



電弱相転移起源の残存重力波の検証可能性

松井 俊憲

共同研究者: 柿崎 充, 兼村 晋哉
富山大学

(論文準備中)

内容

1. イントロダクション

- 研究動機
- 電弱バリオン数生成のシナリオ
- 相転移起源の残存重力波に関する先行研究

2. 模型

- 熱的に強い一次相転移を実現する模型

3. ヒッグス三点結合

4. 電弱相転移起源の残存重力波

5. 結論

1. イントロダクション

研究動機

- 重力波の直接検出実験が始まっている。
 - 地上実験...KAGRA[日], LIGO[米], VIRGO[伊],...
 - 中性子連星の衝突により発生する重力波を探索している。
 - 宇宙実験(将来計画)...eLISA[欧], DECIGO[日],...
 - 初期宇宙起源の重力波を探索する。
- 宇宙背景放射よりさらに初期の宇宙の情報
が得られる可能性がある →重力波天文学
加速器実験に加えて, BSMを探る新たな手法
として期待できる！

宇宙のバリオン非対称性

- 観測されたバリオン数 $\frac{n_B}{s} \simeq \mathcal{O}(10^{-10})$
- サハロフの三条件...バリオン数生成の必要条件
 1. バリオン数非保存過程, 2. CPの破れ, 3. 非平衡状態
- 標準理論で説明できない($m_h=125\text{GeV}$)
- バリオン数生成を説明するシナリオ
レプトジェネシス, アフレック・ダイン機構, 電弱バリオン数生成(EWBG),...
- **EWBGは, 拡張されたヒッグスセクターの物理で説明されるため加速器実験で検証できる.**

電弱バリオン数生成

1. バリオン数非保存過程

スファレロン過程

2. CPの破れ

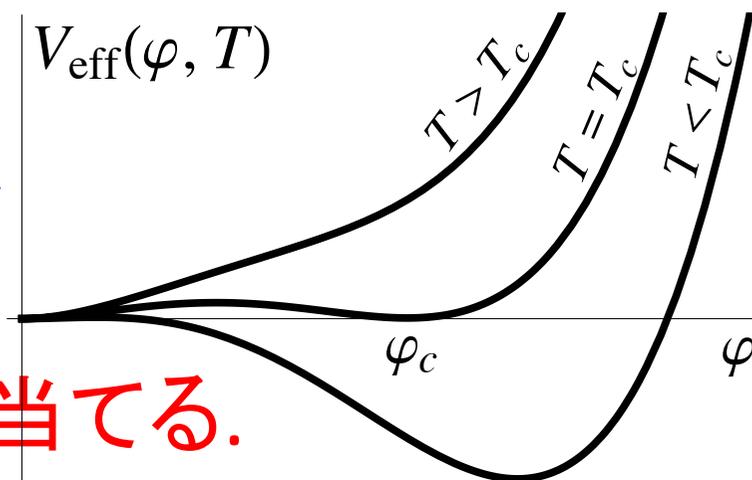
拡張されたヒッグスセクターのCP位相

3. 非平衡状態

電弱相転移が「強い」一次

$$\varphi_c/T_c \gtrsim 1$$

電弱相転移の物理に焦点を当てる.



電弱相転移とヒッグス三点結合

- 強い一次相転移 ($\varphi_c/T_c \gtrsim 1$) が実現するために、付加的ボソンのループによるノンデカップリング効果で説明できる。

高温展開

$$V_{\text{eff}} = D(T^2 - T_0^2)\varphi^2 - ET\varphi^3 + \frac{\lambda(T)}{4}\varphi^4$$

$$\varphi_c/T_c = 2E/\lambda(T_c)$$

[ヒッグス二重項場2個 (2HDM)の場合]

$$E = \frac{1}{12\pi v^3} \left(6m_{W^\pm}^3 + 3m_Z^3 + \sum_{\Phi=H,A,H^\pm} m_\Phi^3 \right)$$

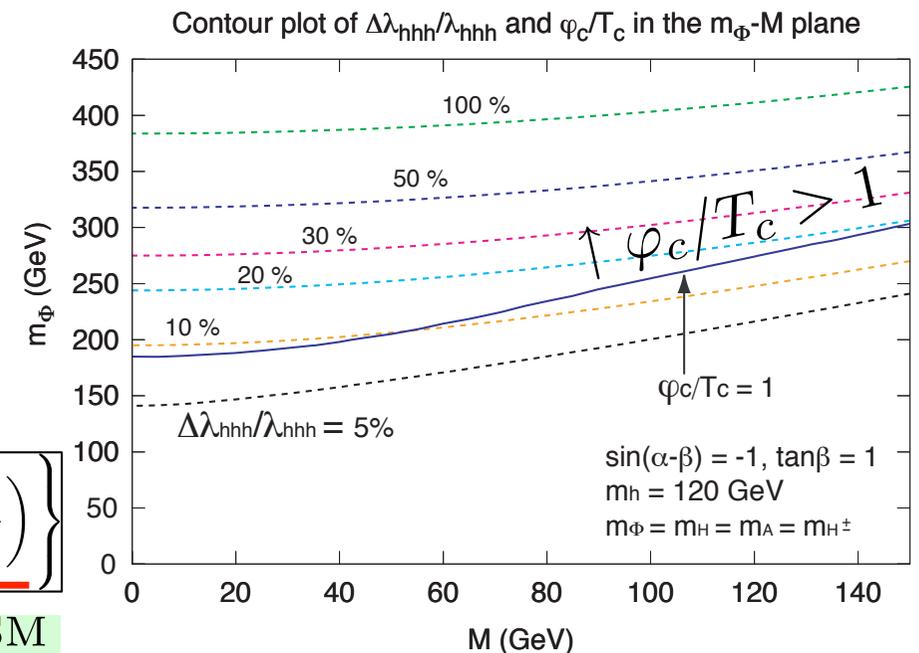
$$\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}} \equiv \frac{3m_h^2}{v} \left\{ 1 - \frac{m_t^4}{\pi^2 m_h^2 v^2} + \sum_{\Phi=H,A,H^\pm} \frac{m_\Phi^4}{12\pi^2 m_h^2 v^2} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2} \right) \right\}$$

$$\Delta\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}} \equiv (\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}} - \lambda_{hhh}^{\text{SM}})/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}$$

ILC (~13% @ $v_s=1\text{TeV}$) で、 $\Delta\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}} > \mathcal{O}(10\%)$ を検証

数値計算 [2HDM]

S.Kanemura, Y.Okada, E.Senaha, PLB606 (2005) 361



先行研究と我々の研究

- 電弱相転移起源の残存重力波の先行研究
 - 模型に依存しない解析^[1], 高次演算子^[2]
 - 輻射補正のループカップリング効果...MSSM^[3]では, 強い一次相転移が実現できない.
 - ツリーレベルでのノンサーマル効果(NMSSM^[3], 実シングレット模型^[4])

[1] C. Grojean and G. Servant, PRD**75**, 043507 (2007); K. Kohri et al., arXiv:1405.4166.

[2] C. Delaunay et al., JHEP**0804**, 029 (2008). [3] R. Apreda et al., NPB**631**, 342 (2002).

[4] A. Ashoorioon and T. Konstandin, JCAP**0809**, 022 (2008).

- 我々はくりこみ可能な拡張スカラー模型で, 熱的な電弱相転移の検証可能性を研究する.

重力波干渉計を使って, 電弱相転移およびその背後の物理を探る.

2. 模型

O(N)模型

- 熱的に強い一次相転移を実現する模型を一般的に取り扱いたい
- O(N)対称性を持つN個のスカラー場 $S^T = (S_1, \dots, S_N)$

$$V_0 = -\mu^2 |\Phi|^2 + \frac{\mu_S^2}{2} |S|^2 + \frac{\lambda}{2} |\Phi|^4 + \frac{\lambda_S}{4} |S|^4 + \frac{c}{2} |\Phi|^2 |S|^2$$
- O(N) \rightarrow 縮退したスカラー質量: $m_S^2 = \mu_S^2 + \frac{c}{2} v^2$
- 付加的ボソンのループによる「**ハンテカップリング**」効果

$$E = (6m_{W^\pm}^3 + 3m_Z^3 + \underline{Nm_S^3}) / 12\pi v^3$$

$$\lambda_{hhh}^{O(N)} \equiv \frac{3m_h^2}{v} \left\{ 1 - \frac{m_t^4}{\pi^2 m_h^2 v^2} + \frac{Nm_S^4}{12\pi^2 m_h^2 v^2} \left(1 - \frac{\mu_S^2}{m_S^2} \right) \right\}$$

ヒッグス三点結合と重力波を研究する

理論的制限①

- 真空安定性: $\lambda > 0, \lambda_S > 0, \sqrt{2\lambda\lambda_S} + c > 0$
- 摂動ユニタリティー

...s波振幅の散乱行列 t_0 を対角化

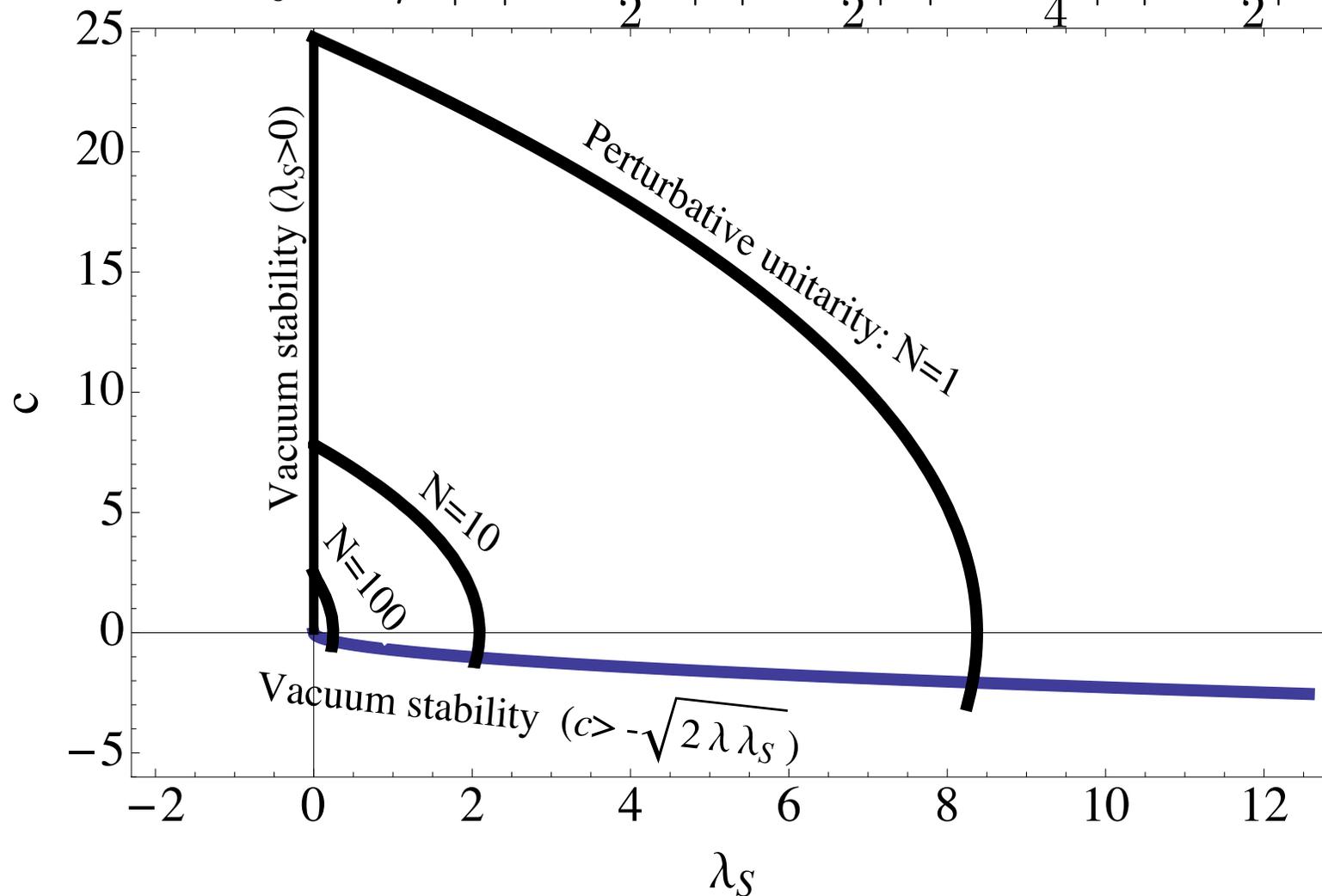
$$u = \begin{pmatrix} w^+ w^- \\ \frac{1}{\sqrt{2}} z z \\ \frac{1}{\sqrt{2}} h h \\ \frac{1}{\sqrt{2}} S_1 S_1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} S_2 S_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} S_3 S_3 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad t_0 = -\frac{1}{32\pi} \begin{pmatrix} 4\lambda & \sqrt{2}\lambda & \sqrt{2}\lambda & \sqrt{2}c & \sqrt{2}c & \sqrt{2}c & \dots \\ \sqrt{2}\lambda & 3\lambda & \lambda & c & c & c & \dots \\ \sqrt{2}\lambda & \lambda & 3\lambda & c & c & c & \dots \\ \sqrt{2}c & c & c & 6\lambda_S & 2\lambda_S & 2\lambda_S & \dots \\ \sqrt{2}c & c & c & 2\lambda_S & 6\lambda_S & 2\lambda_S & \dots \\ \sqrt{2}c & c & c & 2\lambda_S & 2\lambda_S & 6\lambda_S & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$$a_i = -\frac{\lambda}{16\pi}, -\frac{\lambda_S}{8\pi}, -\frac{c}{16\pi}, -\frac{1}{32\pi} \left[\{3\lambda + (N+2)\lambda_S\} \mp \sqrt{\{3\lambda - (N+2)\lambda_S\}^2 + 4Nc^2} \right]$$

→固有値に制限: $|a_i| < 1/2$

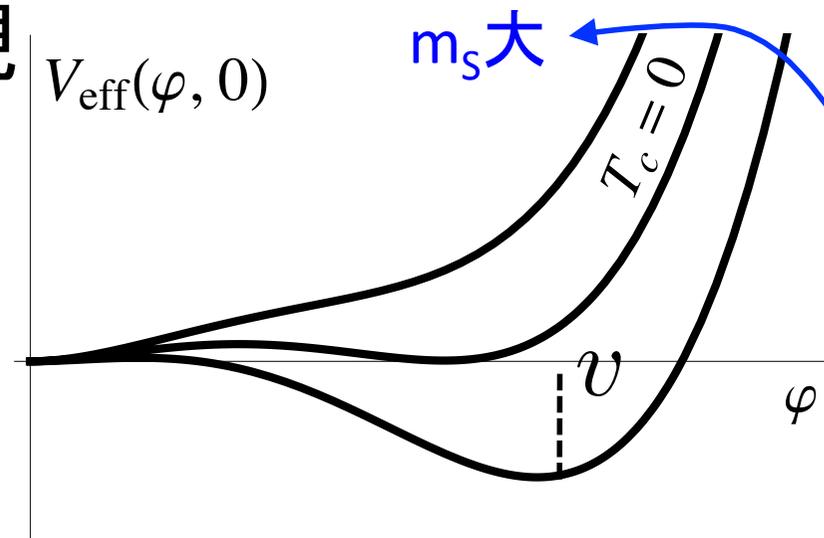
理論的制限①

$$V_0 = -\mu^2 |\Phi|^2 + \frac{\mu S^2}{2} |S|^2 + \frac{\lambda}{2} |\Phi|^4 + \frac{\lambda_S}{4} |S|^4 + \frac{c}{2} |\Phi|^2 |S|^2$$



理論的制限②

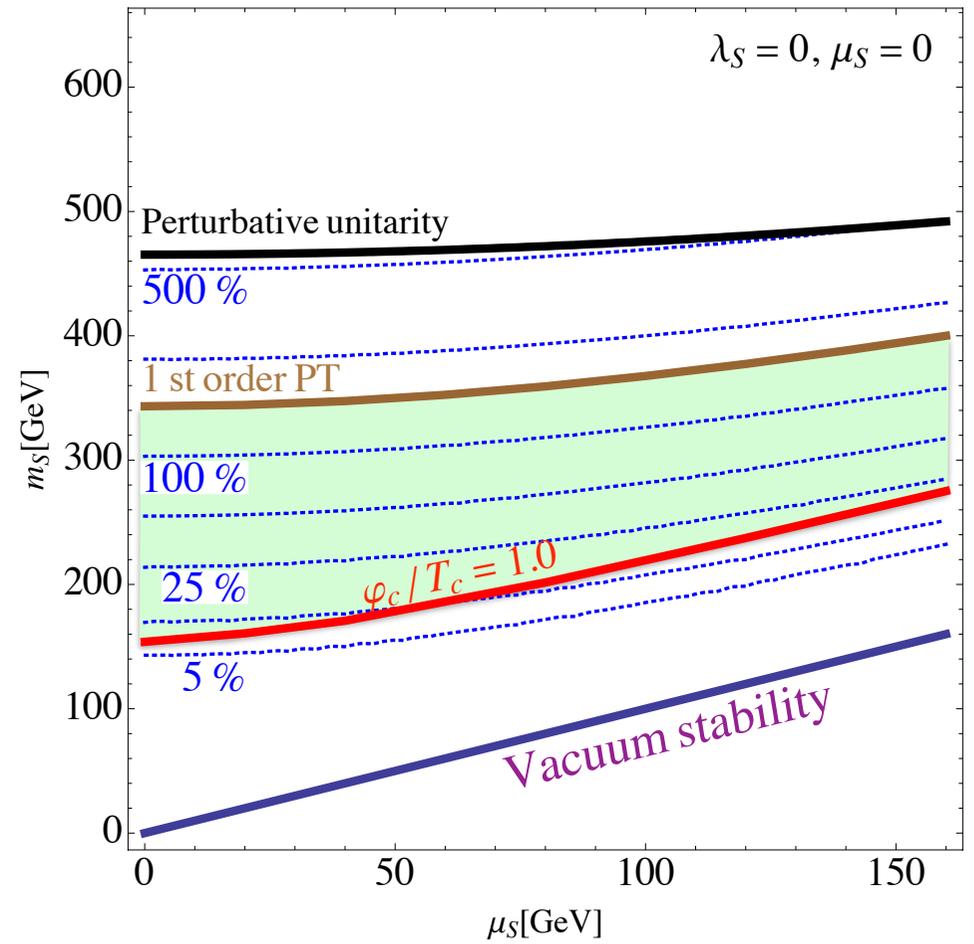
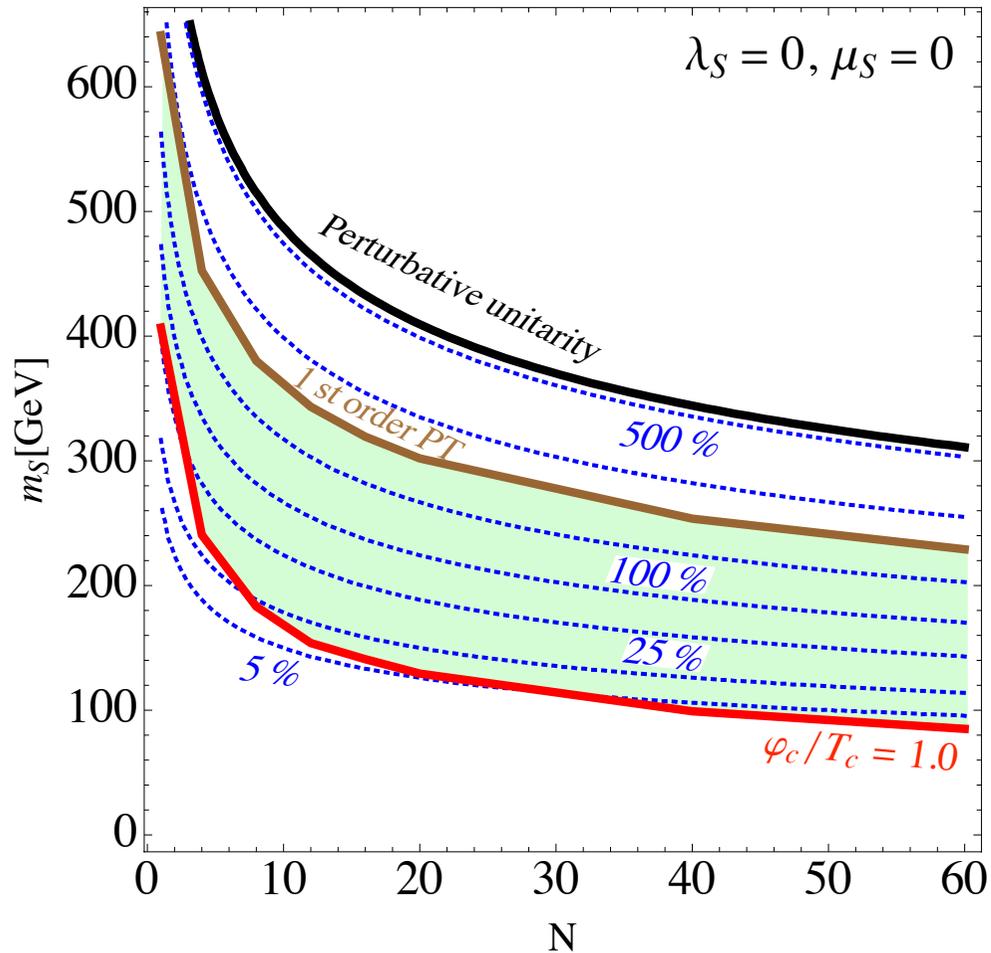
- 強い一次相転移 $\varphi_c/T_c \gtrsim 1$ (cf. SM: $m_h < 48\text{GeV}$)
→ m_s に下限を与える
- インプット値の m_s を大きくするとゼロ温度での破れた相が対称相より大きくなり、強い一次相転移が実現しない領域が存在する
→ m_s に上限を与える



3. ヒッグス三点結合

ヒッグス三点結合

$$\Delta\lambda_{hhh}^{O(N)} / \lambda_{hhh}^{SM} \equiv (\lambda_{hhh}^{O(N)} - \lambda_{hhh}^{SM}) / \lambda_{hhh}^{SM}$$



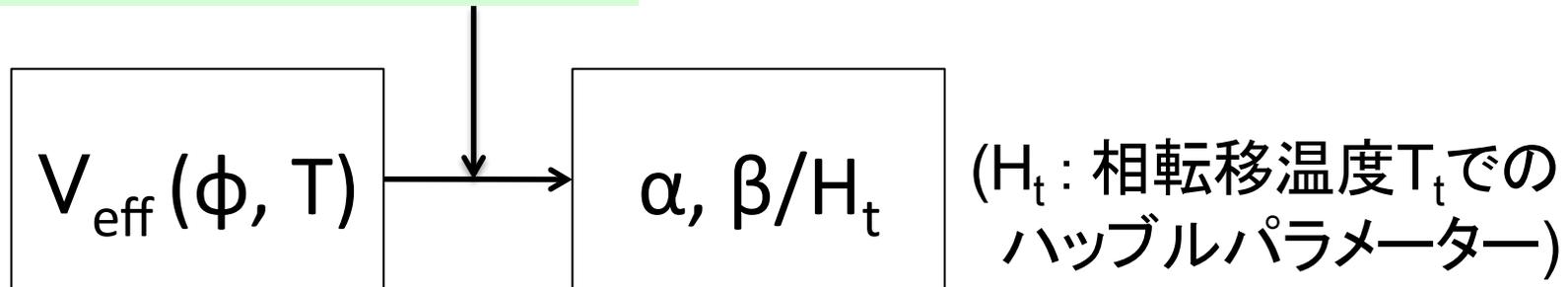
$$\Delta\lambda_{hhh}^{O(N)} / \lambda_{hhh}^{SM} = 500\%, 250\%, 100\%, 50\%, 25\%, 10\%, 5\%$$

4.電弱相転移起源の残存重力波

電弱相転移起源の残存重力波

Numerical calculation

“Overshooting-undershooting method”



- α は, 潜熱 ϵ を輻射のエネルギー密度 ρ_{rad} で規格化して定義される.

$$\alpha \equiv \left(\epsilon / \rho_{\text{rad}} \right) \Big|_{T=T_t} \quad \epsilon(T) \equiv \Delta V_{\text{eff}}(\varphi_B(T), T) - T \frac{\partial \Delta V_{\text{eff}}(\varphi_B(T))}{\partial T}$$

- β/H_t は, 泡の核形成率 $\Gamma(T) \simeq T^4 e^{-\frac{S_3(T)}{T}}$ の変化 $\beta \equiv \frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{dt} \Big|_{t=t_t}$ をハッブルパラメーター H_t で規格化した量 (S_3 : 3次元ユークリッド作用).

$$\beta/H_t = T_t \frac{d(S_3(T)/T)}{dT} \Big|_{T=T_t} \quad S_3(T) = \int dx^3 \left[\frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + V_{\text{eff}}(\varphi, T) \right]$$

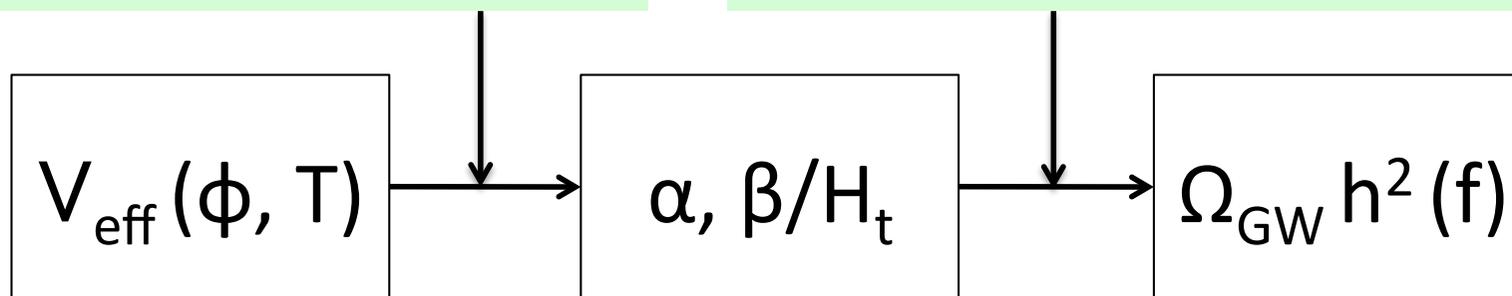
電弱相転移起源の残存重力波

Numerical calculation

“Overshooting-undershooting method”

Model-independent analysis

C. Grojean and G. Servant, PRD75, 043507 (2007)

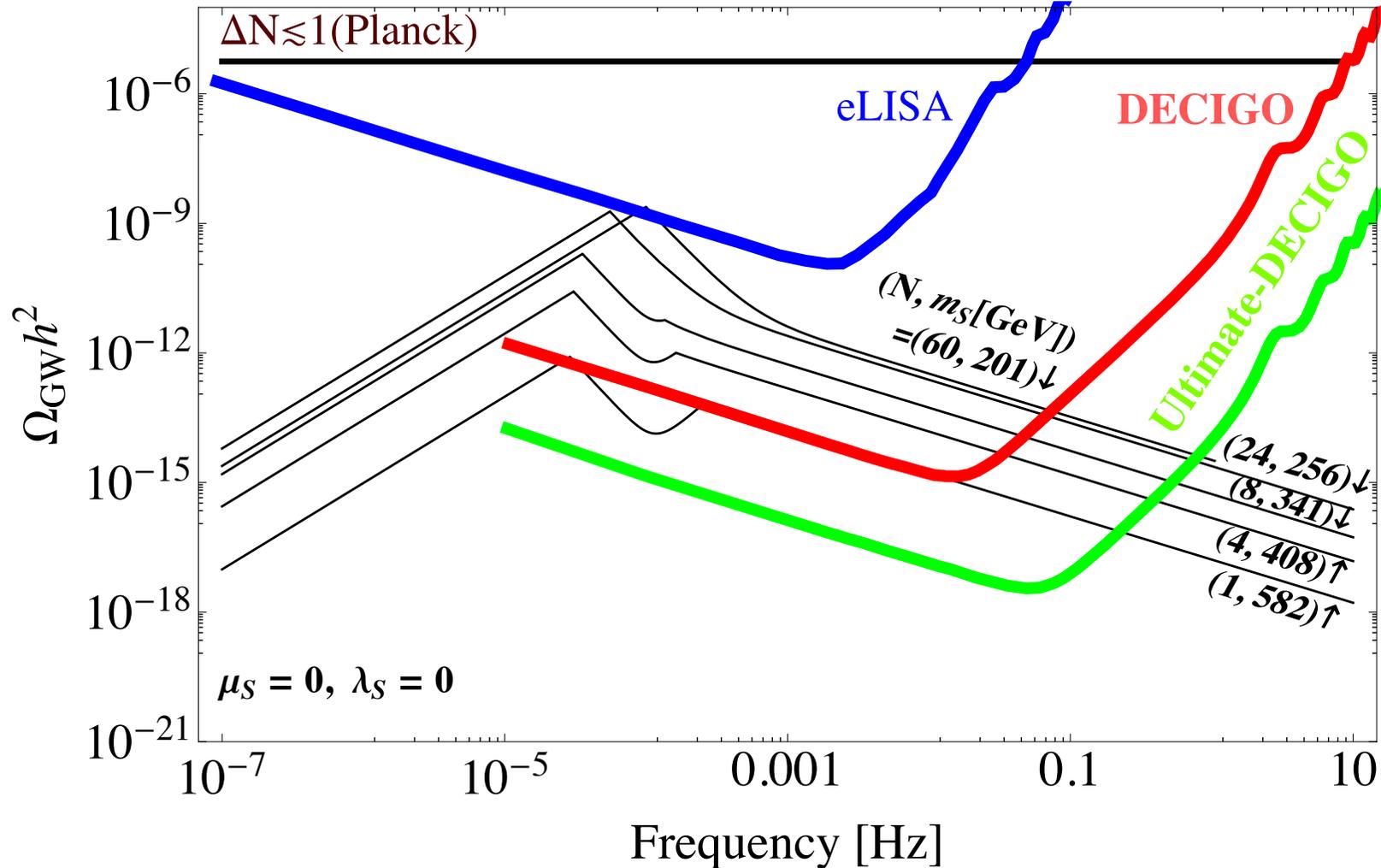


- 泡衝突とプラズマ乱流が重力波の源となる.

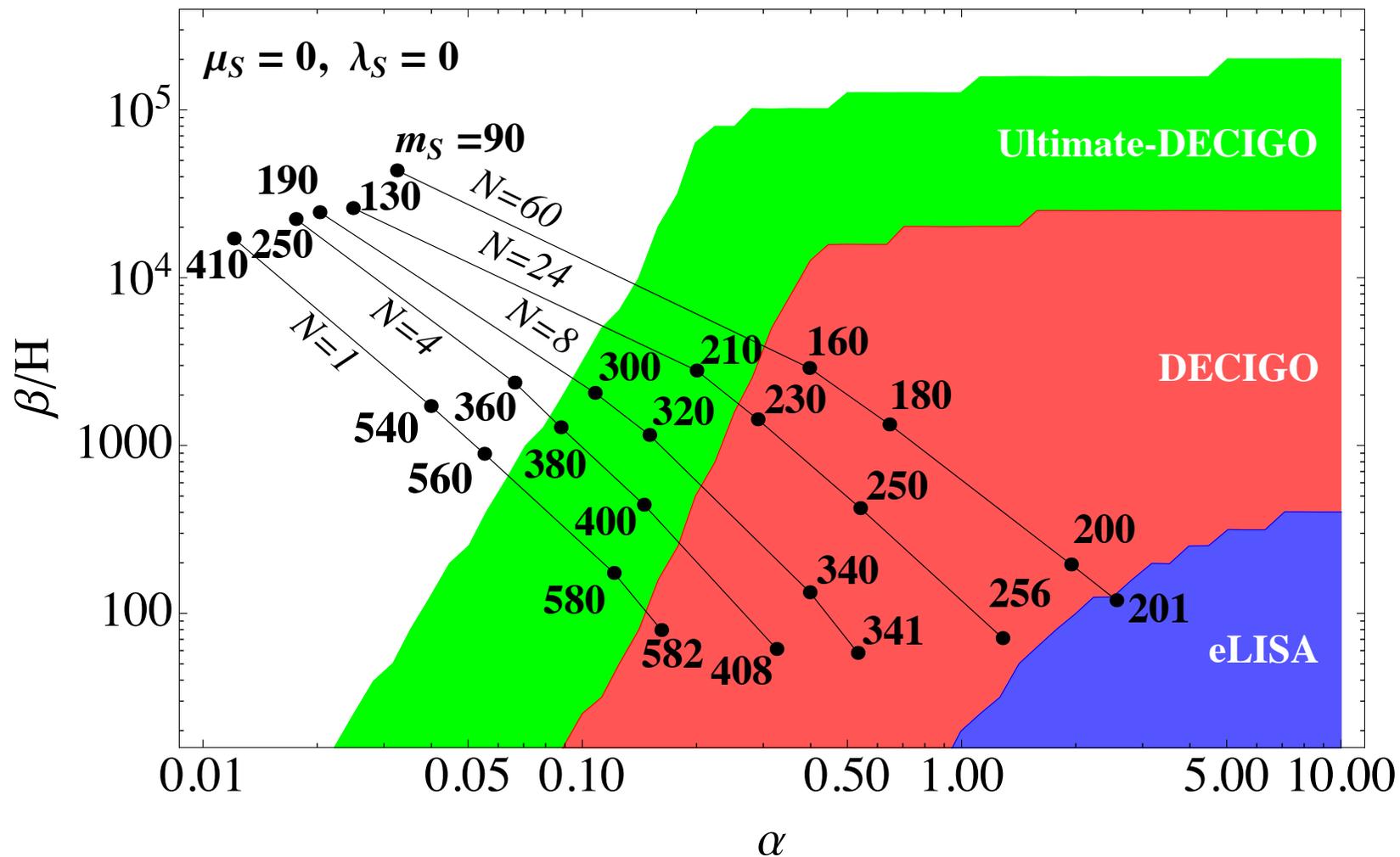
残存重力波: $\Omega_{\text{GW}} h^2(f) \equiv \Omega_{\text{coll}} h^2(f) + \Omega_{\text{turb}} h^2(f)$

$$\Omega_{\text{coll}} h^2(f_{\text{coll}}) \simeq 10^{-8} \left[\frac{H_t}{\beta} \right]^2 \left[\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right]^2, \quad \Omega_{\text{turb}} h^2(f_{\text{turb}}) \simeq 10^{-4} \left[\frac{H_t}{\beta} \right]^2 \quad \text{@peak frequency}$$

重力波スペクトル



模型のパラメーターと実験感度



結論

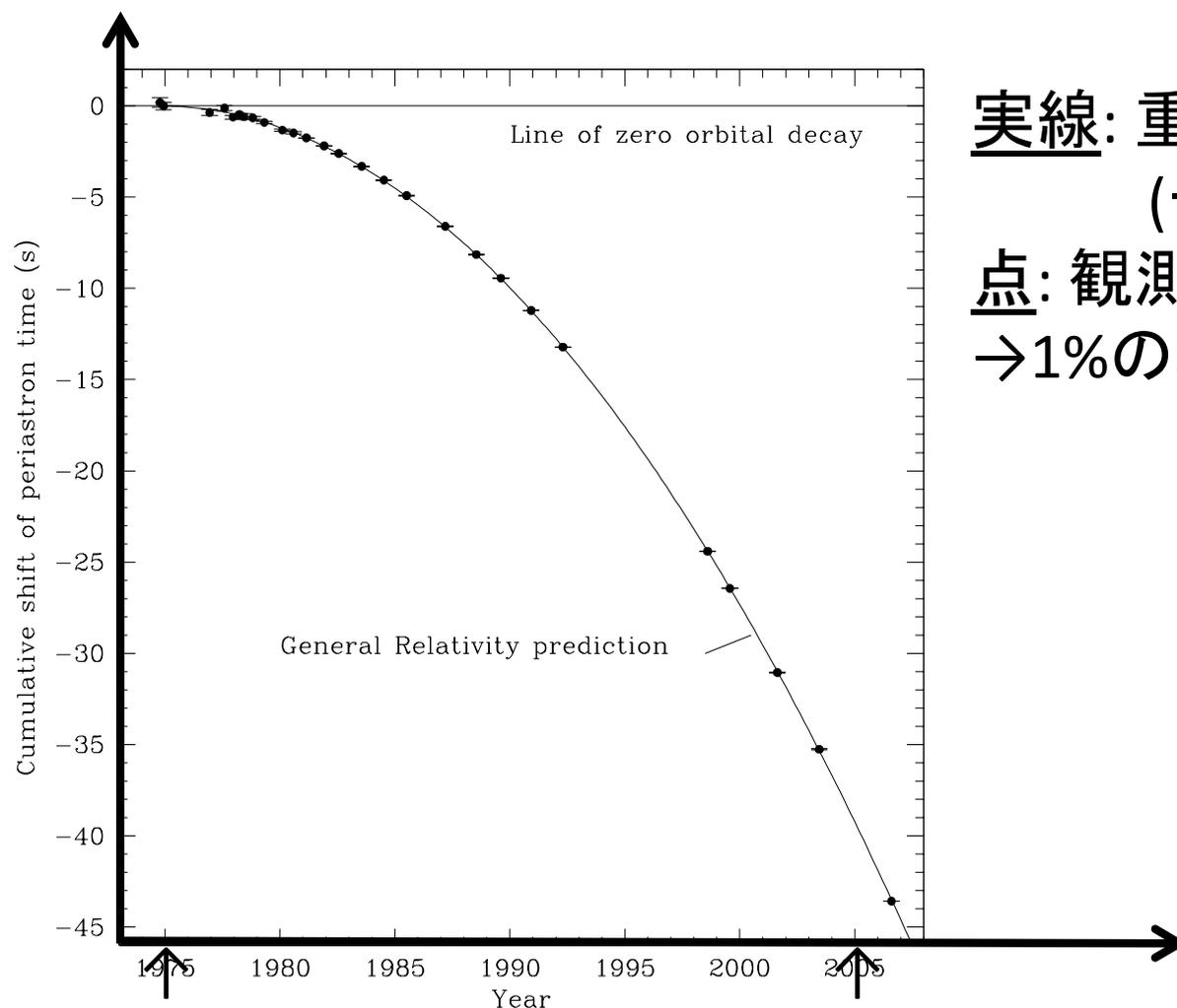
- 熱的に電弱相転移を実現するくりこみ可能な模型として $O(N)$ 模型を研究し, 重力波干渉計で電弱相転移起源の残存重力波が捕らえられることを示した.
- 重力波観測は, 模型の区別が可能であり, 加速器実験に加えて, BSMを探る新たな手法として期待できる!

Back Up

重力波とは

- 一般相対性理論で予言されていた波動方程式の解(未検証)
- 重力波の影響は間接的には観測されている
 - 連星パルサーの軌道収縮が重力波の放射の予言と一致 [Hulse and Taylor (1974)]

連星パルサーの軌道収縮の観測



実線: 重力波の放射の予言
(一般相対性理論)

点: 観測値

→1%の精度で一致

1975年

2005年

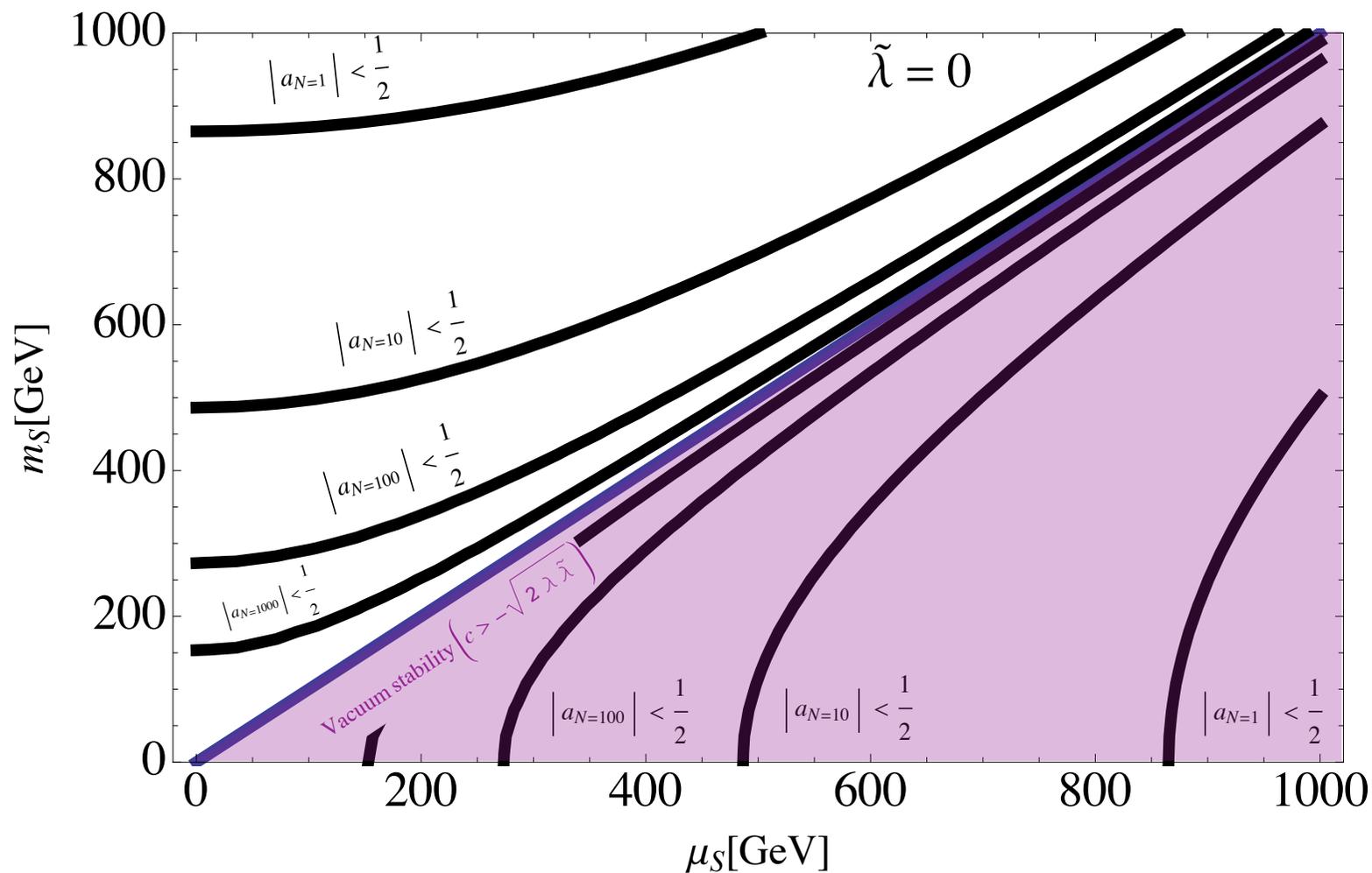
λ_{hhh} can be measured 13% accuracy @ILC-1TeV (2500fb⁻¹)

Table 9.1. Summary of expected accuracies $\Delta g_i/g_i$ for model independent determinations of the Higgs boson couplings. The theory errors are $\Delta F_i/F_i = 0.1\%$. For the invisible branching ratio, the numbers quoted are 95% confidence upper limits.

	ILC(250)	ILC(500)	ILC(1000)	ILC(LumUp)
\sqrt{s} (GeV)	250	250+500	250+500+1000	250+500+1000
L (fb ⁻¹)	250	250+500	250+500+1000	1150+1600+2500
$\gamma\gamma$	18 %	8.4 %	4.0 %	2.4 %
gg	6.4 %	2.3 %	1.6 %	0.9 %
WW	4.8 %	1.1 %	1.1 %	0.6 %
ZZ	1.3 %	1.0 %	1.0 %	0.5 %
$t\bar{t}$	–	14 %	3.1 %	1.9 %
$b\bar{b}$	5.3 %	1.6 %	1.3 %	0.7 %
$\tau^+\tau^-$	5.7 %	2.3 %	1.6 %	0.9 %
$c\bar{c}$	6.8 %	2.8 %	1.8 %	1.0 %
$\mu^+\mu^-$	91%	91%	16 %	10 %
$\Gamma_T(h)$	12 %	4.9 %	4.5 %	2.3 %
hhh	–	83 %	21 %	13 %
BR(invis.)	< 0.9 %	< 0.9 %	< 0.9 %	< 0.4 %

“ILC Higgs White Paper,” arXiv:1310.0763 [hep-ph]

真空安定性・摂動ユニタリティー



結果のまとめ

N	1	4
10	$\gtrsim 641\text{GeV}$	$\gtrsim 453\text{GeV}$
PT	$> 590\text{GeV}$	$> 410\text{GeV}$
$m_S^{\text{Max}}, \Delta\lambda_{hhh}^{O(N)}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}, \varphi_c/T_c, (\alpha, \beta/H)_{T_t}^{T_c} [\text{GeV}]$	582GeV, 113%, 2.16, (0.162, 79.5) $_{60.6}^{102}$ [D]	408GeV, 109%, 2.53, (0.325, 61.4) $_{50.3}^{89.7}$ [D]
$m_S^0, \Delta\lambda_{hhh}^{O(N)}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}, \varphi_c/T_c, (\alpha, \beta/H)_{T_t}^{T_c} [\text{GeV}]$	580GeV, 112%, 2.14, (0.121, 174) $_{67.1}^{103}$ [UD]	400GeV, 101%, 2.40, (0.145, 444) $_{68.5}^{93.1}$ [UD]
$m_S^1, \Delta\lambda_{hhh}^{O(N)}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}, \varphi_c/T_c, (\alpha, \beta/H)_{T_t}^{T_c} [\text{GeV}]$	560GeV, 96.9%, 1.92, (0.0552, 893) $_{91.2}^{110}$	380GeV, 82.2%, 2.14, (0.0878, 1280) $_{86.1}^{100}$ [UD]
$m_S^2, \Delta\lambda_{hhh}^{O(N)}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}, \varphi_c/T_c, (\alpha, \beta/H)_{T_t}^{T_c} [\text{GeV}]$	540GeV, 83.8%, 1.74, (0.0399, 1720) $_{104}^{116}$	360GeV, 66.2%, 1.92, (0.0663, 2370) $_{96.7}^{106}$
$m_S^{\text{Min}}, \Delta\lambda_{hhh}^{O(N)}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}, \varphi_c/T_c, (\alpha, \beta/H)_{T_t}^{T_c} [\text{GeV}]$	410GeV, 27.9%, 1.01, (0.0121, 17100) $_{141}^{143}$	250GeV, 15.4%, 1.06, (0.0176, 22400) $_{130}^{131}$
$\varphi_c/T_c < 1.00$	$\lesssim 407\text{GeV}$	$\lesssim 241\text{GeV}$

8	24	60
$\gtrsim 380\text{GeV}$	$\gtrsim 288\text{GeV}$	$\gtrsim 229\text{GeV}$
$> 350\text{GeV}$	$> 260\text{GeV}$	$> 210\text{GeV}$
341GeV, 107%, 2.82, (0.532, 58.2) $_{44.3}^{81.7}$ [D]	256GeV, 102%, 3.44, (1.28, 71.2) $_{35.7}^{67.9}$ [D]	201GeV, 96.5%, 4.13, (2.56, 120) $_{30.6}^{56.8}$ [eL]
340GeV, 105%, 2.80, (0.398, 134) $_{49.0}^{82.2}$ [D]	250GeV, 92.4%, 3.27, (0.540, 424) $_{49.7}^{70.5}$ [D]	200GeV, 94.6%, 4.09, (1.94, 196) $_{33.7}^{57.2}$ [D]
320GeV, 82.7%, 2.45, (0.150, 1160) $_{74.8}^{89.9}$ [UD]	230GeV, 66.2%, 2.81, (0.290, 1430) $_{66.9}^{77.7}$ [D]	180GeV, 62.1%, 3.39, (0.645, 1340) $_{55.0}^{64.8}$ [D]
300GeV, 63.9%, 2.18, (0.108, 2060) $_{86.5}^{96.1}$ [UD]	210GeV, 46.0%, 2.43, (0.200, 2800) $_{77.1}^{83.7}$ [UD]	160GeV, 38.8%, 2.83, (0.397, 2900) $_{65.6}^{71.1}$ [D]
190GeV, 10.3%, 1.06, (0.0203, 24600) $_{123}^{124}$	130GeV, 6.76%, 1.11, (0.0249, 26000) $_{113}^{114}$	90GeV, 3.88%, 1.10, (0.0324, 43600) $_{103}^{103}$
$\lesssim 183\text{GeV}$	$\lesssim 120\text{GeV}$	$\lesssim 85\text{GeV}$