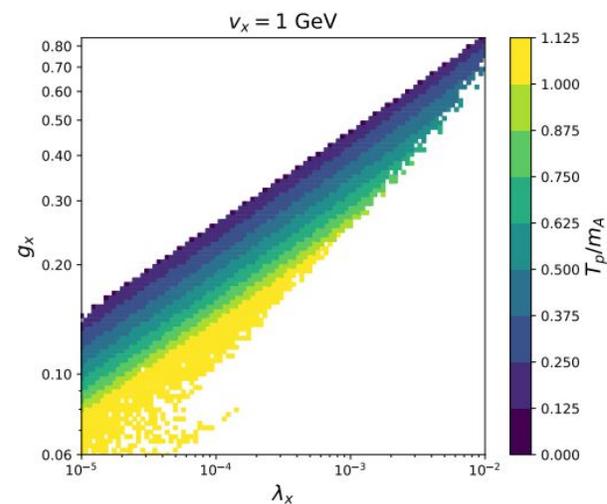
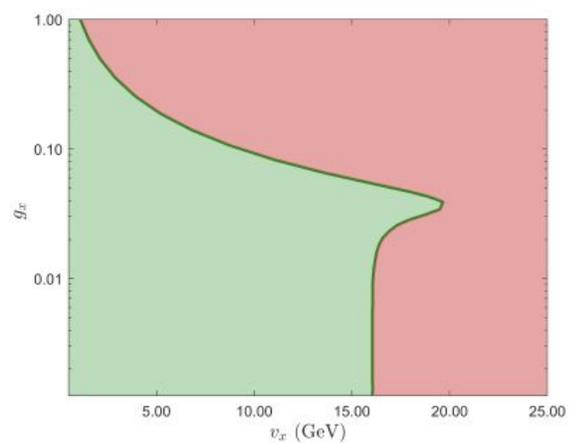
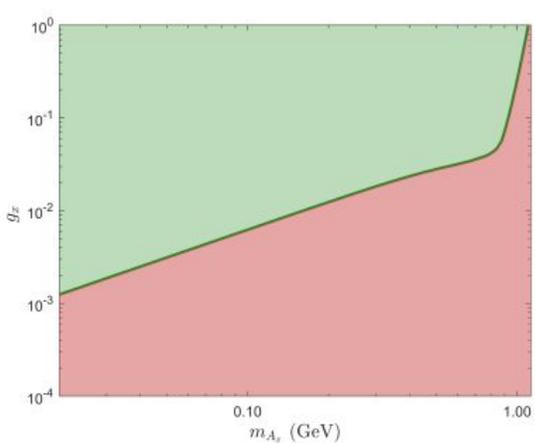


図は原論文より引用

重力波の生成過程

【結論だけ】

Q. コジネシスのパラメタ制約と、FOPTが可能なパラメタ領域は両立するか？



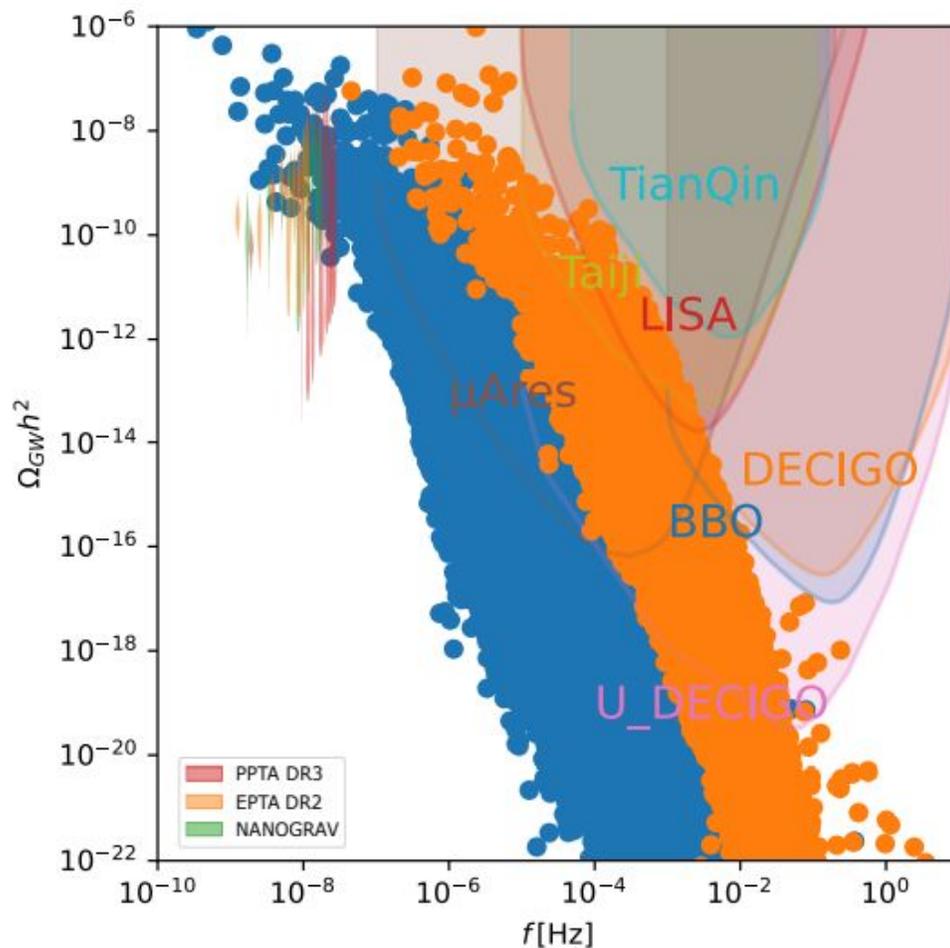
図は原論文より引用

重力波の生成過程

【結論だけ】

A. 一応ある。

重力波望遠鏡では厳しい
PTAならいけるかも？



青点は両立可能
オレンジ点は両立不可

図は原論文より引用

まとめ

- B-Lに対応する $U(1)_X$ ゲージ対称性を考えると、コジェネシス過程によって、バリオン非対称性とDMができる。
- そのゲージ対称性の元で、従来のFOPTによる重力波の予測をアップデートするとより正確で安定な予測が得られる。
- コジェネシスとFOPTのどちらも許容するようなパラメタは存在するが、現状のPTAによる観測領域に入る。

参考文献

- Wan-Zhe Feng, Anupam Mazumdar, and Pran Nath, "Baryogenesis from dark matter", arXiv:1302.0012 [hep-ph] (2013).
- Arnab Chaudhuri and Jaydeb Das, "Study of entropy production due to electroweak phase transition in Z_2 symmetric extension of the Standard Model", arXiv:2206.08699 [hep-ph] (2022).