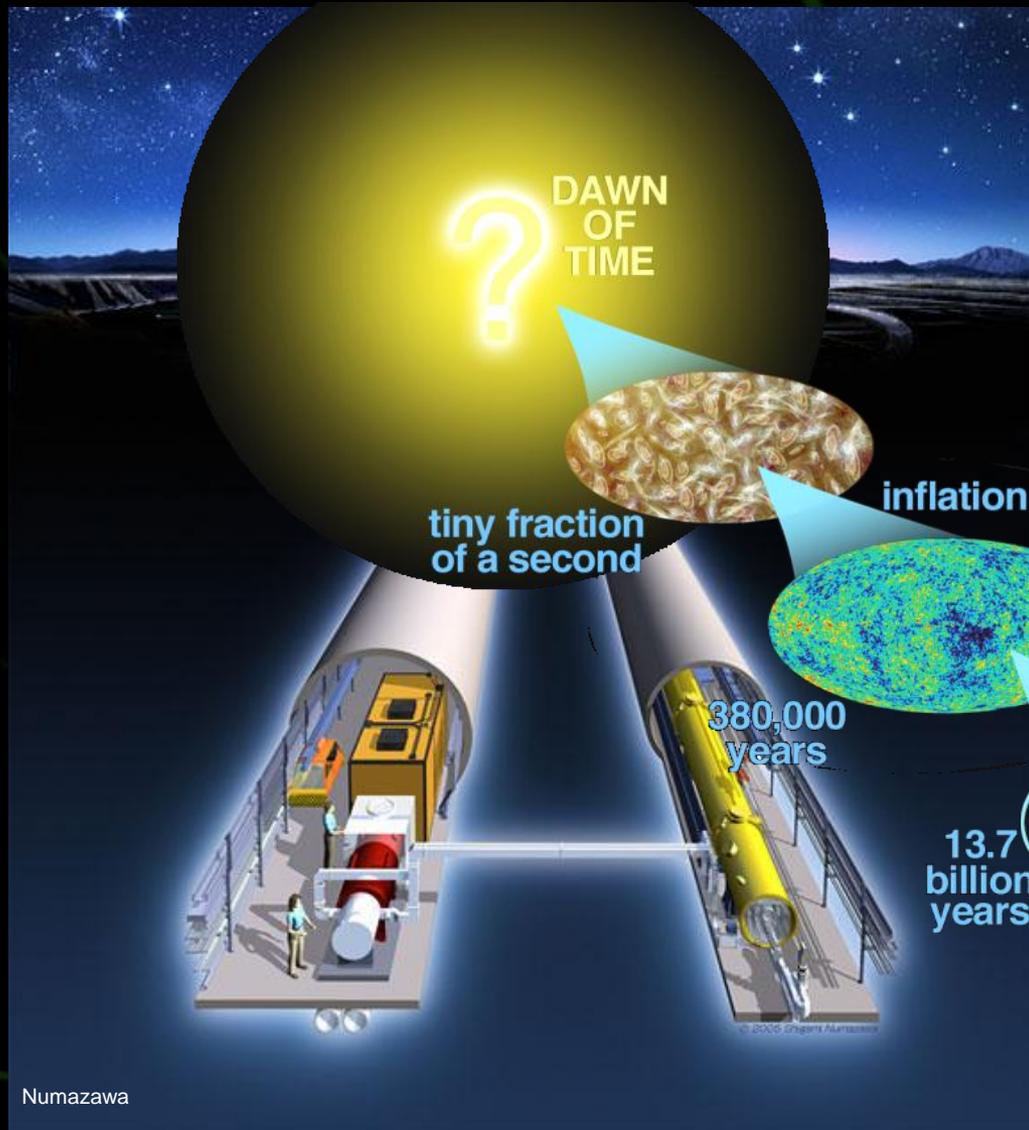


-- ILCタスクフォースセミナー --

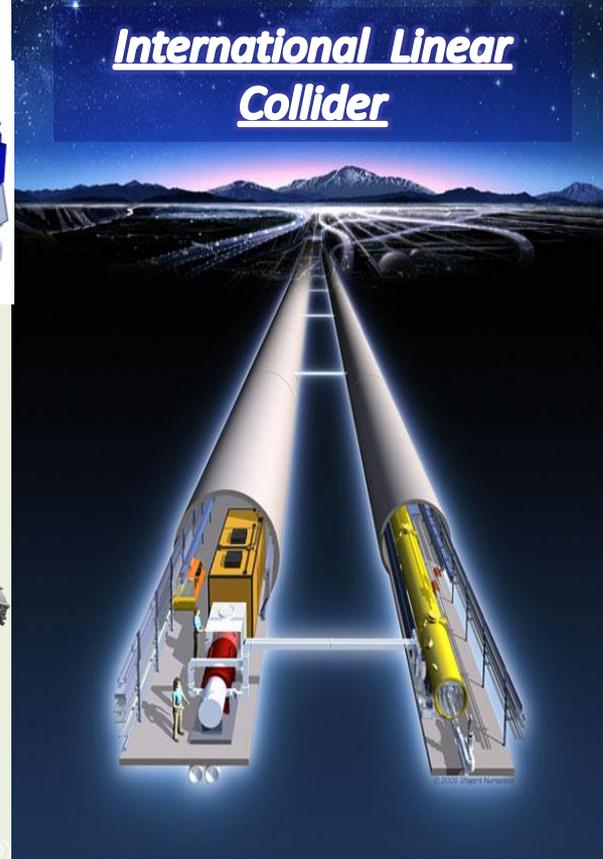
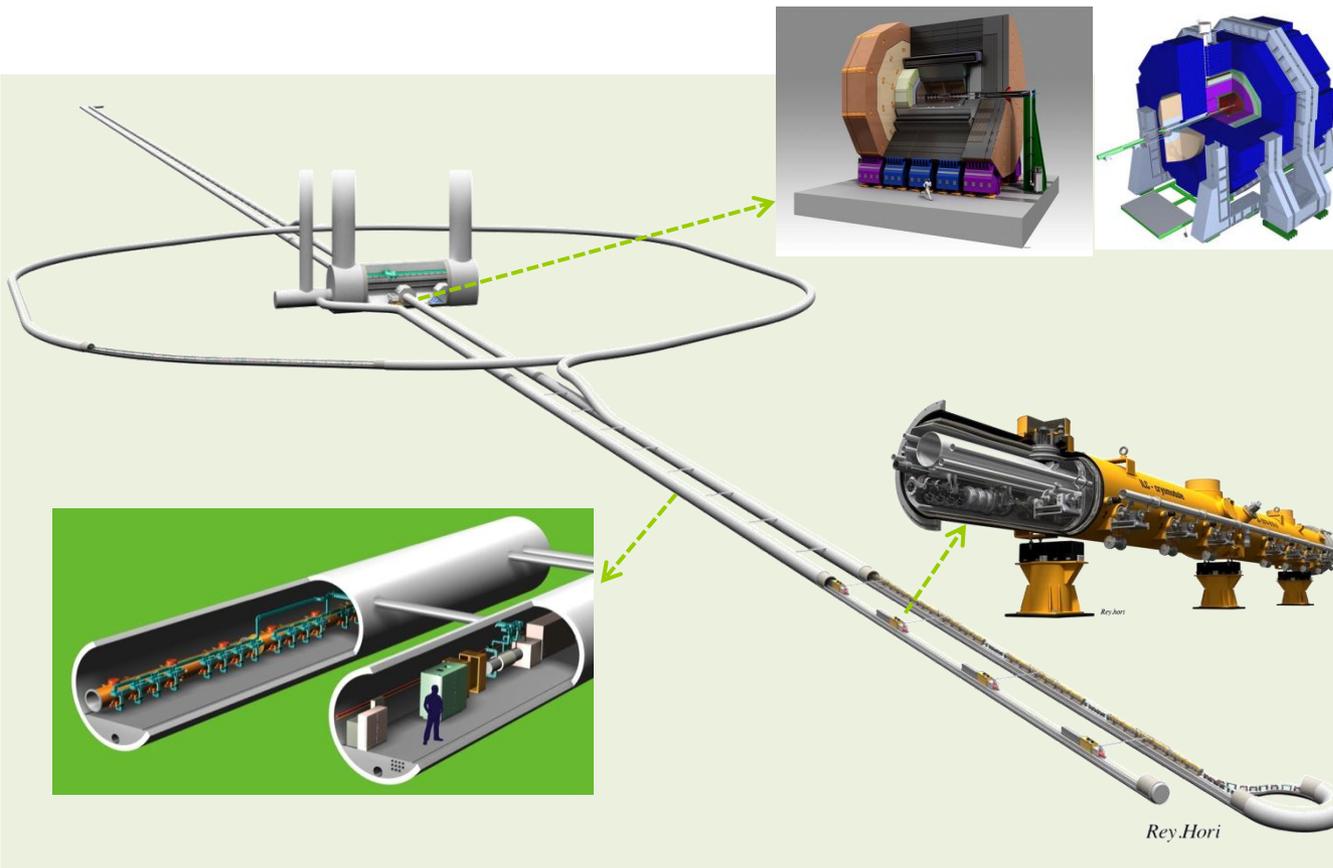
宇宙創成の謎に迫る国際リニアコライダー

2012/02/28 京都大学

1. ILCの物理と準備状況
川越清以(九州大学)
2. ILC加速器
山本 明(KEK)
3. ILC測定器
石川明正(東北大学)



International Linear Collider

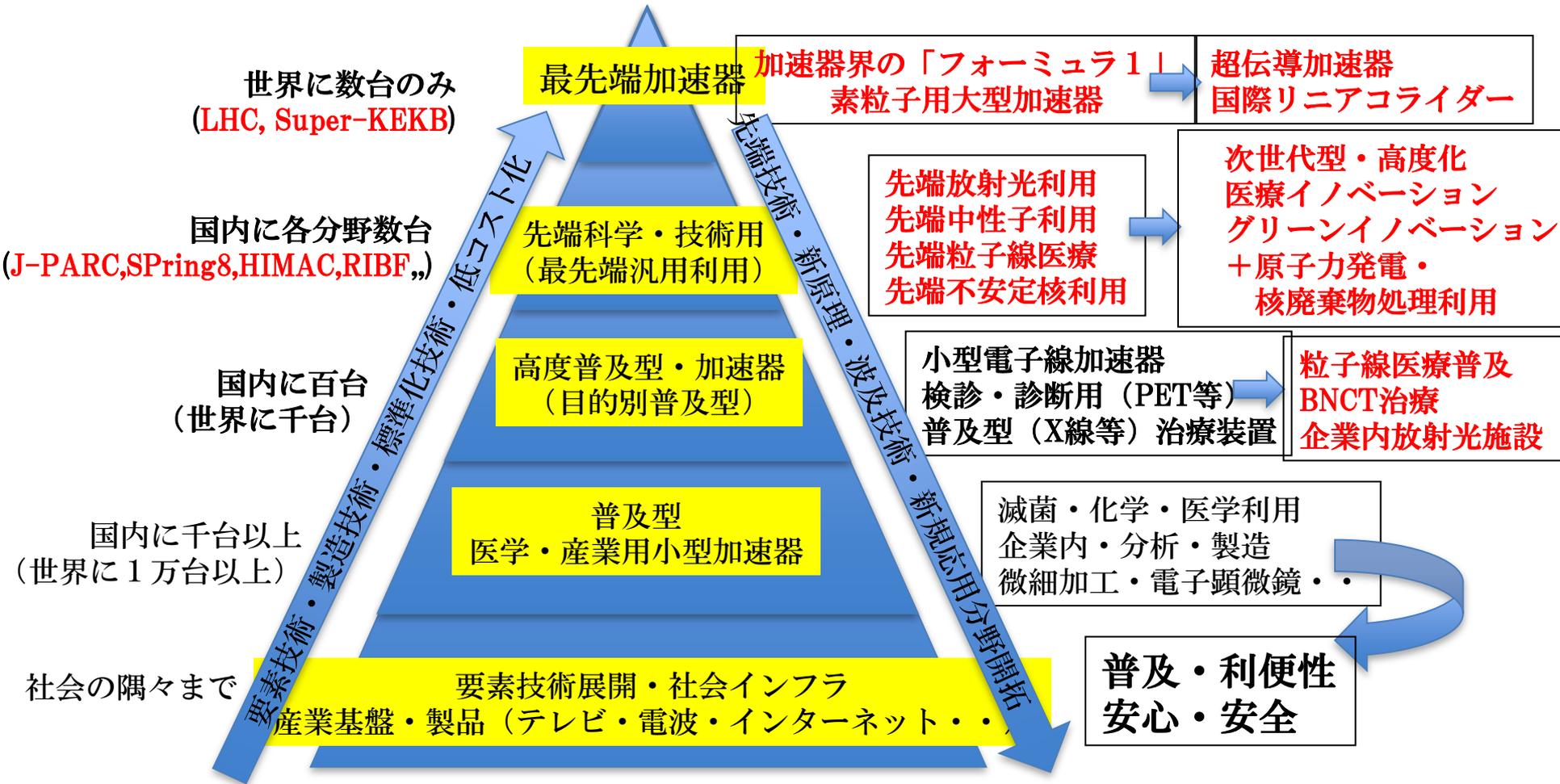


ILCの物理と準備状況

川越清以(九州大学)

@京都大学、February 28, 2012

「加速器」ピラミッド



世界の加速器の進展と 5大加速器研究所

世界最高エネルギー・最高強度の電子・陽電子コライダー
国際協力で建設を計画中

リニアコライダーILC

2009 LHC

CERN@ジュネーブ

LHC
最高エネルギー

FNAL@シカゴ

Booster

TEVATRON 終了
2010秋
超伝導加速器開発
大強度陽子、他へ

HERA(電子・陽子)終了
>> 放射光施設へ
超伝導加速器

K. Kawagoe, Physics at the ILC

KEK@つくば・東海村 (JAEAと共同)

KEKB, J-PARC
強度フロンティア
超伝導加速器開発

1989

SLAC

HERA

1987

トリフ

バトロン

SLAC@スタンフォード

PEP-II(B-Factory)終了
>> 放射光施設へ

国際リニアコライダー(ILC)

- 最高エネルギー・最高強度の電子陽電子コライダー
国際チーム(GDE)による開発・設計が進行中
- 2012年末に工学設計書(TDR)完成
 - 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
- 背振山地と北上山地が有力候補地

静電型加速器

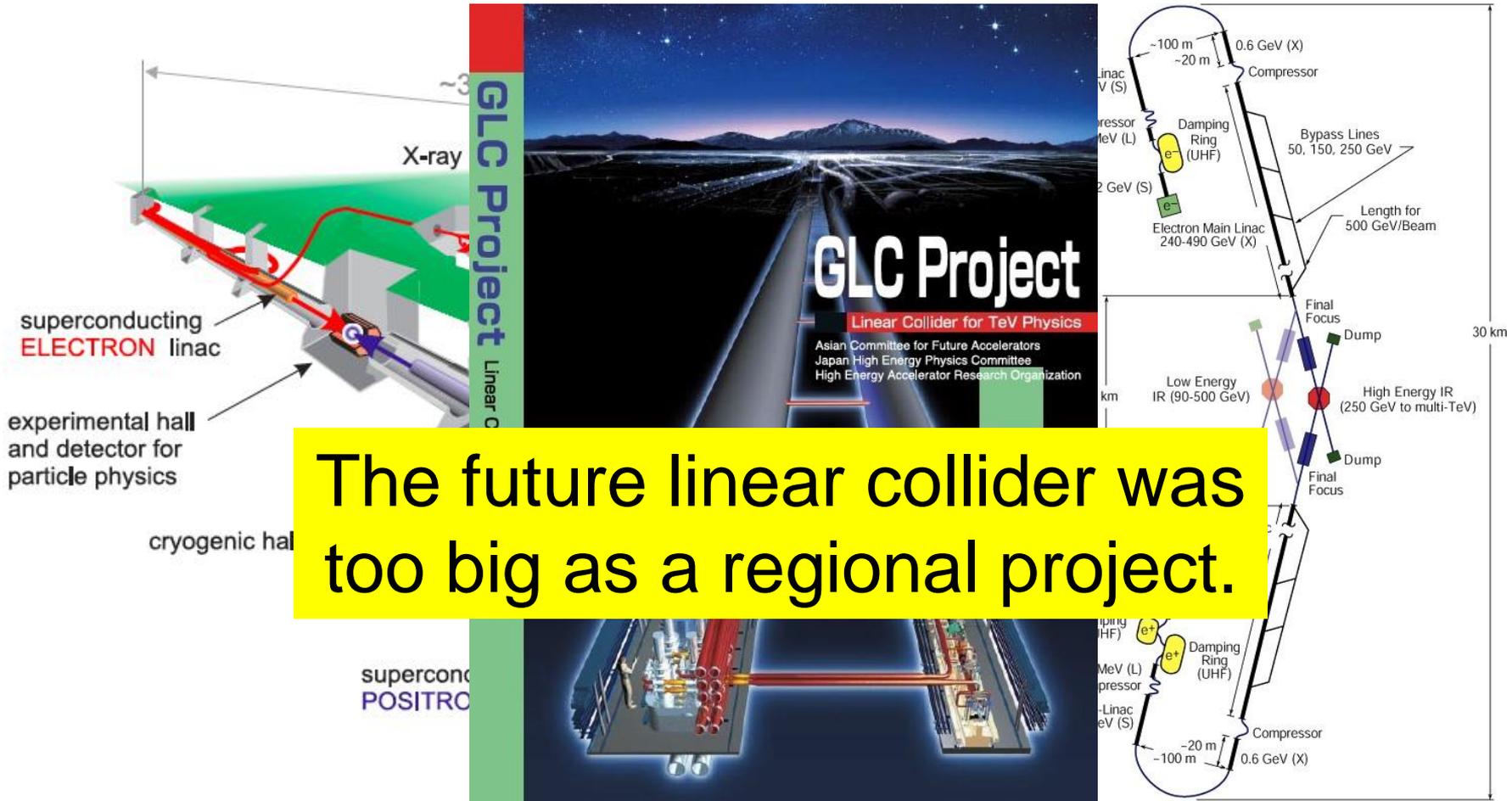
2012/02/28

PETRA

Chicago
↓

ILCに至るまでの歴史

R&D studies of linear colliders started in 1980's in three regions:
Asia, Europe, and North America



The future linear collider was too big as a regional project.

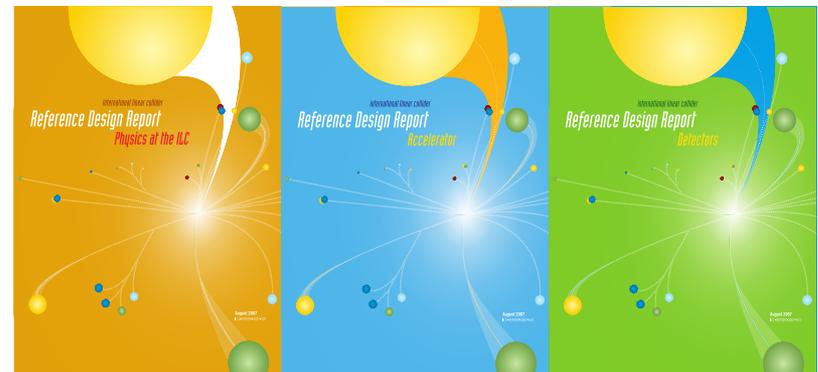
TESLA in Europe

GLC in Asia

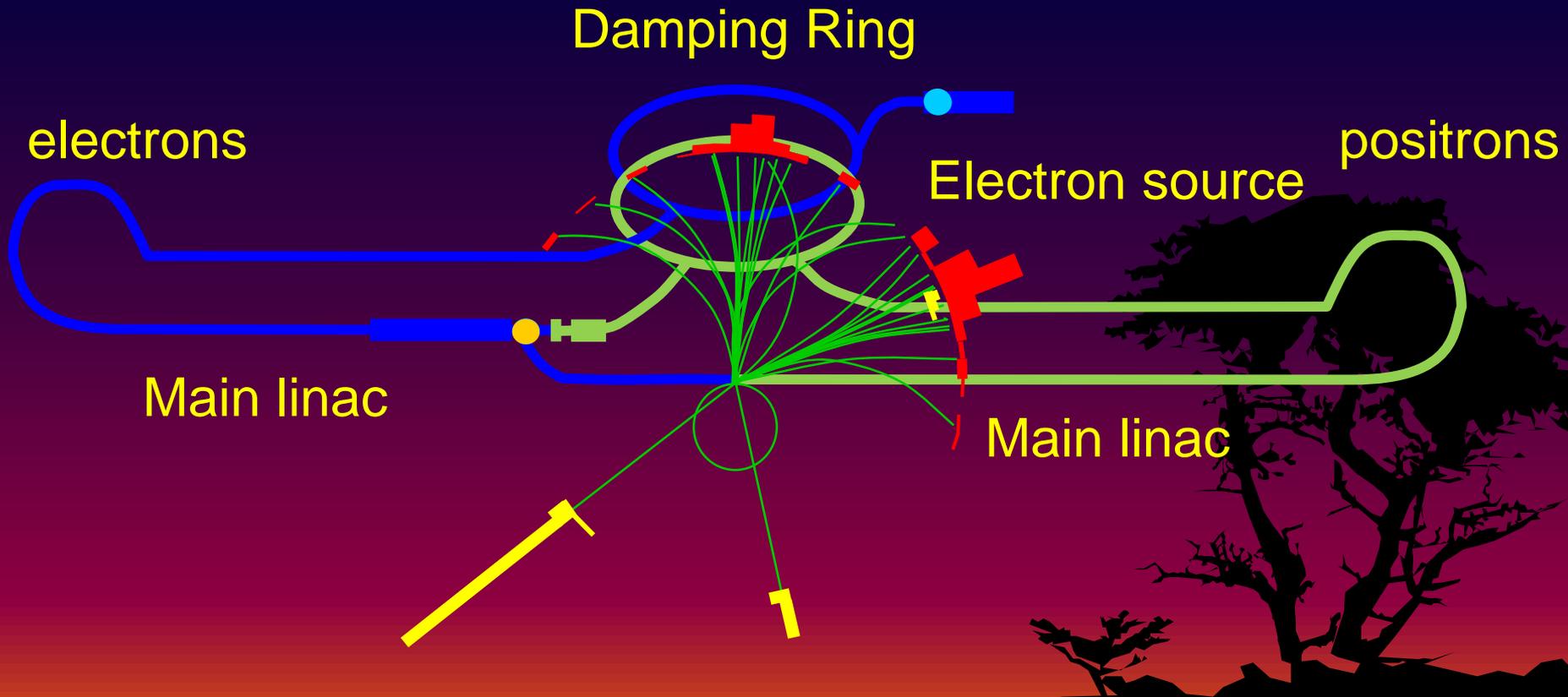
NLC in North America

ILC:真の国際プロジェクト

- 2004: The cold technology was chosen for the ILC by ITRP (International technology Recommendation Panel).
- 2005: GDE (Global Design Effort) organized for the accelerator design.
- 2007: RDR (Reference Design Report) published.
- 2012: TDR (Technical Design Report) to be completed.
- 2013: A new organization after GDE, site-selection, ...



Operation of the ILC accelerator

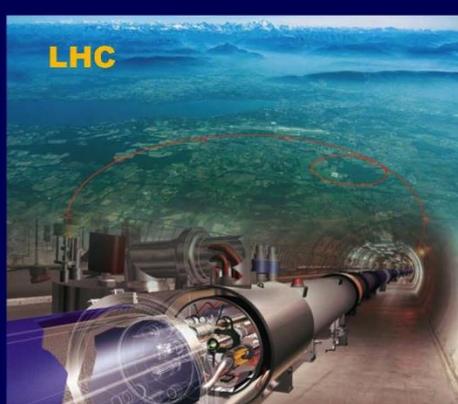


Animation by T. Takahashi (Hiroshima)

2012/02/28

なぜILCが必要か？

まずは陽子，次に電子



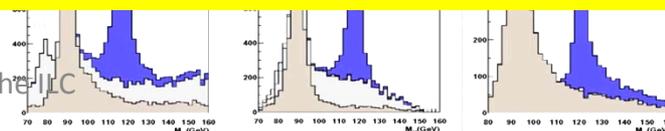
- ILCのクリーンな環境で、LHCで発見された新粒子を調べ尽くす。
 - 質量は？ スピンは？ 結合定数は？
 - 背後にある対称性や原理を探る
 - 未知の粒子に対する情報を得る
 - TeVの物理の全貌を明らかにするためには次に何が必要かを決める。

2012/02/28

Make up the road

A. Suzuki

K. Kawagoe: Physics at the ILC



素粒子物理学とは

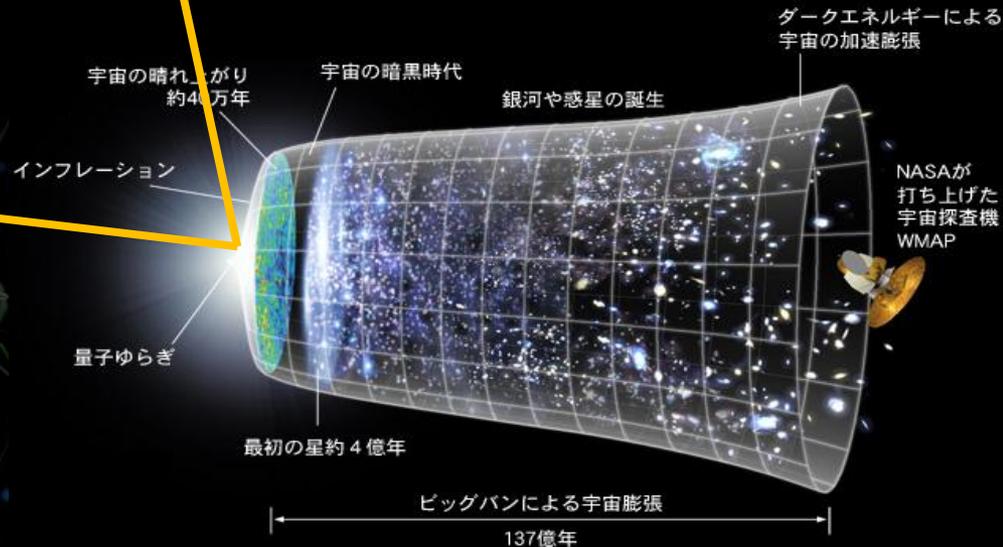
物質粒子	第1世代	第2世代	第3世代	ゲージ粒子
クォーク	アップ u	チャーム c	トップ t	強い力 グルーオン g
	ダウン d	ストレンジ s	ボトム b	
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	
				弱い力 W^+ W^- Z W ボゾン Z ボゾン

ヒッグス場に伴う粒子
(未発見)



物質の根源を探る

宇宙の始まりを探る



標準理論の成り立ち

ゲージ相互作用

ゲージ粒子

強い力	
	g
グルーオン	
電磁力	
	γ
光子	
弱い力	
	W^+
	W^-
	Z
W ボゾン Z ボゾン	

物質

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μ ニュートリノ	 τ ニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

湯川力



ヒッグス

標準理論の闇

ゲージ相互作用

物質



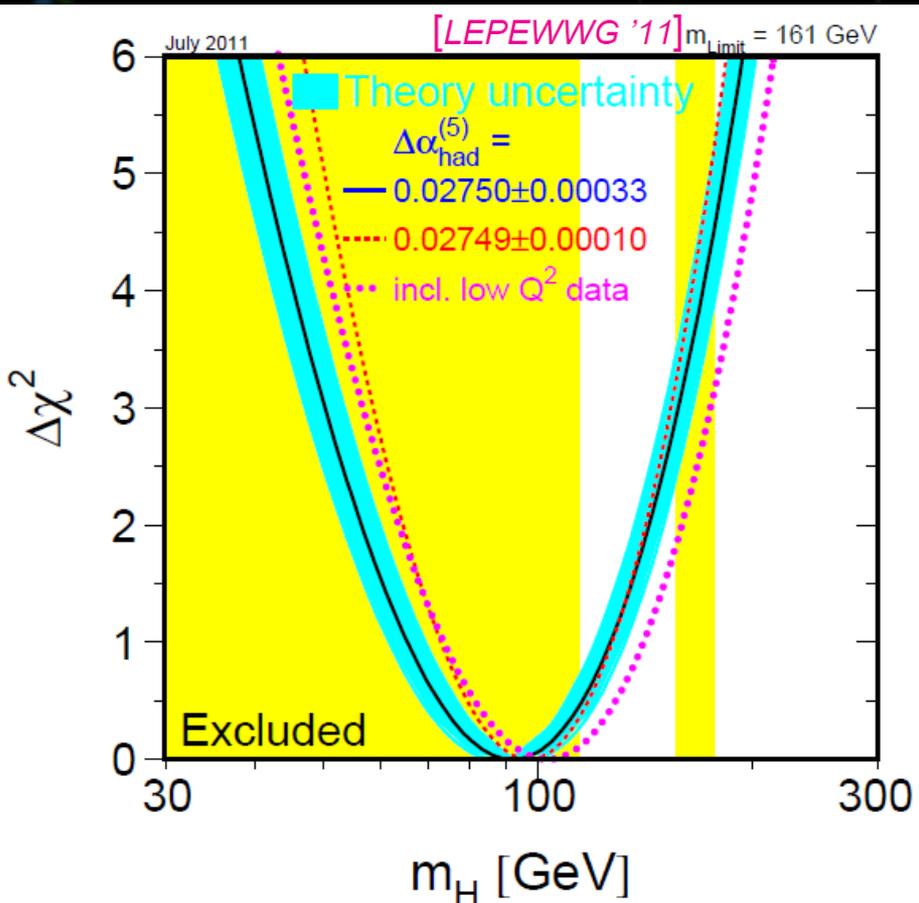
湯川カ

この部分はほとんど検証されていない

ヒッグス

ヒッグス粒子の探索(LHC以前)

この部分を使って
ある程度の予測はつく
W粒子, トップクォークの質量, , ,



標準理論は
161GeV以下を示唆
過去の直接探索
LEP: 114GeV以上
Tevatron: 160 GeV付近を排除

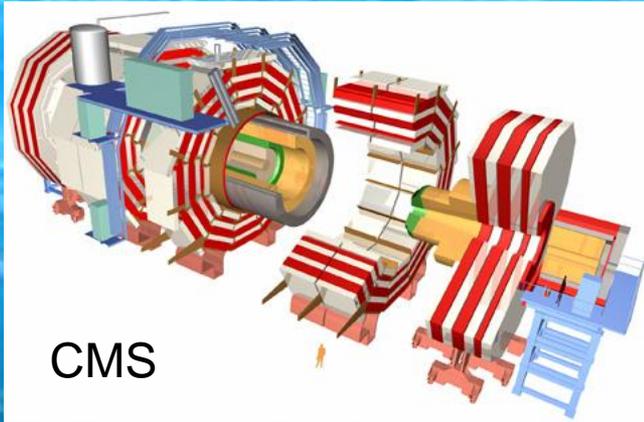
LHCでの新粒子発見可能性 (Table at the end of 2010)

Case	Light Higgs	Heavy Higgs	No Higgs	Other New Particles
1	Y			Y
2		Y		N
3			Y	Y
4	Y			N
5		Y		Y
6			Y	N

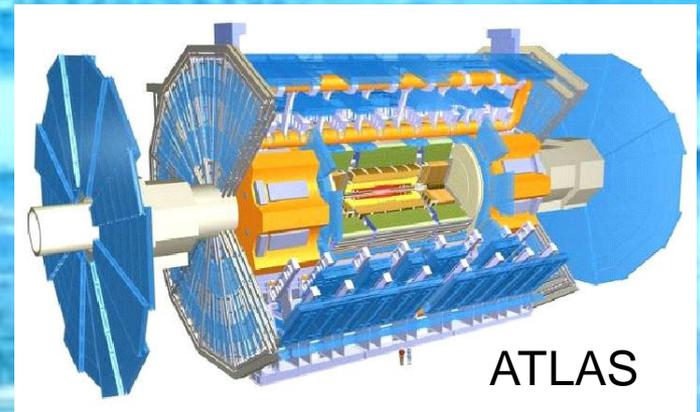
- Light Higgs ($M_H < 161$ GeV) is consistent with the electroweak measurements at LEP.
- Heavy Higgs ($M_H > 161$ GeV) is inconsistent with the electroweak measurements at LEP.

LHCの結果がILCの物理シナリオに大きな影響を与える。

Higgs Searches at the LHC



CMS

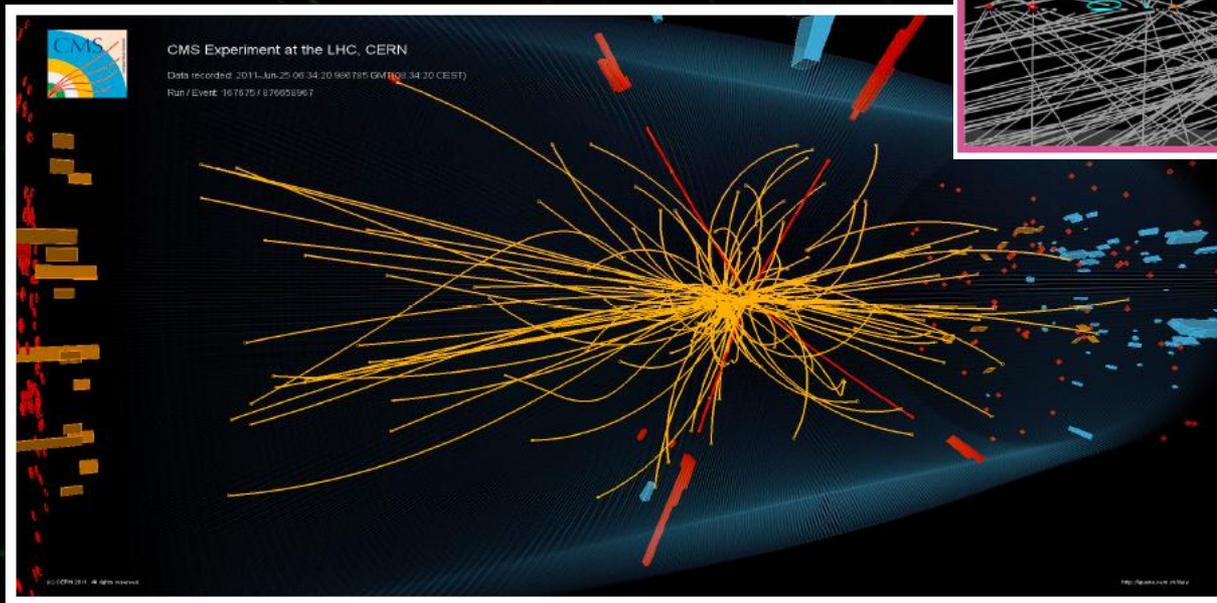
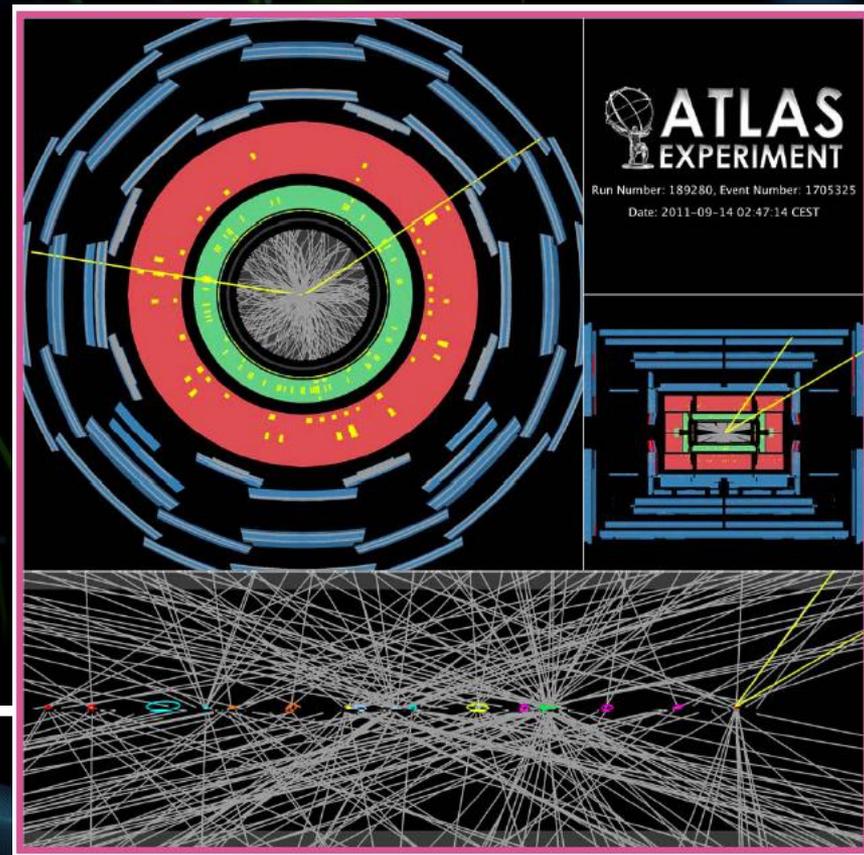
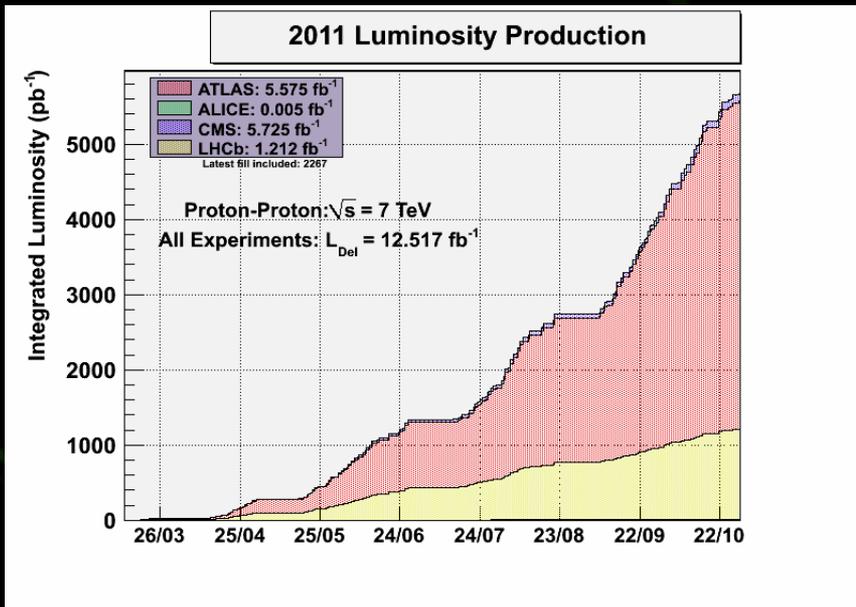


ATLAS



LHC

CERN@Geneva

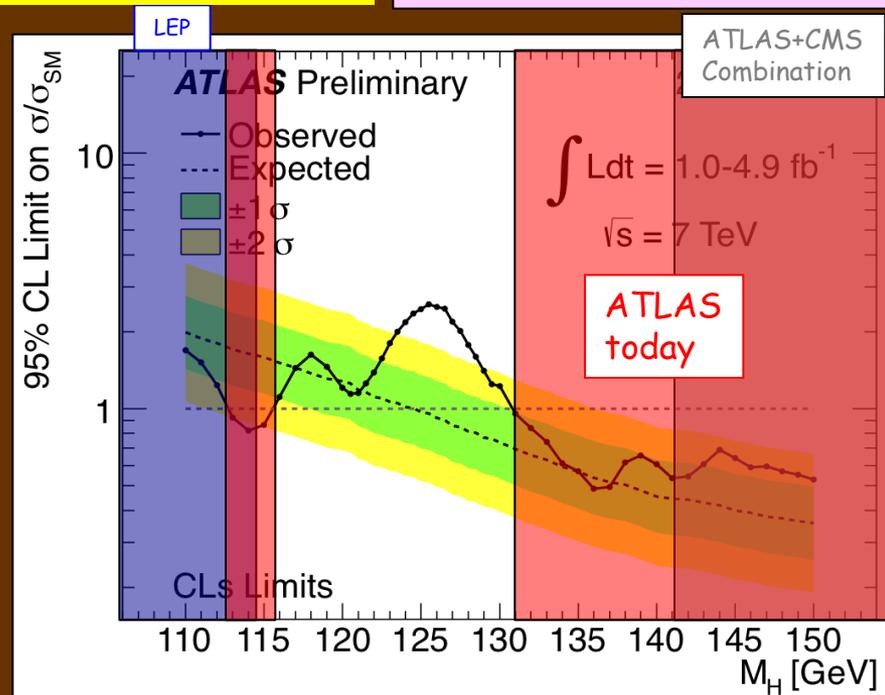
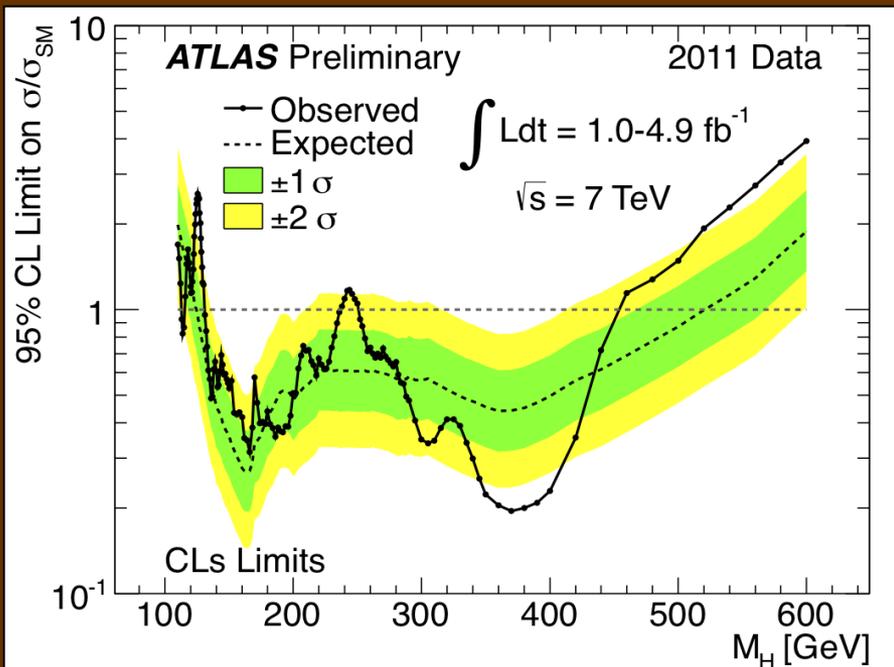


LHC加速器と ATLAS/CMS実験

Putting all channels together → combined constraints

$H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow \tau\tau$
 $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$
 $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l, H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow llqq, H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$
 $W/ZH \rightarrow lbb+X$ not included

ATLASの全チャンネルを合わせたリミット。かなり絞られてきた。



Excluded at 95% CL

$112.7 < m_H < 115.5 \text{ GeV}$
 $131 < m_H < 453 \text{ GeV, except } 237\text{-}251 \text{ GeV}$

Expected if no signal

$124.6\text{-}520 \text{ GeV}$

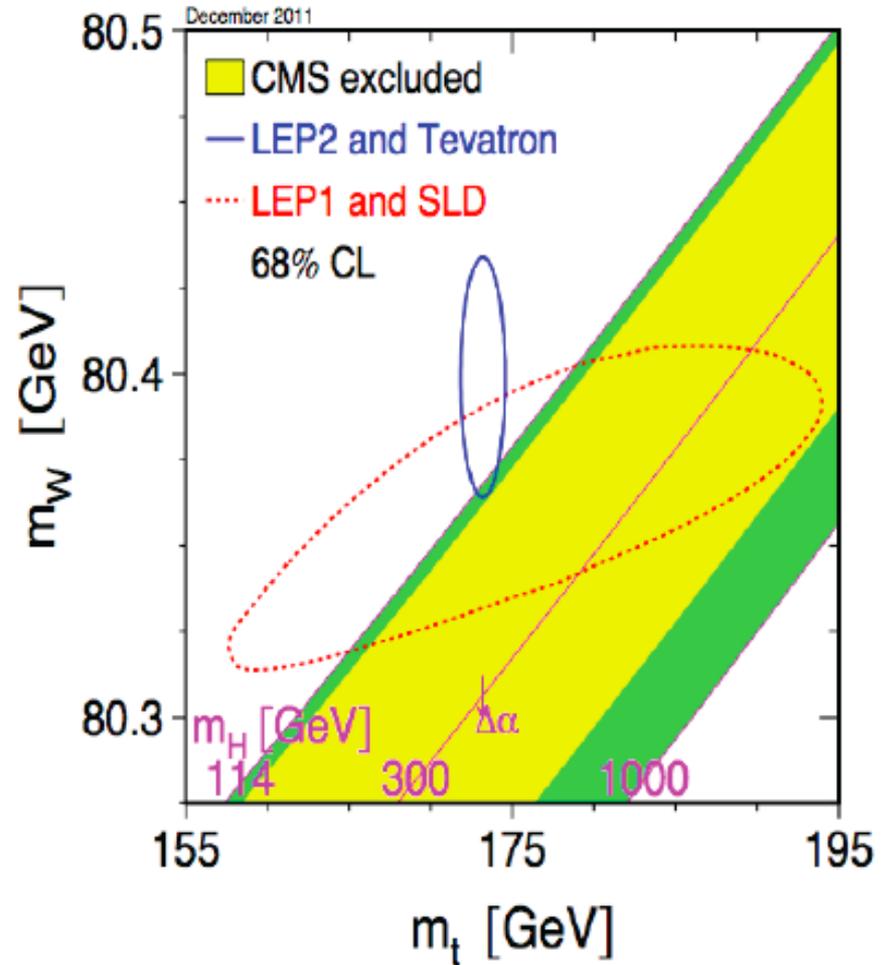
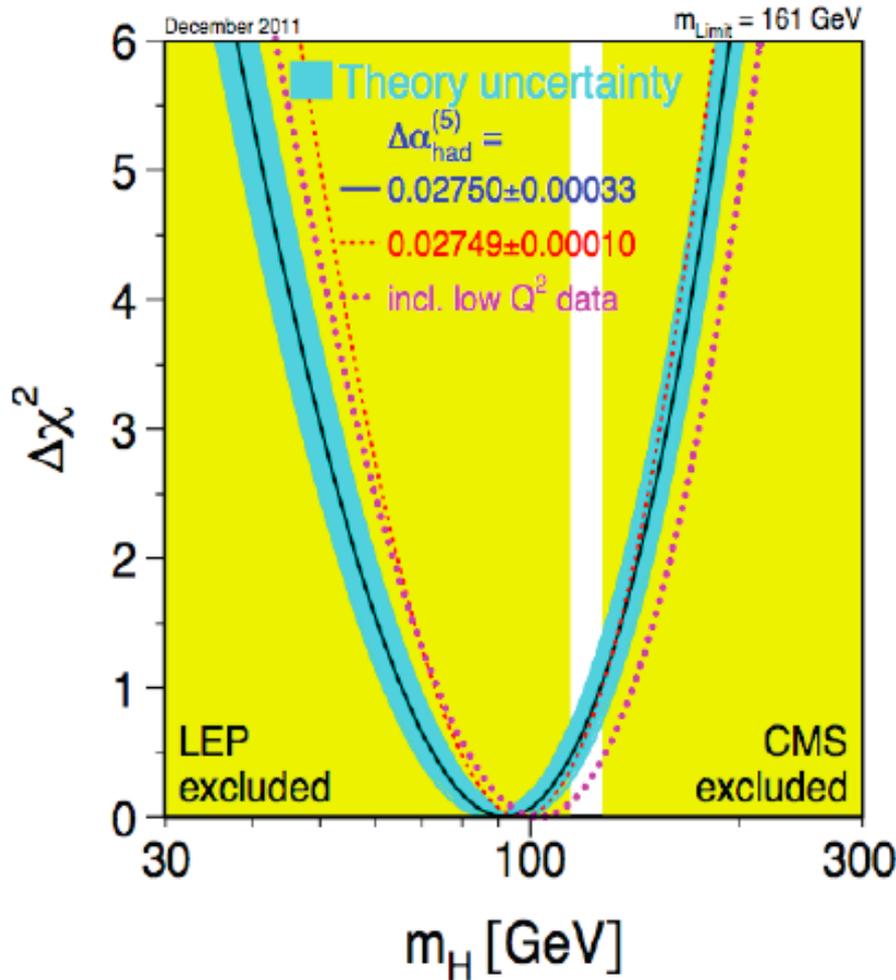
Excluded at 99% CL

$133 < m_H < 230 \text{ GeV, } 260 < m_H < 437 \text{ GeV}$

F. Gianotti
2011/12/13



Freshly squeezed EWK plots



LHCでの新粒子の発見可能性

(My personal view as of February 2012)

Case	Light Higgs	Heavy Higgs	No Higgs	Other New Particles
1	Y			Y
2		Y		N
3			Y	Y
4	Y			N
5		Y		Y
6			Y	N

In 2012, a center-of-mass energy of 8 TeV, and 15 fb⁻¹/experiment are expected at the LHC.

A light “Higgs” may be discovered at the LHC (cases 1 and 4).

We still have a significant chance for the scenario 1 (the best case for the ILC),

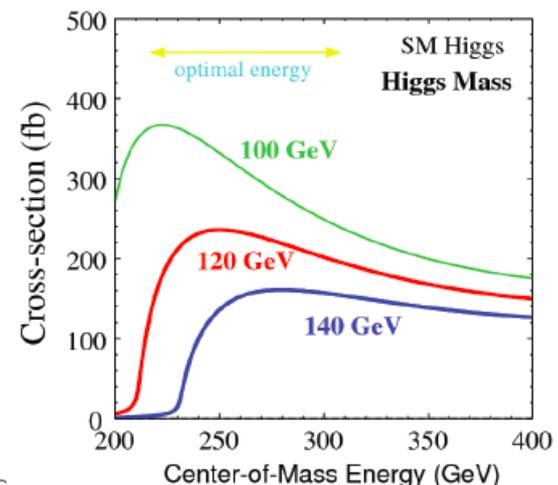
In either case, the ILC should be naturally started as “**The Higgs Factory**”.

LHCでのヒッグス粒子探索

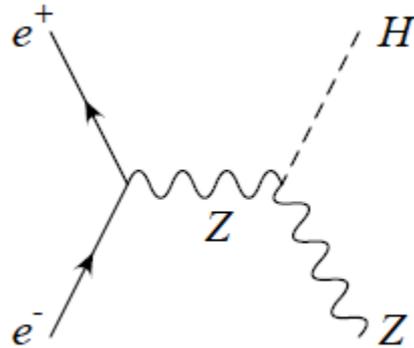
- 2012年(今年!)末までに取得するデータで
 - 標準理論ヒッグスが存在するなら、発見可能(ノーベル賞級の大発見)。
 - どうも軽いところにあるようだ。
 - 見つからなくても、大発見(標準理論を超える物理が必ずある)。
- **LHCの結果がILC計画に大きく影響する**
 - 対象とする物理と初期エネルギーが、より明確になる。
 - 今年末までに、じわじわとシナリオが絞られていく。
 - 次ページ以降は「軽いヒッグス発見」の場合を想定

「ヒッグス工場」としてのILC

- 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
- 標準理論ヒッグスか否か:「ヒッグス」は未知の新粒子
 - $E_{\text{CM}} \sim M_{\text{H}} + 120 \text{ GeV} (\sim 250 \text{ GeV}?)$ 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

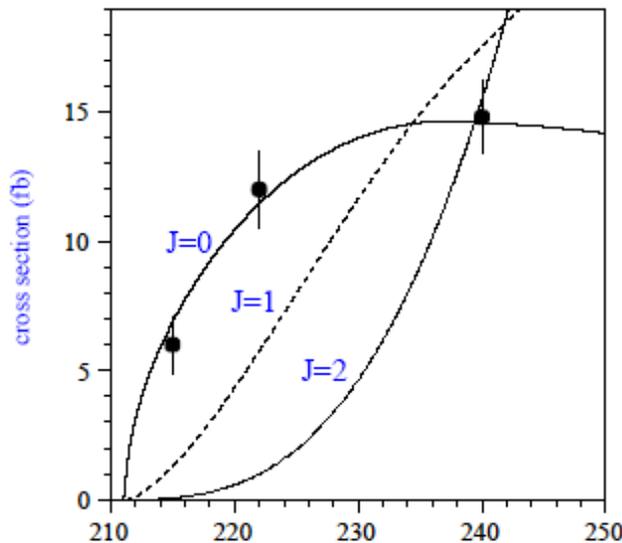


ヒッグスの質量、生成断面積、スピン

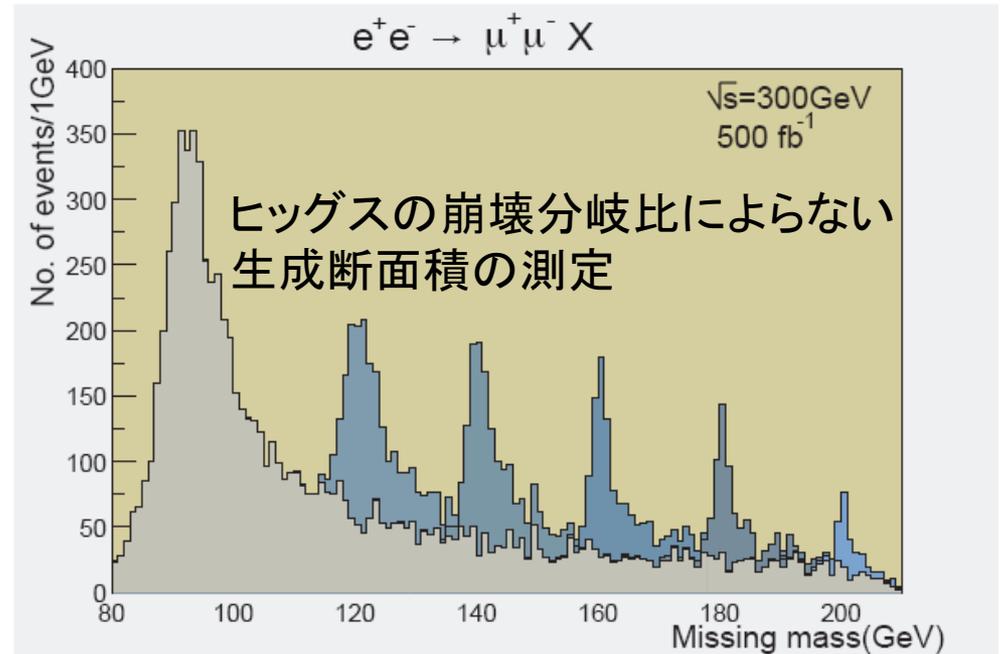


$ee \rightarrow HZ$ 過程でヒッグス粒子を大量生産し
ヒッグス粒子の性質を精密に決める。
最も生成断面積が大きくなるのは
 $M_H + 130 \text{ GeV}$ ぐらい。

スピンの決定



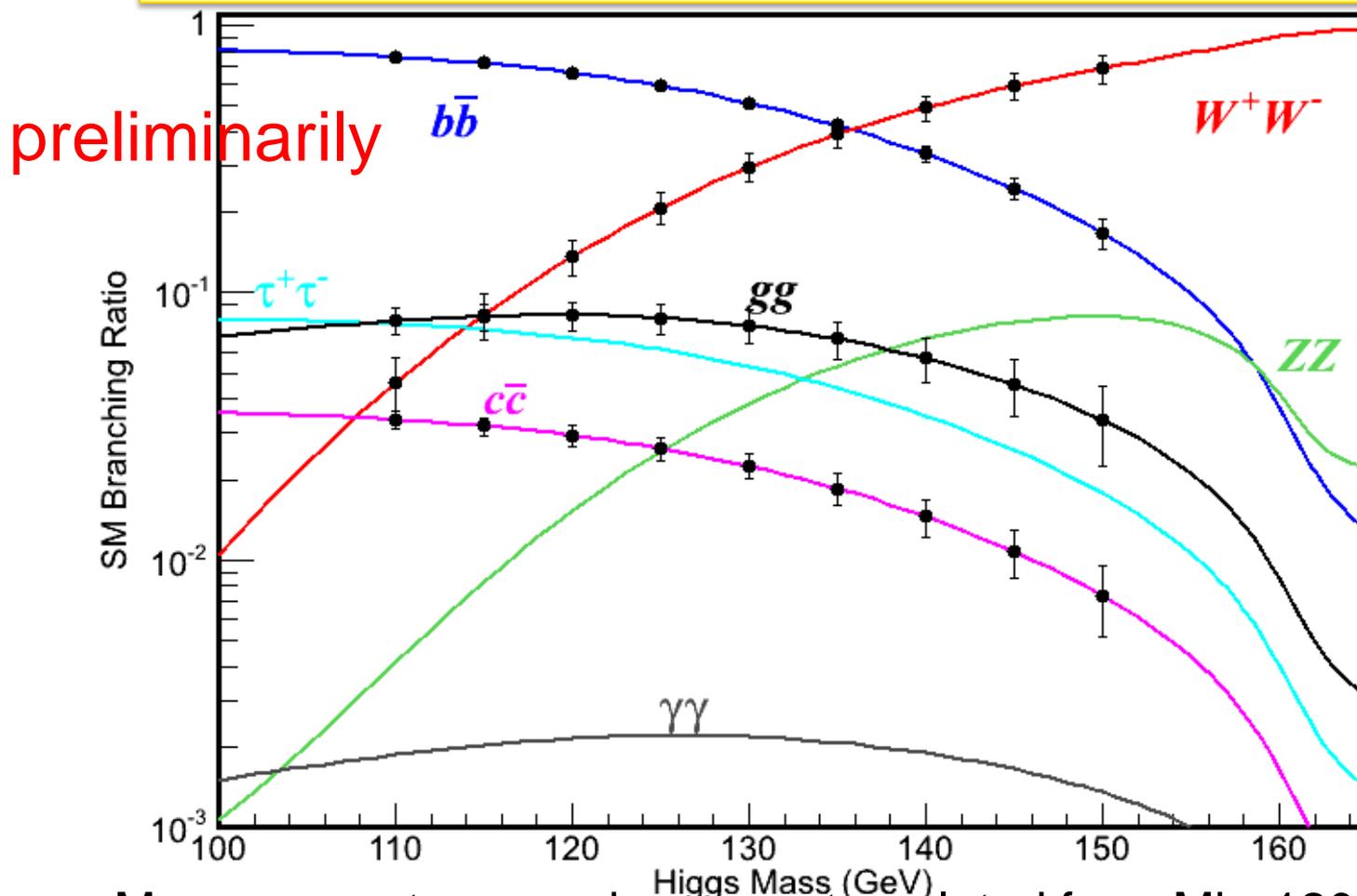
TESLA TDR 2001



GLC project 2003

ヒッグス粒子の崩壊分岐比の精密測定

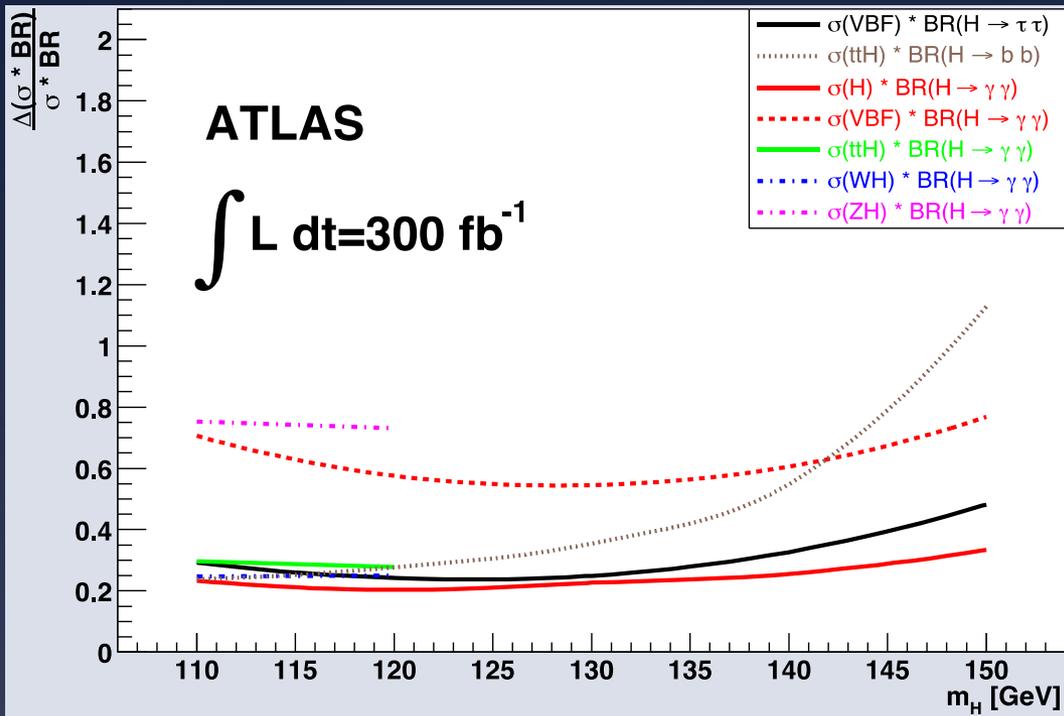
$E_{cm}=250 \text{ GeV}$, $L=250 \text{ fb}^{-1}$, Beam pol(e^+, e^-)=(+30%, -80%)



H. Ono

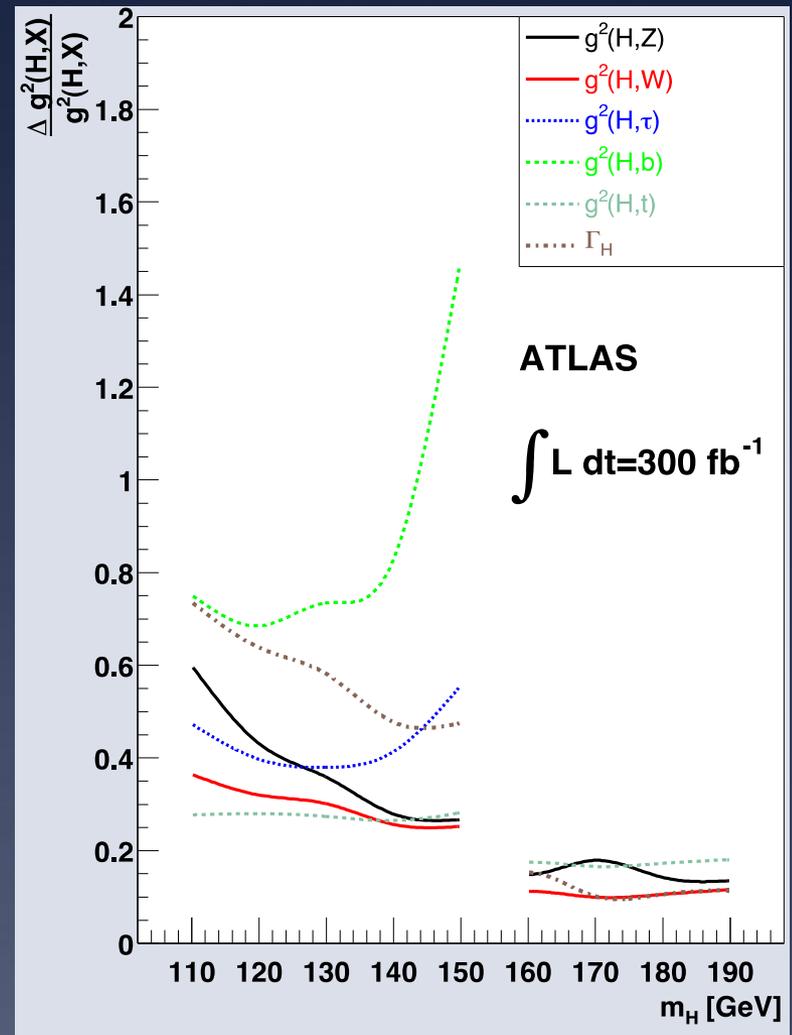
Measurement accuracies are extrapolated from $M_h=120 \text{ GeV}$

LHCでのヒッグス粒子の測定精度は？



M. Dührssen (2003)

Error of (cross section x BR) > 20%
 Error of coupling constants > 30%
 (for $m_H = 120 \text{ GeV}$, 14 TeV , 300 fb^{-1})

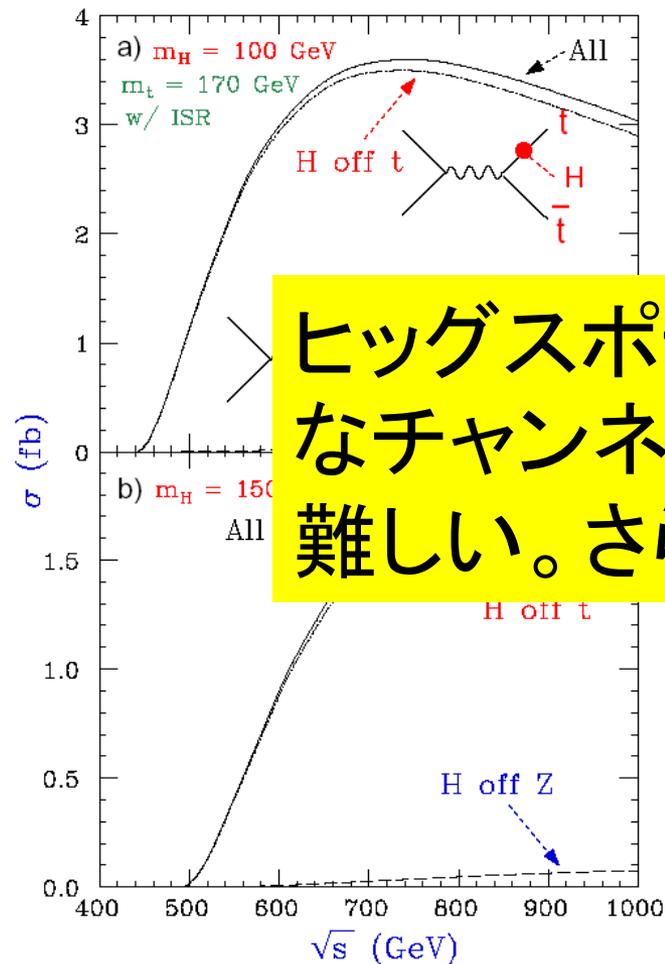


トップ湯川結合とヒッグス自己相互作用

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

D.Harada

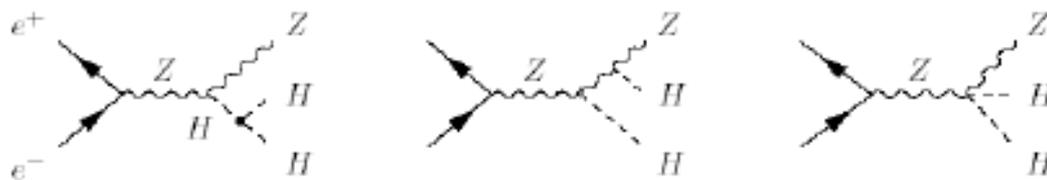
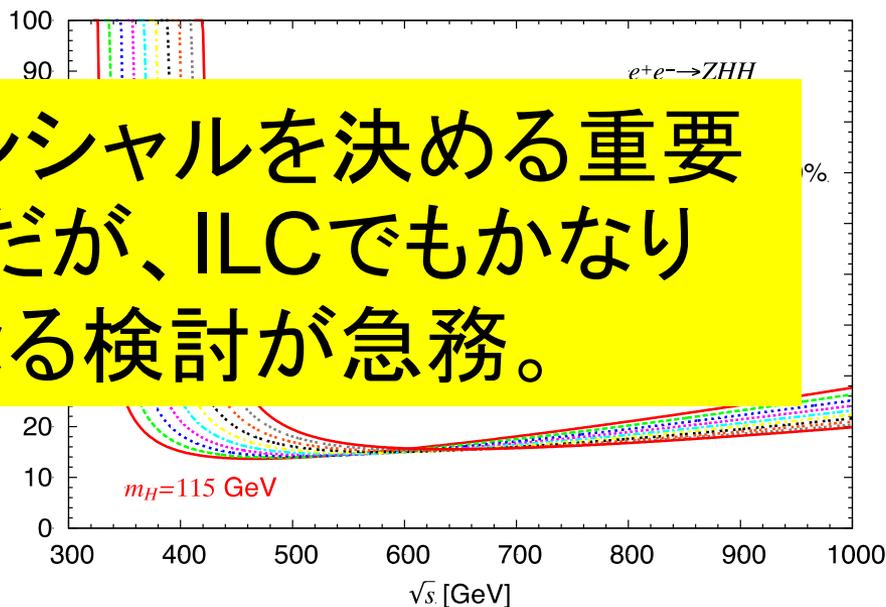
理論計算のみの評価

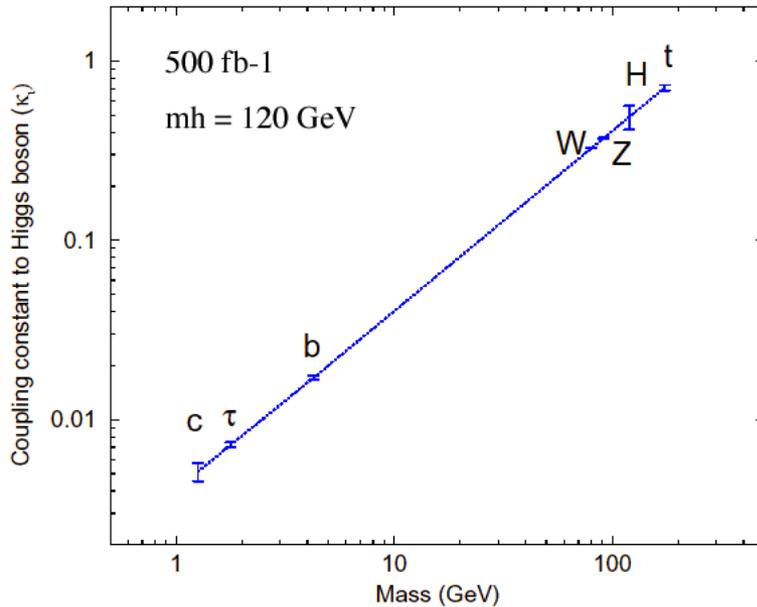


$$\lambda_{hhh} = \lambda_{hhh}^{SM} (1 + \delta\kappa)$$

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

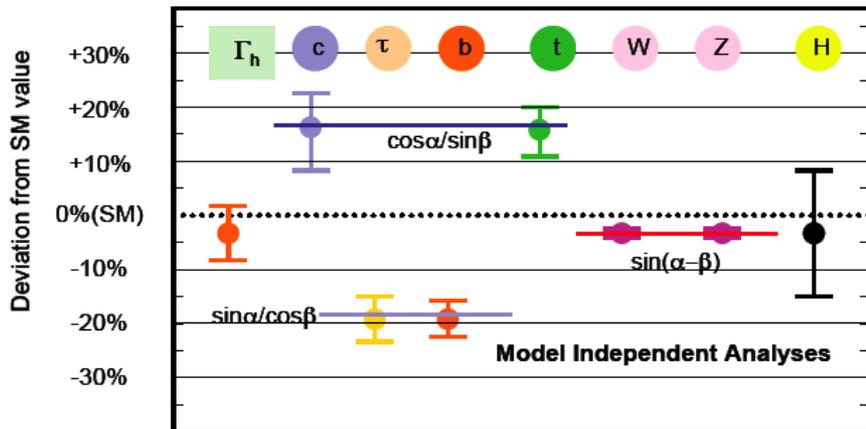
ヒッグスポテンシャルを決める重要なチャンネルだが、ILCでもかなり難しい。さらなる検討が急務。



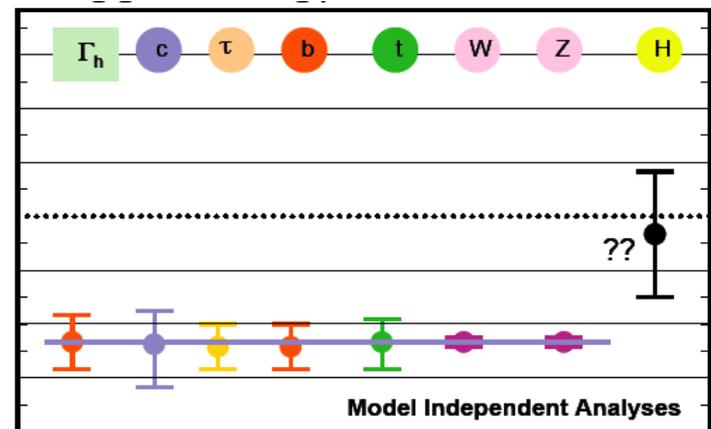


生成断面積および崩壊分岐比の測定によりヒッグス粒子とクォーク、レプトン、ゲージ粒子との結合定数を精密に決める。O(1)%レベルで決めることができる。

SMでは結合定数 \propto 質量
SMからのずれで新物理を探る

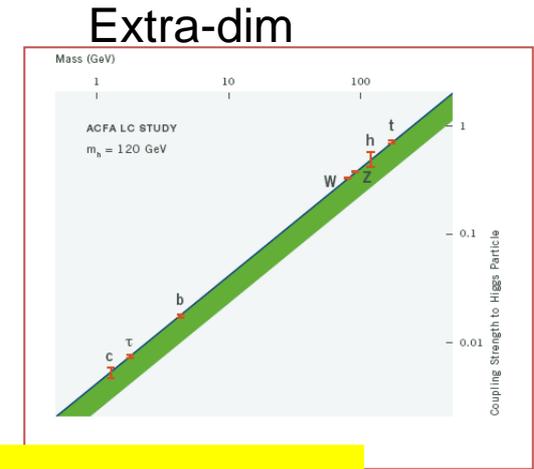
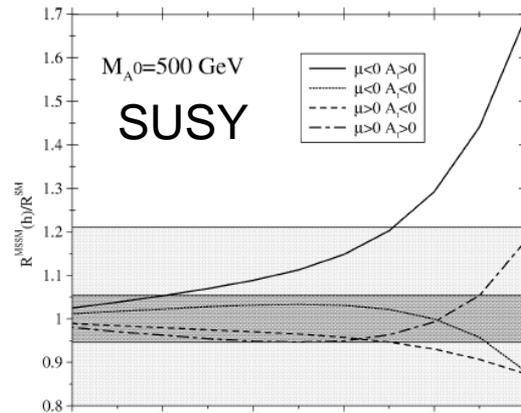
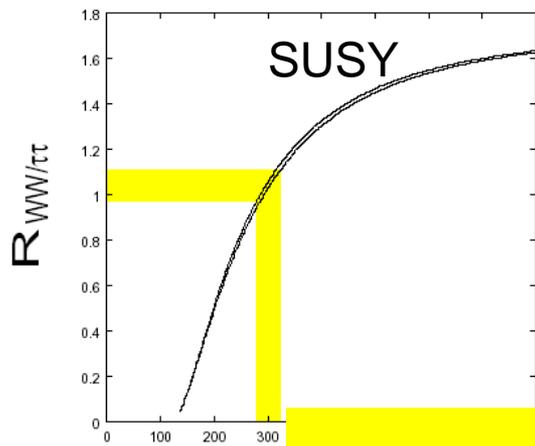


SUSY
(2 Higgs Doublet Model)



Extra dimension
(Higgs-radion mixing)

ヒッグス粒子精密測定によるTeV物理の探索



ACFA report

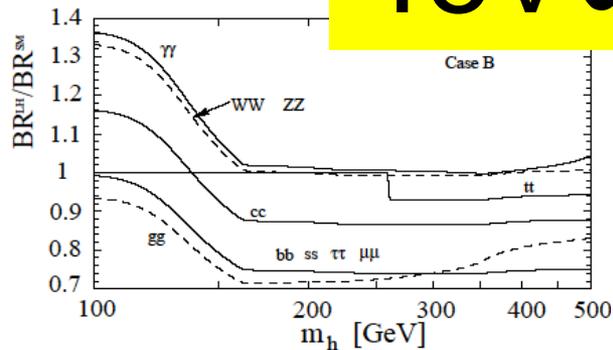
Little Higgs

ヒッグス粒子は
TeVの新物理を探る道具

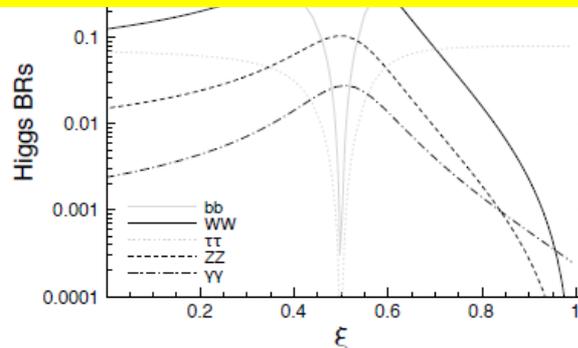
art

ryogenesis

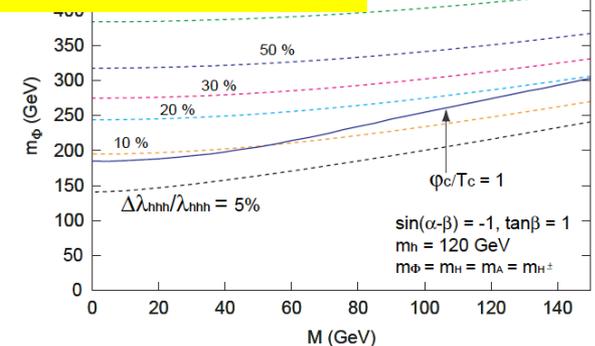
ϕ_C/T_C in the m_ϕ - M plane



R.C. Chen et al

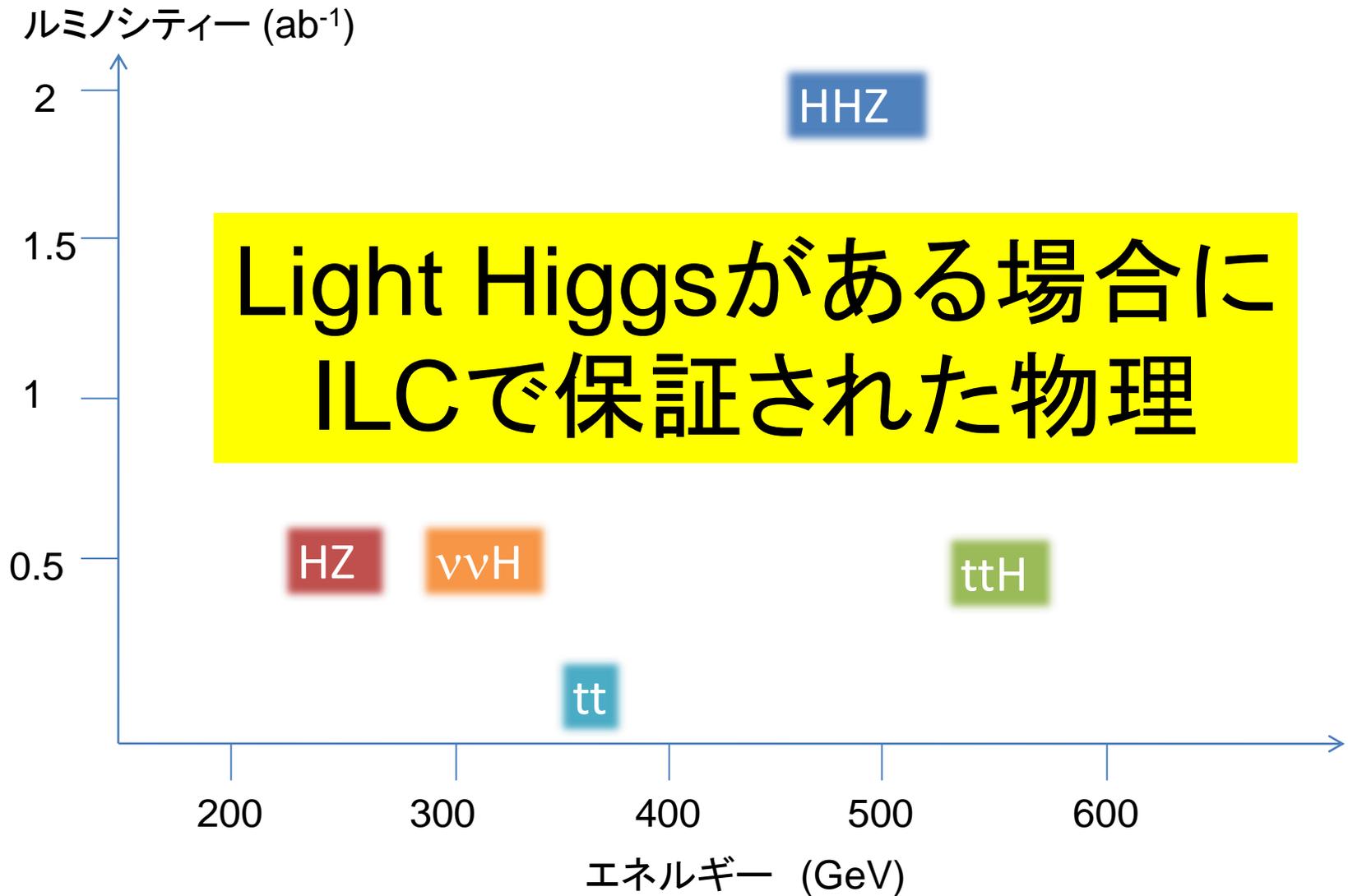


R.Contino et al



S.Kanemura et al

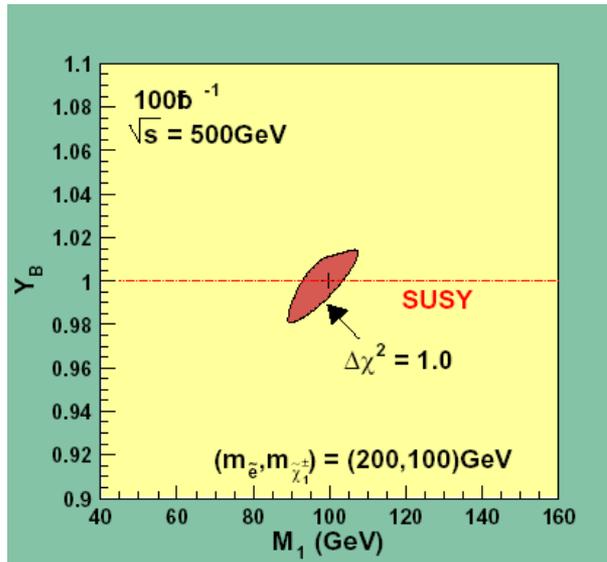
ILCにおけるヒッグス粒子とトップクォークのプログラム



ヒッグス以外の新粒子

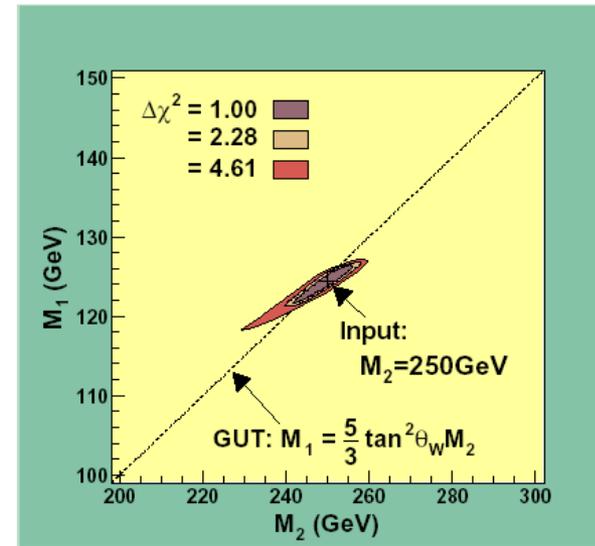
- LHCで今後(比較的重い)新粒子が見つかるかもしれない
 - もし見つければ、その崩壊から軽い新粒子の質量に目安がつく
- LHCで発見不能な(比較的軽い)新粒子がILCで見つかる可能性もある
- LHC/ILCでヒッグス以外の新粒子がひとつ見つければ、おそらくそれはひとつだけではない。新粒子発見の時代に突入する。
 - 超対称性？余剰次元？
 - 暗黒物質？
- 新粒子を詳しく調べて、次のコライダーエネルギーを決める。
 - 1 TeV までならILCのアップグレード(第2期)
 - それ以上ならCLIC or Muon Collider

超対称模型の 様々な基本的な測定 SUSY relation

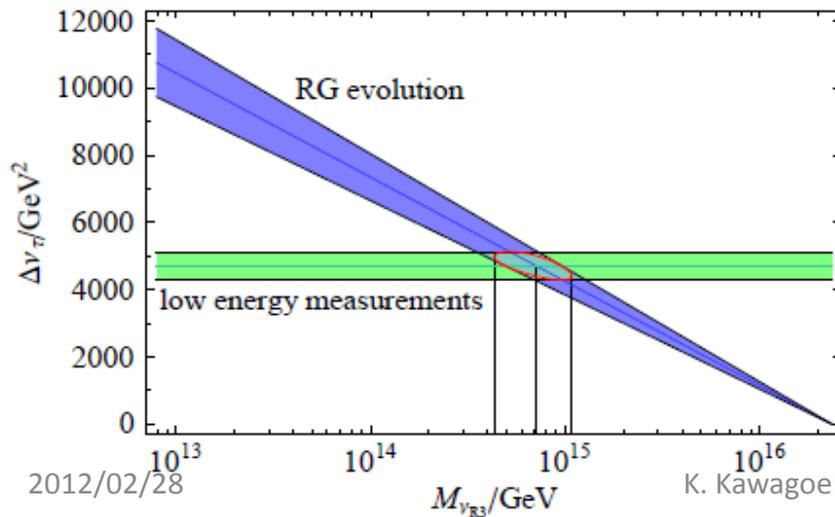


GLC Project

GUT relation



Seesaw neutrino mass

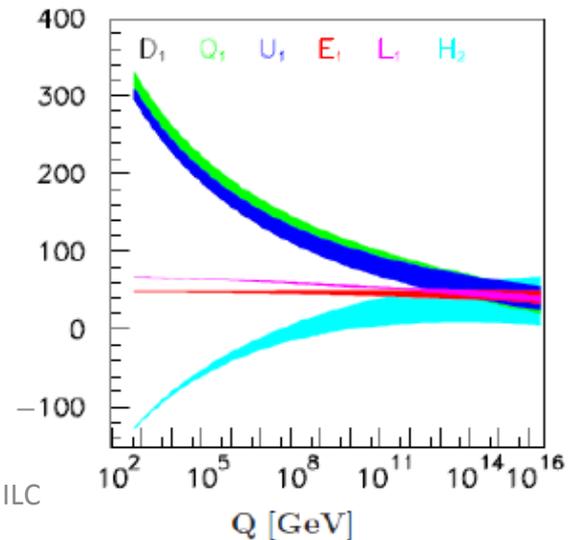


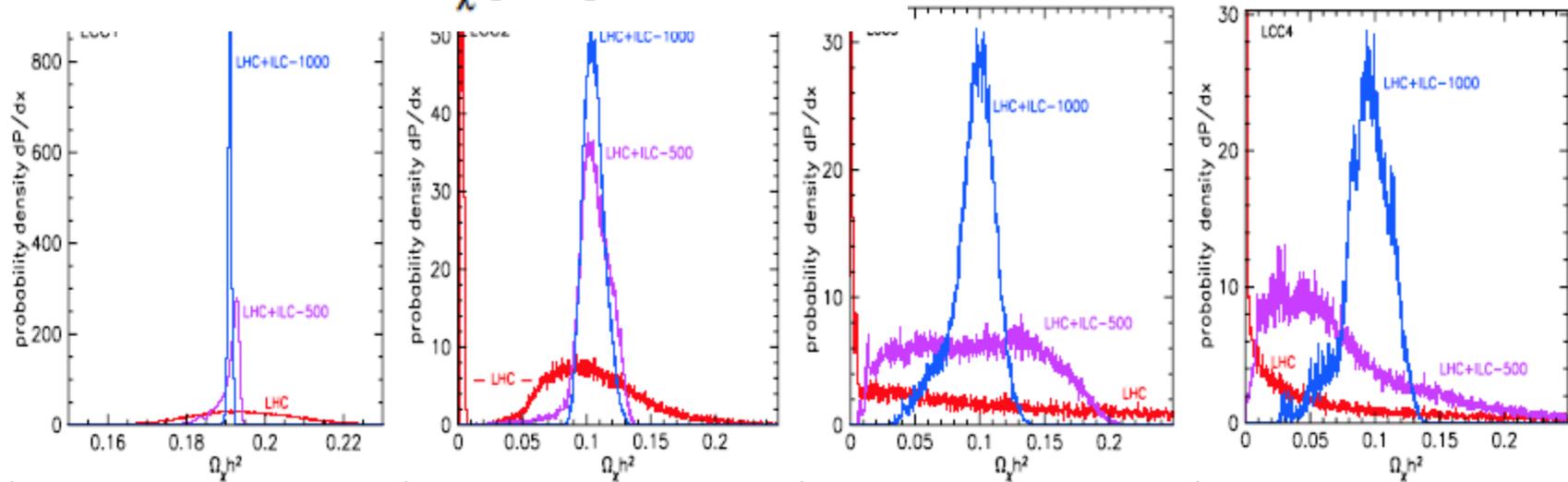
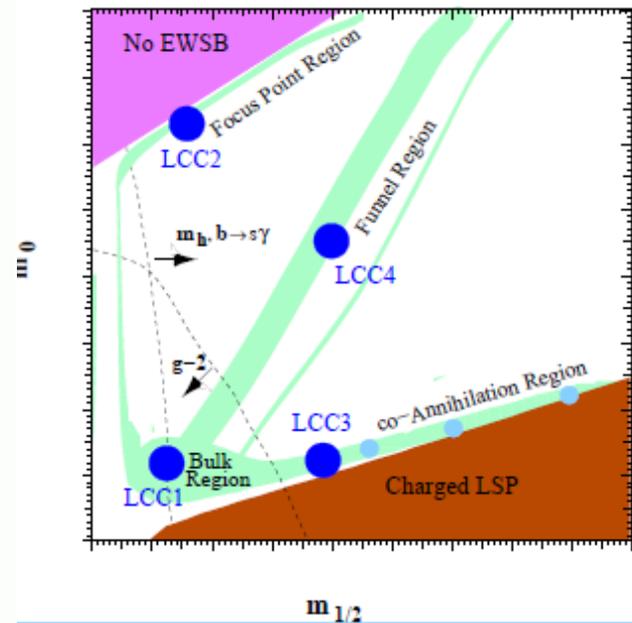
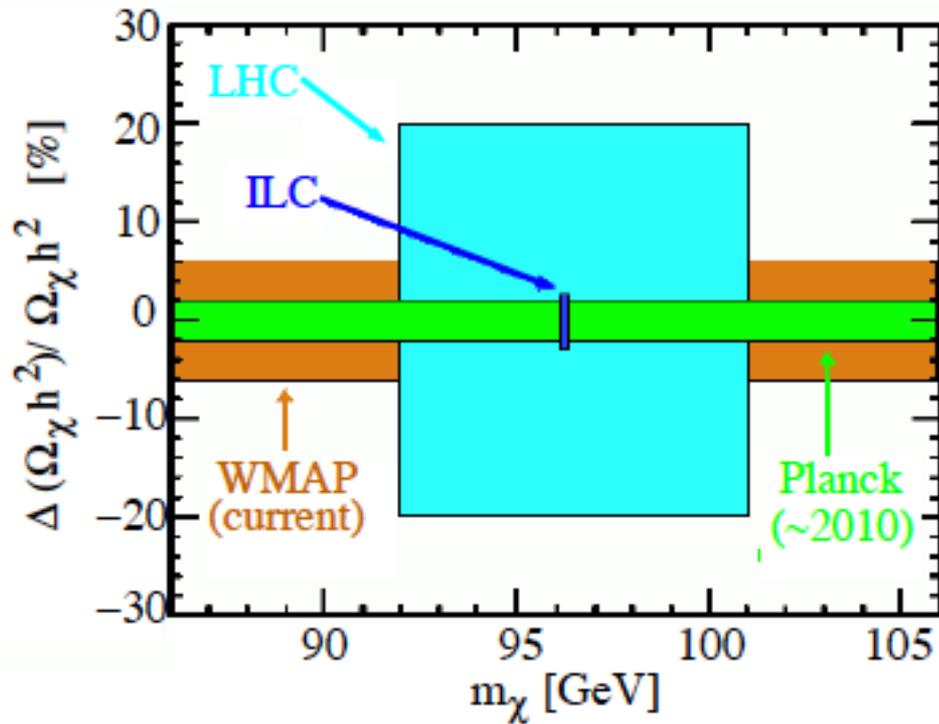
ILC RDR

2012/02/28

K. Kawagoe: Physics at the ILC

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



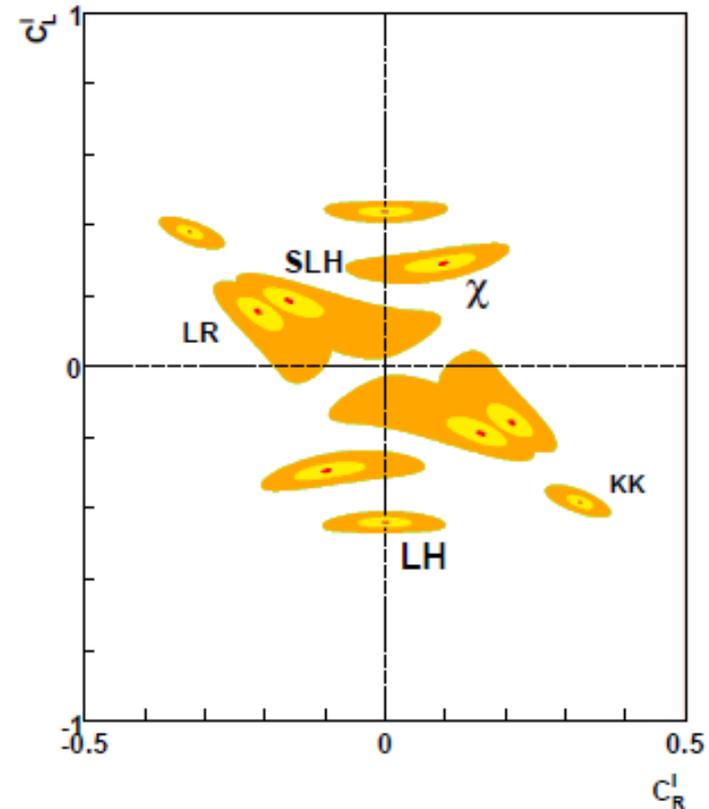
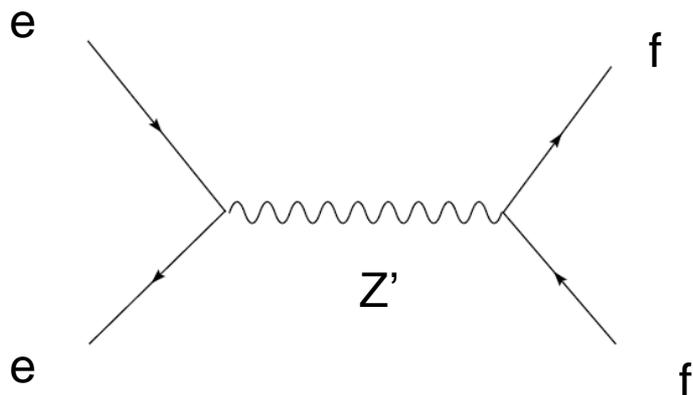


新粒子がなくても 精密測定で高エネルギーを探る

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。

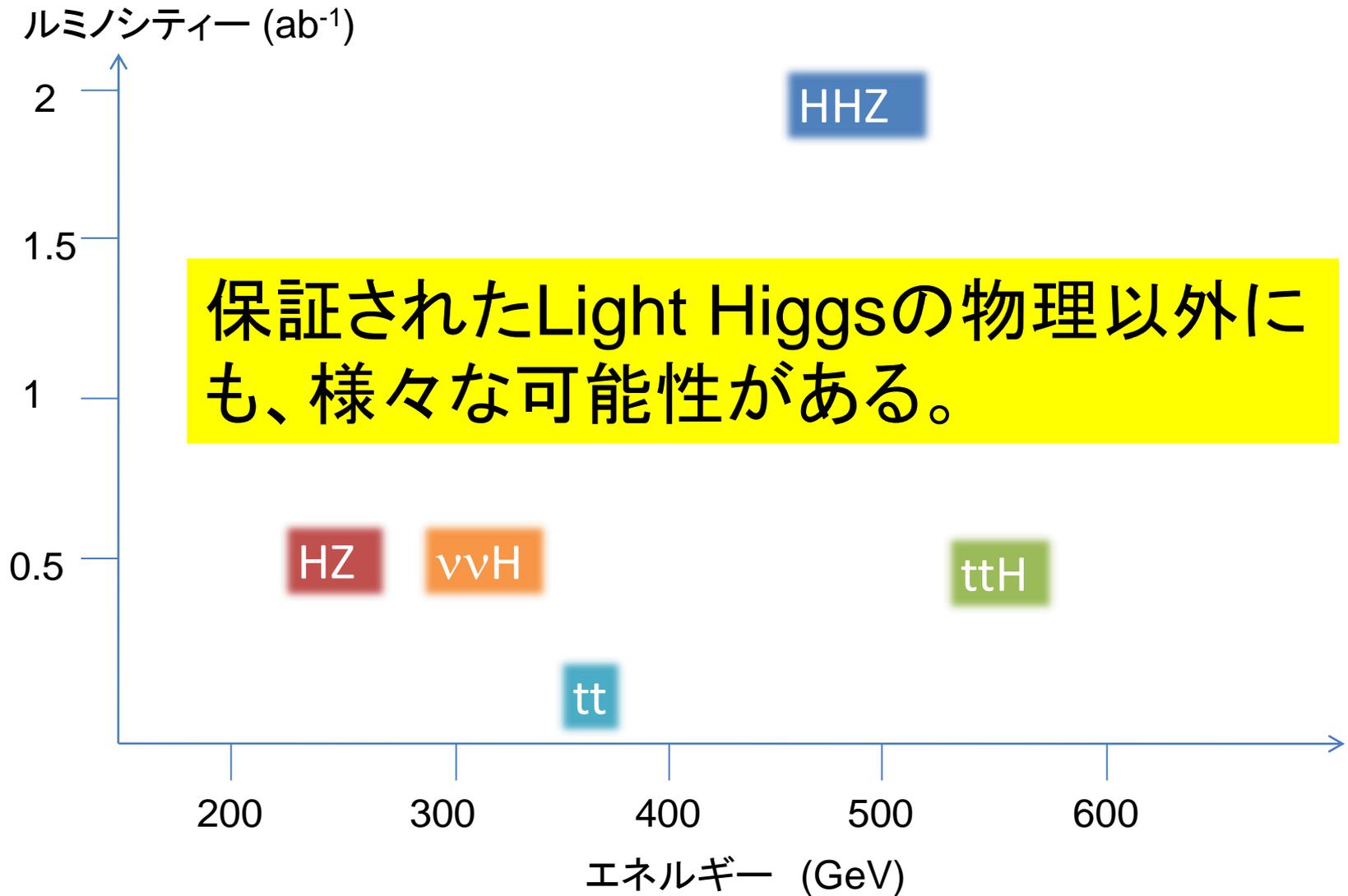
レプトンコライダーの特徴を生かす
(バックグラウンドの小ささ、
運動学の制約、偏極ビーム)

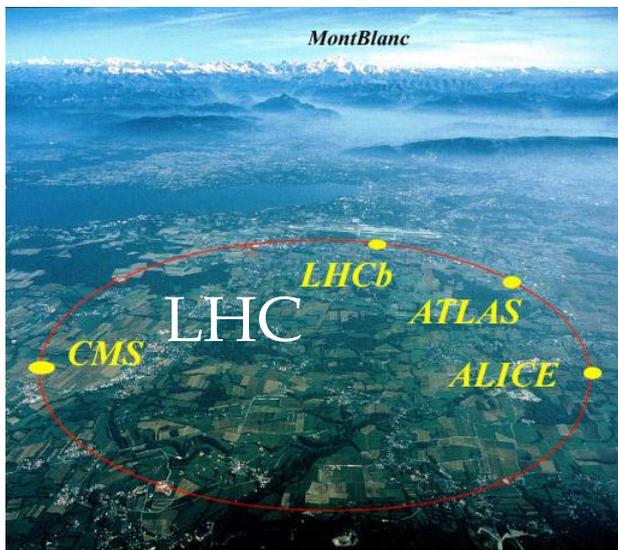


$m_{z'} = 1, 2, 3 \text{ TeV}, E_{\text{cm}} = 500 \text{ GeV}, L = 1 \text{ ab}^{-1}$

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



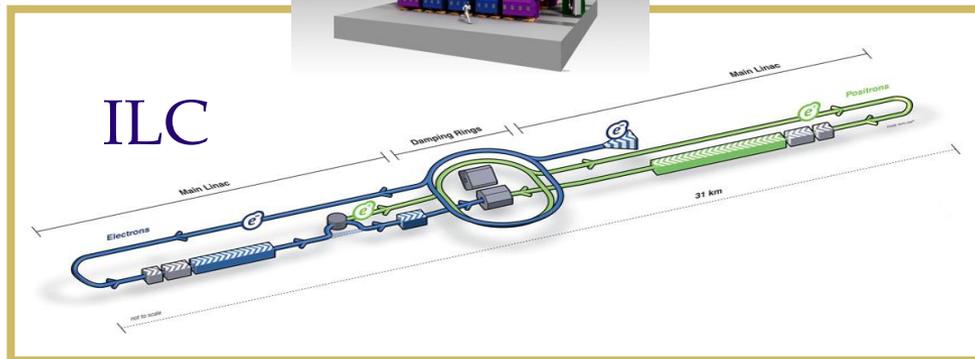


ILC物理のまとめ

- 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
 - 余剰次元などの新物理

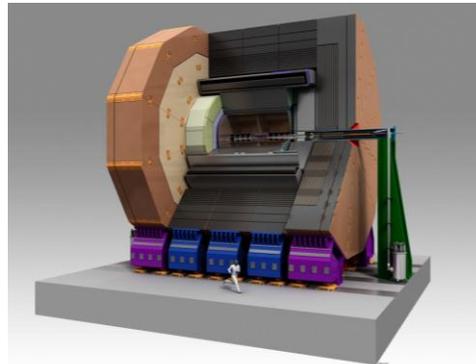
次のステップ
精密測定、物理構造解明

- 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

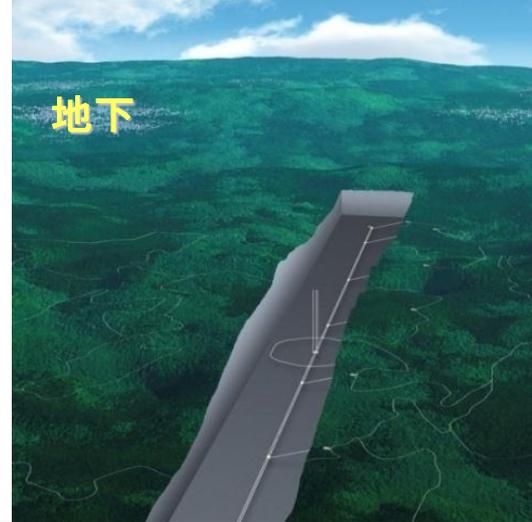
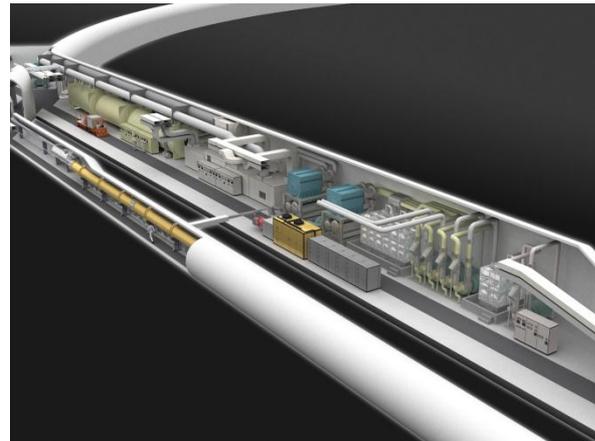


- LHCをはるかにしのぐ感度で新しい物理の本質を解明

ILC全体像

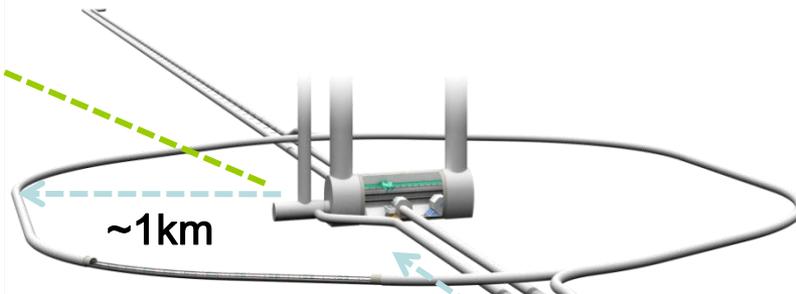


素粒子測定器



地下

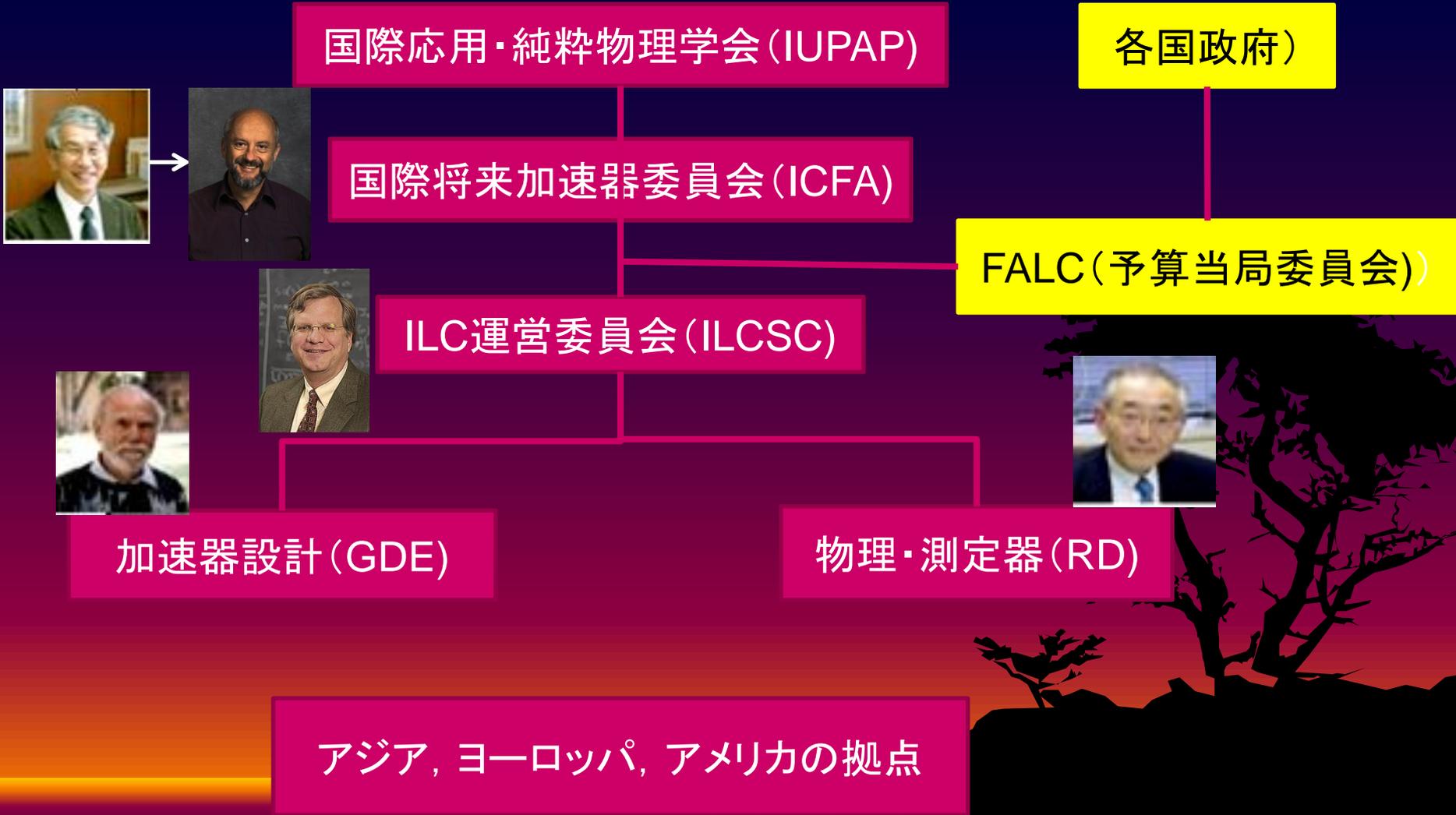
~15000本の
超電導加速空洞



加速器・測定器の開発・設計 (👉 山本さん・石川さん)

- 2012年末に工学設計 (TDR) 完成予定
- 第1期: 500 GeV (全長約31 km)以下でスタート
- 第2期: 1 TeV (全長約50 km)に拡張
- 世界に5~6カ所の候補地 (日本に2カ所)

現在のILC推進体制 ～研究者～



計画の流れ

5年間

設計の完成
製造技術確立

基本仕様決定

基本設計

生産技術

工学設計

OECD閣僚級会議声明

財政当局の情報交換

研究者・土木学会らによる
サイト関連調査

第一次コスト試算

コスト削減

CERNのLHC実験の
成果をふまえて

非公式・公式の政府間協議
資金分担・サイト協議

地点調査
環境アセス

現在

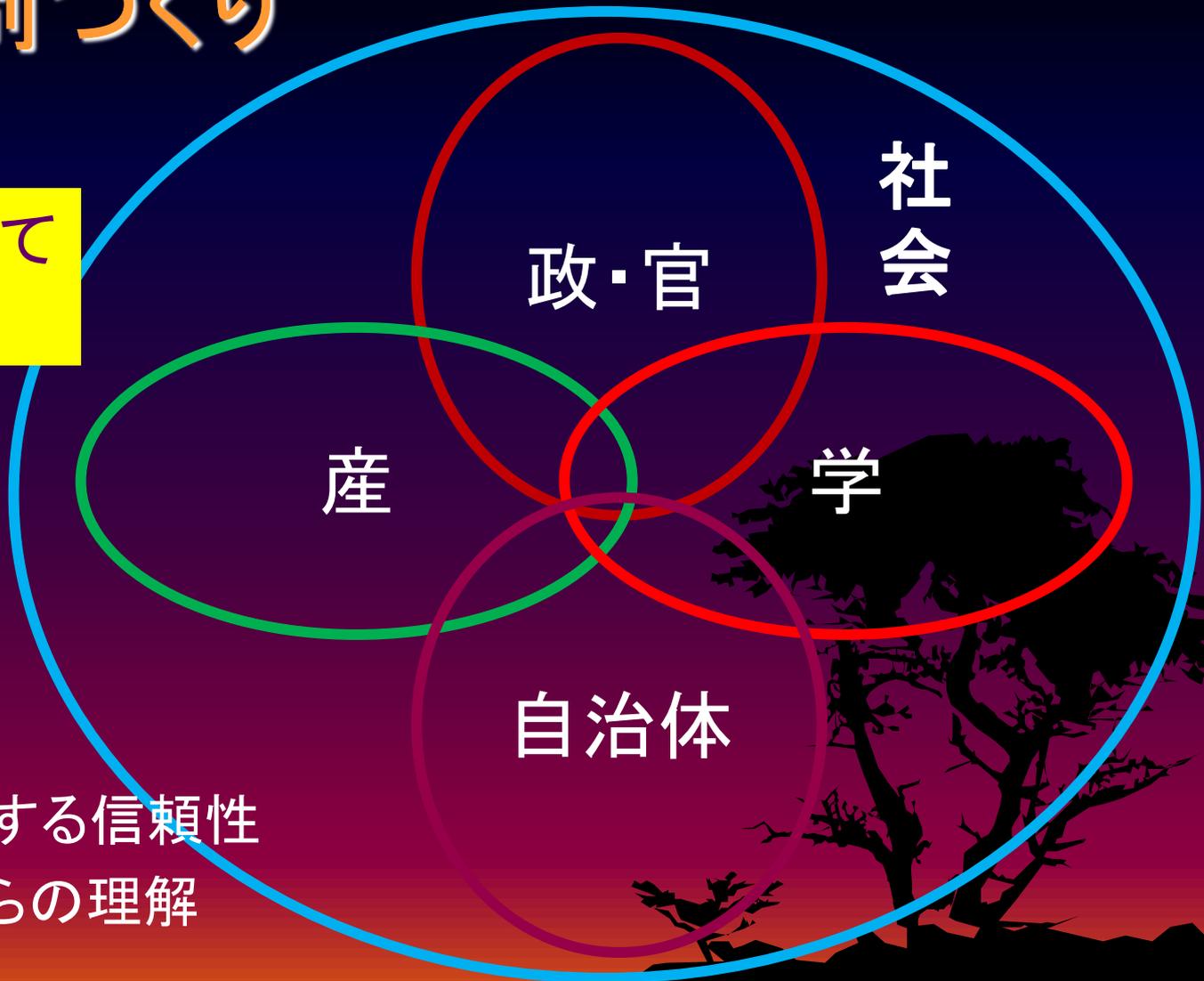
2012

現在の主要4課題

1. **物理** LHCの初期結果(来年にも発見あり得る)により学術的判断
2. **技術** 超伝導加速装置の技術・工業化の確立とコスト
3. **組織** 国際研究所のあり方・世界との共存共栄、そこへの過程
4. **調査** 本格的な事前調査・詳細設計・工程

国内の体制づくり

すべてが参加して
創り上げる計画



- 科学的根拠
- 技術とコストに対する信頼性
- 納税者(国民)からの理解
- 十分な準備検討

先端加速器科学技術推進協議会 <http://www.aaa-sentan.org>

会員数 一般会員 84社（三菱重工業、東芝、日立製作所、三菱電機 他）
特別会員 38機関（KEK、東北大学、東京大学、京都大学、神戸大学、広島大学、九州大学他）

平成23年12月時点（平成20年に発足）

超党派のリニアコライダー国際研究所
建設推進議員連盟も平成20年に発足



第1回先端加速器シンポジウム

K. Kawagoe: Physics at the ILC

2012/02/28

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

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>

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27 km) 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。

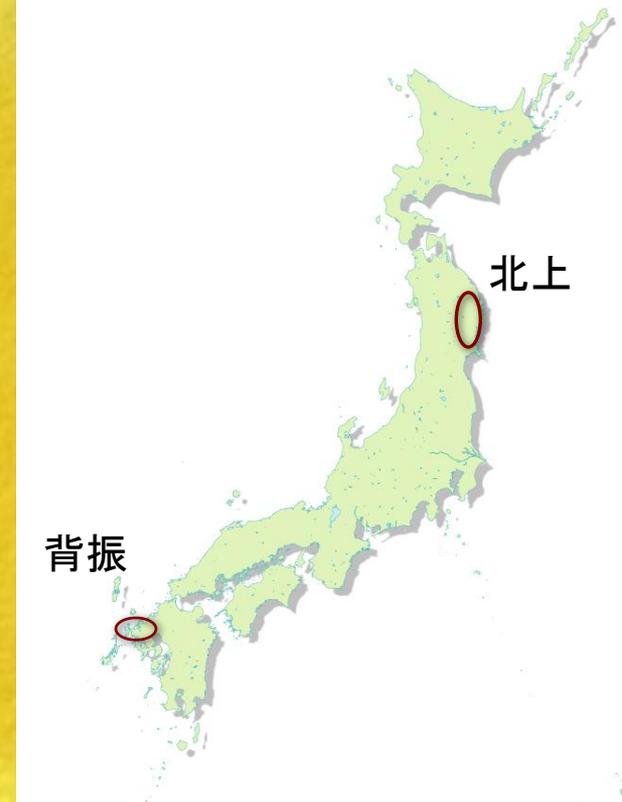
国内の候補地

● 九州

- ◎ 背振山地 2000年頃から地元の検討開始
- ◎ 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 1990年代初頭から地元の検討開始
- ◎ 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 → 分析良好
- ◎ 岩手県: 復興構想会議にTOHOKU国際科学技術特区の中核としてILCを提案(2011年5月～)



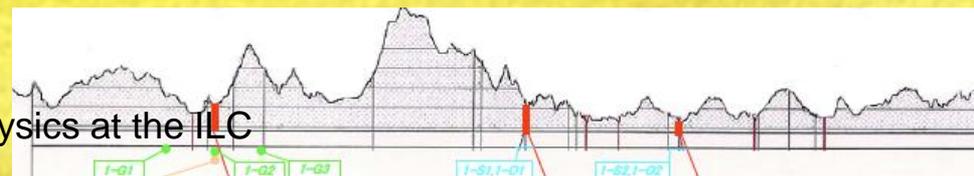
地域の大学、自治体、市民／経済団体が主導

ILCの理解啓蒙の促進

サイト地質・都市計画等の調査・検討

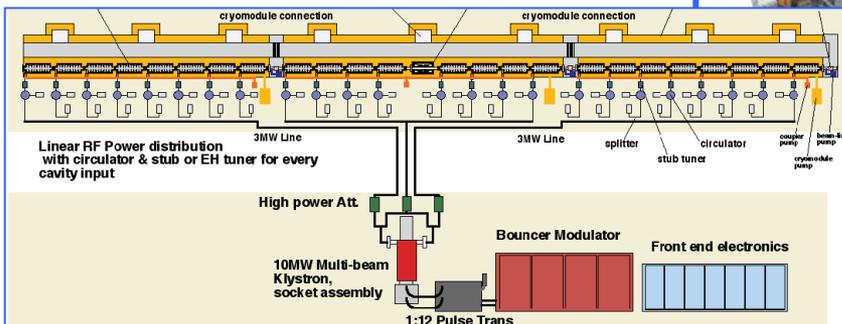
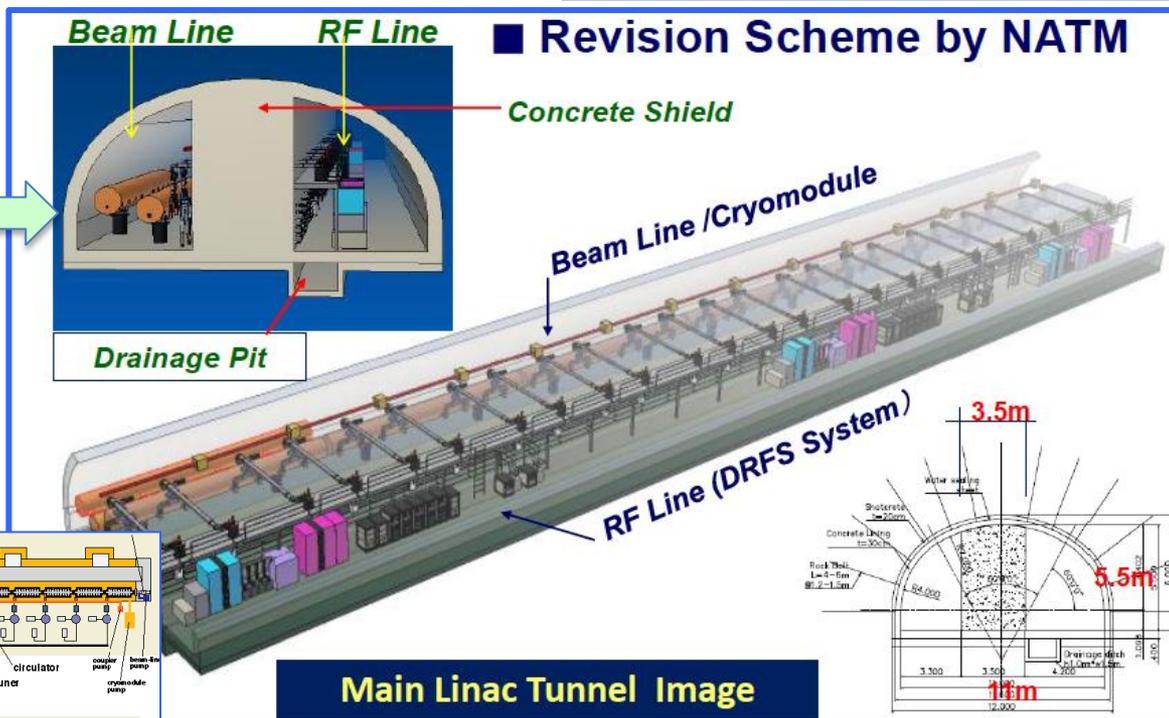
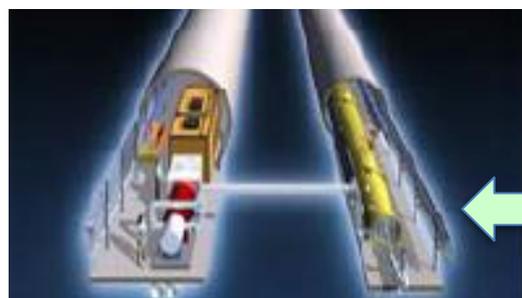
2012/02/28

KO Kawagoe: Physics at the ILC



日本の候補地に最適化した トンネル・加速器の設計が進行中

Courtesy: Enomoto/Miyahara
Study supported by KEK-DG



RDR RF unit :
3 Cryomodule (9+8+9 = 26 cavity),
operated by using 10 MW Klystron

DRFS RF unit:
2 cavities operated by 800 kW Klystron



@Sefuri

GDEによる候補地視察(2012/01/17-18)

1/19朝NHK全国ニュース
「頑強な岩盤があり、景色も非常に美しいため、よい印象を持った。選考にあたっては、地域の人たちが熱意を持って受け入れてくれ、環境を整えてくれることが重要だ」
(GDE Director, B. Barish)



@Kitakami

2012/02/28

K. Kawagoe: Physics at the ILC

42

先端加速器科学技術推進シンポジウム (AAAと議員連盟の共催、2011年12月15日)

先端加速器科学技術推進シンポジウム 2011 in 東京
「国際リニアコライダーと先端加速器の応用」



野田首相が冒頭の挨拶で、LHCのヒッグス探索と、加速器科学とその応用の重要性について述べた。そして、ILCを実現するための課題について言及した。

- ILCを実現するための国際的な枠組み
- 世界の科学者の議論により、問題を一つ一つ解決していくこと
- 市民の理解と支持

昨年12月、第3次補正予算によりILCのための5億円の予算(調査費)が認められた。そのうち3億円は加速器開発に、2億円は背振山地・北上山地の2つの候補地の地質調査に当てられる。

政府がILCの推進を決めた訳ではない。しかし、政府がILCを日本の将来プロジェクトとして検討し始める時期に来た。

政、産、官、学 から160名

「準備状況」のまとめ

- 国際協力で推進
- 電子・陽電子でのエネルギーフロンティア実験
 - 大きな発見・決定能力、予期せぬ大発見
 - 物理の決定
 - GUTスケールでの物理へ
- 技術と設計・コストダウンに世界・産学で協力

2011-2012年

- 製造技術・R&D
- LHCからの発見インプット
- 学術的意義の精査
- 初期エネルギーの最適化
- コストダウン
- 工学設計 (TDR)
- 詳細調査・審議過程

最も重要なもの=物理と加速器のエネルギー

最重要・喫緊の課題

1. **技術**：高性能の加速空洞の安定した（高品質）製造技術の確立
→ **先端加速器開発、国際協力**
2. **物理**：ヒッグス粒子等、新粒子生成に必要な最小エネルギーの確定
(ヒッグス工場、新粒子工場となる初期エネルギーの最適化)

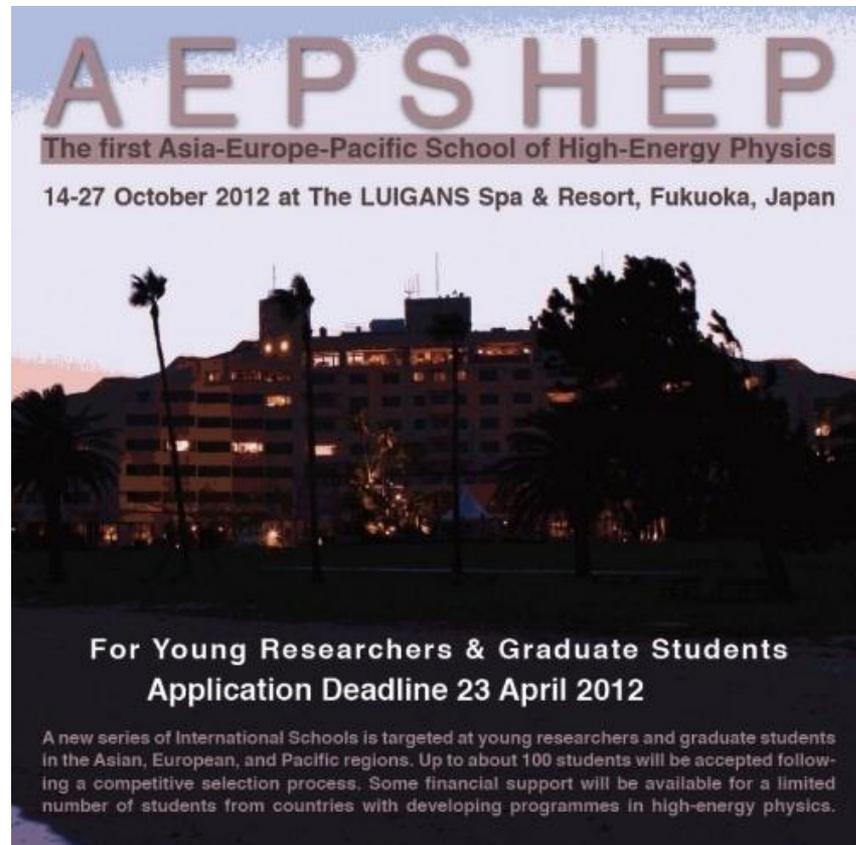
AEPSHEP 2012 国際スクールのご案内

Welcome to Fukuoka, Japan

- The First Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics (AEPSHEP 2012) will be held in Fukuoka, Japan, October 14-27 2012.

<http://2012.aepshep.org/>

若手研究者、大学院生が対象
参加者100名まで(選抜あり)



AEPSHEP
The first Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics
14-27 October 2012 at The LUIGANS Spa & Resort, Fukuoka, Japan

For Young Researchers & Graduate Students
Application Deadline 23 April 2012

A new series of International Schools is targeted at young researchers and graduate students in the Asian, European, and Pacific regions. Up to about 100 students will be accepted following a competitive selection process. Some financial support will be available for a limited number of students from countries with developing programmes in high-energy physics.