

高エネルギー加速器によって拓く 素粒子物理学の次の展開

ヒッグス場の精密測定から
新物理の直接探索へ

「リニアコライダー計画」

石野 雅也 （東大 素粒子センター）

© NASA

元々

宇宙の最小構成要素：「素粒子」は何か？
その間（素粒子間）に働く「力」は何か？

展開

いかに宇宙は始まったか？

究極

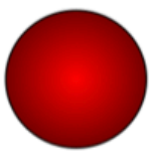
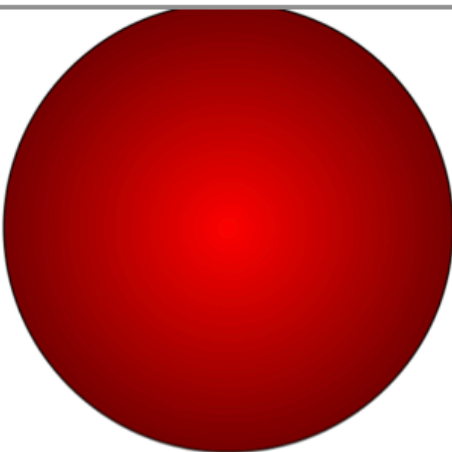
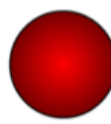
なぜ「そう」なっているか？

ということまで知りたい

（神の領域を科学する？）

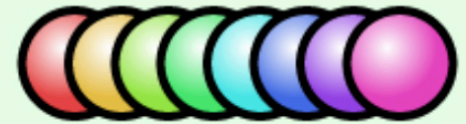
物質の最小構成要素としての

フェルミ粒子

I	II	III
Up Quark ~ 0.002 GeV  	Charm Quark 1.25 GeV  	Top Quark 175 GeV  
Down Quark ~ 0.005 GeV Electron 0.0005 GeV  	Strange Quark ~ 0.095 GeV Muon 0.105 GeV  	Bottom Quark 4.2 GeV Tau 1.78 GeV  
Electron Neutrino ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0

相互作用を媒介する存在としての

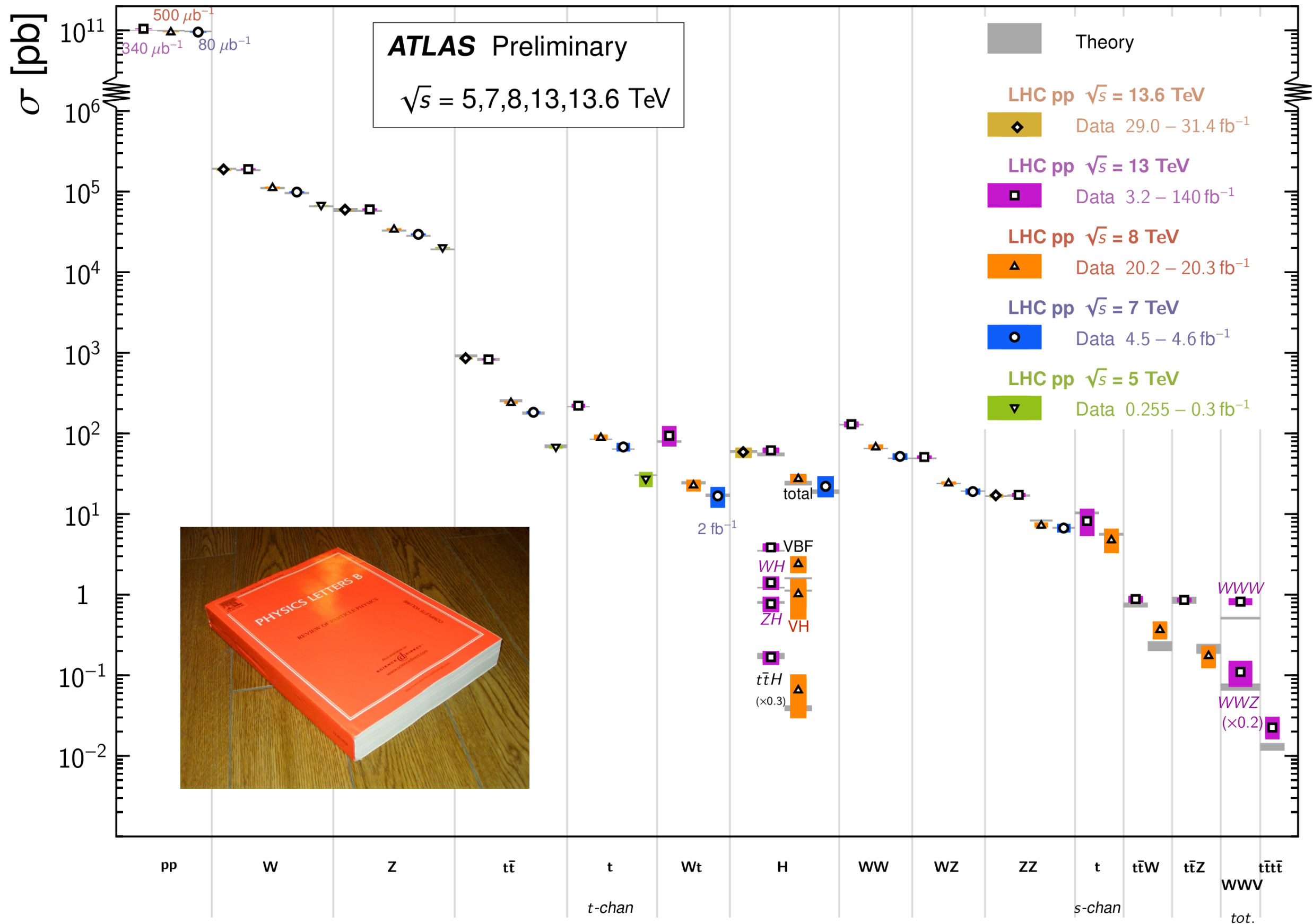
ゲージ粒子

電磁気力 electromagnetic	 γ : photon
強い力 strong	 g : gluon
弱い力 weak	 Z^0 : Z boson  W^+ : W^+ boson  W^- : W^- boson

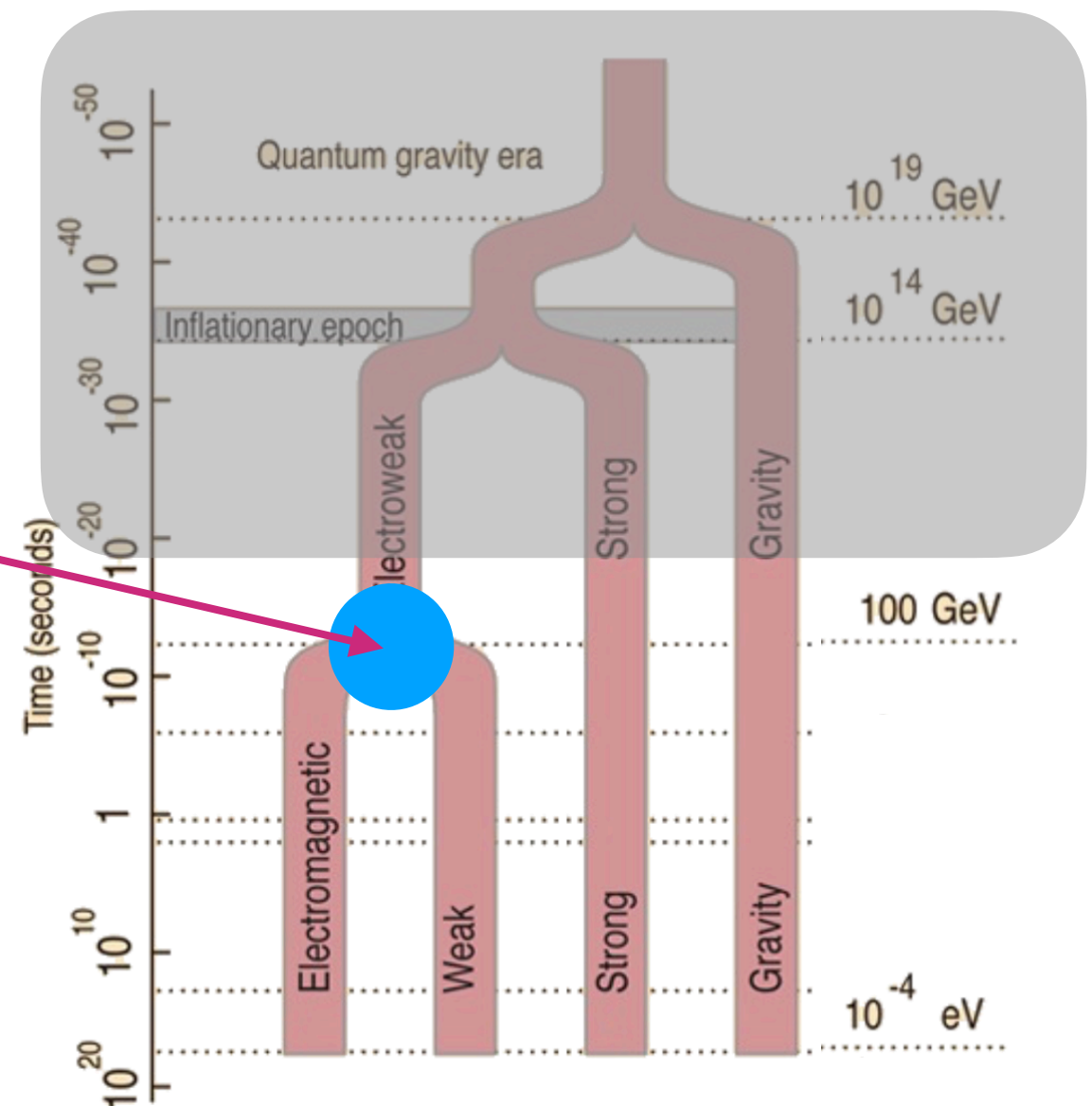
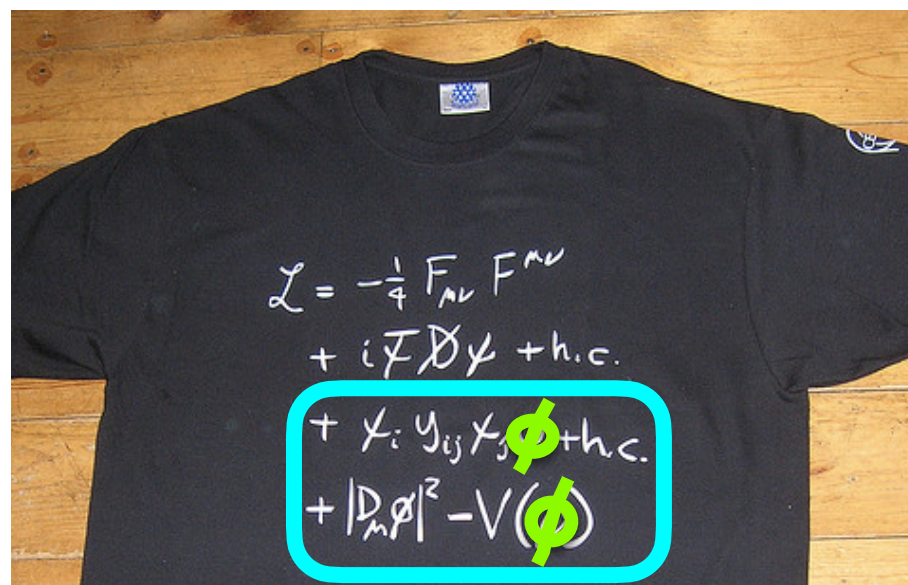
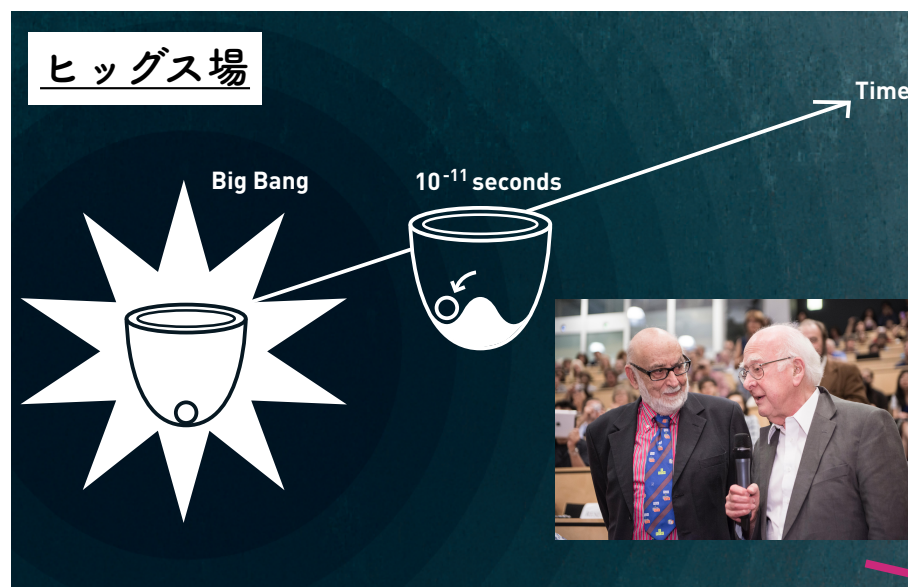
ゲージ対称性 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

これを課して理論を構築したら、（なんだかよくわからないけれど?）

自然現象を、（すくなくとも EW scale までは、）うまく記述できてしまう



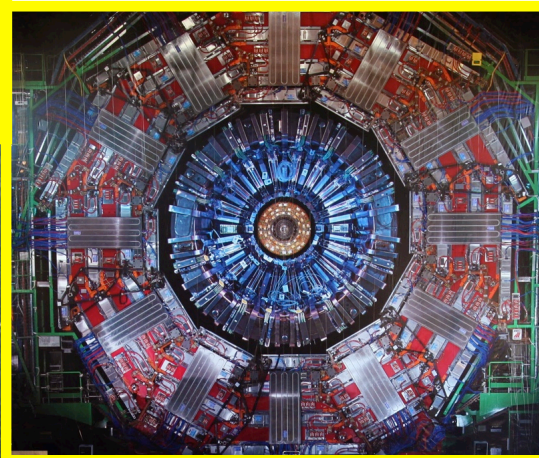
- 宇宙の冷却 →
- ・ 電弱対称性の破れ
 - ・ ヒッグス場の性質の変化
(真空期待値 $\neq 0$)



CERN提供

LHC加速機

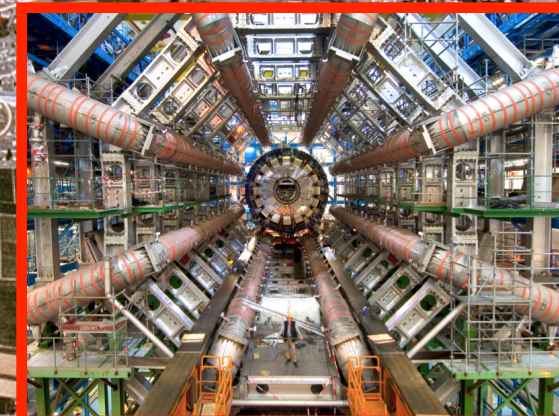
CMS



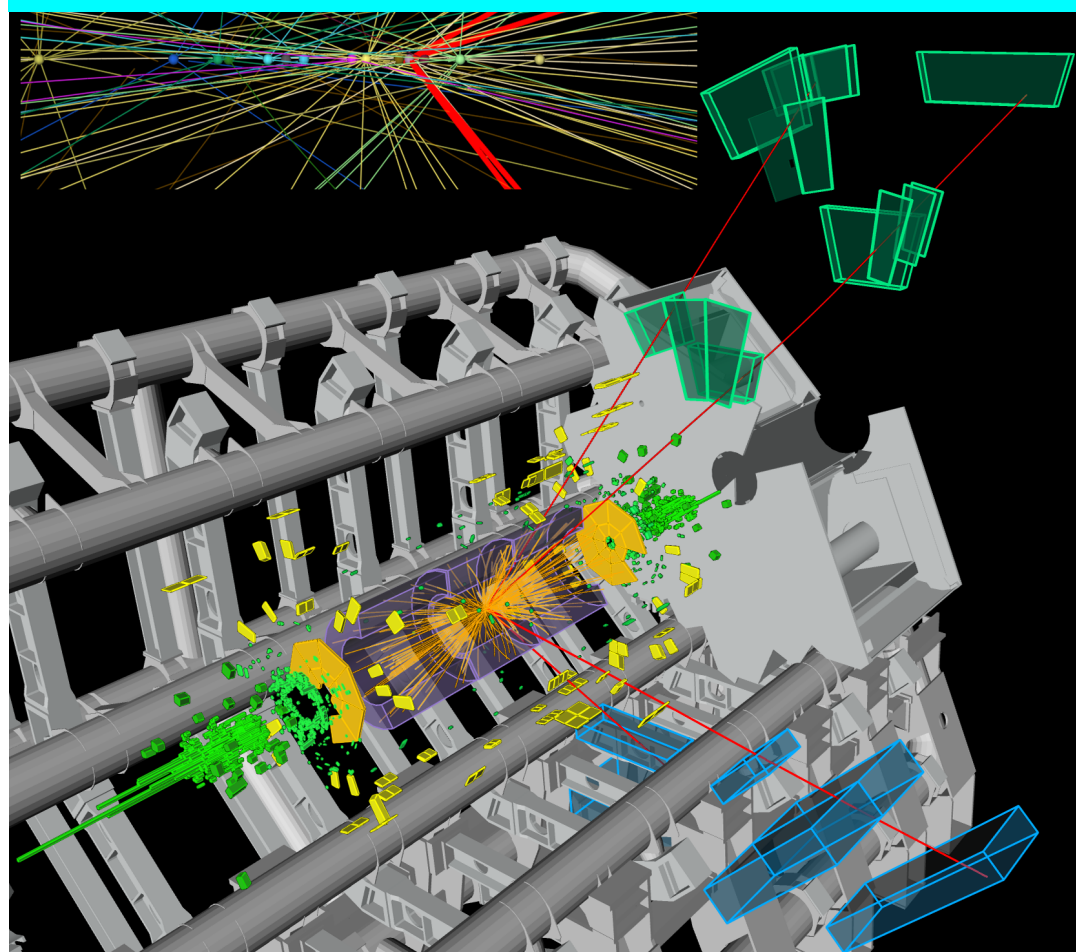
LHCb

ALICE

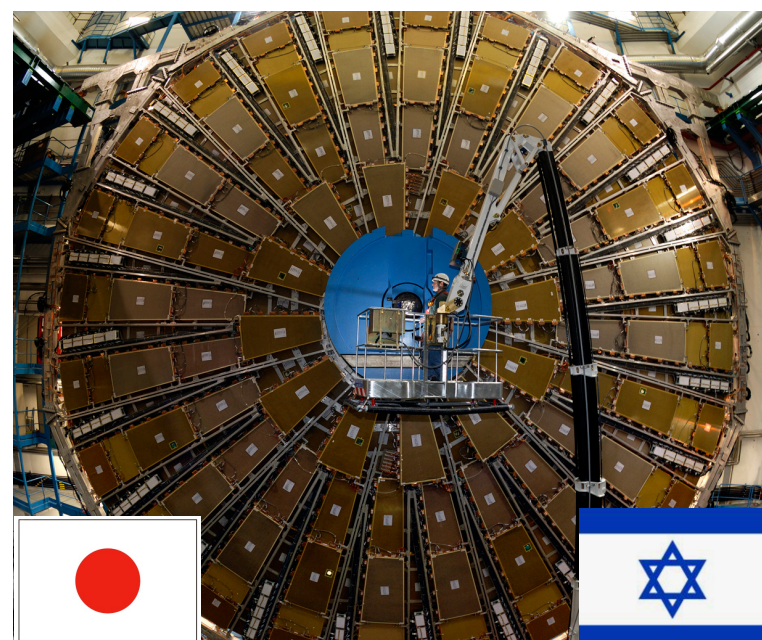
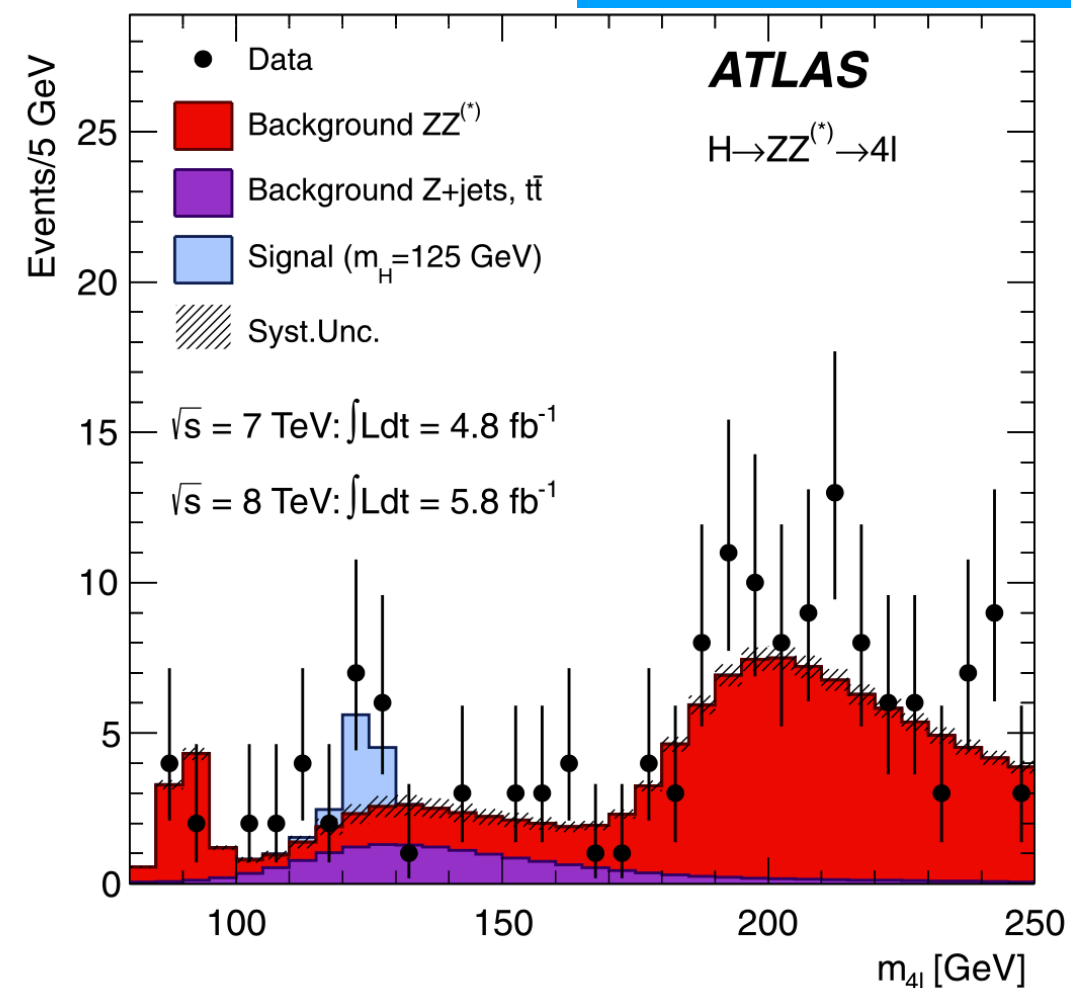
ATLAS



Higgs $\rightarrow 4\mu$ イベント



2012 Summer

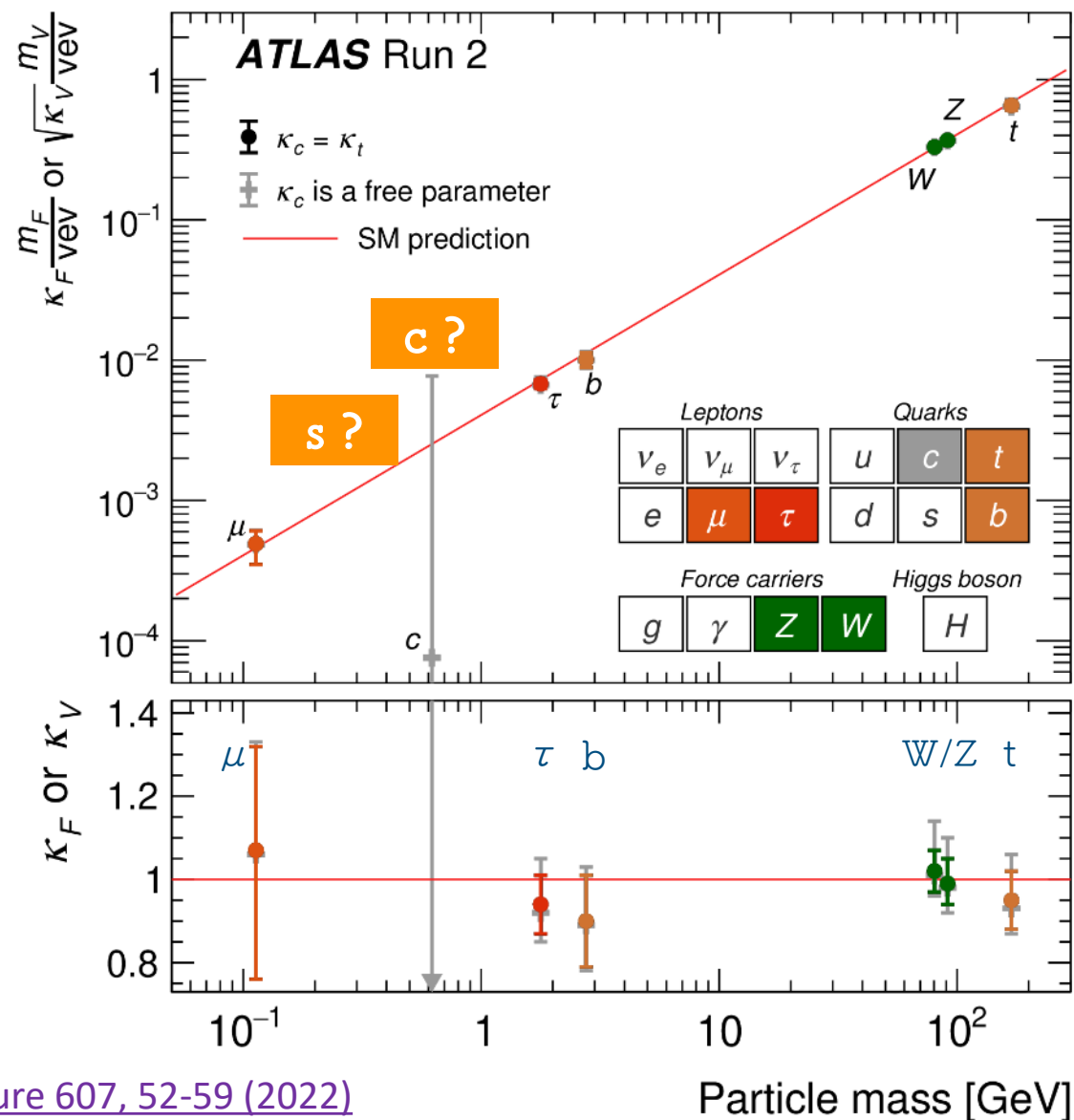


7+8TeV	4 μ	2 μ 2e	4e
BG	1.3 ± 0.1	2.2 ± 0.2	1.6 ± 0.2
DATA	6	5	2
Signal $m_H = 125\text{G}$	2.1 ± 0.3	2.3 ± 0.3	0.9 ± 0.1

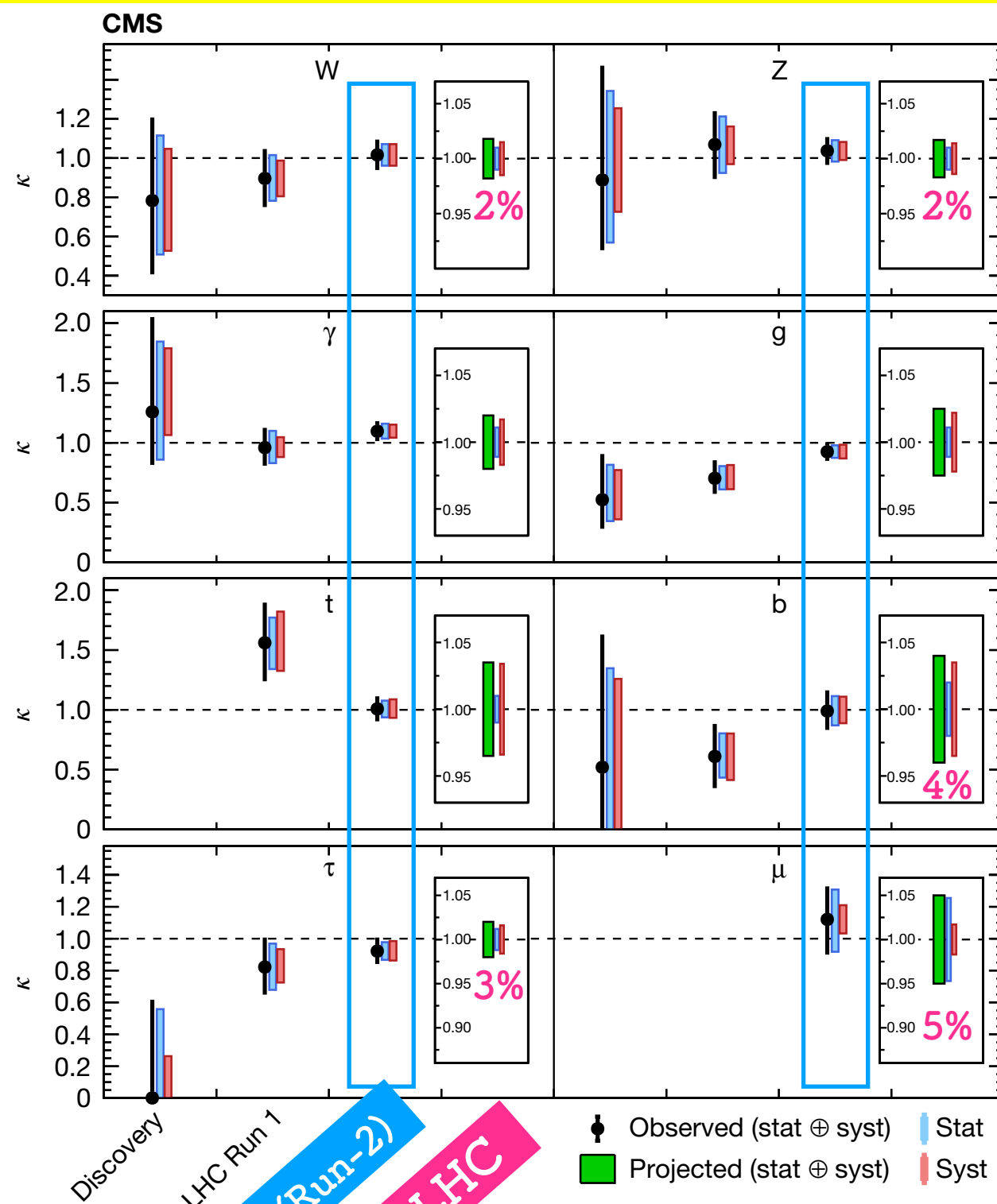
8 Higgs: Coupling Constant 測定精度 (現在までの到達点)

現在：LHC-Run2 全データ (2015-18)

エラーの範囲で 標準理論とコンシステント



[Nature 607, 52-59 \(2022\)](#)



[Nature 607, 60-68 \(2022\)](#)

精度が足りない、まだ足りない！
高輝度-LHCでも、多分まだ不足

○(10% 程度) →

HL-LHC
2-5%

[A] 高いエネルギーで粒子を衝突させて直接測定

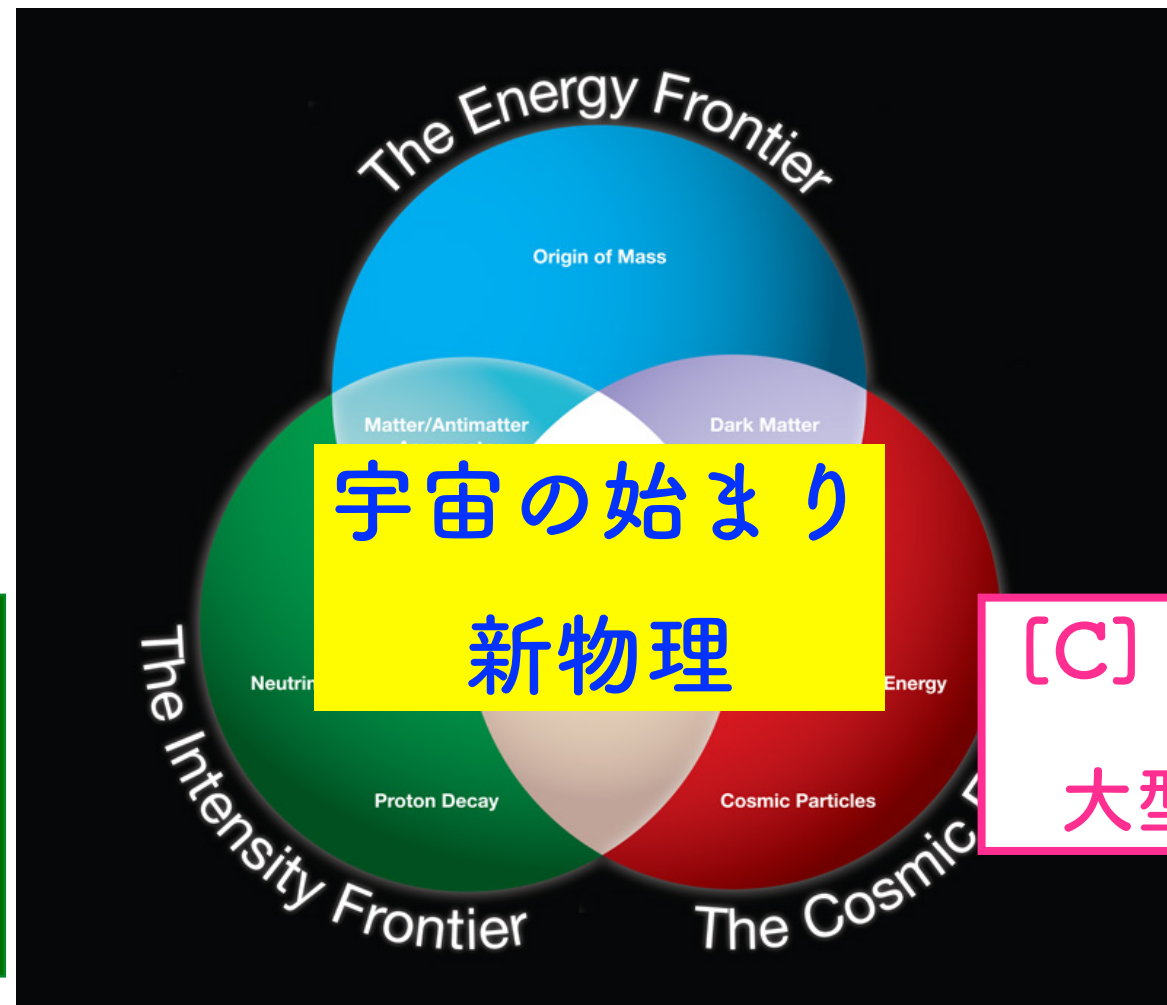
LHC : 14TeV (→ e.g. 将来計画 FCC-hh : 100TeV / Energy拡張 LC : 3TeV)

[B] 高強度ビーム "等" で
稀に起こる現象を精密測定

J-PARC, B-Factor, 神岡

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim (1/2) \hbar$$

- ・ 不確定性原理 を利用
- ・ 稀に起こる高エネルギー現象を捉える
(新粒子の効果)



[C] 遠い宇宙を見る

大型望遠鏡/CMB

→ 前人未到のフロンティアの開拓
新発見の可能性を最大化

[A] 高いエネルギーで粒子を衝突させて直接測定

LHC : 14TeV (→ e.g. 将来計画 FCC-hh : 100TeV / Energy拡張 LC : 3TeV)

[A] っぽい

次世代 LC
(Energy拡張)

[B] っぽい

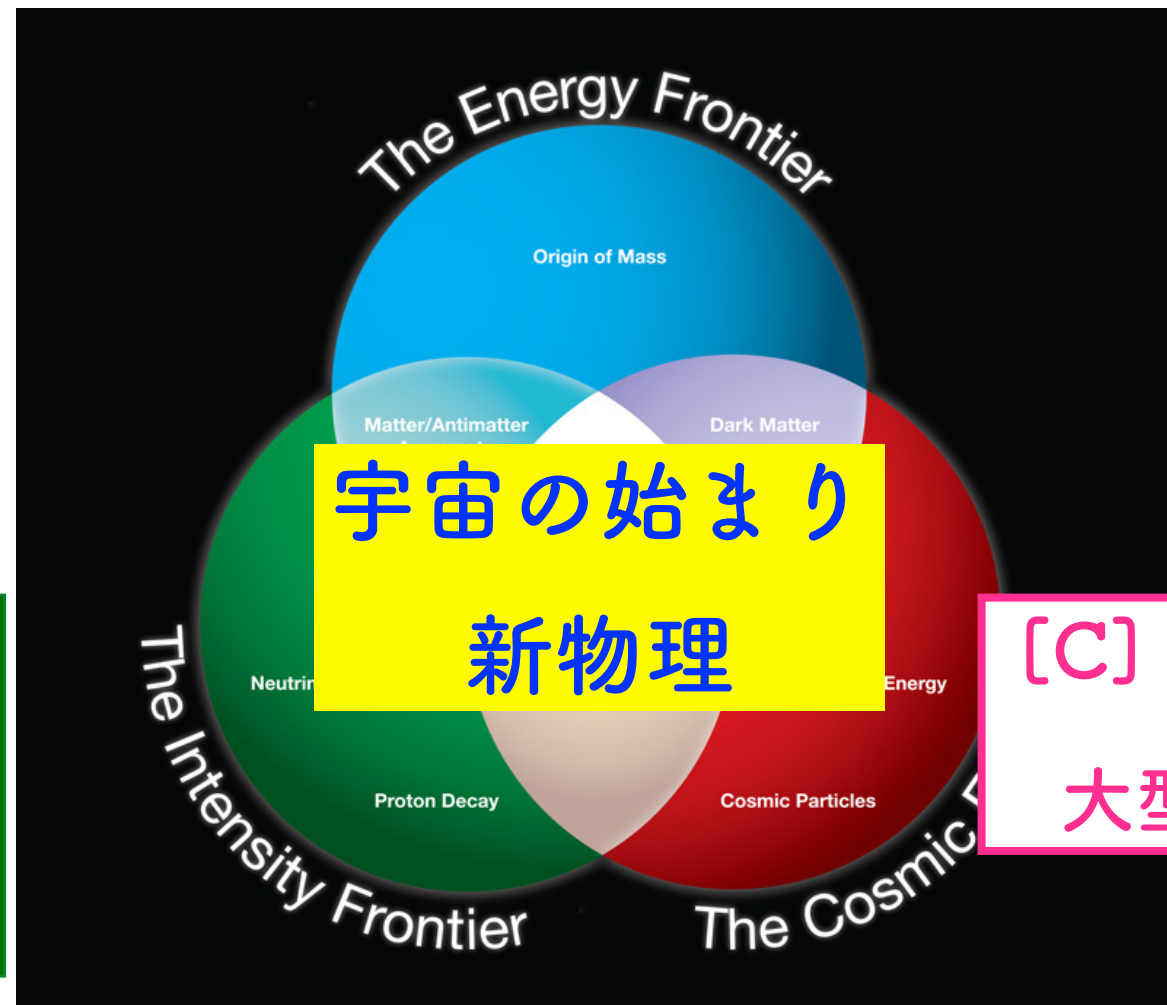
LC (ILC250)
超伝導RF

[B] 高強度ビーム "等" で
稀に起こる現象を精密測定

J-PARC, B-Factor, 神岡

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim (1/2) \hbar$$

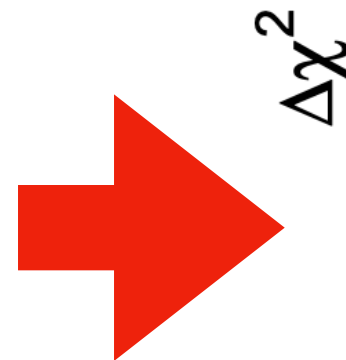
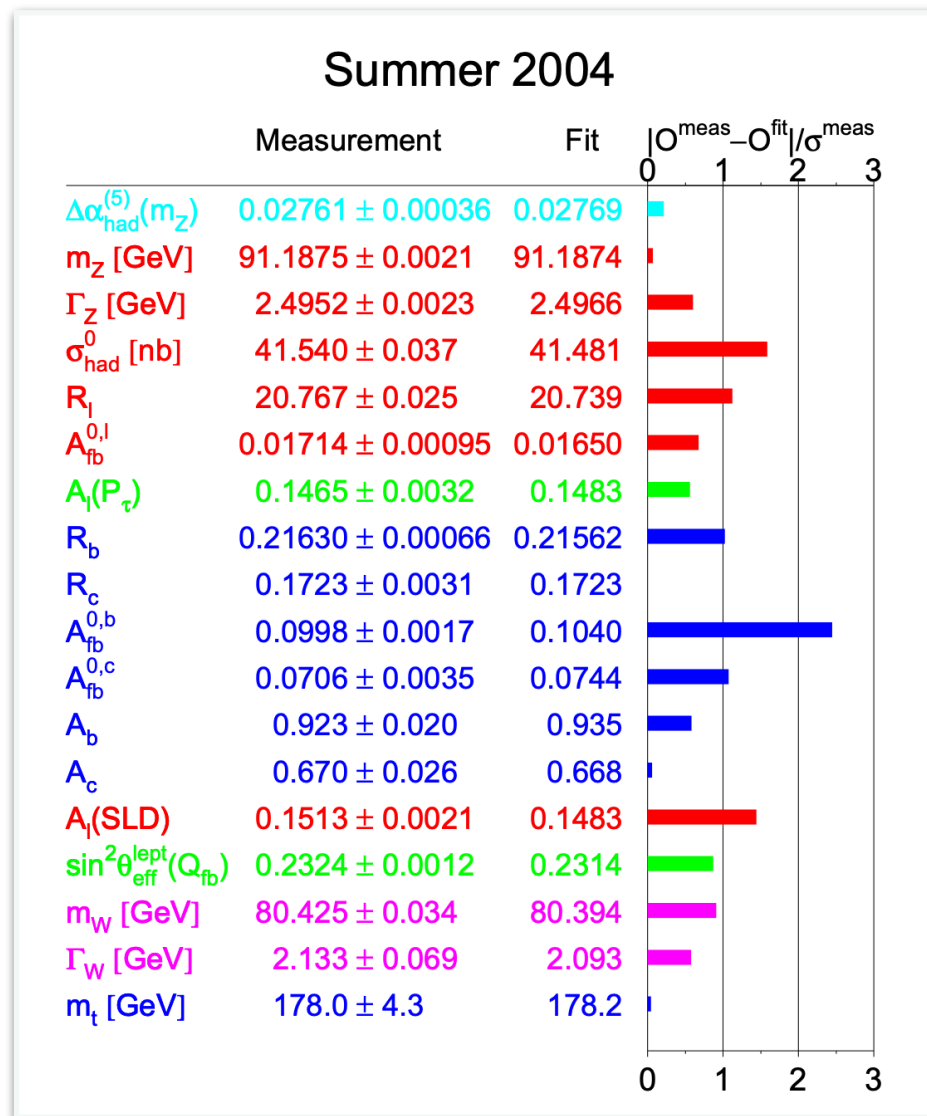
- ・ 不確定性原理 を利用
- ・ 稀に起こる高エネルギー現象を捉える
(新粒子の効果)



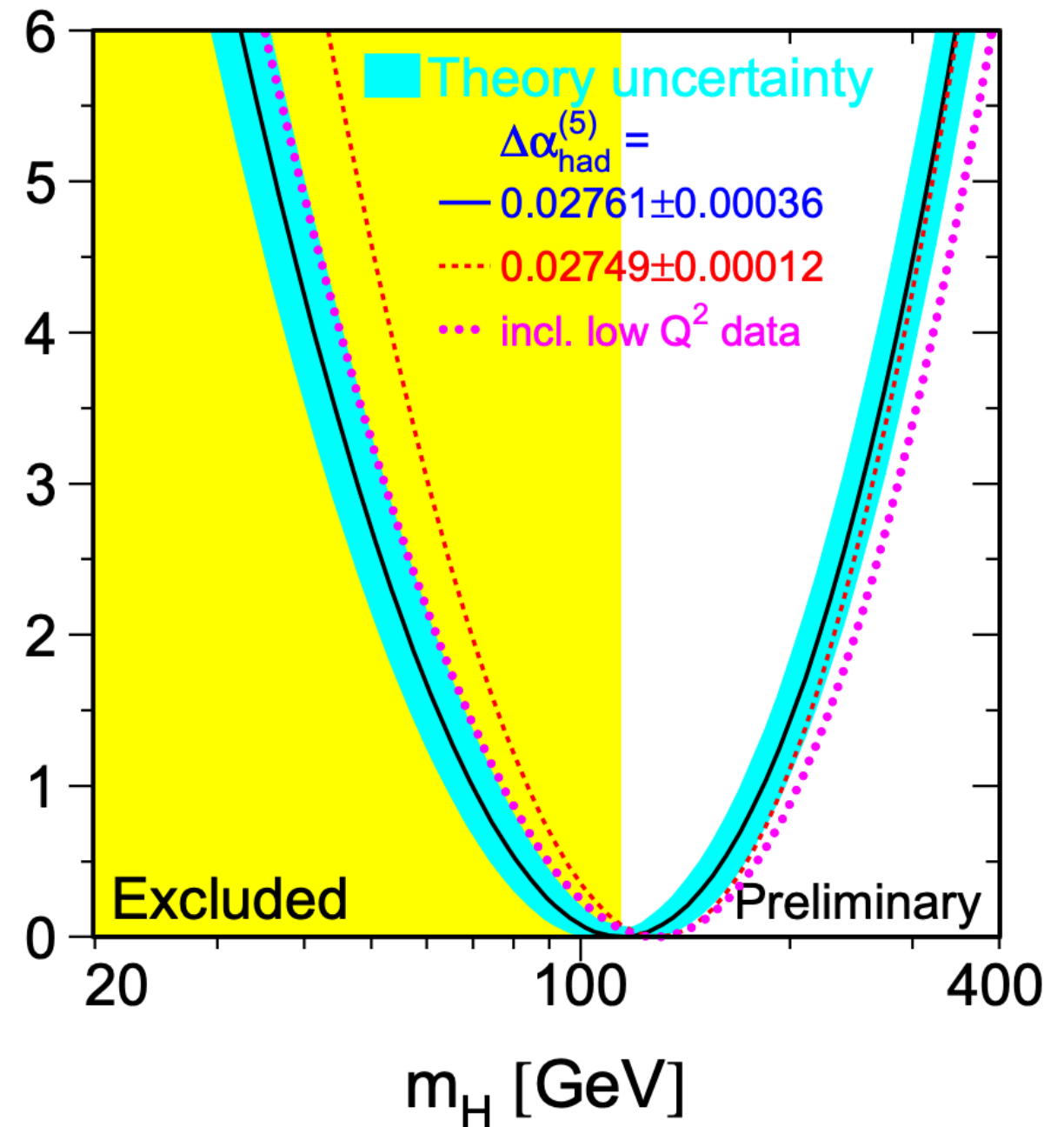
[C] 遠い宇宙を見る
大型望遠鏡/CMB

→ 前人未到のフロンティアの開拓
新発見の可能性を最大化

e^+e^- コライダー: LEP-I / LEP-II
 精密測定の結果を入力にして



1990年代後半 - 2010頃
 よく見たプロット



&

素粒子の標準模型が正しいと信じて
 Higgs Massを予測する

本当に、Higgsは その辺りにあった (w/ LHC)

精密測定で狙いを定める → 無駄なく次のステップ

日本の素粒子物理 研究者の将来計画 (2025)

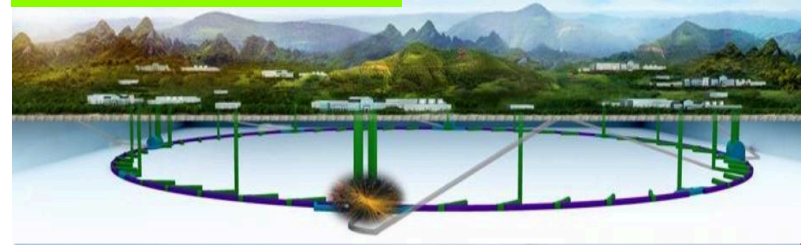
- 世界的な協力の下でのHiggs Factoryを早期実現することが素粒子実験業界にとって「超重要」
- Global Projectとして ILCの実現をパートナー国の協力のもとリードして、ILC in JPNを実現する
- 他のHF計画についても包括的に取り組み、ヒッグスファクトリーの実現可能性を最大化させる。

- We prioritize efforts to realize the ILC as Global Project, taking a leading role in advancing ongoing initiatives. We will engage with international partners to discuss governance, responsibilities, and site selection. We intend to develop and expand our scientific and promotional activities to host the ILC as Global Project in Japan.
- We also extend our activities in other Higgs factory proposals as a collective approach to maximize the chances of timely realizing a Higgs factory.

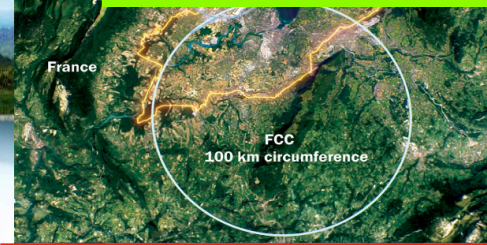
2013, 2016: China Xiangshan Science Conference concluded that **CEPC is the best approach** and a major historical opportunity for the national development of accelerator-based high-energy physics program.

中国
(2013)

CEPC (中国)



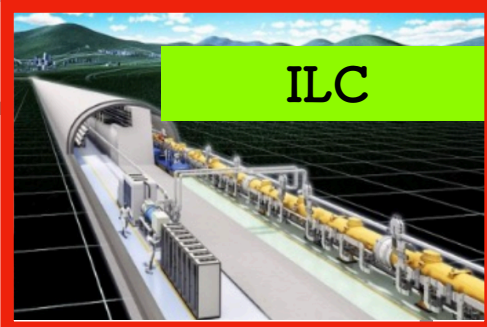
FCC (CERN)



2017: Japan Association of High Energy Phys. (JAHEP) proposes to construct **A 250 GeV center-of-mass electron-positron collider of mass ILC promptly as a Higgs factory.**

日本
(2017)

ILC



2020: European Strategy for Particle Physics, **An electron-positron Higgs factory is the highest priority next collider.** For the longer term, the European particle physics community has the ambition to operate a proton-proton collider at the highest achievable energy.

ヨーロッパ
(2020)

- Higgs Factoryを作って、
- 精密測定をして、

2022, ICFA “reconfirmed the international consensus on the importance of **a Higgs factory as the highest priority for realizing the scientific goals of particle physics**”, and expressed support for the above-mentioned Higgs factory proposals

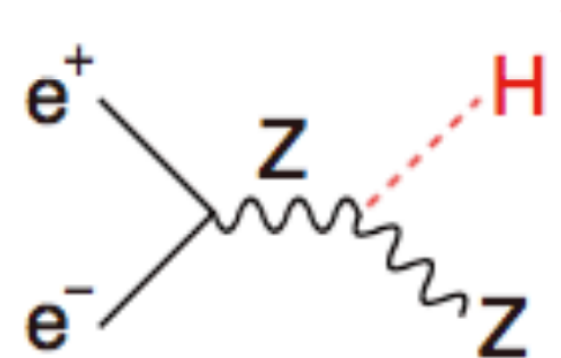
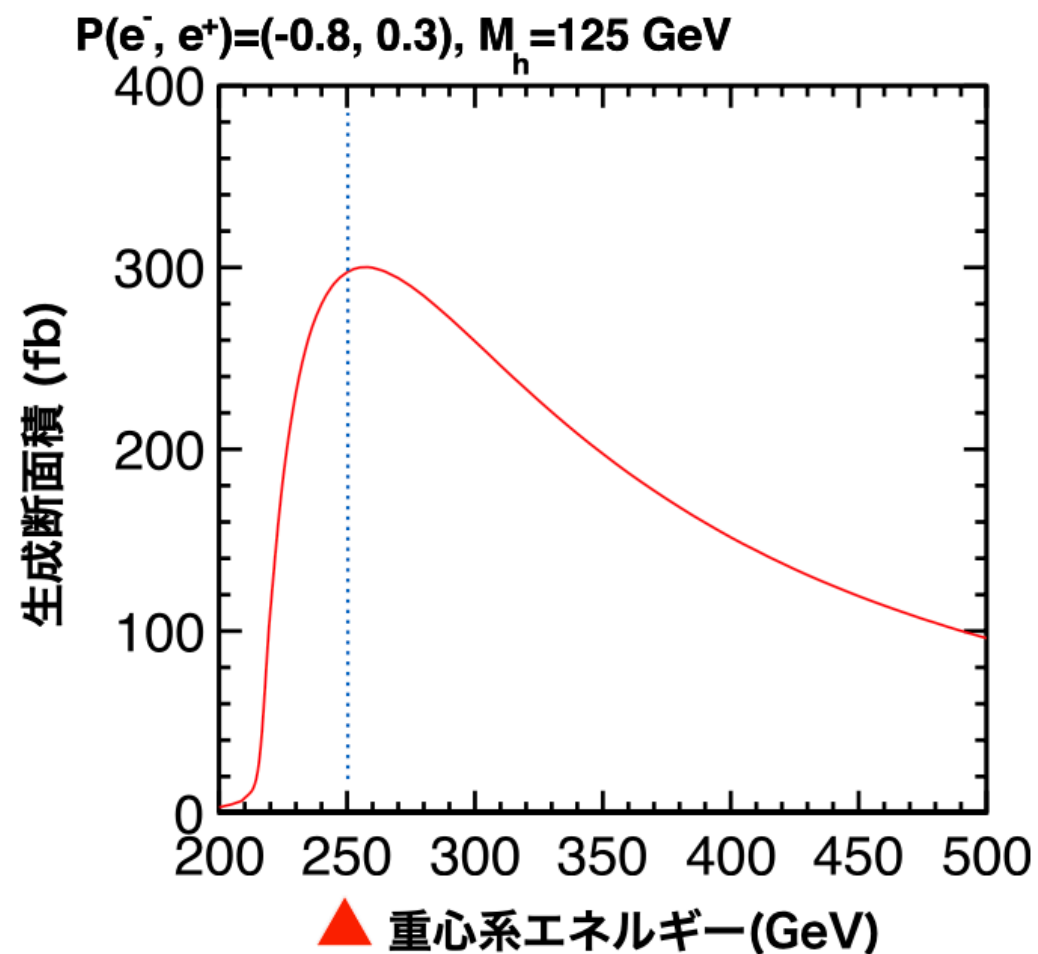
ICFA
(2022)

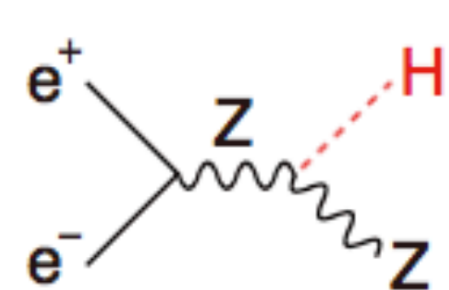
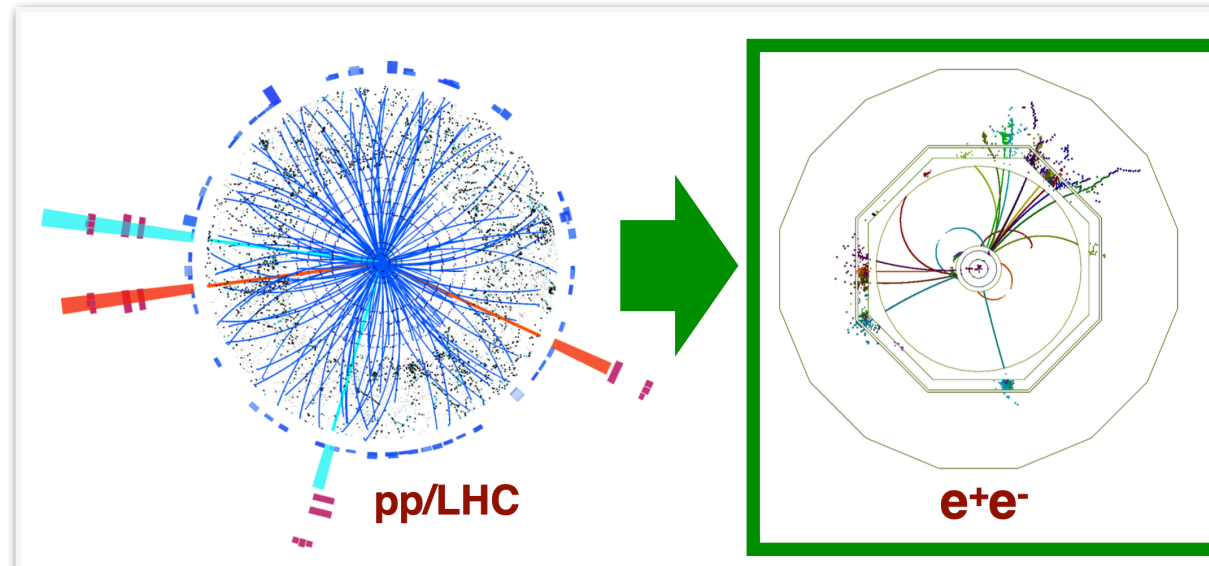
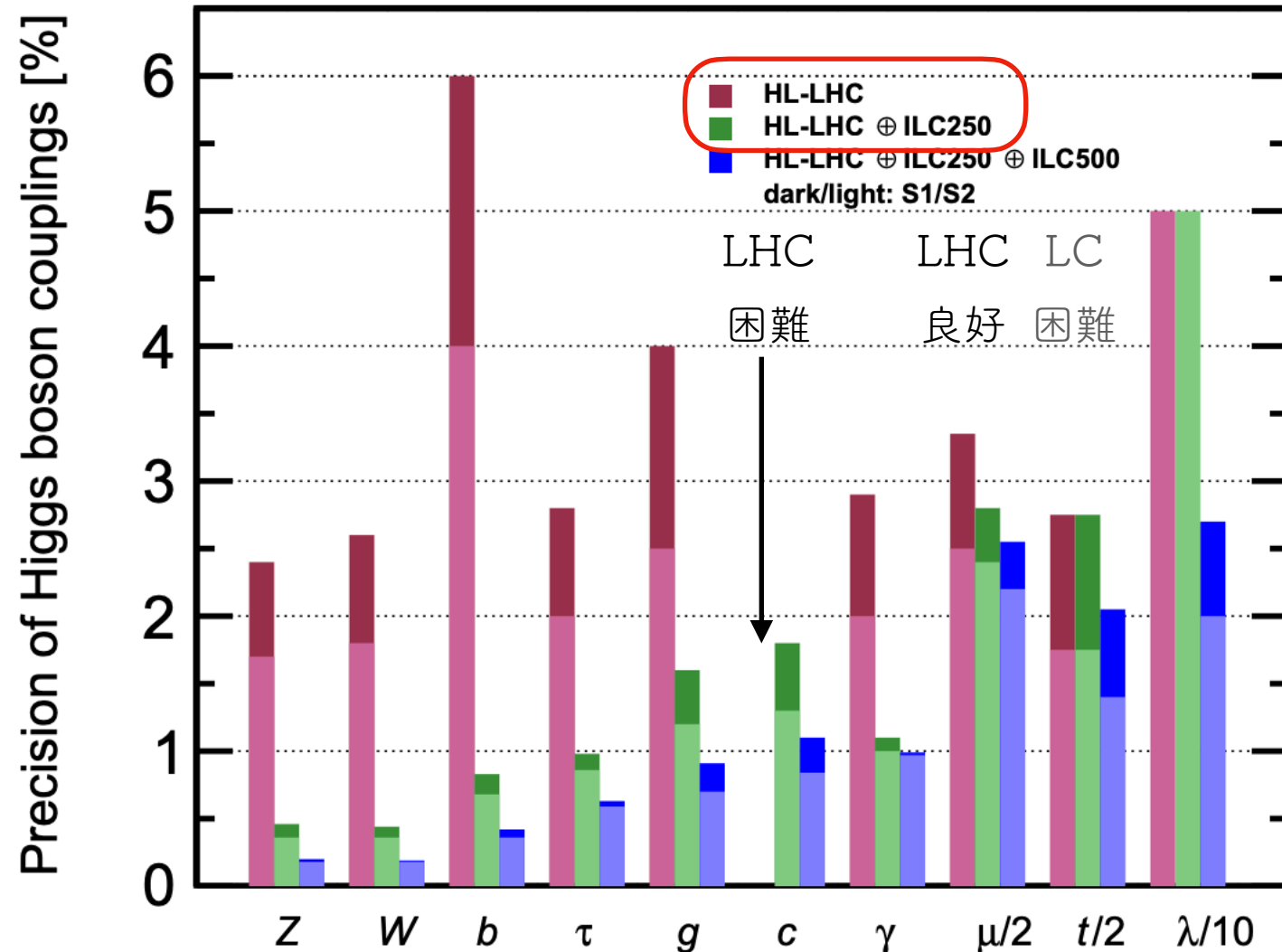
→ EW Scaleより上の物理の示唆を得る
初期宇宙の物理の示唆を得る

(質量階層性問題, Dark Matter, 真空の安定性, 物質優勢の宇宙, etc. ... **解決のヒントを得る期待感**)

Higgs Factoryの物理

$\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ での物理

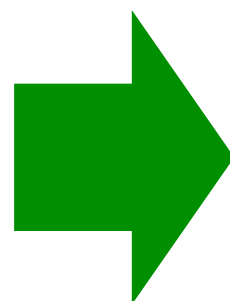




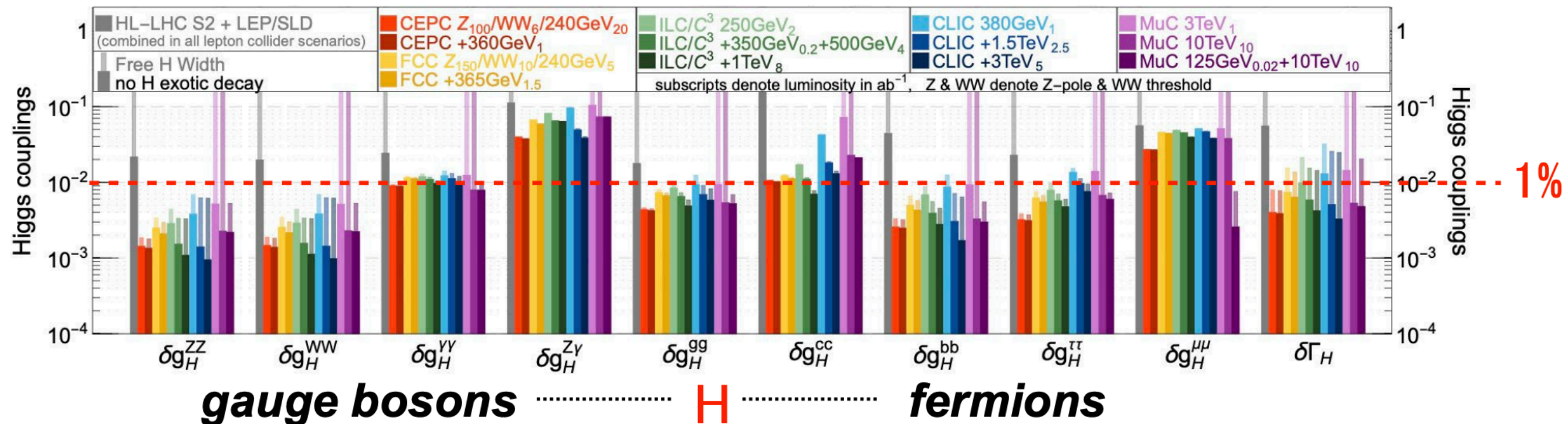
$$\kappa = g_X / g_X^{\text{SM}} = 1 + \Delta\kappa$$

$$\Delta\kappa \sim O(v^2/\Lambda^2)$$

例えば、1TeVに新物理
 $\rightarrow \sim 6\%$ のズレとして表出



この差異を捉えて、新しい物理の
 正体を察するには、HFが必要



情報の読み取り方： (カラフルすぎて見にくいと思いますが...)

- **CEPC (オレンジ)** // **FCC (黄色)** // **ILC (緑色)** どれでも 精度 ~1% or better
- (**HL-LHC (灰色)** に比べて、数倍、あるいは1桁 高精度)

Happyシナリオ：結合定数の測定からNext Stepへ

Higgs真空は（標準模型で仮定している通り）

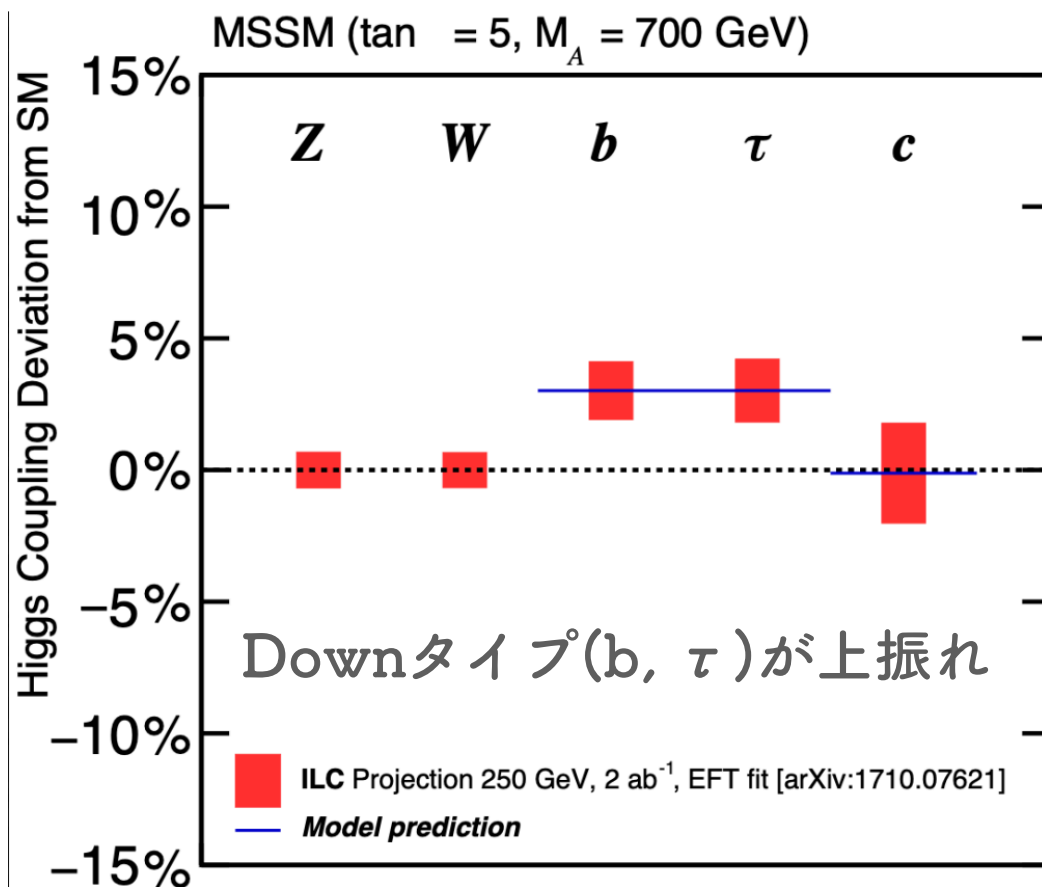
質量だけを見ているのか？

素粒子の持つ別の性質を
感じて結合強さを変化
させていないか？

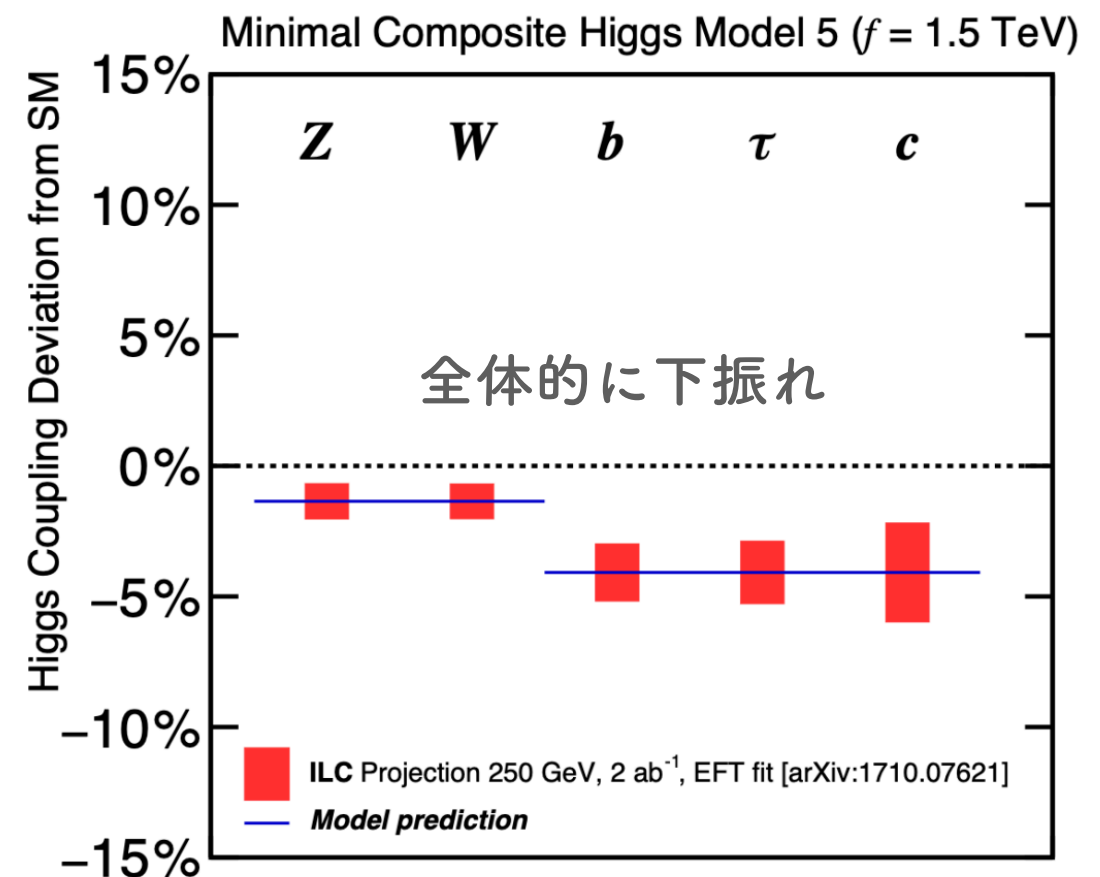


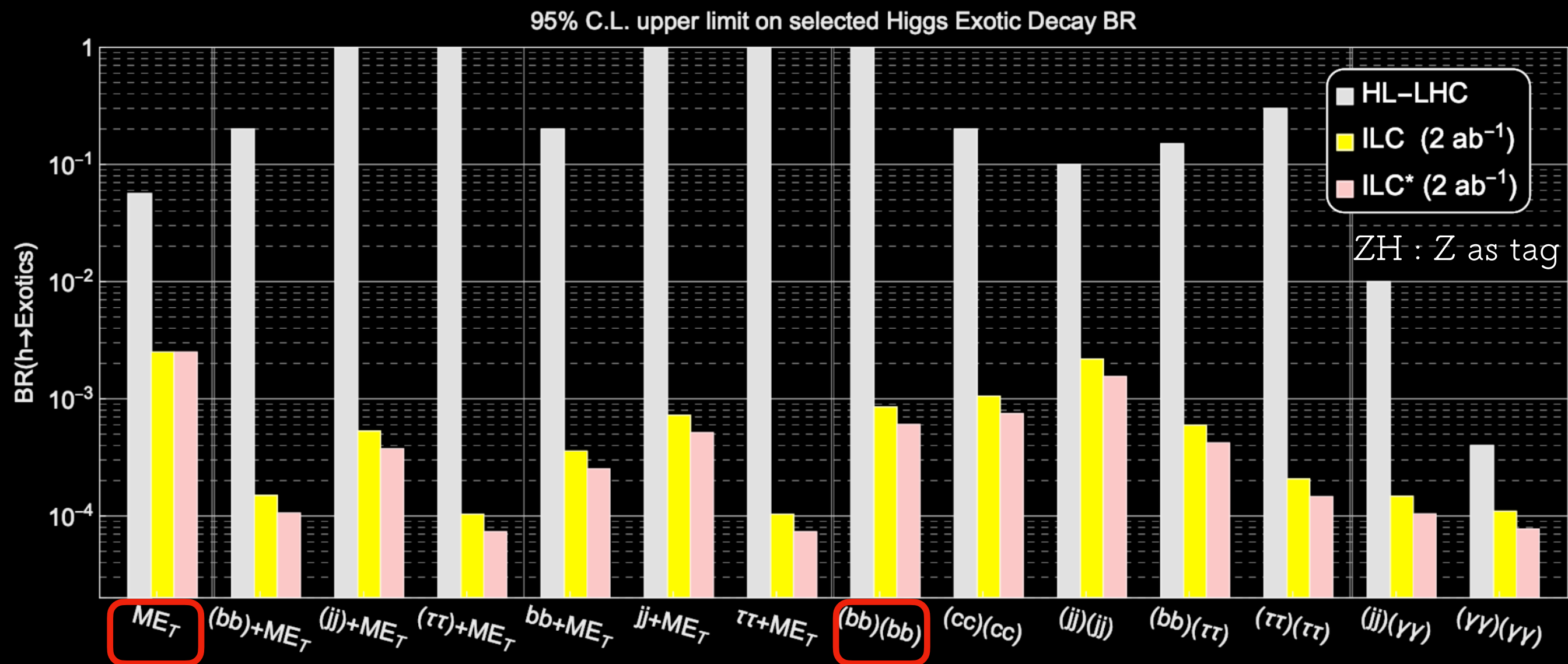
- up v.s. downタイプ
- クォーク v.s. レプトン
- 第2世代 v.s. 第3世代

SUSY (MSSM)



Composite Higgs

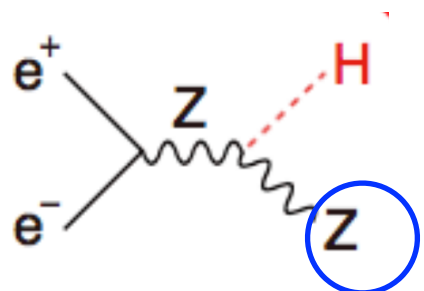




①

Fully Invisible Higgs Decay

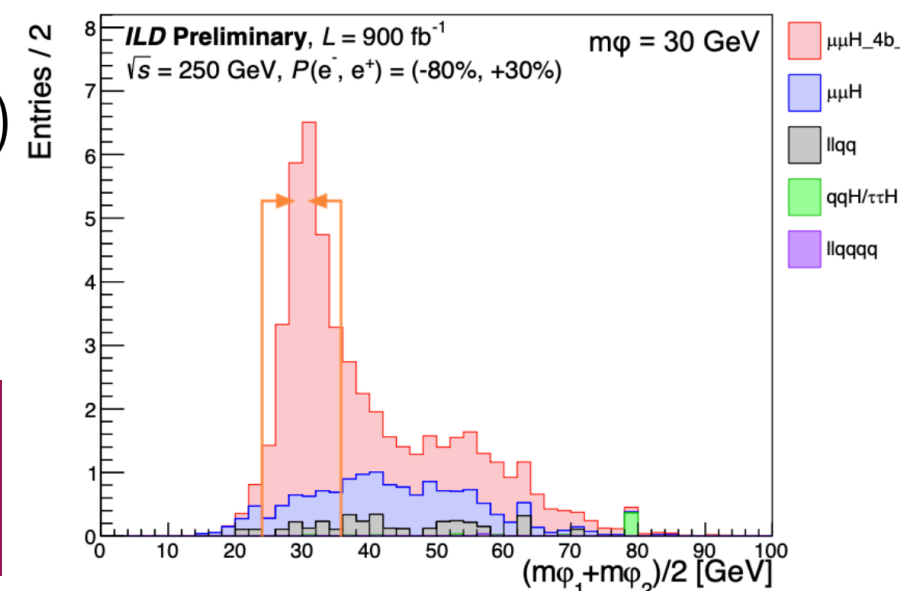
95% CL Br = 0.16%



②

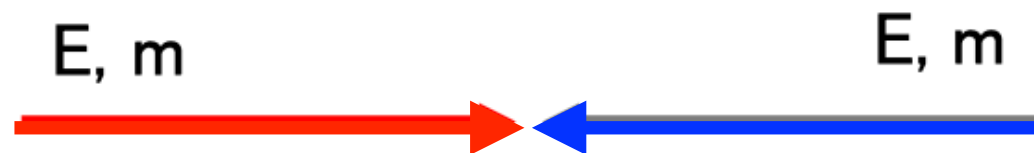
$$H \rightarrow \phi\phi \rightarrow (b\bar{b})(b\bar{b})$$

LHCの人としては「驚愕」というか...
別次元の実験室だなあと実感する



リニアコライダーの特徴

Energy Extendability が 可能にする物理

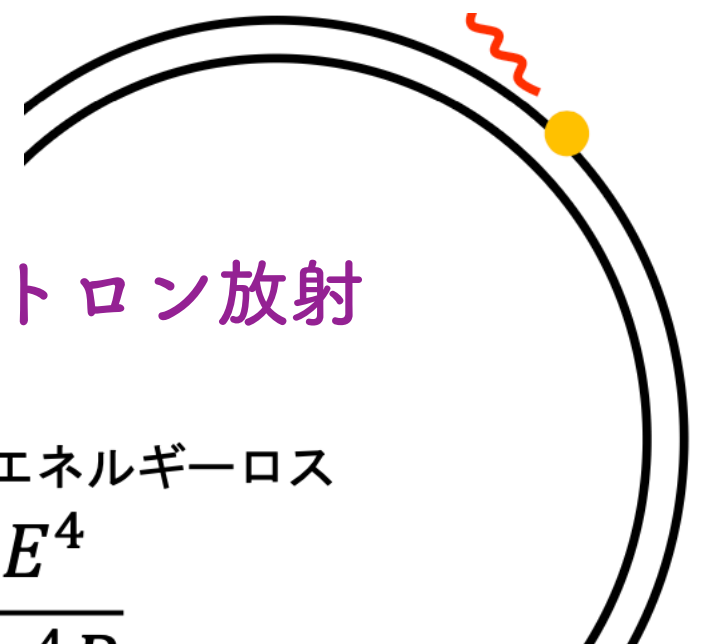


シンクロトロン放射

1周当たりのエネルギーロス

$$\Delta E \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

エネルギーの4乗に比例

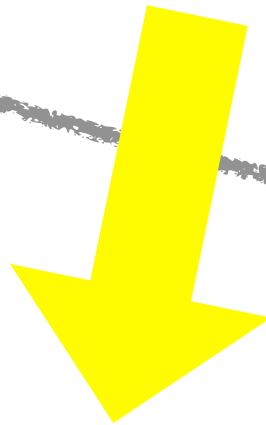


LC - Energy Extendability

125 + 125 GeV

20km , 31.5 MV/m

建設 + 実験 : 25 - 30年。 その間に...
 技術革新 : 特に加速勾配 31.5 MeV/m → ?



$E' + E'$ GeV

加速勾配 $\times N$

$E'' + E''$ GeV

延長 $\times 2$

SMからのズレ

→ $\sqrt{s} = 1$ TeV

→ 4倍を実現する技術

30年後に availableならそれを使う
 不足なら 延長 + 新技術 混在など

[A] 高いエネルギーで粒子を衝突させて直接測定

LHC : 14TeV (→ e.g. 将来計画 FCC-hh : 100TeV / Energy拡張 LC : 3TeV)

[A] っぽい

次世代 LC
(Energy拡張)

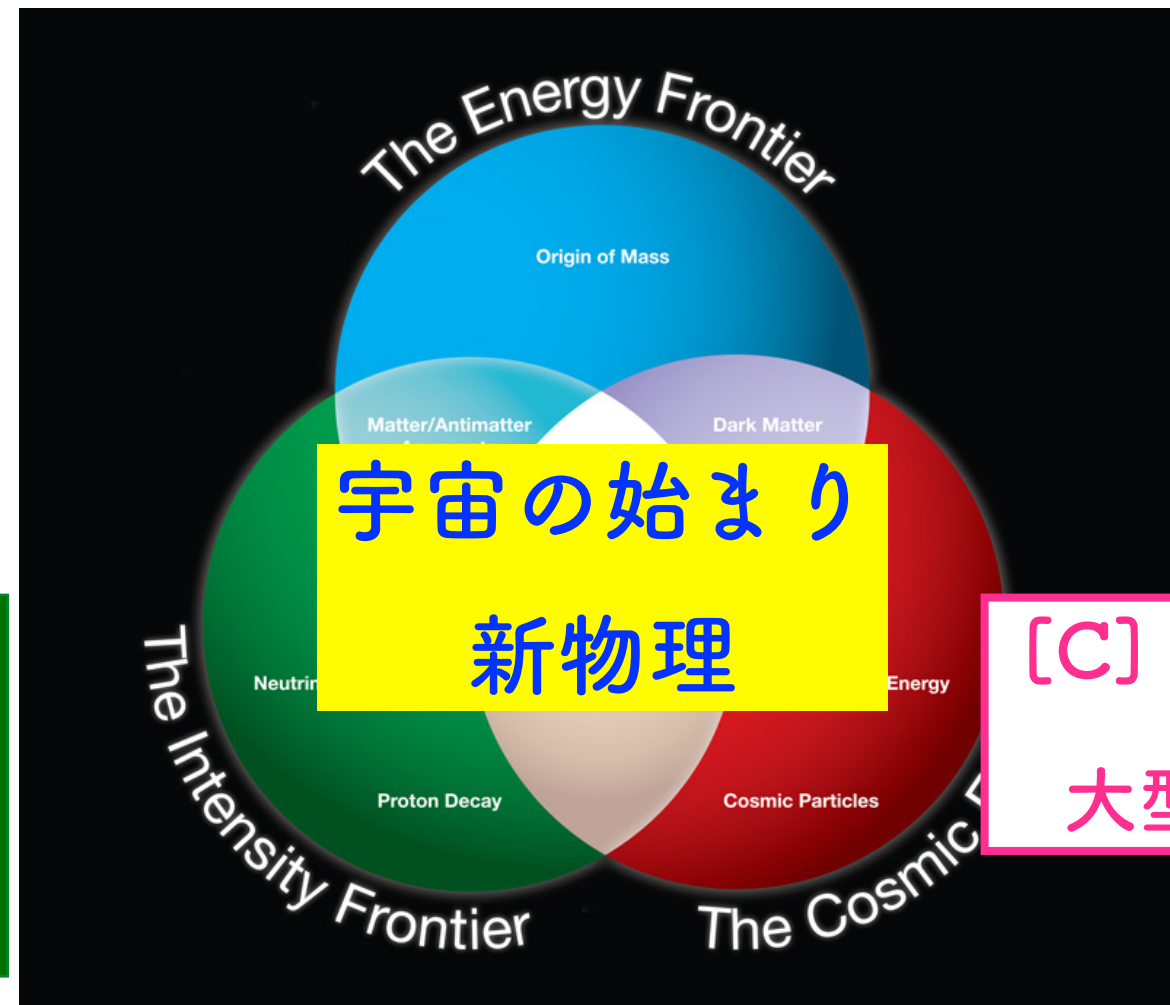
[B] っぽい

LC (ILC250)
超伝導RF

[B] 高強度ビーム "等" で
稀に起こる現象を精密測定

J-PARC, B-Factor, 神岡

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim (1/2) \hbar$$

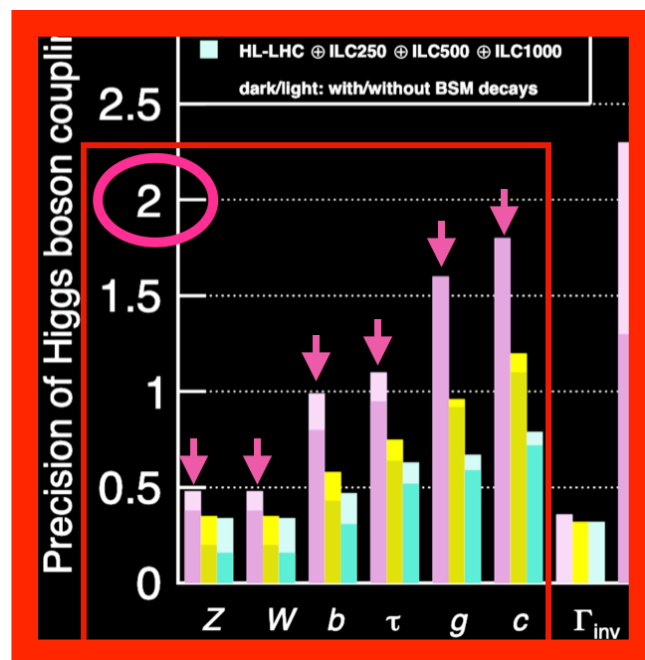


[C] 遠い宇宙を見る
大型望遠鏡/CMB

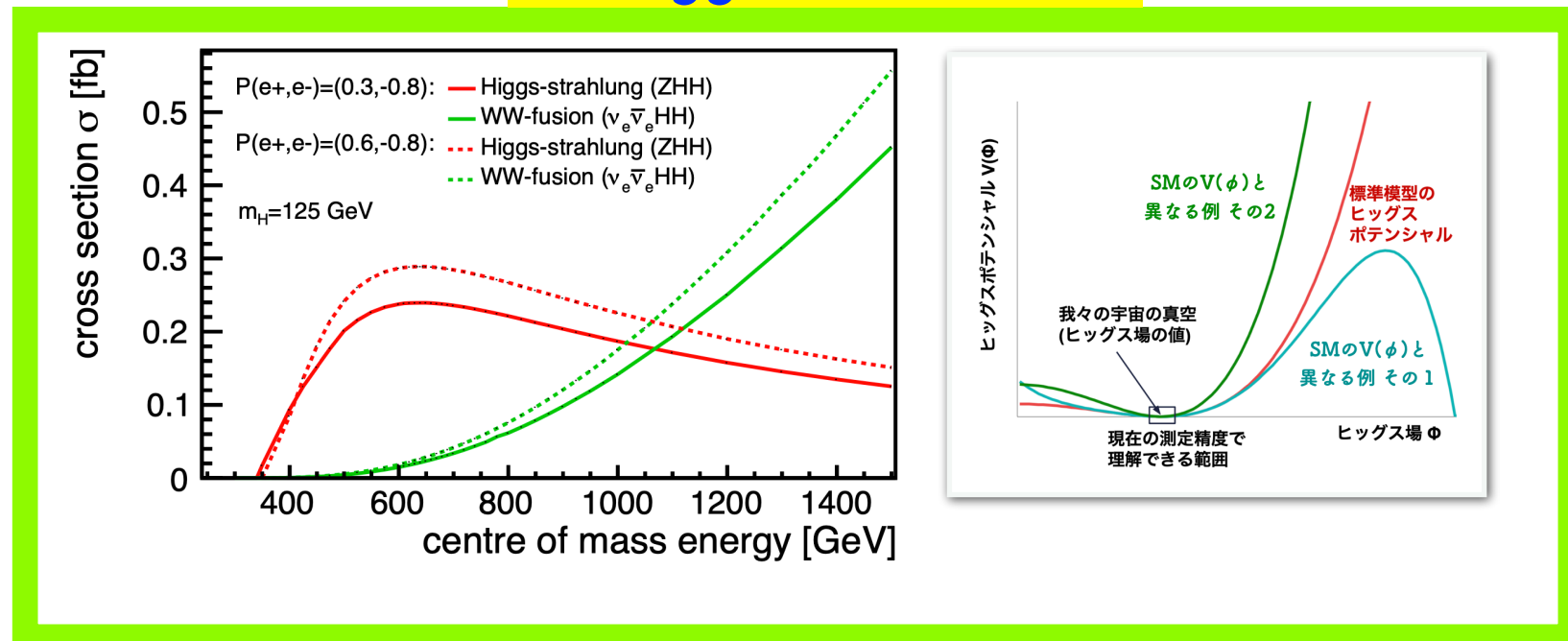
→ 前人未到のフロンティアの開拓
新発見の可能性を最大化

- 不確定性原理を利用
- 稀に起こる高エネルギー現象を捉える
(新粒子の効果)

Higgs Coupling



Higgsの自己結合



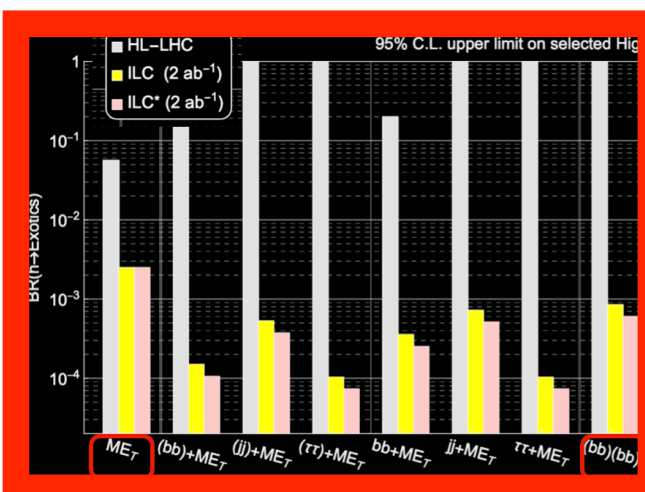
250 GeV

380 GeV

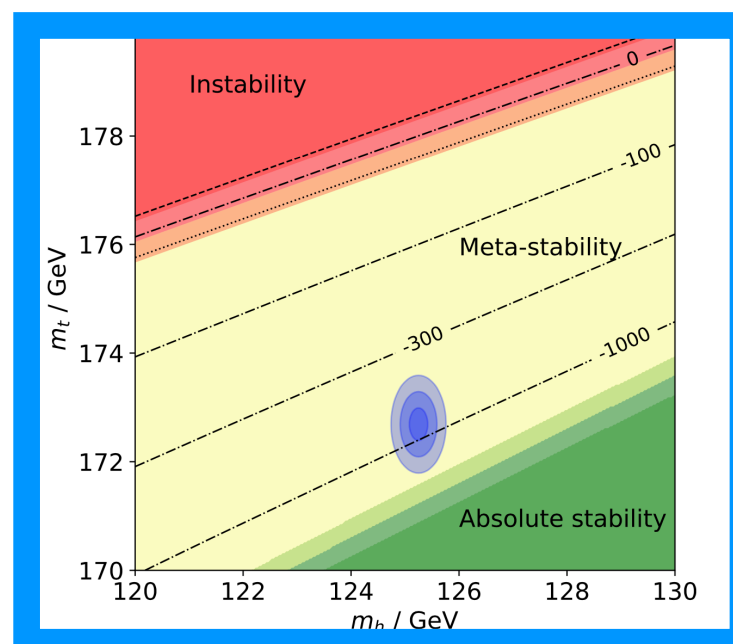
550 GeV >>> 1000GeV? >>> multi-TeV?

HF後の新技術によるEnergy拡張

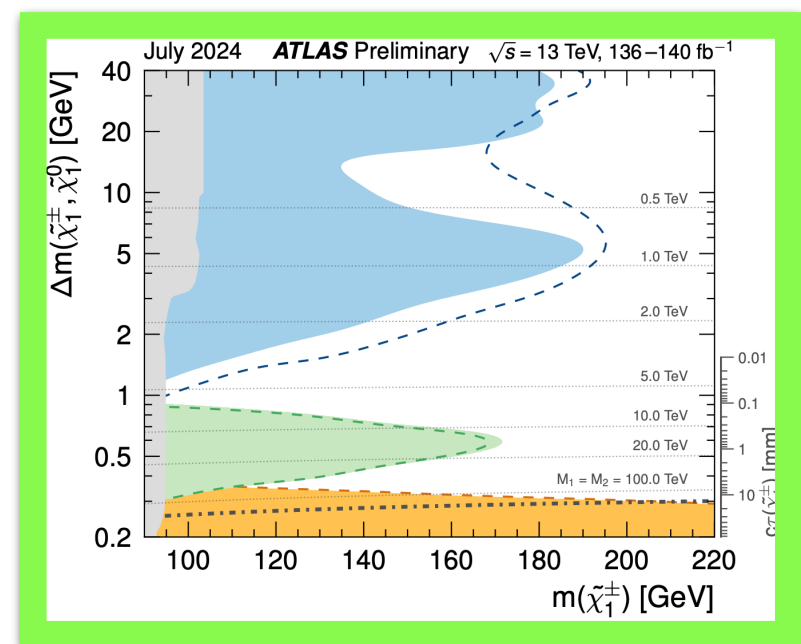
Higgs Exotic Decay



top mass >> Vac.安定性



(Electro-Weak) SUSY



22 $\sqrt{s} = 500/1000 \text{ GeV}$: Higgs Self-Coupling : λ_3

- Higgs Potential の形は第一原理によって決まっていない
- (EW Symmetry Breakingの Dynamicsを考えるヒントになるか?)

multi-TeVに至るにせよ
必ず立ち寄る物理

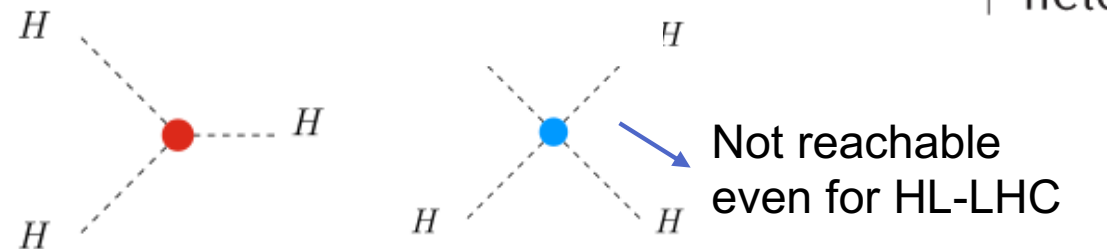
Higgs Potential ($V(H)$) を我々の宇宙があるPotential minimum近傍で展開

$$V(H) = \underbrace{\frac{1}{2}m_H^2 H^2}_{\text{Higgs mass term}} + \underbrace{\lambda_3 v H^3}_{\text{Higgs self-coupling}} + \underbrace{\frac{1}{4}\lambda_4 H^4}_{\text{Higgs self-coupling}} + \dots$$

In SM

$$\lambda(= \lambda_3 = \lambda_4) = \frac{m_H^2}{2v^2} \sim 0.13$$

$m_H \sim 125 \text{ GeV}, v \sim 246 \text{ GeV}$

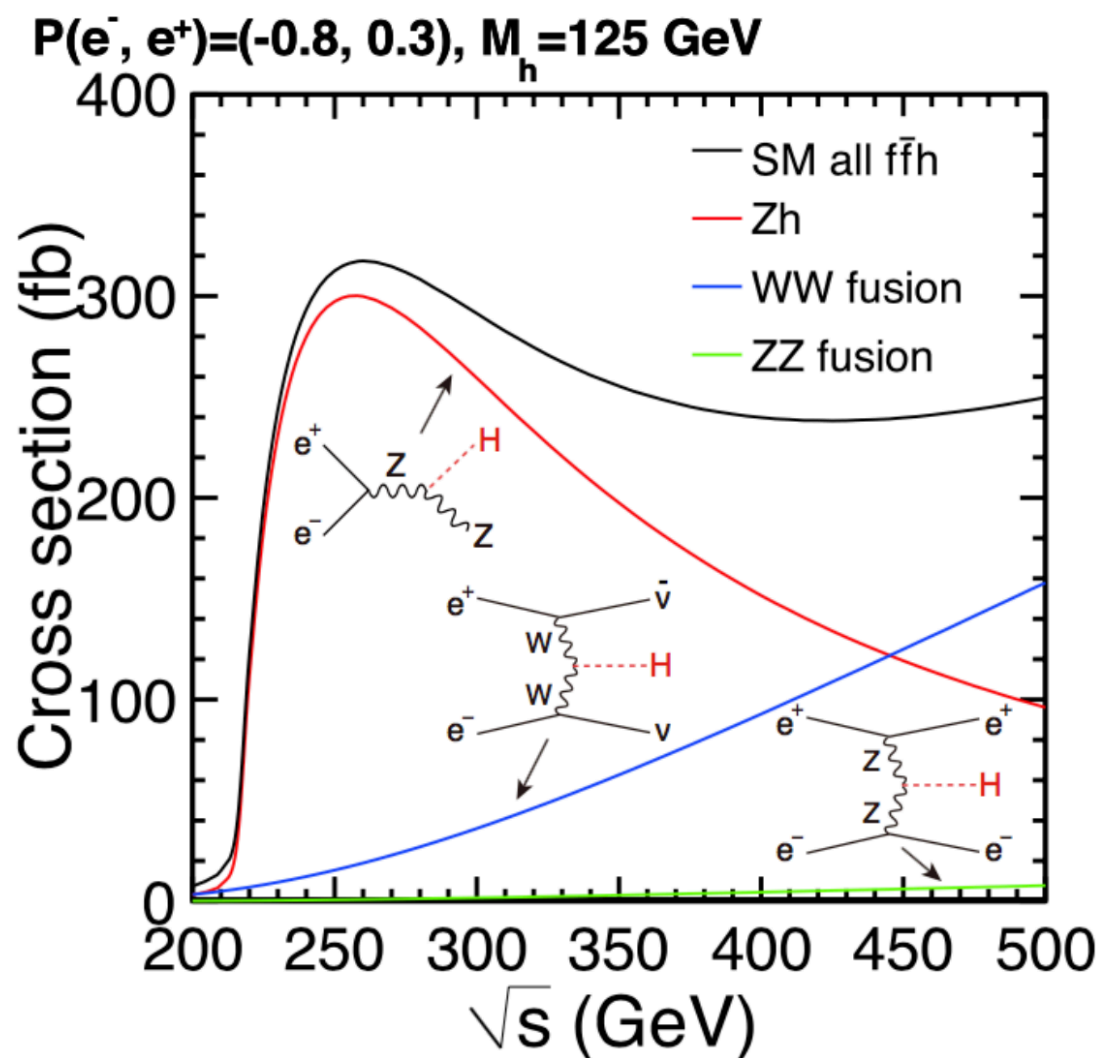


- 実験で λ_3 を測定して、 λ_{SM} と比較する
- λ の測定値が λ_{SM} と一致しない場合
 - a sign of **BSM**?
 - a hint of **EW Baryogenesis**?...

[λ の測定値のズレ と BSM]

- 2HDM (Yukawa Type-I) λ : -0.5 ~ 1.5)
- EW Baryogenesis Model λ : 1.5 ~ 2.5)

λ が大きくズレる可能性
SMの良いテスト & BSM にsensitive

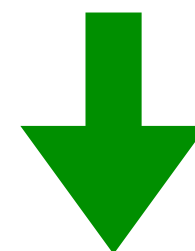


$bbbb, bbww, bb\tau\tau$, others?

P5 White Paper (2023) の頃

[500 GeV] ZHH ($\Delta\lambda \sim 25\%$)

[1 TeV] WW-fusion ($\Delta\lambda \sim 10\%$)

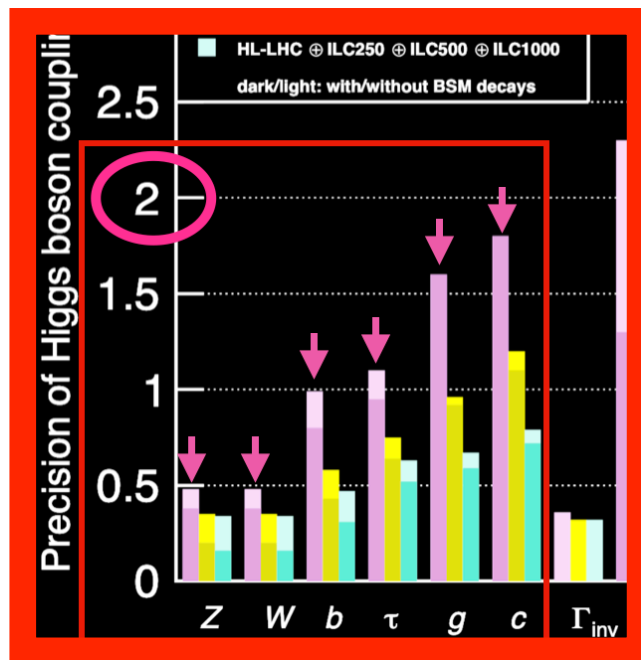


Recent Study (ESPP Input) 2025

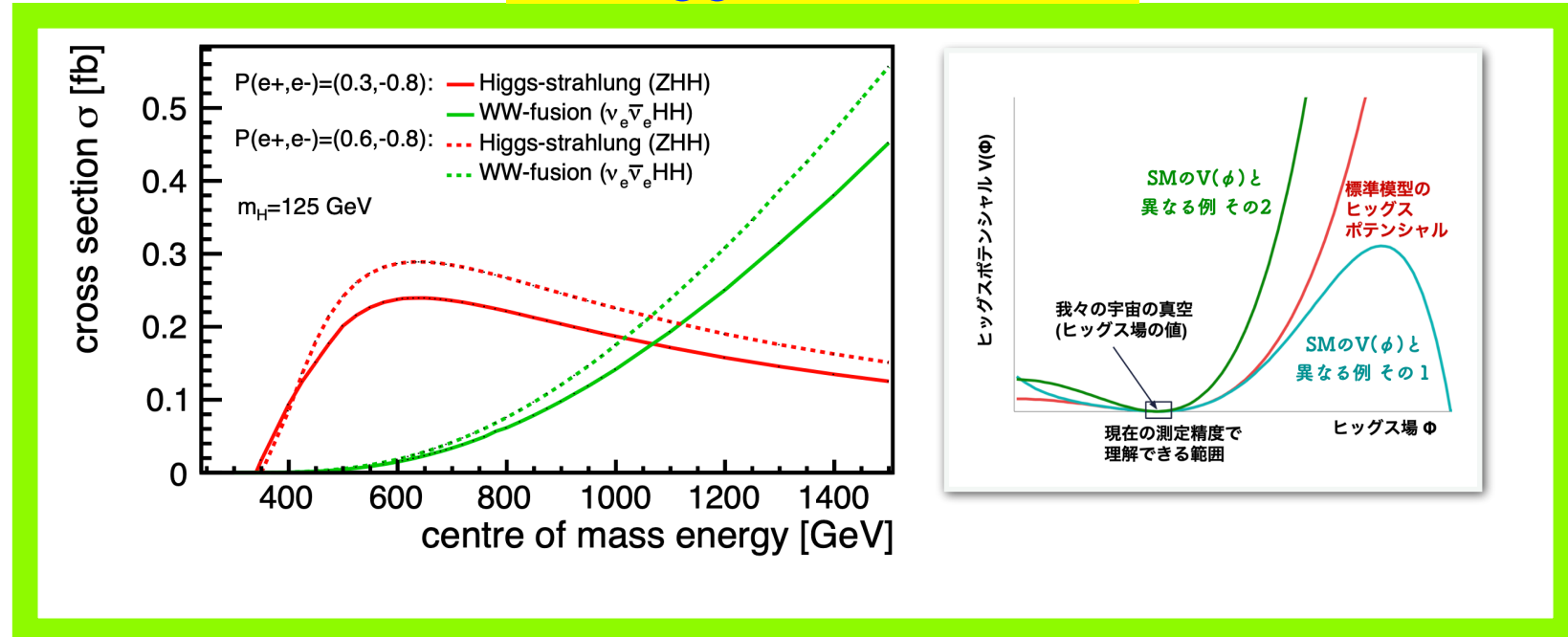
- $\nu\nu HH$ @ 550 GeV 断面積増加
- Jet Flavor Taggingの高度化、etc.

$\Rightarrow \Delta\lambda \sim 15\%$ 程度

Higgs Coupling



Higgsの自己結合



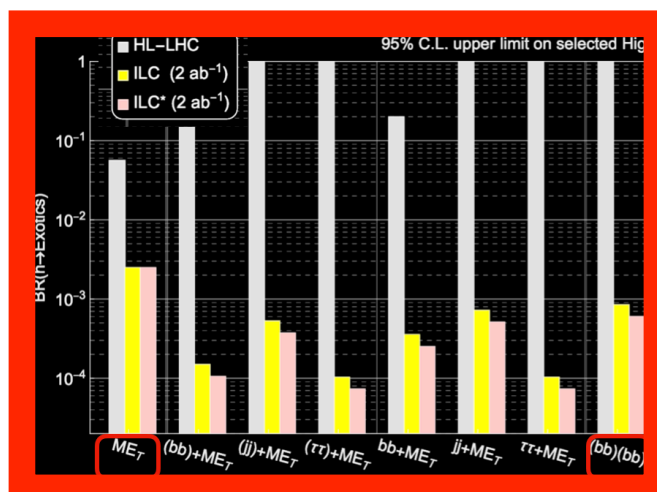
250 GeV

380 GeV

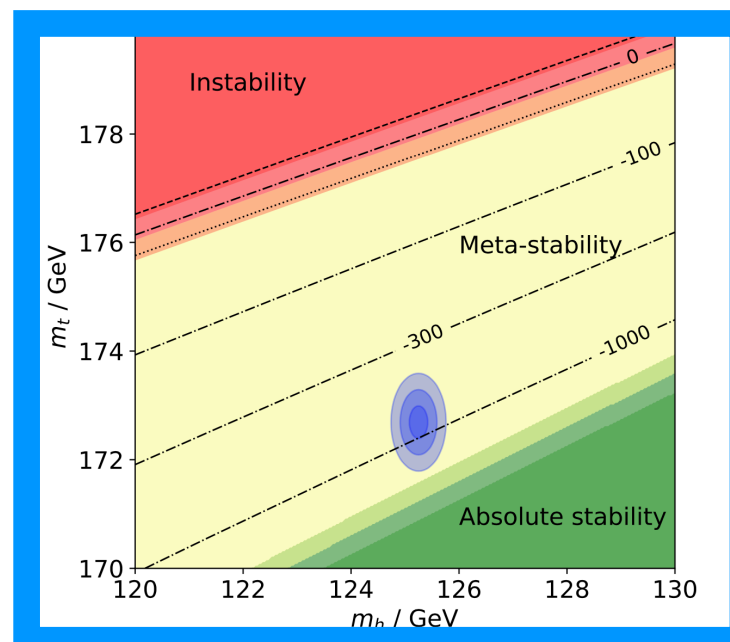
550 GeV >>> 1000GeV? >>> multi-TeV?

HF後の新技術によるEnergy拡張

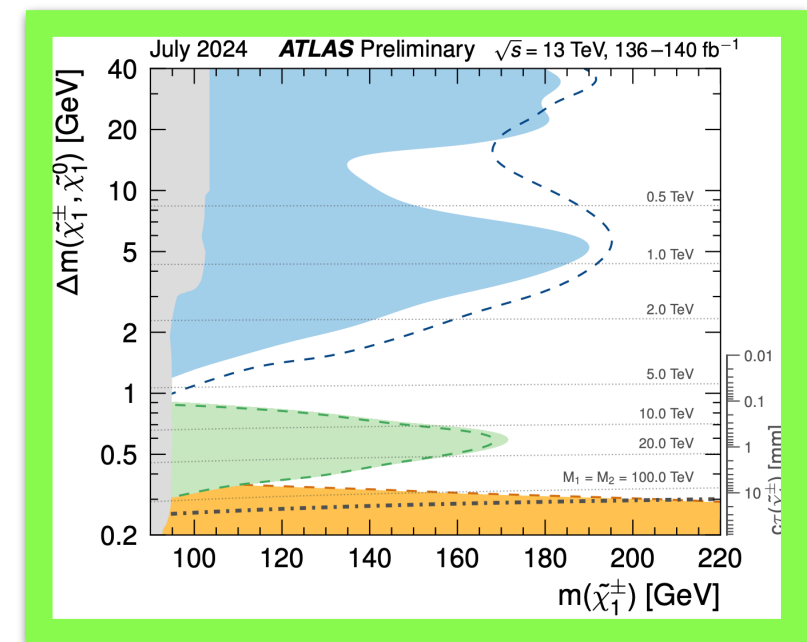
Higgs Exotic Decay

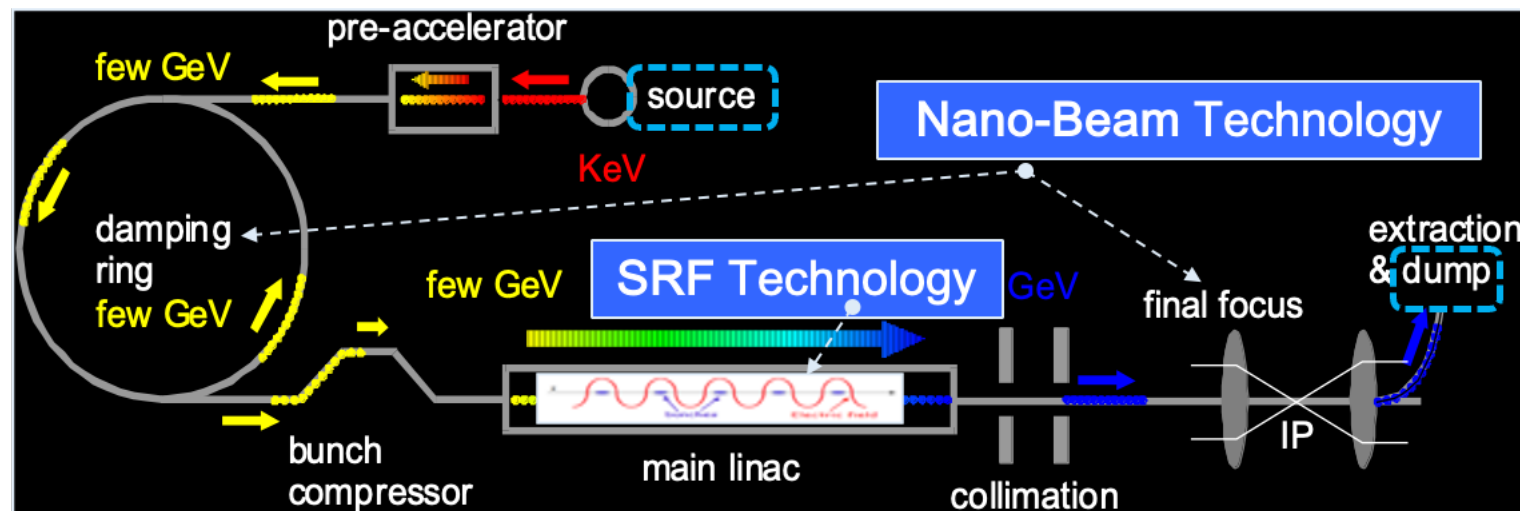
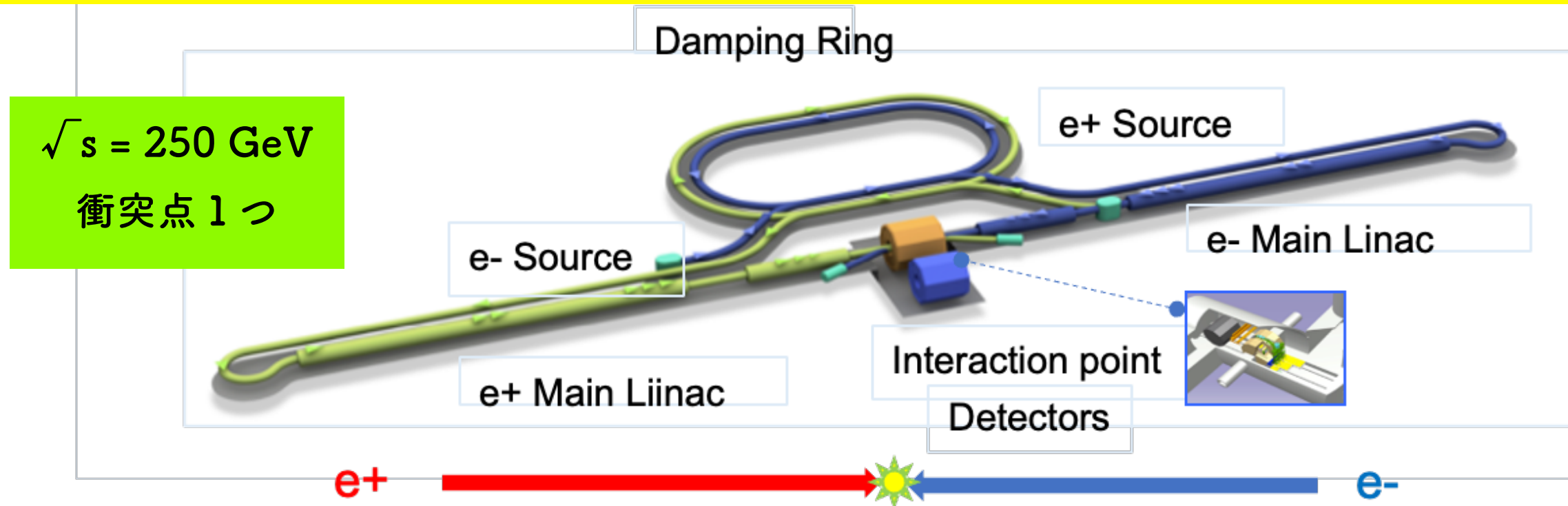


top mass >> Vac.安定性



(Electro-Weak) SUSY





技術的な熟成度

- Showstopperはない
- 一方、明日から大量生産を始めるのは無理

⇒ 最重要課題をWork Packageにした
 国際的な R&D Framework ILC-Tech. Network

Parameters	Value
Beam Energy	125 + 125 GeV
Luminosity	1.35 / 2.7 x 10 ³⁴
Beam rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.73 / 0.961 ms
# bunch / pulse	1312 / 2625
Beam Current	5.8 / 8.8 mA
Beam size (y) at FF	7.7 nm
SRF Field gradient	< 31.5 > MV/m
#SRF 9-cell cavities	~ 8,000 (~ 900)
AC-plug Power	111 / 138 MW

将来計画委員会 2017

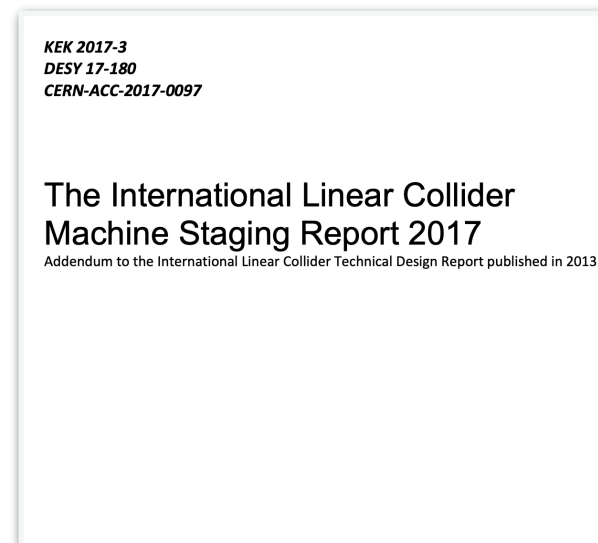
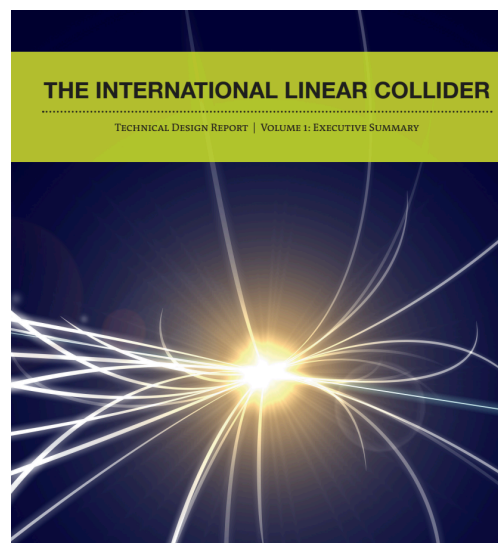
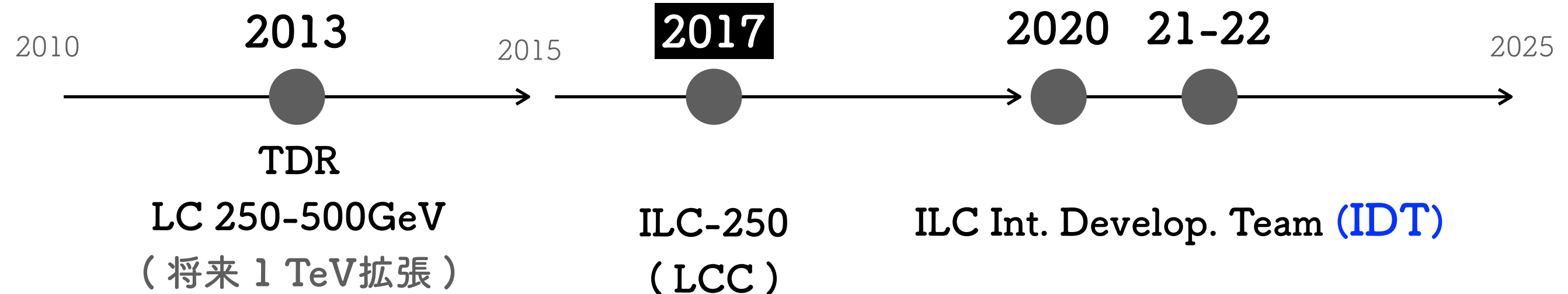
→ ILC250・日本国内・早期実現

ILC250物理意義の検証委員会

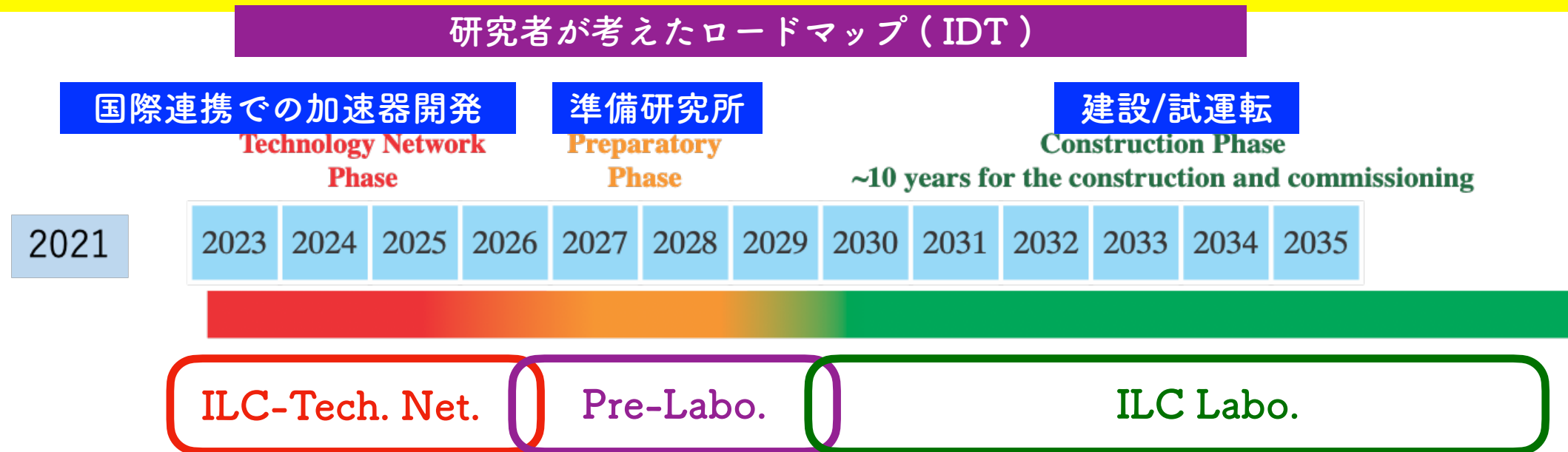
→ Beyond SMの方向性を定め得る

IDTによる「Pre-Lab提案」

→ Pre-Lab移行は時期尚早
(第2期有識者会議)



日本に建設するILCのための、
ILC Pre-Lab の準備 (国際的研究者)



[Step-1] パートナー国が集まって Global Projectの形 を議論/決定する

- ILCの建設に関心を持つ世界の**研究者/政府**は、これをGlobalプロジェクトとして進めるための議論をする
- **費用分担ルール**、**責任分担ルール**、推進組織の形態、サイトの決定方法、etc. 枠組みを決める

[Step-2] [1] のルールに従い 具体的なILCの形 を議論し、決定していく

世界の研究者+政府は、Global Projectとして、どんなILCを作るか、どこがホストするか、議論する

(a) 日本政府は、ILC250をホストすることへの関心を表明する

(b) Europeは、例えば、最初から長いトンネルを掘って、既存技術で 250 > 380 > 550 GeV提案... とか

ここで、色々出てきて、本気の競争をするのは "良いこと"

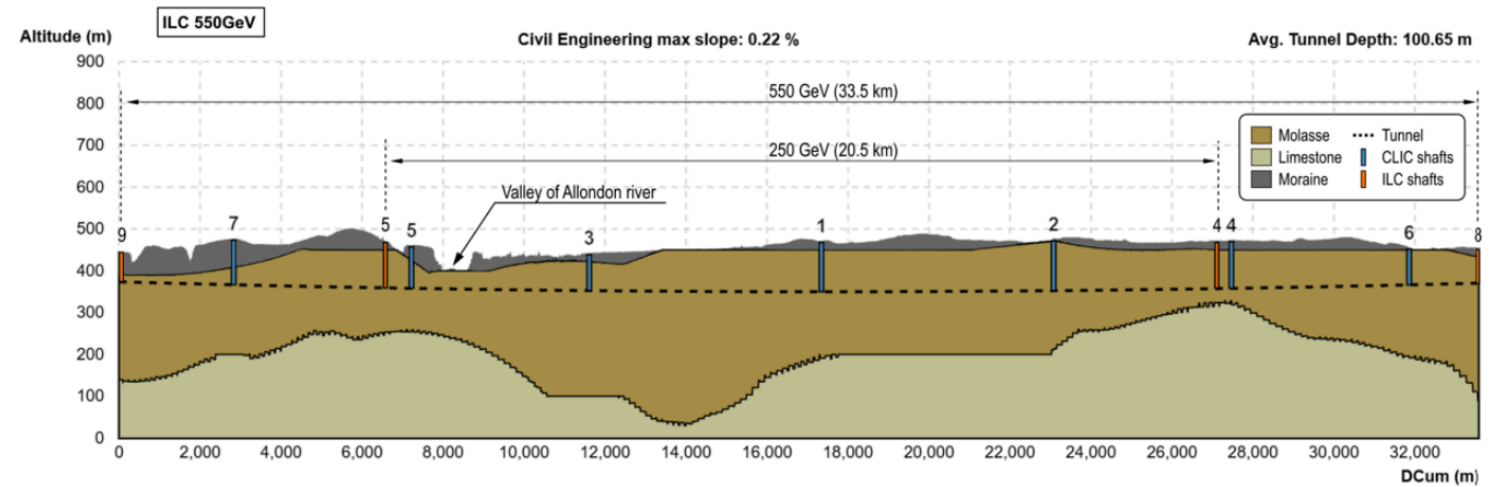
[Step-3] [2] が決まれば次に進める → 準備研究所の開始

◎ 仕様

- ✦ トンネル 33.5 km
- ✦ RF 20.5 km
- ✦ **2 IP** + R&D + Fixed Target



Phase-1 SRFを埋めきらないで HFとして運転

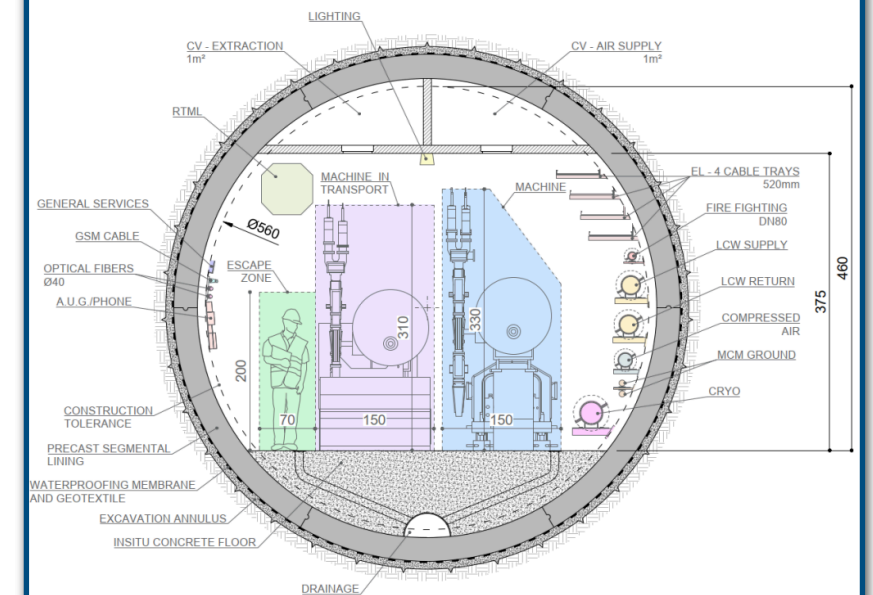


◎ Operation Model

- ✦ 準備6年・建設10年 ⇒ Data Taking: 2042
- ✦ Phase-1 (CHF 8.3 B) **1.4兆円 FCC-eeの半分くらい**
 - ・ 250 GeV・SRF・偏極
 - ・ $2.7E34$
- ✦ Phase-2 (CHF 5.5 B) **+ ~1兆円**
 - ・ 550 GeV・SRF same technology・Luminosity x2
 - ・ $6E34$
- ✦ Phase-3
 - ・ 結果を見て、TeV Scaleへ

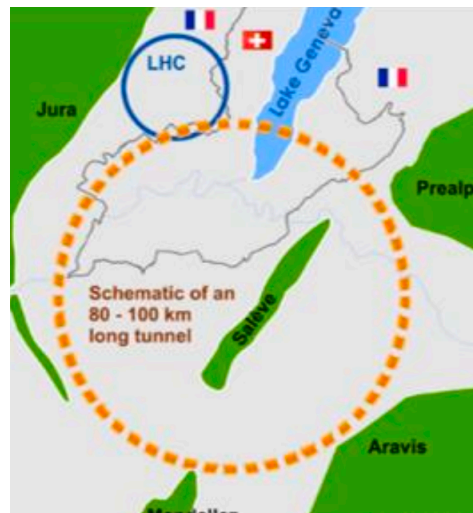
ILC Japan Cross section Implemented at CERN

5.6m Internal Diameter



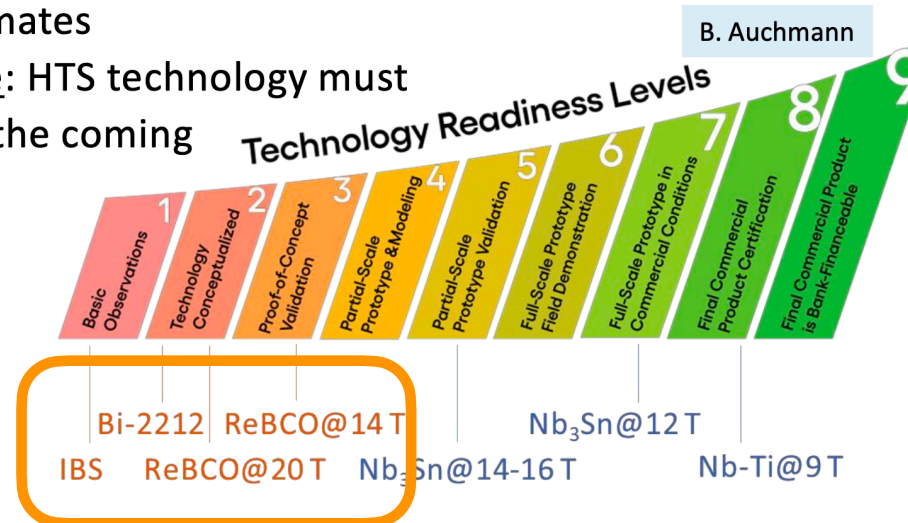
European Strategy 2025-2026 への1つのインプットとして提出された

- stage 1: FCC-ee (Z, W, H, (tt)) as Higgs factory, EW & top factory
- stage 2: FCC-hh (~100 TeV) at Energy Frontier, pp collisions

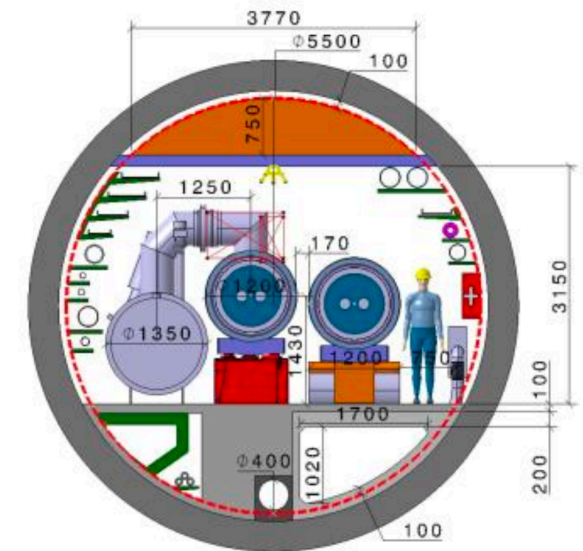


Rough estimates

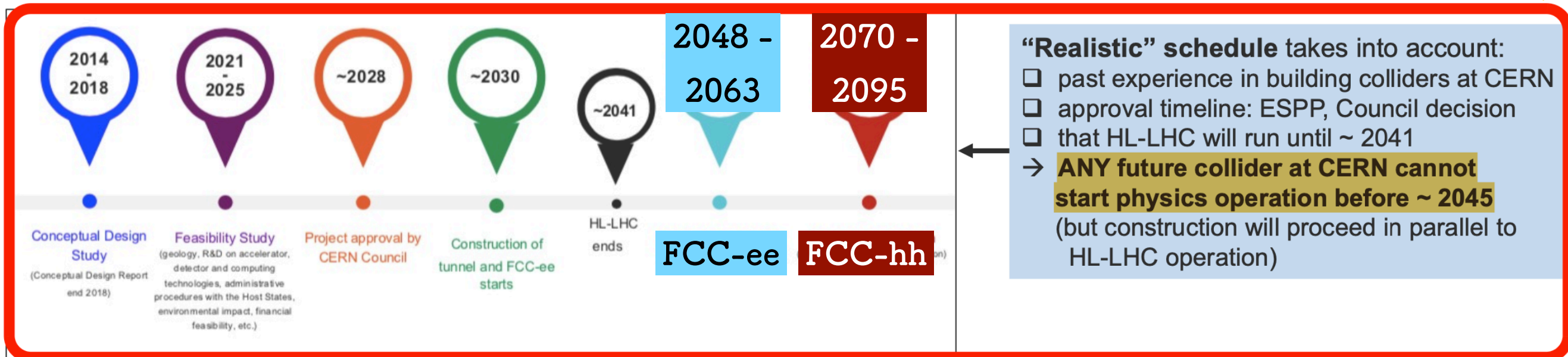
Bottom line: HTS technology must catch over the coming 10 years in TRL to LTS



FCC-hh



Collider Center



1st stage collider, FCC-ee: electron-positron collisions 90-360 GeV

Construction: 2033-2045 → Physics operation: 2048-2063

2nd stage collider, FCC-hh: proton-proton collisions at ≥ 100 TeV

Construction: 2058-2070 → Physics operation: ~ 2070-2095

[A] e^+e^- Higgs Factory → [B] Energy Frontierへ

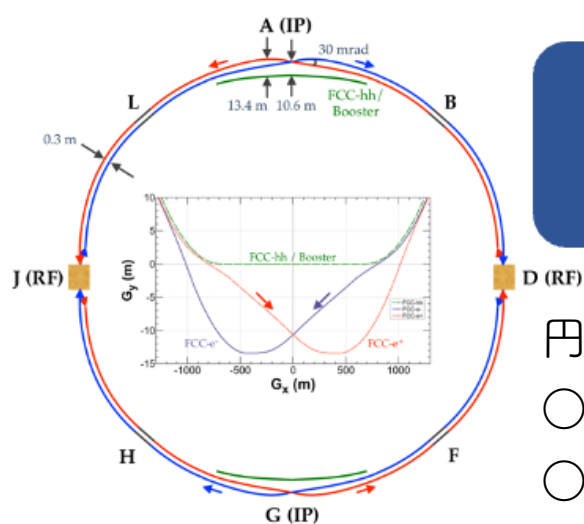
理想形

[A] Higgs粒子の精密測定により **次の新物理のエネルギースケール** を知る
 → **Higgs Factory** でやる

精密測定

[B] [A] の科学的結果 & **その時点での最良の加速器技術** で 次の加速器を作り、
 Energy Frontierで、素粒子/宇宙の「なぜ？」を解明していく

Energy Frontier



FCC-ee
(CERN)

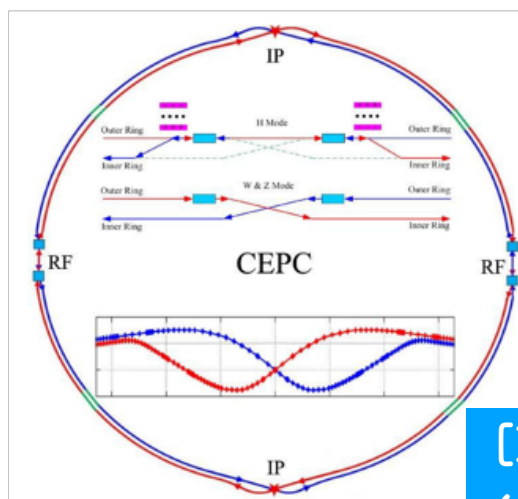
円形加速器（周長90km）

○ 高いルミノシティ

○ 陽子・陽子への拡張性

× 建設コスト高（2兆円以上）

× 運転コスト高（300 MW）



CEPC
(中国)

円形加速器（周長100km）

[B] $\sqrt{s} \sim 100$ TeV p-p衝突
 （16T磁石を開発できれば）

ILC 250

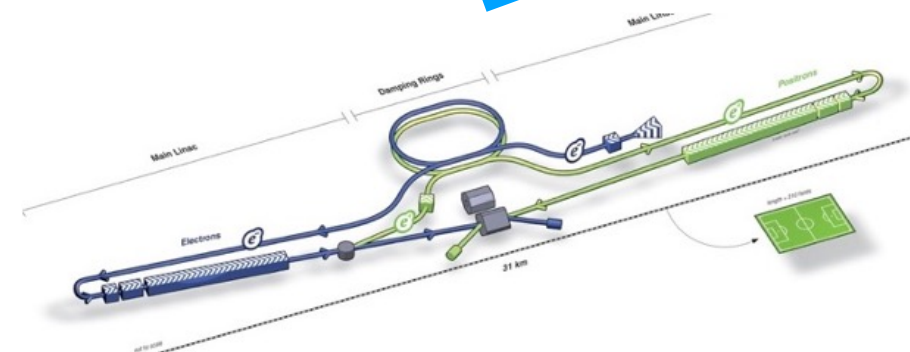
直線 20km

○ 建設コスト 半分

○ 運転コスト 低（120 MW）

△ 衝突点の数（普通は1点。2点作れるがコスト上がる）

△ ルミノシティ（精密測定は十分可能）



ILCに特徴的なアドバンテージ

[A] の科学的結果をふまえて

[B] 期間の **技術革新（衝突エネルギー & 輝度）** 導入

➡ 総合的にリーズナブルな形で [B] へ進める

- 素粒子物理の大目標

- 宇宙の始まりと進化、終焉の理解
- なぜそうなっているのか? 博物学をやった後、これに答えたい/理解したい

- 先端加速器が有効なツール

- EWスケールまでの物理：対称性の物理 o.k. // その破れのDynamicsについてはイマイチ
- 次の一步への扉を開くのは、Higgs粒子の精密測定
→ Higgs Factoryの重要性は、世界のコンセンサス

- Higgs Factory

- 3つのプロポーザル (FCC, CEPC, LC) 安価に、クイックに、短期で重要な結果
- LCがリーズナブルなソリューションであることについての考察・議論
- HF for 30年間の技術革新 → エネルギー拡張性 (見定めて手を打つ・ e^+e^- の利点)

- LHCの次の基幹計画

- 広い支持と共に、[加速器 / 検出器 / 物理] どの観点でも共同研究の輪の拡大が必須
- 相乗効果をもたらす共同研究の形を早く作らねばいけないと思っています

WP-prime 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定

目標 (モジュール)
 8空洞入りモジュール
 加速勾配: 31.5MV/m
 Q値: $<1 \times 10^{10}$

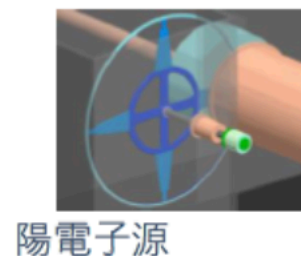
Rey.Hori/KEK

WP-prime 1: 空洞量産実証



目標 (空洞単体テスト)
 冷凍機則に則った9セル空洞で
 加速勾配: 35MV/m
 Q値: $\sim 1 \times 10^{10}$

目標
 SLCやS-KEKB
 を超える大量の
 陽電子生成技術
 確立



WP-prime 8~10: 陽電子源開発

ビームダンプ

WP-prime 15: 最終収束系

ビームダンプ



目標:
 ATF-FFで垂直方向
 37nmを安定にkeep。

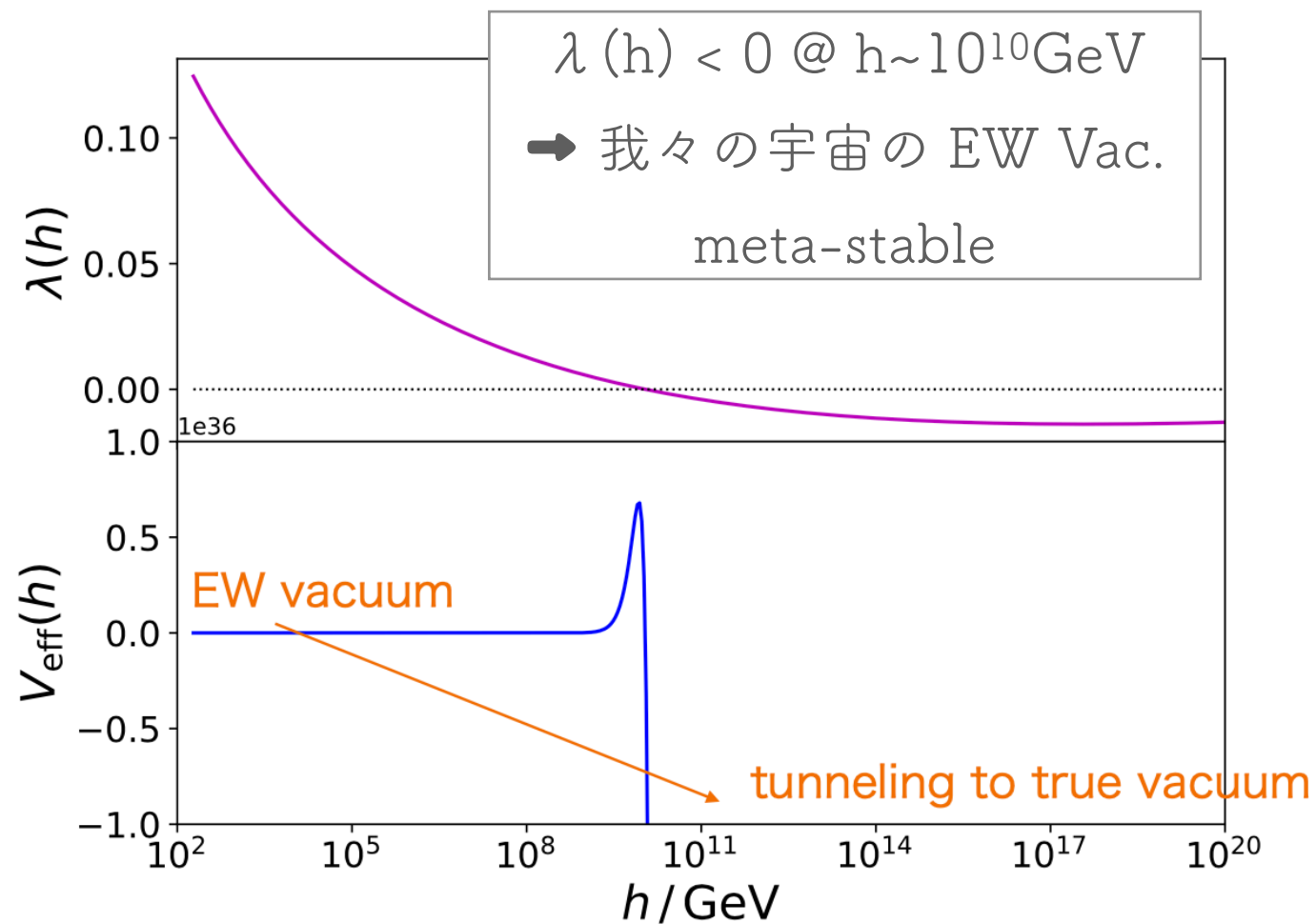
- ILCで必要とされる技術に関して、Showstopperは存在しない
- 一方、量産開始までに必要とされる技術を、よりマチュアにしておくべき時期
- 国際的に密接な関係を取りながら、研究プログラムを進める経験も重要

- ▶ Higgs potential

$$V(h) = \frac{1}{2}m^2 h^2 + \frac{1}{4}\lambda h^4$$

- ▶ 1-loop effective potential at large h

$$V_{\text{eff}}(h) \simeq \frac{1}{4}\lambda(h) h^4$$



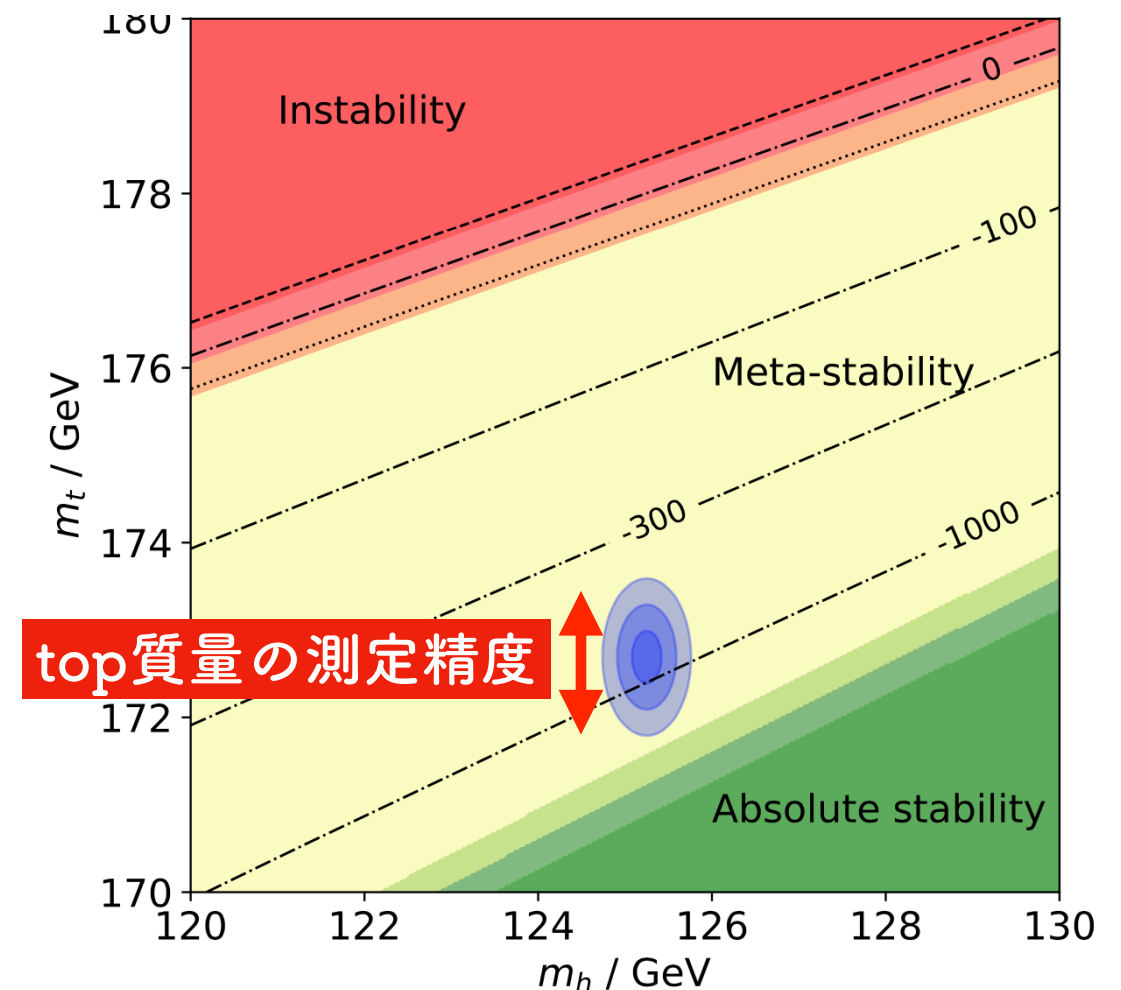
one-loop RG equation of λ and y_t

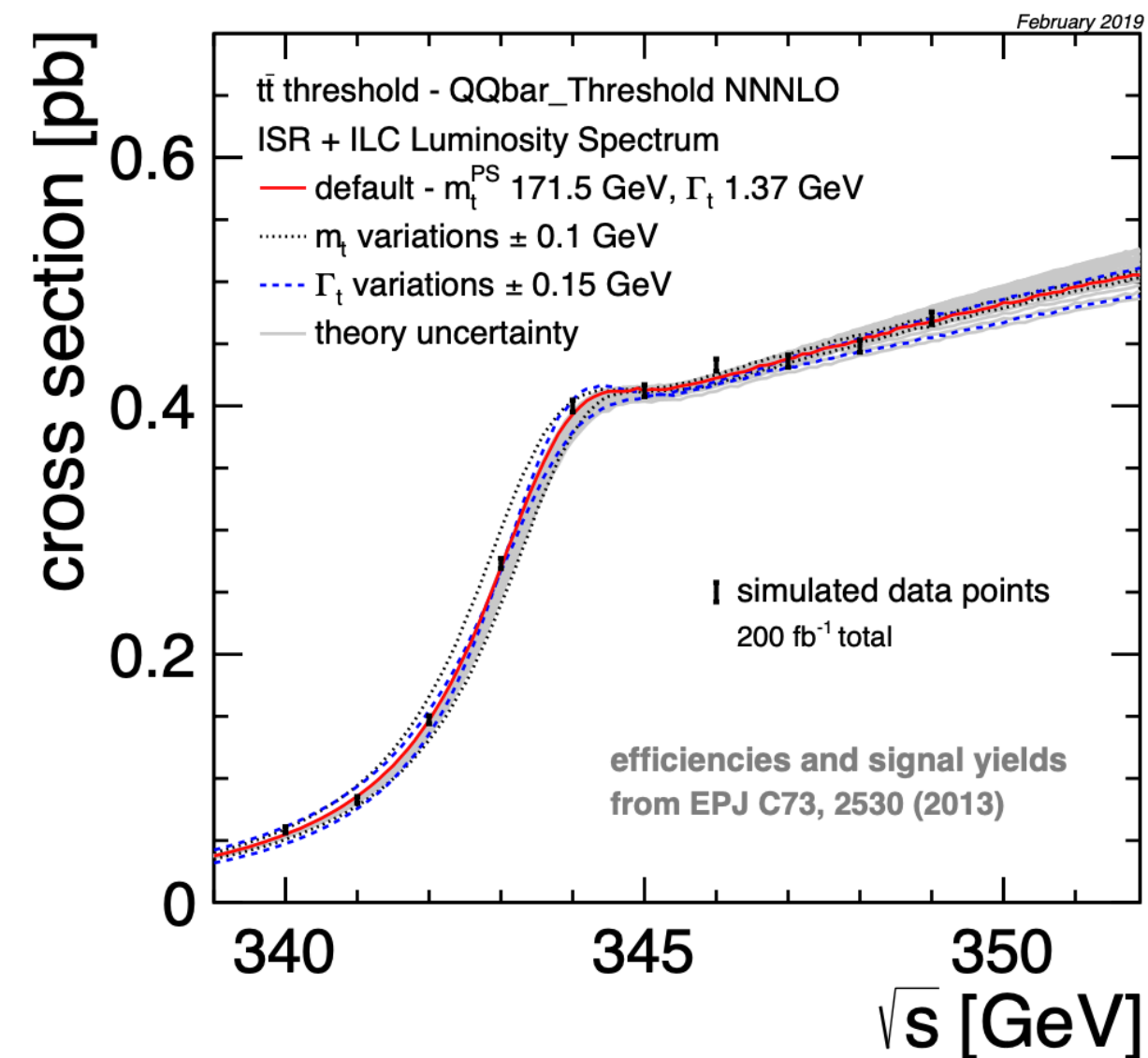
$$16\pi^2 \frac{d\lambda}{d \ln \mu} \Big|_{\text{one-loop}} = 12\lambda \left(2\lambda + y_t^2 - \frac{g_Y^2 + g_2^2}{4} - \frac{g_2^2}{2} \right) - 6y_t^4 + 6 \left(\frac{g_Y^2 + g_2^2}{4} \right)^2 + 12 \left(\frac{g_2^2}{4} \right)^2$$

EW vacuum decay rate

$$\log_{10} (\gamma \times \text{Gyr Gpc}^3) = -785^{+45}_{-49} + 155^{+155}_{-222} - 181^{+181}_{-276}$$

$\nearrow \Delta m_h$ $\uparrow \Delta m_t$ $\nwarrow \Delta \alpha_s$





Threshold Scan

$\rightarrow$ short-distance mass (theoretically well defined)

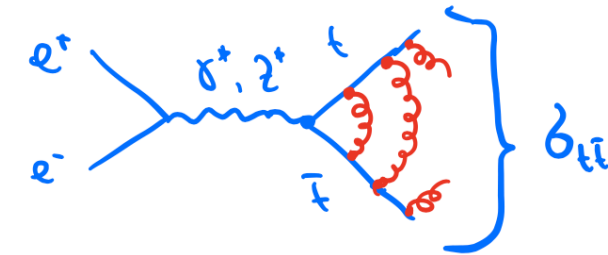
$\Delta m \sim 20 \text{ MeV}$ (statistical)

$\Delta m \sim 50 \text{ MeV}$ (sys.: higher-order loop, α_s)

EPJ C73, 2530 (2013)

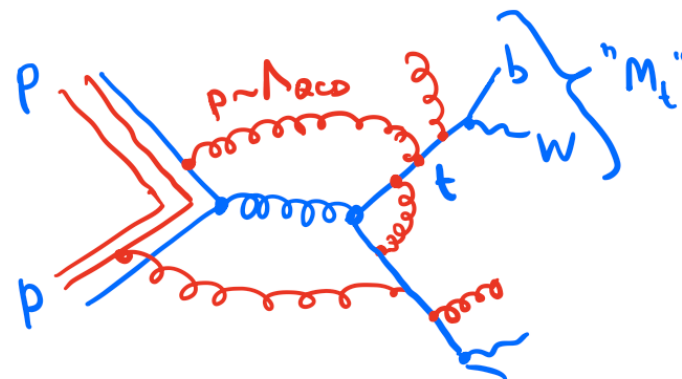
EW Vac. Stabilityの判断に十分な精度

(c.f. LHC $\sigma(t\bar{t})$ n-differential, NLO $173.2 \pm 1.6 \text{ GeV}$)



Reconstructed Top invariant mass

Need to model soft-gluon radiation/exchanges
 (theoretically not well defined)



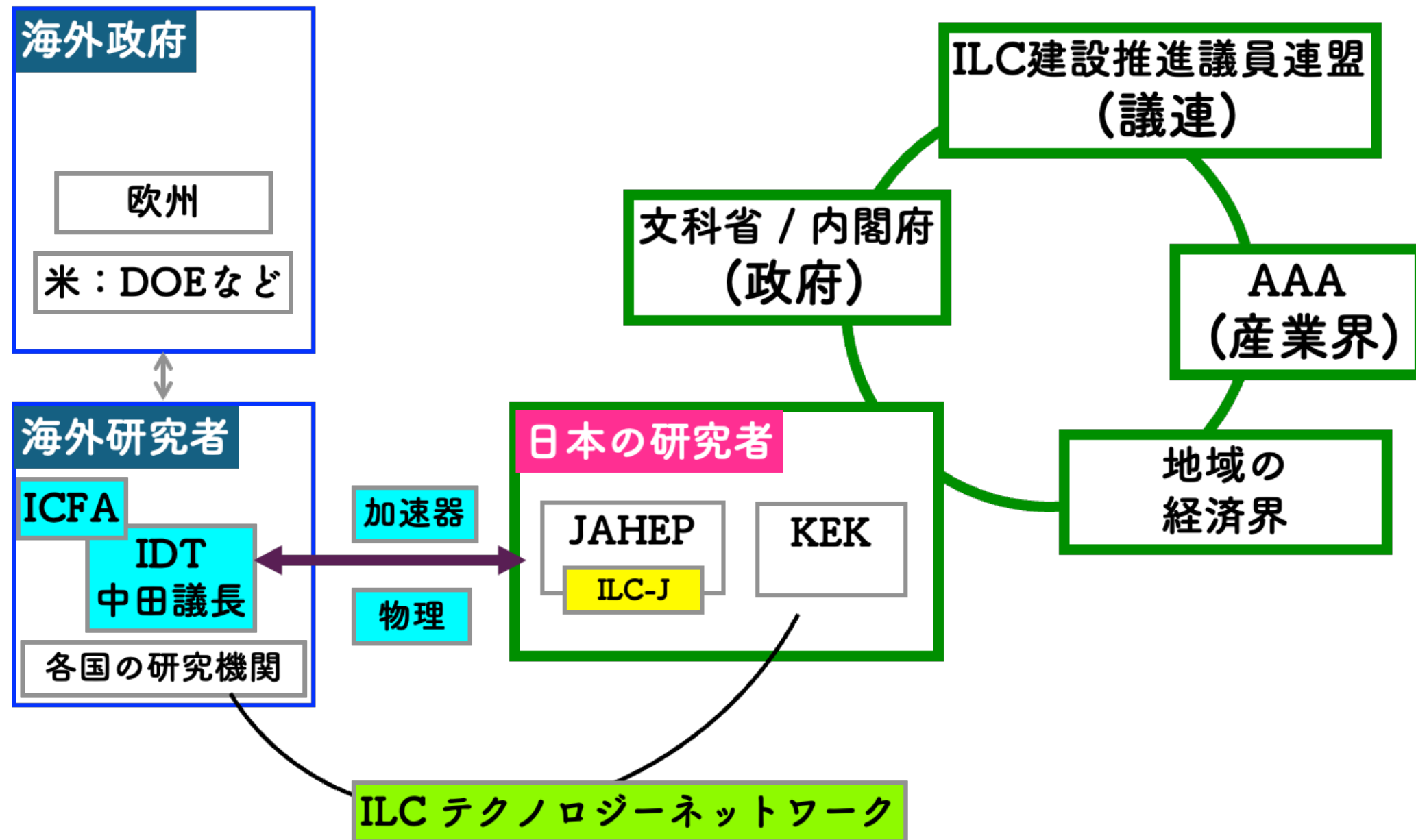
LHC MC template method: $\Delta m \sim 600 \text{ MeV}$

MC mass $\Leftrightarrow$ Theoretical mass mapping studies on-going

- 素粒子分野の振興を期待。ヒッグス粒子の精密測定がもつ学術的な意義は認められる。
- ILC 計画の今後の見通しを明確にするような大きな進展は見られない
 - 不足 (ILC) : 国際的な研究協力と **費用分担の見通し**、国民/科学コミュニティーの広い支持
 - 不足 (広域) : 分野の将来について **国際的に統一された提案/ロードマップ**
- ➡ 日本政府がILC誘致の関心表明を前提とした **ILC 準備研究所への移行は時期尚早**

上記の「不足」を埋めるための、具体的なアクション

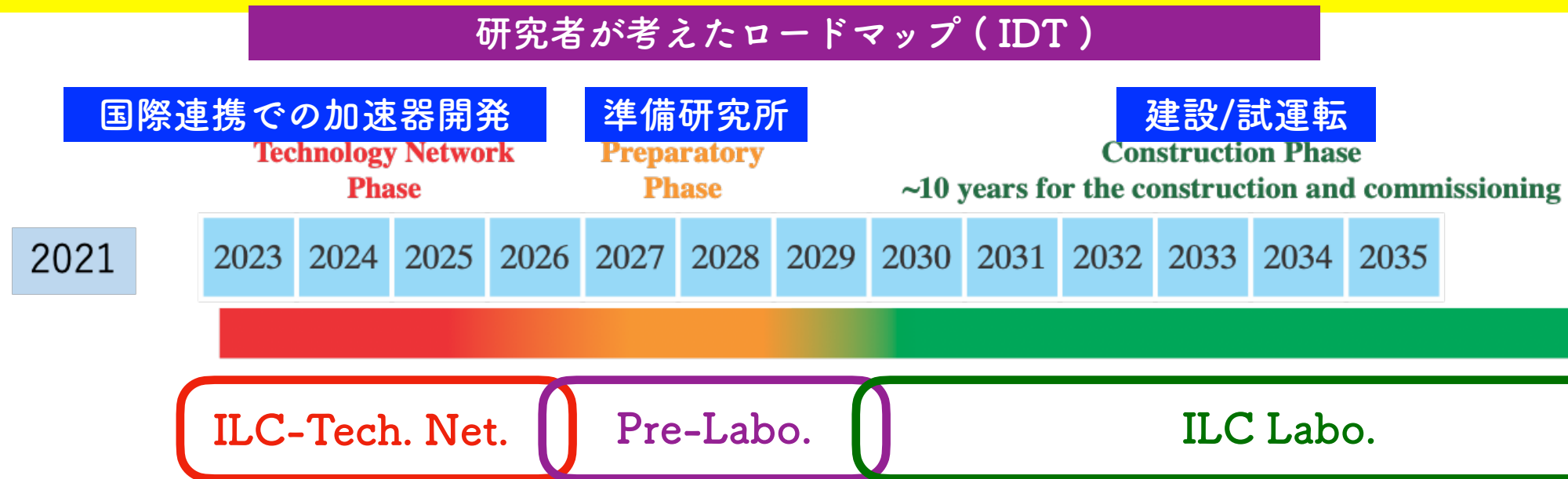
- 費用分担の議論が進まない原因の1つ、**立地問題を一旦切り離せ**
 - ➡ **Global Projectに立ち戻る**
- ITERなど、過去のGlobal Projectに学べ
 - ➡ IDTの元に設置された**国際有識者会議 (IEP)**で分析
- 次世代加速器の開発に重要な技術課題に対して、国際的に連携して取り組む必要
 - ➡ **ILC Technology Network**
- 国内外のステークホルダーとの関係構築
 - ➡ **ILC-Japan / KEK ILC推進**



グローバルプロジェクトとしてILCの実現に関心を持つ
国内外の研究者/政府間の議論のもとプロジェクトを推進しようとしている



WG/TF: 従来からILCの方、 普段はATLAS or Belle II or 他の実験を主にやっているが、
将来 HFがスコープに入る世代の方々の参加を得て、研究活動/プロジェクト推進活動をしています



[Step-1] パートナー国が集まって Global Projectの形 を議論/決定する

- ILCの建設に関心を持つ世界の**研究者/政府**は、これをGlobalプロジェクトとして進めるための議論をする
- **費用分担ルール**、責任分担ルール、推進組織の形態、**サイトの決定方法**、etc. **ルールを決める**

立地問題切り離し

[Step-2] [1] のルールに従い 具体的なILCの形 を議論し、決定していく

世界の研究者+政府は、Global Projectとして、どんなILCを作るか、どこがホストするか、議論する

(a) 日本政府は、ILC250をホストすることへの関心を表明する

(b) Europeは、例えば、最初から長いトンネルを掘って、既存技術で 250 > 380 > 500 GeV提案... とか

ここで、色々出てきて、本気の競争をするのは"良いこと"

[Step-3] [2] が進めば次に進む → **準備研究所の開始** ILCの建設に向けて、さらに議論/決定、推進する