

ILCの物理的意義

Shigeki Matsumoto (Kavli IPMU)

お題: 有識者会議での体験を踏まえたILCのオーバービュー

有識者会議(物理作業部会)のテーマはILCの物理的意義の有無でした。この作業部会の最終的な結論は、物理的意義が**“有る”**でしたが、どのような議論を経てこの結論に至ったのかを、(できるだけ)系統적으로お話したいと思います。

加速器実験が挑戦する物理の大問題

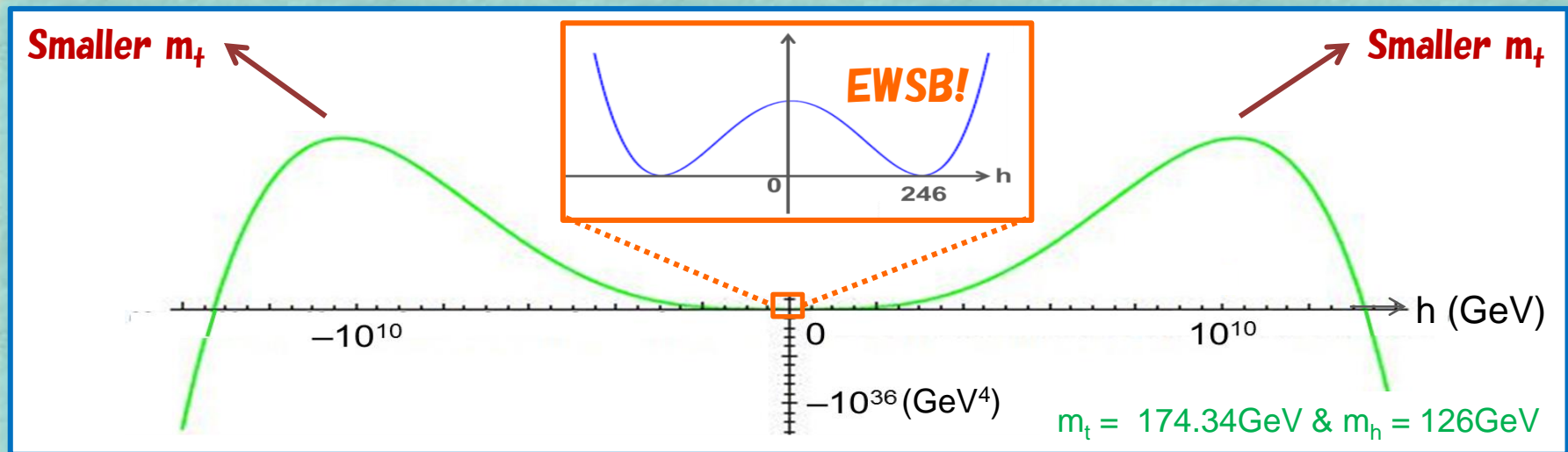
何故電弱対称性が破れたのか？ それも何故0(100)GeVで？

大事な点: 標準模型では予め電弱対称性が0(100)GeV程度で破れることを仮定している為、上記の質問に解答を与えることは出来ない！

ちなみに物性物理では同等の問題(超伝導)があり、その問題は解かれている。

Ginzburg-Landau 理論 → BCS 理論 (Higgs = : ϕ :)

電弱対称性の破れ(Higgs)の背後にある“BCS理論”に相当する理論は何か？



素粒子における場の理論がプランクスケールを基本的なエネルギースケールとして持つ事を考えると、第0近似では電弱対称性は破れてはおらず、何かの理由で**小さな破れ**が起こり、結果**小さな真空期待値**を持ったと期待される。

加速器実験が挑戦する物理の大問題

電弱対称性の破れ(Higgs)の背後にある物理の3つの可能性

TeVスケール超対称性

非常に高いスケールで超対称性の破れが起こり、それが引き金となり電弱対称性が破れる。

ヒッグス場は数あるスカラー場の1つにすぎない。

複合ヒッグス模型達

高いスケールで、何かの動的対称性の破れが起こり、それが引き金となり電弱対称性が破れる。

ヒッグス場は動的対称性の破れに付随するPNG。

何か全く違う原理

これまでに(常識的に)考えられてきたものとは別の機構や理由により電弱対称性が破れる。

しばしば、ヒッグス場は特別なスカラー場となる。

高エネルギー物理学の最も大事な役割は、電弱対称性の破れの背後にある物理を明らかにする、あるいはその為に進むべき研究の方向を示す事である。(実際、歴史的には加速器における物理は常にその役割を果たしてきた。)

高エネルギー加速器実験は大量の物理量を一度に測定する実験であり、その意味で予期せぬ出来事に非常に強い。逆にいうと、高エネルギー加速器実験でシグナルが発見されないと非常に強い制限が様々なシナリオに課される。

この意味においてLHC実験とILC実験は同じ物理的な意義を持つ。そのため、LHC実験とILC実験との違い、相補性、相乗効果を丁寧に議論する必要有り。

加速器実験が挑戦する物理の大問題

地上の運動

重力

天体の運行

標準模型

強い力

SU(3)

弱い力

SU(2)

電気力

U(1)

磁気力

電磁気力

LHC & ILC

超対称性?

複合模型?

それ以外?

- ✓ 暗黒物質
- ✓ 大統一理論
- ✓ ニュートリノの起源
- ✓ 宇宙のバリオン数
- ✓ 暗黒エネルギー
- ✓ インフレーション
- ✓ Strong CP問題
- ✓ 3世代問題
- ✓ ...

究極の理論

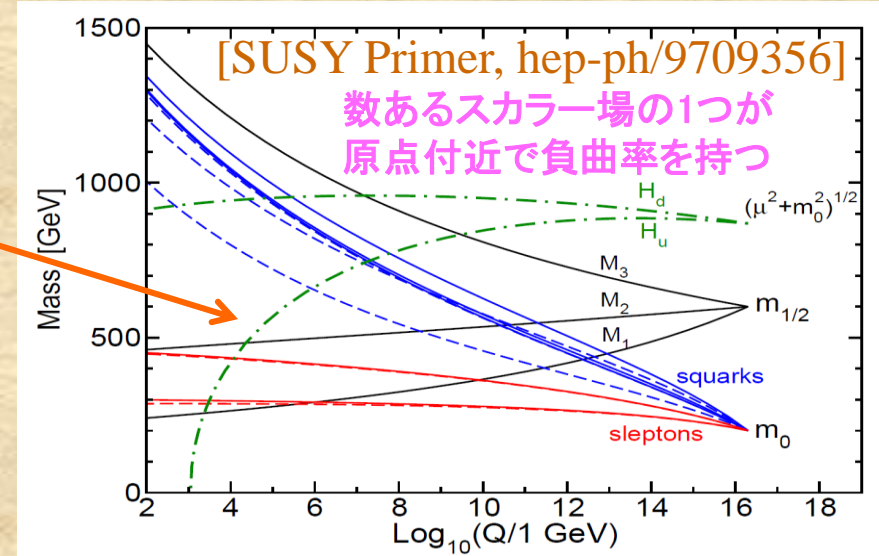
他の物理の大問題もとても大事。高エネルギー実験が電弱スケールのすぐ上のスケールの物理を明かにしてくれる事で、どのような枠内で問題が可決されるべきかが分かる。これは他の実験との非常に大きな相乗効果と言える。

TeVスケール超対称性シナリオ

何故 $|H|^2$ の係数(m^2)が負になる?

$$V = m^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

SUSY breaking $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ **EWSB**
(Radiative corrections)
 [K. Inoue, et. al, PTP,1982]



何故 $0(m^2)$ が100GeV程度?

$$m^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2 + \delta m_{H_u}^2|_{\text{stop}} + \delta m_{H_u}^2|_{\text{gluino}} + \dots$$

- ✓ Higgsino mass
- ✓ Heavy Higgs mass
- ✓ Squark (Stop) mass
- ✓ Gluino mass

...

$$\delta m_{H_u}^2|_{\text{stop}} = -\frac{3}{8\pi^2} y_t^2 (m_{Q_3}^2 + m_{U_3}^2 + |A_t|^2) \log\left(\frac{\Lambda}{\text{TeV}}\right)$$

$$\delta m_{H_u}^2|_{\text{gluino}} \simeq -\frac{2}{\pi^2} y_t^2 \left(\frac{\alpha_s}{\pi}\right) |M_3|^2 \log^2\left(\frac{\Lambda}{\text{TeV}}\right)$$

TeVスケール超対称性シナリオ

$$m^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2 + \delta m_{H_u}^2|_{\text{stop}} + \delta m_{H_u}^2|_{\text{gluino}} + \dots$$

↑
(100GeV)²

No fine-tuning

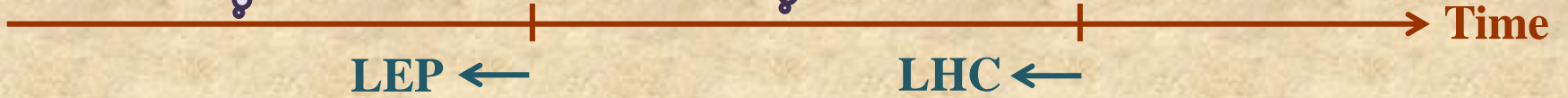
Small fine-tuning

$M_{\text{SUSY}} < 0(0.1)\text{TeV}?$

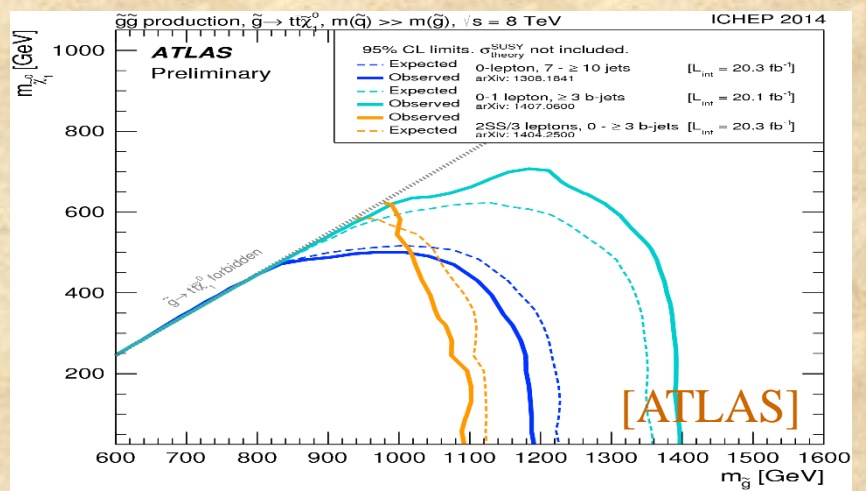
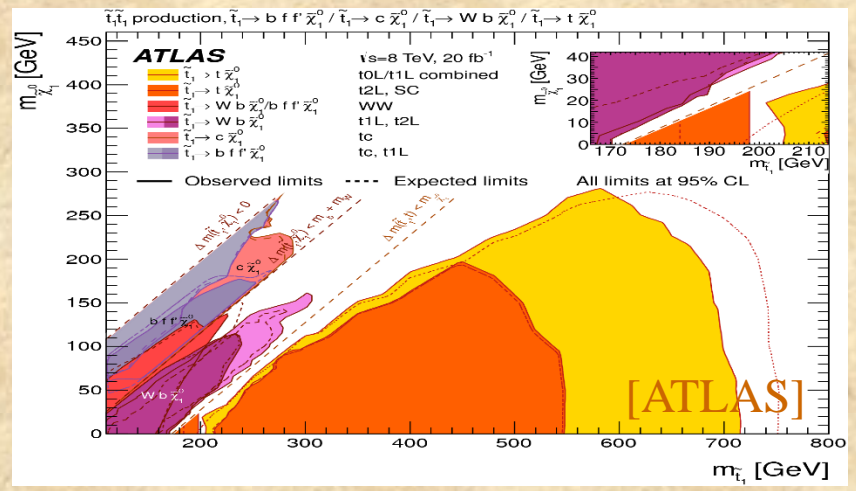
$M_{\text{SUSY}} < 0(1)\text{TeV}?$

Fine-tunings in nature
 ✓ 3 Helium → Carbon
 ✓ Quadrupole in CMB

Coupling unification, DM



LHCの戦略 → Direct productions colored new particles + ...



TeVスケール超対称性シナリオ

ILCの戦略 → Indirect probe via precise Higgs measurements + ...

間接検出: 始状態及び終状態がSM粒子である過程への新物理の寄与を検出。

- Rパリティ正の新粒子の寄与はRパリティ負の新粒子の寄与より大。
- MSSMでRパリティ正の新粒子とは重いHiggs粒子達。これら粒子達は発見された最も軽いHiggsの相互作用に大きな補正を与える。

$I = 1.15 \text{ab}^{-1} @ 250 \text{GeV} \oplus 1.6 \text{ab}^{-1} @ 500(550) \text{GeV}$ & $II = \oplus 2.5 \text{ab}^{-1} @ 1 \text{TeV}$

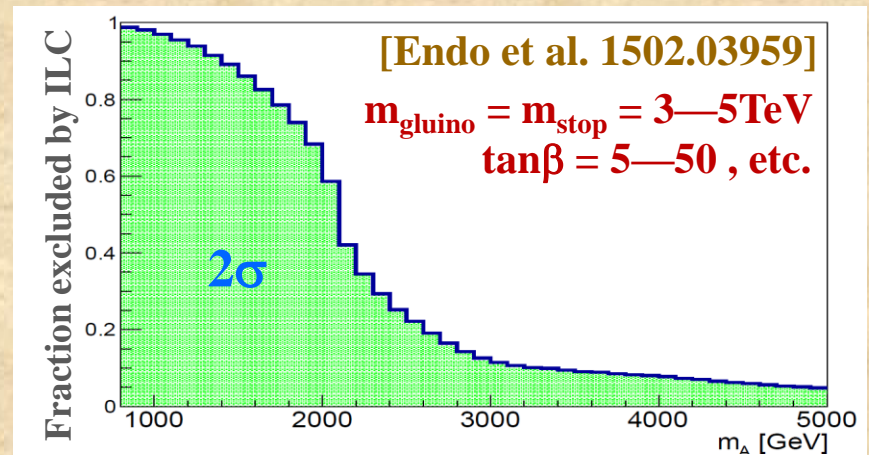
	Δm_h	Γ_h	κ_t	κ_b	κ_τ	κ_c	κ_Z	κ_W	κ_g	κ_γ	λ
I.	30MeV	2.5%	7.8(2.3)%	0.8%	1.2%	1.5%	0.5%	0.6%	1.2%	4.5(1.7)%	46%
II.	---	2.3%	1.9(1.7)%	0.7%	0.9%	1.0%	0.5%	0.6%	0.9%	2.4(0.8)%	13%

↑ $\hookrightarrow [s^{1/2} = 550 \text{GeV I/O } 500 \text{GeV}]$ [LHC-ILC synergy] ↓

ILCでは結合定数を模型に依存しない方法で決定可能。

測定されたHiggs質量と様々な現象論的制限を考慮済み。 →

感想: 重心系のエネルギーが500GeVというのは絶妙だと思います。



複合Higgs模型シナリオ

何故 H^2 の係数(m^2)が負になる?

$G \rightarrow H$

A confining gauge theory
+
elementary SM fermions
+
SM gauge bosons

- ✓ Higgsボソンは $G \rightarrow H$ に伴うpNGBの一つ。
- ✓ $G \supset SU(2) \times U(1)$ は部分的にゲージ化。
- ✓ SM fermionは G の不完全表現として導入。
- ✓ Top YukawaはFermion共鳴との混合で実現。
- ✓ $V(h)$ はtreeでは0で、輻射補正から生成。

Explicit breaking of G

$$V(h) = \gamma \sin^2(h/f) + \beta \sin^4(h/f)$$

f = decay constant associated with $G \rightarrow H$

何故 $0(m^2)$ が100GeV程度?

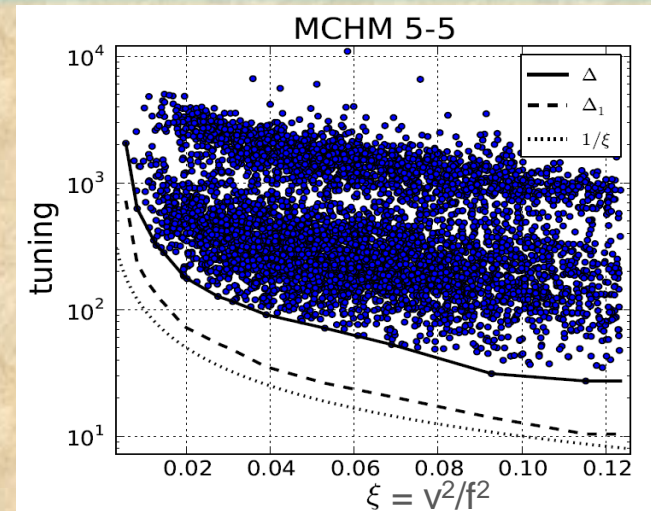
$0(v) \sim 0(f)$ from $V(h)$, tuning $\sim 0(v^2/f^2)$

When γ is from LO while β is from NLO, it becomes more severe, say double tuning. \rightarrow

When both γ and β are from LO, it is still $0(v^2/f^2)$. Typical example is MCHM14-14.



f & Fermion共鳴の質量は小さいほど良い!



[J. Barnard et al. 1507.02332]

複合Higgs模型シナリオ

LHCの戦略 → **Productions of top partners and vector bosons + ...**

✓ **Top partner: $m_T > 700\text{--}800\text{GeV}$**

E.g. $1_{3/2}$ top partner:

$T \rightarrow bW$

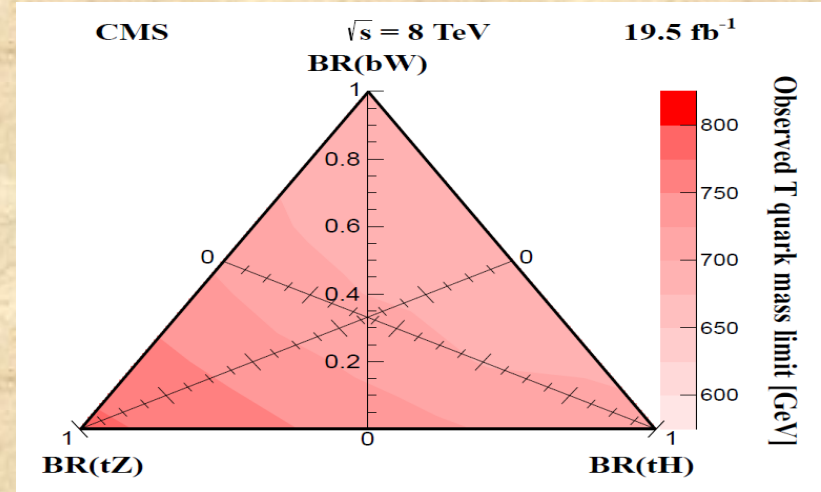
$T \rightarrow tZ$

$T \rightarrow hZ$

→→→→→

✓ **$G(H \rightarrow WW/ZZ): f > 700\text{GeV}$**

✓ **Vector boson production, etc.**



ILCの戦略 → **Precise Higgs and top measurements + ...**

✓ **HiggsのW/Zとの結合の精密な測定。**

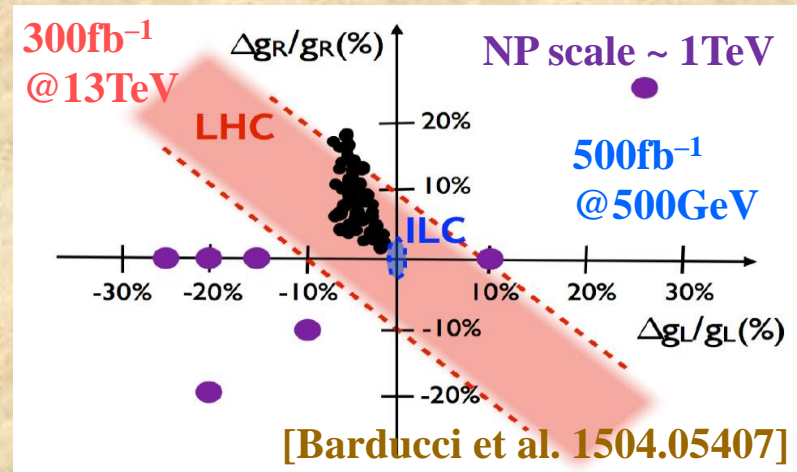
✓ **湯川結合定数の精密な測定。**

✓ **Higgsの自己(3点)結合の測定。**

精密なTopの性質の測定(tZ等) →

($\Delta m_t = 100\text{MeV}$ & $\Delta \Gamma_t = 32\text{MeV}$)

✓ **Vector boson resonanceの検出。**



違う考え方に基づくシナリオ (EW Naturalness)

[In SUSY framework, J. Feng, K. Matchev, T. Moroi, 2000; H. Baer, et. al. as recent studies]

H²の項への輻射補正は、高エネルギー物理により絶妙にコントロールされている。

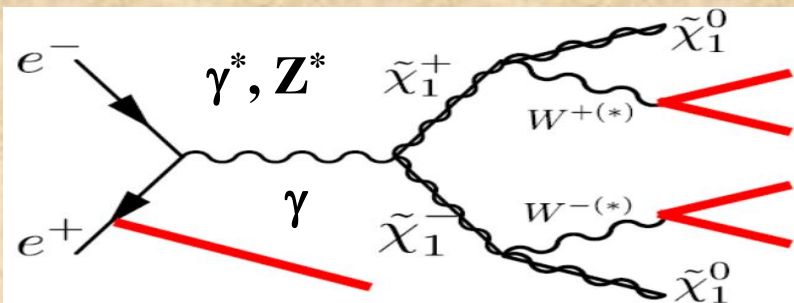
$$m^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2 + \delta m_{H_u}^2|_{\text{stop}} + \delta m_{H_u}^2|_{\text{gluino}} + \dots$$

SUSYが破れて出る補正

$$= (\text{小さい数}) \times (M_0)^2 \text{ [上記の項は } M_0 \text{ の関数]}$$

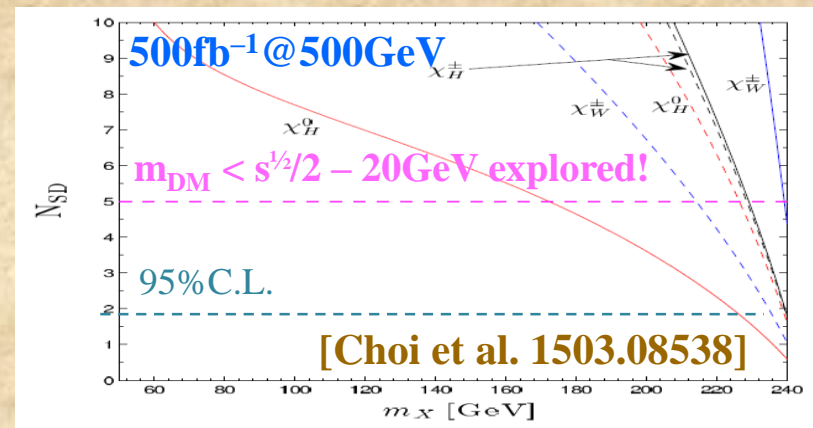
- 予言:**
- ① μ 項は小さい \rightarrow Higgsinoの質量は200GeV程度以下
 - ② $(m_{H_d})^2$ 項は小さい \rightarrow 重いHiggsの質量は $|\mu| \tan\beta$ 以下 \rightarrow 前と同戦略
 - ③ 他の超対称粒子はTeVより重い可能性あり \rightarrow Higgsは特別な粒子

LHCではこのシナリオの検証が難しい。ILCではHiggsino生成を通じて可能。



DM search: $\gamma + \cancel{E} + \text{soft tracks, etc.}$

[Berggren et al. 1307.3566]



違う考え方に基づくシナリオ (Multiverse)

[Y. Nomura, 2011; Y. Nomura; S. Shirai, 2014 and M. Ibe, et. al, 2015 in SUSY framework]

我々が観測する物理量(の幾つか)に強いバイアスが掛かっている可能性を考慮。

- ① 我々は多数ある宇宙の一つに住んでいる。
- ② それぞれの宇宙は異なる物理定数を持つ。
- ③ $m^2 \sim -(100\text{GeV})^2$ の宇宙にのみ住める。

String theory & Eternal inflationが支持 →



Implication to SUSY

③ → $(M_{\text{SUSY}})^2 - |\mu|^2 \sim (100\text{GeV})^2$

- ✓ M_{SUSY} の分布はスケール依存なし。(動的SUSYの破れを考える。)
- ✓ μ の分布は m_{pl} に向かい増大する。
- ✓ 上記の③式は M_{SUSY} と μ の両者が100GeVに近いほど満たし易い。

③式を満足する宇宙のみを考えると、 $M_{\text{SUSY}} \sim \mu$ のスケールはどこでも良い。

↓ [PGM, Spread, Mini-split, ...]

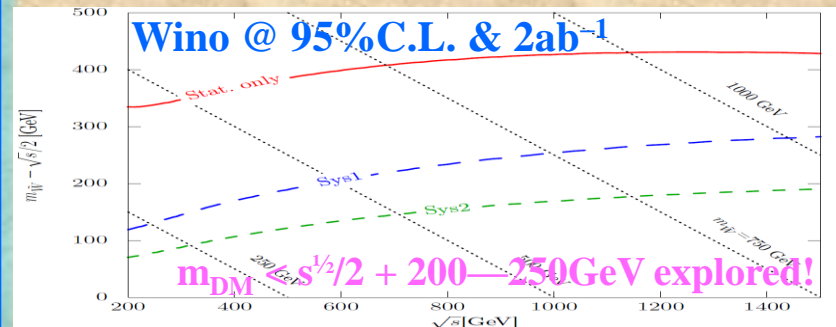
AMSBシナリオ [Giudice, et al, 1998]

シナリオの検証

ゲージノ以外の超対称粒子は非常に重い可能性大。LSPはWinoとなる。

LHC: Disappearing track search,

ILC: Radiative correction to $ee \rightarrow ff$



Sys1. e:0.2%, μ :0.15%, b:0.5%, c:1.0%

Sys2. e:0.4%, μ :0.30%, b:1.0%, c:2.0%

違う考え方に基づくシナリオ (MPP)

[C. Froggatt, H. Nielsen, 1996; H. Kawai, et. al. for recent studies]

作用原理の背後により基本的な原理があり、それが様々なパラメータを決定。

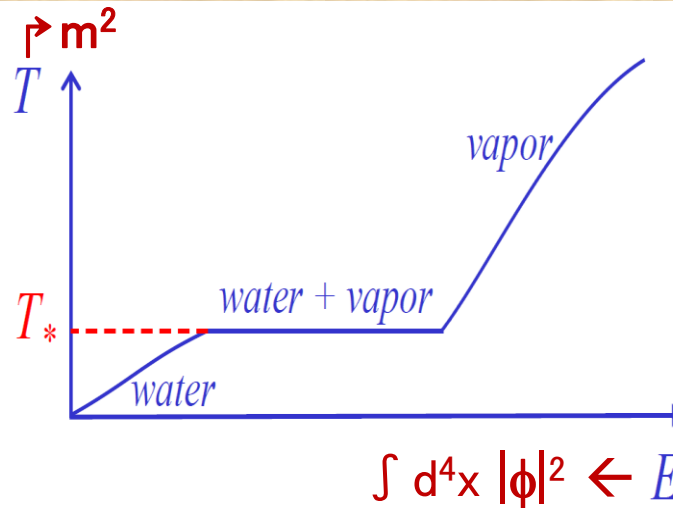
○ カノニカル

$$\int [d\varphi] e^{-\beta H[\varphi]}$$



○ ミクロカノニカル

$$\int [d\varphi] \delta(H[\varphi] - E)$$



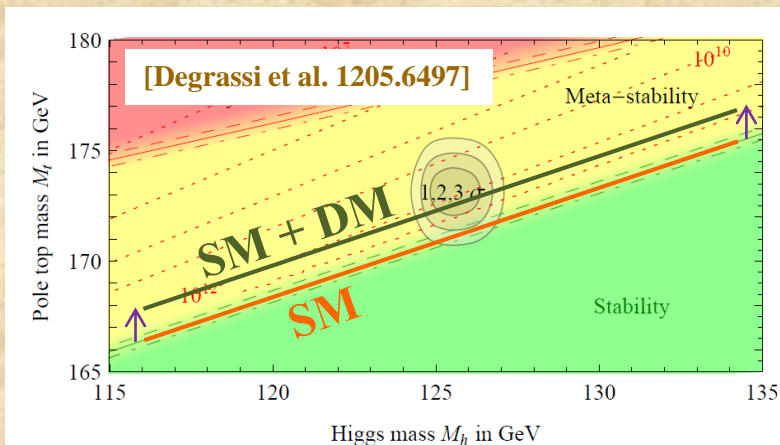
○ 標準模型

$$Z = \int [d\varphi] e^{iS[\varphi]}$$



○ ??????????

2相共存の条件



シナリオの検証

1. トップとヒッグス質量の精密測定
→ 前スライドで述べた通り。
2. 暗黒物質シグナルの検出
[シナリオと無矛盾な有力候補はSU(2)_L-3のマヨラナ粒子]
→ 前スライドで述べた通り。

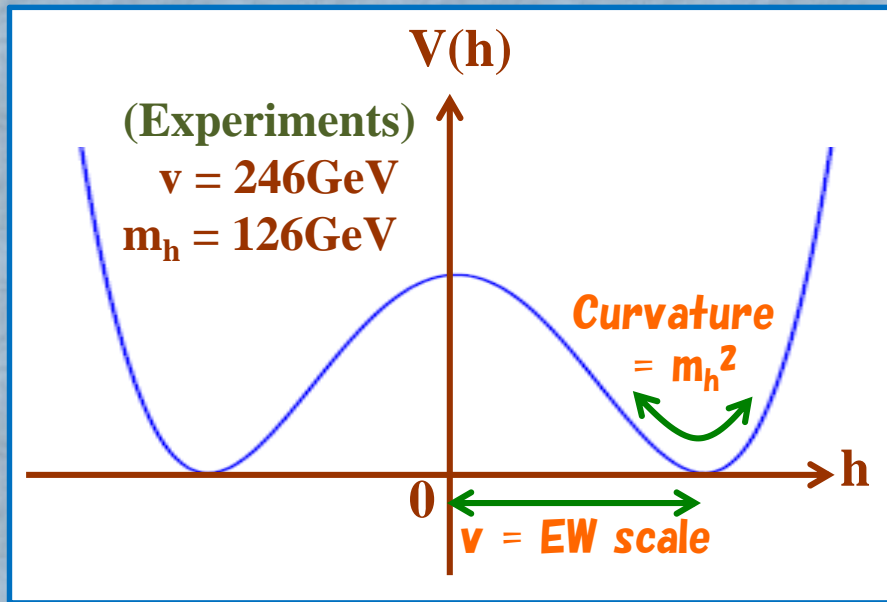
まとめ

- 何故電弱対称性が破れたのか？そしてそのスケールは何故 100GeV であったのか？は物理学における重大な問題の一つであり、素粒子物理学にとっては、この先**どちらの方向**に議論を進めるべきかの手がかりを与える問題である。またこの問題は**暗黒物質**問題とも密接していると期待されており、暗黒物質の正体解明の観点からも大事である。
- 上記問題を**タックル**するにあたり**ILC**は理想的な環境と与える。



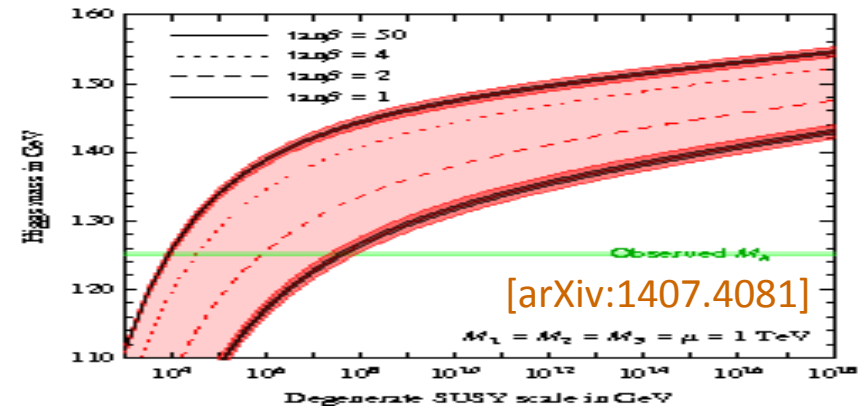
- 電弱対称性の破れ、つまりHiggs粒子の背後にある物理に**タックル**するのだから、**Higgs**を出来るだけ精密に**探査**するのが有効なのは当然。

Higgs mass in SUSY



Relation between v and m_h in SUSY

[Okada, Yamaguchi, Yanagida (1990);
 Ellis et al (1990); Haber et al (1990)]

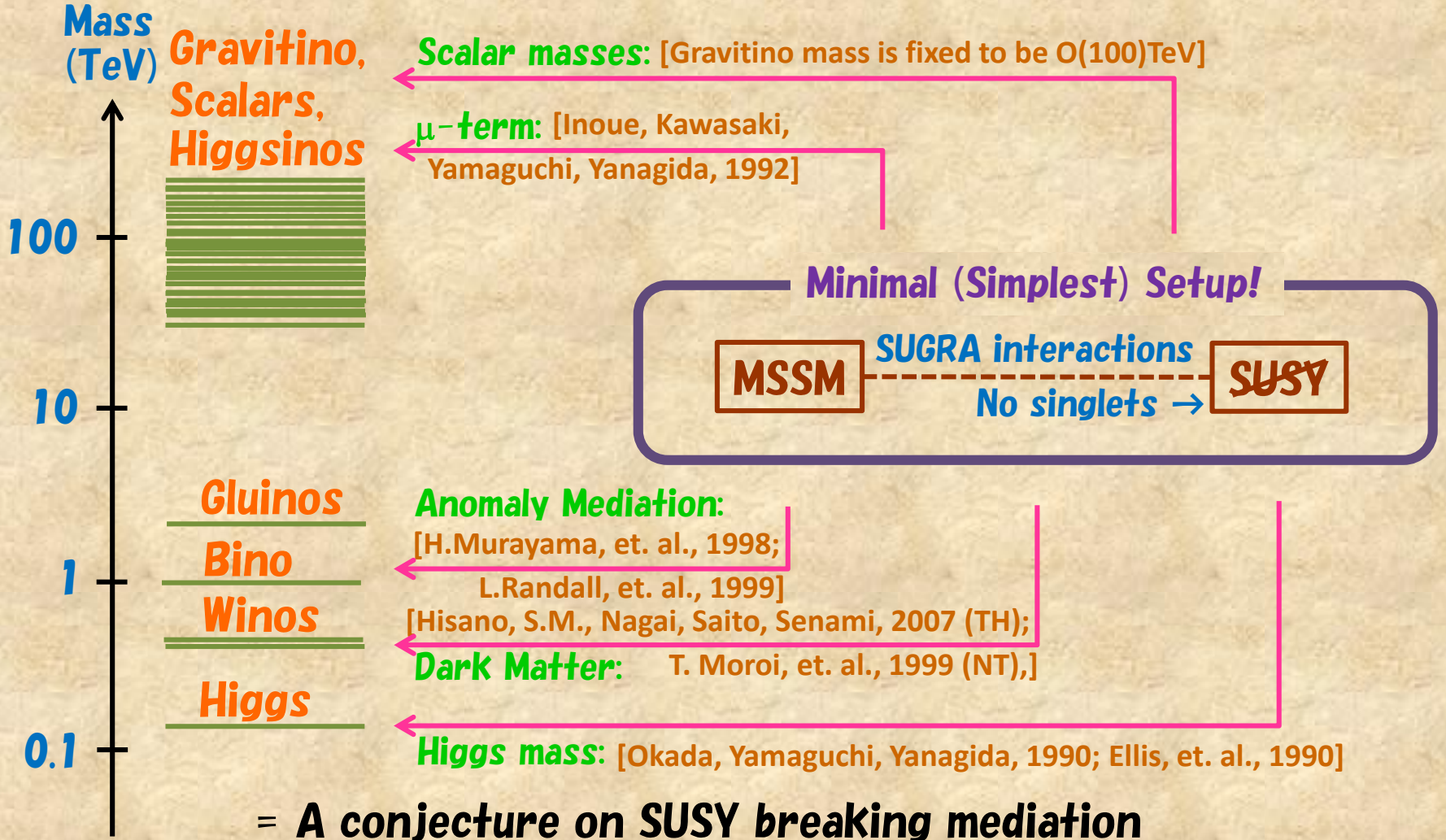


ILC can determine couplings in a model independent way

- $\sigma \times \text{BR}$ measured in each mode
- σ measured from recoil mass, namely, $e^-e^+ \rightarrow H Z \rightarrow X \mu^- \mu^+$.
- Total width of H obtained by $e^-e^+ \rightarrow \nu\nu H \rightarrow \nu\nu W^-W^+$.
 ($\sqrt{s} > 350 \text{ GeV}$ is crucial.)

AMSBシナリオ

~ Pure Gravity Mediation Model ~



[Ibe, Moroi, Yanagida (2007), Ibe, Yanagida (2011), Ibe, Matsumoto, Yanagida (2012)]

Heavy Wino DM search

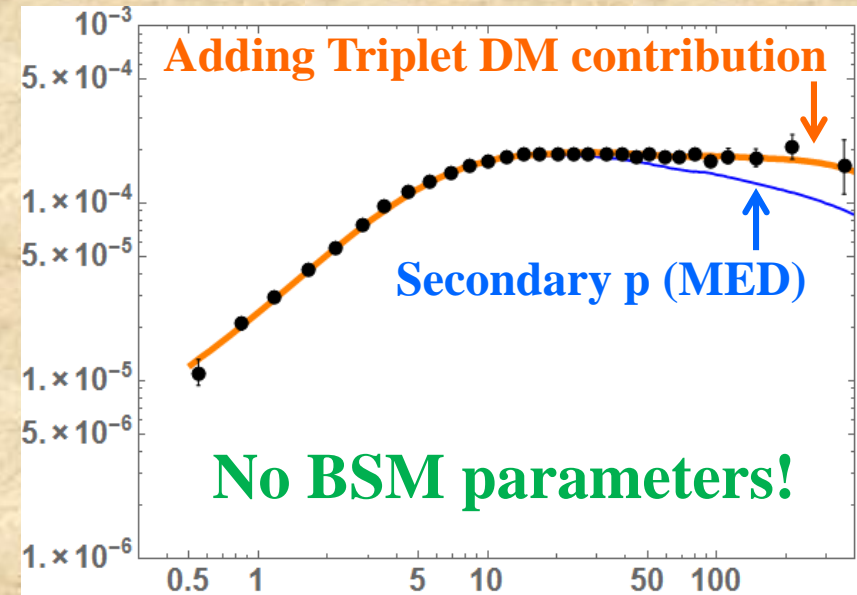
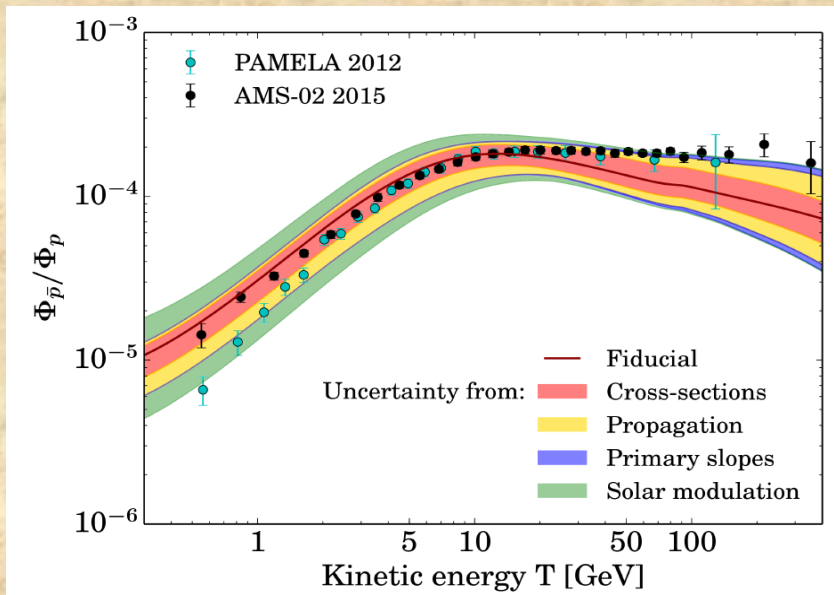
TeV scale thermal WIMP (DM relic abundance only from $\Omega_{\text{TH}} h^2$):

- When DM is from a $SU(2)_L$ doublet, its mass is predicted to be 1TeV.
- When DM is from a $SU(2)_L$ triplet, its mass is predicted to be 3TeV.



None of current & near future collider experiments can access the DM. Only DM indirect detection experiments have a possibility to detect it.

A hint of the TeV scale WIMP from the AMS-02 anti-p/p data?:



If this is true, we need the CLIC or the 100TeV collider!

素粒子現象論の動向：LHC前から後へ

～ Personal thoughts on theoretical studies of new physics models ～

Before LHC (1st run)

After LHC (1st run)

Technicolor (TC/ETC)

Technicolor (TC/ETC)

Extra-dimension (GHU)

Extra-dimension (GHU)

String people

Flat land (Just SM)

Composite Higgs (CompH)

Composite Higgs (CompH)

Supersymmetry (SUSY)

Supersymmetry (SUSY)

Something new

SUSY becomes very attractive for those who study its cosmology seriously!