



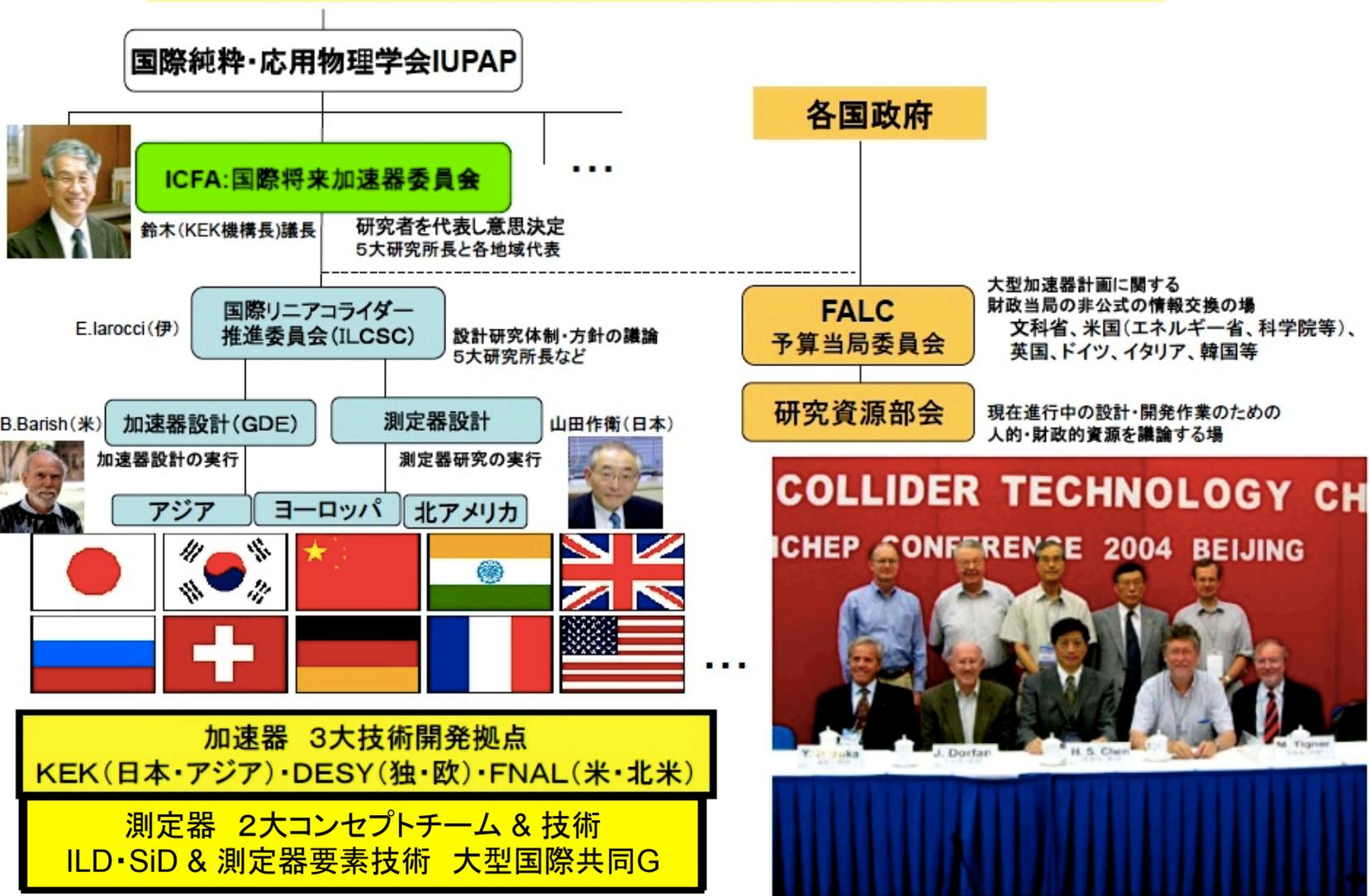
ILCの物理・測定器

川越 清以 (九州大学)
高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『コライダー加速器による高エネルギー物理学の将来展望』
2011.09.10@名古屋大学

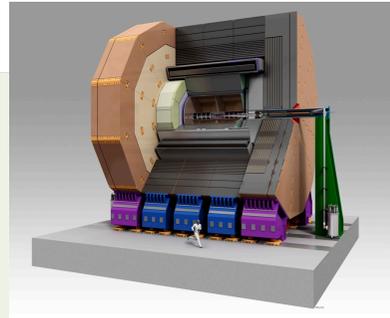
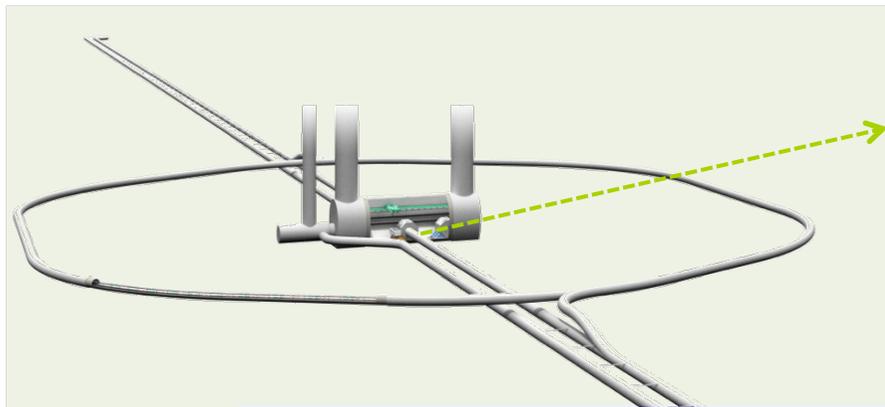
リニアコライダー

- 1980年代からアジア(日本)、北米、ヨーロッパで次世代計画として推進
 - 1986年「高エネルギー物理学将来計画(次期計画検討小委員会報告)」
 1. TeV領域の電子リニアコライダーの国内建設を目指した加速器のR&Dに直ちに着手する。
 2. SSCにおける国際協力実験を推進する。
 - 1997年「高エネルギー物理学将来計画検討小委員会報告」
 1. リニアコライダーを日本における高エネルギー物理学研究の次期基幹計画とする。
 2. 現在建設中のKEKB計画を予定通り遂行することは重要である。また、その他の国内・国外における加速器・非加速器実験の諸計画も、広範な学問基盤の形成のために推進する。
 - アジア(日本)の計画と平行してNLC計画(北米)とTESLA計画(ヨーロッパ)が進められた。
- 2004年から、世界で一つの「国際リニアコライダー(ILC)」として推進
 - 2006年「高エネルギー物理学の展望」
 - 日本の高エネルギーコミュニティは、エネルギーフロンティアの物理が最も重要であるとの認識の元に、ILCの実現を最優先課題とし、ILCの実験開始以前においては、エネルギーフロンティアと相補的な役割を担うフレーバー物理を共に推進するというマスタープランを成し遂げる。

現在の国際リニアコライダー計画の研究開発推進体制

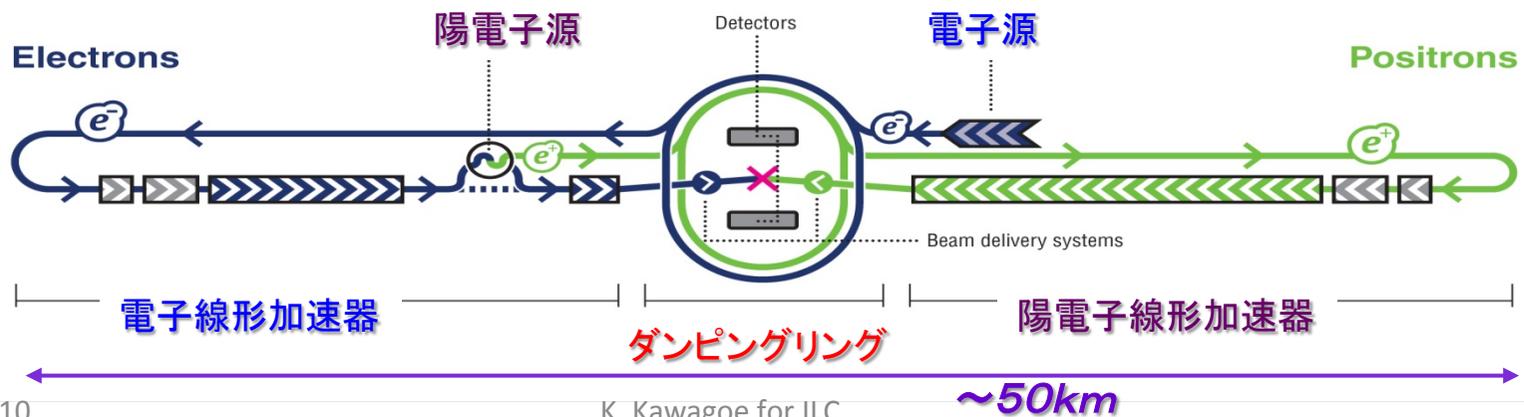


ILC全体像



GDEによる開発・設計 (👉 佐伯さん)

- 2012年末にTDR
- 第1期: 500 GeV (全長約31 km)でスタート
- 第2期: 1 TeV (全長約50 km)に拡張
- いつ、どこに作るかはこれからの議論による



なぜILCが必要か？

まずは陽子, 次に電子



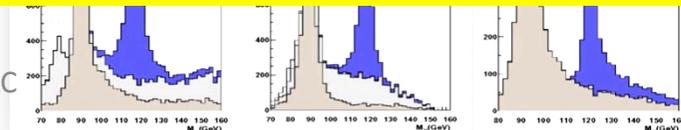
- ILCのクリーンな環境で、LHCで発見された新粒子を調べ尽くす。
 - 質量は？ スピンは？ 結合定数は？
 - 背後にある対称性や原理を探る
 - 未知の粒子に対する情報を得る
 - TeVの物理の全貌を明らかにするためには次に何が必要かを決める。

2011/09/10

Make up the road

A. Suzuki

K. Kawagoe for ILC



2010年秋の物理学会 (LHCでの発見可能性)

S. Kanemura

さまざまな可能性

	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)

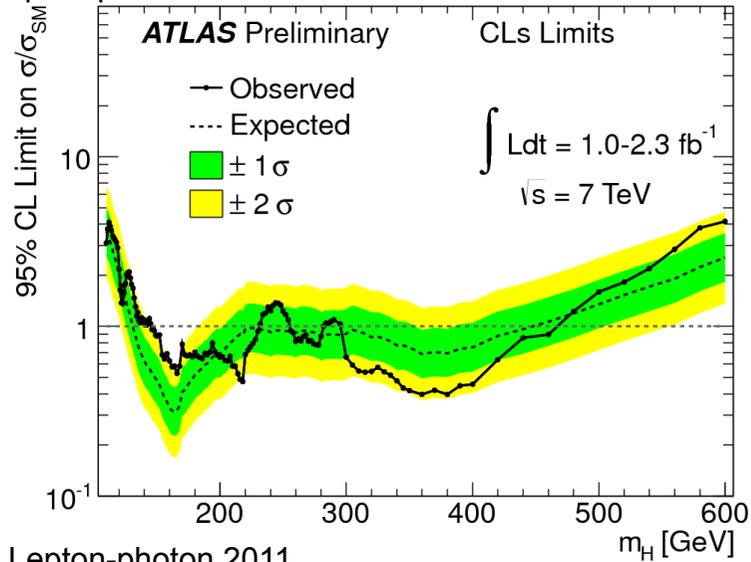
heavy H : $150 - 200 \text{ GeV} < m_h$ (LEPと一見矛盾する領域)

11

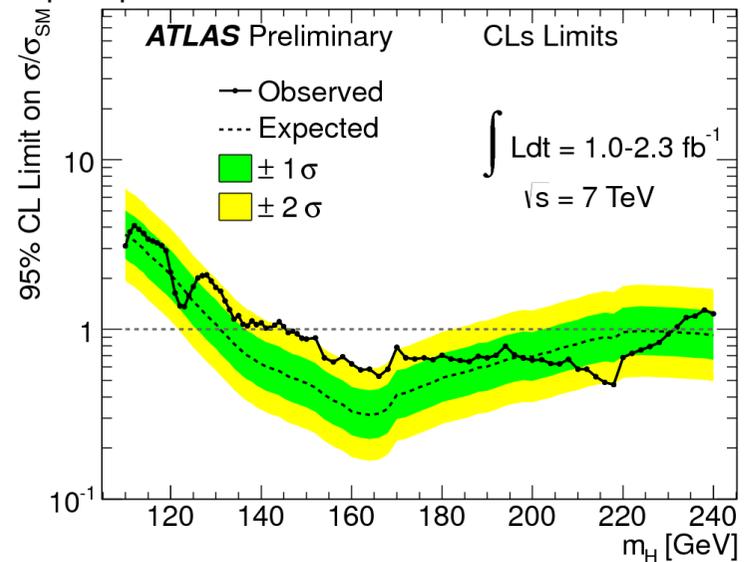
LHCの結果(新粒子の発見)が、ILC計画に直接影響する。
初期エネルギー、アップグレードシナリオ

2011年夏の状況

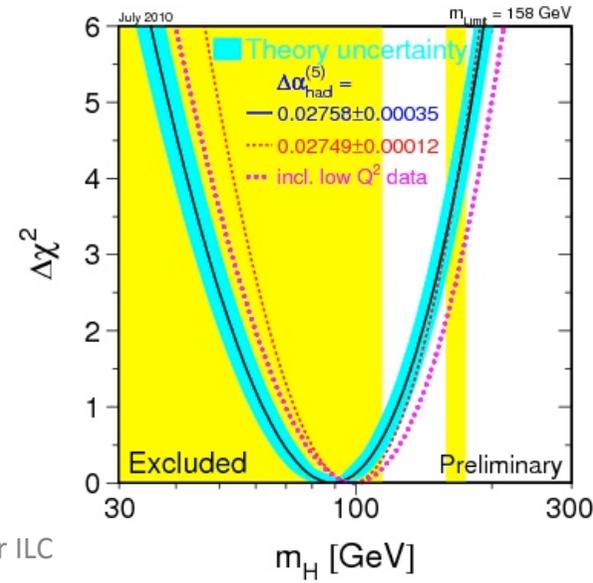
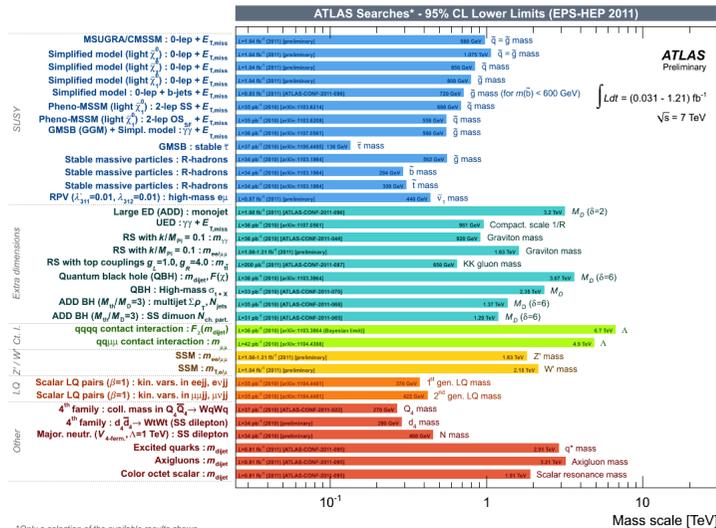
Lepton-photon 2011



Lepton-photon 2011



Lepton-photon 2011



LEP EWWG 2010

*Only a selection of the available results shown

2011年夏の状況

- 信頼度95%で、標準模型ヒッグス粒子の広い質量領域を排除
 - $145 \text{ GeV} < M_H < 466 \text{ GeV}$ のほとんどの領域を排除(ATLAS+CMS, LP2011)
- ヒッグスが軽い領域と重い領域は(まだ)生き残る。
 - 軽いヒッグスはEW精密測定と合致し、超対称性の予言と矛盾しない。
 - 軽い領域のexcessは最大 2.8σ (@EPS2011)から最大 2.1σ (@LP2011)に減少
 - 重いヒッグスは、EW精密測定にも超対称性の予言とも合わない
 - 超対称性以外の新物理が必要
- 超対称性や余剰次元など、標準模型を超える新粒子の兆候は(まだ)見えない。
 - カラーを持つ新粒子はとても重くないといけない
 - カラーを持たない新粒子は軽くてもよい
- 要するに、まだどのシナリオも排除された訳ではない
 - 2012年末までに、じわじわとシナリオが絞られていく

現時点の個人的予想

さまざまな可能性

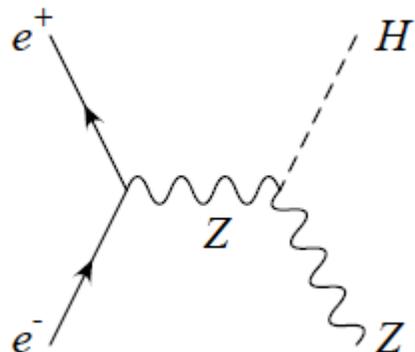
		light H	heavy H	no H	NewParticle
対抗	シナリオ1	x			x
	シナリオ2		x		x
	シナリオ3			x	x
本命	シナリオ4	x	この場合、ILCをやる意義はあるか？		
大穴	シナリオ5		x		
	シナリオ6			x	

light H : $114\text{GeV} < m_h < 150\text{-}200\text{ GeV}$ (LEPにコンシステントな領域)
 heavy H : $150\text{-}200\text{ GeV} < m_h$ (LEPと一見矛盾する領域)

シナリオ4: ILC as the Higgs Factory

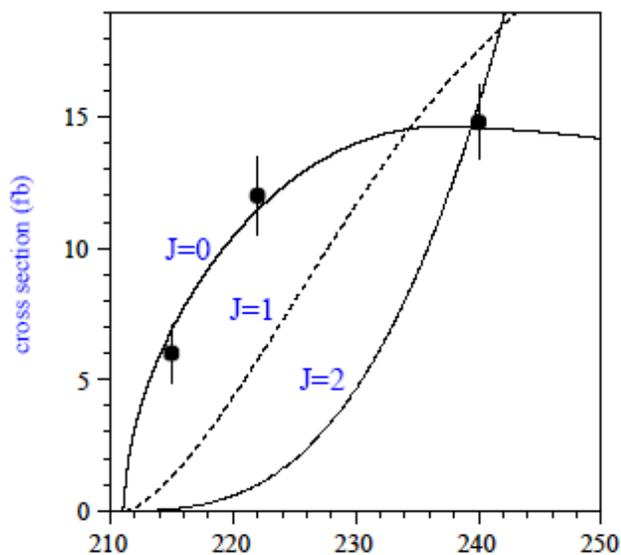
- LHCで発見されたヒッグス粒子を調べ尽くす
 - 初期状態のわかった素粒子同士の反応
 - バックグラウンドの少ないクリーンな環境で精密測定
 - 電子(+陽電子)の偏極を利用
- 標準模型ヒッグスか否か: **「ヒッグス」は未知の新粒子**
 - $E_{\text{CM}} \sim M_{\text{H}} + 130 \text{ GeV} (\sim 250 \text{ GeV})$ がベスト。
 - 質量、生成断面積の精密測定とスピンの決定
 - 崩壊分岐比の精密測定
 - $E_{\text{CM}} \sim 500 \text{ GeV}$ 以上で
 - ヒッグス自己相互作用の測定
 - トップ湯川結合の測定
- トップクォークの精密測定も可能
 - $E_{\text{CM}} \sim 350 \text{ GeV}$ で、*ttbar threshold study*
 - 質量、 $\alpha_s(m_Z)$ 、 Γ_{top} の測定
 - Top-quark momentum の測定
 - Forward-backward asymmetry

ヒッグスの質量、生成断面積、スピン



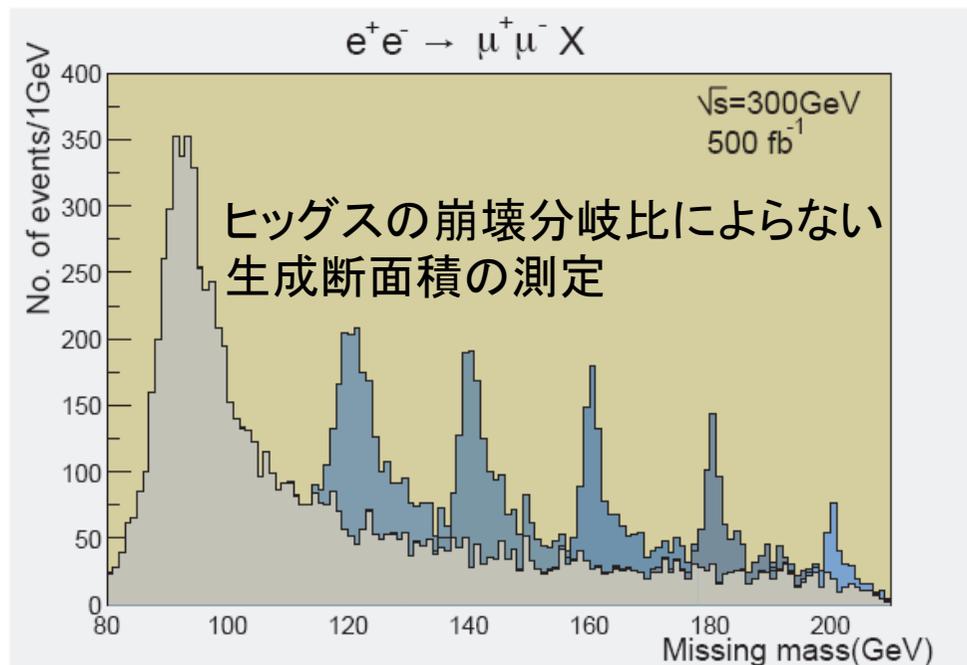
$ee \rightarrow HZ$ 過程でヒッグス粒子を大量生産し
ヒッグス粒子の性質を精密に決める。
最も生成断面積が大きくなるのは
 $M_H + 130 \text{ GeV}$ ぐらい。

スピンの決定



TESLA TDR 2001

2011/09/10



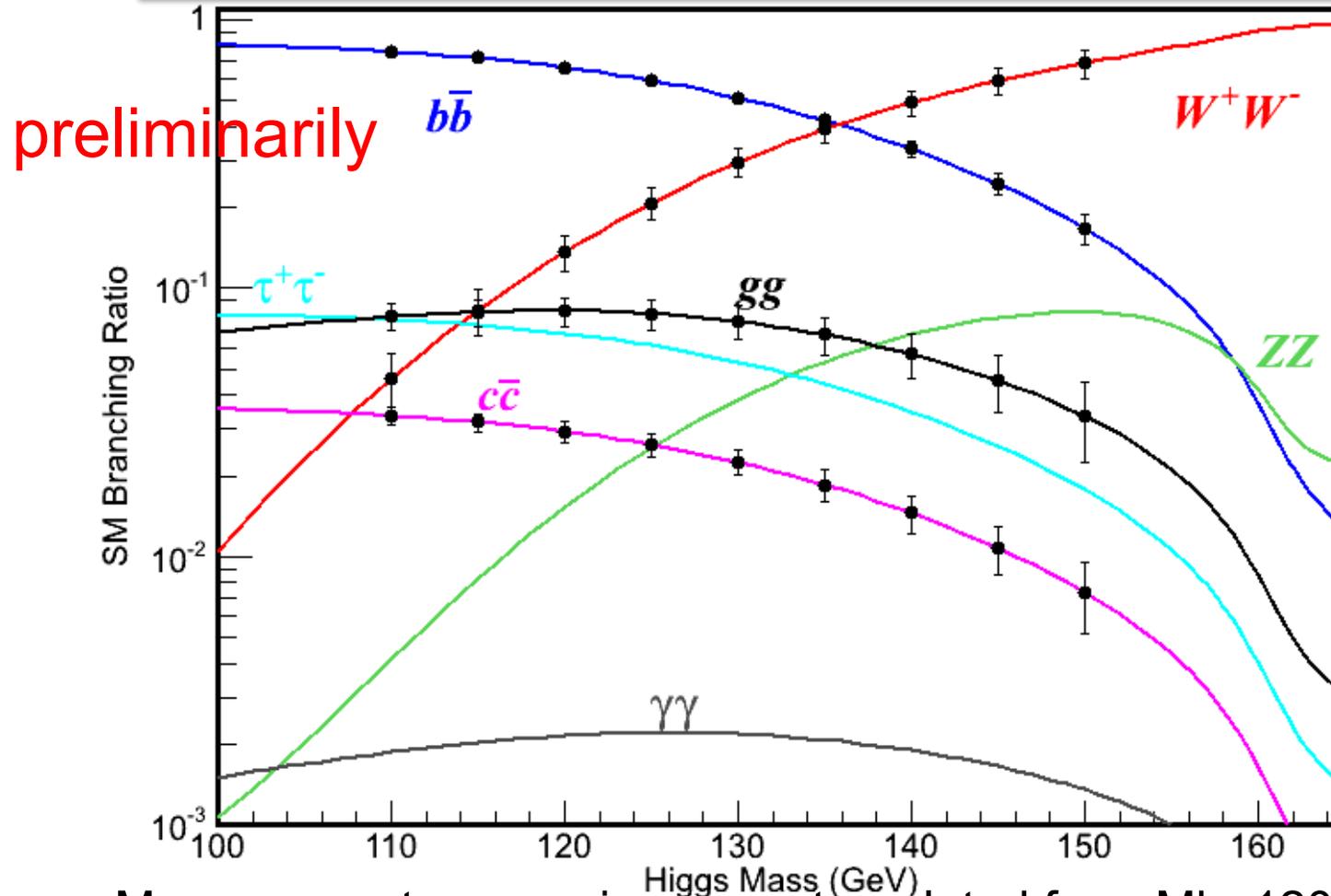
GLC project 2003

K. Kawagoe for ILC

11

BR accuracy with different Mh

$E_{cm}=250 \text{ GeV}$, $L=250 \text{ fb}^{-1}$, Beam pol(e^+, e^-)=(+30%, -80%)



H. Ono

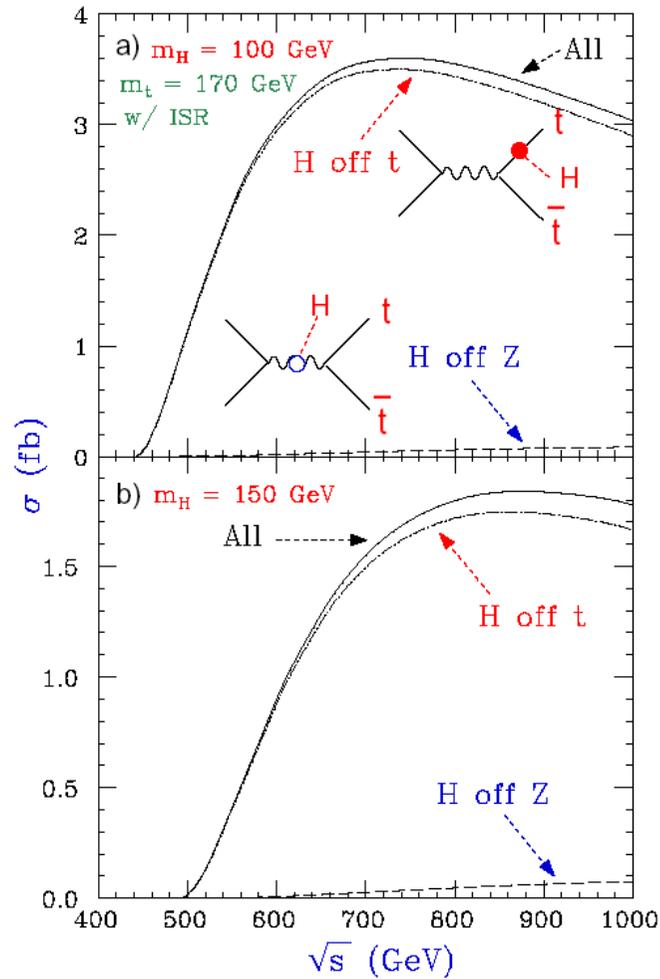
Measurement accuracies are extrapolated from $M_h=120 \text{ GeV}$

トップ湯川結合とヒッグス自己相互作用

高エネルギー(500GeV以上)、高ルミノシティ(数 ab^{-1})の物理

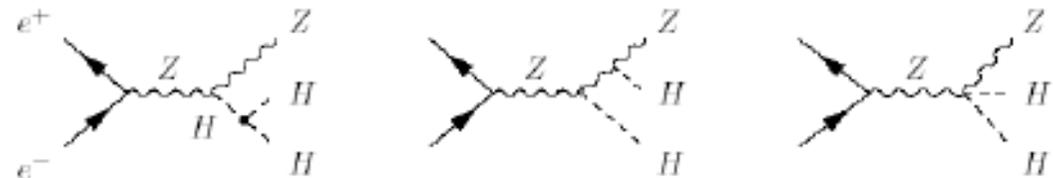
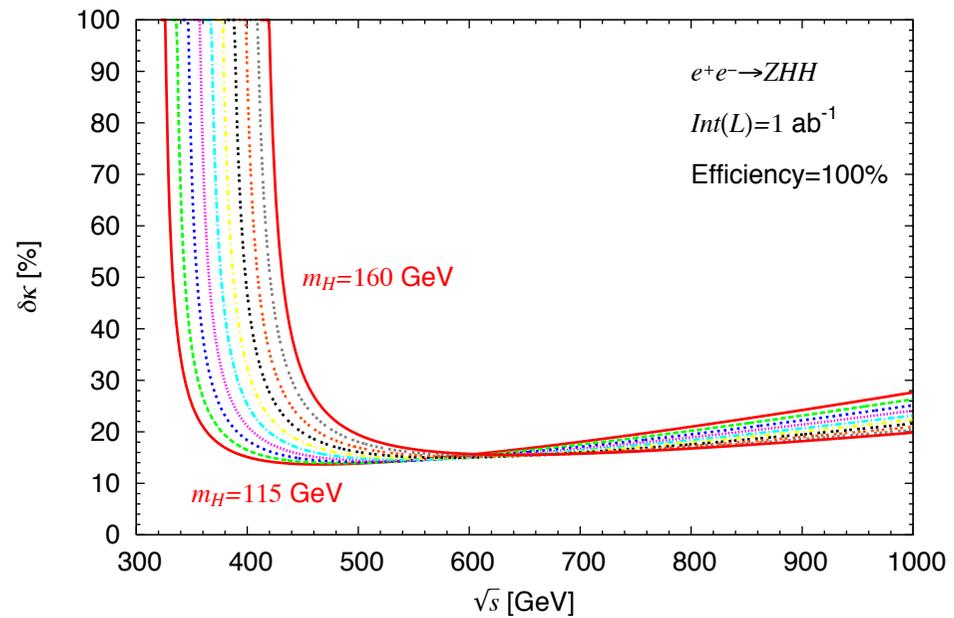
D.Harada

理論計算のみの評価

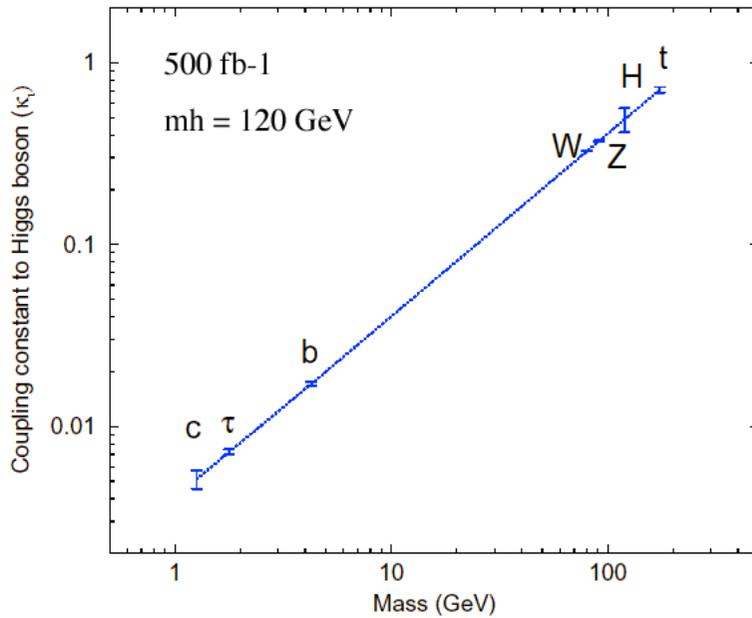


$$\lambda_{hhh} = \lambda_{hhh}^{\text{SM}} (1 + \delta\kappa)$$

$$e^+e^- \rightarrow Zhh$$

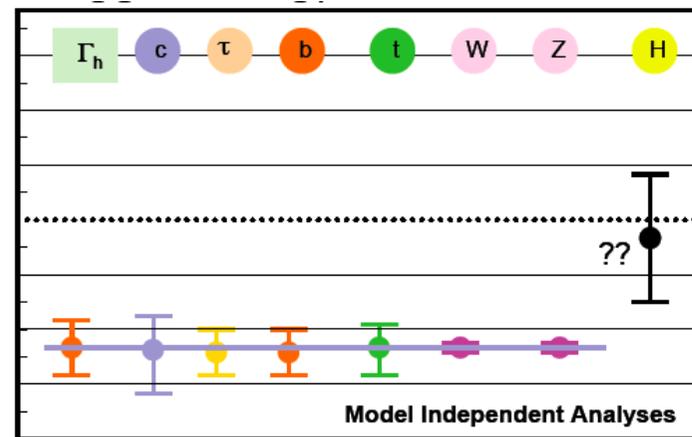
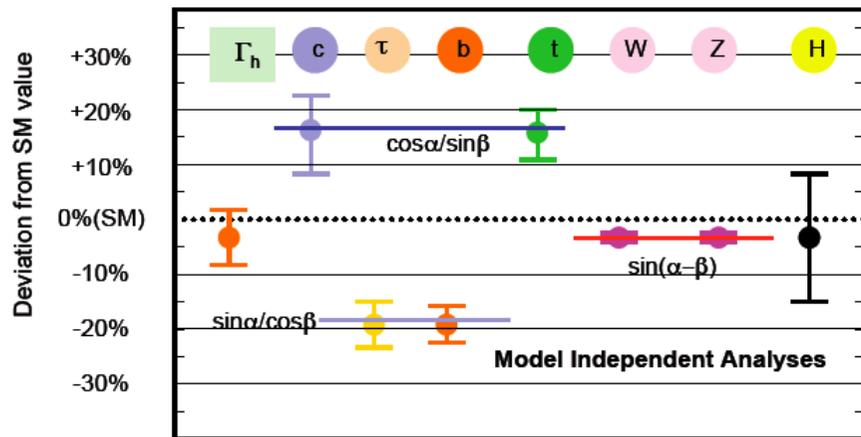


K. Kawagoe for ILC

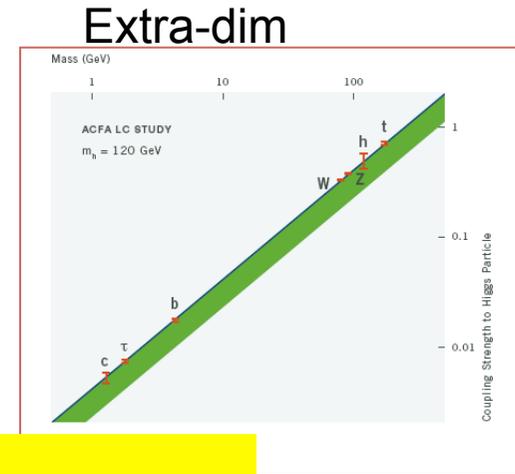
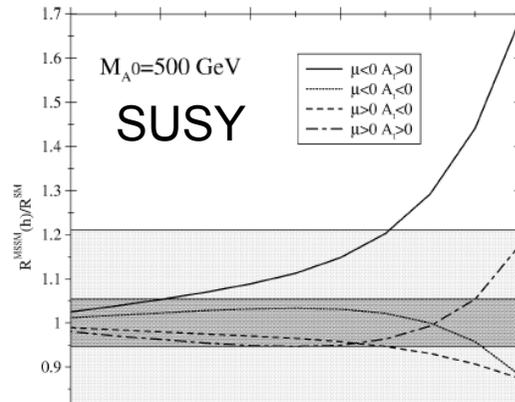
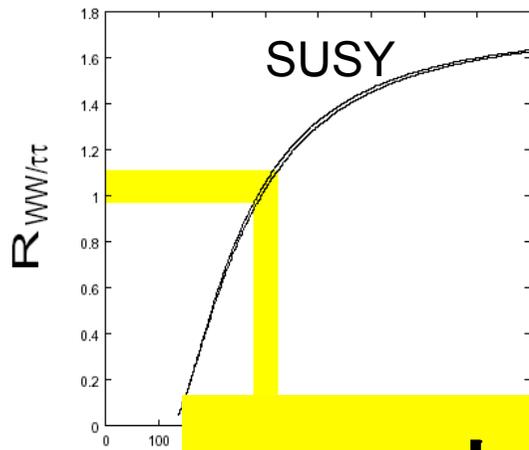


生成断面積および崩壊分岐比の測定によりヒッグス粒子とクォーク、レプトン、ゲージ粒子との結合定数を精密に決める。0(1)%レベルで決めることができる。

SMでは結合定数 \propto 質量
SMからのずれで新物理を探る



ヒッグス粒子精密測定によるTeV物理の探索



**ヒッグス粒子は
TeVの新物理を探る道具**

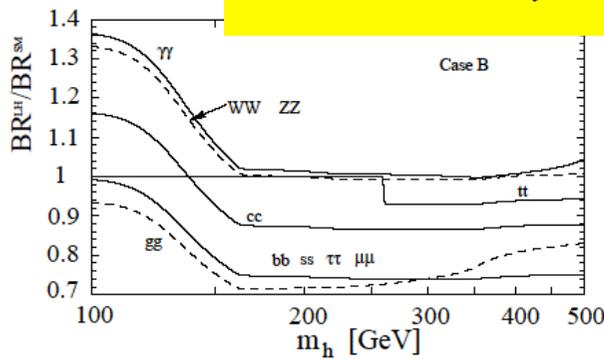
ACFA report

Report

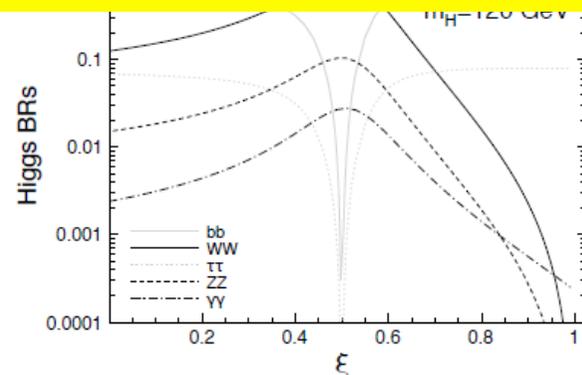
Little H

Dark baryogenesis

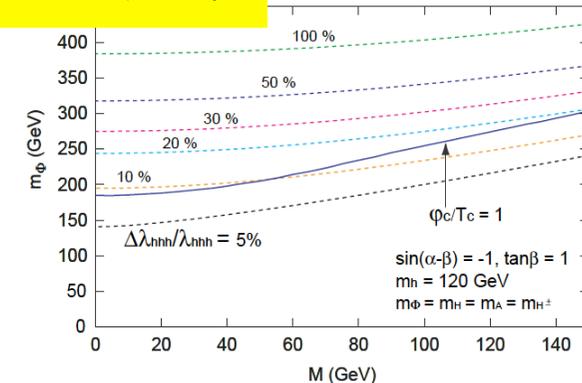
$\lambda_{hh\bar{h}}/\lambda_{h\bar{h}h}$ and ϕ_c/T_c in the m_ϕ -M plane



R.C. Chen et al

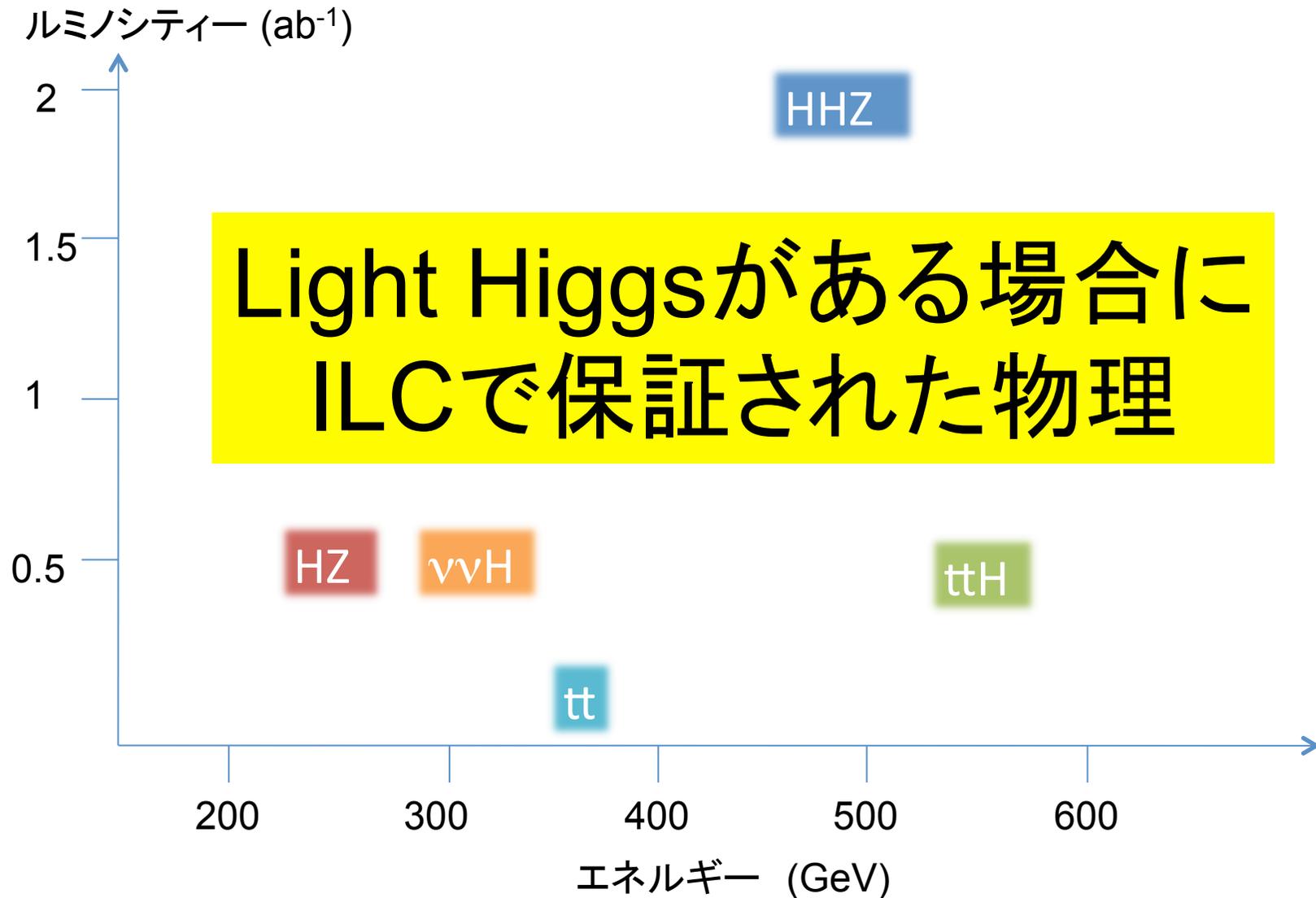


R.Contino et al



S.Kanemura et al

ILCにおけるヒッグス粒子とトップクォークのプログラム

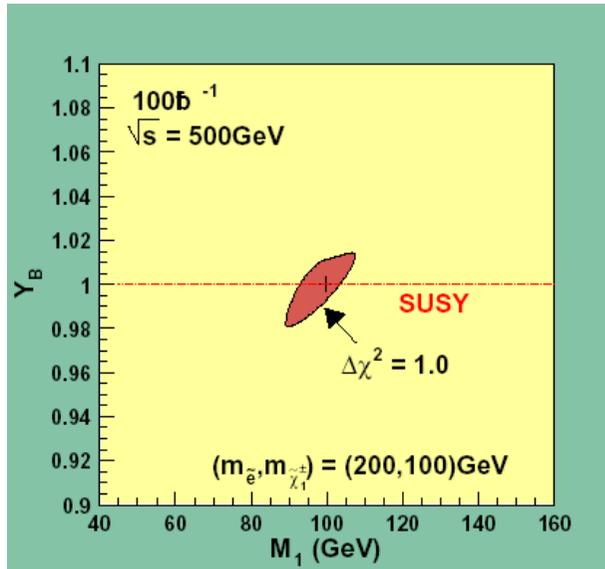


ヒッグス以外の新粒子

- LHCで今後(比較的重い)新粒子が見つかるかもしれない
 - もし見つければ、その崩壊から軽い新粒子の質量に目安がつく
- LHCで発見不能な(比較的軽い)新粒子がILCで見つかる可能性もある
- LHC/ILCでヒッグス以外の新粒子がひとつ見つければ、おそらくそれはひとつだけではない。新粒子探索の時代に突入する。
 - 超対称性？余剰次元？
 - 暗黒物質？
- 新粒子を詳しく調べて、次のコライダーエネルギーを決める。
 - 1 TeV までならILCのアップグレード(第2期)
 - それ以上ならCLIC or Muon Collider

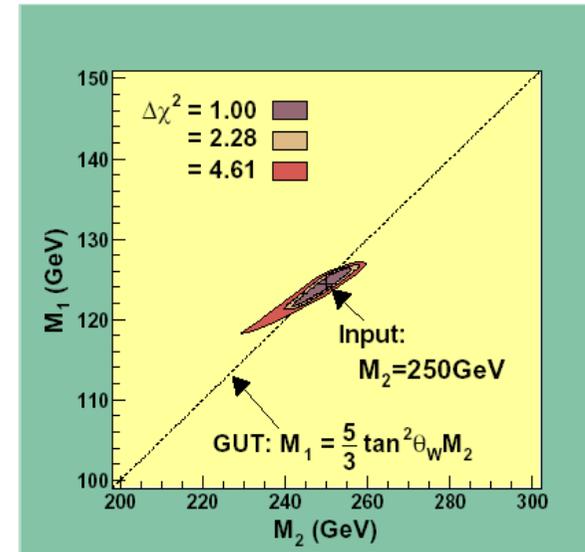
超対称模型の 様々な基本的な測定

SUSY relation

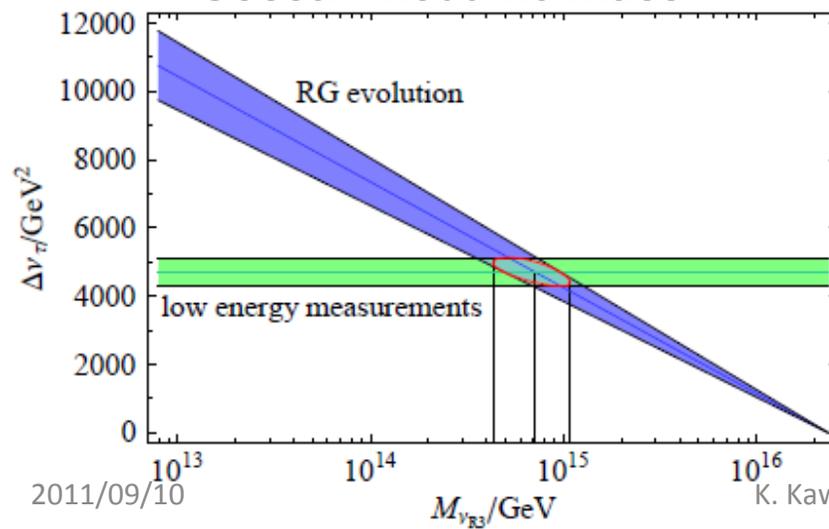


GLC Project

GUT relation



Seesaw neutrino mass

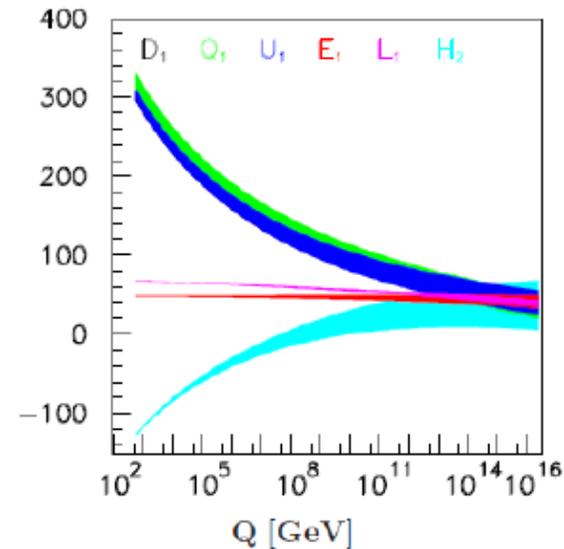


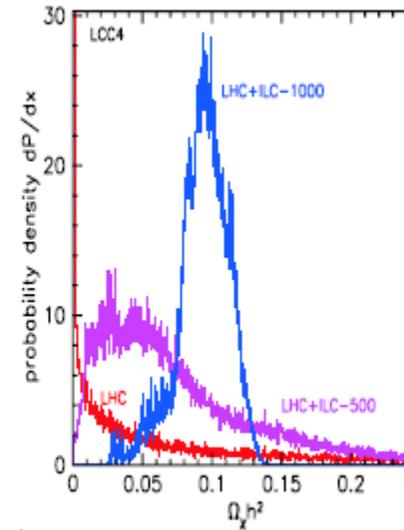
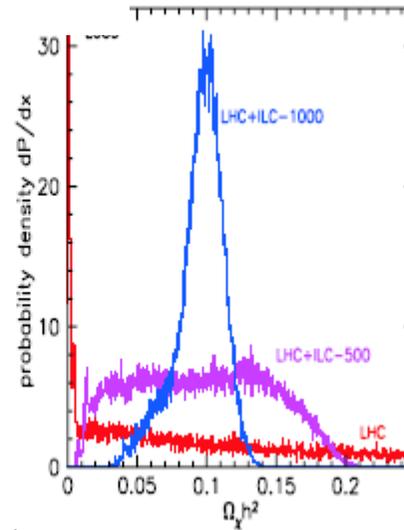
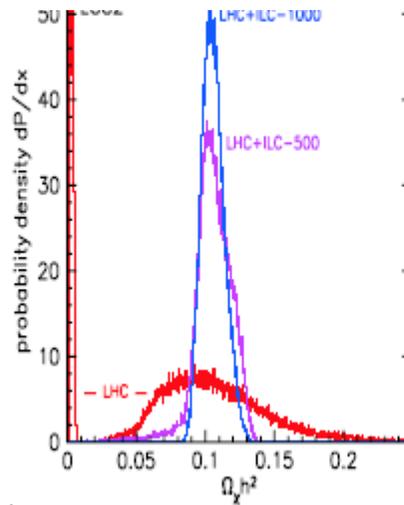
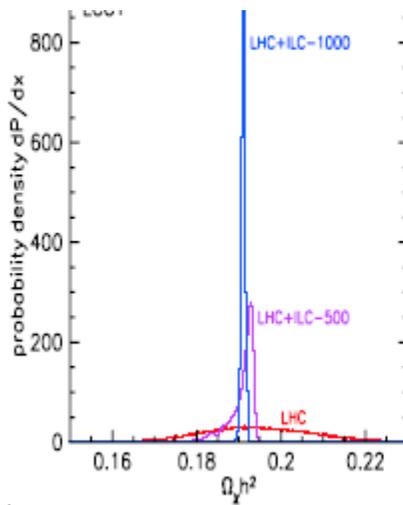
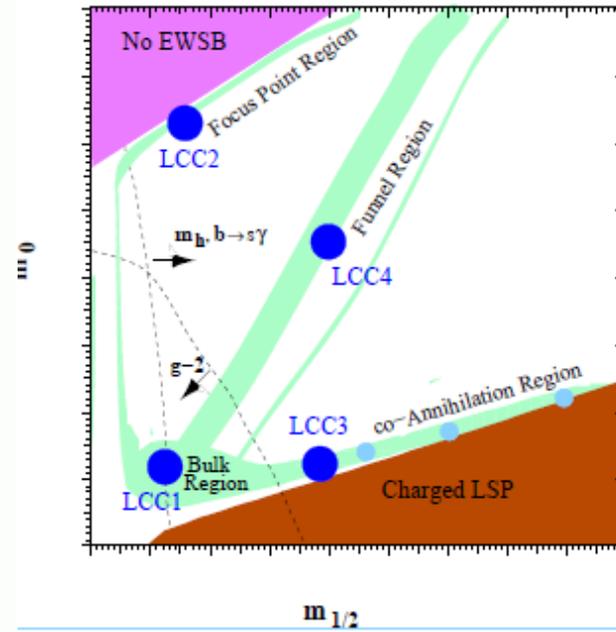
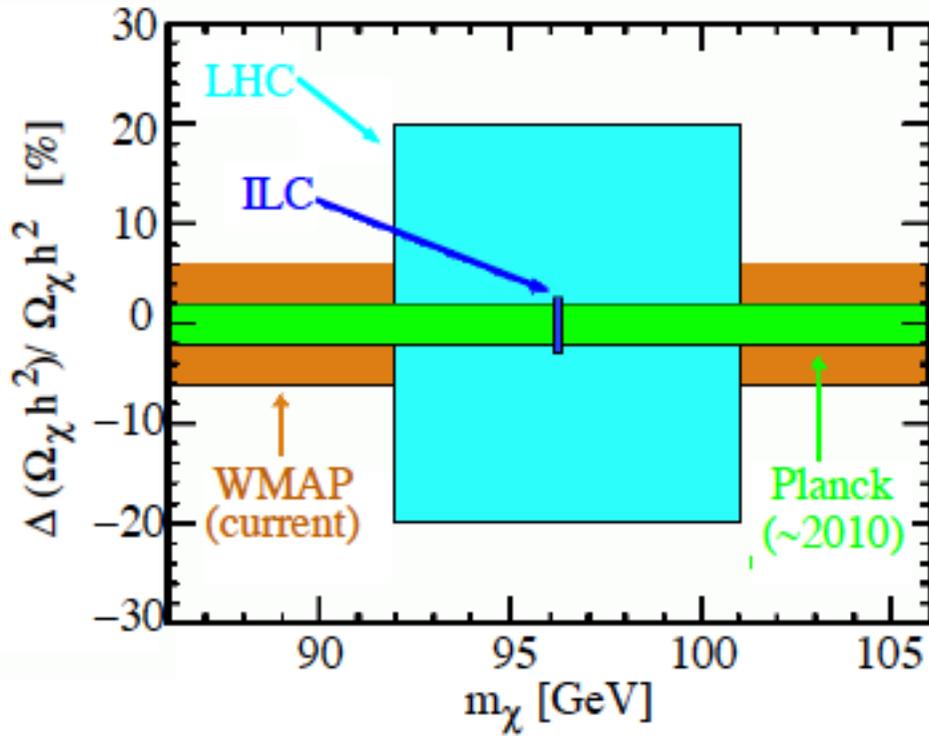
ILC RDR

2011/09/10

K. Kawagoe for ILC

$M_j^2 [10^3 \text{ GeV}^2]$





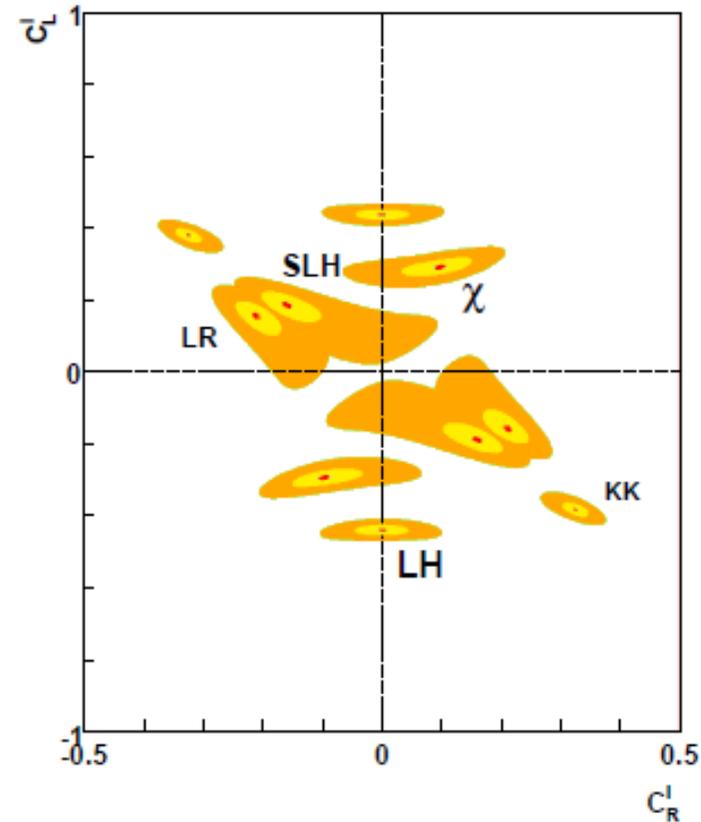
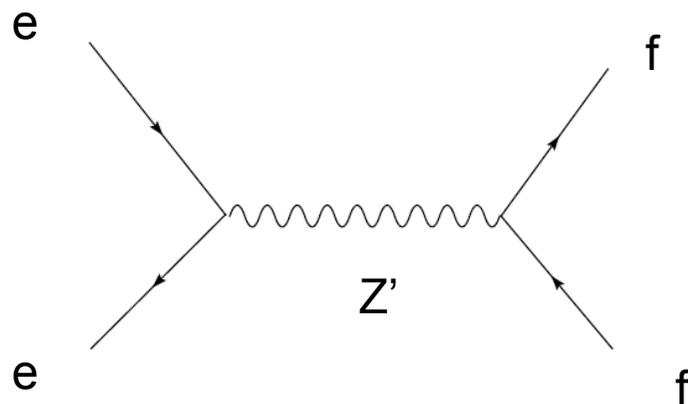
E.A.Baltz, M.Battaglia, M.E.Peskin, and T.Wizansky

新粒子がなくても 精密測定で高エネルギーを探る

様々なZ' 模型の区別

たとえILCエネルギーが新粒子の生成に足りなくても、TeV物理に関する重要な知見が得られることがある。

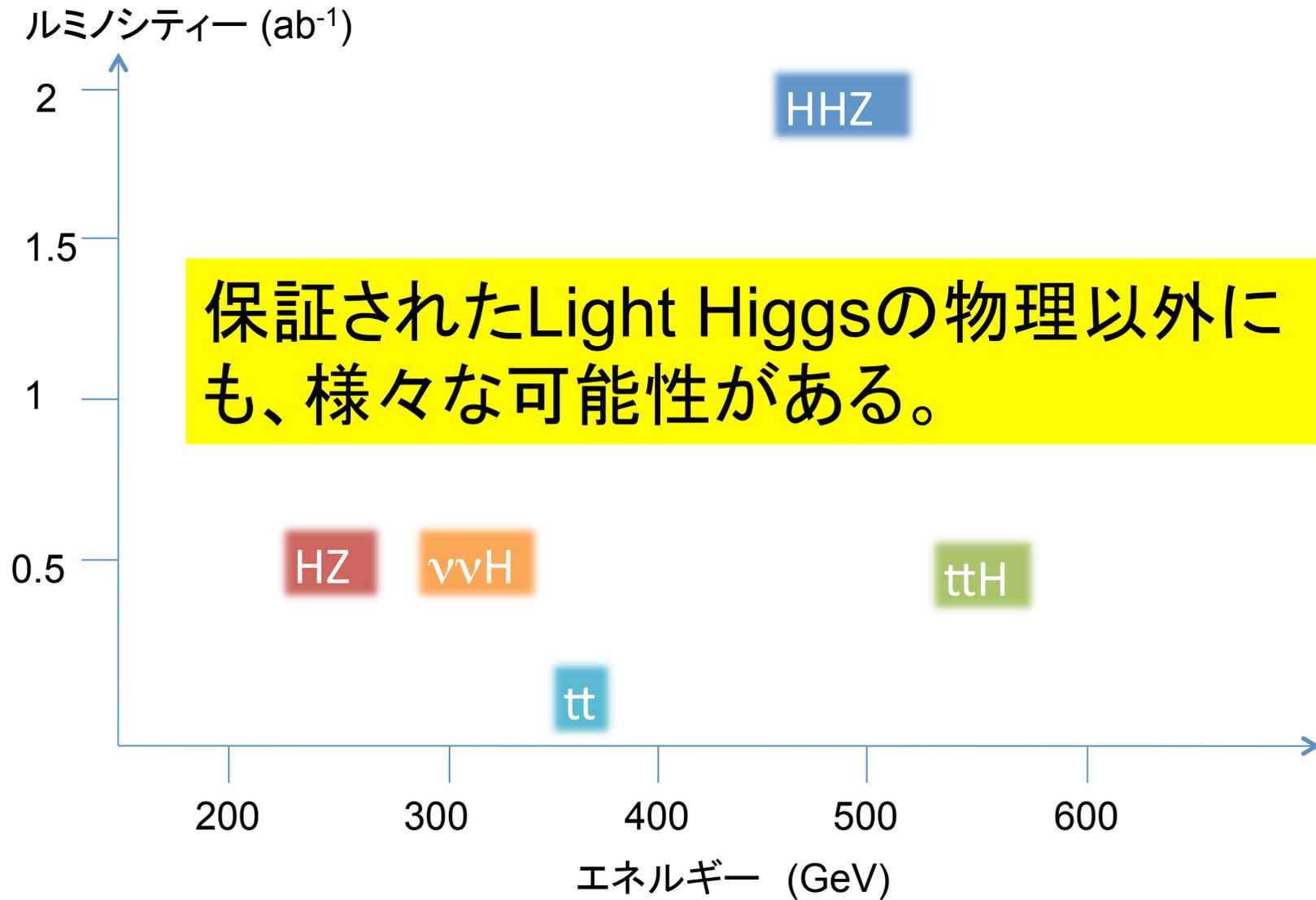
レプトンコライダーの特徴を生かす
(バックグラウンドの少なさ、
運動学の制約、偏極ビーム)



$m_{Z'} = 1, 2, 3 \text{ TeV}, E_{\text{cm}} = 500 \text{ GeV}, L = 1 \text{ ab}^{-1}$

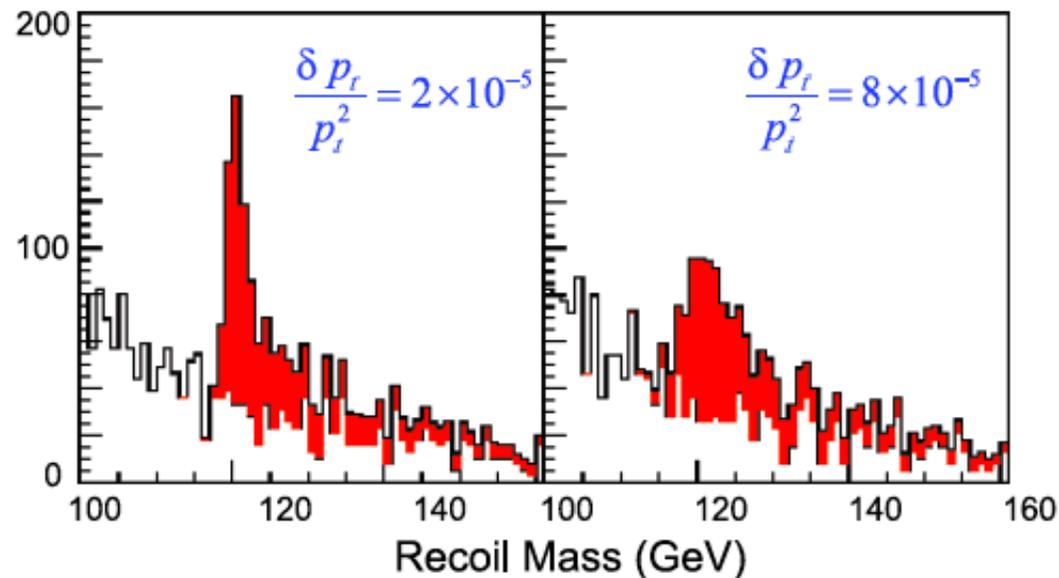
S. Godfrey, P. Kalyniak, A. Tomkins

ILCにおけるヒッグス粒子とトップクォークのプログラム



ILC実験のための測定器

- LHC測定器(high rate & high radiation)とは開発の方向が異なる。
- ILC加速器の性能を最大限に発揮するため、LEP測定器を大きくしのぐ性能が必要
 - Impact parameter resolution for b/c-tagging (Higgs BRの測定)
 - Momentum resolution for $ee \rightarrow llX$ (recoil mass, below)
 - Jet energy resolution to separate W and Z (multi-jets events)



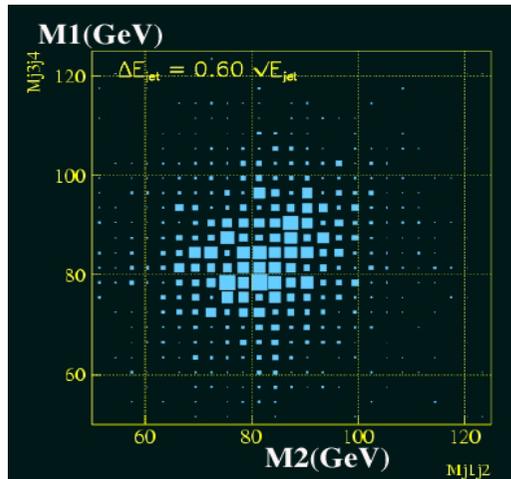
$E_{\text{CM}}=500\text{GeV}$ での
 $ee \rightarrow HZ \rightarrow llX$ での
Recoil mass

Mass resolutionとS/N
の向上は実質的ルミノ
シティの向上に相当

Jet (quark) の再構成

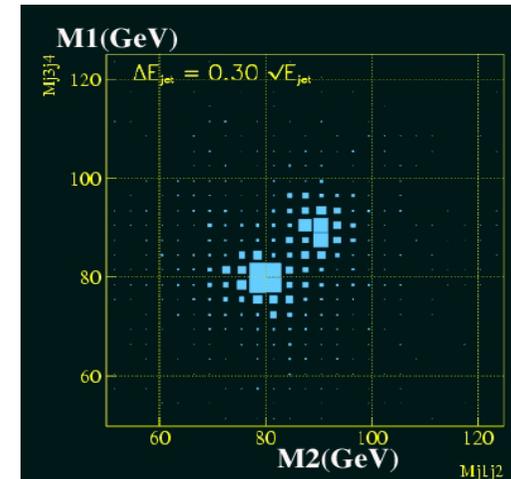
$$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}WW, \nu\bar{\nu}ZZ \quad W/Z \rightarrow jj$$

Current



$$\sigma_E / E = 0.6 / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Goal

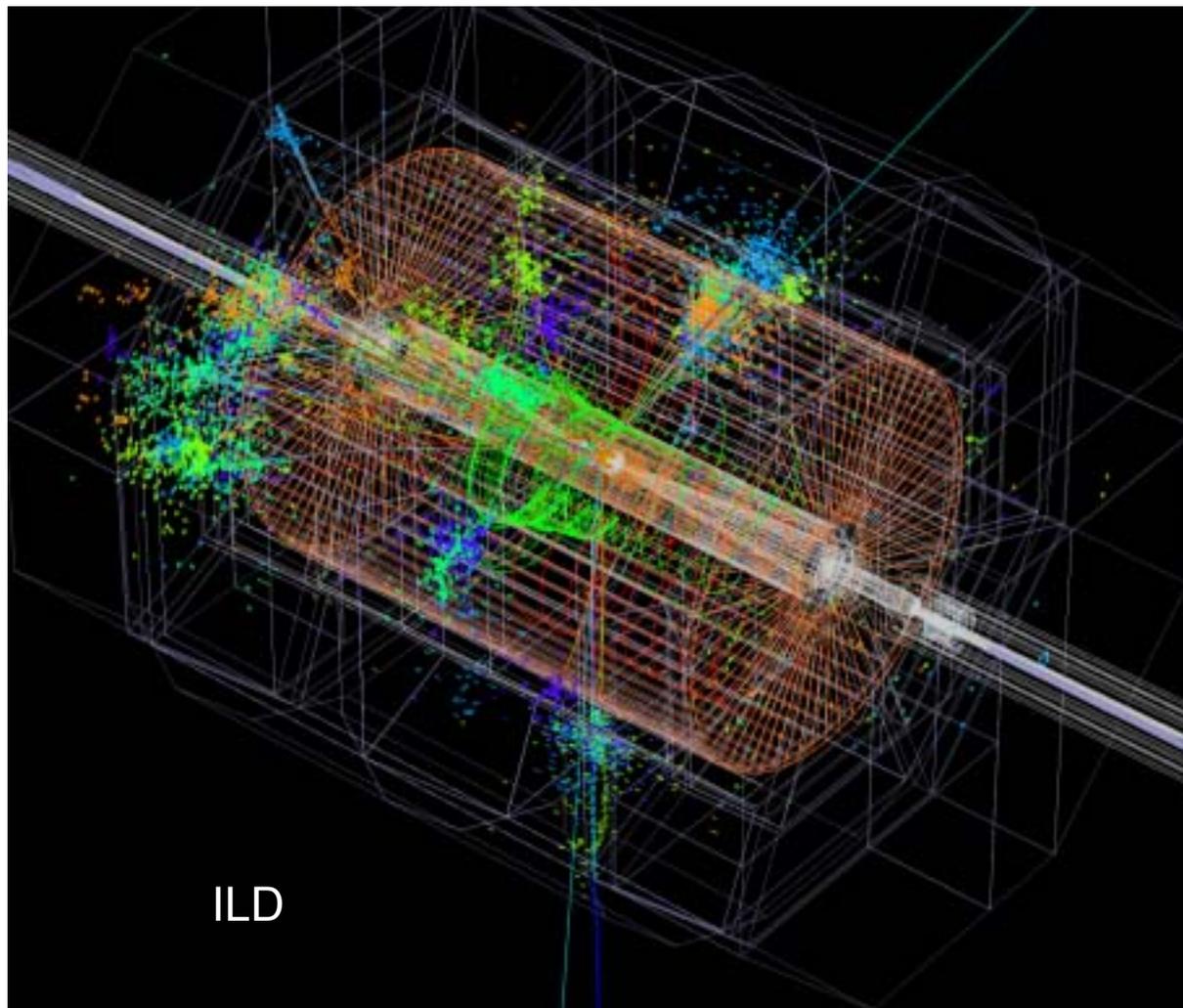
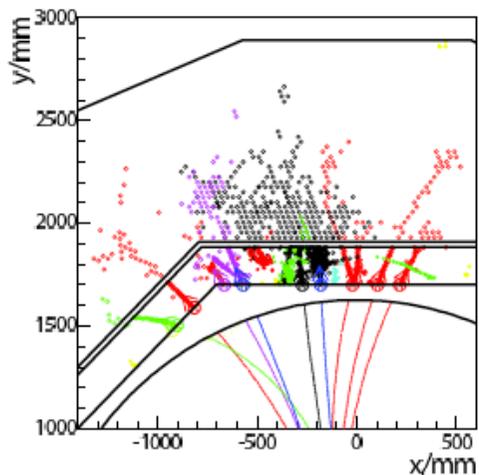


$$\sigma_E / E = 0.3 / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

- WとZのジェットを分離するには、 $\sigma_E / E = 0.3 / \sqrt{E}$ が必要。
- A promising technique : PFA (particle flow algorithm)
 - 荷電粒子は飛跡検出器で、中性粒子はカロリメータで測定
 - 測定したエネルギーの重複を解くことが鍵

PFA

- ジェット中の荷電粒子によるエネルギー/運動量測定の一重復を解く。
 - 電磁シャワーの広がりを抑え、細分割して読み出す
 - PFAに特化されたpattern recognitionが必要



#ch	ECAL	HCAL
ILC (ILD)	100M	10M
LHC	76K (CMS)	10K (ATLAS)

$\times 10^3$ for ILC
Need new technologies !

ILC測定器が目標とする具体的な性能

■ Vertexing ($h \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, \tau^+\tau^-$)

- $\sim 1/5 r_{\text{beampipe}}, < 1/30$ pixel size (wrt LHC)

$$\sigma_{ip} = 5\mu\text{m} \oplus 10\mu\text{m} / p \sin^{3/2} \theta$$

■ Tracking ($e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow \ell^+\ell^-X$; incl. $h \rightarrow$ nothing)

- $\sim 1/6$ material, $\sim 1/10$ resolution (wrt LHC)

$$\sigma(1/p) = 2 \times 10^{-5} / \text{GeV}$$

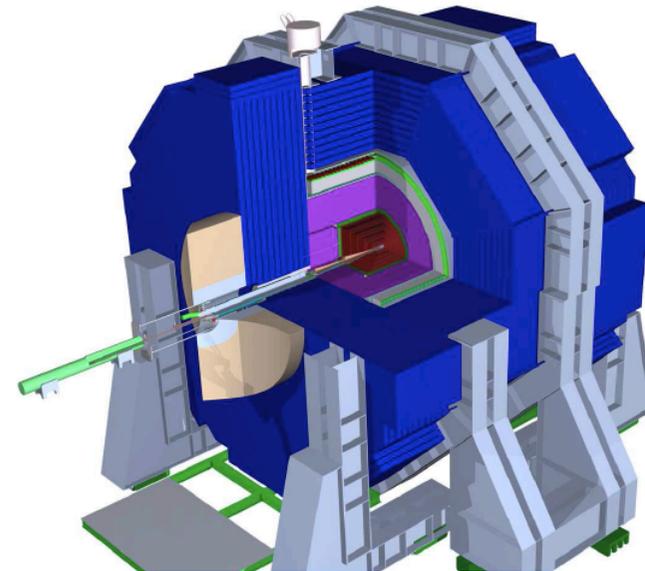
■ Jet energy (quark reconstruction)

- $\sim 1/2$ resolution (wrt LHC) by PFA

$$\sigma_E / E = 0.3 / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

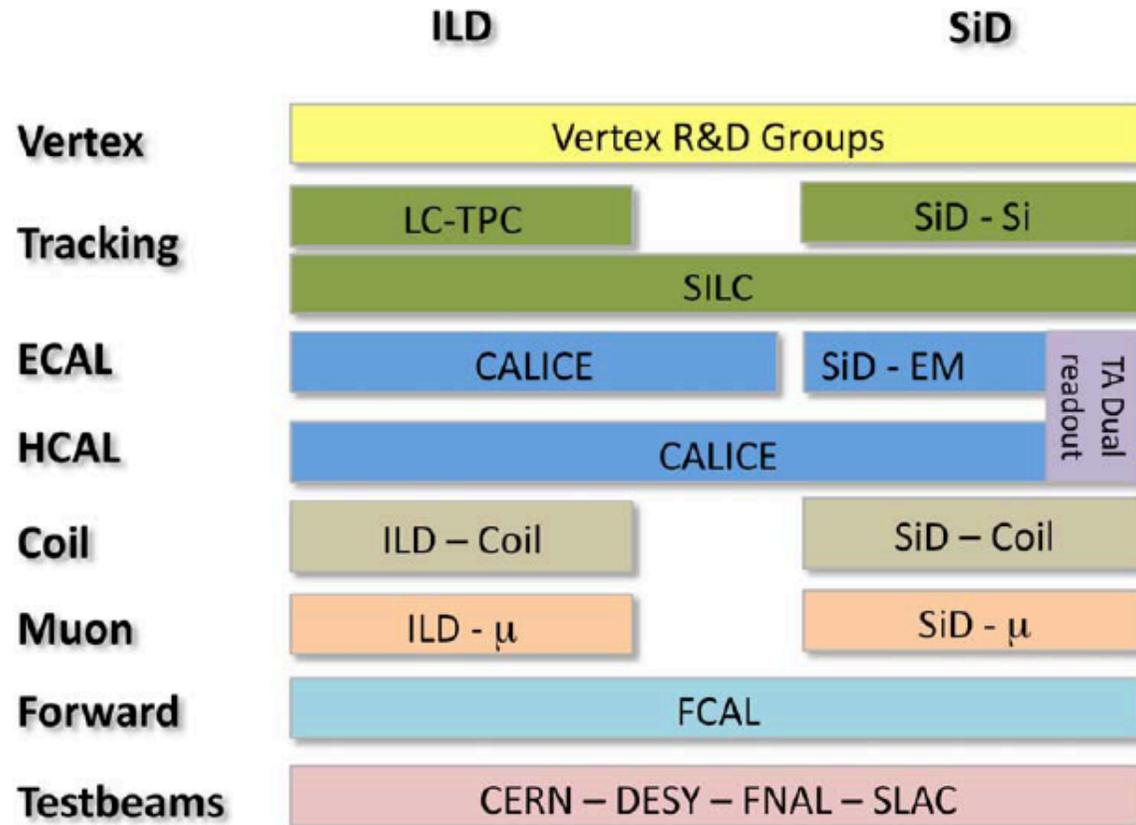
ヒッグスの再発見を1日で達成

ILDとSiD



- どちらもPFAに最適化したコンセプト。ソレノイド磁石はHCALの外。
- ピクセル検出器は、ILCのバンチ構造に対応できる技術を開発中
- ILD
 - 中央飛跡検出器: $B=3.5\text{T}$ 、TPCとシリコン検出器の組み合わせ
 - ECAL: Si-W and/or Scint-W、HCAL: Analog or Semi-digital
- SiD
 - 中央飛跡検出器: $B=5\text{T}$ 、シリコン検出器だけで構築
 - ECAL: Si-W、HCAL: Digital
- ひとつのIPをILDとSiDで共有。『Push-Pull』方式で入れ替え。

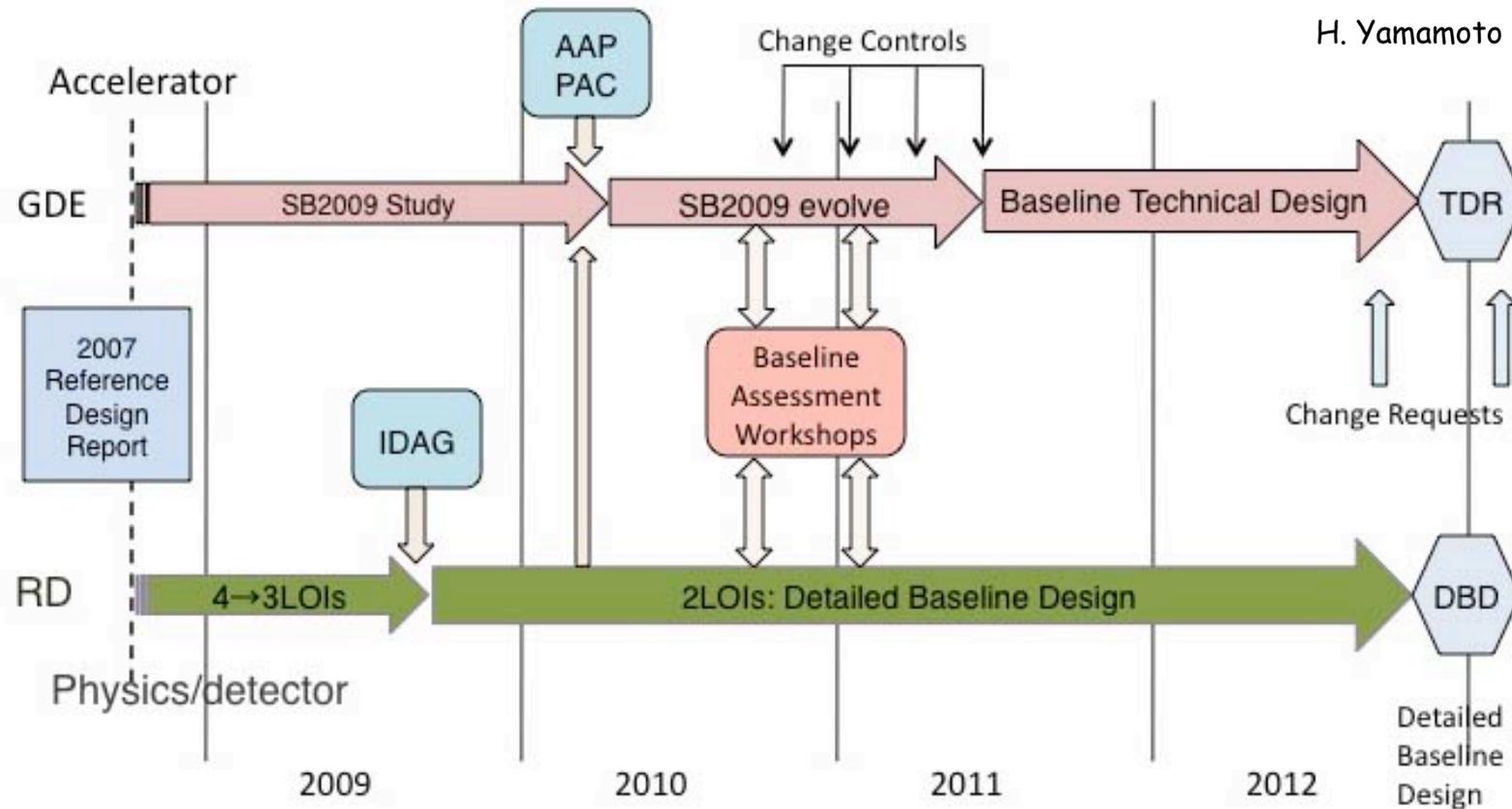
ILC測定器の開発・設計グループ



M. Demarteau

- タテ(測定器コンセプトグループ)
- ヨコ(コンセプトグループを超えたR&Dグループ)
- CLIC測定器グループとの連携も始まっている

ILC測定器の開発・設計

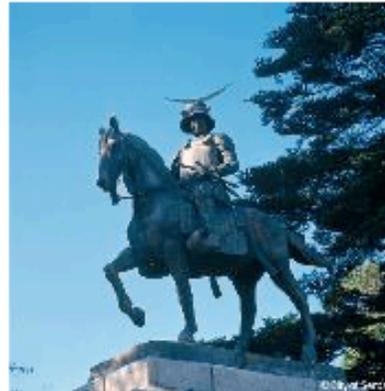


- IDAG (International Detector Advisory Group):
 - 2009年夏にILDとSiDの2測定器コンセプトのLOIsを認証
- ILD and SiD:
 - DBD (Detailed Baseline Design)を2012年末までに完成させる
- 2013以降: ‘Pre-ILC lab’ ? (検討中、GDE/RDの1年延長が決まる)

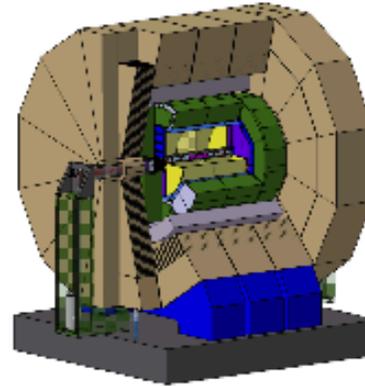


A JSPS Grant in Aid for Specially-Promoted Research
A global R&D program of a state-of-the-art detector system for ILC
Kick-Off Meeting 2011
12-14 September 2011, Sendai, Japan

- Home
- JSPS Research Program Home
- Program
- Registration
- Accommodation
- Venue
- Access
- Restaurants
- Hiraizumi Tour



Source: Sendai City, Tourism Section



The international linear collider (ILC) has far superior sensitivity for physics within its energy reach than the LHC that will provide a glimpse into the Terascale. The resolutions required for detectors at the ILC far exceed those of the LHC detectors and the detector R&Ds for the ILC have indeed been significantly raising the standard of the field in the recent past. In Japan, a large part of ILC detector R&Ds had been supported by a JSPS program which ended in March, 2011. Luckily, we have been awarded a new 5-year JSPS program - a grant-in-aid for specially promoted research '[A global R&D program of a state-of-the-art detector system for ILC](#)'. The goal of the program is to realize a detector system based on the so-called particle-flow algorithm which requires detector elements with

学術創成研究(2006-2010)の成果をもとに、ILCの物理と測定器R&Dのための特別推進研究(2011-2015)が採択された。
来週、東北大でkick-off meeting。

Venue: The main lecture room: Faculty of Pharmaceutical Sciences, Tohoku University.

<http://epx.phys.tohoku.ac.jp/Kickoff2011/>

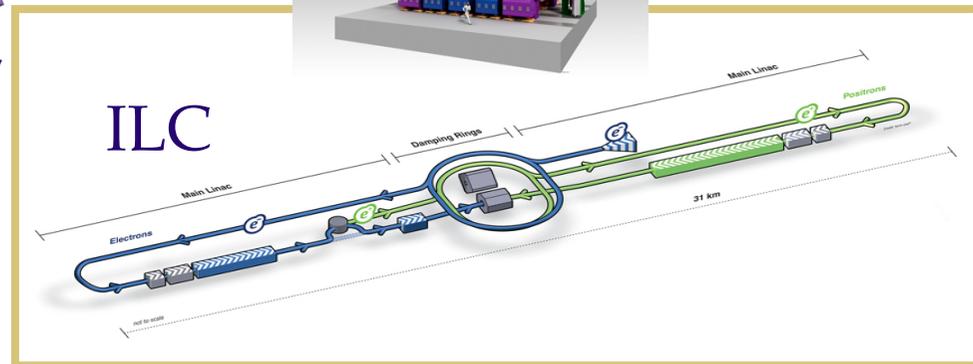


まとめ

- LHCで素粒子物理の革命が始まる
 - ヒッグス粒子: 質量起源
 - 超対称性: 暗黒物質
 - Any “SURPRISE” may still happen...

次のステップ
精密測定、物理構造解明

- LHCの成果でILCの指針が決まる
- 結果が確定するまで待つのではなく、あり得るシナリオに備えてILCの準備をしておく



- LHCをはるかにしのぐ感度で新しい物理の本質を解明

宇宙の創成・進化
の謎の究明

物質と力の究極像
の探究

国際リニアコライダー(ILC)



ニュートリノの
CP非対称の検証

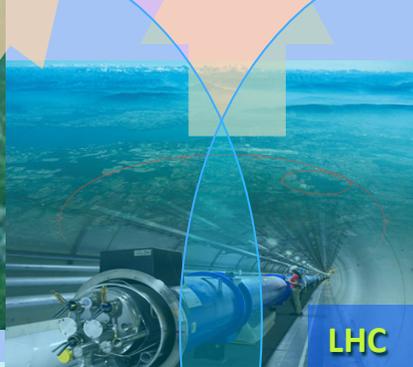
研究成果・技術開発・人材育成

小林・益川理論を超える
クォーク理論の探求

J-PARC/T2Kの増強



J-PARC



LHC



KEK-B

Super-KEKB

クォークの
CP非対称の検証



6つのクォークの探求

ニュートリノ
の謎の探求



「物質の源」

「力の源」

ヒッグス粒子「質量の源」



本日議論したいこと

- (LHCで軽いヒッグスが発見された場合)リニアコライダーの早期実現に向けて、高エネルギーコミュニティが結束できるか
 - 十分な物理的意義があるか
 - コストとマンパワーに見合った成果を期待できるか
 - 他の大規模プロジェクトのとの整合性

「学術研究の大型プロジェクトの推進について(審議のまとめ)」

(平成22年10月科学技術・学術審議会)

- まだ計画は十分に詰まっておらず、継続して研究者コミュニティや諸外国との慎重な協議が必要。
- LHCの成果等を踏まえつつ、Bファクトリー高度化の終了後の計画として位置づけるべき。
- 長期に及ぶ高額な計画であり、社会的理解が得られるか不明。
- 緊急性が明確でなく、関連コミュニティ及び社会や国民の理解が得られるよう努力が望まれる。

平成23年9月1日

文部科学省 研究振興局
基盤研究課 量子放射線研究推進室内閣府 政策統括官
(科学技術政策・イノベーション担当) 付
総 括 G

総合科学技術会議 有識者議員懇談会

日本国の正式な会議で初めて、
場所や政治にまで突っ込んだ議
論がなされた。

[http://www8.cao.go.jp/cstp/
gaiyo/yusikisha/20110901.html](http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/yusikisha/20110901.html)

国際リニアコライダー計画について

1. 国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) 計画とは

(1) 概要

直線の線形加速器(全長:約30km)で、電子と陽電子の衝突実験を実施する計画。これにより、質量の起源とされる「ヒッグス粒子」の性質の解明や「超対称性粒子」など未知の粒子が発見され、宇宙創成の謎の解明につながると期待されている。



(2) 意義

現在、欧州合同原子核研究機関(CERN)は、円形加速器(周長約27km)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を用いて「ヒッグス粒子」の発見等を目指す実験を行っているが、そこで「ヒッグス粒子」が発見されても、その性質を解明しなければ、標準理論が正しいことについての物理的な証明ができないため、ILCによる実験が必要。

(3) 概念設計書

- 2007年8月、研究者グループより概念設計書と建設コストが発表された。
- 建設コスト約66億ドル(当時のレートで約7,700億円。運営費・土地取得等の経費は別)、建設期間7年、実験期間20~30年、年間運転経費1.5~2.7億ドル(約180~320億円)、必要電力約23万kW。

(4) 位置づけ

- 内外で広く利用されている小型汎用加速器や国内でも数台しかない先端大型加速器を凌ぐ世界最先端の超大型加速器であり、現在考えられている加速器の中で、ビッグバン(宇宙の始まり)にもっとも近い状態(1兆分の1秒後)を再現できるもの。
- その成果は人類共通の財産となることが期待されるが、巨額の経費と長期間を要する計画であるため、1カ国だけでは実施できない計画であり、国際協力によって進めていくことが必要。

2. 国際リニアコライダー計画をめぐる動向

(1) 研究者レベルでの国際的な設計活動の状況

- 2007年に概念設計書が発表されて以来、各国の研究者レベルで技術的な詳細設計活動を実施中。2012年末の技術設計レポート完成を目指している（日本を含め、各国ともに政府レベルでの検討は行われていない状況）。
- ILC の心臓部といえる超伝導加速空洞（右図）の歩留まり向上技術が課題。



(2) 日本

- 高エネルギー加速器研究機構（KEK）の研究者等が自主的な取組により、高品質なビームの発生技術等の要素技術の研究開発を実施。
- 平成22年10月に取りまとめられた「学術研究の大型プロジェクトの推進について（審議のまとめ）」（科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会）において、以下の課題が示された。
 - ・ まだ計画は十分に詰まっておらず、継続して研究者コミュニティや諸外国の関係者との慎重な協議が必要。
 - ・ LHC の成果等を踏まえつつ、B ファクトリー高度化の終了後の計画として位置づけるべき。
 - ・ 長期に及ぶ高額な計画であり、社会的理解が得られるか不明。
 - ・ 緊急性が明確でなく、関連コミュニティ及び社会や国民のさらなる理解が得られるよう努力が望まれる。

(3) 欧州

- CERN は、2012年末までの LHC 実験の成果や、ILC 関連の要素技術開発の状況を見極めた上で次の計画を検討するとの立場。
- LHC 実験の後継としては、ILC 以外にも LHC の高度化や CLIC 計画もあり、次にどの計画を推進するかは未定。

(4) 米国

- ILC 計画については、CERN の LHC 計画の実験結果を見極めて必要性を評価するとのスタンス。
- ただし、ILC 計画も含め、将来の加速器施設に必要な要素技術の研究開発は着実に実施。

(参考)

国際リニアコライダーをめぐる様々な動き

1. 誘致を目指す動き

- 岩手県
東日本大震災復興構想会議において、岩手県達増知事より、「TOHOKU国際科学技術研究特区」による東北の復興が提案されている同特区において、国際リニアコライダーを誘致し、国際素粒子・エネルギー研究所を国家プロジェクトとして創設するとしている。岩手県は東北加速器基礎科学研究会による要望活動も積極的に実施。
- 福岡県・佐賀県
先端基礎科学次世代加速器研究会を中心に誘致活動を実施。

2. 国会、党、産業界等の動き

- 衆・内閣委員会（7月29日、（民主）階猛議員）、参・外交防衛委員会（8月9日、（公明）山本香苗議員）等で積極的な取組を求める議論がなされた。
- 民主党科学技術イノベーション推進調査会（会長：川端達夫議員）の「科学技術イノベーション政策の基本的な推進方針」中間とりまとめ（平成23年7月5日）に「TOHOKU国際科学技術研究特区構想（国際リニアコライダー等）の実現に向け一層努力する」との提言。
- 自由民主党科学技術創造立国調査会、宇宙・海洋開発特別委員会合同会議において、国際リニアコライダー計画の日本への誘致の推進について決議（平成23年8月26日）。
- 超党派の議員により「リニアコライダー（先端線形加速器）国際研究所建設推進議員連盟」設立（平成20年7月）。
- 産学により「先端加速器科学技術推進協議会」設立（平成20年6月）。