

エネルギーフロンティアの展望

高エネルギー物理学研究者会議
将来計画小委員会タウンミーティング
「10年先を俯瞰した高エネルギー物理学の将来展望」

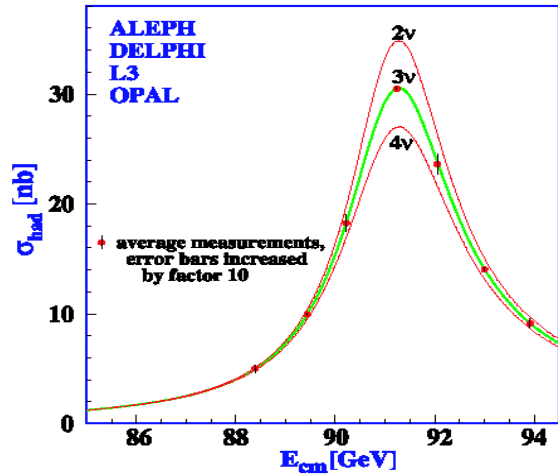
東京大学 山下了

マテリアルを頂いた方々(敬称略・順不同)

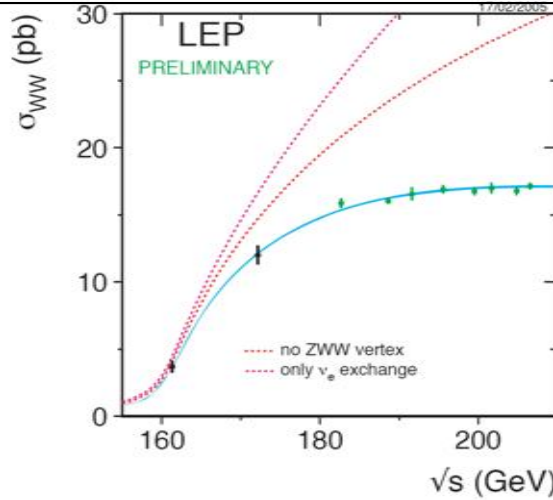
花垣・徳宿・川本・浅井・山本明・松本重・山本均・栗木・早野・奥木・田窪・竹下・兼村・村山……

これまでのエネルギーフロンティア成果 @ E ~ 0.1 TeV

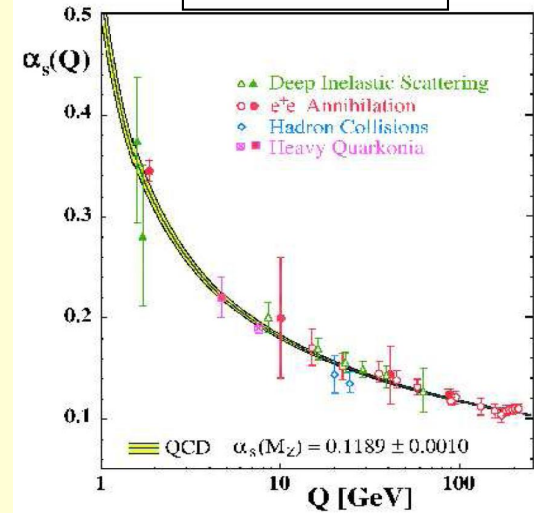
世代数 = 3



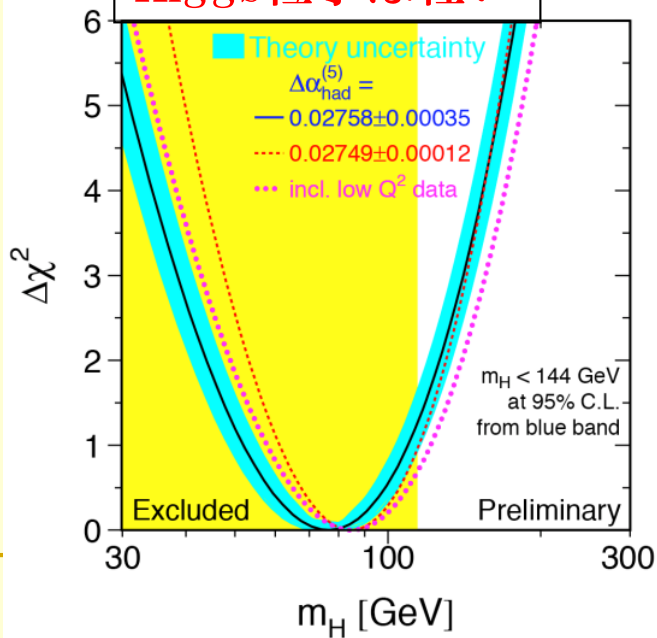
電弱相互作用: SU(2) x U(1)



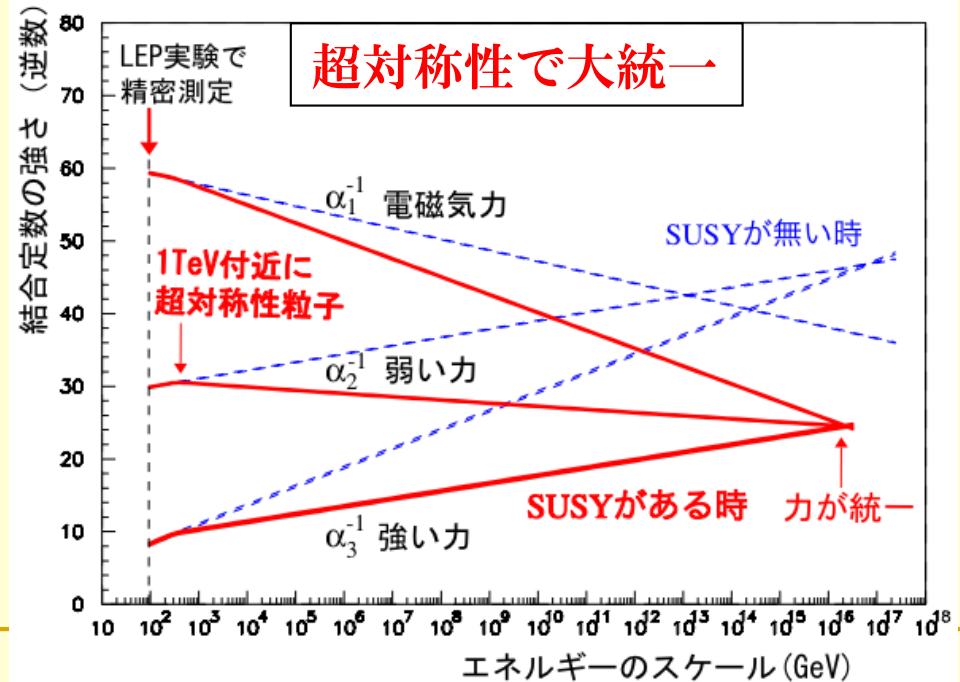
SU(3)



Higgs粒子は軽い



超対称性で大統一



エネルギーフロンティアが挑む謎

- **質量の源** (ヒッグス機構 + シーソー機構への手がかり?)
- **真空の相転移** (ヒッグス機構)
→ダークエネルギー、インフレーション宇宙になにかつながるか??
- **階層性問題** (ヒッグス・超対称性・余剰次元、)
- **ダークマター** (超対称性・余剰次元、)
- **反物質消滅の原因**
(電弱バリオジェネシス・レプトジェネシスへの手がかり?)
- **力・物質の大統一** →重力を含めた「超大統一」まで?

「神の粒子」ヒッグス

全てを知るはずであるが、1つだけいるとすれば余りにも不自然

全てを知る素粒子？

- 唯一3世代の全ての粒子を区別でき、それぞれが何であるかを「知っている」
- 元々は別の右巻きと左巻きの世界、別の粒子、を「繋げて」いる
- 通常のゲージ結合でない「新しい相互作用」(湯川力)を持つ
- さらに新しい「自己結合」(あるいは違うテクニカラーなど)を持つ
- 宇宙の至る所「真空」に場として充ちている

実験的および理論的にわかっていること

- WおよびZ(ゲージ粒子)との結合をもつ「何か」がある(LEP/Tevatron)。
- 素粒子であればスピン0の中性粒子が必ず1つは存在する
- ひとつの場だとすると、質量領域は理論的には500GeV程度まで、実験的には150GeV程度までに限定されてきている。
- SUSYのMSSMだと一番軽いヒッグス粒子の質量はさらに極めて強く(140GeV以下)限定されている。

備考

- SUSYでは必ず2つ以上の場(最低でも5つのヒッグス粒子)。
一番単純な場合(MSSM)は2つのヒッグス場=5個のヒッグス粒子群 h_0, H_0, A_0, H^+, H^- 。
- 複合粒子の可能性(新しいカットオフスケール)もあり
- ヒッグス場の構造は新物理からの現象のスペクトラム、ダークマターの組成を決める。

「神の粒子」ヒッグス

全てを知るはずであるが、1つだけいるとすれば余りにも不自然

ほとんど何もわかっていない

(これまでの実験から多々制限は付いている)

いくつかの場か、場の構造は実験的にも理論的にも未定

- 素粒子か？複合粒子か？
- 湯川結合・自己結合は存在するか？
- いくつかの場がどう組み合わせられているか？
- フェルミオンとゲージ粒子の質量の源は同じか？
- アップタイプとダウタイプは違う場からか？同じ場からか？
- レプトンとクォークは同じヒッグスと結合するか、違うか？
- 3世代が同じ粒子で区別されているのか？違うヒッグスか？
- さらに新しい相互作用か？
- 複数場の場合、CP混合はあるか？



大いなる悩みの種

「いわゆるワインバーグ・サラム・グラシヨウの**標準理論**」は数ある中での一番シンプルな場合。ヒッグス粒子は1つ

→ 理論的に非常に不安定。自然には全てがプランク質量に

(**階層性問題** = 理論的大問題)

宇宙論とのコネクション ダークマター

あることはわかっているが正体不明

- 宇宙観測 (望遠鏡・CMB観測) → 羽澄氏のお話
- 地下実験 (直接観測) → 井上氏のお話
- 生成・測定実験 (エネルギーフロンティア)

いろんな新物理模型が暗黒物質
候補を含んでいる (離散対称性)

SUSY

UED

Littlest Higgs with T parity

Dark Higgs

Radiative Seesaw

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle \sigma v \rangle}$$

$$\frac{\langle \sigma v \rangle}{\text{m}^2} \sim (g^2/4p)^2/$$

新粒子の質量と結合定数の精密測定が
ダークマターの正体を解明する

TeVスケール物理

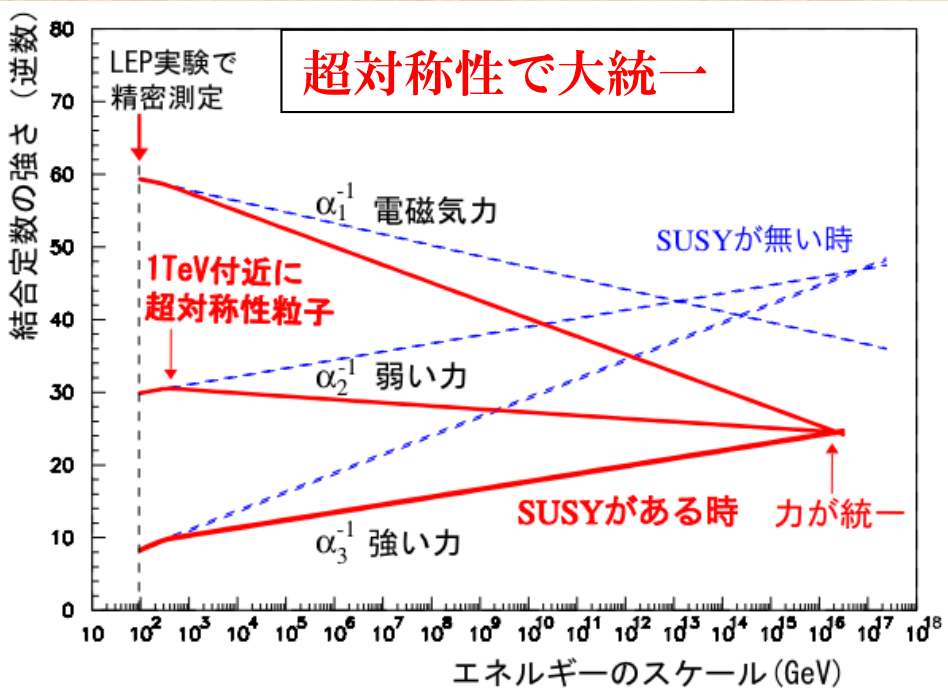
階層性問題と暗黒物質問題がテラスケールにおける新物理の存在を示唆

～ 階層性問題 ～

～ 暗黒物質問題 ～



全く独立な両問題がともにテラスケールに新しい物理が存在する可能性を示唆！



膨大・無尽蔵の可能性



LHCの現状

重心系 7 TeV

2010年: 約 45pb^{-1} 収集

- 解析結果はほぼ全て公開

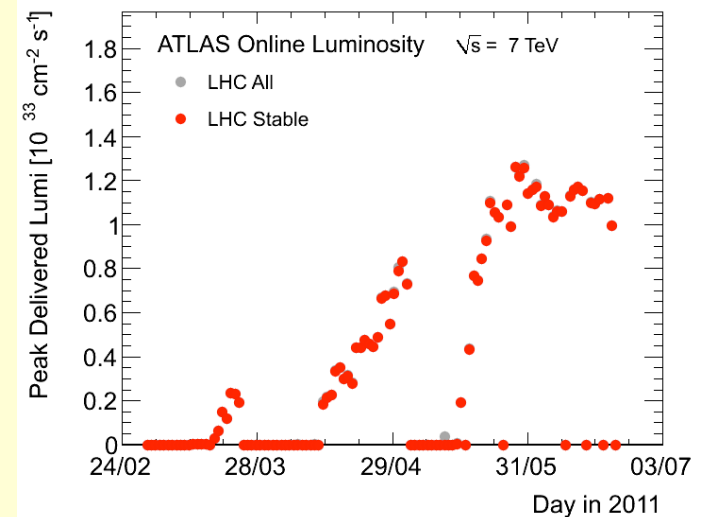
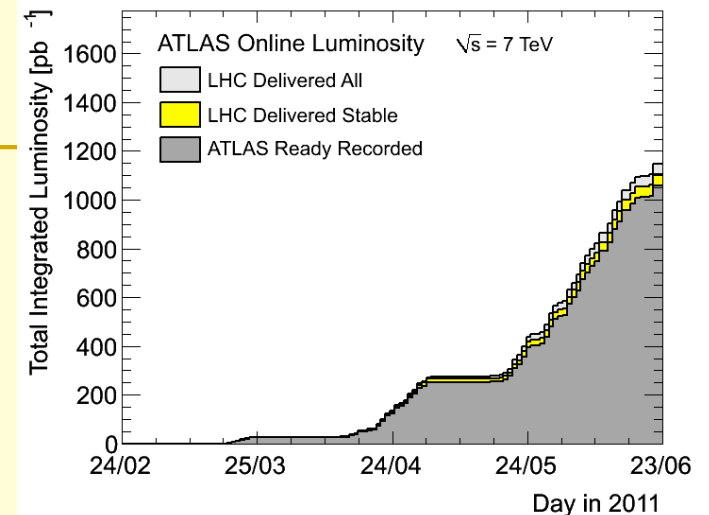
2011年現在: $>1\text{fb}^{-1}$ 収集

- Peak luminosity $1.26\text{E}33$

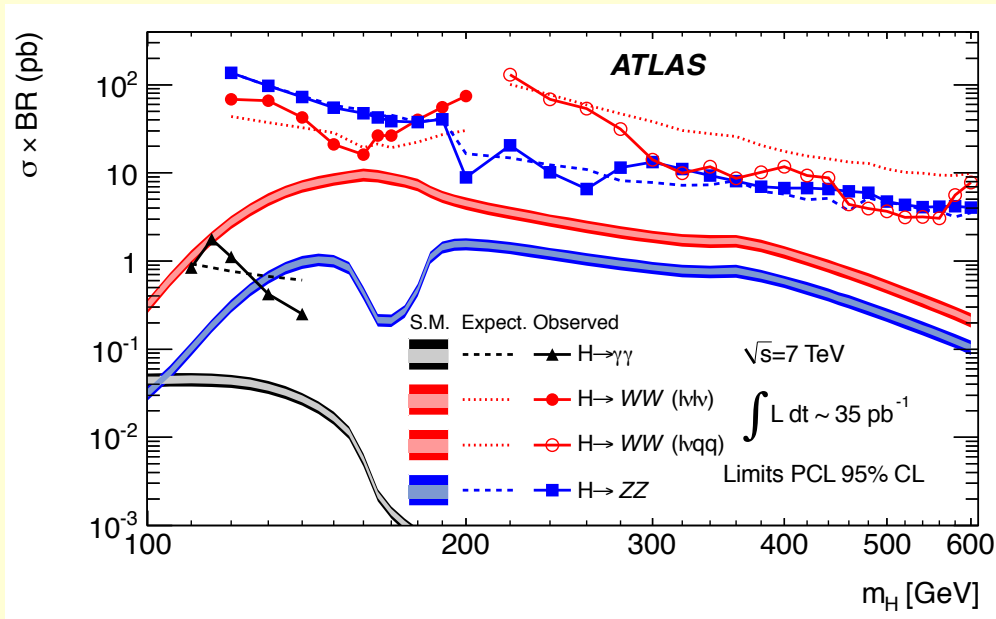
50ns bunch spacing

$\Rightarrow \sim 5$ interactions per bunch crossing

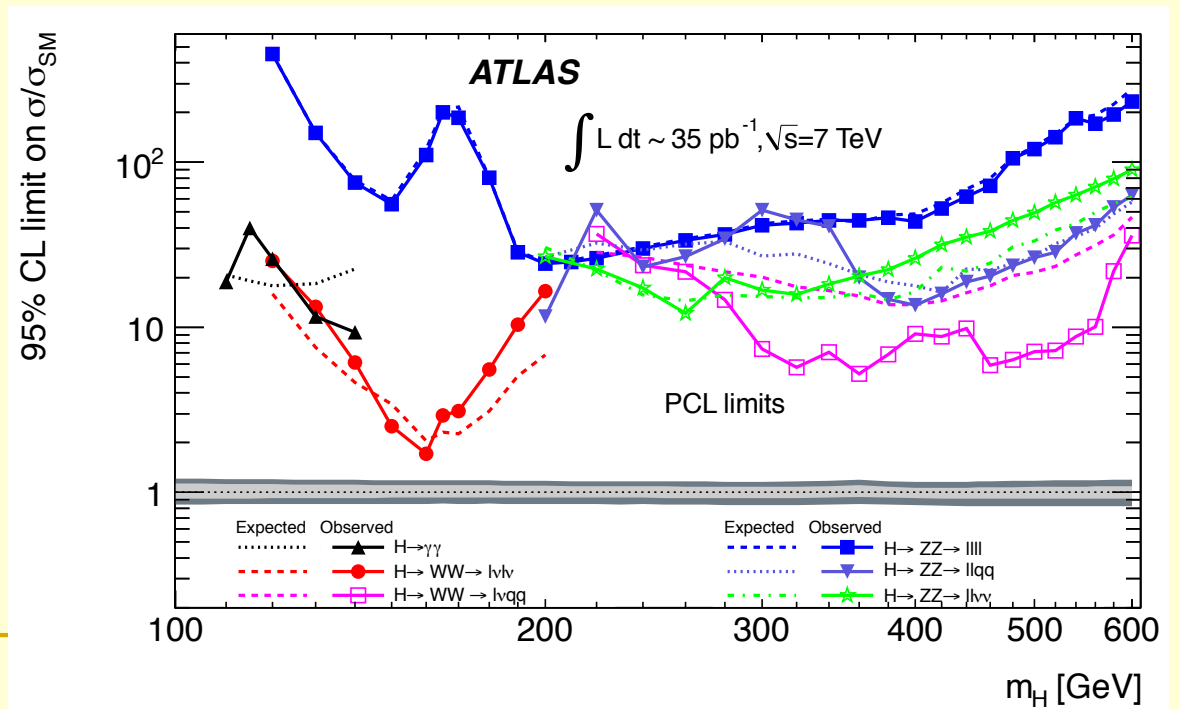
2012年いっぱい7TeVでデータ収集



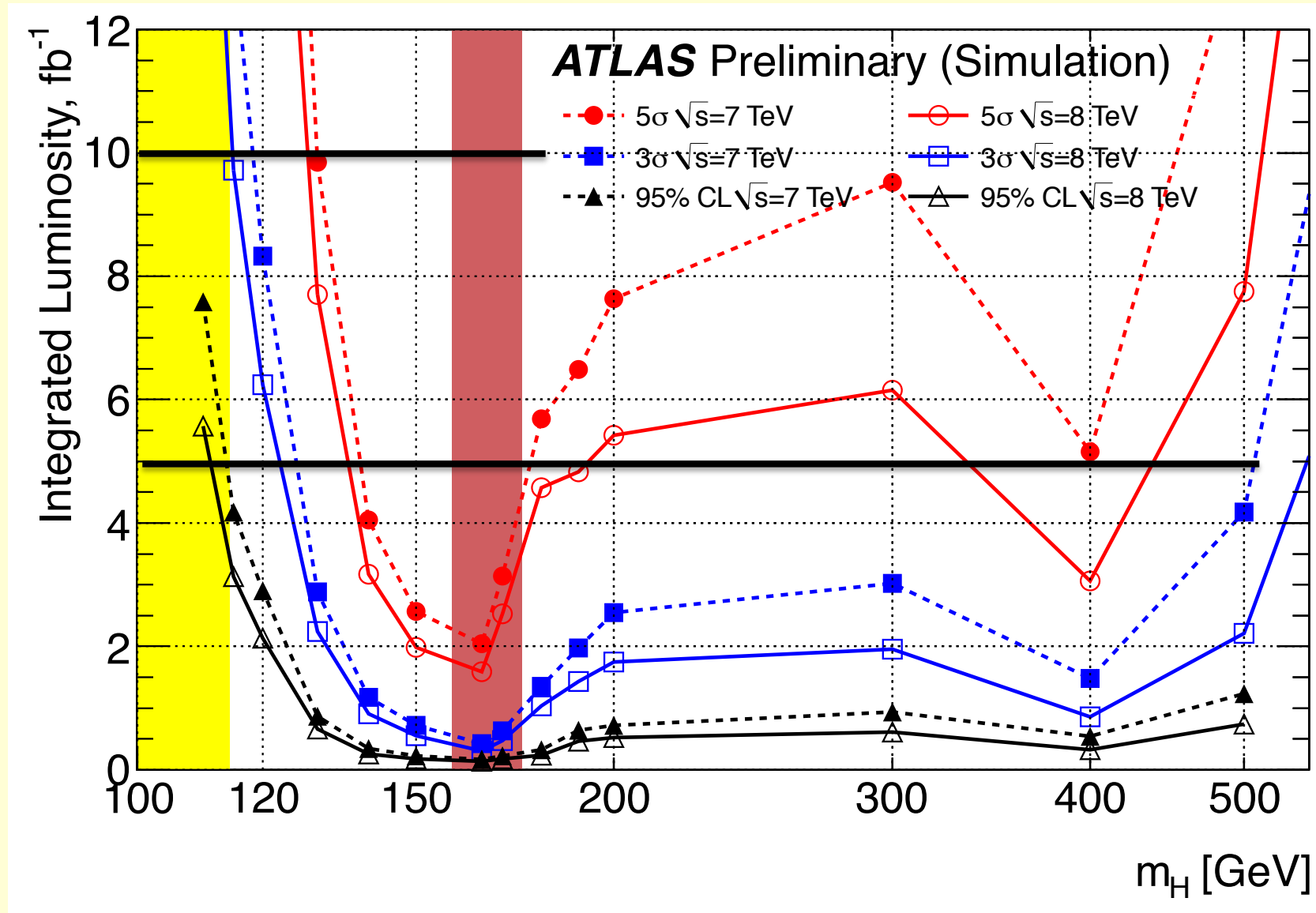
2010年 標準理論(的)ヒッグス粒子探索の結果



$\sim 35 \text{ pb}^{-1}$



2011-2012年 LHC ヒッグス探索の予想感度



SUSY List

SUSY particles

spin	0			1/2			1
	squark			quark			
Quark family	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{c}_L \\ \tilde{s}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{t}_L \\ \tilde{b}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$	
	\tilde{u}_R	\tilde{c}_R	\tilde{t}_R	u_R	c_R	t_R	
	\tilde{d}_R	\tilde{s}_R	\tilde{b}_R	d_R	s_R	b_R	
	slepton			lepton			
Lepton family	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu}_{eL} \\ \tilde{e}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu}_{\mu L} \\ \tilde{\mu}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu}_{\tau L} \\ \tilde{\tau}_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$	
	\tilde{e}_R	$\tilde{\mu}_R$	$\tilde{\tau}_R$	e_R	μ_R	τ_R	
	Higgs boson			Higgsino			
Higgs particles	$\begin{pmatrix} \phi_1^0 \\ \phi_1^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ \phi_2^0 \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_1^0 \\ \tilde{\phi}_1^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{\phi}_2^+ \\ \tilde{\phi}_2^0 \end{pmatrix}$		
Gauge particle				Gagino			Gauge boson
				$\tilde{\gamma}$	\tilde{Z}^0	\tilde{W}^\pm	γ
				\tilde{g}			Z^0
							W^\pm
							g

LHC

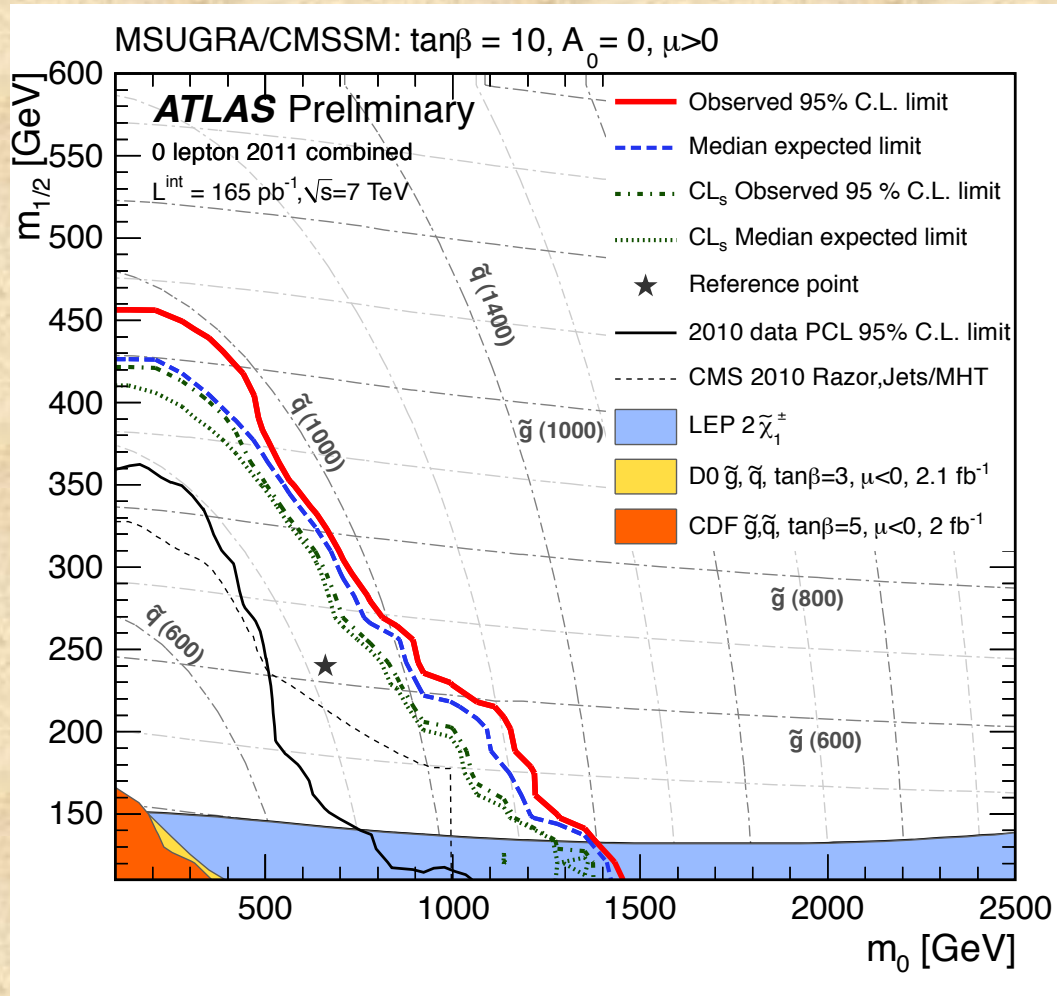
Colored
(~Heavy)

ILC
electroweak
(~Light)

$$(\tilde{\gamma}, \tilde{Z}^0, \tilde{\phi}_1^0, \tilde{\phi}_2^0) \rightarrow (\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0)$$

$$(\tilde{W}^\pm, \tilde{\phi}^\pm) \rightarrow (\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm)$$

SUSY探索の現状



CMエネルギーと、ルミノシティでの
 SUSY質量探索範囲 (TeV) 5σ 発見能力

\sqrt{s} (TeV)	\mathcal{L} (fb^{-1})			
	1	2	5	10
7	0.7	0.8	1.0	1.2
8	0.8	1.0	1.2	1.4
9	0.9	1.1	1.3	1.6

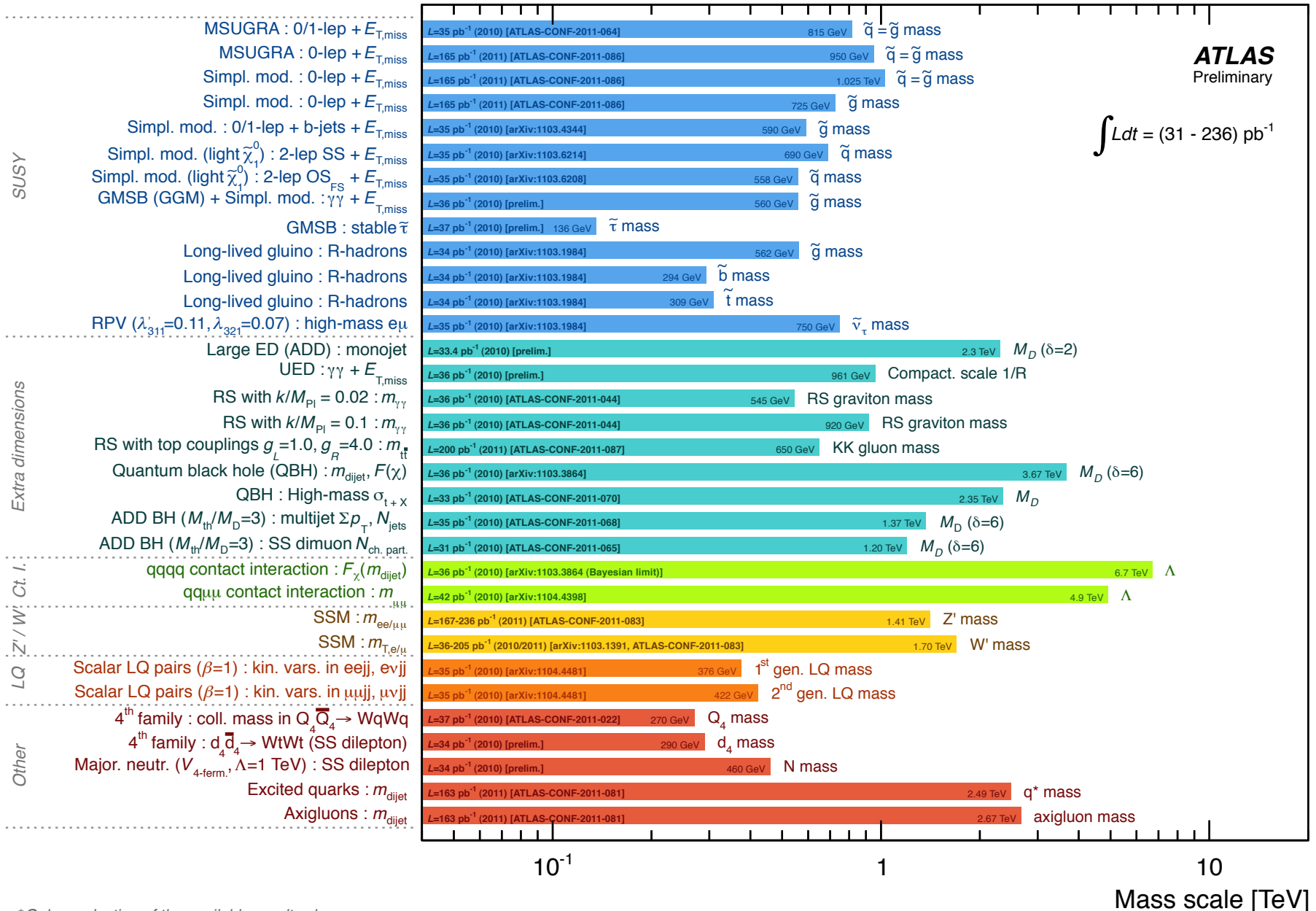
- 0 lepton + missing ET
- Only 165 pb^{-1}

Summary of Beyond SM

ATLAS Searches* - 95% CL Lower Limits (June 6, 2011)

ATLAS
Preliminary

$$\int L dt = (31 - 236) \text{ pb}^{-1}$$



*Only a selection of the available results shown

現状まとめ

最も不可思議な粒子「**ヒッグス**」は、もし標準理論「的」であれば
現状 114–150 GeV程度 (SUSYのMSSMでは90~130 GeV程度)

→2012年までにLHCで $3\sim 5\sigma$ 以上で

見つかる可能性大！！

SUSYは、もし「Constrained MSSMのMSUGRA的であれば」colorを
持つ粒子については、現状0.5~1 TeVまで下限が付く。

(まだまだ発見の可能性あるwindowあり。10倍データで解析中

LSP、Non-coloredの粒子群は更に制限は低い)

→2012年までにLHCでcolored particlesは

1 TeV程度まで 5σ 発見できる。

→13~14 TeV運転が始まると2014年には2~2.5 TeVまで発見可

エネルギーフロンティアの計画の行くべき道： 「物理」と「技術」が決める

LHC: 2010～2012年 7～8TeV run

大発見の可能性大!!

→ 2014年より Full Energy Run

→ 2020年頃 アップグレード (ルミノシティ増強)

◎ 加速器・測定器 アップグレード

ILC: 2010～2012年 技術開発・設計 第二フェーズ(TDP-2)

→ 2012年 加速器工学設計書 (Technical Design Report) 完成

◎ 加速器 詳細設計

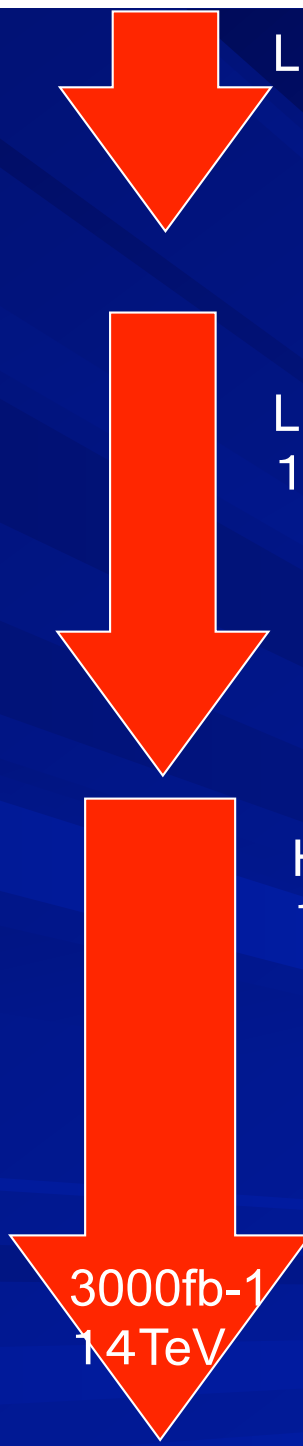
◎ サイト毎の施設設計 (国内候補地・海外候補地)

測定器・詳細設計書 (Detailed Baseline Design) 完成

→ LHCの初期データでILCの最初のエネルギー&コストの最適化

現在の大学4年生の年齢

2011	22歳	4年
2012	23	M1
2013	24	M2
2014	25	D1
2015	26	D2
2016	27	D3
2017	28	
2018	29	
2019	30	
2020	31	
2021	32	
2022	33	
2023	34	
2024	35	
2025	36	
2026	37	
2027	38	
2028	39	
2029	40	
2030	41	

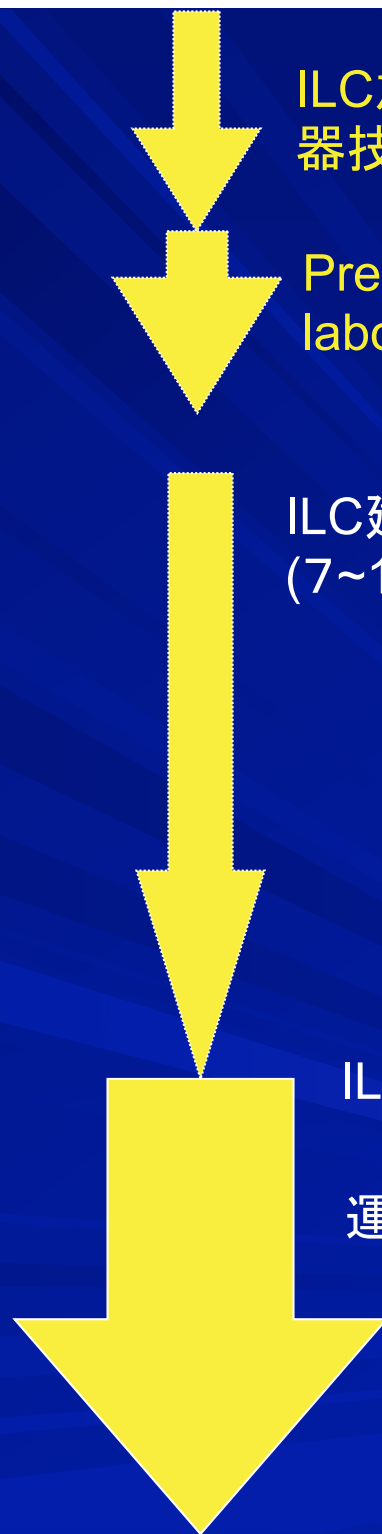


LHC稼働

LHC
14TeV

HL-LHC
14TeV

3000fb-1
14TeV



ILC加速器・測定器技術開発

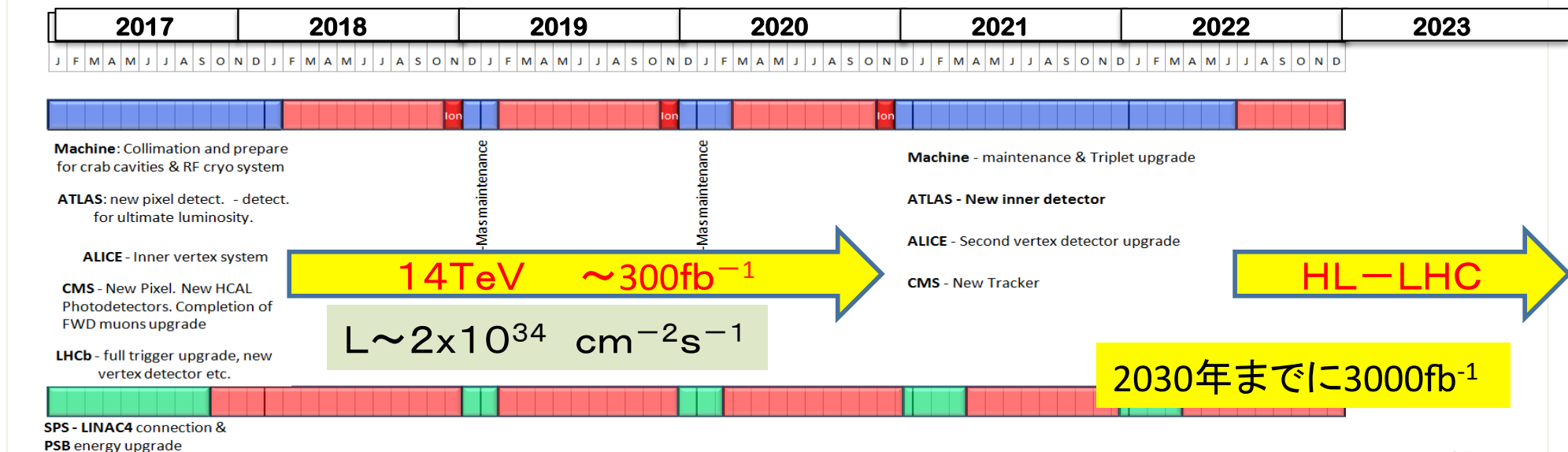
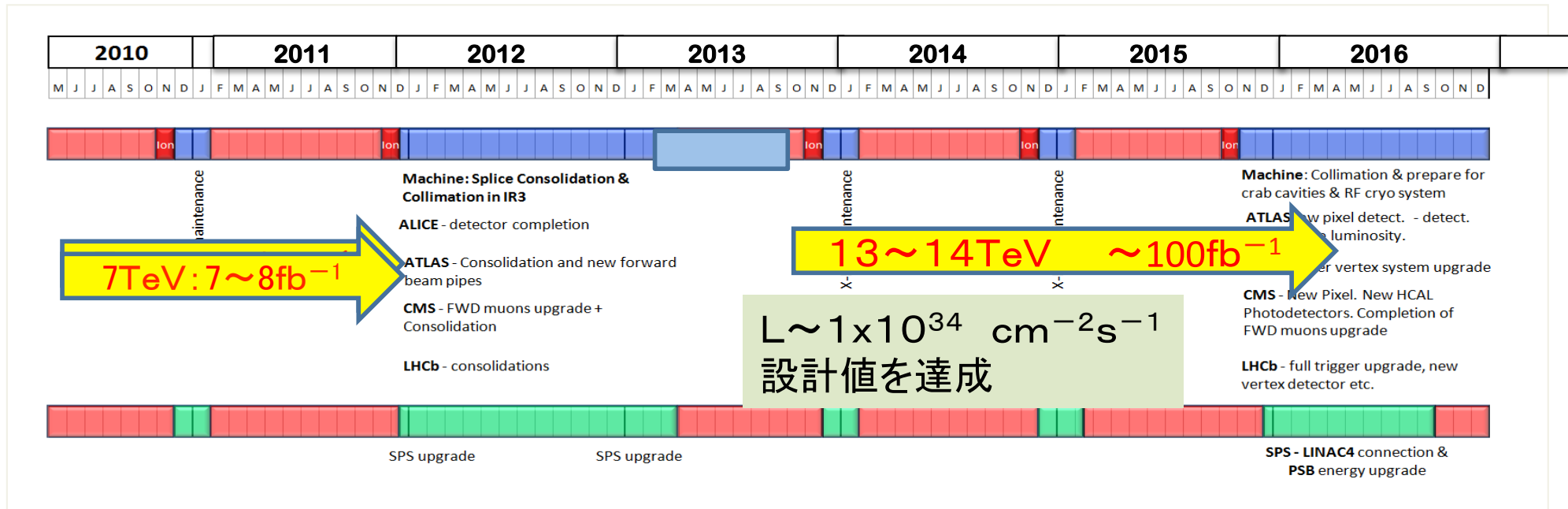
Pre-ILC laboratory

ILC建設
(7~10年)

ILC稼働

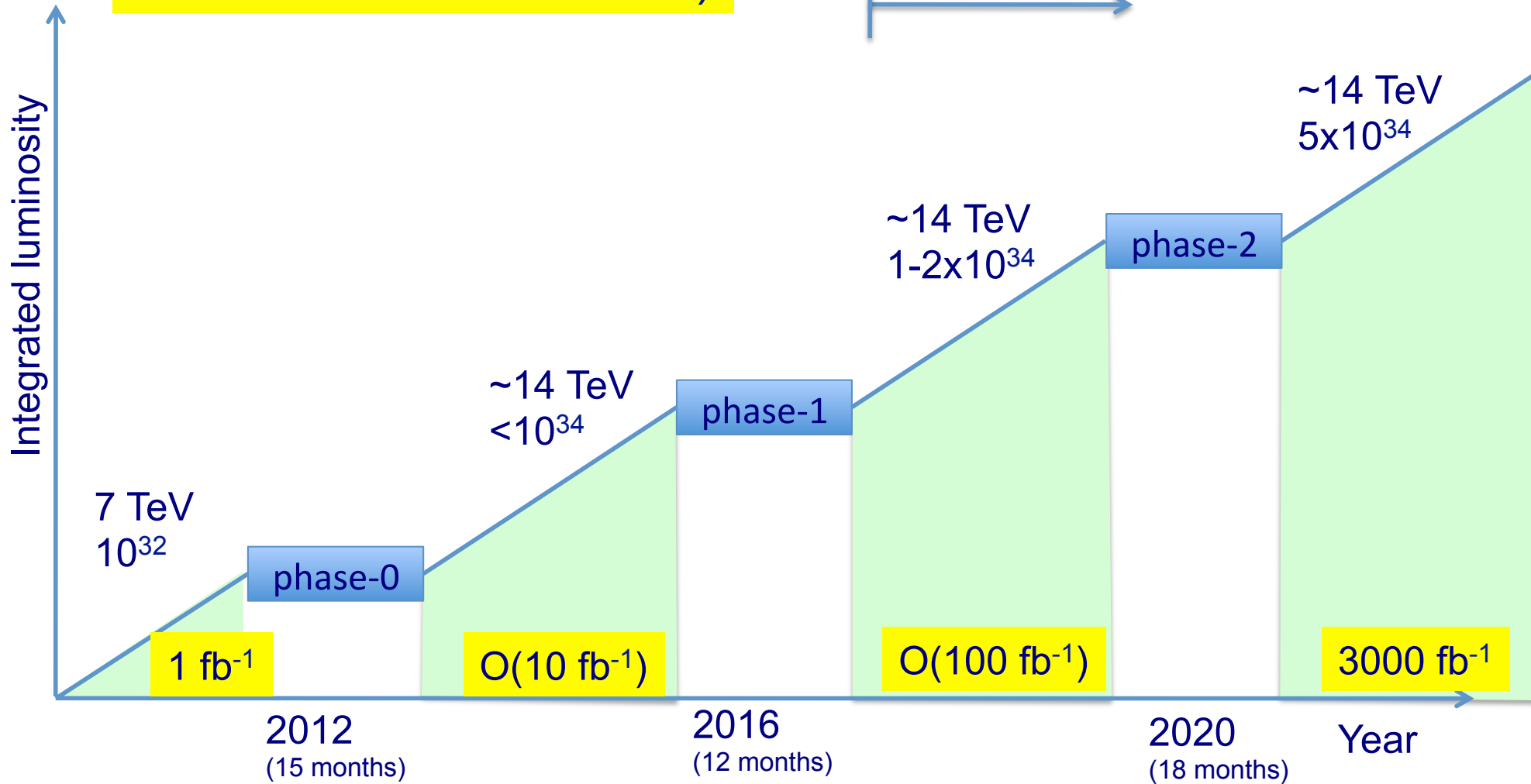
運転・研究

The 10 year technical Plan 見直し中



スケジュール(2010年7月)

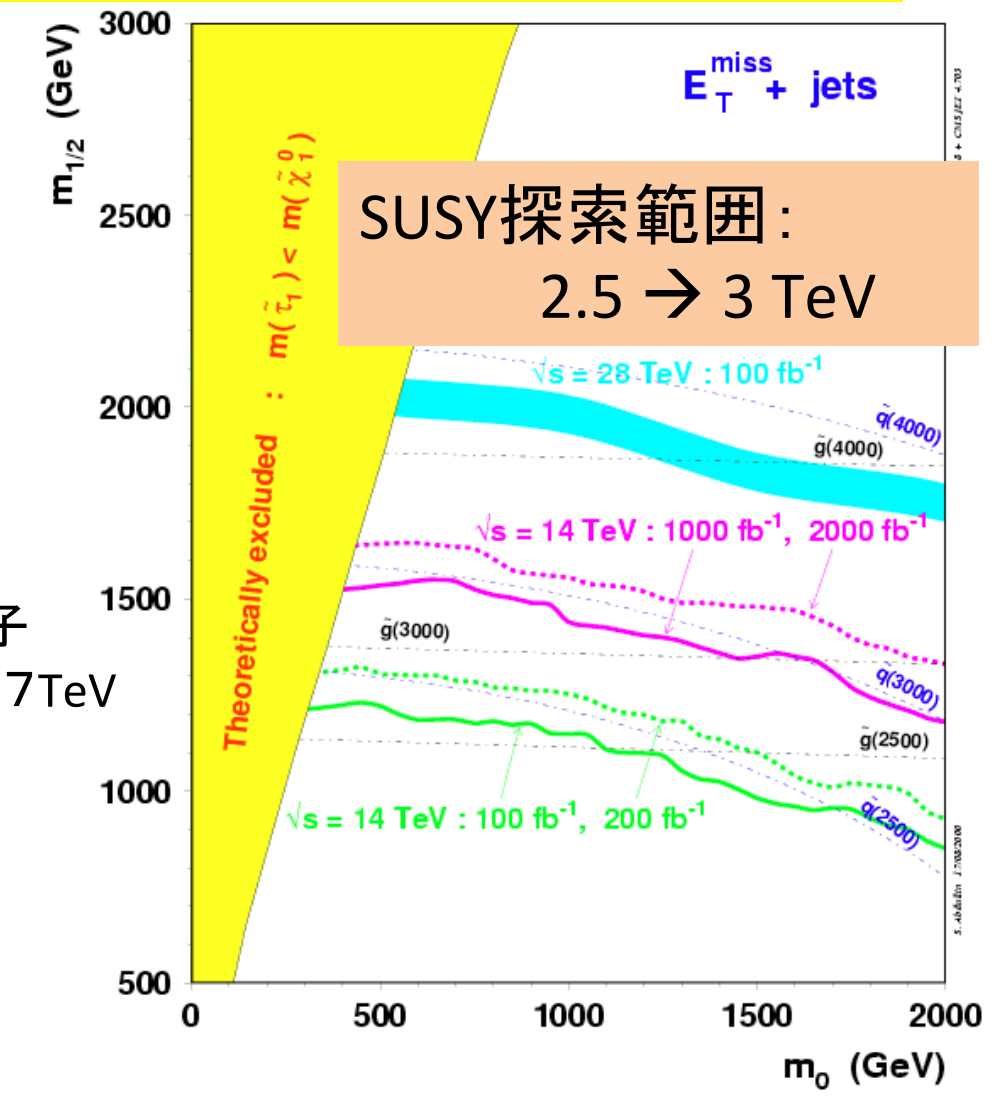
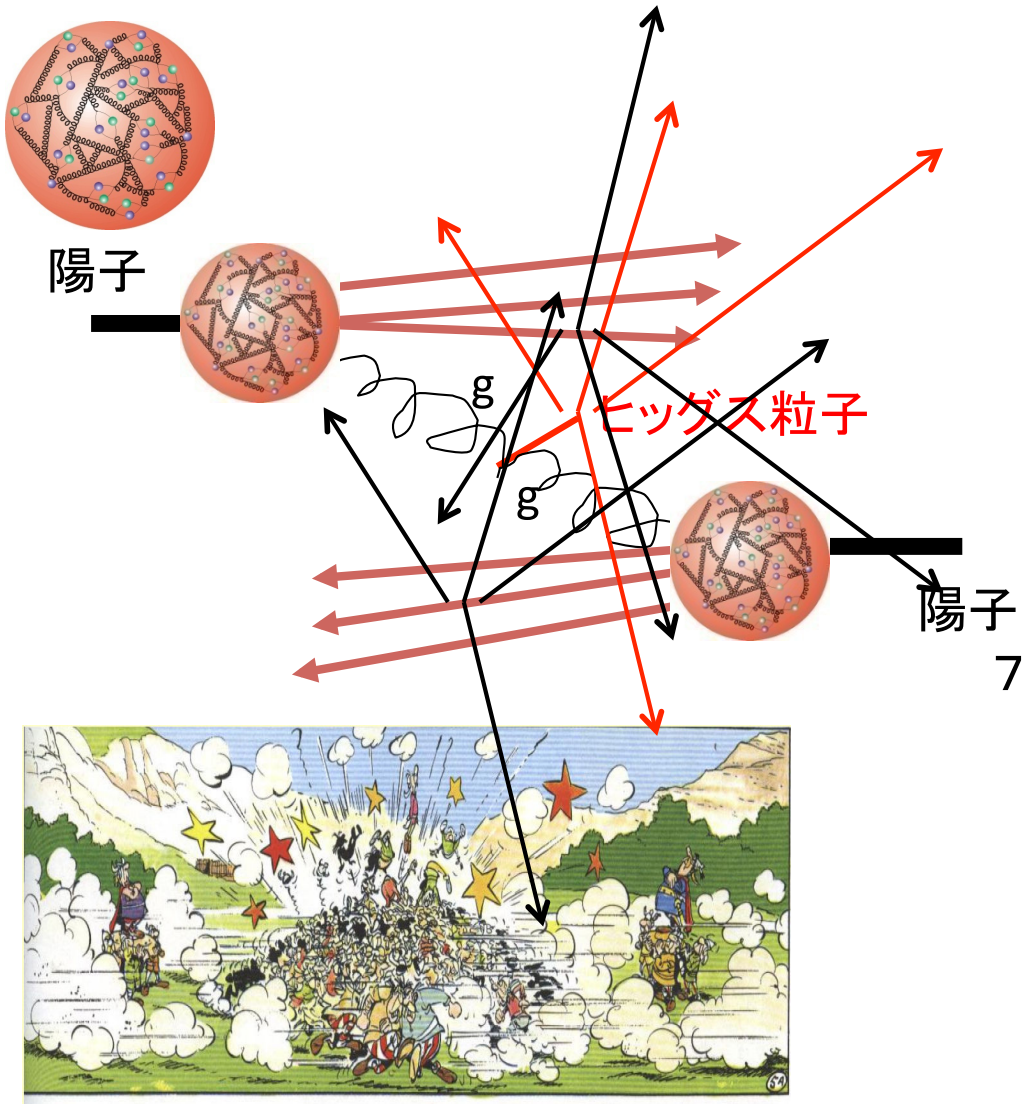
Beyond the design lumi.
→



T. Kawamoto

High statistics → High Energy

高輝度化により、実質的に、高いエネルギーのクォークやグルーオンを増やせる：
 → より高いエネルギーで探索が可能になる。



ルミノシティアップグレードでの物理

- ❖ まずはとにかくエネルギー（質量）リーチの拡大
- ❖ 新現象が発見された場合の精密測定

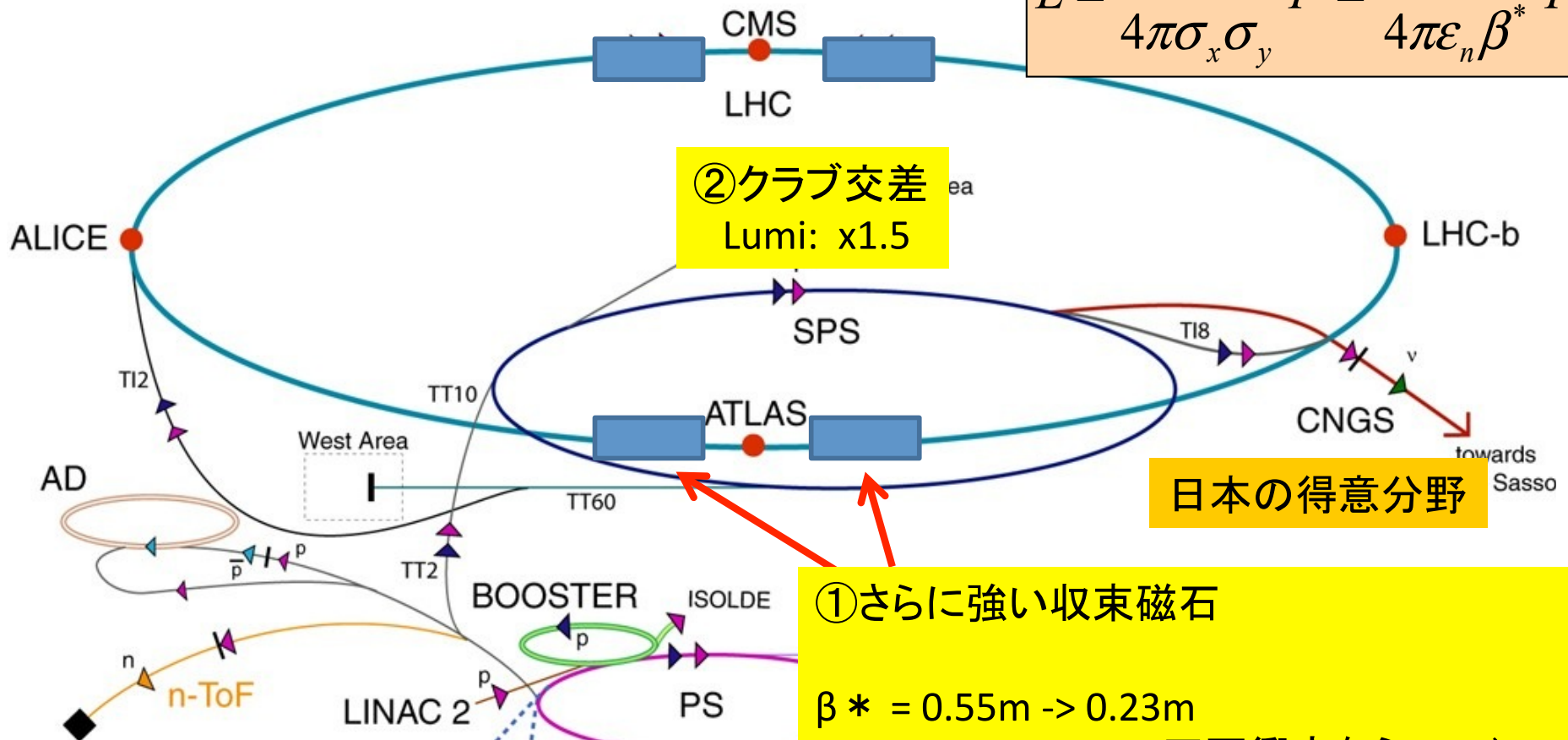
質量到達範囲の目安 (TeV)

(TGCは測定精度)

Process	LHC 14 TeV 100 fb ⁻¹	SLHC 14 TeV 1000 fb ⁻¹	DLHC 28 TeV 100 fb ⁻¹	LC 0.8 TeV 500 fb ⁻¹	CLIC 5 TeV 1000 fb ⁻¹
Squarks (TeV)	2.5	3	4	0.4	2.5
$W_L W_L$ (σ)	2	4	4.5	6	90
Z' (TeV)	5	6	8	8 [±]	30 [±]
Extra-dimens. scale (TeV)	9	12	15	5–8.5 [±]	30–55 [±]
q^* (TeV)	6.5	7.5	9.5	0.8	5
Compositeness scale (TeV)	30	40	40	100	400
TGC, λ_γ (95%CL)	0.0014	0.0006	0.0008	0.0004	0.00008

いかにしてHigh-Luminosityを達成するか

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} F = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi\varepsilon_n \beta^*} F$$



② クラブ交差
Lumi: x1.5

日本の得意分野

① さらに強い収束磁石
 $\beta^* = 0.55\text{m} \rightarrow 0.23\text{m}$
Lumi: x1.6 (正面衝突ならx 2.5)

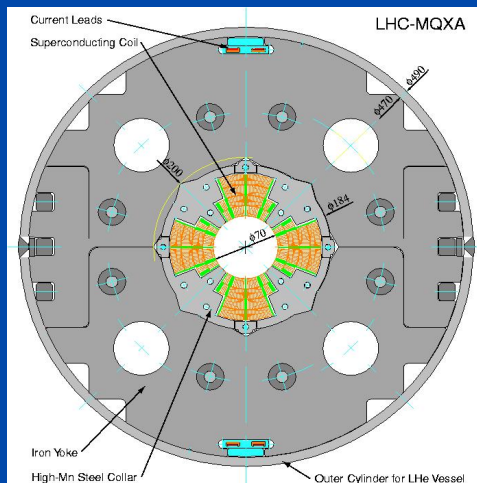
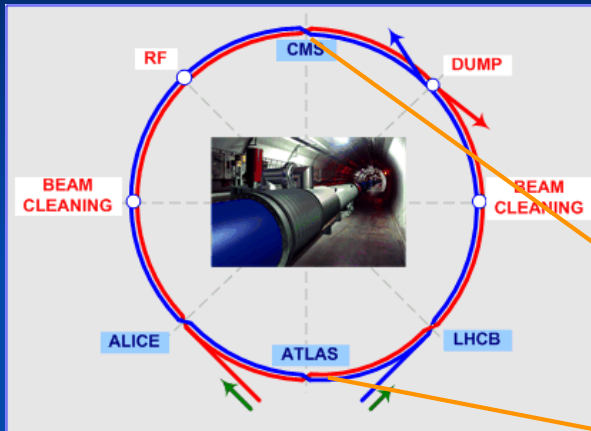
③ よりたくさん
の入射: Injector upgrade
N: $1.15 \times 10^{11} \rightarrow 1.5-1.7 \times 10^{11}$
Lumi: x2-3

④ コリメータのアップグレード

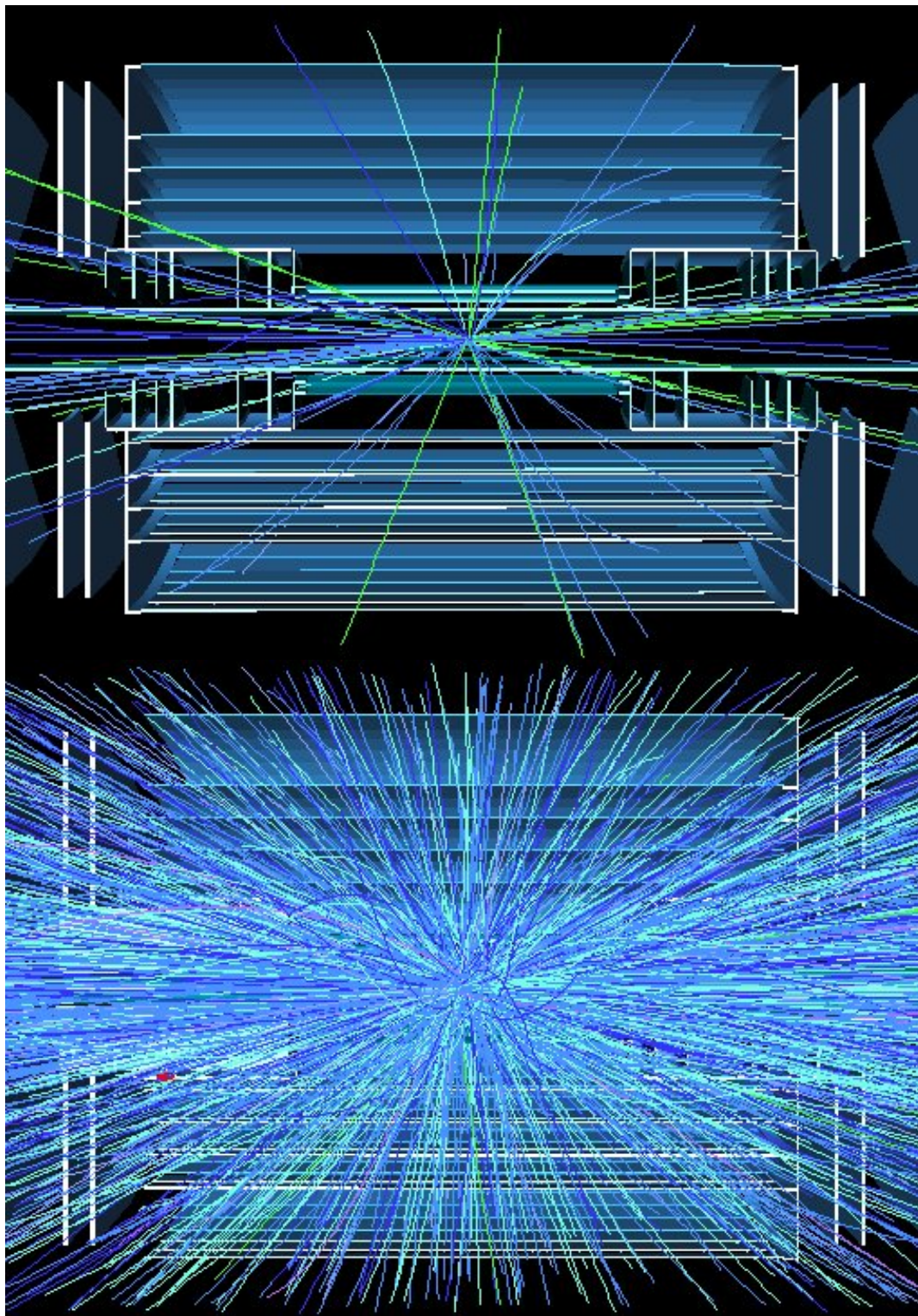
▶ neutrons ▶ neutrinos SPS Super Proton Synchrotron

LHC Large Hadron Collider
n-ToF Neutron Time-of-Flight
CNGS CERN Neutrino

CERN-LHC ビーム衝突点収束磁石 KEK-Fermilab Collaboration



衝突点ビーム収束磁石: 日本のLHC建設貢献
日(KEK)、米(Fermilab)間の国際協力



High luminosity LHCのイベントが
どんな感じかの例:

Charged particle tracks from simulation

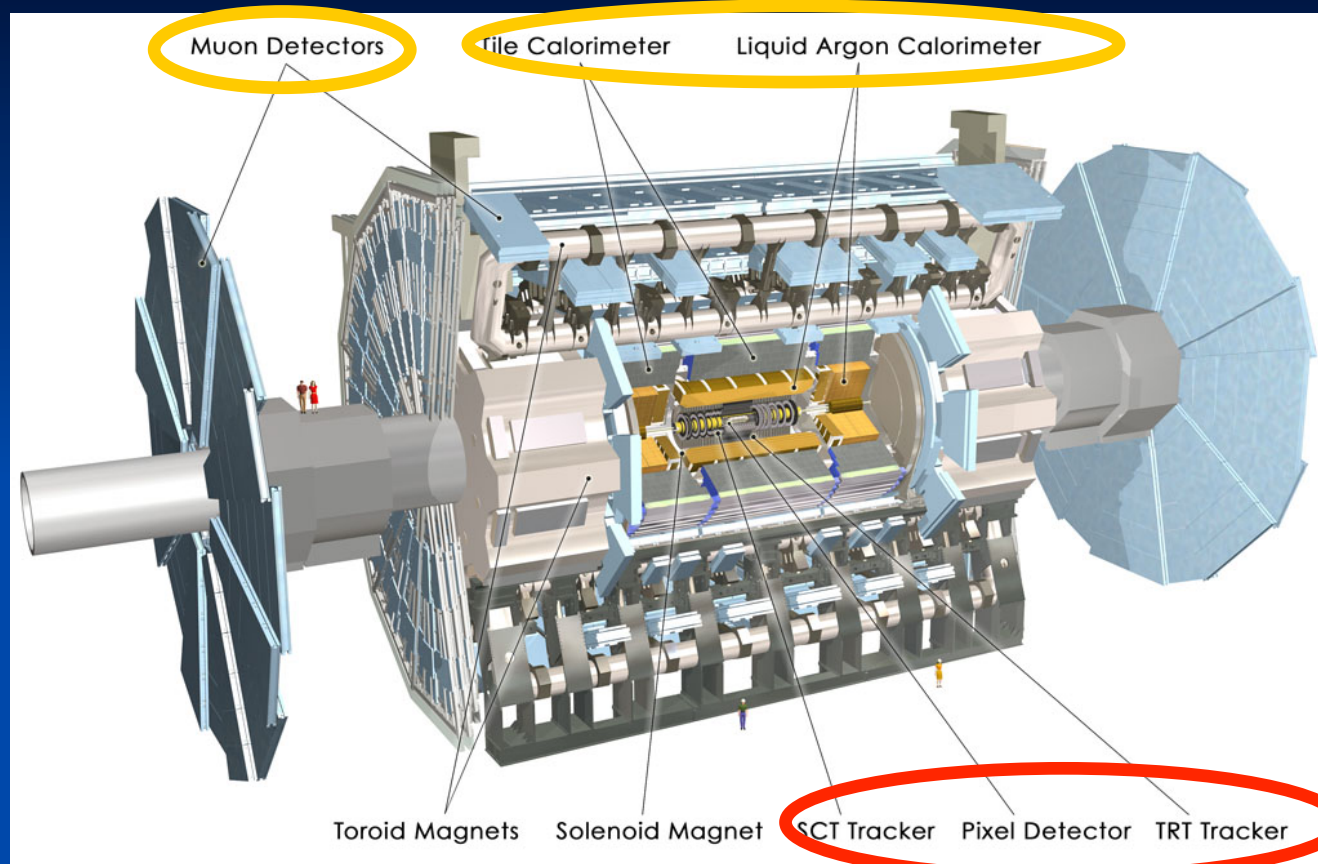
普通(以下)のLHC

$L = 0.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
5 pp collisions / crossing

極端なLHC

$L = 10 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
400 pp collisions / crossing

ATLAS Detector upgrade Plan



- Magnet System には変更なし。
- Inner Tracker は全部新しくする (All Silicon, Pixel/Short-Stripの多用)
- Calorimeterは LVL1 Trigger を完全に入替える
- Muon はレートの高いところだけの変更



ILC Accelerator Baseline Parameter for Physics

The BASELINE:

E_{cm} adjustable from 200 – 500 GeV

Luminosity $\int L dt = 500 \text{ fb}^{-1}$ in the first 4 years ($L \sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

e^- beam polarization 80%

Upgradable: to $\sim 1 \text{ TeV}$ with 1 ab^{-1} / 3-4 years

Options :

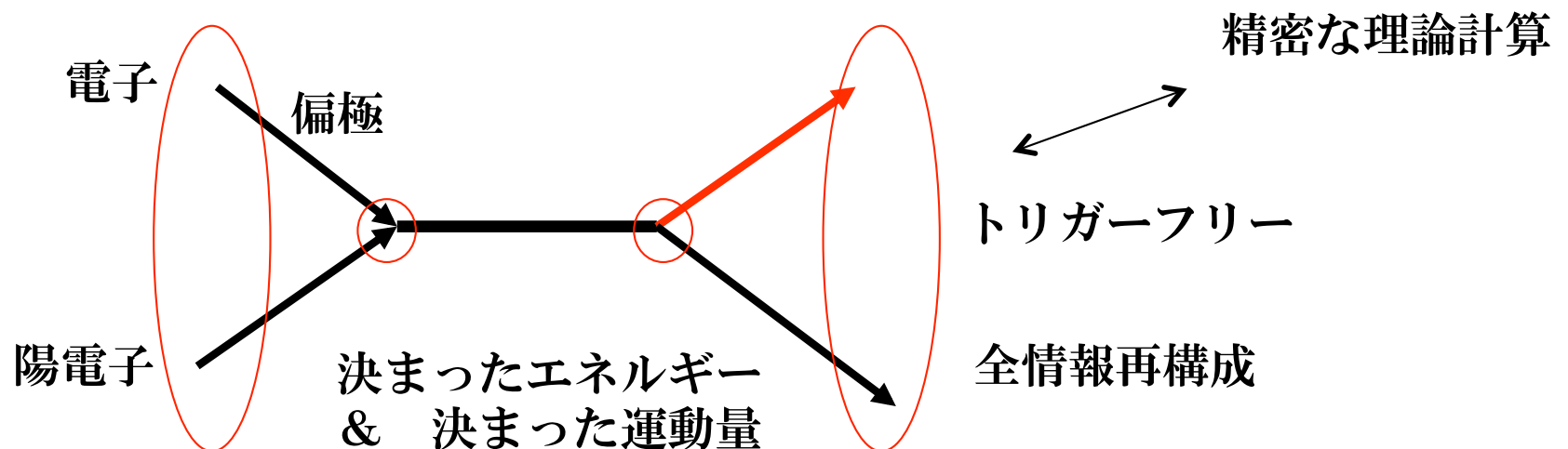
- e^+ polarization $>50\%$
- GigaZ (high luminosity running at M_Z and $2M_W$)
- $\gamma\gamma$, $e\gamma$, e^-e^- collisions

Choice of options depends on LHC+ILC results

[<http://www.fnal.gov/directorate/icfa/para-Nov20-final.pdf>, Heuer et al]

Superior Characteristics of ILC

- **Electron/positron collision** (elementary process)
- **Fixed Energy & Scan** (controllable)
- **Controllable beam polarization**
- **Very sensitive detectors**
- **Trigger free**
- **Precise theoretical calculation (<1%)**





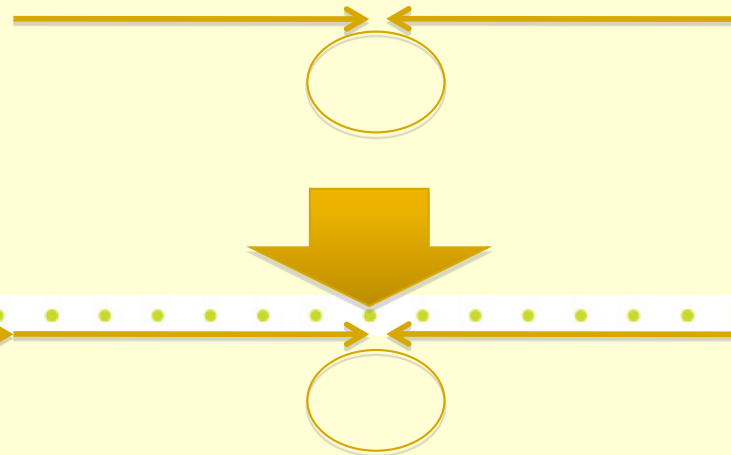
はじめの一步

最も重要なもの=加速器のエネルギー

エネルギー閾値 (直接生成に必要なエネルギー)

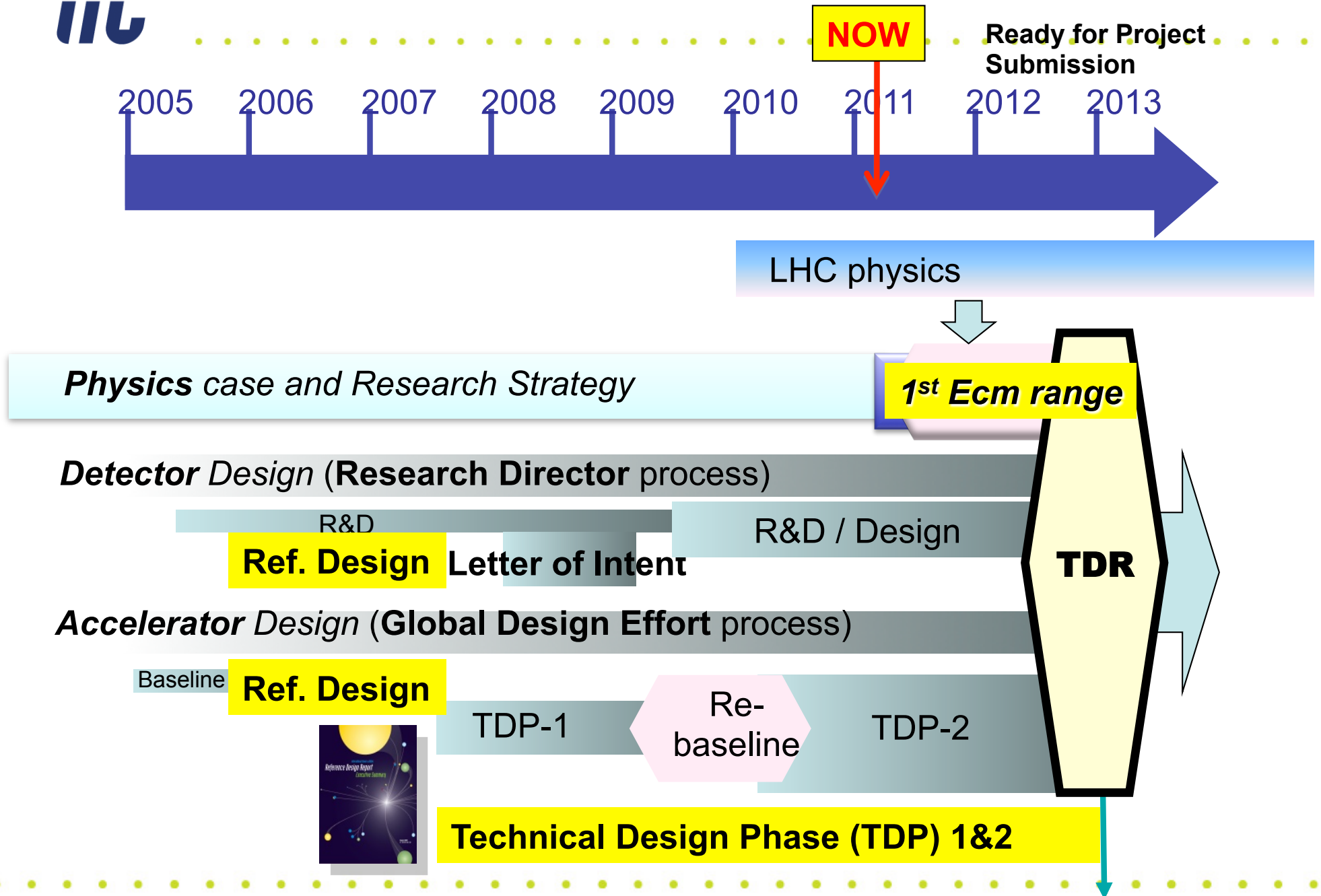
- Higgs生成 $M_{\text{HIGGS}}+M_Z$ (~210 GeV for 120 GeV Higgs)
- Higgs自己結合 $2 \times M_{\text{HIGGS}}+M_Z$ (~330 GeV for 120 GeV Higgs)
- Top quark対生成 350 GeV
- 超対称性粒子・ダークマター $2 \times \text{LSP}$ (最も軽い超対称性粒子) 質量
- Any pair production $2 \times \text{質量}M$ ($E_{\text{cm}}=500\text{GeV}$ なら $M=250\text{GeV}$ まで)

円形加速器と比較したリニアコライダーの特徴
エネルギー拡張性





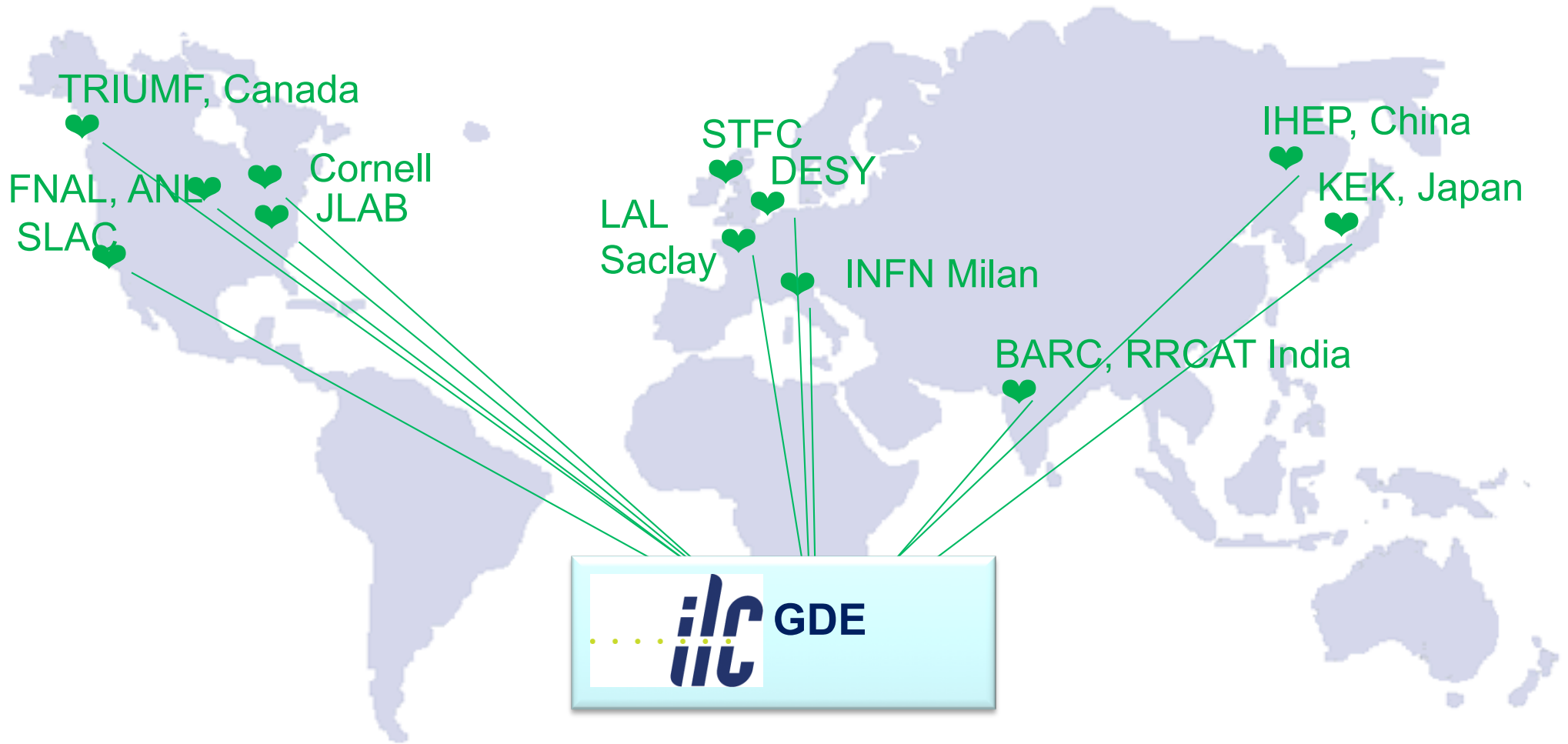
ILC Technology-Driven Timeline



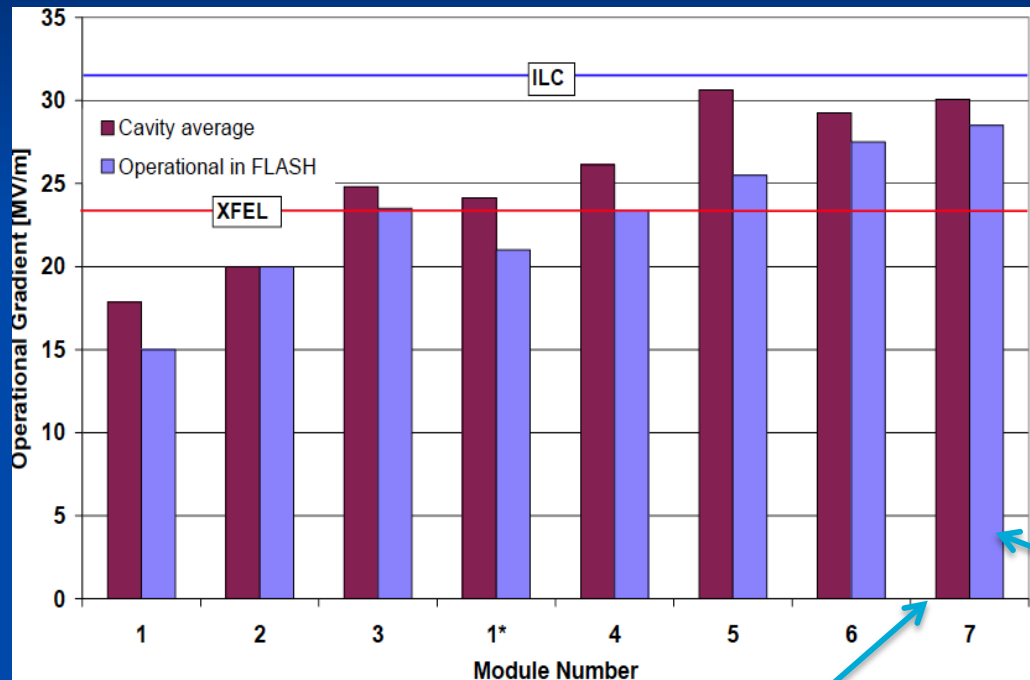
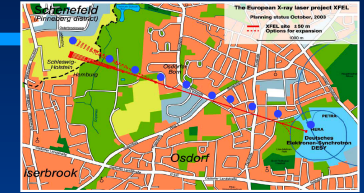


Global Collaboration

focusing on SCRF



加速器ユニットとしての性能の進展 in progress at TESLA/FLASH toward EuroXFEL



ILC operation:

- <31.5> MV/m

R&D Status:

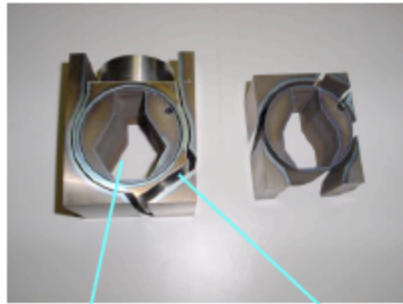
- ~ 30 MV/m to meet XFEL requirement



•9連空洞 x 9: 加速器ユニットとしては、30 MV/mのレベル、
>> さらに開発、性能の向上/安定性への努力



Cavity Fabrication Process



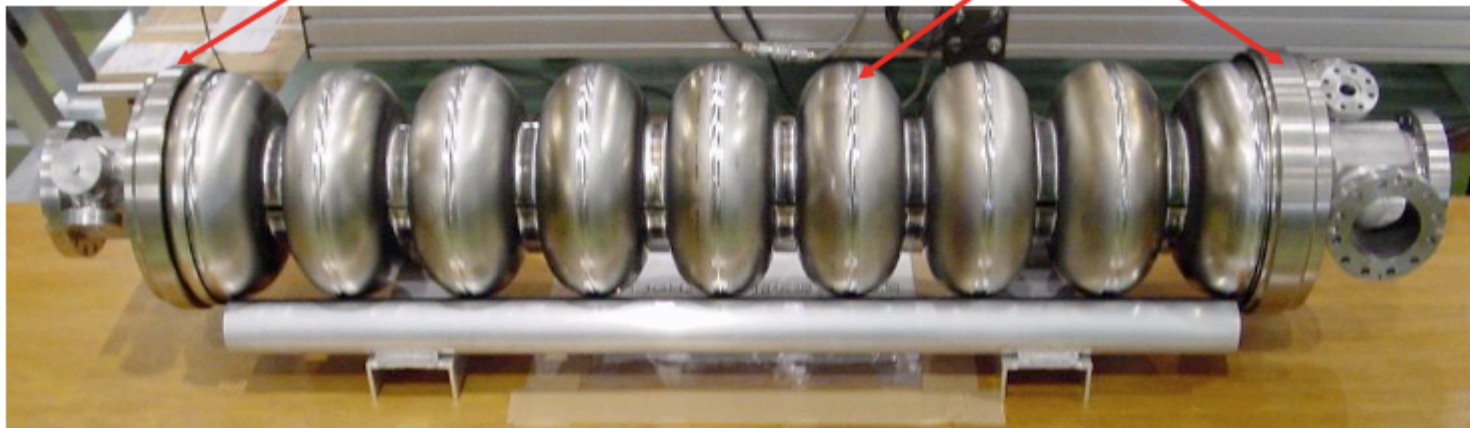
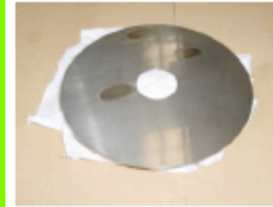
HOM coupler



End-groups



Center-cells
(Tokyo Denkai ; RRR~300 Nb)



S1-Global Module C (DESY, FNAL cavities)

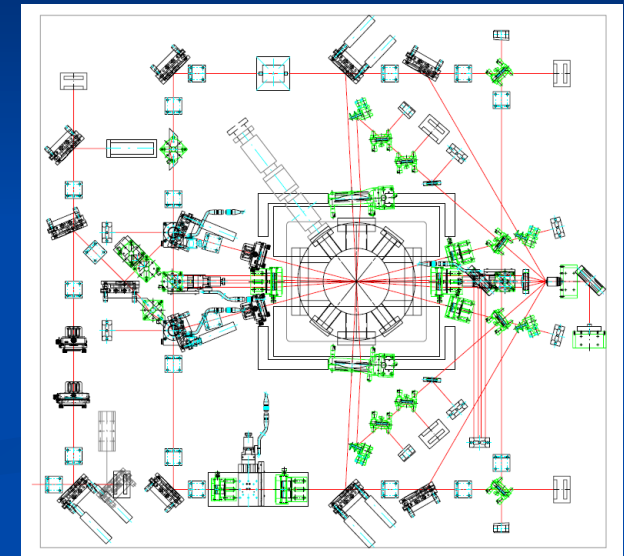
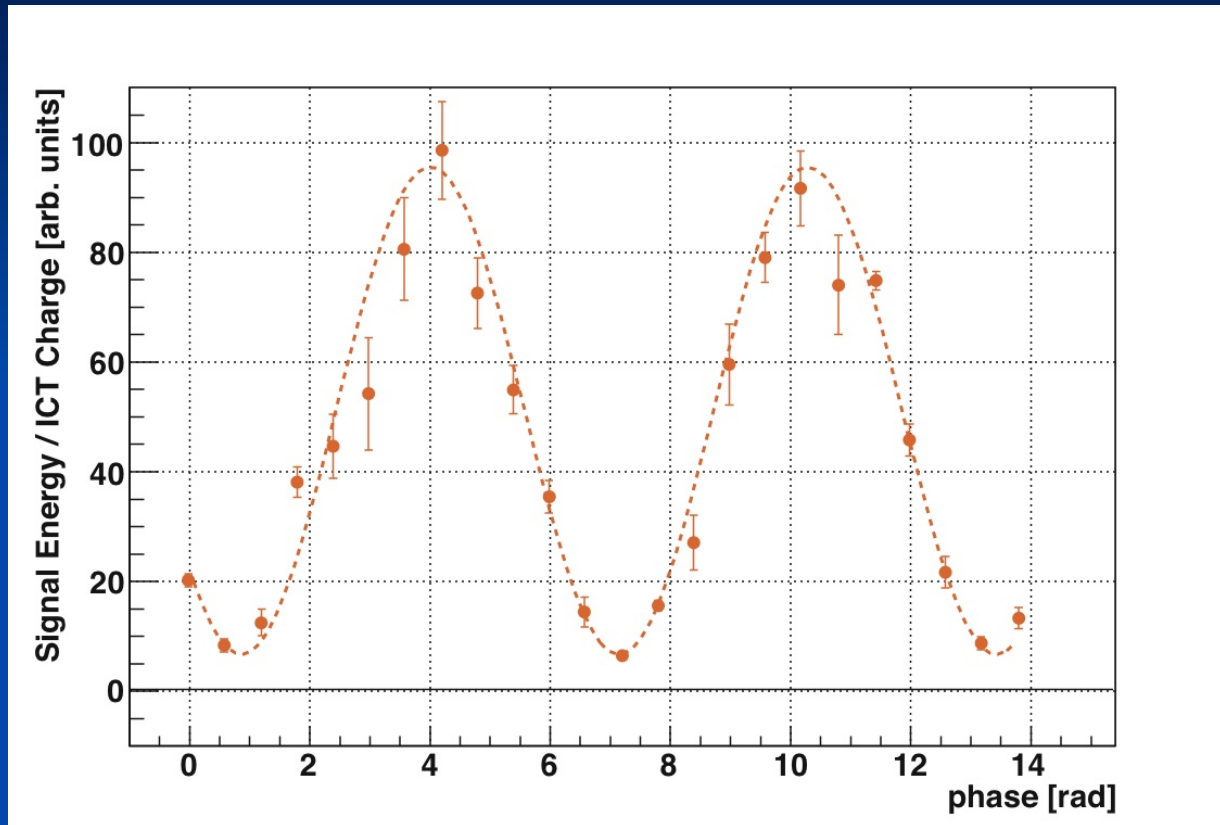


Cryomodule and cavities were arrived at STF on Jan. 2010.

Final Results in 2010 continuous beam operation

The final beam size was measured with IP-BSM (Laser Interferometer)

(東大・駒宮研、KEK、他)

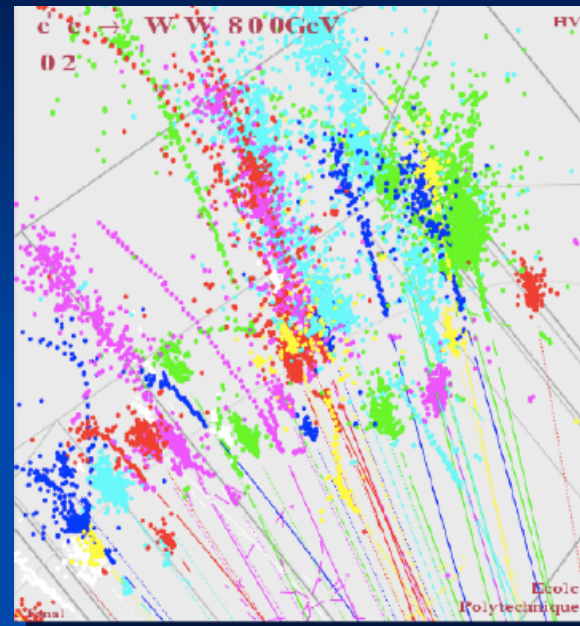
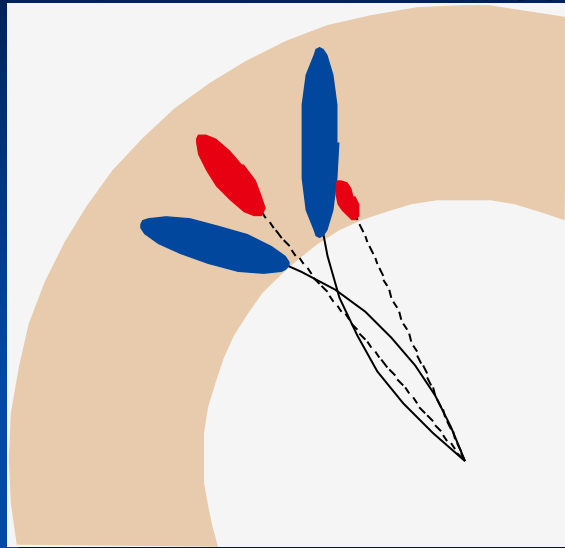


In the continuous operation,
we achieved the 0.87 of the modulation depth at 8.0 deg. Mode.

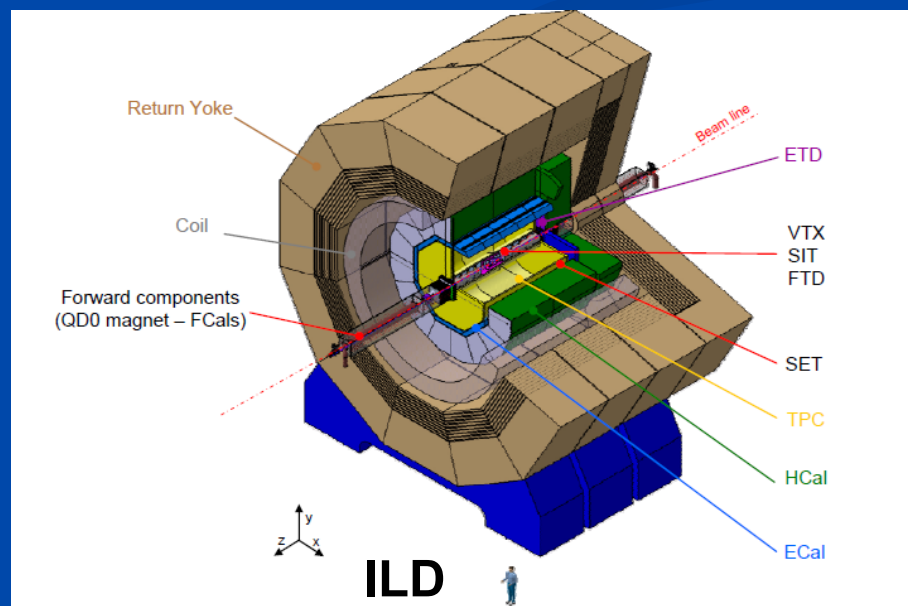
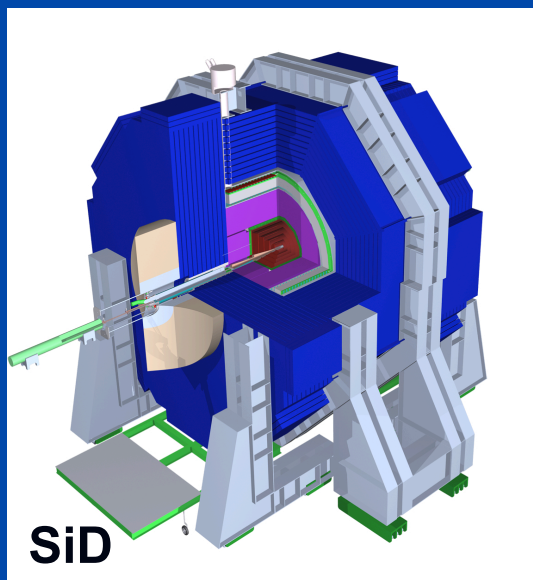
The evaluated vertical beam size is 310 ± 30 (stat.) $+0/-40$ (syst.) nm.
(The design beam size is 114nm for $\epsilon_y=13\text{pm}$.)

Particle Flow Analysis (developed at LEP)

ジェットのエネルギーを精度よく決めるために



ILCでの測定器 (提案例)



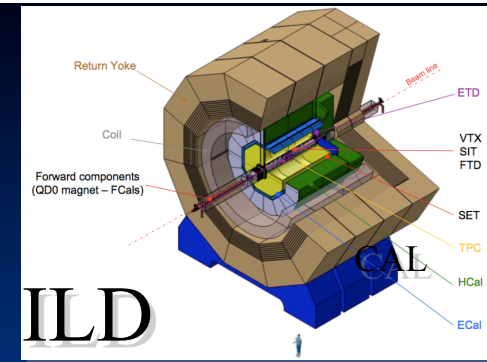
特別推進研究
ILC測定器
(代表:山本均)
採択(H23-27)

ILC 実験の基本理念

事象をファイマン図を見るがごとくに見る

LHC測定器の1桁上を行く性能を目指して

With respect to detectors at LHC:



■ Vertex Detector

■ Inner layer

3~6 times closer to IP

■ Pixel size

1 / 30

■ Materials

1 / 30

■ Tracking Detector

■ Materials in Tracker

1 / 6

■ Track mom. resolution

1 / 10

■ Calorimeter

■ EM cal granularity

1 / 200

■ *Impact Parameter resolution*: $< 5\text{mm} + 10\text{mm} / p(\text{GeV}) \sin^{-3/2} \theta$

■ *Jet energy resolution*: $dE/E < 0.3 / \sqrt{E(\text{GeV})}$

■ *Excellent Hermeticity*: down to $\theta < 5\text{--}10 \text{ mrad}$ (active mask)

国内の候補地

九州

- 背振山地
- 先端基礎科学次世代加速器研究会(2007発足)
- 九州大学、佐賀大学、福岡県、佐賀県
- 九大・佐賀大合同組織、自治体の推進室設置
- 地質調査(基礎資料・済)、産学連携を推進中

東北

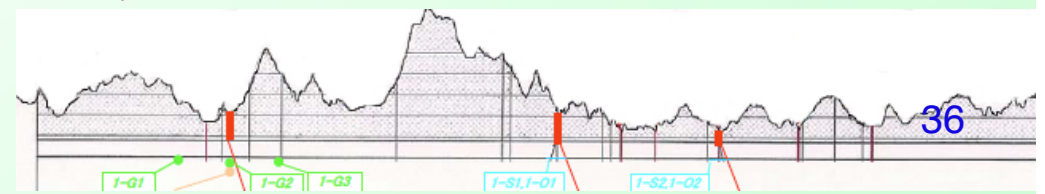
- 北上山地
- 東北加速器基礎科学研究会(2009発足)
- 東北大学、岩手県、宮城県、東北経済界
- ボーリング調査、分析中
- 岩手県: 復興構想会議にTOHOKU科学技術特区の中核としてILCを提案(2011年5月～)



地域の大学、自治体、市民／経済団体が主導

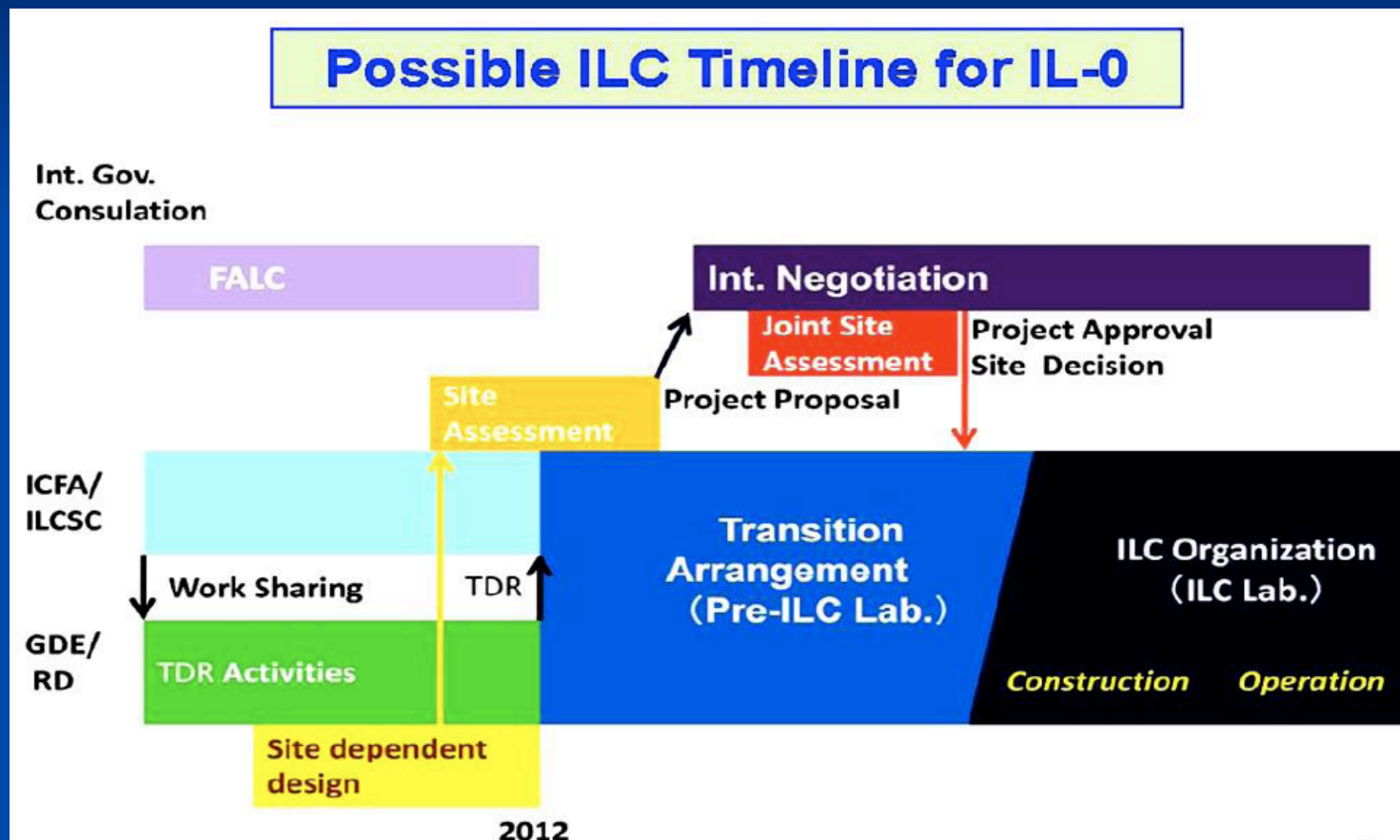
ILCの理解啓蒙の促進

サイト地質・都市計画等の調査・検討



ILC Timeline beyond 2012

by ILCSC/ICFA



ヒッグス(これだけで十分新物理だが)
と
更に越える新物理

6つのシナリオ

(a la 兼村@2010秋の物理学会シンポジウム)

さまざまな可能性 (2010秋・物理学会シンポでの兼村氏のトーク)

	light H	heavy H	no H	NewParticle
シナリオ1	X			X
シナリオ2		X		X
シナリオ3			X	X
シナリオ4	X			
シナリオ5		X		
シナリオ6			X	

light H : $114\text{GeV} < m_h < 150 - 200 \text{ GeV}$ (LEPにコンシステントな領域)

heavy H : $150 - 200 \text{ GeV} < m_h$ (LEPと一見矛盾する領域)

ヒッグスが？

(軽い、重い、何もない)

それ以外は兆候なしの場合

シナリオ6 (No-Higgs×No-NP)

- ヒッグスも何もなければ、ツリーレベル・ユニタリティからTeV以上で電弱理論は強結合になる
この場合は理論の予言能力がなくなる
- あるいは、新粒子がヒッグスの代わりにユニタリティを救う(例:ヒッグスレス模型)
- そのスケールに次世代加速器実験で直接間接に到達可能なはずだが。。。見つからない。。。。
- いずれにせよ、新物理の存在は確定的
- 興味深いシナリオだが...
- LHC(初期)で発見の成果がないシナリオ
→ もっとリーチが必要？または何か見落とし？見えない？
- 10年後のエネルギーフロンティアのシナリオを描きにくいシナリオ
(物理研究としては本来はこの場合、フロンティア実験が正に「必須」でTeVまでに確実になにかあることはわかっているにもかかわらず何かと明確に言えない)

シナリオ5 (Heavy-Higgs×No-NP)

- ヒッグスは重いところに見つかった
- 他に何も見つからない
- Low Λ シナリオ
- 重いヒッグスはLEPと矛盾

⇒ 必ず何か**新しいダイナミクス**
が**TeV**になければならない

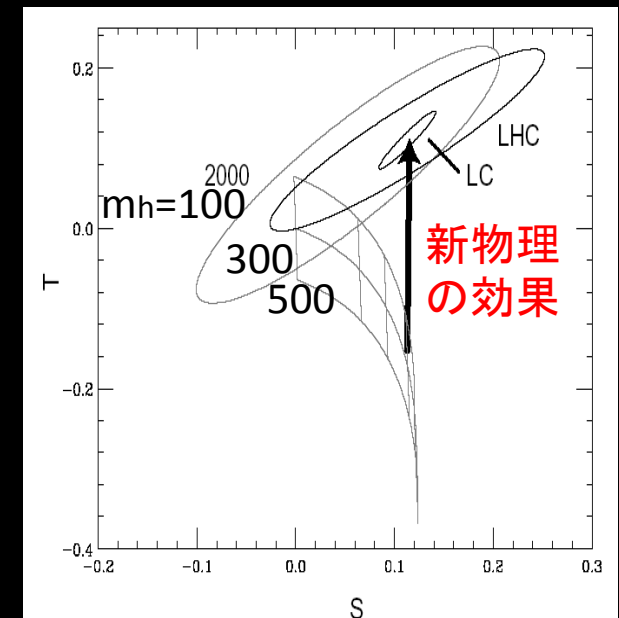
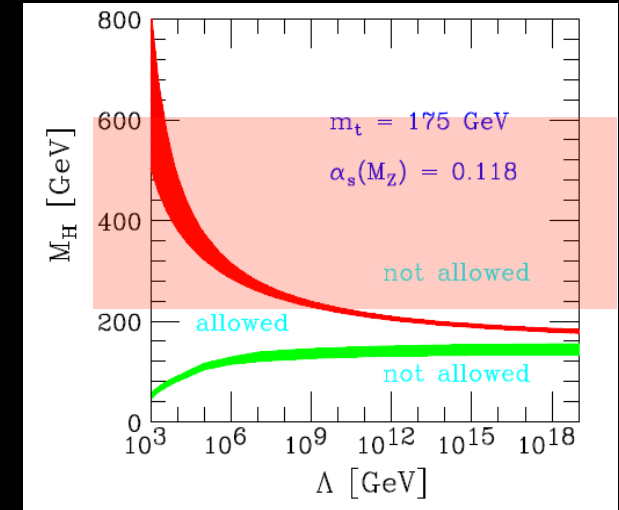
TeV領域の新粒子を発見せよ！

– SLHCでエネルギーリーチを！！

直接探索

– もしエネルギー的に届けば

ILCで重いヒッグスの**精密測定**

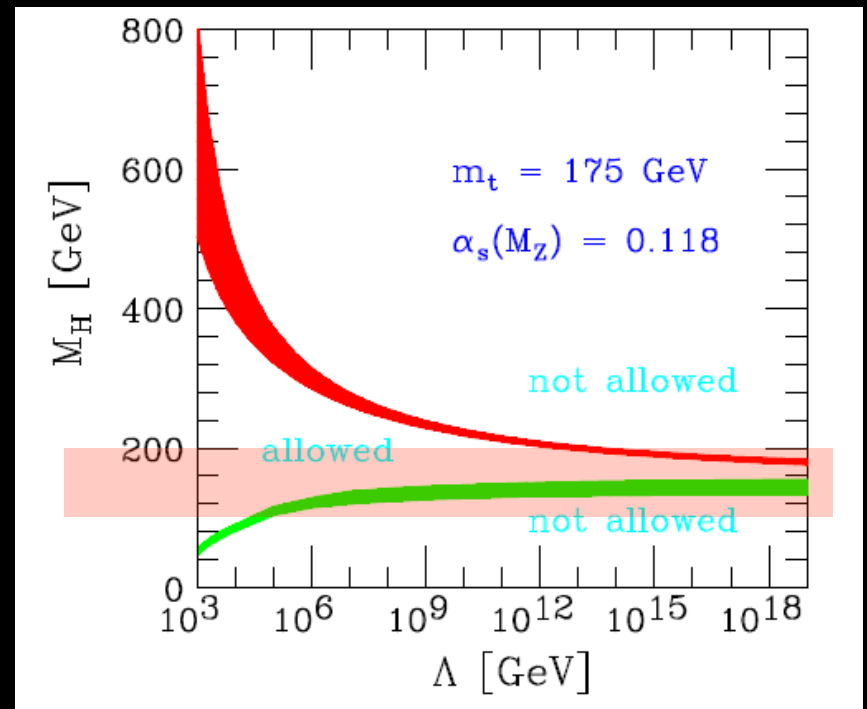


シナリオ4 (light-Higgs×no-NP)

- LEPとコンシステントなシナリオ
- Very high Λ までSMは生き残れる？

ヒッグスはSMか？新物理か？
ストリングスケールまでSM？

- 階層性問題は残る
- 暗黒物質、ニュートリノ質量、宇宙のバリオン非対称も謎のまま
- GUTも無理,

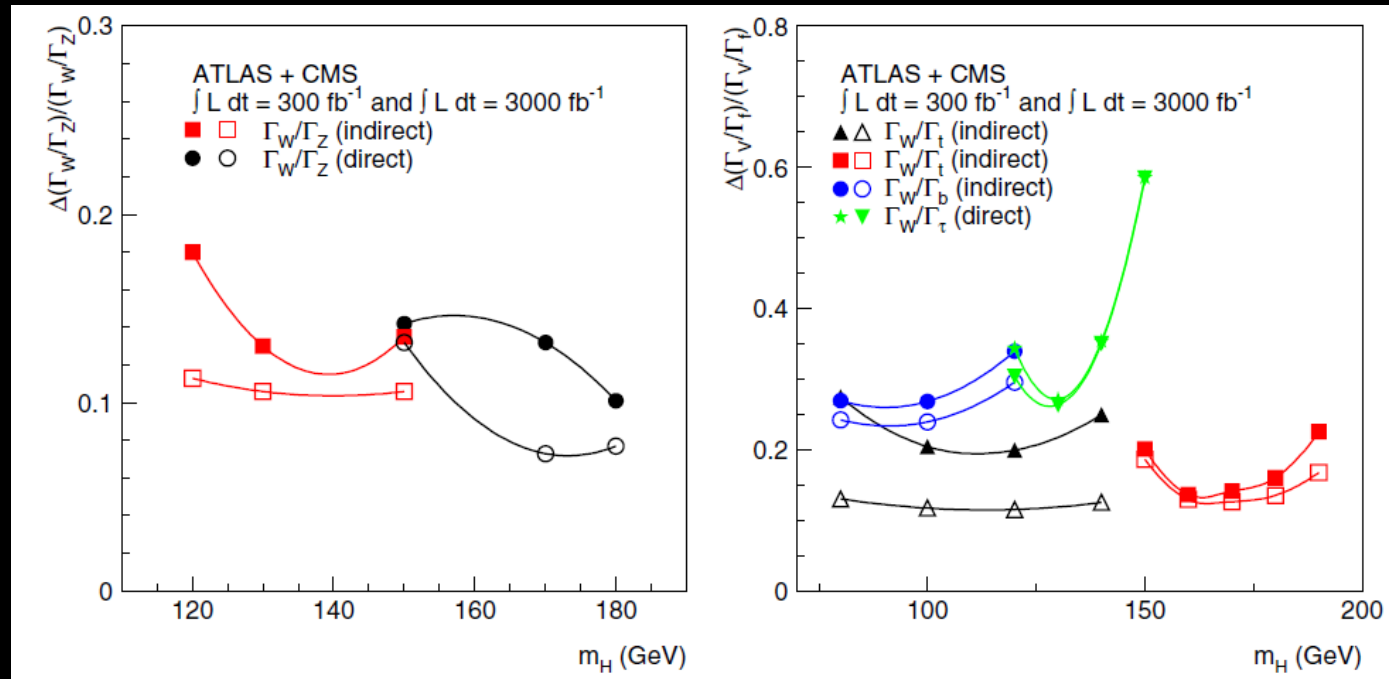


TeV領域でNPがあって“ほしい”

- ヒッグスの精密測定 (ILC) → 質量起源を決定, 新物理を発見する
- もしNPのスケールがマルチTeV以下なら直接に探索可能 (SLHC)
- SM結合の精密測定で間接的に探索

質量起源の決定への道

LHC, HL-LHCでの結合定数測定(標準理論的なヒッグスの場合)



- $M_H < 140 \text{ GeV}$ での主崩壊モード(bb)もSLHCでも測れる(> 30%)

→ ILCで約2%レベルまで測る→新物理へ

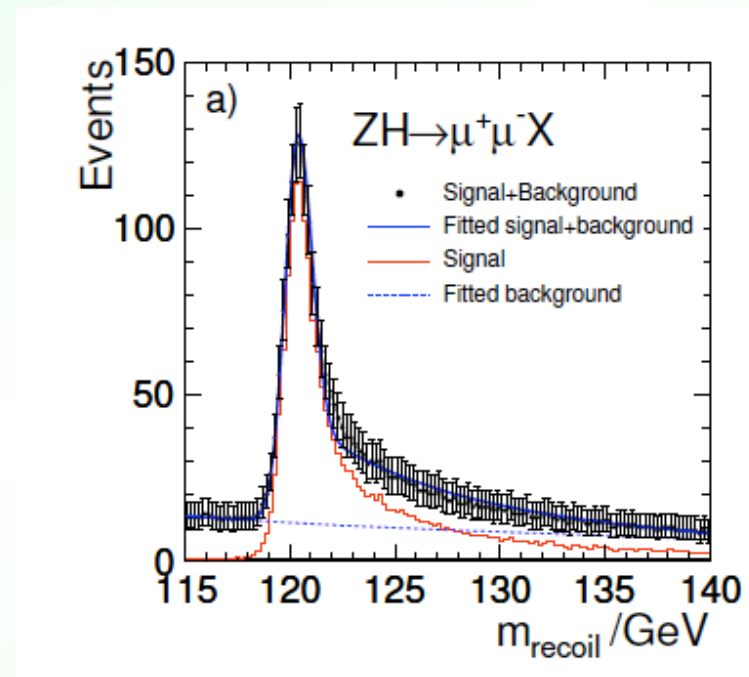
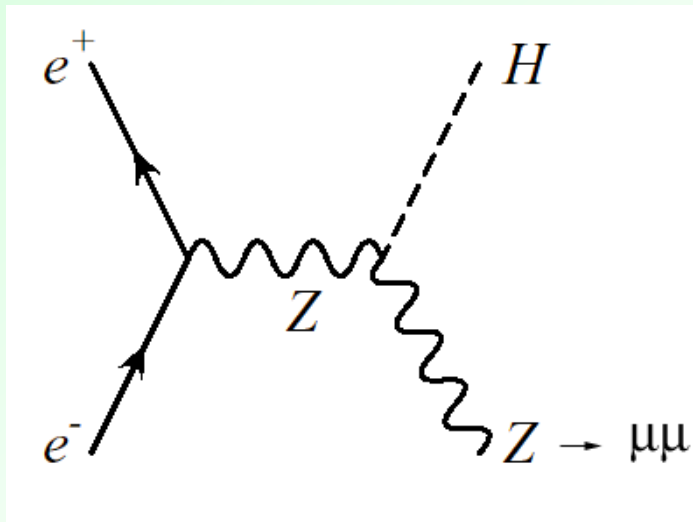
※LHC(ハドロンコライダー)では比のみが決まるため、結合定数決定には理論的な仮定が必要

→ILCで絶対値を精密に測ることから更に新物理へ

ヒッグス=ファクトリー

‘Higgs-strahlung’

$$e^+e^- \rightarrow ZH, Z \rightarrow \mu\mu, ee$$



- Zを検出、反跳質量を見る。 $m_{\text{recoil}}^2 = (P_{e^+e^-} - P_Z)^2$
- ヒッグスの崩壊を見ずに、ヒッグスの質量と生成断面積を測定。
- そしてヒッグス崩壊を検出 → ヒッグス分岐比の絶対測定
- ヒッグス・ファクトリー: 1日で 5sのシグナル

ヒッグス粒子の性質を徹底的に分析

モデルによらない解析

質量

Spin, CP

ゲージ結合

W, Z

湯川結合

Top quark

Bottom

charm

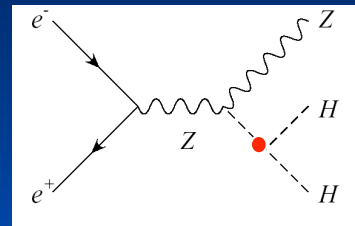
Tau

寿命 G_H

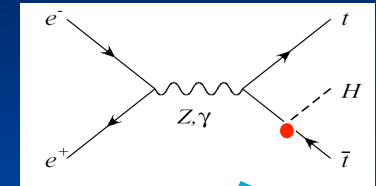
自己結合

CP mixing

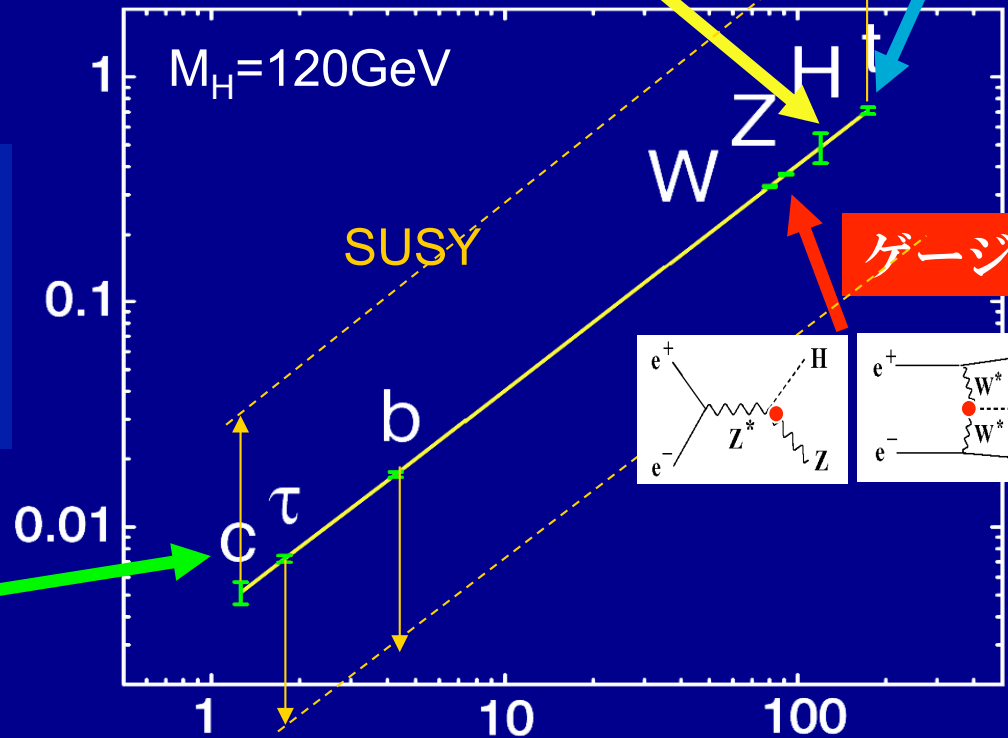
自己結合 ⇒
真空での凝縮



トップ湯川結合

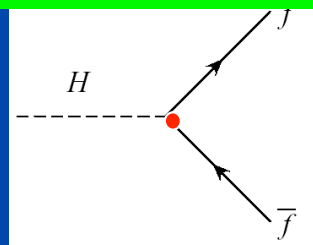


結合定数



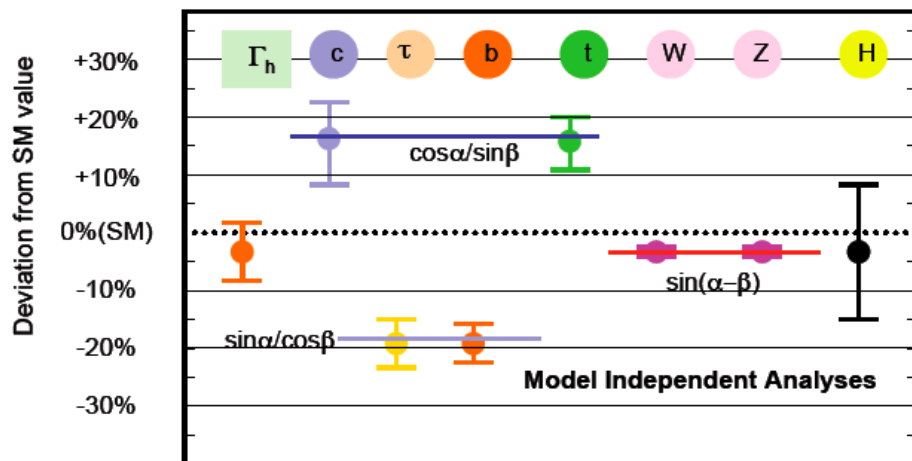
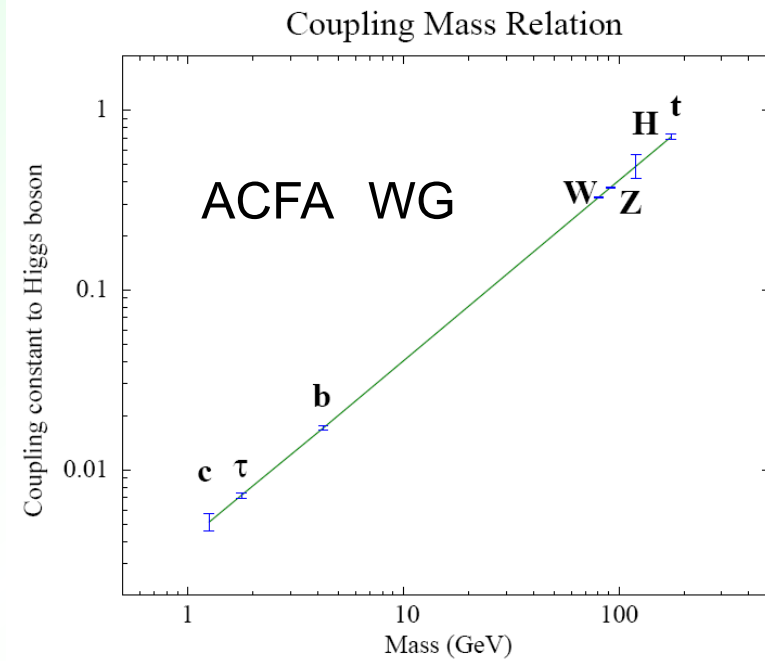
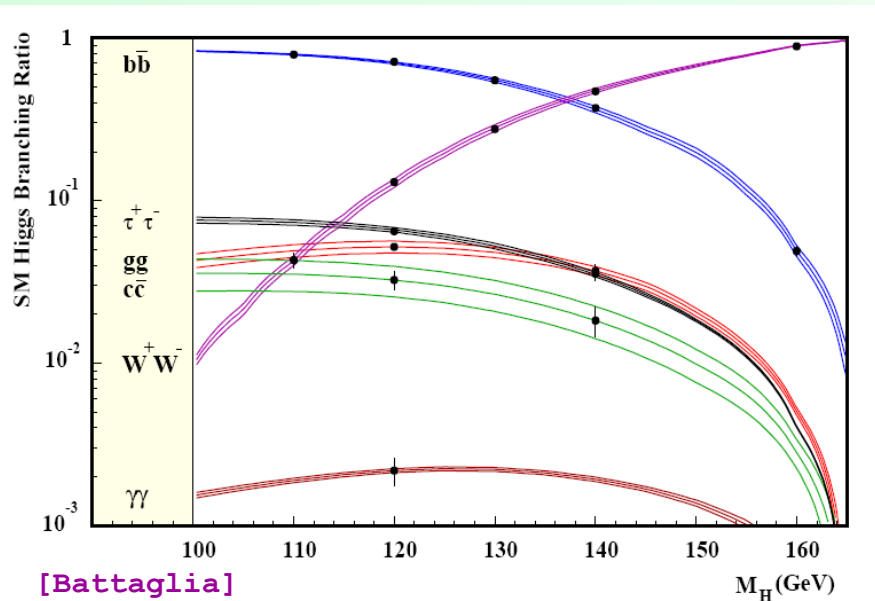
ゲージ結合

湯川結合

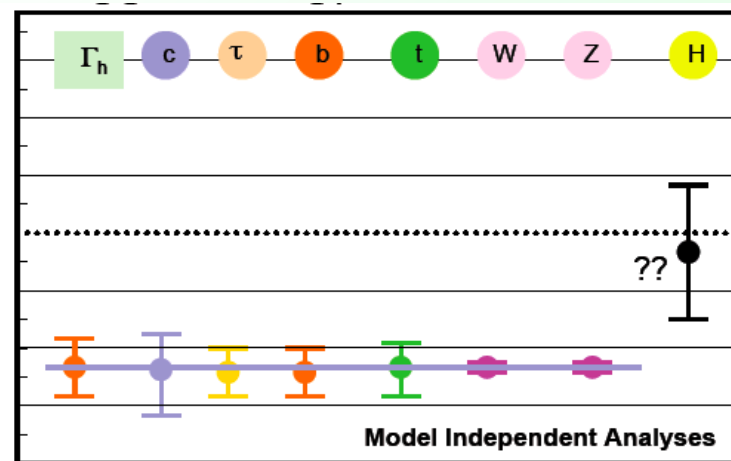


質量[GeV]

標準模型からのずれのパターン → New Physicsの理論構造



SUSY
(2 Higgs Doublet Model)

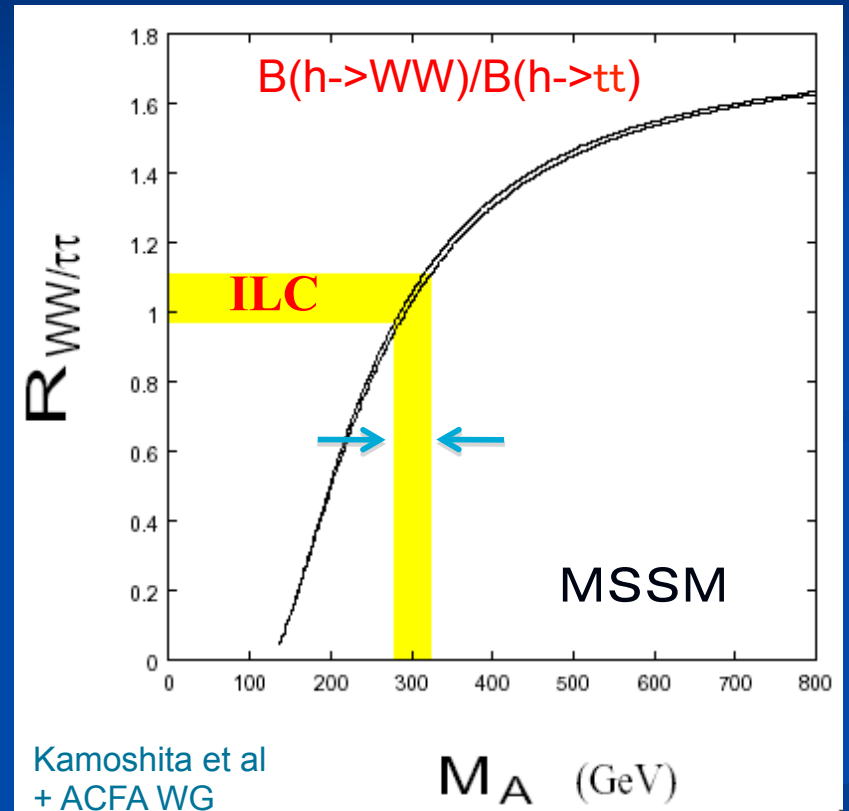
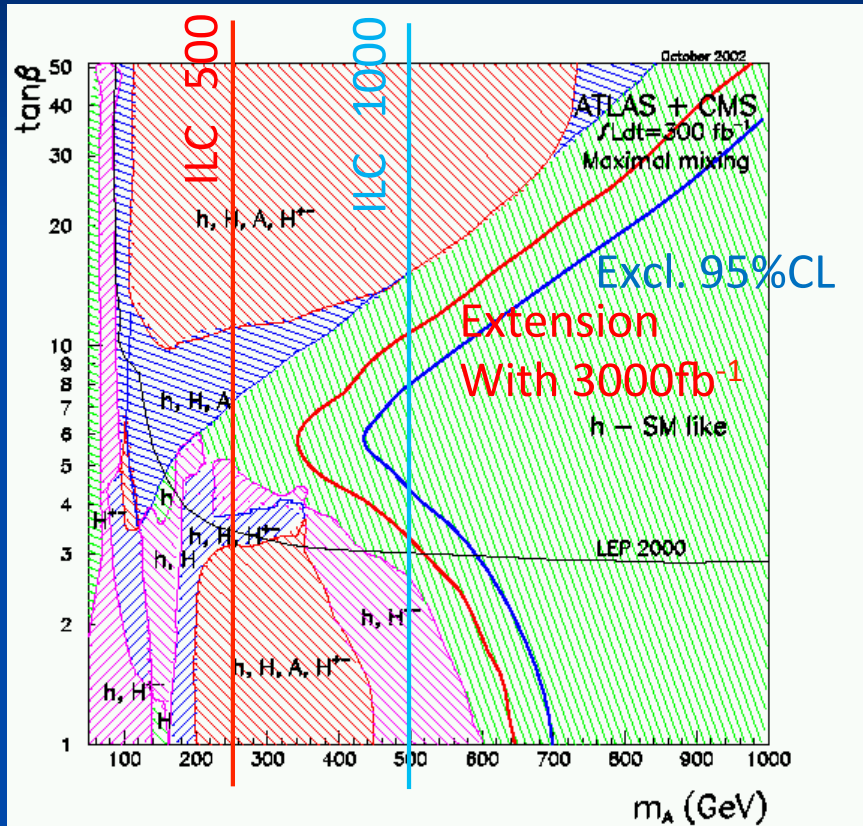


Extra dimension (S. Yamashita)
(Higgs-radion mixing)

更に先へ

Heavy Higgs

重いヒッグス粒子 質量領域の決定



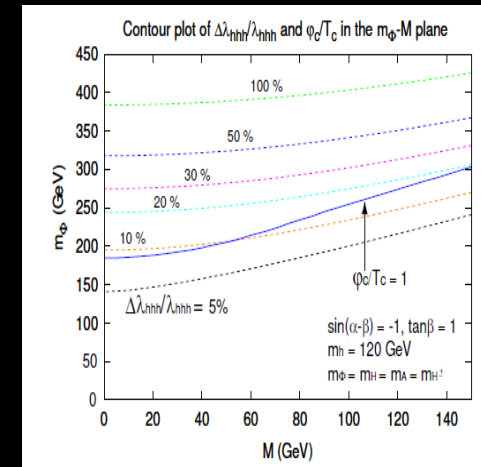
ヒッグス質量と自己結合、new physics

- 宇宙論とのコネクション

hhh結合のSMからのずれの大きさ
= 電弱相転移が強い一次的

$$V(\phi, T) \iff V(\phi)$$

電弱バリオン数生成のシナリオの検証



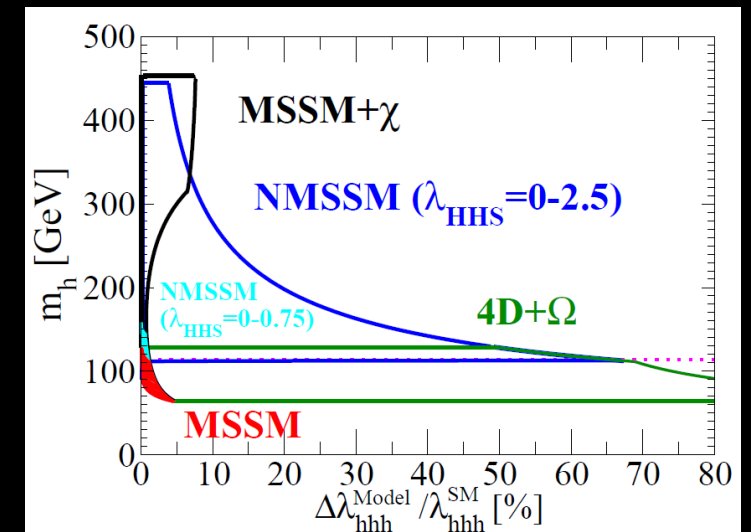
S.Kanemura, Y. Okada, E. Senaha (2006)

- SUSYヒッグスセクターの区別

- MSSM (2 Higgs doublets)
- MSSM + singlet (μ 問題)
- MSSM + triplets (Type-2 Seesaw)
- 4DSSM + charged singlets

(SUSY Radiative Seesaw)

- SUSY粒子が重くて直接見れなくても一番軽いヒッグス h の質量とhhh結合を測ることで各モデルを区別できる



S.Kanemura, T. Shindou, K. Yagyu, arXiv:1009.1836[hep-ph]

これらの検証にはhhh結合をO(10)%で測ることが必要

新物理

が

直接生成・検出領域にある場合

- LHCではcolored new particleが
エネルギーリーチにある時
- ILCでは $E_{cm} > 2 \times \text{LighestNewParticle}$
(pair production)

シナリオ1 (light-Higgs×NP-found)

- 私たちにとって**ベスト**のシナリオ(沢山の発見)
- いろいろなTeV領域の新物理模型がある

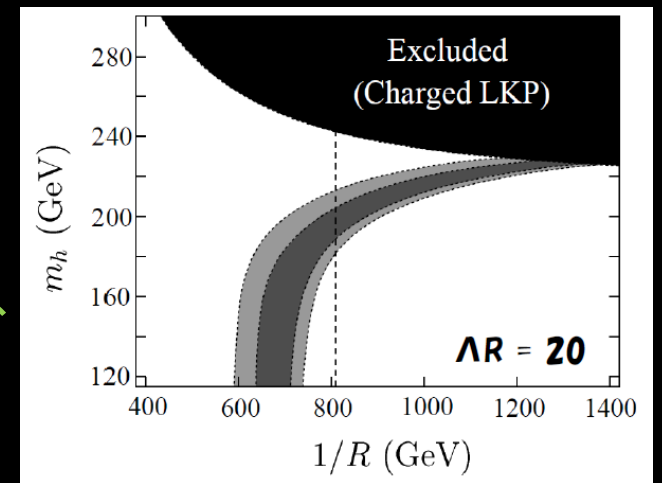
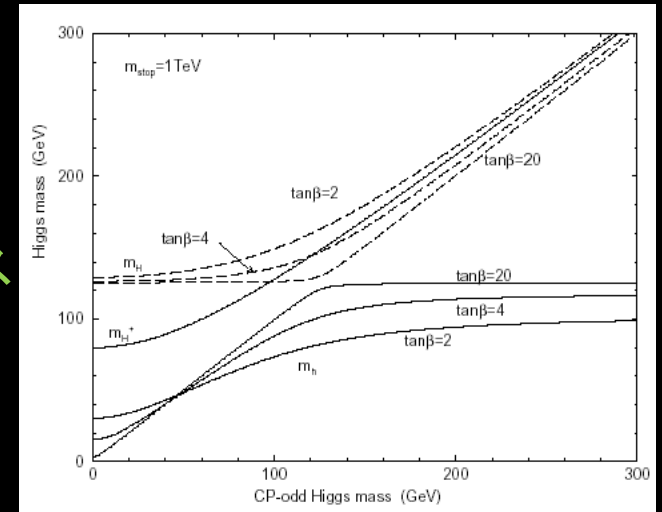
SUSY, Little Higgs, UED,

これらを区別する!

- 質量の測定(スペクトル)
- スピンの測定
- 結合定数の測定
-

MSSMは
軽いヒッグスを
予言する

ミニマルな
UED模型も
DMデータ
のもとで
軽いヒッグスを
予言



Kakizaki, Matsumoto, Senami (2006)

テラスケールの新物理パラダイム
ラグランジアン構成

シナリオ2 (heavy-Higgs×NP-found)

- LEPに必ずしも矛盾しない
- MSSMではない新物理 (Low Λ)
- マルチTeVスケールで理論が強結合になるダイナミカルな模型
 - Technicolor
 - Fat Higgs models (SUSY)
- SLHCでのTeVの直接探索
- ILCでの重いヒッグス、New particlesの精密測定

SUSY but “Fat” Higgs ...

Harnik, Kribs, Larson, Murayama (2004)

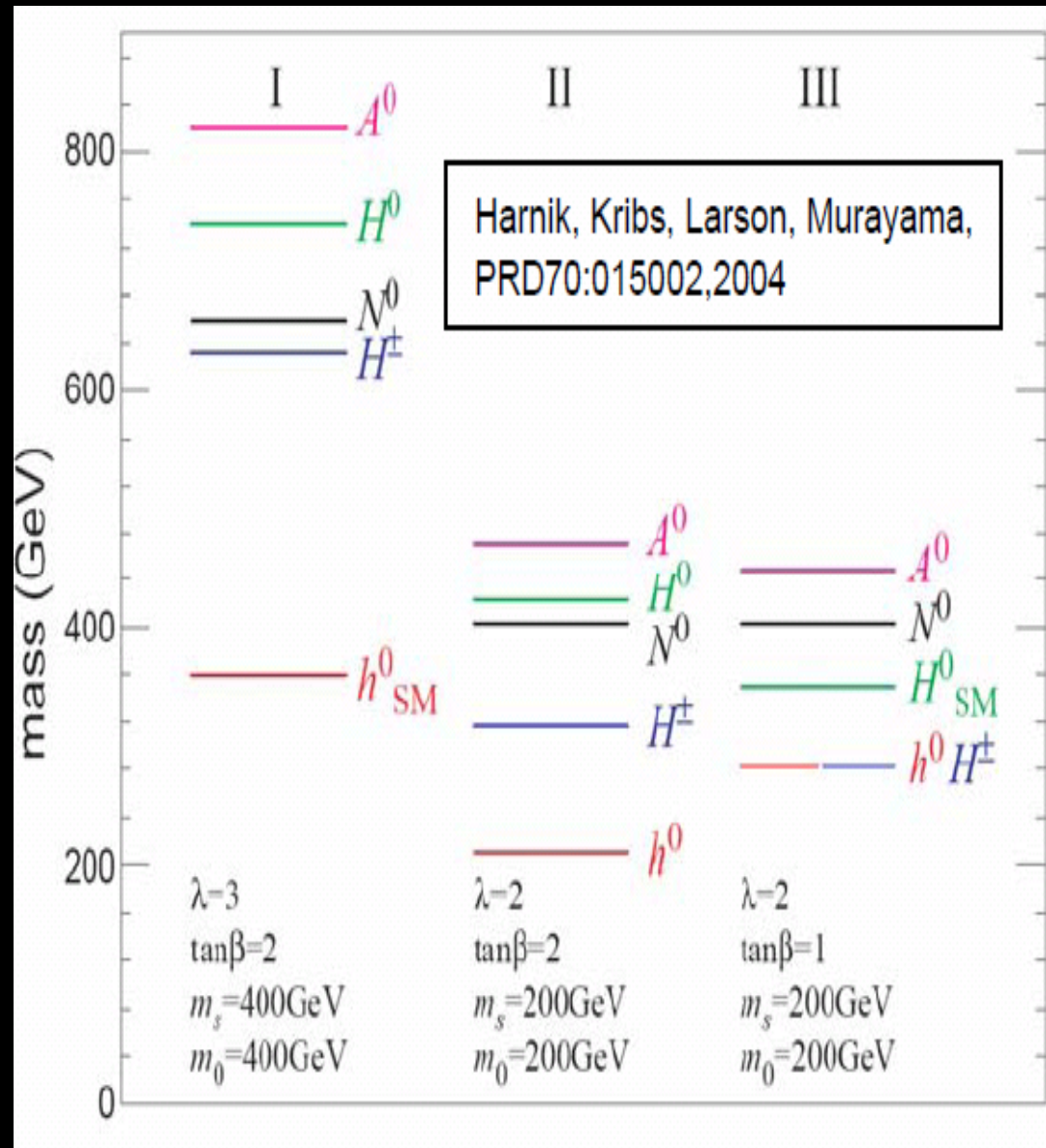
ヒッグスはマルチTeVで複合場に
低エネルギーでヒッグス H1, H2, S
Next-to MSSM (NMSSM) になっている

MSSMと異なりヒッグス質量は
ツリーで重くなれる

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta + (\lambda_{HHS}^2 v^2 / 2) \sin^2 2\beta + \delta m_{\text{loop}}^2$$

SLHCによる重いヒッグス粒子の直接測定
ILCによる精密測定でスペクトル調べる

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 - \lambda^2 v^2$$



シナリオ3 (No-Higgs×NP-found)

- Lee Quigg Thacker(1977) によるツリーユニタリティの概念では, ユニタリ性の為に1TeVまでにヒッグスが在るはず (あるいはTeVで強結合理論になり予言能力なくなる)

ヒッグスができていてもLHCでは見えてないだけ？

インビジブルなヒッグス崩壊

ダークマター

余剰次元 (Radion混合)

他の可能性 (ヒッグスレス)

例) ベクトル場 W' の導入によりユニタリティ救う

→ ヒッグスレス模型

ヒッグスポータルダークマター

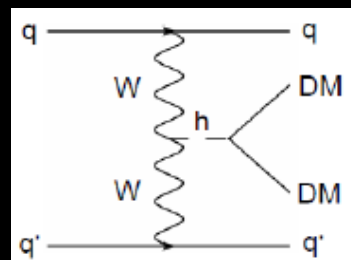
DMがヒッグスを通じてのみ
標準模型と相互作用する

$$L = c_{DM} DM^2 |\Phi|^2 \text{ の形}$$

このようなシナリオは
DM以外の新粒子が重い場合
に現れる (DM: Z_2 パリティ)

$m_{DM} < m_H/2$
なら Invisible 崩壊

LHC

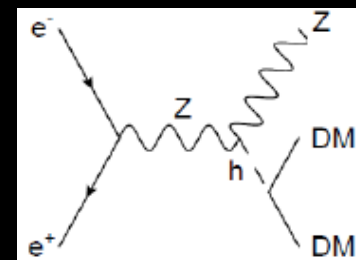


30fb^{-1} , $E=14\text{TeV}$

$Br > 0.50$ (95%CL)

Conf.@U. of Tokyo, 2009

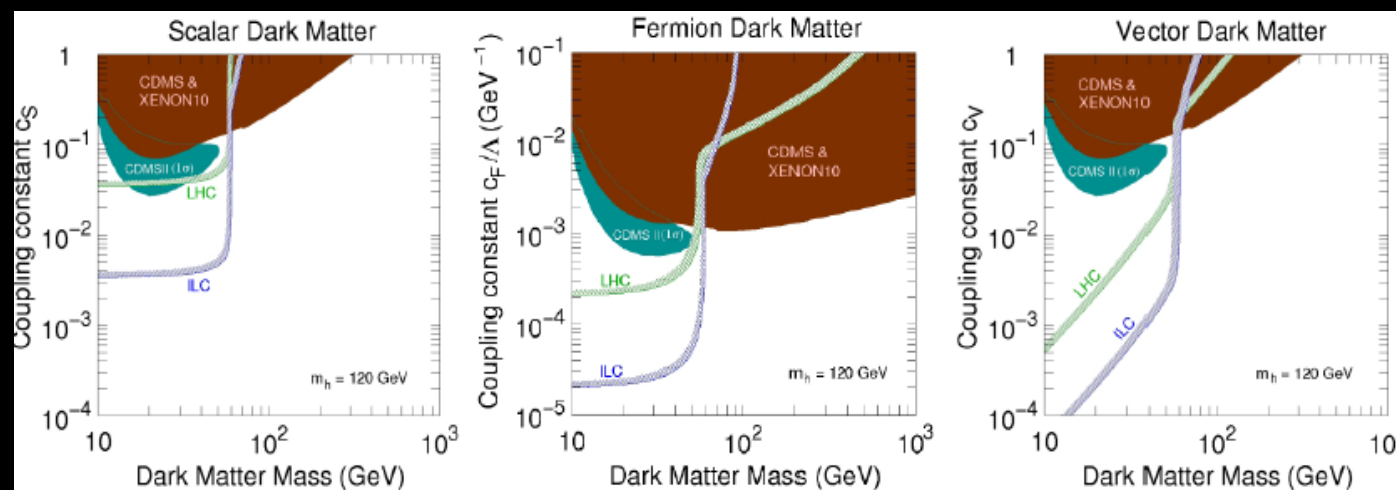
ILC



500fb^{-1} , $E = 350 \text{ GeV}$

$Br > 0.0095$ (95%CL)

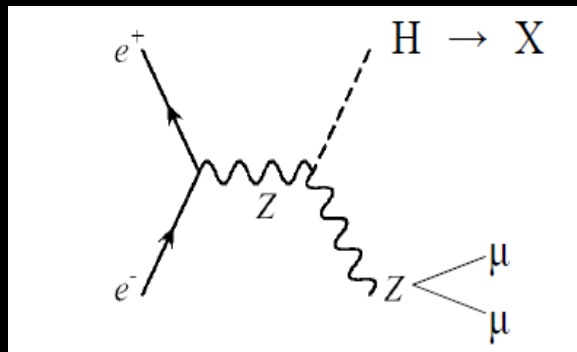
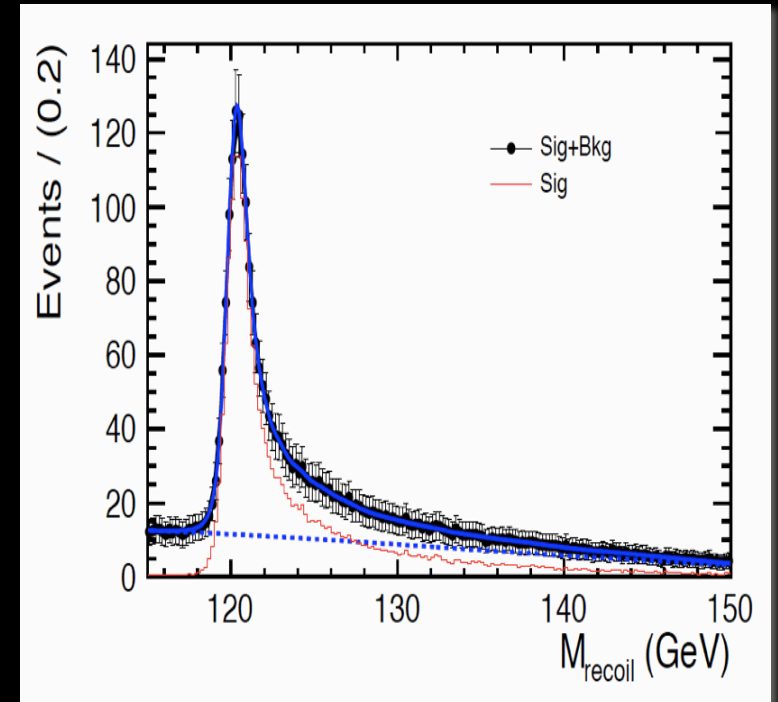
M. Schumacher, 2003



SK, S. Matsumoto, N. Okada, T. Nabeshima, 2010

ヒッグスのインビジブル崩壊

- ヒッグスポータル模型: ヒッグスが暗黒物質に崩壊
- 余剰次元: ヒッグスがRadion (見えない) に崩壊
- ILCではリコイル測定により模型に依存しない (ヒッグスの崩壊に依存しない) 解析が可能



$$\begin{aligned}
 m_X^2 &= p_X^2 \\
 &= s - 2\sqrt{s}E_Z + m_Z^2 \\
 &= s - 2\sqrt{s}E_{\mu\mu} + m_{\mu\mu}^2
 \end{aligned}$$

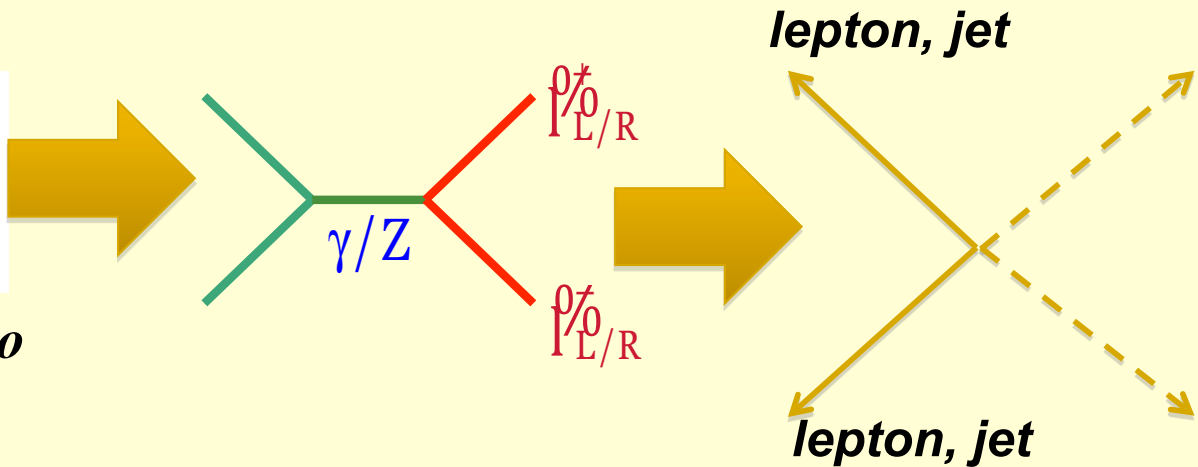
ILCのみ可能

新粒子ファクトリー

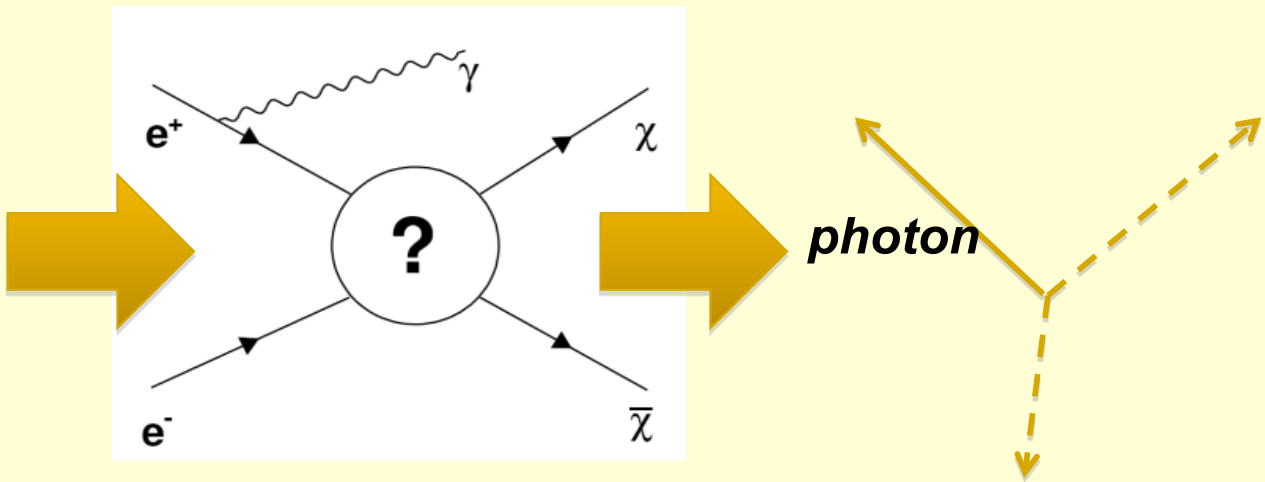
超対称性粒子

$$\begin{aligned}
 e^+e^- &\rightarrow \tilde{e}_R\tilde{e}_R, \tilde{e}_L\tilde{e}_L, \tilde{e}_R\tilde{e}_L, \tilde{\nu}_e\tilde{\nu}_e \\
 e^+e^- &\rightarrow \tilde{\mu}_R\tilde{\mu}_R, \tilde{\mu}_L\tilde{\mu}_L, \tilde{\nu}_\mu\tilde{\nu}_\mu \\
 e^+e^- &\rightarrow \tilde{\tau}_1\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2\tilde{\tau}_2, \tilde{\tau}_1\tilde{\tau}_2, \tilde{\nu}_\tau\tilde{\nu}_\tau
 \end{aligned}$$

Neutralino / Chargino



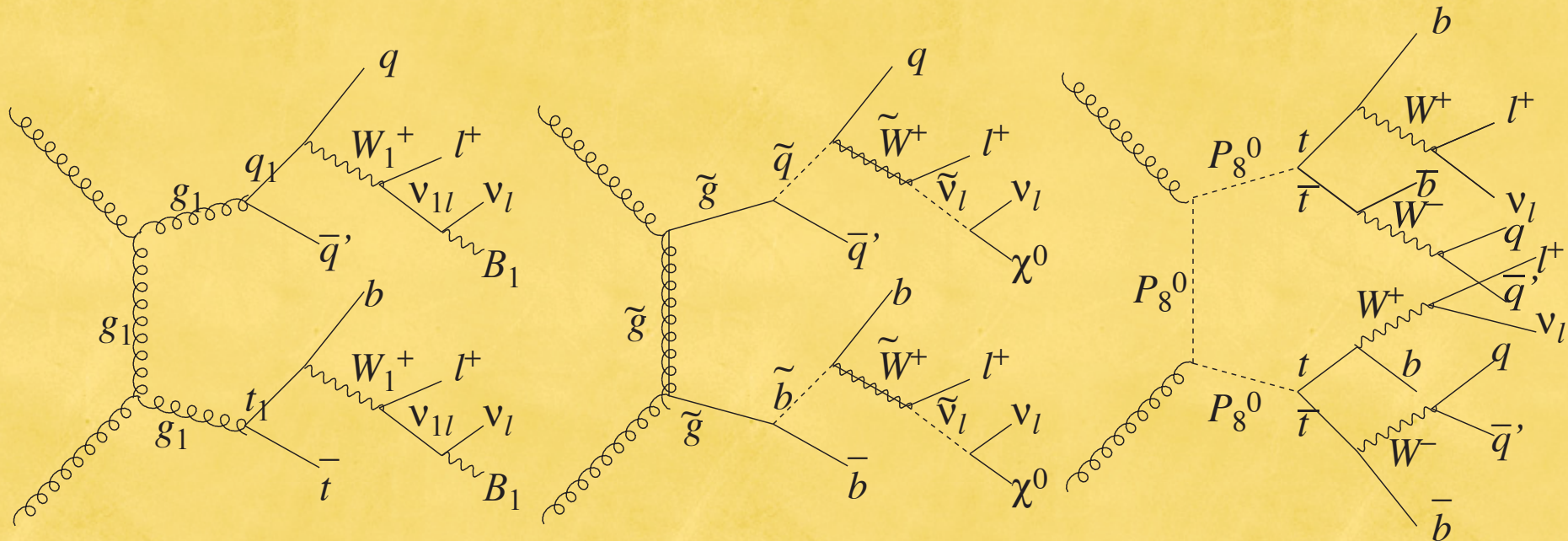
ダークマター対生成



ダークマターをもたらすモデルはどれも似たシグナルを持つ

Murayamaより

missing E_T , multiple jets, b -jets, (like-sign) di-leptons



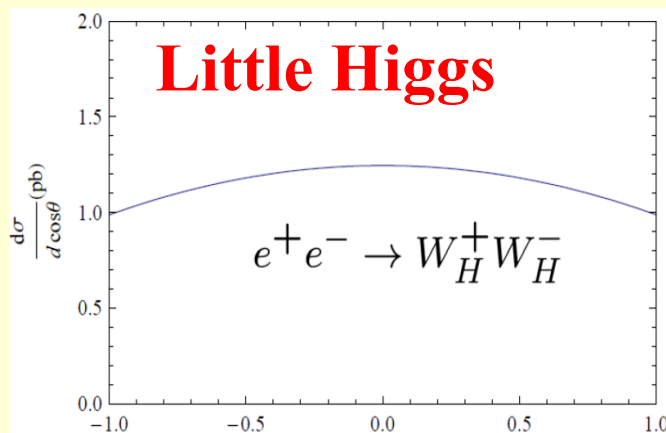
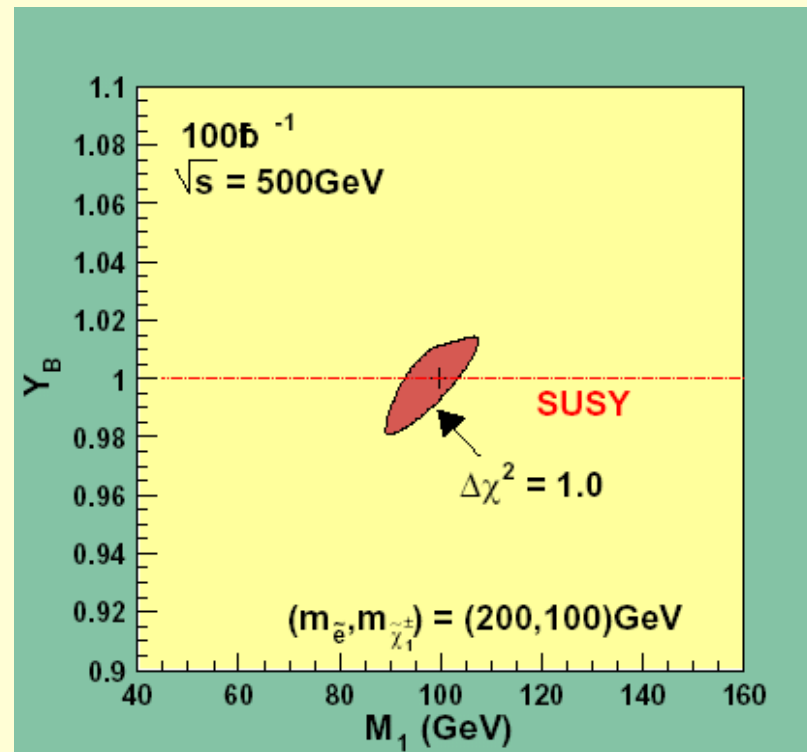
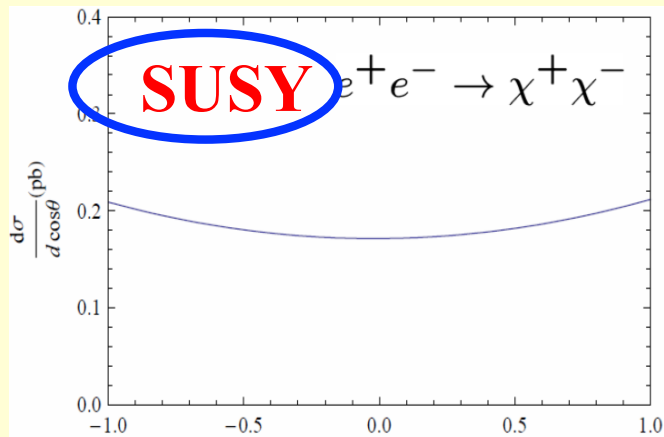
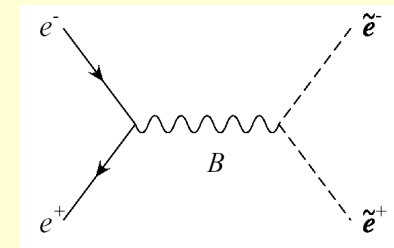
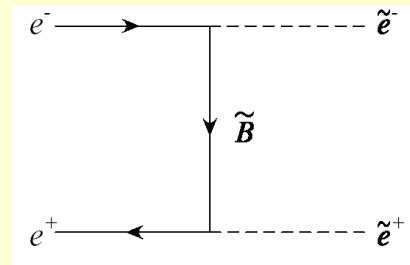
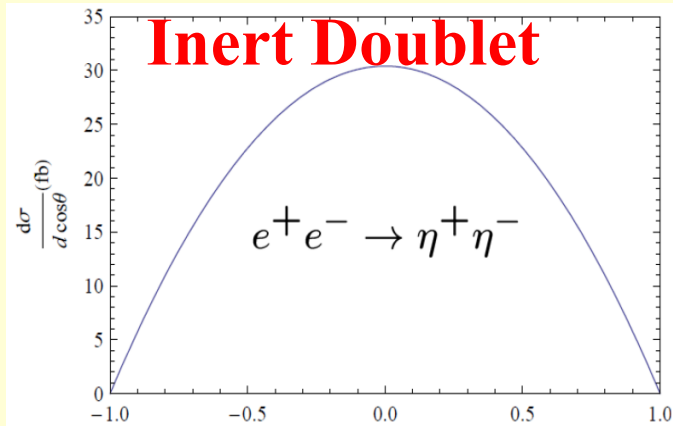
UED
spin 1

SUSY
spin 1/2

technicolor
spin 0

+little Higgs with T-parity, warped ED with Z_3 baryon

超対称性原理の発見



[N.Okada, etal]♪

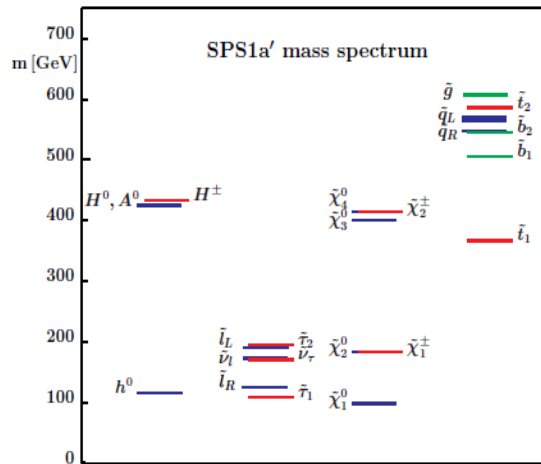
[Nojiri, Fujii, Tsukamoto]♪

新粒子のスペクトルの例

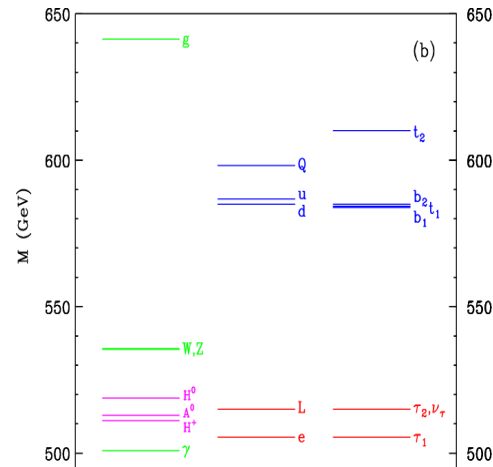
- 新粒子のスペクトルを調べて新物理のモデルを区別、決定することができる

新粒子のスペクトルの例

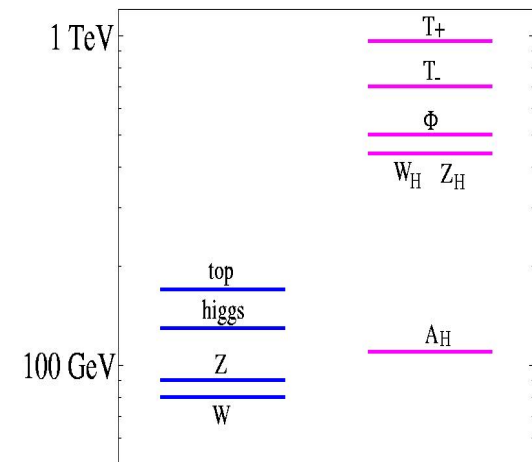
MSSM (SPS1a')



UED ($R^{-1} = 500$ GeV)



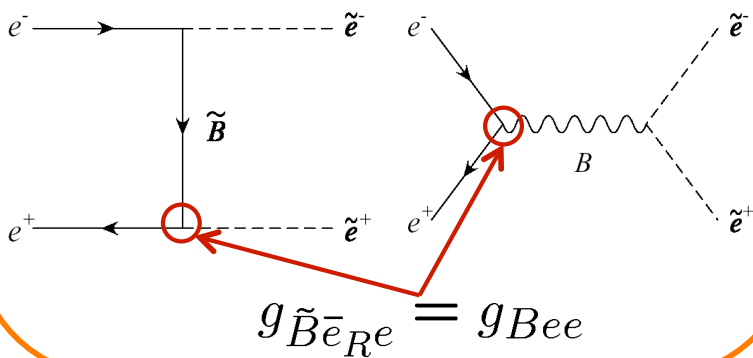
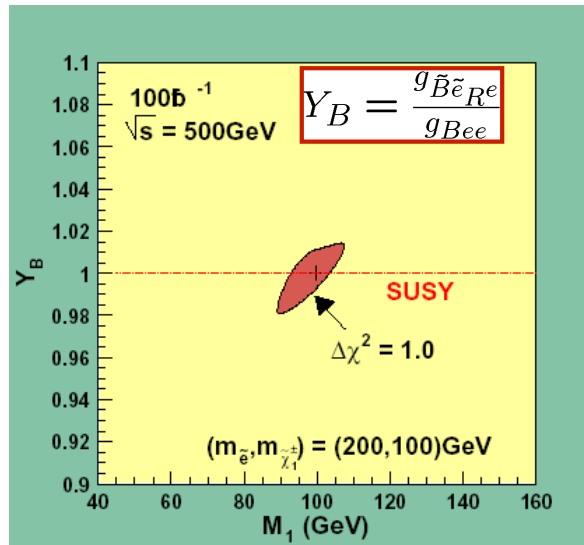
LHT ($f = 600$ GeV)



ILCにおけるテラスケールの物理

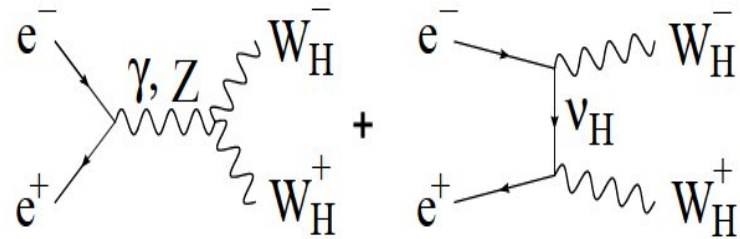
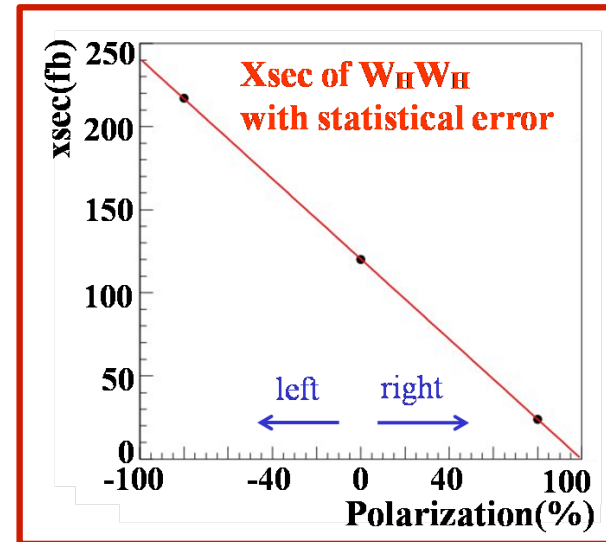
～ 新しい対称性の証明 ～

● Slepton production



[M.Nojiri, K. Fujii, T. Tsukamoto, 1996]

● W_H production



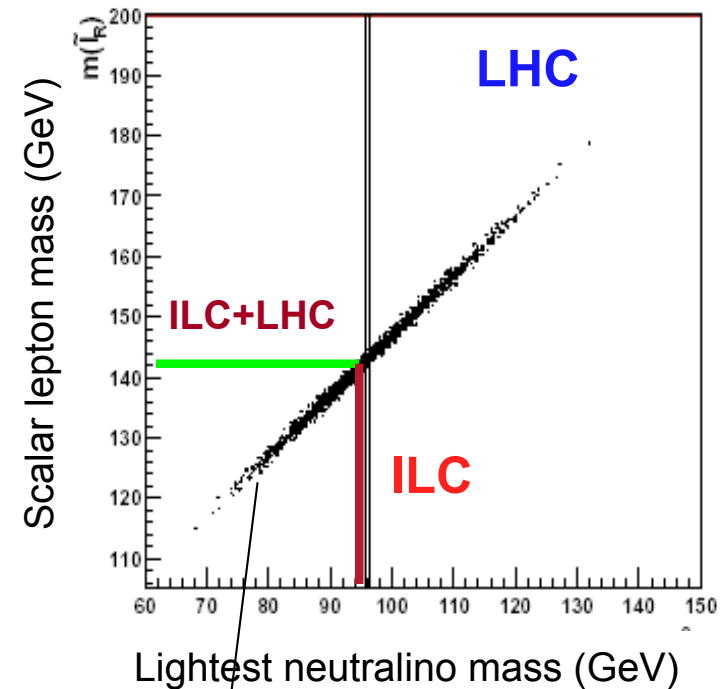
W_H はU(1) chargeを持たず!

[E. Asakawa, et. al., 2009]

Using the M(lightest SUSY particle) from ILC

300 fb⁻¹@LHC
M values in GeV

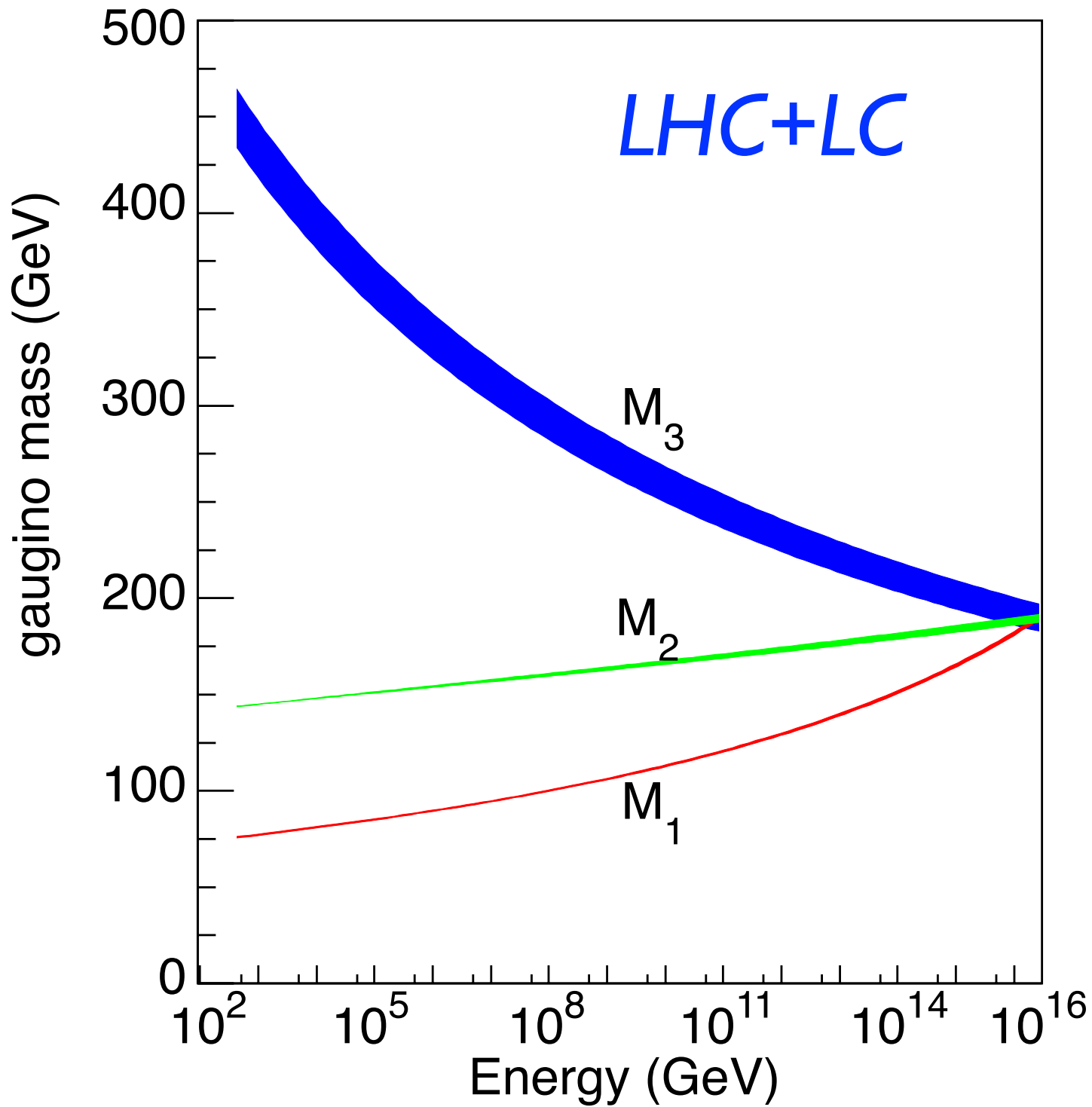
	LHC	LHC+LC (0.2%)
$\Delta m_{\tilde{\chi}_1^0}$	4.8	0.19 (ILC input)
$\Delta m_{\tilde{l}_R}$	4.8	0.34
$\Delta m_{\tilde{\chi}_2^0}$	4.7	0.24
$\Delta m_{\tilde{q}_L}$	8.7	4.9
$\Delta m_{\tilde{b}_1}$	13.2	10.5



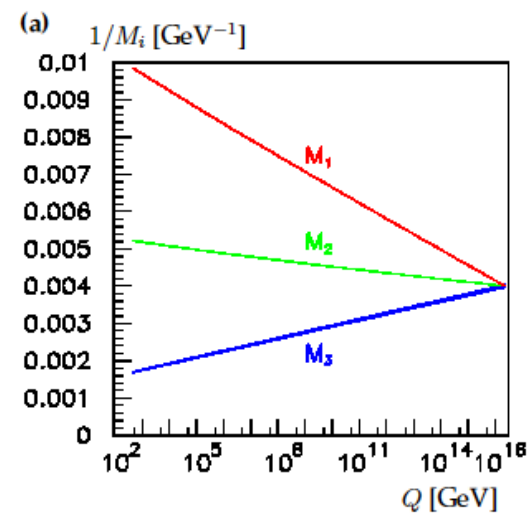
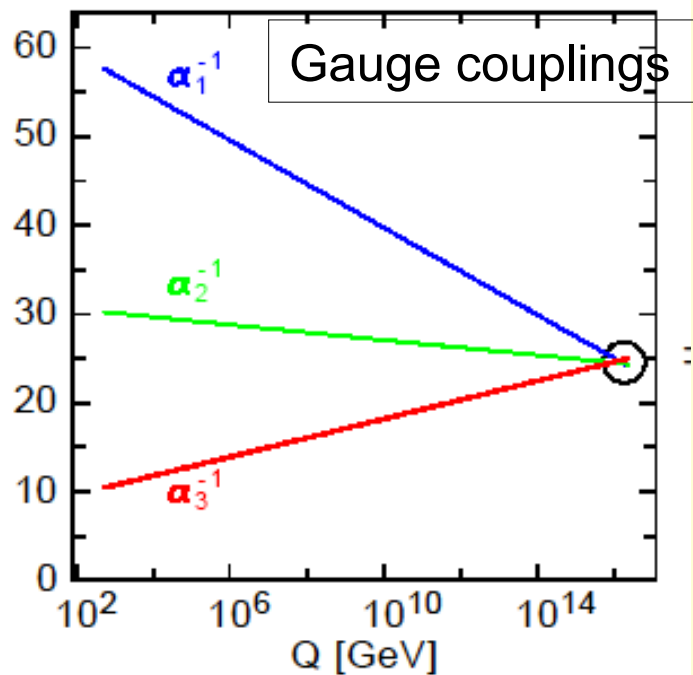
Significant improvements even if only $m(\text{LSP})$ is measured at ILC

Strong correlation at LHC

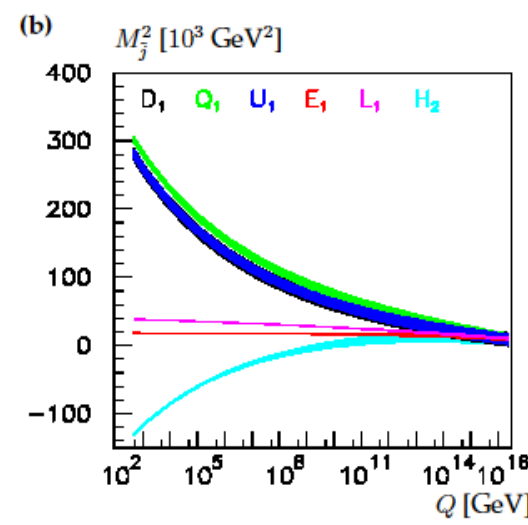
An input from ILC resolve this correlation



GUT : 大統一理論



Gaugino masses



Scalar masses

LHC+ILC
Combined analysis



SUSY breaking scenario

Super-Gravity, Gauge-Mediation,,,

SUSY パラメータの測定

- Chargino は Wino と Higgsino の混合:

$$(\tilde{W}^+, \tilde{H}^+) \begin{pmatrix} M_2 & \sqrt{2}m_W \cos\beta \\ \sqrt{2}m_W \sin\beta & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{W}^- \\ \tilde{H}^- \end{pmatrix}$$

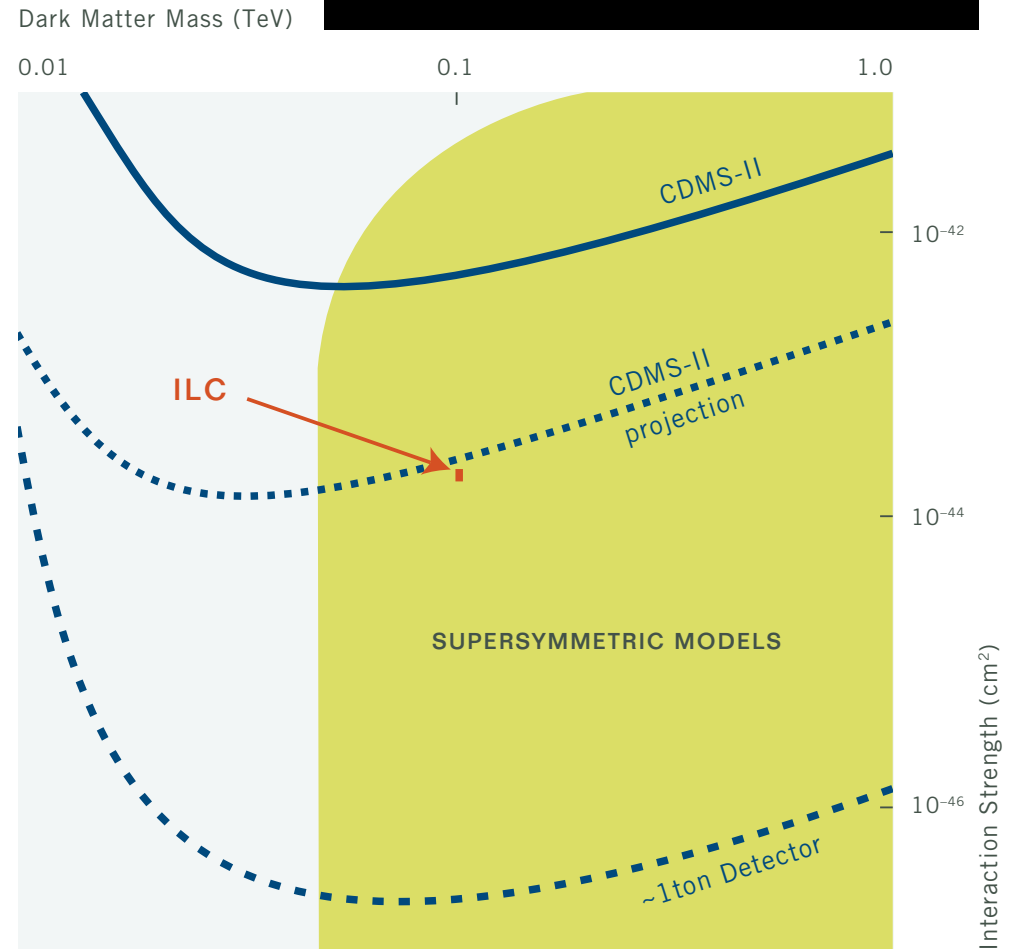
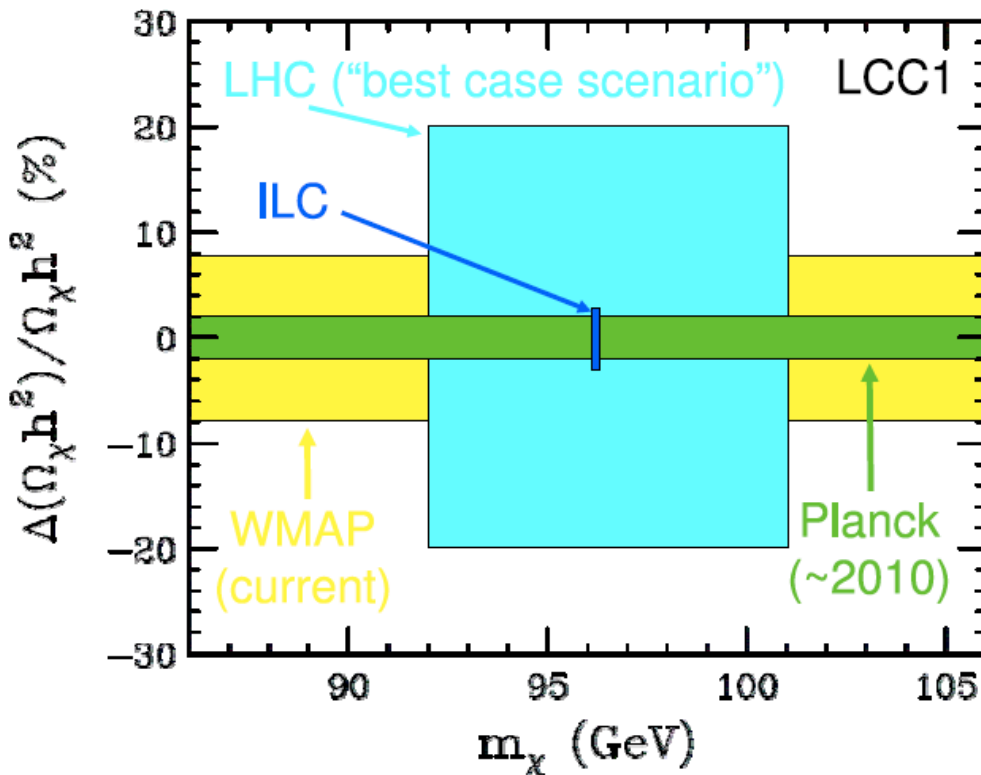
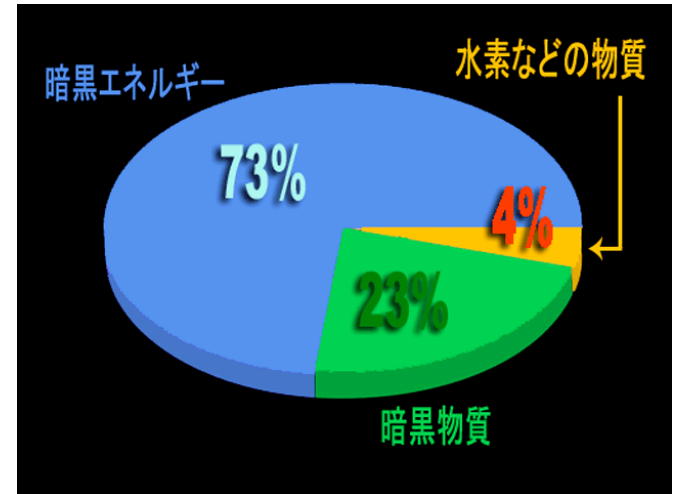
- 偏極電子(e^-_R)を使う:
 - Chargino の Higgsino 成分が chargino 対生成に寄与
 - 右巻き selectron の対生成は Bino に依存

- 下の測定から $(M_1, \tan\beta, M_2, \mu)$ を導出

$$\begin{array}{cc} \sigma(e^+e^-_R \rightarrow \tilde{e}^+_R\tilde{e}^-_R) & \sigma(e^+e^-_R \rightarrow \tilde{\chi}^+_1\tilde{\chi}^-_1) \\ m(\tilde{\chi}^+_1) & m(\tilde{\chi}^0_1) \end{array}$$

暗黒物質の正体解明

暗黒物質は一番軽い超対称粒子か？

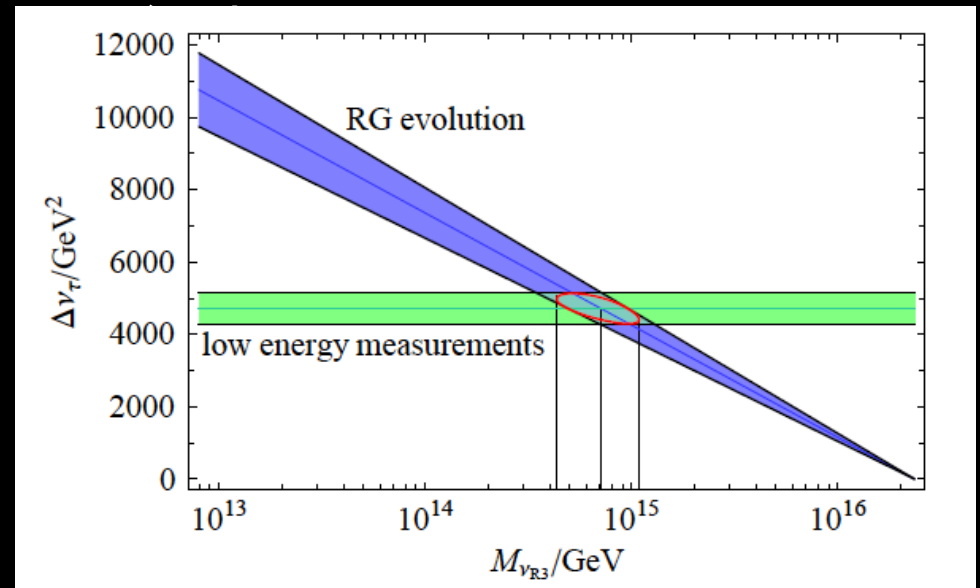


右巻きニュートリノ質量のスケール (レプトジェネシスのシナリオ)

- シーソー機構
 - 非常に高いスケールのマヨラナ質量をもつ右巻きニュートリノを導入
- レプトジェネシス
 - 右巻きニュートリノのCP破れ相互作用を通じた崩壊によるレプトン数生成
 - スファレロン過程
 - バリオン数に転化

LHC/ILCでスレプトン質量の精密測定をすることにより、重い右巻きニュートリノのマヨラナ質量に対する情報が得られるかもしれない

第3世代スカラーニュートリノの質量



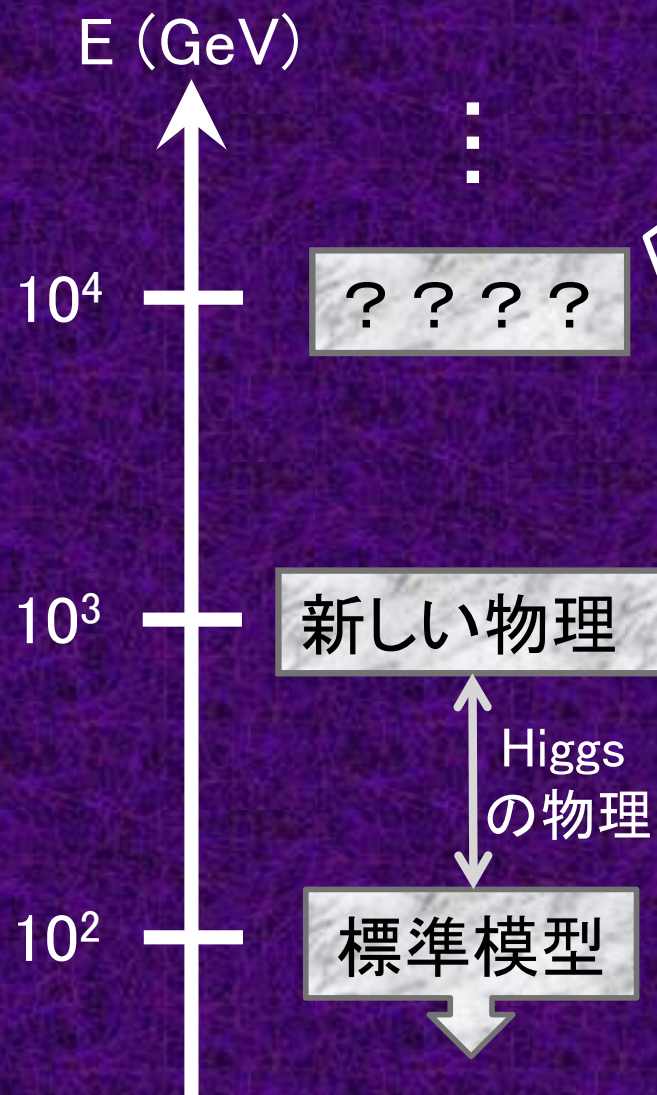
[A. Freitas, W. Porod, P. M. Zerwas, 2005]

繰り込み群に対する、ニュートリノセクターの第3世代の湯川結合の影響を見る！

$$D_n \sim \log(M_{\text{GUT}}/M_{\text{RN}})$$

D_n = Slepton の質量²の差で表せる

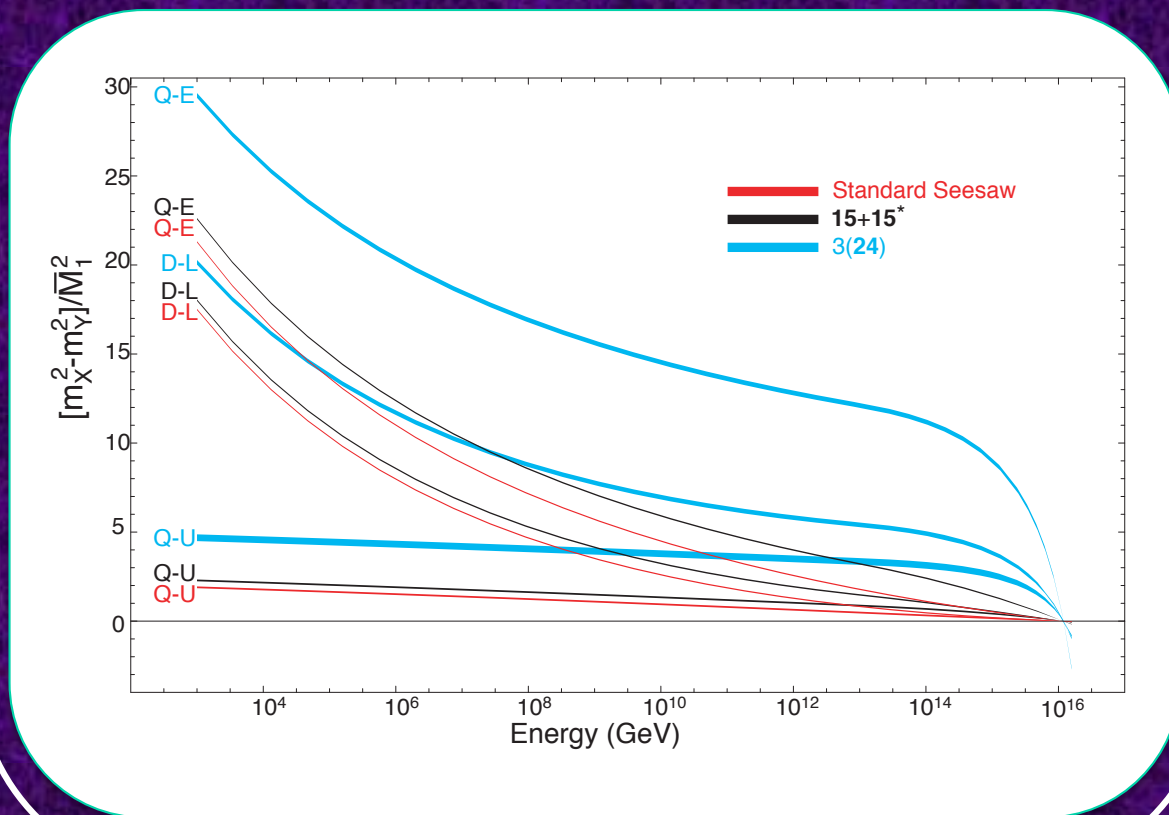
消えた反物質の理由を追い求めて レプトジェネシス



~ Leptogenesis ~

右巻きマヨラナニュートリノ崩壊 → 宇宙のレプトン数
 → スファロン過程
 → 宇宙のバリオン数

右巻きマヨラナニュートリノ質量 ~ GUT スケール！



まとめ (兼村流仕分け+将来計画小委員会2011/6月)

	light H	heavy H	no H	NewParticle	HL-LHC	ILC
シナリオ1	x			x	○	◎
シナリオ2		x		x	○	◎
シナリオ3			x	x	○	◎
シナリオ4	x				△	◎
シナリオ5		x			◎	△
シナリオ6			x		◎	?

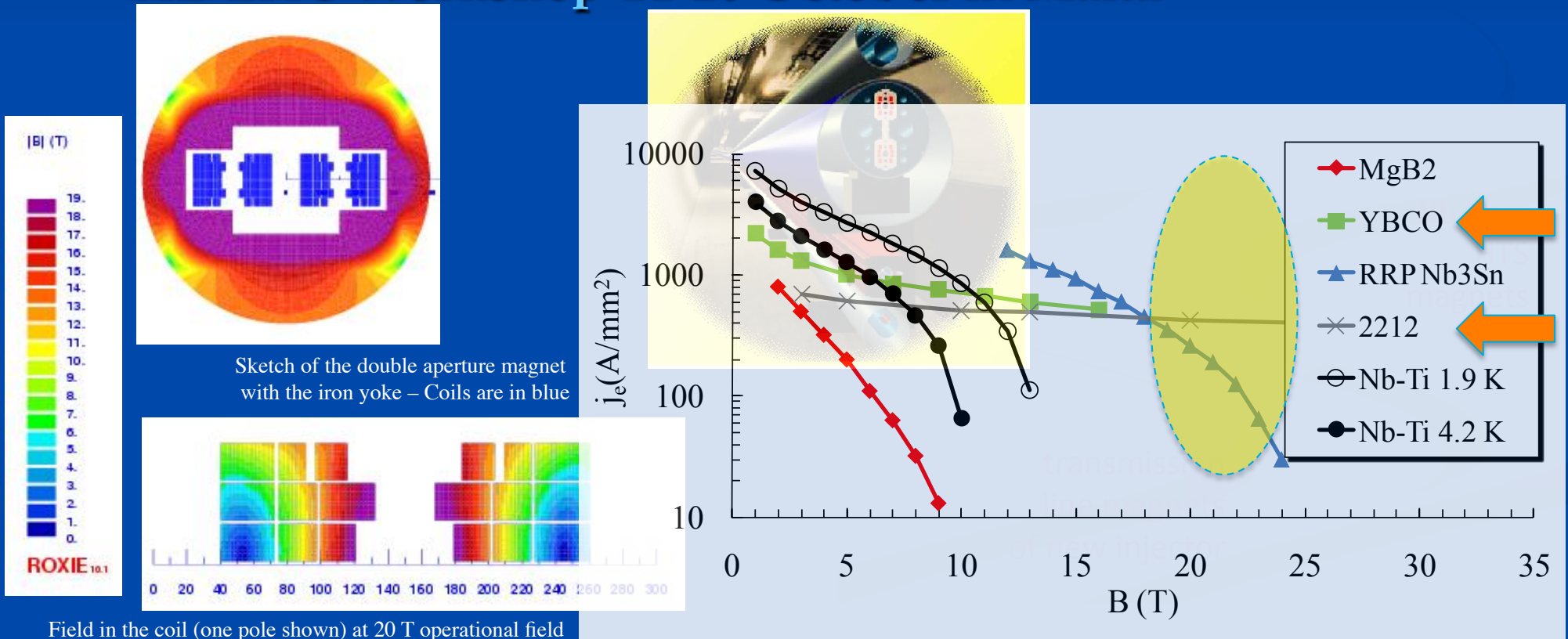
二者択一という意味ではありません

新たな粒子、現象の発見
精密測定とラグランジアン構成

ハドロンコライダー HL-LHC
レプトンコライダー ILC

High Energy LHC by 2035 ?

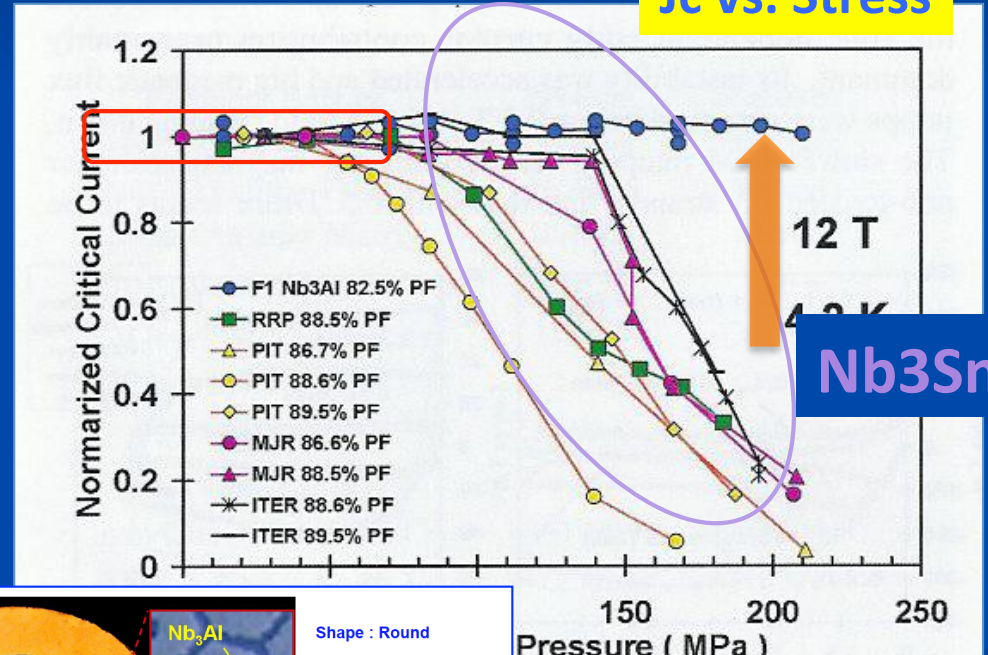
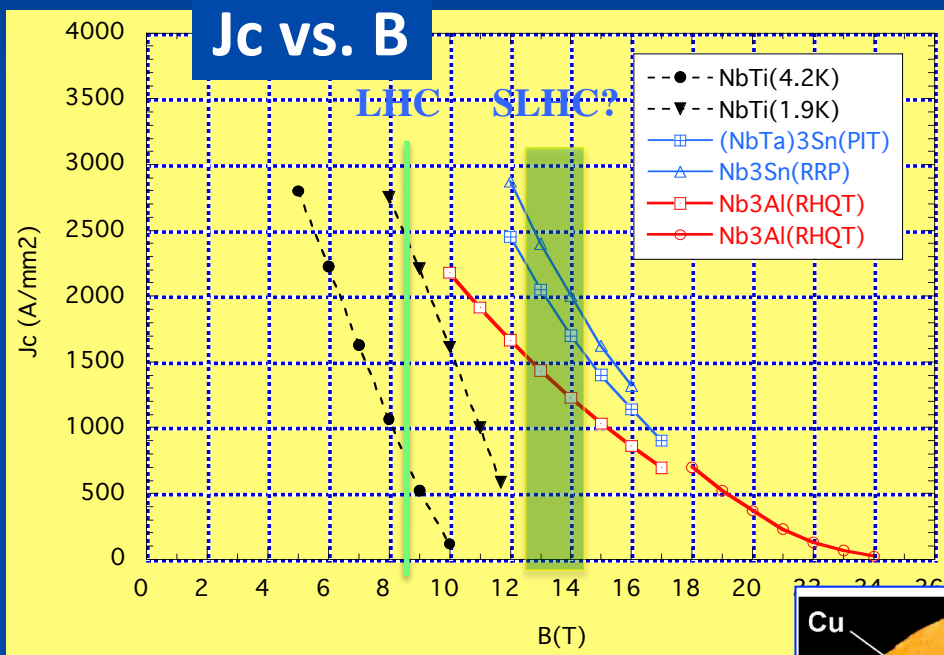
- The High Luminosity LHC or HL-LHC is the route that will enable the way to the Farthest Energy Frontier : an HE-LHC based **on 20 T magnets for a 33 TeV** c.o.m. collider
- HE-LHC Workshop 14-16 October in Malta



KEK's R&D effort toward LHC Upgrade

Nb₃Al: High Field Conductor w/ high strength

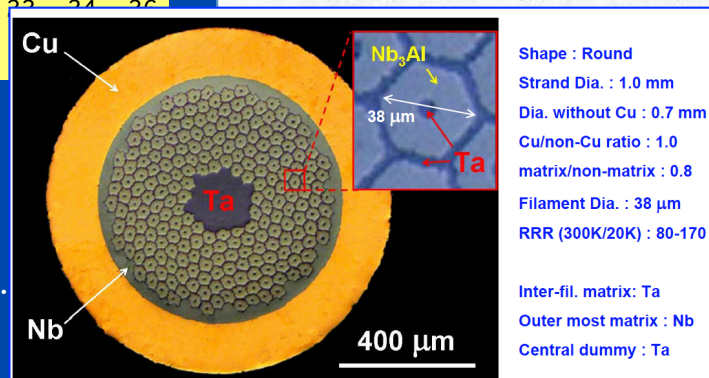
機械的に安定、Nb₃Snに近い超伝導特性(高臨界磁場、高臨界温度)
 日本独自の技術:物質材料科学研究機構によるオリジナルな開発

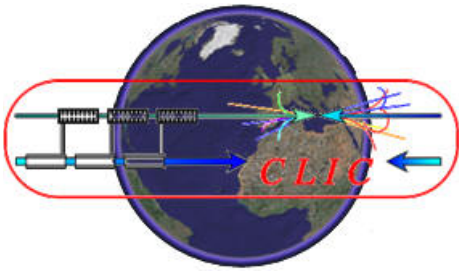


NIM-KEK協力による、
 加速器応用開拓

Presented at MT-20
 By A. Kikuchi et al.

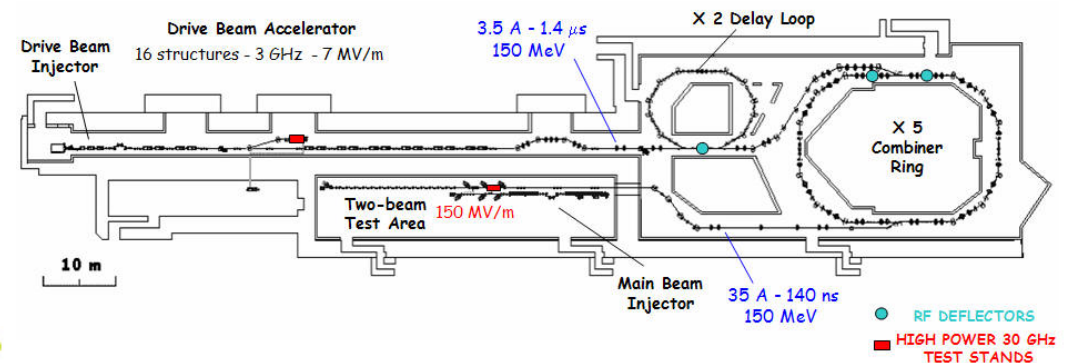
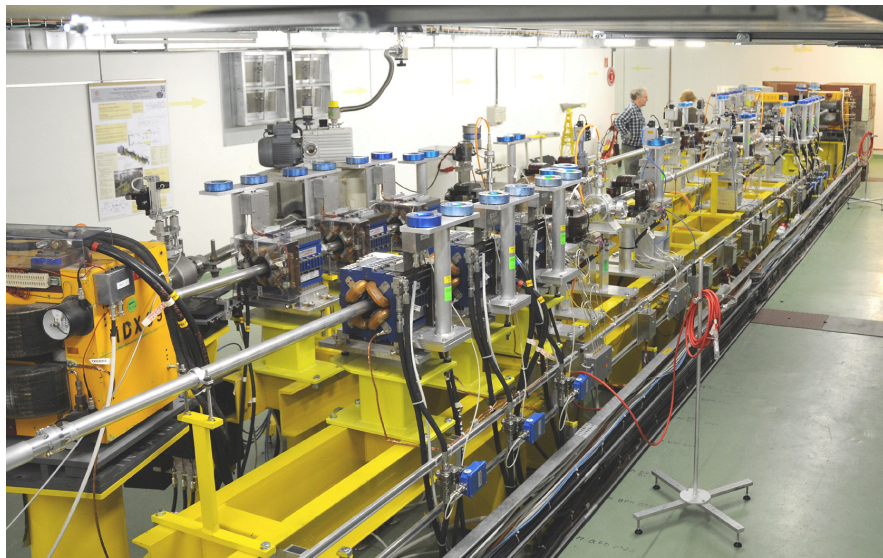
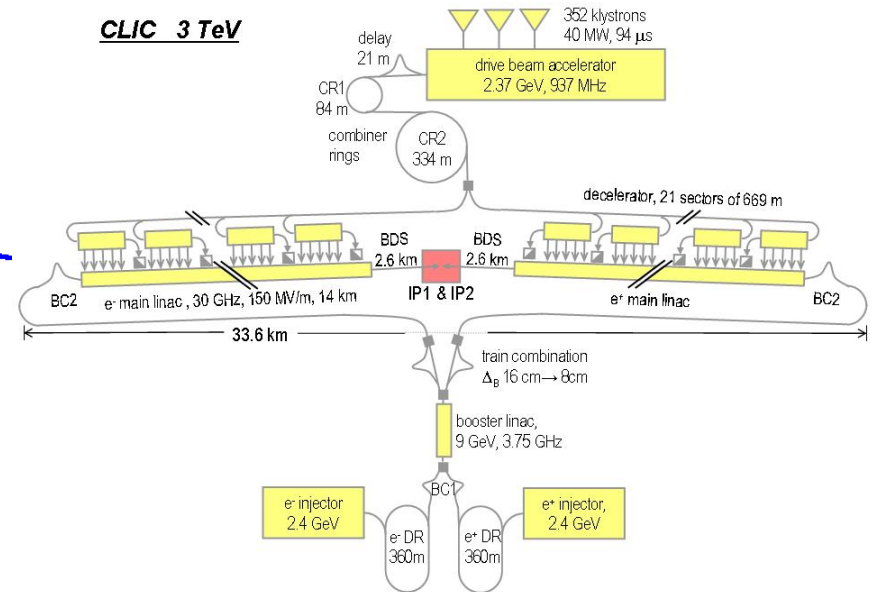
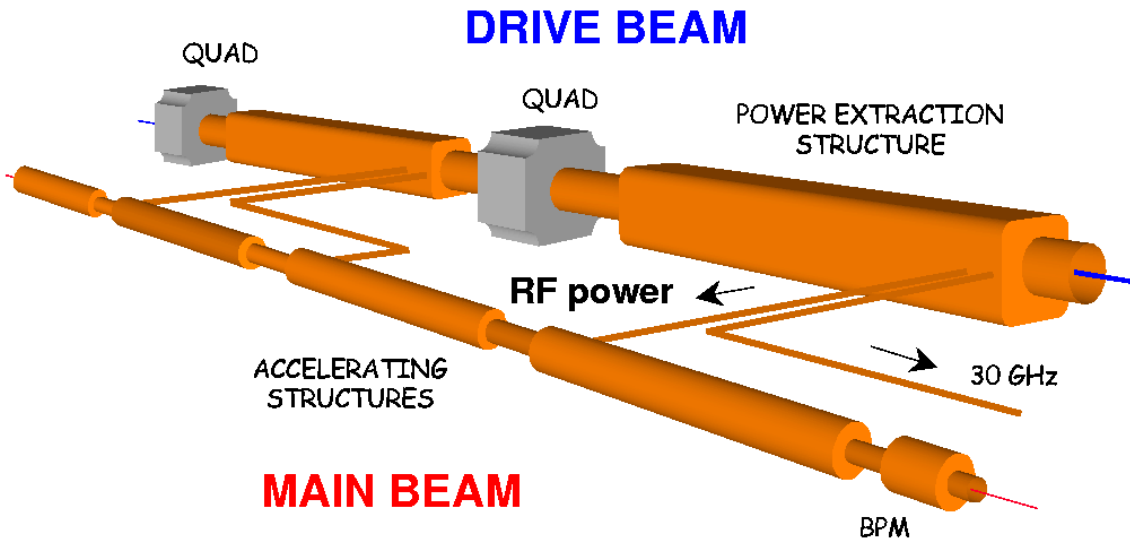
物理学会シンポジウム A. Yamamoto
 SC Technology in LHC/ILC より



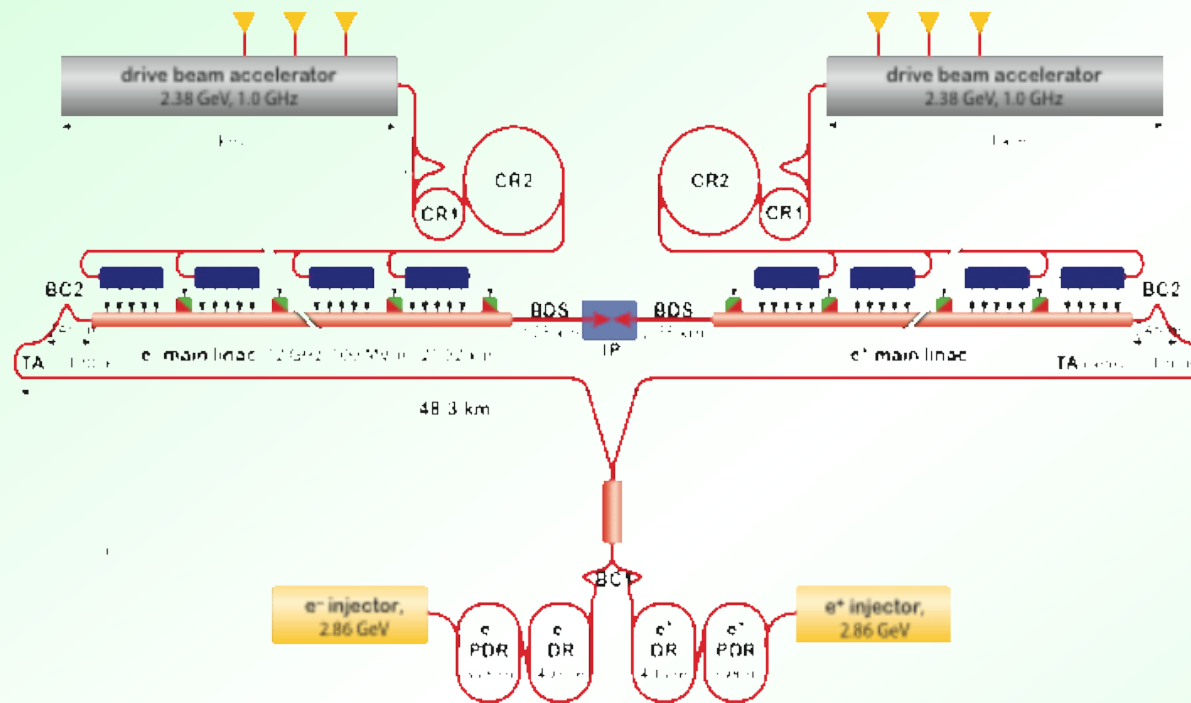


CLIC Compact Linear Collider (Two-beam accelerator)

Aiming for Multi-TeV Linear Collider



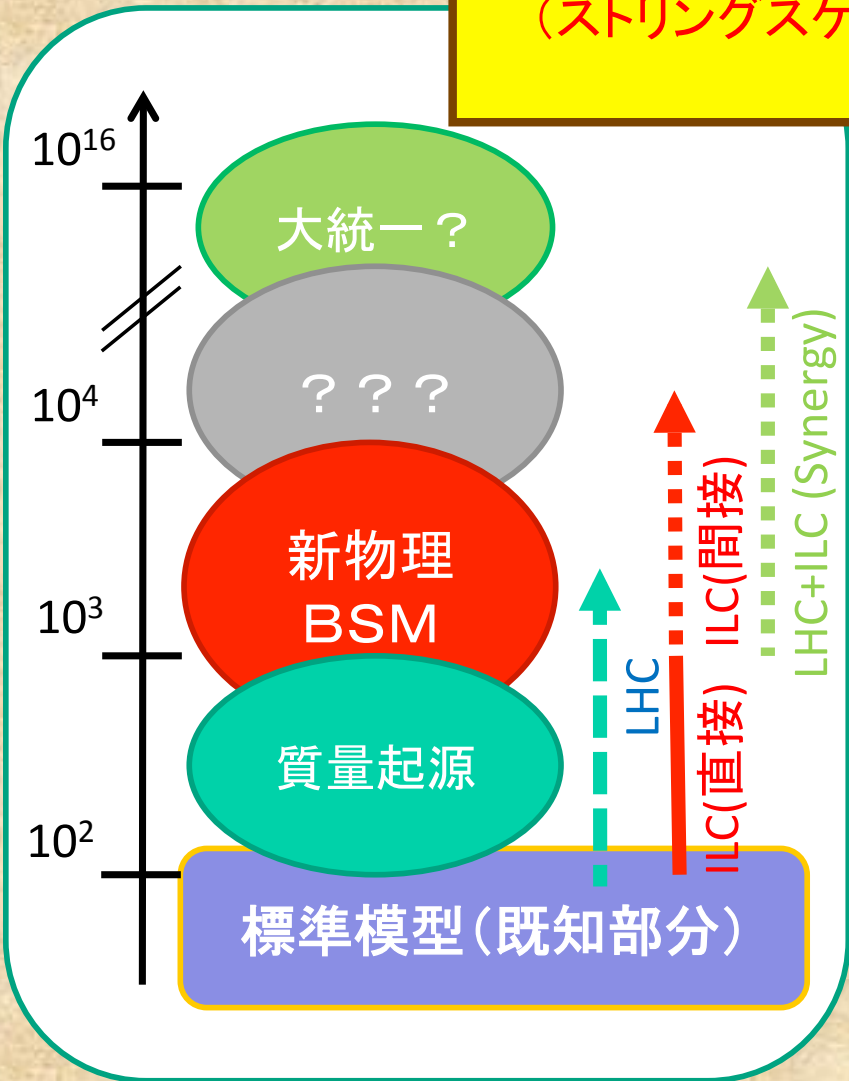
CLIC (Compact Linear Collider)



- CERNが推進
- 低エネルギー高電流のビームの電場で高エネルギー低電流のビームを加速
- 衝突エネルギー: 500 GeV→3TeV
- 2011年にCDR
- ILCと緊密に協力 (特に物理と測定器)

エネルギーフロンティアにおける物理の目指すもの

LHC+ILC
電弱スケール～テラスケールの物理(ラグランジアン)を完全に決定し, そこからさらに高いエネルギースケール(ストリングスケール、 ν_R スケール、GUT、プランクスケール)を探る



- ILCにおける物理**
- Higgs 粒子(達)の性質決定
 - 軽い新粒子(達)の性質決定
 - 新粒子の相互作用決定
 - 新物理の対称性の決定
 - 精密測定を通じた非常に高いスケールの物理探査

- LHC→SLHCにおける物理**
- Higgs 粒子(達)の発見・測定
 - Colored 新粒子の発見・測定
 - 他の新粒子(達)・現象の発見
 - 新粒子(達)の性質探査・測定

まとめ (兼村流仕分け+将来計画小委員会2011/6月)

	light H	heavy H	no H	NewParticle	HL-LHC	ILC
シナリオ1	x			x	○	◎
シナリオ2		x		x	○	◎
シナリオ3			x	x	○	◎
シナリオ4	x				△	◎
シナリオ5		x			◎	△
シナリオ6			x		◎	?

二者択一という意味ではありません

新たな粒子、現象の発見
精密測定とラグランジアン構成

ハドロンコライダー HL-LHC
レプトンコライダー ILC