

***Gravitational wave
from a cosmological phase
transition
for neutrino mass generation***

瀬戸 治
(北海道大)

With: 岡田宣親(アラバマ大)

Refs : arXiv 1807.00336

§ はじめに

微小ニュートリノ質量

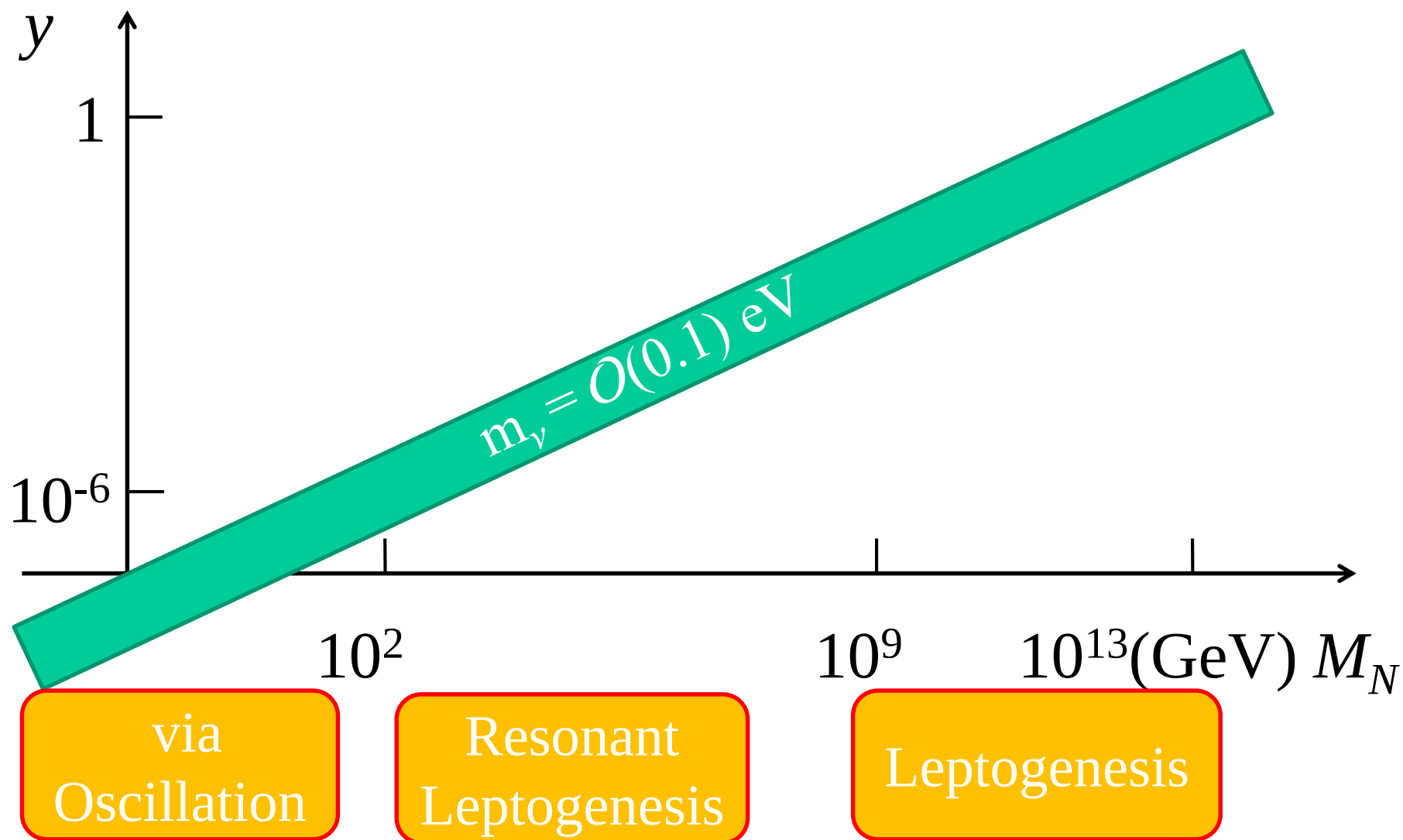
- ニュートリノ振動
→ 小さい ($< 0.1 \text{ eV}$) がゼロでない
- 標準模型ではゼロ質量
- シーソー機構 : Majorana の場合

[Yanagida, Gell-Mann et al (1979)]

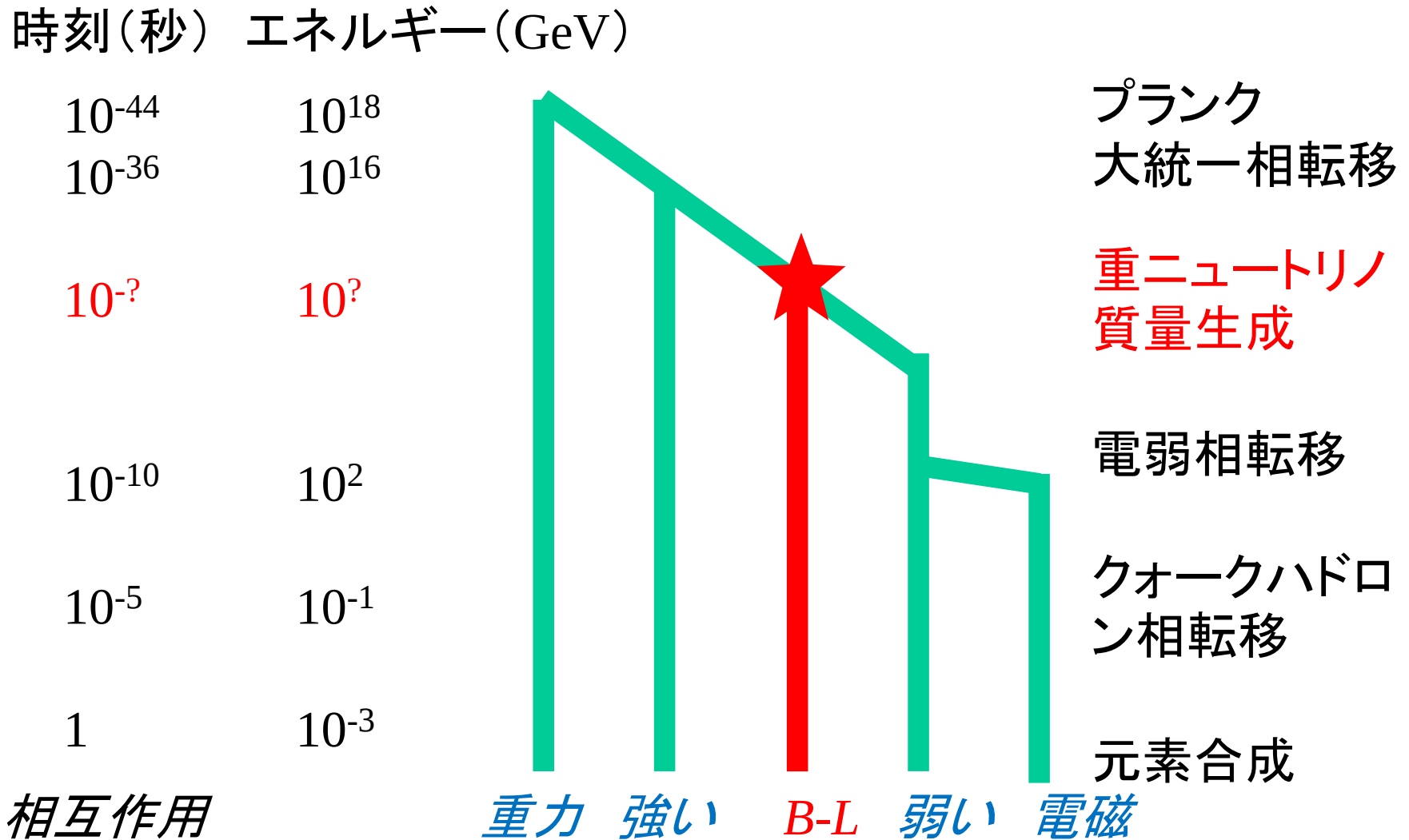
$$\begin{pmatrix} 0 & y\nu \\ y\nu & M_N \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -(y\nu)^2/M_N & 0 \\ 0 & M_N \end{pmatrix}$$

重い右巻きニュートリノ質量 N

M_N の値？

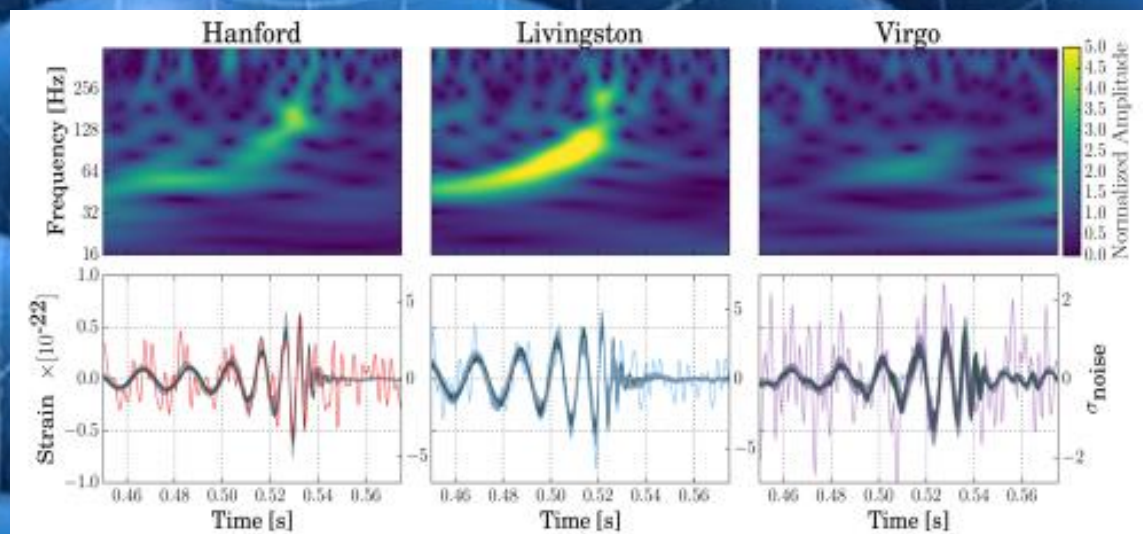


初期宇宙での相転移



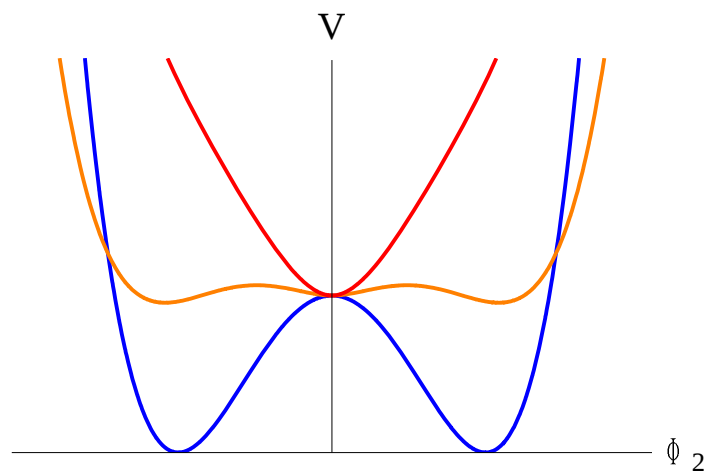
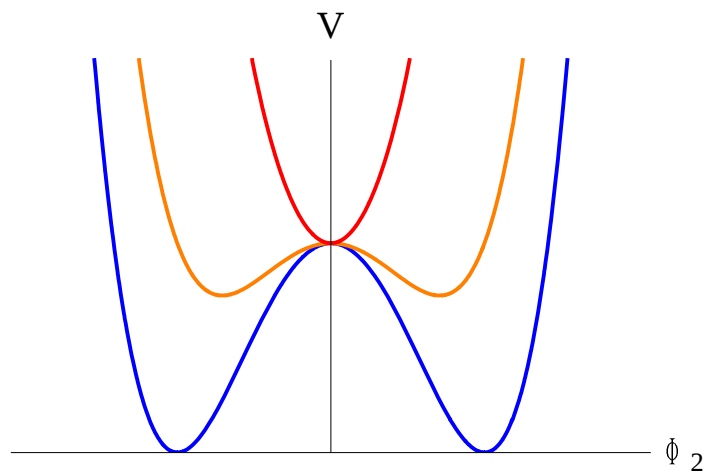
何故、宇宙論的重力波？

- 検出可能
- 透過力
- 生成可能
 - 宇宙論的
 - インフレーション
 - 位相欠陥
 - 強い一次相転移 → 非等方圧力 → 重力波
 - ...



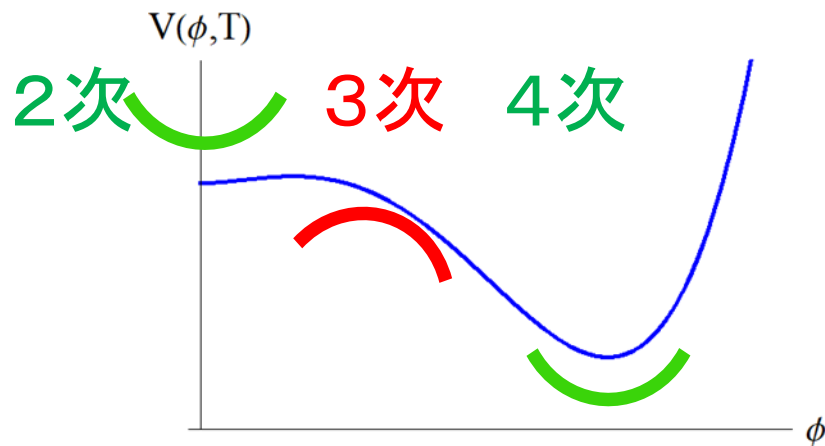
一次か？

- 有限温度ポテンシャル



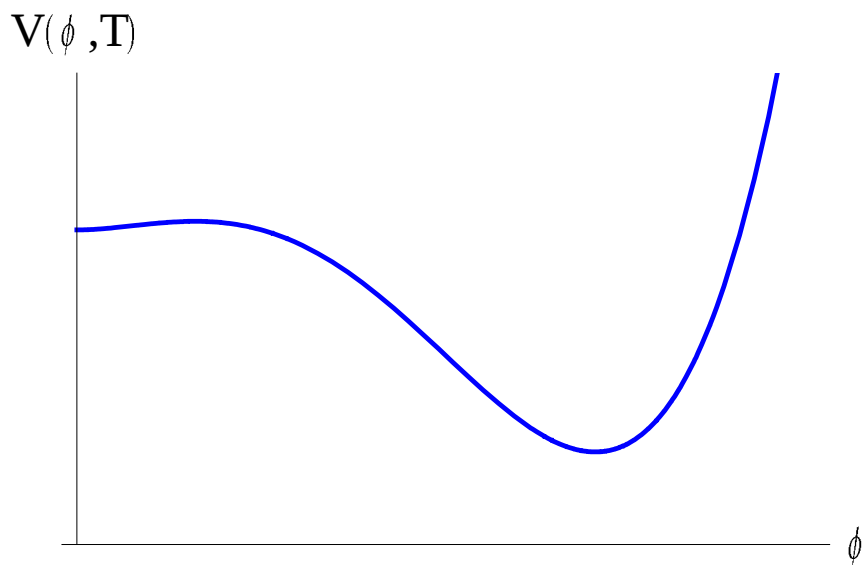
- 3次項

- 温度補正
- Tree level 相互作用

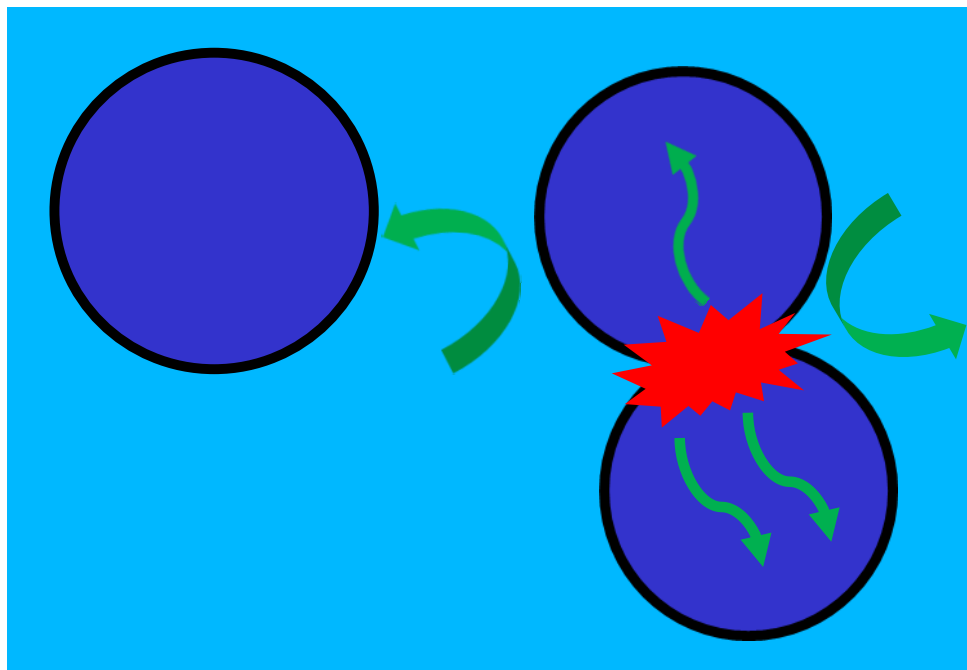


一次相転移からの重力波

- 有限温度ポテンシャルにおける障壁と一次性



- 泡形成



- 泡の衝突
- 音波
- 乱流

重力波スペクトル

- 輻射優勢宇宙において、
- 輻射のエネルギー密度
- 潜熱密度

$$\rho_{\text{rad}} = \frac{\pi^2 g_*}{30} T^4$$

$$\epsilon = \left(V - T \frac{\partial V}{\partial T} \right) \Big|_{\{\phi_{\text{high}}, T_\star\}} - \left(V - T \frac{\partial V}{\partial T} \right) \Big|_{\{\phi_{\text{low}}, T_\star\}}$$

$$\alpha \equiv \frac{\epsilon}{\rho_{\text{rad}}}$$

- 遷移速度
- 泡生成率 $\Gamma(T) = \Gamma_0 e^{-S(T)} \simeq \Gamma_0 e^{-S_E^3(T)/T}$

$$\frac{\beta}{H_\star} \simeq T \frac{dS}{dT} \Big|_{T_\star} = T \frac{d(S_E^3/T)}{dT} \Big|_{T_\star}$$

重力波スペクトル

- **泡の衝突** [Kosowsky and Turner (1993), Huber and Konstandin (2008)]

$$f_{\text{peak}} \simeq 17 \left(\frac{f_{\star}}{\beta} \right) \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right) \left(\frac{T_{\star}}{10^8 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{1/6} \text{ Hz},$$

$$h^2 \Omega_{GW}(f_{\text{peak}}) \simeq 1.7 \times 10^{-5} \kappa^2 \Delta \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right)^{-2} \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{-1/3},$$

- **音波** [Hindmarsh et al (2014, 2015), Caprini et al (2016)]

$$f_{\text{peak}} \simeq 19 \frac{1}{v_b} \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right) \left(\frac{T_{\star}}{10^8 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{1/6} \text{ Hz},$$

$$h^2 \Omega_{GW}(f_{\text{peak}}) \simeq 2.7 \times 10^{-6} \kappa_v^2 v_b \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right)^{-1} \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{-1/3}.$$

- **乱流** [Kamionkowski et al (1994), Caprini et al (2009)]

$$f_{\text{peak}} \simeq 27 \frac{1}{v_b} \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right) \left(\frac{T_{\star}}{10^8 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{1/6} \text{ Hz},$$

$$h^2 \Omega_{GW}(f_{\text{peak}}) \simeq 3.4 \times 10^{-4} v_b \left(\frac{\beta}{H_{\star}} \right)^{-1} \left(\frac{\kappa_{\text{turb}} \alpha}{1 + \alpha} \right)^{3/2} \left(\frac{g_{\star}}{100} \right)^{-1/3}.$$

§ $U(1)_{B-L}$ の破れ起源の重力波

$U(1)_{B-L}$ ゲージ対称性

- 最も単純な anomaly-free $U(1)$ gauge 理論
- 右巻きニュートリノの3世代構造
 - 右巻きニュートリノ質量起源

$$m_{N_R^i} = \frac{Y_{N^i}}{\sqrt{2}} v_2$$

- B-L 荷を持つヒッグス場 “+2” Φ_2
- $\mathcal{L} = y L \Phi N + \frac{1}{2} Y_N N \Phi_2 N$

- 余分な中性ゲージボソン

$$M_{Z'}^2 = 4g_{B-L}^2 v_2^2$$

模型: next to minimal

構成粒子

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	$U(1)_{B-L}$
q_L^i	3	2	1/6	1/3
u_R^i	3	1	2/3	1/3
d_R^i	3	1	-1/3	1/3
ℓ_L^i	1	2	-1/2	-1
e_R^i	1	1	-1	-1
H	1	2	-1/2	0
N_R^i	1	1	0	-1
Φ_1	1	1	0	+1
Φ_2	1	1	0	+2

湯川相互作用

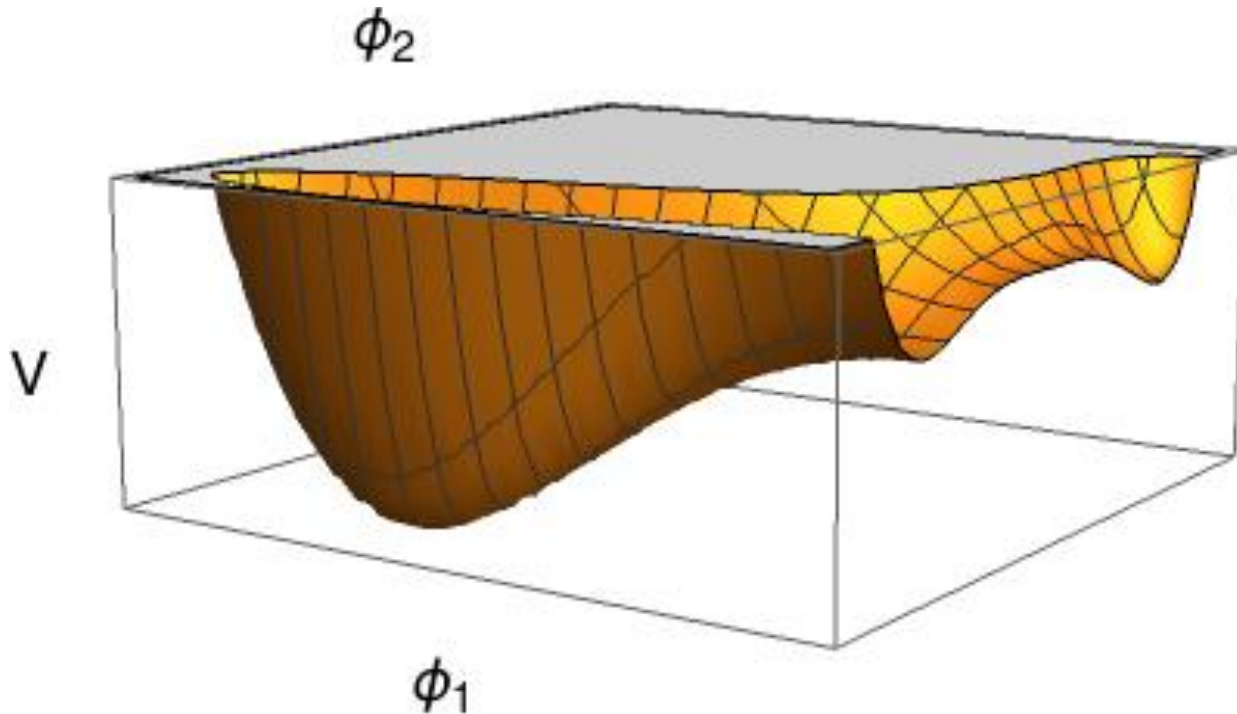
$$\mathcal{L}_{Yukawa} \supset - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 Y_D^{ij} \bar{\ell}_L^i H N_R^j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 Y_{N^k} \Phi_2 \overline{N_R^k}^C N_R^k + \text{H.c.}$$

ヒッグスポテンシャル

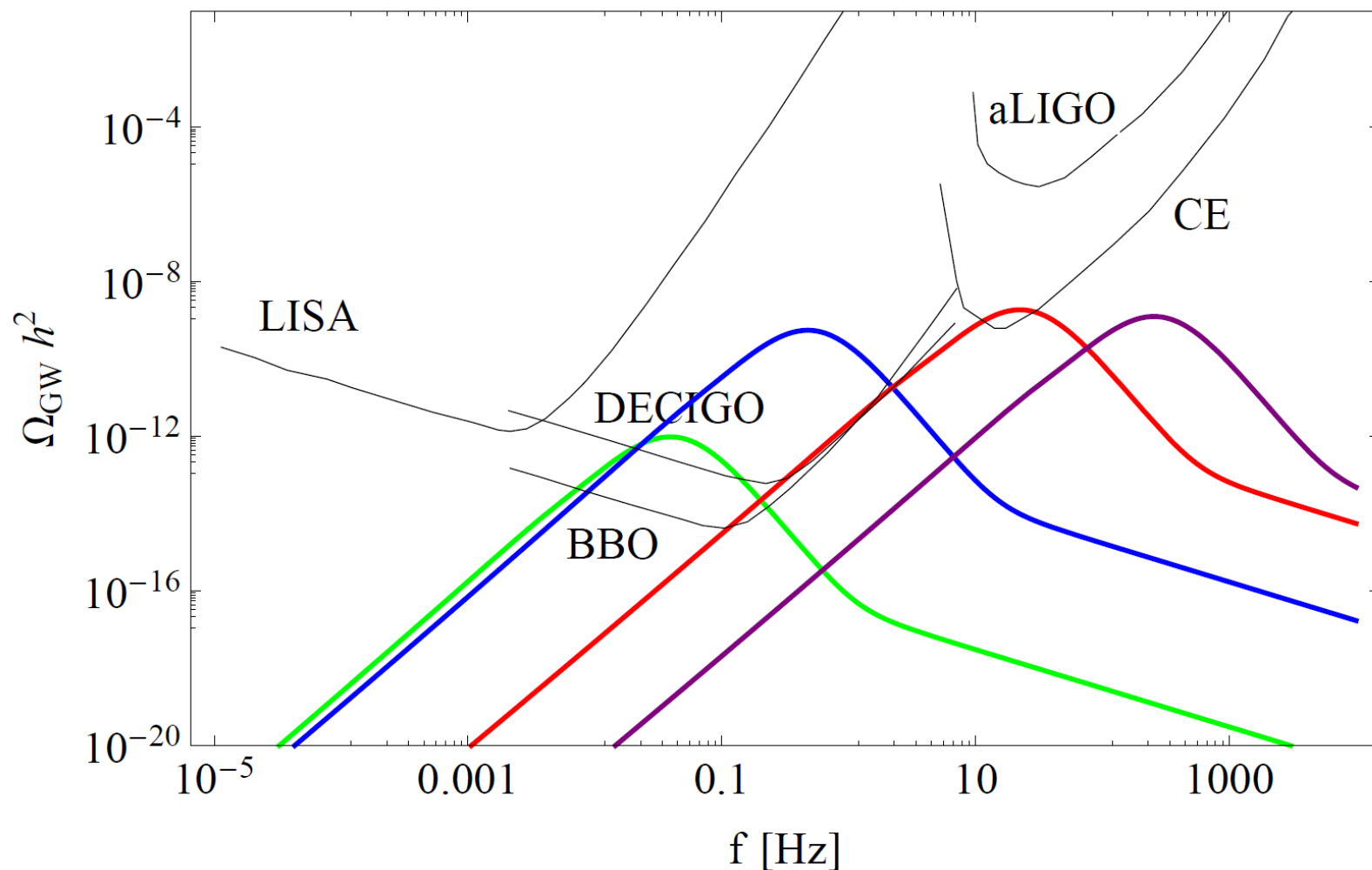
$$V(\Phi_1, \Phi_2) = \frac{1}{2} \lambda_1 (\Phi_1 \Phi_1^\dagger)^2 + \frac{1}{2} \lambda_2 (\Phi_2 \Phi_2^\dagger)^2 + \lambda_3 \Phi_1 \Phi_1^\dagger (\Phi_2 \Phi_2^\dagger) \\ + M_{\Phi_1}^2 \Phi_1 \Phi_1^\dagger - M_{\Phi_2}^2 \Phi_2 \Phi_2^\dagger - A(\Phi_1 \Phi_1 \Phi_2^\dagger + \Phi_1^\dagger \Phi_1^\dagger \Phi_2).$$

ヒッグスポテンシャル

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = \frac{1}{2}\lambda_1(\Phi_1\Phi_1^\dagger)^2 + \frac{1}{2}\lambda_2(\Phi_2\Phi_2^\dagger)^2 + \lambda_3\Phi_1\Phi_1^\dagger(\Phi_2\Phi_2^\dagger) \\ + M_{\Phi_1}^2\Phi_1\Phi_1^\dagger - M_{\Phi_2}^2\Phi_2\Phi_2^\dagger - A(\Phi_1\Phi_1\Phi_2^\dagger + \Phi_1^\dagger\Phi_1^\dagger\Phi_2).$$



重力波スペクトル



$$v (=v_1=v_2) = 4, 10^2, 10^4, 10^5 \text{ TeV}$$

§ まとめ

- B-L ゲージ対称性の破れは
 - 右巻きニュートリノに質量を与え、
 - 強い一次相転移で、
 - 検出可能なほど大振幅な重力波を生成した

かもしれない...

- この重力波の検出は
 - 加速器で探れない基礎物理
 - 物質反物質の起源
 - ニュートリノ質量の起源

の解明への貢献期待大

註) ゲージ依存問題 [e.g., Chiang and Senaha (2017)]