

国際リニアコライダー計画 *International Linear Collider*

1. 本日のお話の流れ
2. ILC計画の概要

10:00-10:20	計画概要・イントロ	山下 (ICEPP)
10:20-11:30	ILCでの物理、LHC + ILC	松本重貴 (富山大)
11:30-12:00	ILCへの期待と米国の状況	村山 (IPMU)
(昼食)	12:00-13:00	
13:00-13:40	国際設計による加速器設計・技術開発の進展と展望	山本明 (KEK)
13:40-14:20	超伝導加速技術および超伝導加速試験施設 (KEK-STF) 開発	早野 (KEK)
14:20-14:50	超低エミッタンスビームの生成と制御	栗木 (広島大)
(休憩 20分)	14:50-15:10	
15:10-15:40	ILC 測定器および国際協力	山本均 (東北大)
15:40-16:20	反応点・飛跡検出器の技術開発	田窪 (東北大)
16:20-17:00	カロリメータの技術開発	竹下 (信州大)
17:00-18:30	全体質疑 90分	



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*

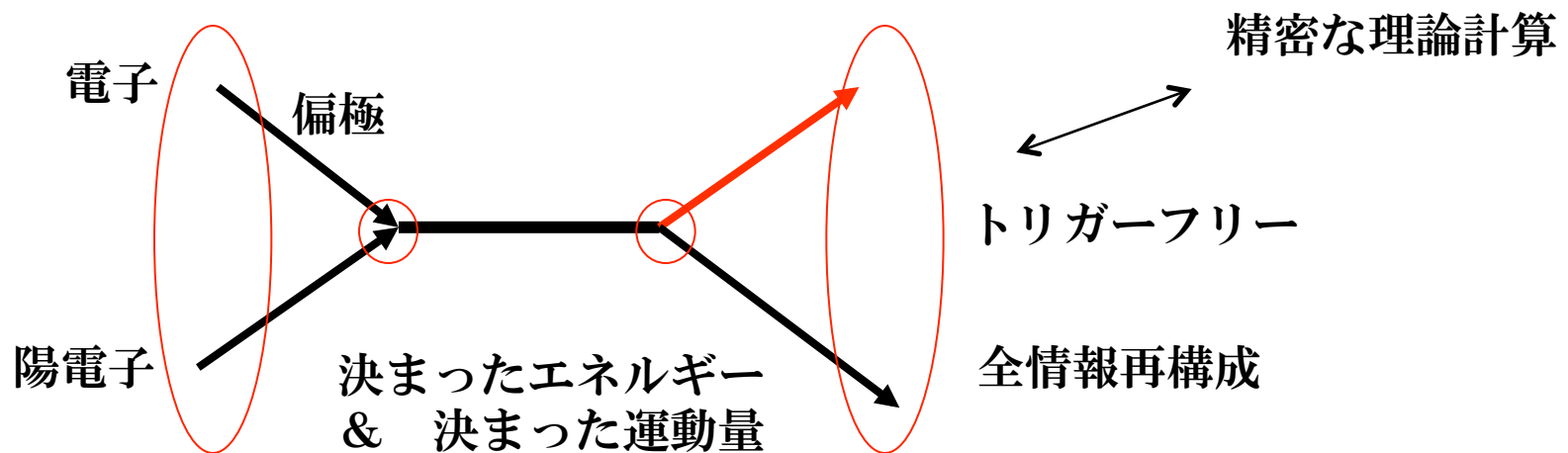
Options :

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

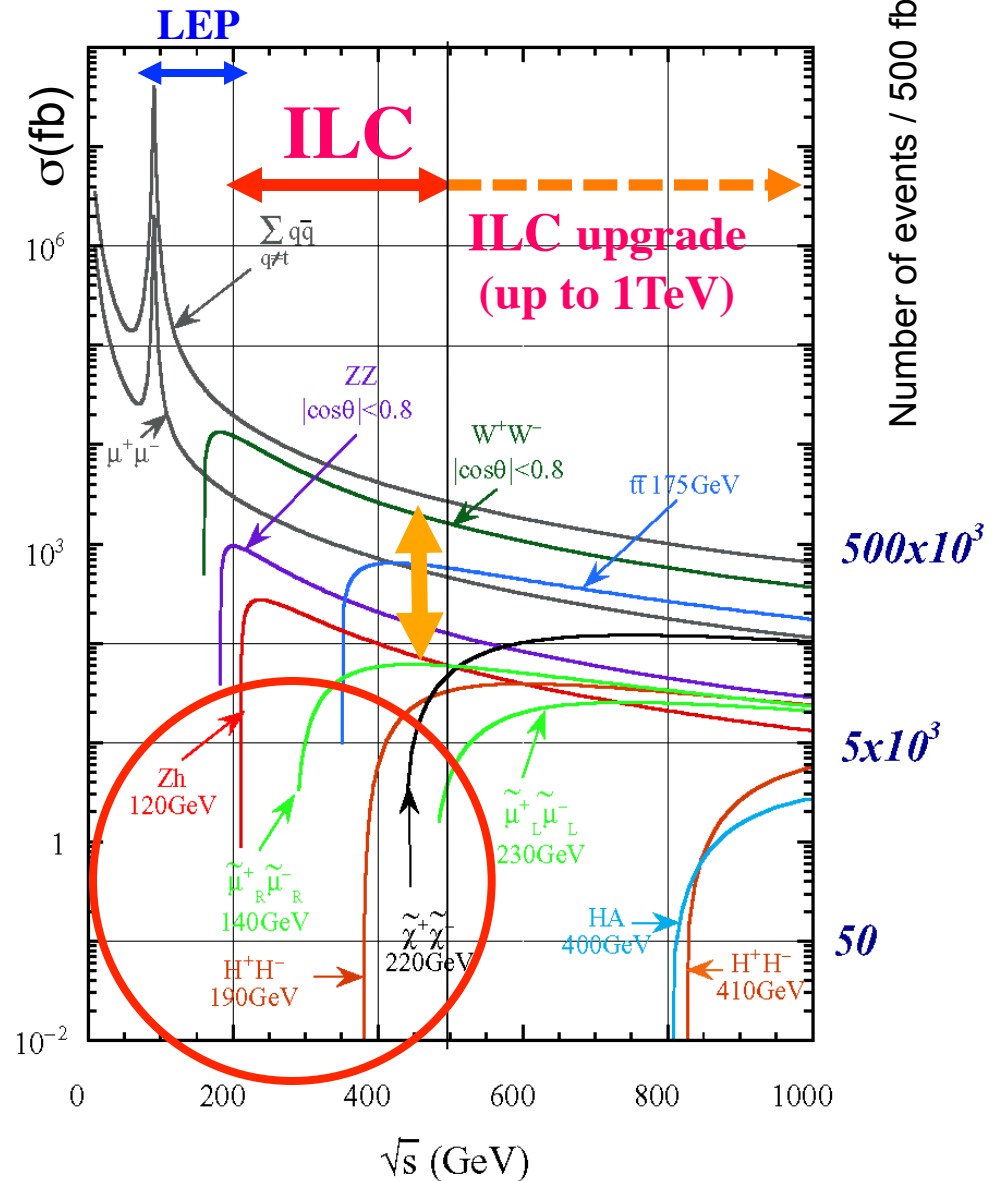
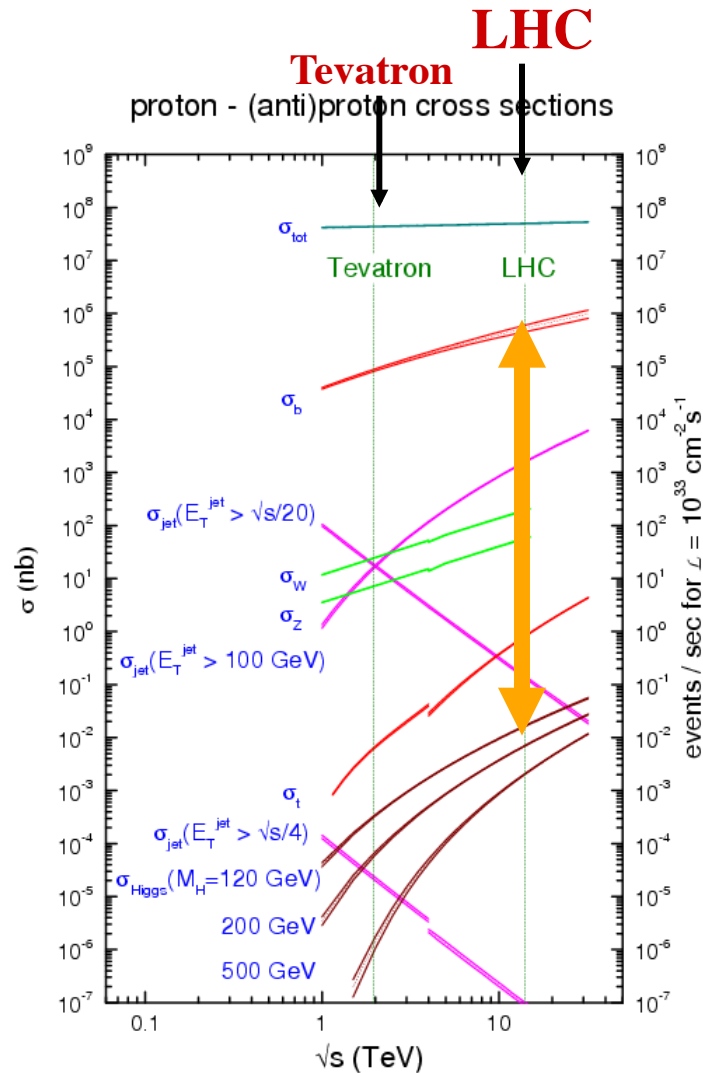
Choice of options depends on LHC+ILC results

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%)**



Signal and background Cross-section





物理を極める

■エネルギー（質量）閾値以下に存在する「全ての粒子」を「ひとつつつ」発見

- ◆エネルギーを変えながら(Energy Scan)
- ◆S/N 典型的には1～10（電子・陽電子コライダーの特徴）

■エネルギー閾値を遙かに超える質量をもつ粒子も中間状態でつくり発見

- ◆典型的には E_{cm} の10倍程度まで、Contact Interactionなどでは100倍程度まで
- ◆結合力、スピンもわかる。重力子、 Z' 、

■LHCではとらえられない新粒子・新現象の発見

- ◆電弱相互作用で生成される粒子、「見えない」粒子、

■LHCで見つかる新現象・新粒子を極める

- ◆ヒッグス粒子、エネルギー欠損を伴う事象（超対称性粒子・余剰次元、、、）

■粒子の性質・法則を決定し、物理原理を発見する

- ◆質量発現の機構・真空の相転移、超対称性原理、余剰次元、

■物理モデルを決定する

- ◆Minimum Supersymmetry (MSSM)、Next-MSSM、複数ヒッグス場、余剰次元の次元数、

■ダークマターの正体を決定する。

- ◆超対称性、余剰次元、Little Higgs、質量、量子数、結合力、Mixing、

■大統一理論のエネルギースケールでの物理を発見する

- ◆GUTモデル、SuperGravity、String-inspired Models、



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)

リニアコライダーの概念図

偏極電子源

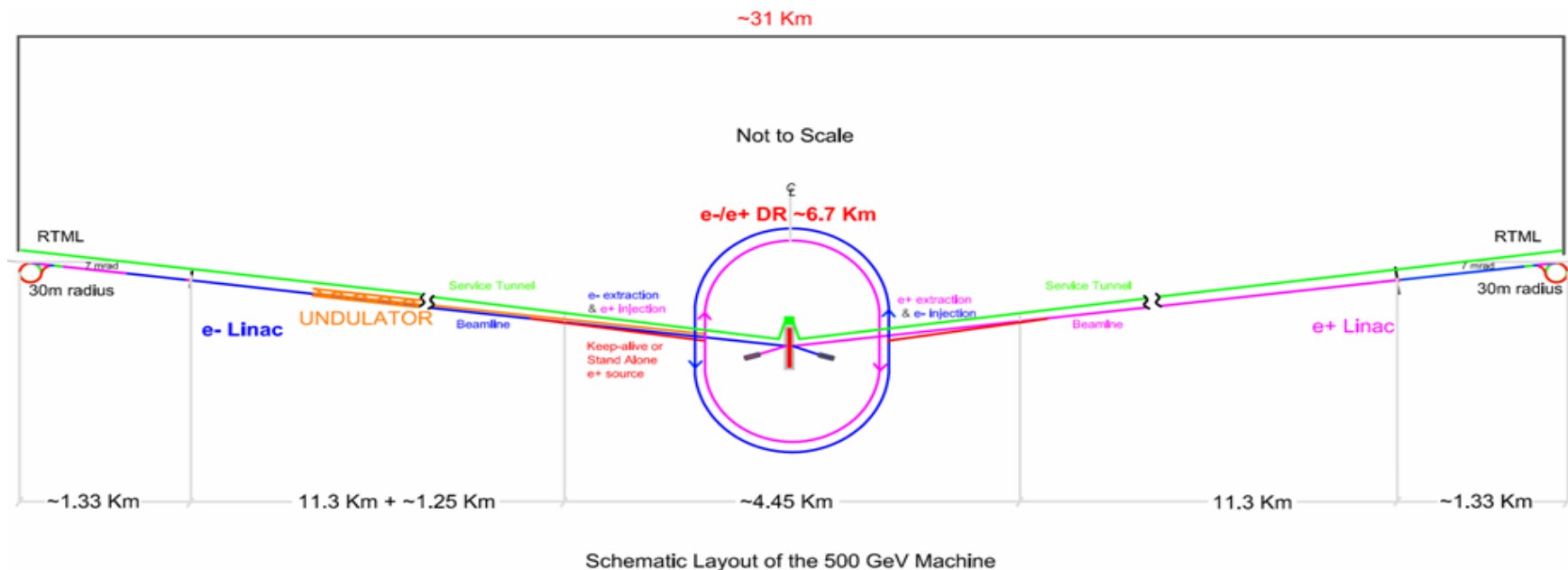
超格子フォトカソード+強力レーザー

ダンピングリング

ビームのエミッタンスを低減

陽電子源

電子ビームで発生する陽電子を収集



主リニアック

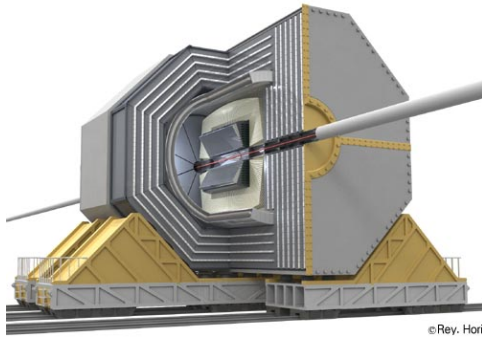
超伝導加速管を片側約8000個並べて粒子を加速

ビーム収束

ビームサイズをナノメートルまで絞り込む

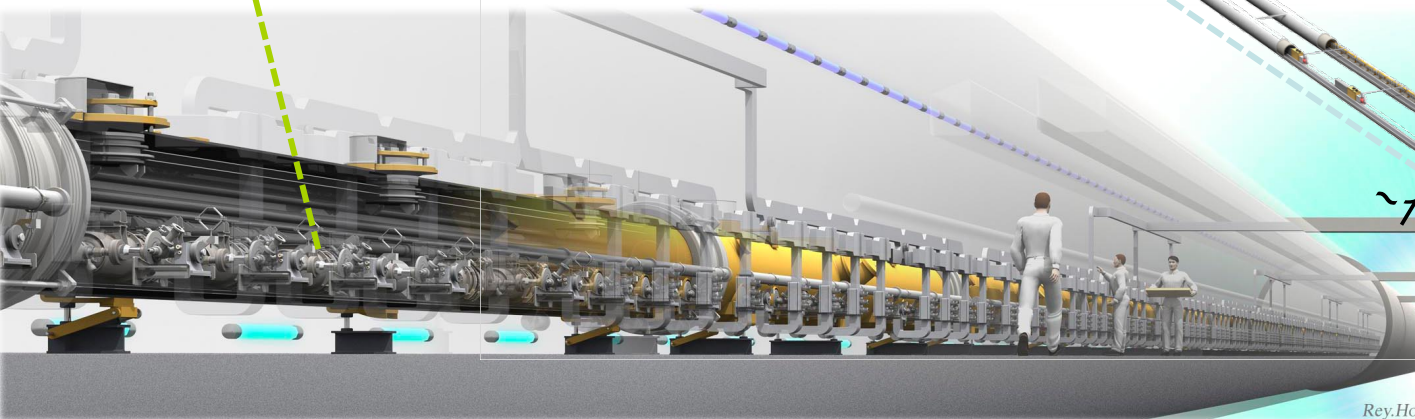
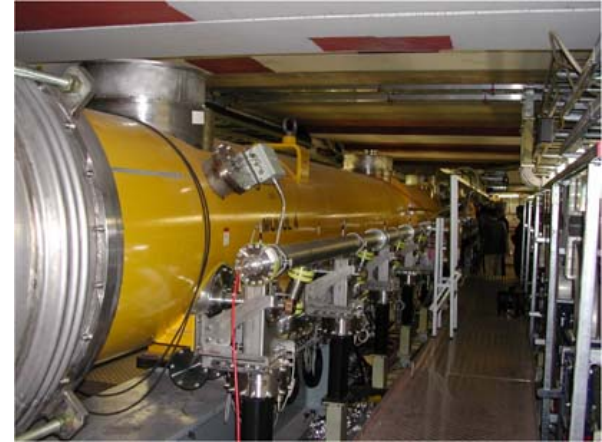
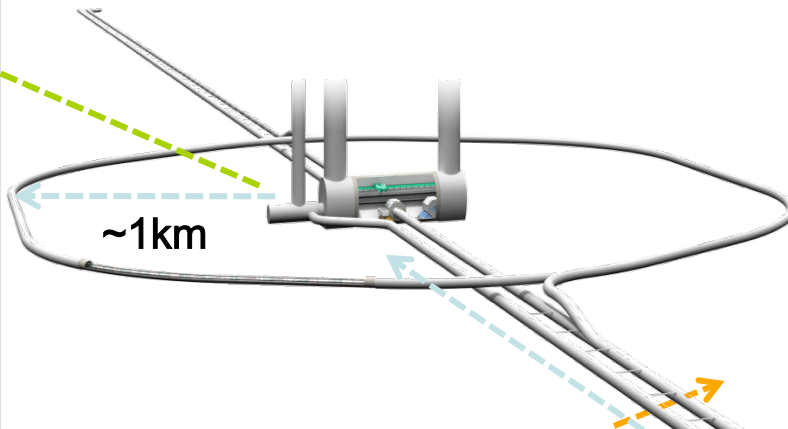
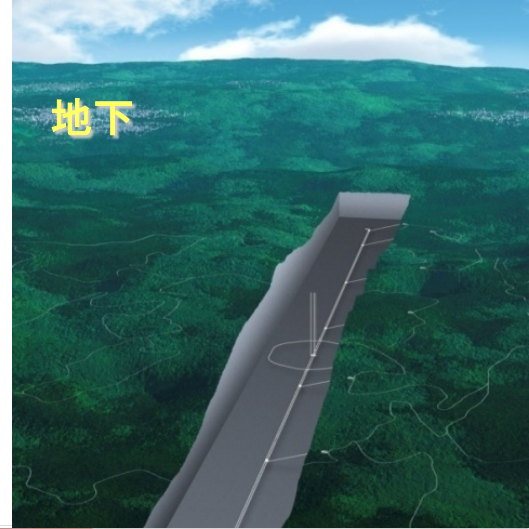
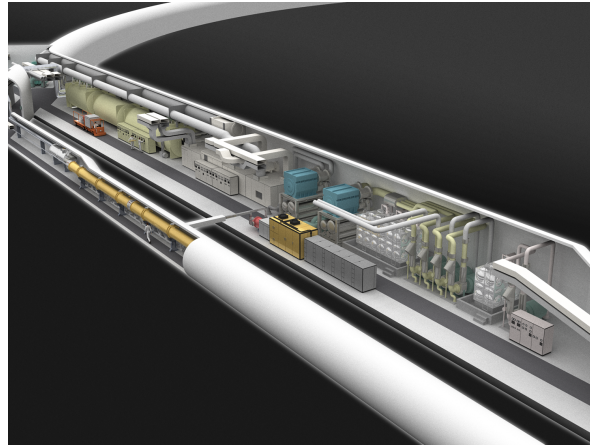
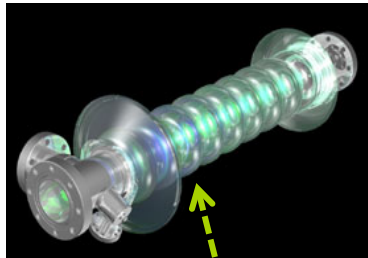
第1期 (500 GeV) : 約30 km
第2期 (1 TeVまで) : 45 kmを超える長さ

リニアコライダー全体像



素粒子測定器

~15000本の
超電導加速空洞

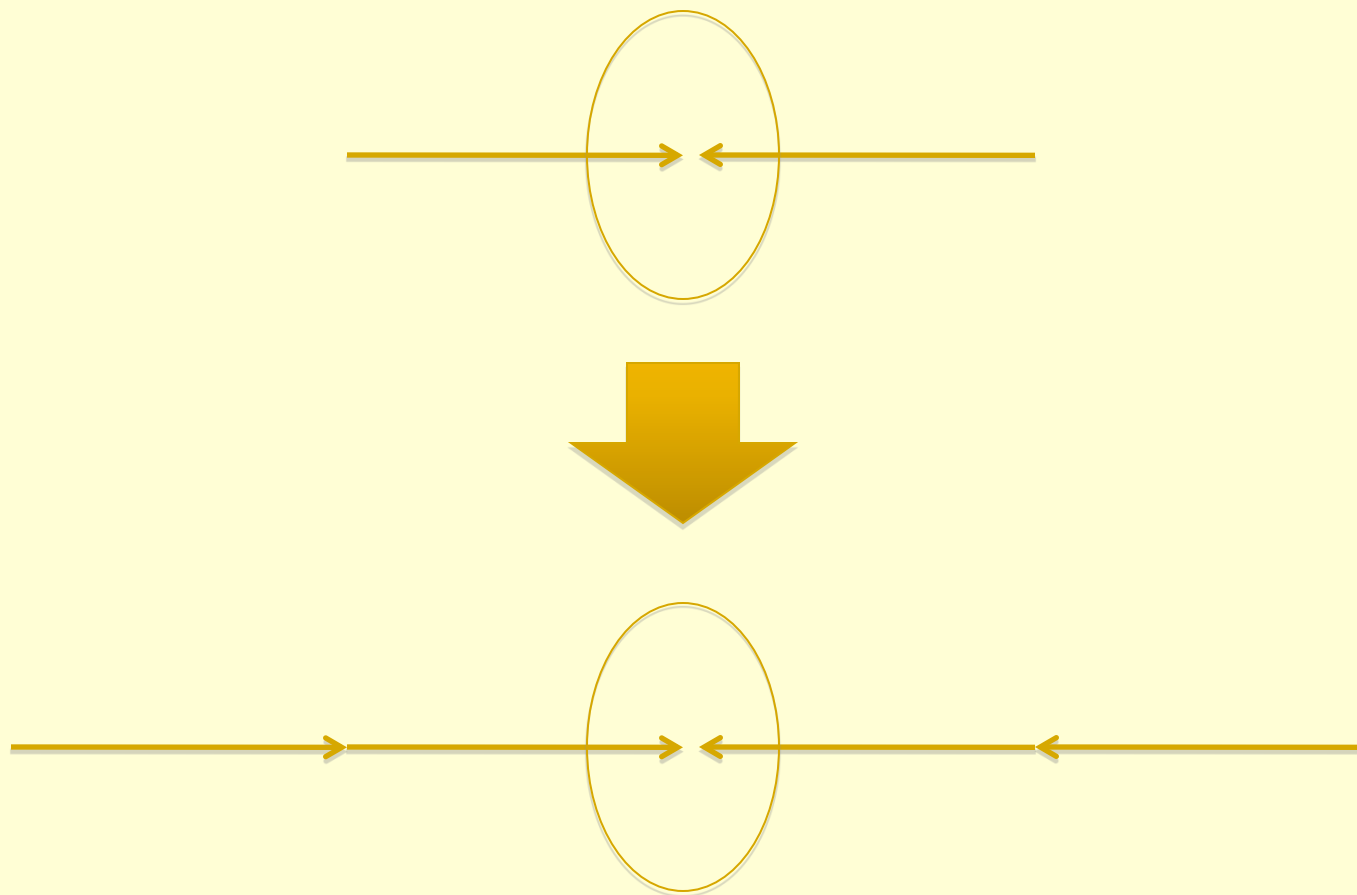


~16km

Rey.Hori



放射光によるエネルギーロスの解消に加えて
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





Accelerator Technology

生みの苦しみの現状は、山本明、早野、栗木氏参照

曲げ続ける力

LHC

陽子・陽子衝突

超伝導磁石

放射線耐久

円形

瞬時の加速と制御

リニアコライダー

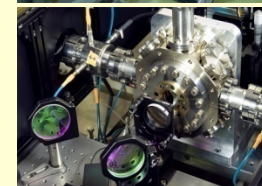
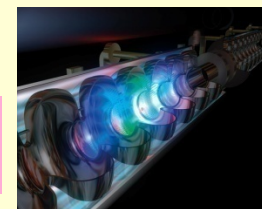
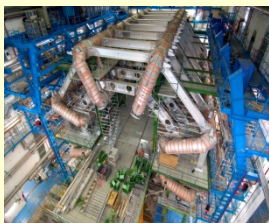
電子・陽電子衝突

超伝導加速装置

ナノ・ビーム制御

線形（直線）

キーテクノロジー





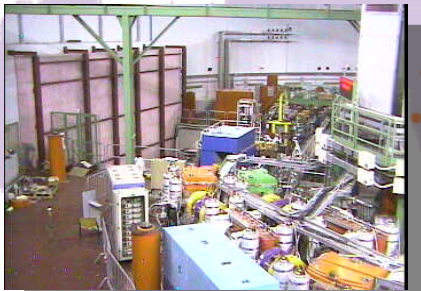
Large Scale Test Facilities for ILC accelerator R&D

TTF/FLASH (DESY) ~1 GeV
ILC-like beam ILC RF unit
(* lower gradient)



DESY

INFN Frascati

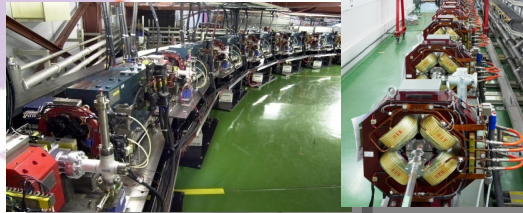


DA^fNE (INFN Frascati)
kicker development
electron cloud

STF (KEK) operation/construction
ILC RF unit test



KEK, Japan



ATF & ATF2 (KEK)
ultra-low emittance
Final Focus optics
KEKB electron-cloud



CesrTA (Cornell)
electron cloud
low emittance

FNAL Cornell



NML facility ILC RF unit test
Under construction



Main LINAC TEST Facilities



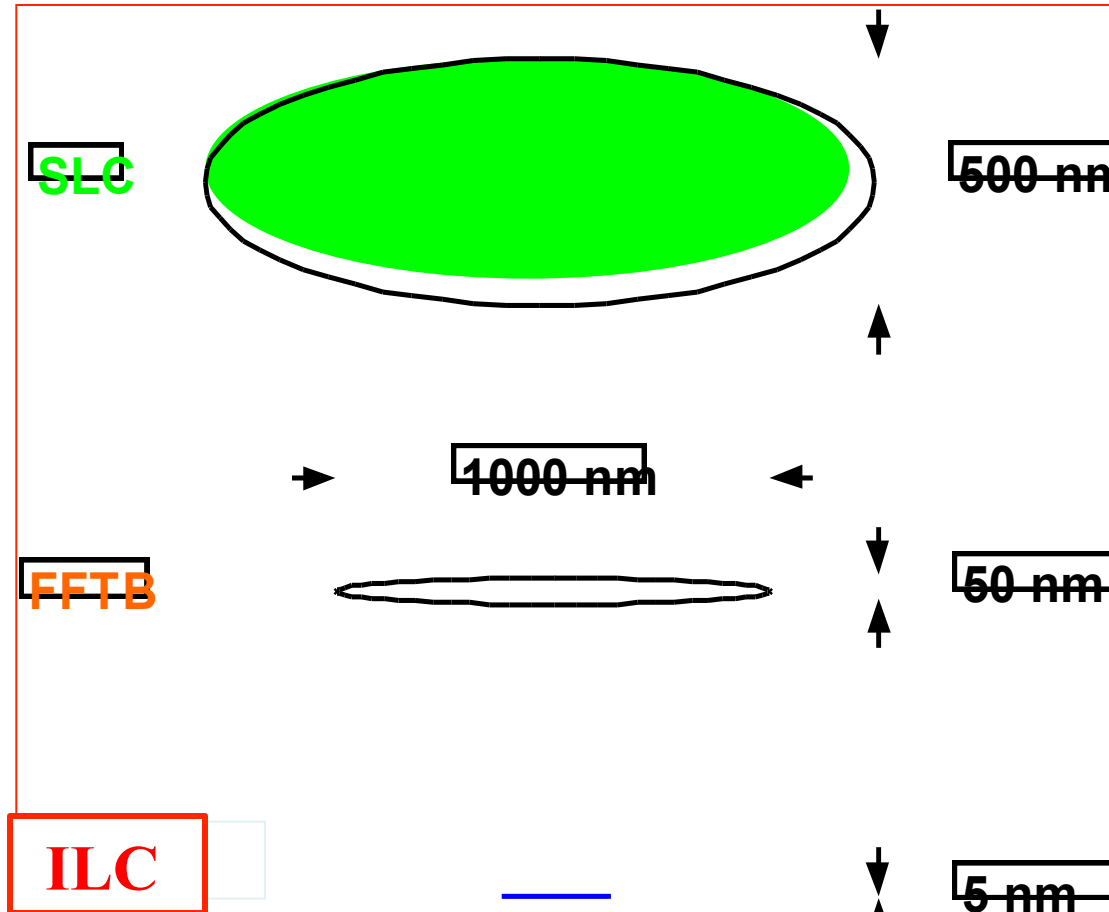
DESY TTF/FLASH
EURO-XFEL (Under constr.)

KEK STF

FNAL NML



The scale of the Beam at Collision Point

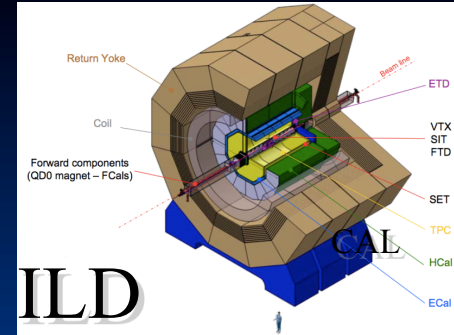


ILC 実験の基本理念

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

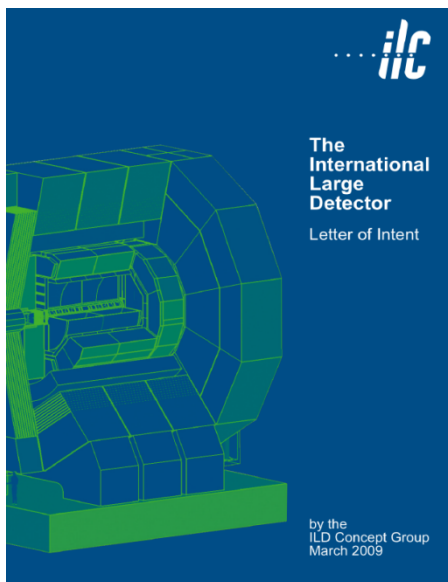
■ EM cal granularity

1 / 200

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

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

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

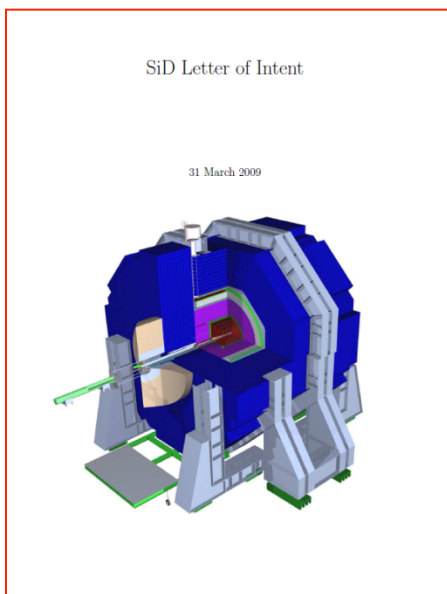


The ILD group

Location of LOI and supporting documents

<http://www.ilcild.org/documents/ild-letter-of-intent>

- LOI signatories
 - 695 名
 - 32 力国
 - 148 研究機関



The SiD group

Location of LOI and supporting documents

<http://silicondetector.org/display/SiD/LOI>

- LOI signatories
 - 240 名
 - 17 力国
 - 77 研究機関

宇宙の創成・進化
の謎の究明

国際リニアコライダー (ILC)

物質と力の究極像
の探究

研究成果・技術開発・人材育成

ニュートリノの
CP非対称の検証

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

Super-KEKB

J-PARC

KEK-B

クォークの
CP非対称の検証

LHC

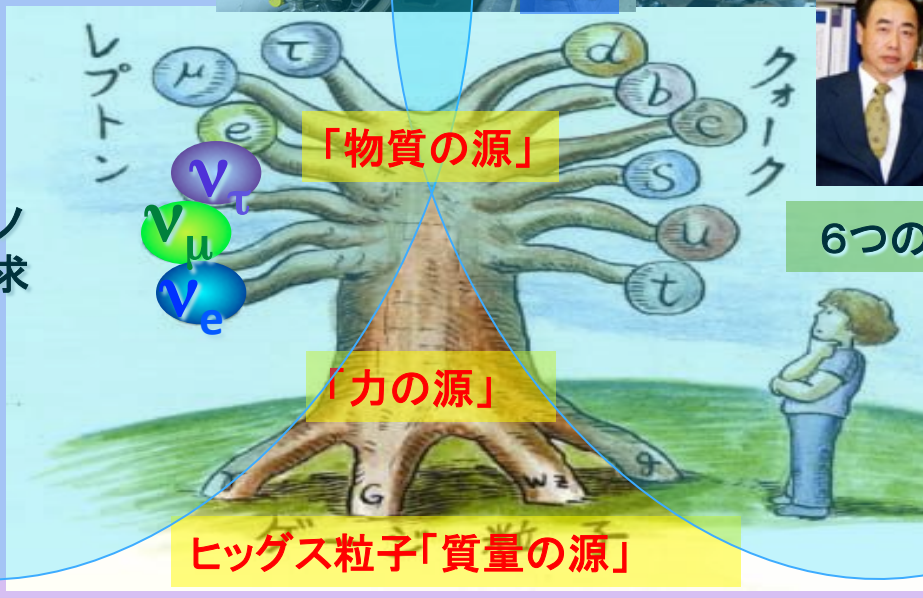
ニュートリノ
の謎の探求

「物質の源」

6つのクォークの探求

「力の源」

ヒッグス粒子「質量の源」



リニアコライダー計画の歴史

- 1986年 高エネルギー委員会・第一次将来計画小委員会答申 リニアコライダーのR&Dに着手する
 - 1980年代～ 概念設計と原理の確立
 - 1997 高エネルギー委員会・第二次将来計画小委員会答申 リニアコライダーを次期基幹計画とする
 - 1997.2 ACFA（アジア将来加速器委員会）声明
 - 2001.9 ACFA声明 アジア太平洋地域にリニアコライダーを
 - 2001 世界の素粒子・加速器研究者がコンセンサス：次期計画はリニアコライダー
 - 2003 ACFA主催国際シンポジウム（つくば）

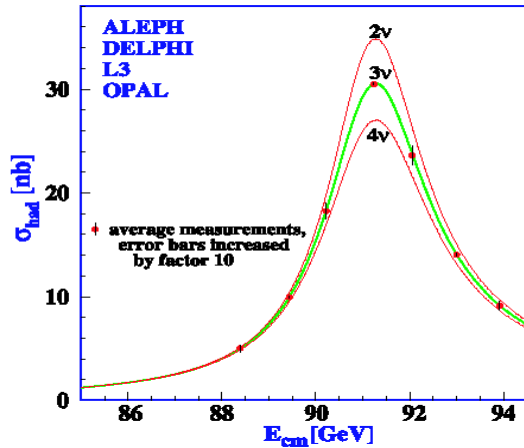
 - 2004.1 OECD閣僚級会議声明 リニアコライダーの意義、財政当局関与の必要性を認識
 - 2004.8 主加速器の技術を世界統一（北京国際会議） **超伝導技術**
 - 2004.10 高エネルギー委員会声明
 - ILC研究開発に積極的に取り組むことは日本高エネルギー物理研究者の総意
 - 2004.11 ACFA声明：日本がリニアコライダーをホストすることを望む

 - 2005.2 国際設計チーム(GDE)組織開始
 - 2005.12 設計骨子作成
 - 2006.10 日本高エネルギー物理学研究者会議の統一方針：ロードマップ

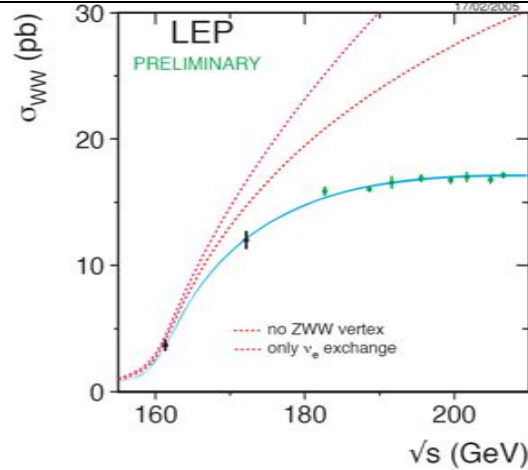
 - 2006年度 基本設計書作成
 - 2007年夏 基本設計書 (Reference Design Report: RDR) 完成
-
- **2008～2012** 産業界のノウハウを取り入れて工業化技術の確立（2010年第一期、2012年まで第二期）
 - 各種調査、学術的意義、社会的意義、技術的進展
 - LHCからのインプット
 - 工学設計書 (Technical Design Report: TDR) 作成

Standard Model @ E ~ 0.1 TeV

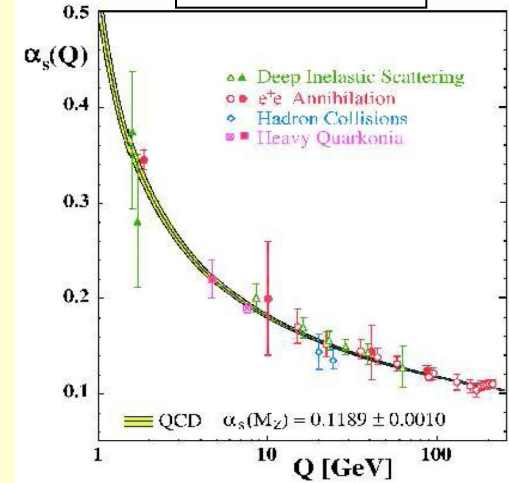
世代数 = 3



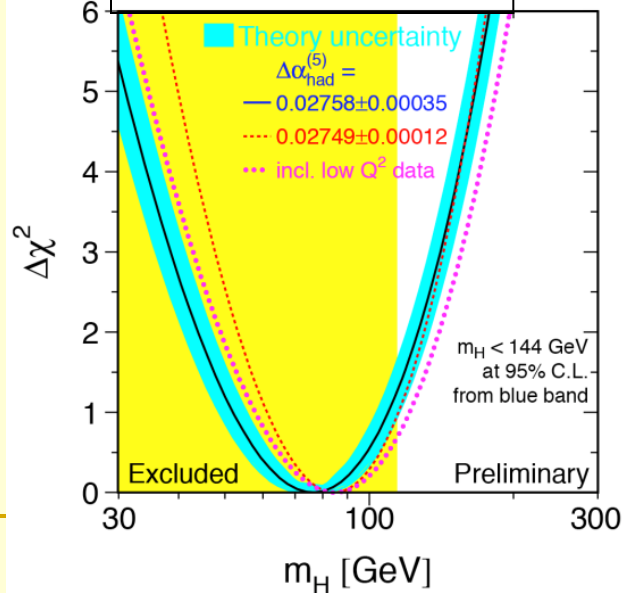
電弱相互作用 : SU(2) x U(1)



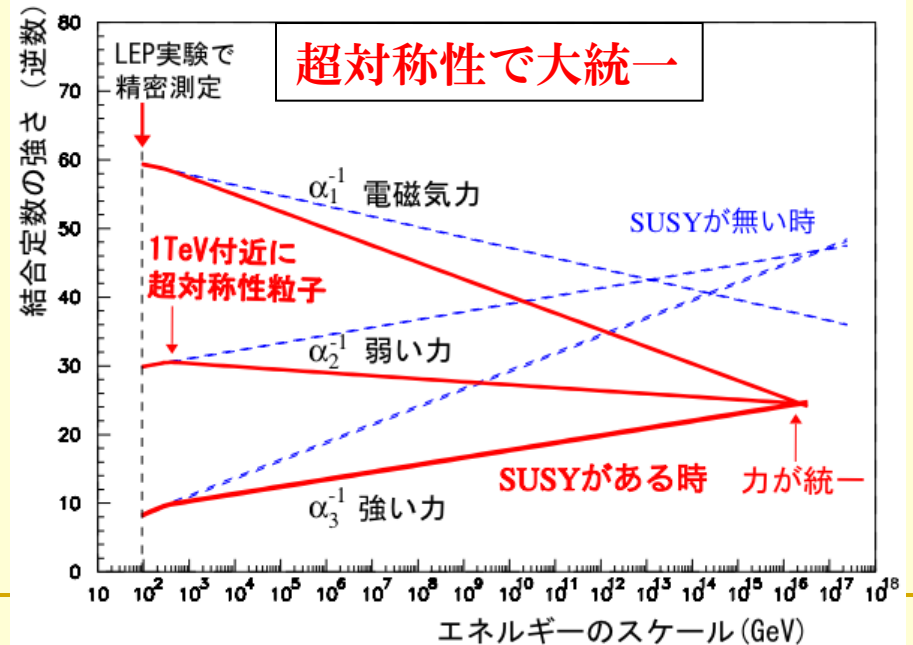
SU(3)



Higgs粒子は軽い



超対称性で大統一



現在の国際リニアコライダー計画の研究開発推進体制

国際純粋・応用物理学会IUPAP

ICFA:国際将来加速器委員会

鈴木 (KEK機構長)議長 研究者を代表し意思決定
5大研究所長と各地域代表

E.Iarocci (伊)

国際リニアコライダー
推進委員会 (ILCSC)

設計研究体制・方針の議論
5大研究所長など

加速器設計(GDE)

加速器設計の実行

測定器設計

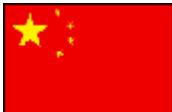
測定器研究の実行

山田作衛 (日本)

アジア

欧州

北米



各国政府

FALC
予算当局委員会

大型加速器計画に関する
財政当局の非公式の情報交換の場
文科省、米国（エネルギー省、NSF等）、
英国、ドイツ、イタリア、韓国等

研究資源部会

現在進行中の設計・開発作業のための
人的・財政的資源を議論する場

加速器 3大技術開発拠点

KEK(日本・アジア)・DESY(独・欧)・FNAL(米・北米)

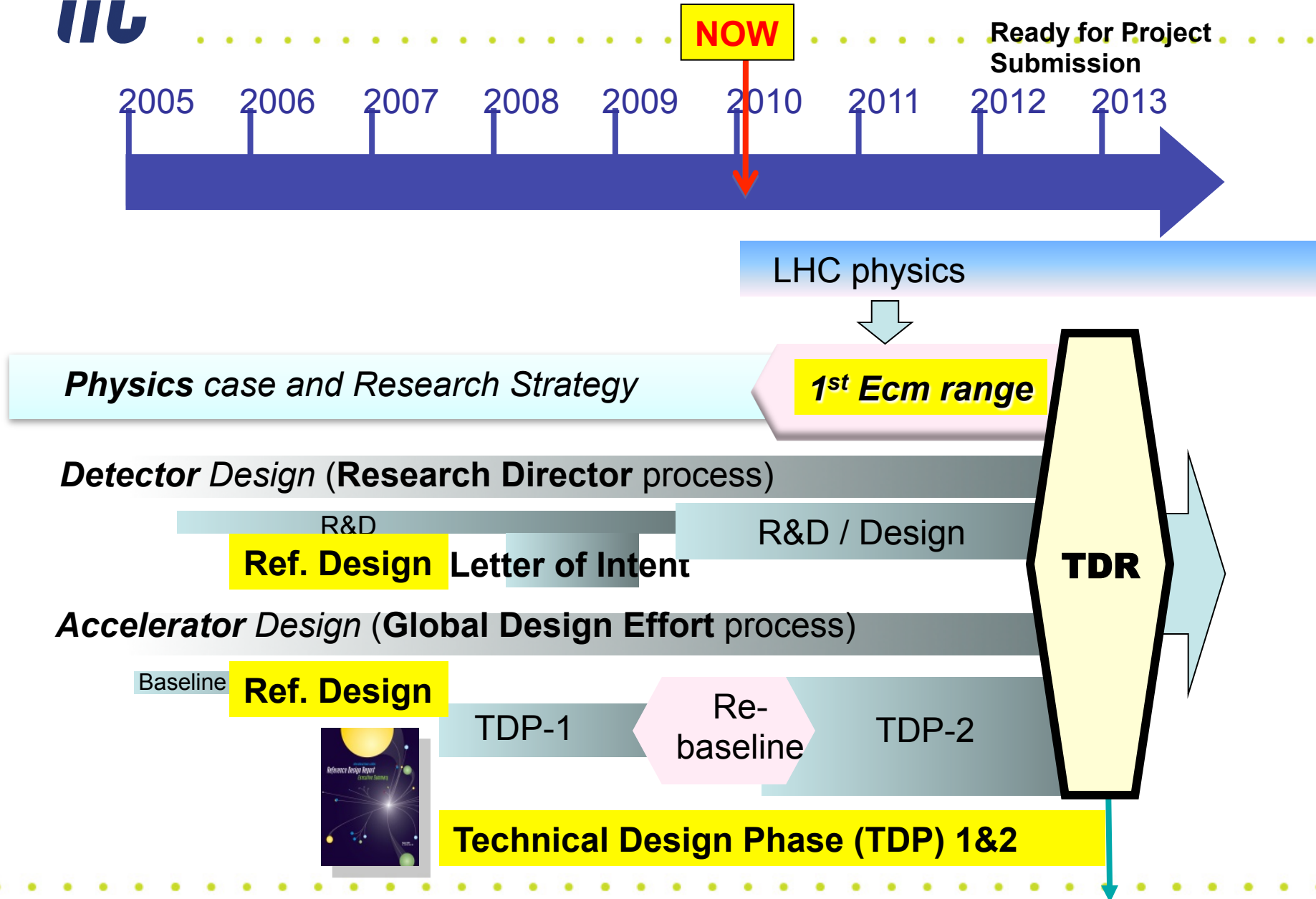
測定器 3大コンセプトチーム & 技術

ILD・SiD・4th & 測定器要素技術 大型国際共同G





ILC Technology-Driven Timeline



ILC Reference Design Report (2007 Aug.)

<http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>



物理

加速器

測定器

Signup

世界

約1800名

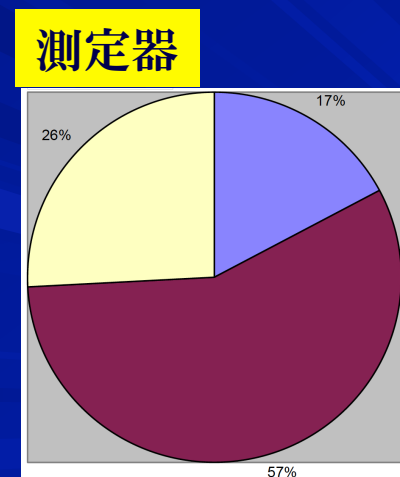
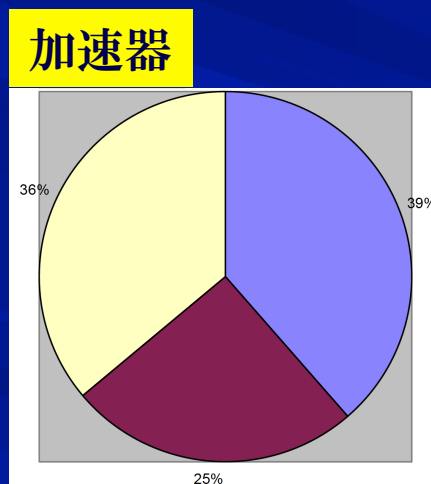
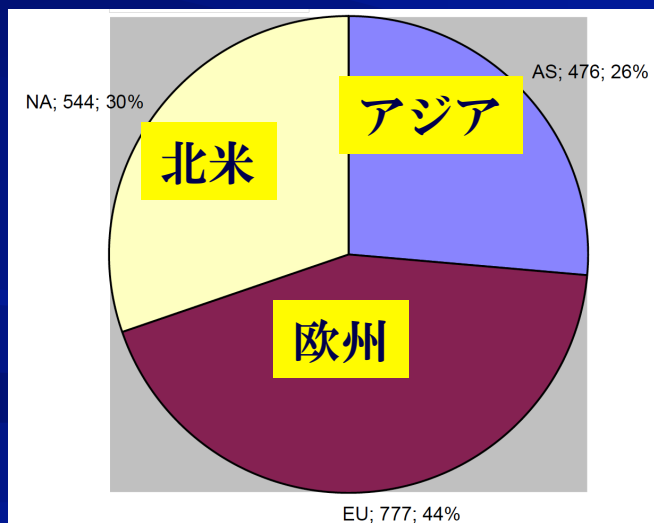
325機関

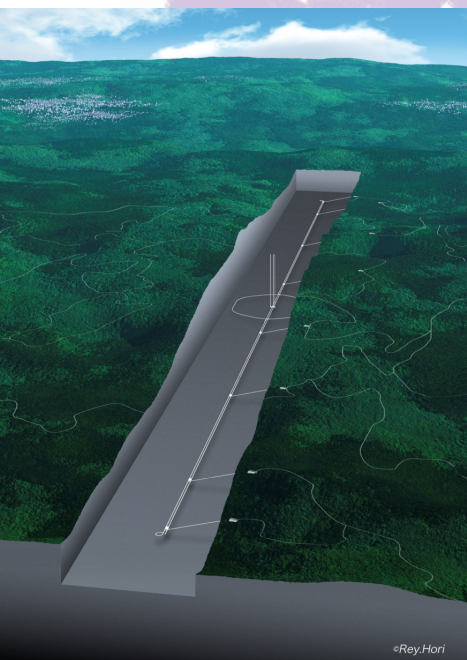
40力国

日本

208名(2位)

42機関





©Rey.Hori



Site example studies

諸条件

電力（特高送電線・電力潮流安定性）

地質（特に活断層がないこと、振動が小さいこと等）

アクセス・輸送

etc.

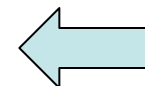
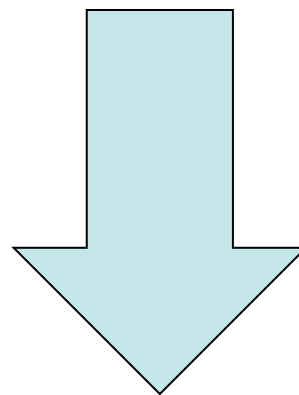
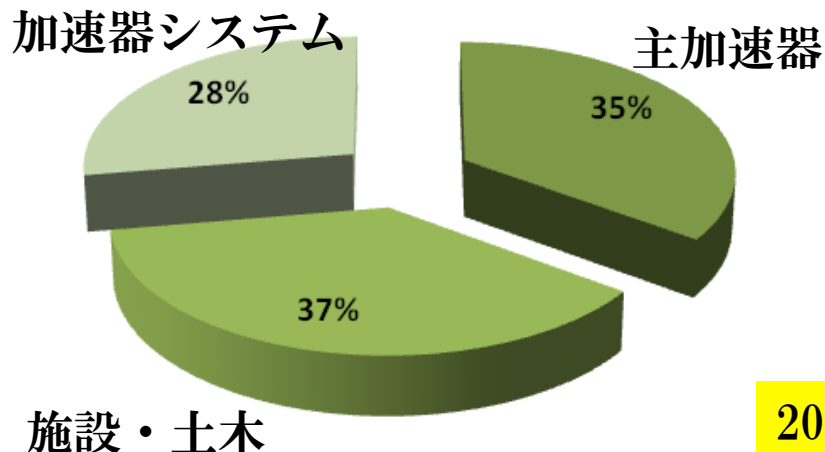


Reference Design (2007) cost estimate

For $E_{cm}=500\text{GeV}$ machine

- Estimated cost (2007) ~6.7 Billion ILCU*
 - 4.9 Billion ILCU shared
 - 1.8 Billion ILCU site-specific

1 ILCU (ILC unit) = 1 \$ = 1/1.2 Euro = 116.667 Yen (正確には1 Euro = 140 円で換算)



LHCの初期成果
製造技術向上
設計改良

2008-2012 Technical Design Phase

コストダウンと精度向上

計画の流れ

設計の完成
製造技術確立

基本仕様決定

基本設計

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

2008

現在
5年間

第一次コスト試算

コスト削減

生産技術

CERNのLHC実験の
成果をふまえて

工学設計

2012

政府間協議

地点調査
環境アセス

201X年

資金分担

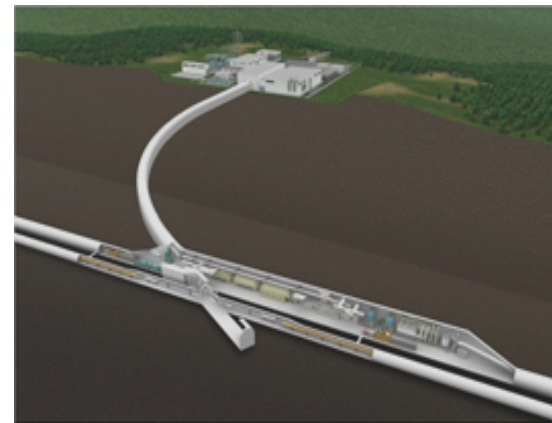
サイト決定

国際研究所

国際研究所設立

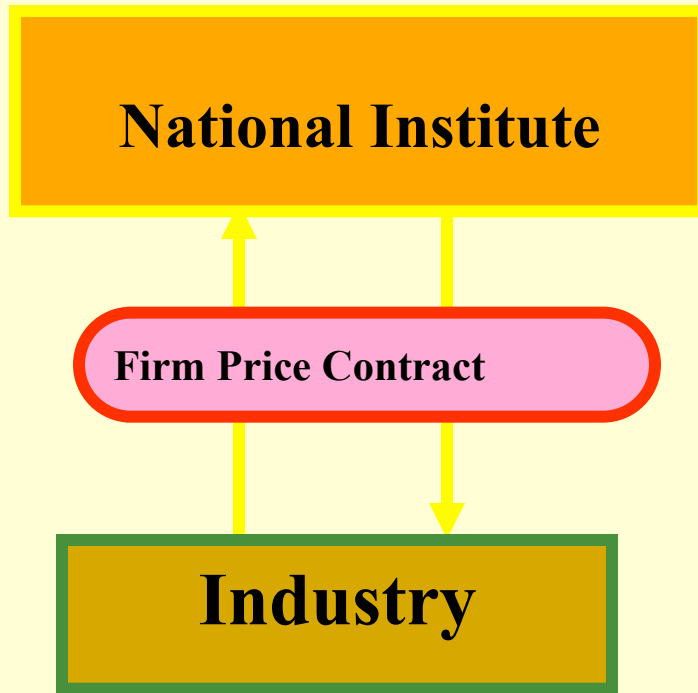
建設（～7年）

運転・実験（10年以上）

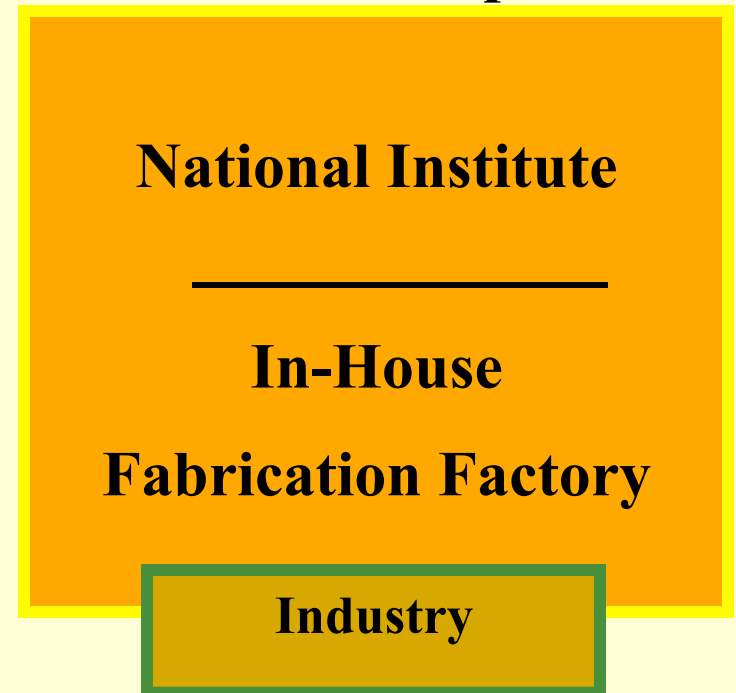


先端加速器技術開発における産学連携形態の違い

Japan



North America and Europe



産学のより緊密な連携
協同作業が必須

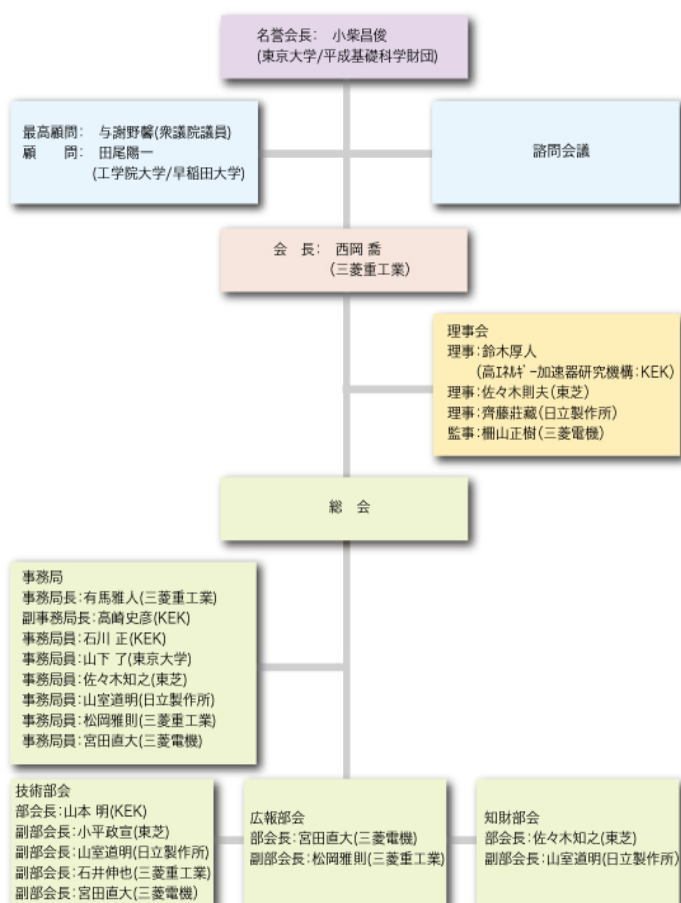
先端加速器科学技術推進協議会

<http://www.aaa-sentan.org>

会員数 一般会員 67社(三菱重工業、東芝、日立製作所、三菱電機 他)

特別会員 35機関(KEK,東京大学、京都大学、理化学研究所、原子力研究開発機構、他)

平成21年5月時点



設立総会にて



第1回先端加速器シンポジウム



第10回技術部会

(～ 3週間に1回の頻度で開催)

地方の研究会の状況

● 福岡・佐賀地方

- ◎ 先端基礎科学次世代加速器研究会(2007年末より)

- ◎ 福岡・佐賀両県、大学、市民団体等

- ◎ 年数回の研究会を開催

● 東北地方

- ◎ 東北加速器基礎科学研究会（2009年4月より）

- ◎ 東北経済連合会、大学、自治体等

- ◎ 理解促進、啓蒙活動等

基礎科学・ILC計画への理解促進へ：国会議員による勉強会

2006年 6月15日 議員連盟の発足（自民党の有志による）

2008年 7月31日 超党派議員連盟の発足
（自民・民主・公明・共産・社民・国民）

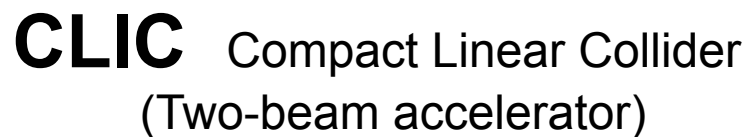
会長	与謝野馨
会長代理	鳩山由起夫
幹事長	河村建夫、野田佳彦
事務局長	田村憲久、内藤正光

発起人

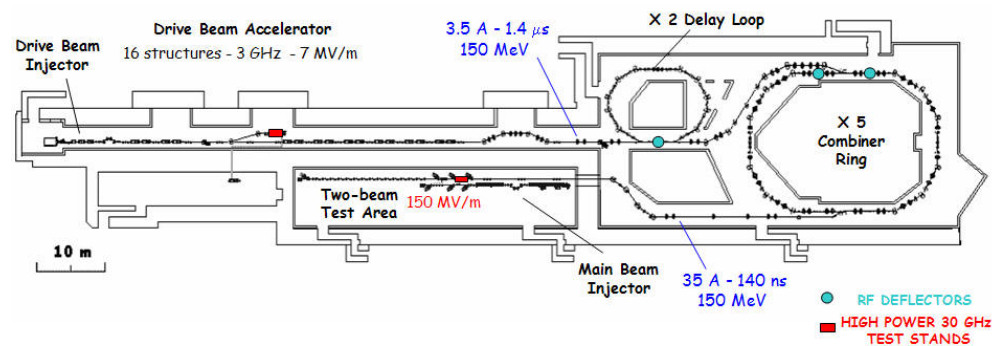
与謝野、河村、保利、尾身、森英輔、田村（自民）
鳩山、野田、高木、大畠、内藤（民主）
斎藤（公明）、吉井（共産）、亀井郁夫（国民）、
日森（社民）



KEK視察



Aiming for Multi-TeV Linear Collider



まとめ

- ILC計画の概要
- 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

2010ー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）
→ LHC results to come soon !



Backup

Discovery & Principle determination potentials at ILC

質量の起源の発見

自然が超対称性であれば
その原理の発見

さらに上の世界

Discovery of Self-coupling

Bottom Yukawa
Charm Yukawa

Heavy Higgs

Total width

Invisible width

2HDM?

Strong EWSB

No other source of mass?

Top quark anomaly

SUSY mixing

MSSM? NMSSM? Beyond?

LSP darkmatter

SUSY breaking

SUSY GUT

SUSY CPV

SUSY LFV

Extra dimension Principle

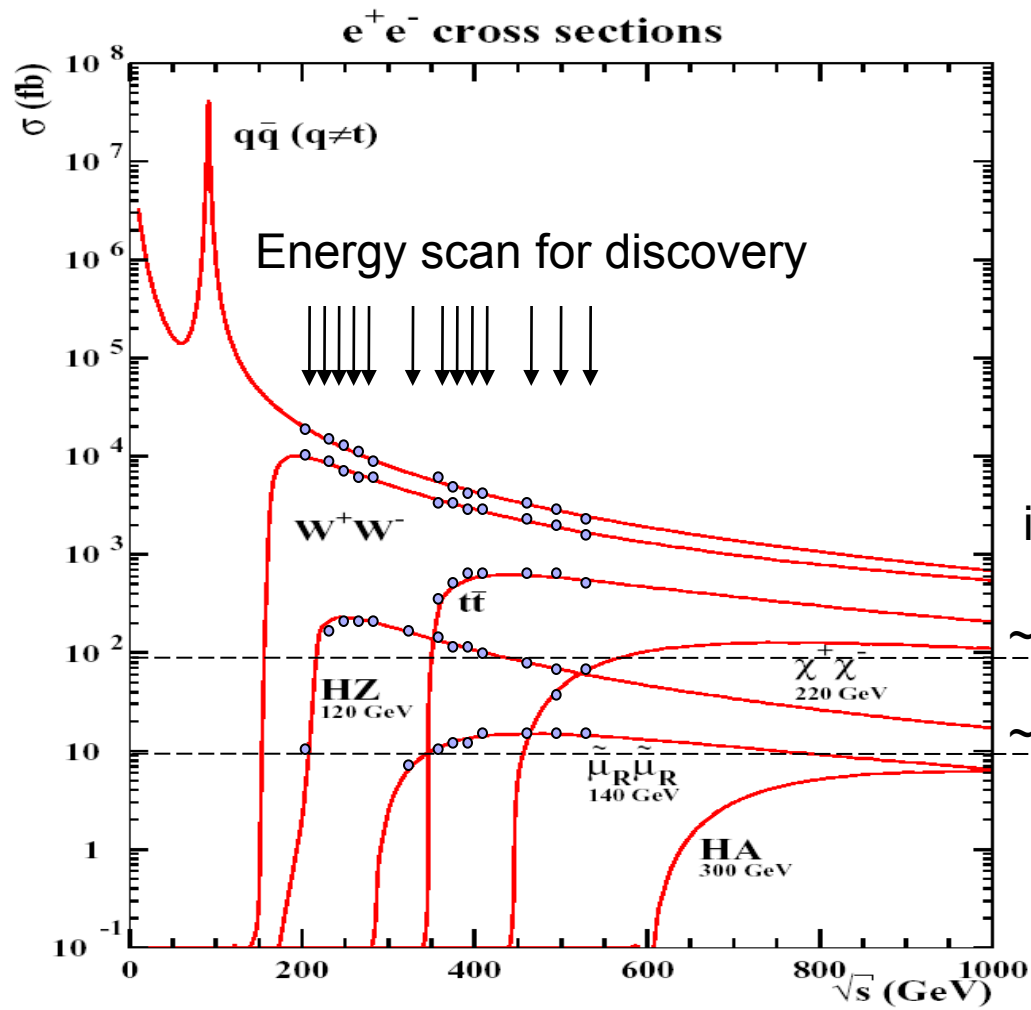
Discovery of Graviton

N-Dimensions & Scale

Z'

Little Higgs

etc.

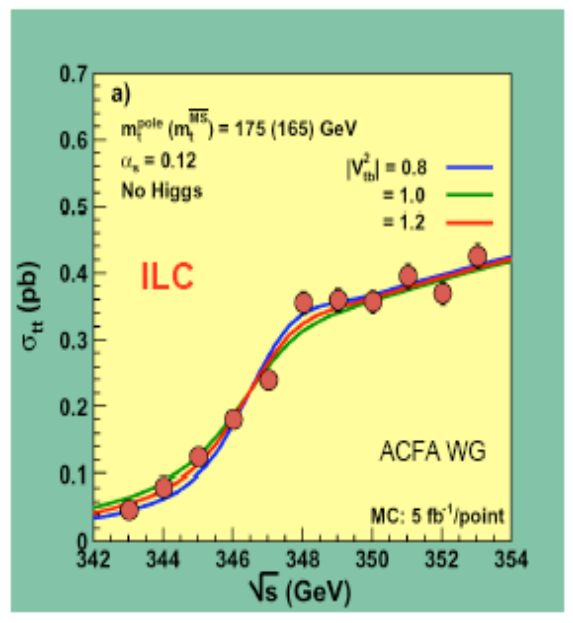


Energy Scan

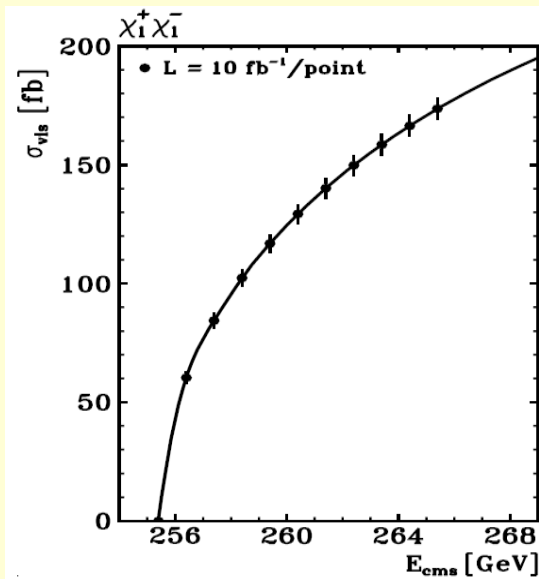
Tunable Beam Energy

Precise mass, Spin and Coupling constants Determination

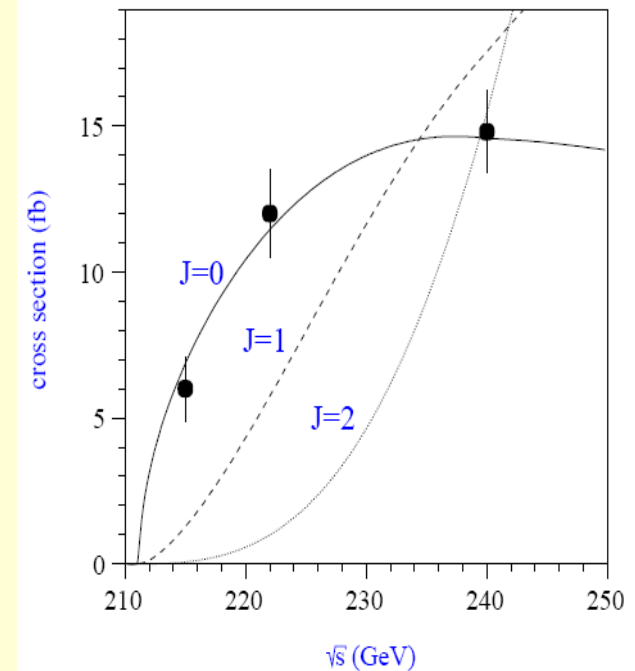
Top quark



SUSY



Higgs $e^+e^- \rightarrow ZH$



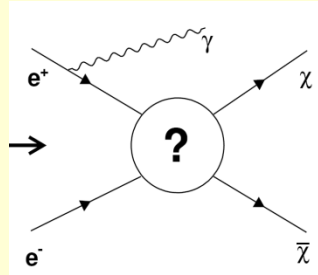
Mass resolution typically 50 – 100 MeV

Things we'll never do with a hadron machine:

Reconstruct the invisible

Model-independent
WIMP reconstruction:

$$M_{recoil}^2 = s - 2\sqrt{s}E_\gamma$$



Mass reconstruction of
invisible Higgs:

$$m_H^2 = (p_{\text{visible}} - p_{\text{initial}})^2$$

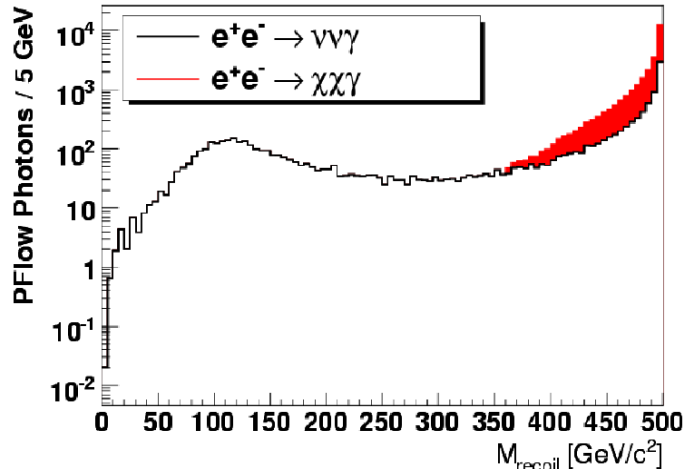
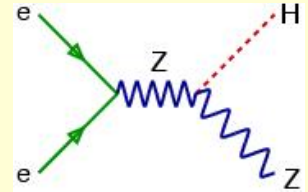
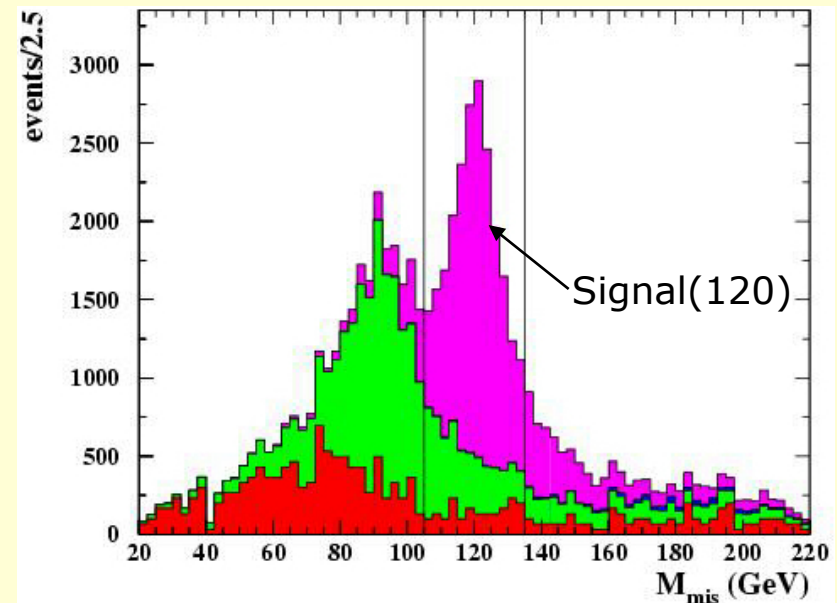


Figure 4: Recoil mass distribution for a 180 GeV Spin-1 WIMP.

[List et al, Birkedal et al]



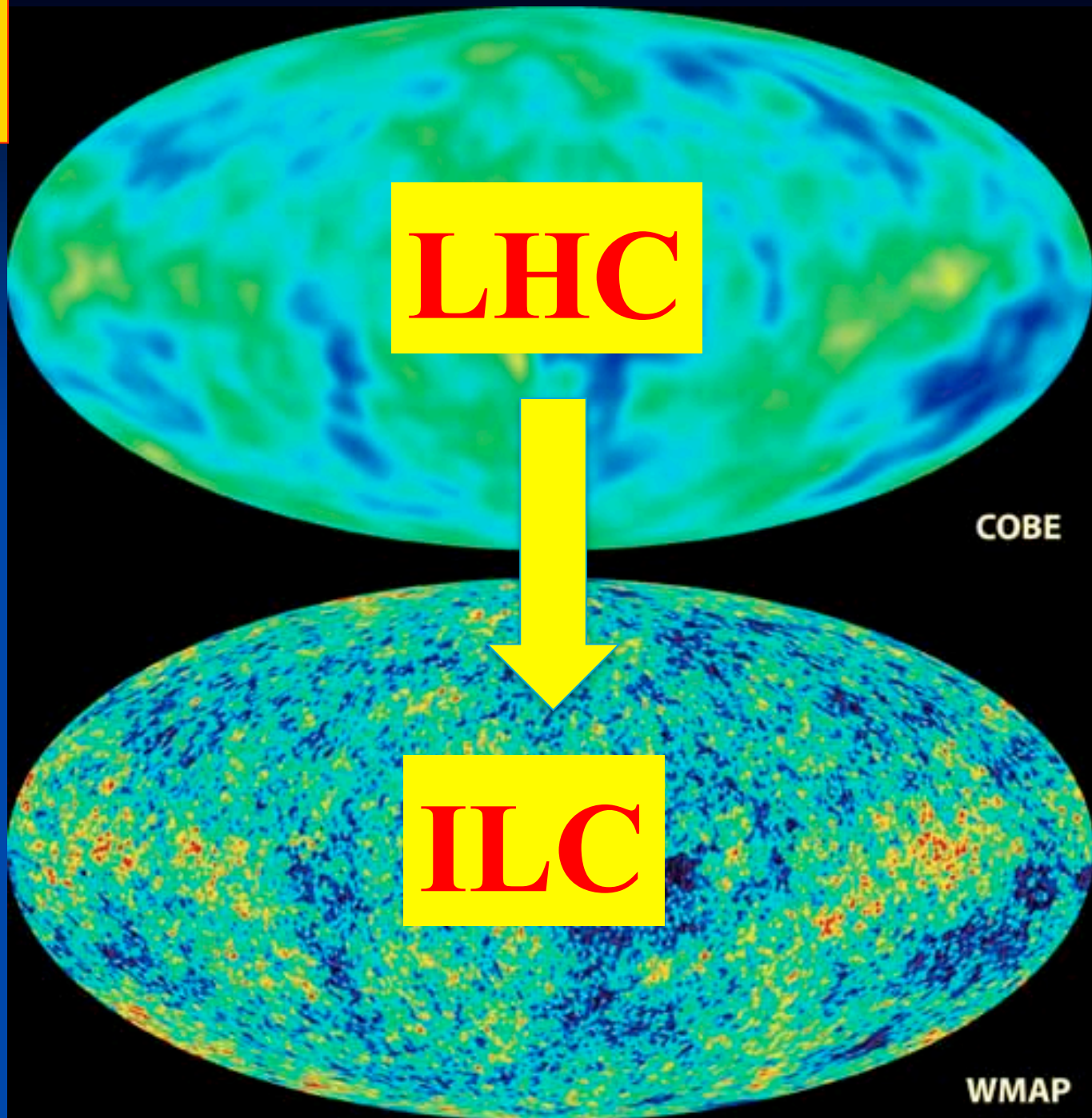
[Schumacher]

高精度

COBE 1990年
角度分解能 = 10°
温度の揺らぎ = 10^{-5} 度

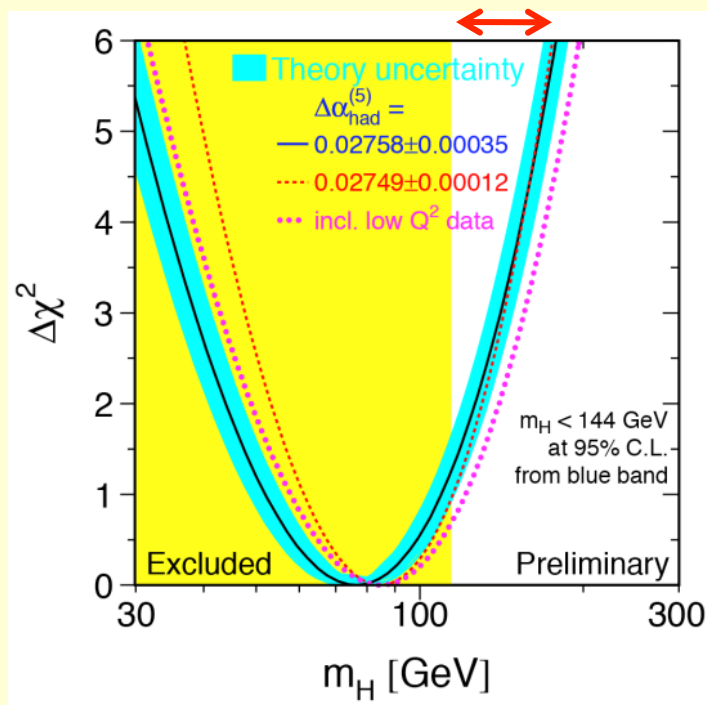


WMAP 2003年
角度分解能 = $10'$
宇宙年齢 = 137 ± 2 億年

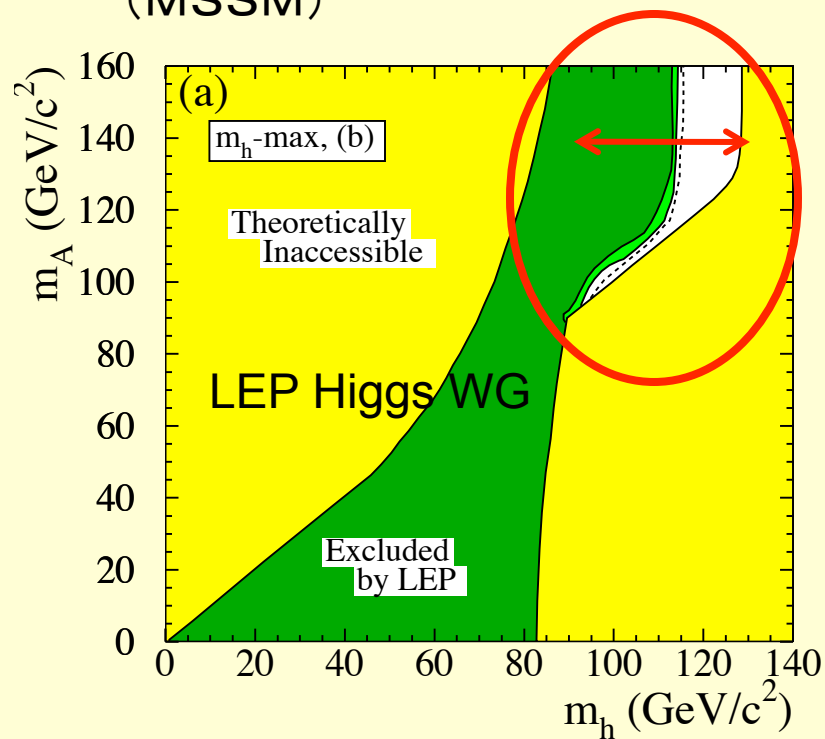


ヒッグス粒子の質量範囲

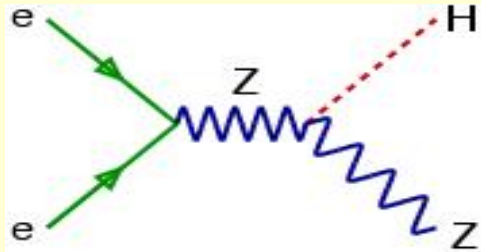
標準理論 114 GeV ~ 150 GeV



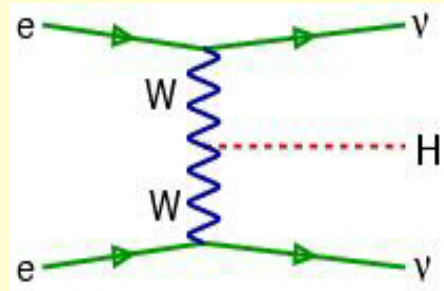
超対称性理論 90 GeV ~ 130 GeV (MSSM)



Higgs Physics

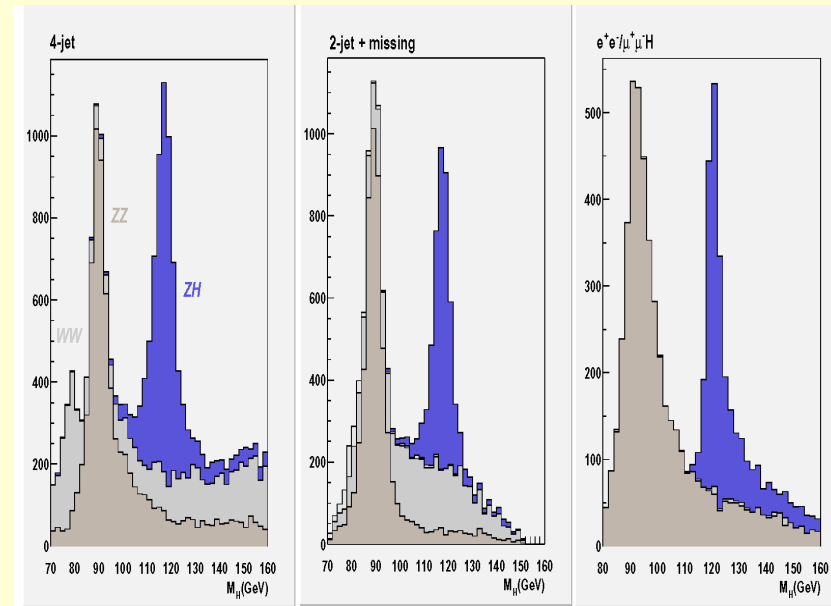
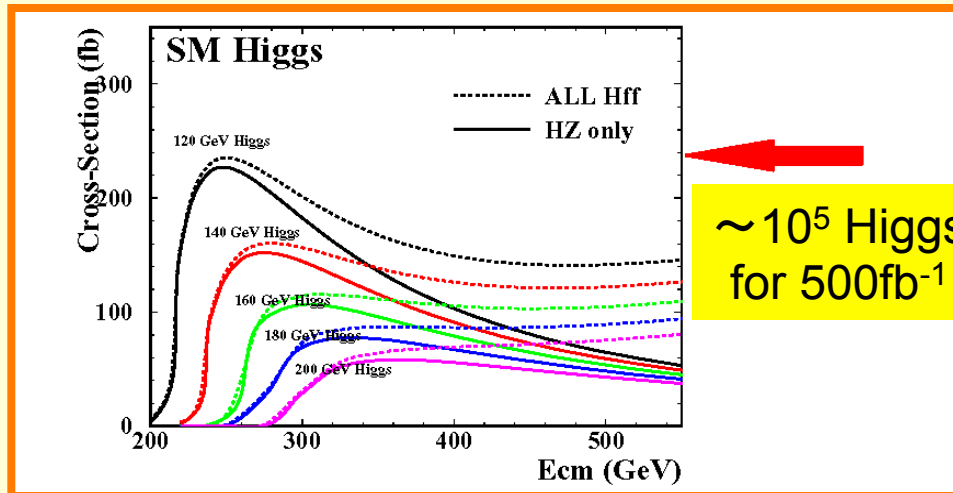


Higgs-strahlung



WW fusion

ヒッグス粒子ファクトリー

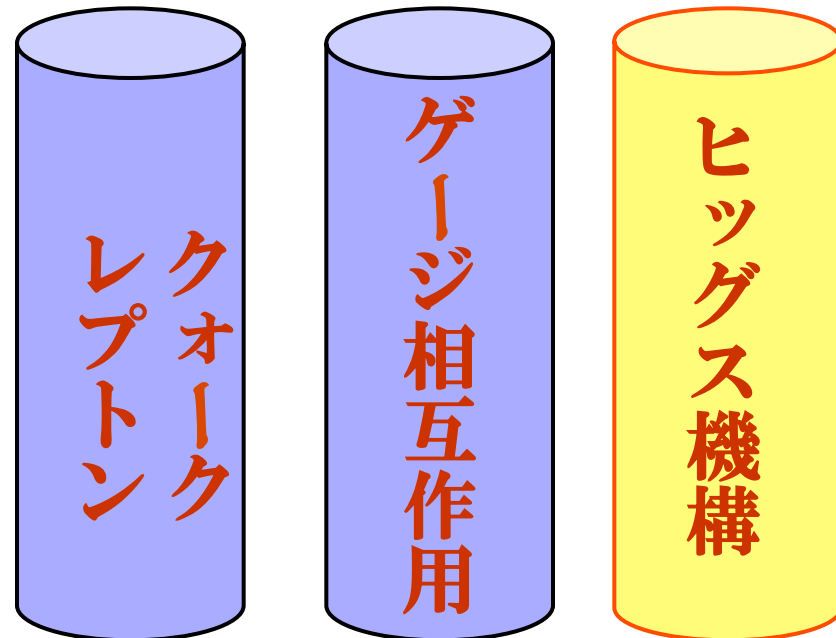


Higgs Sector is unknown

Electroweak fit at LEP/SLC/Tevatron tells
At least one should exist below 150 GeV
which couples to Z and W

Almost **NOTHING** is known

- NOTHING is known for **Yukawa-coupling**
- NOTHING is known for **self-coupling**
- Various Models
 - Single Higgs? Two Higgs field doublets?
 - Additional singlet? Triplet?
 - SUSY? Extra-dimension?
 - Composite?
 - Type-I? Type-II?
- Why top is so heavy? Special for 3rd generation?
- **CP-violation** in Higgs sector?
- More exotics?



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

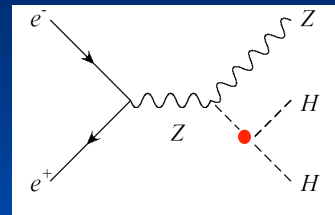
Tau

寿命 Γ_H

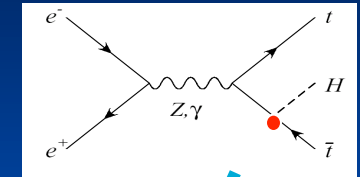
自己結合

CP mixing

自己結合 $\Rightarrow$
真空での凝縮

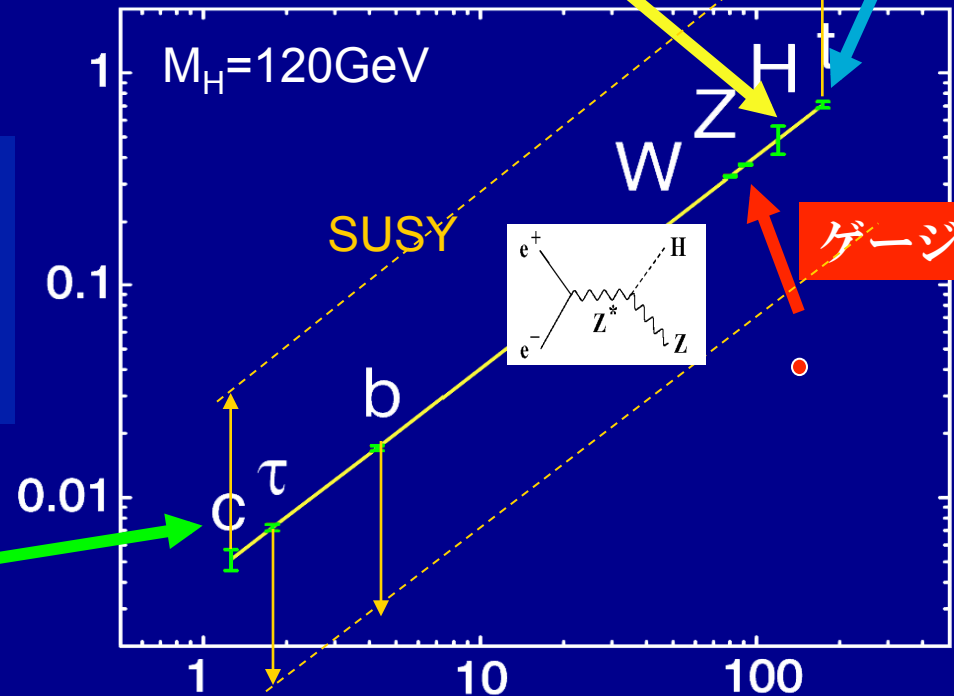
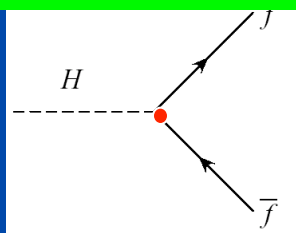


トップ湯川結合



結合定数

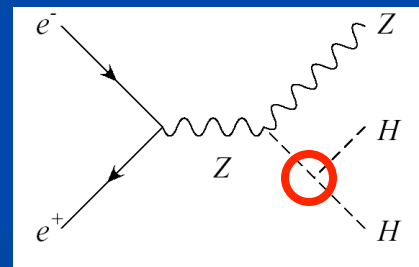
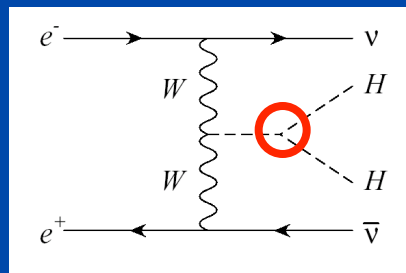
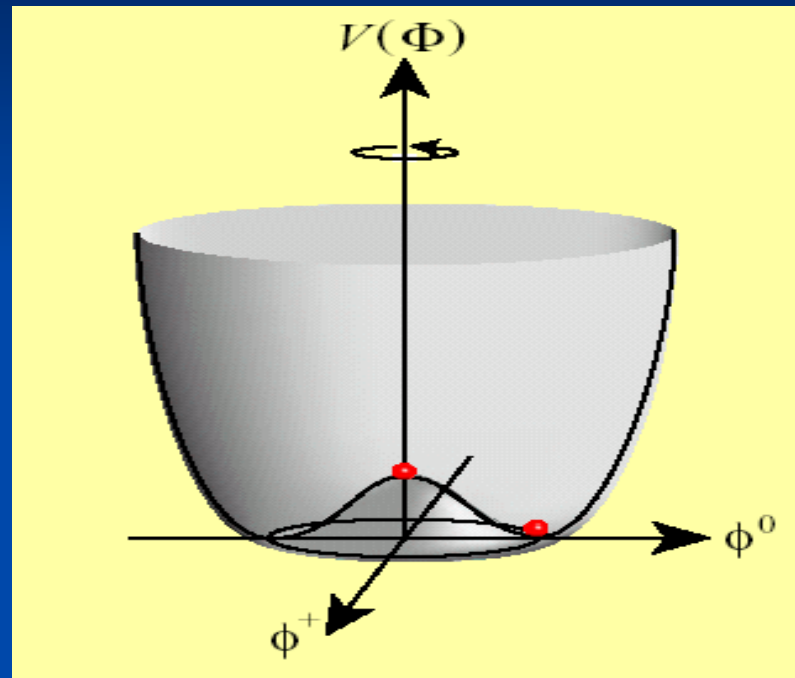
湯川結合



質量[GeV]

Higgs potential = Origin of EW Symmetry Breaking

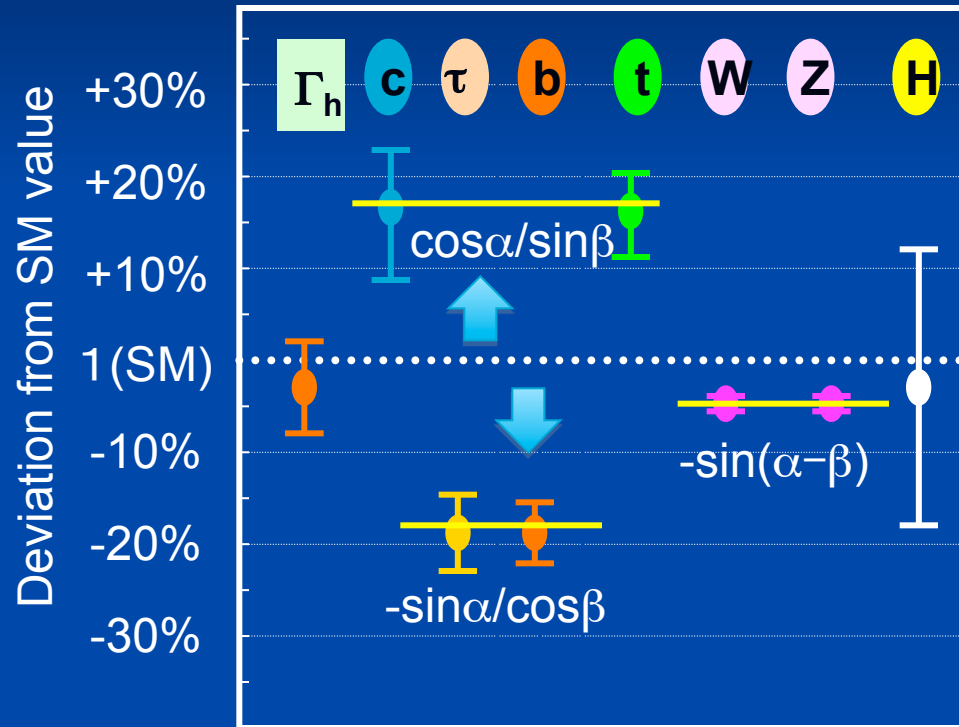
自己結合力



$$\delta\Lambda/\Lambda \sim 10 - 30 \%$$

更に先へ

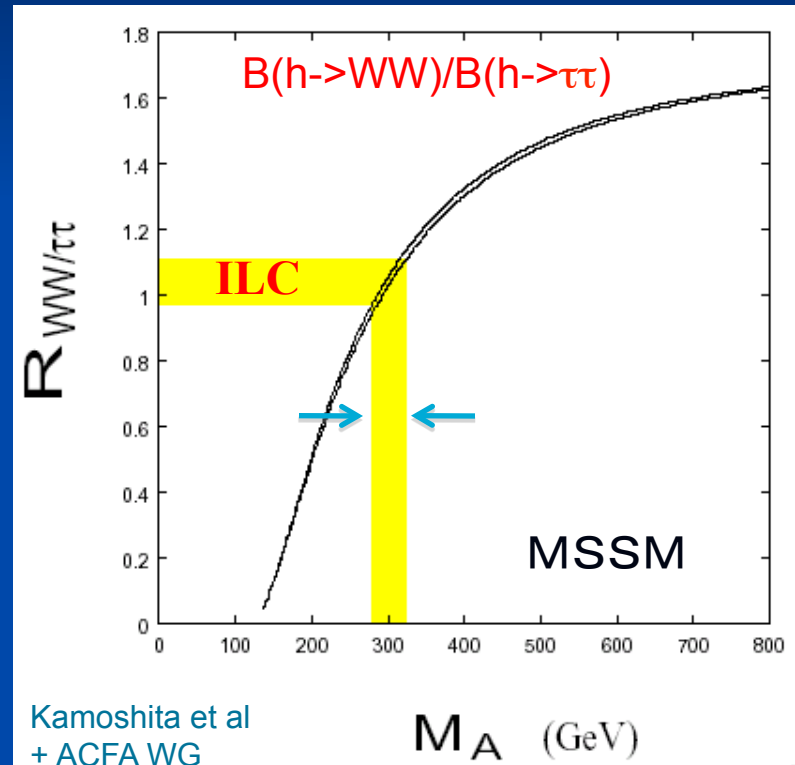
SUSY / Multi Higgs



Model Independent Analyses

ILC Higgs

重いヒッグス粒子 質量領域の決定



新粒子ファクトリー

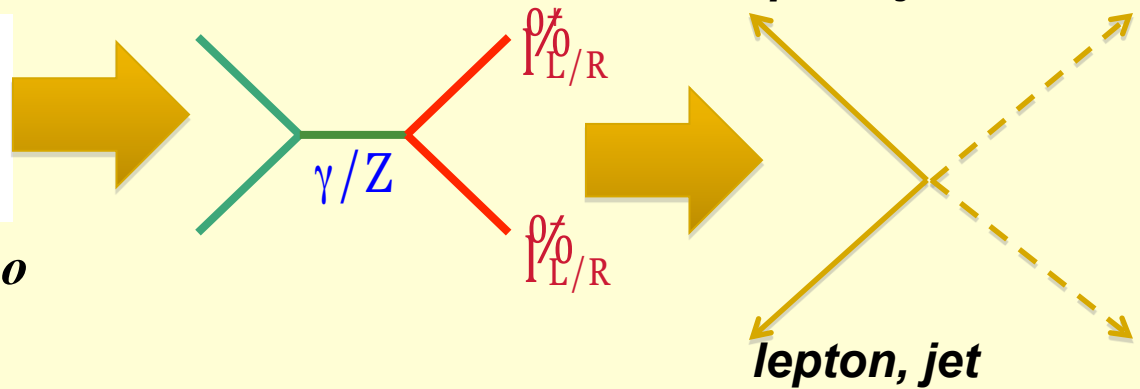
超対称性粒子

$$e^+e^- \rightarrow \tilde{e}_R\tilde{e}_R, \tilde{e}_L\tilde{e}_L, \tilde{e}_R\tilde{e}_L, \tilde{\nu}_e\tilde{\nu}_e$$

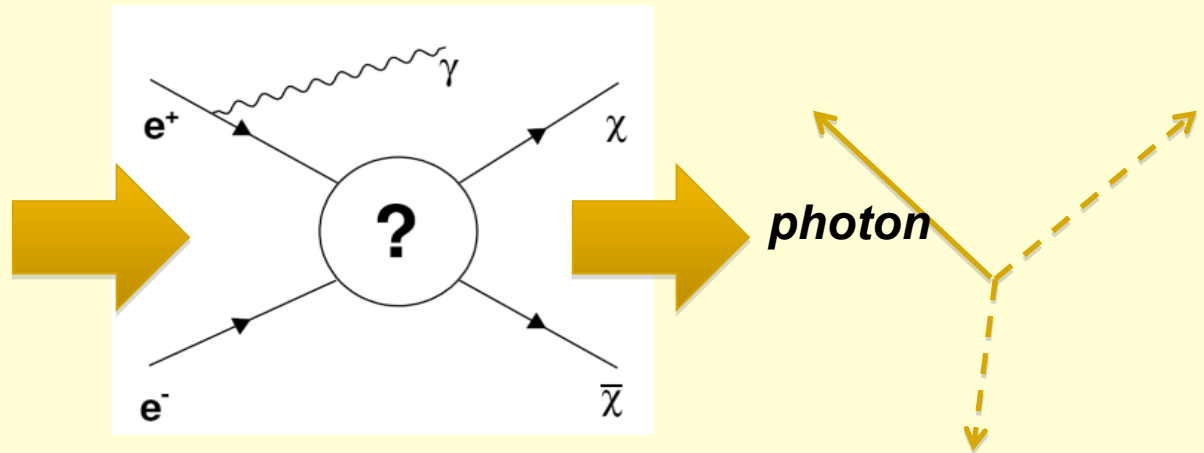
$$e^+e^- \rightarrow \tilde{\mu}_R\tilde{\mu}_R, \tilde{\mu}_L\tilde{\mu}_L, \tilde{\nu}_\mu\tilde{\nu}_\mu$$

$$e^+e^- \rightarrow \tilde{\tau}_1\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2\tilde{\tau}_2, \tilde{\tau}_1\tilde{\tau}_2, \tilde{\nu}_\tau\tilde{\nu}_\tau$$

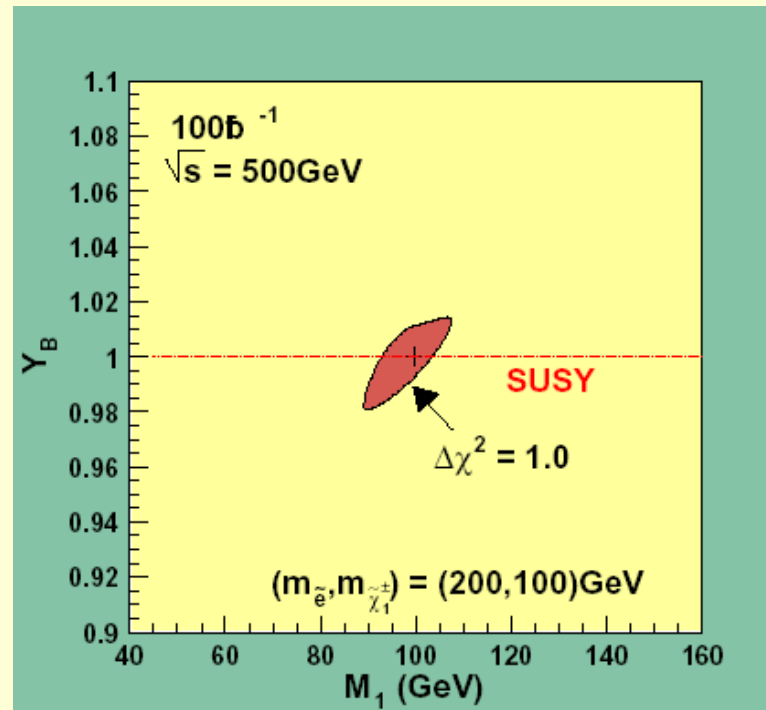
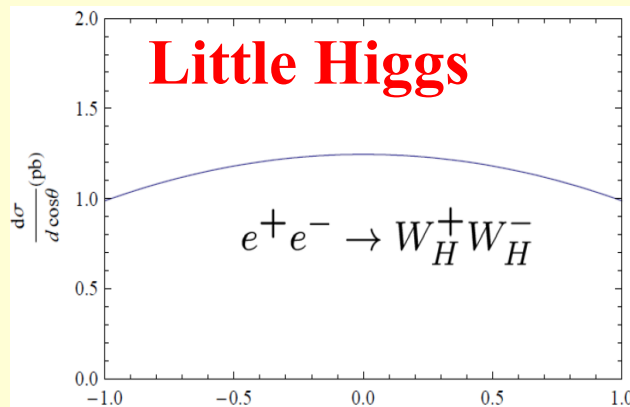
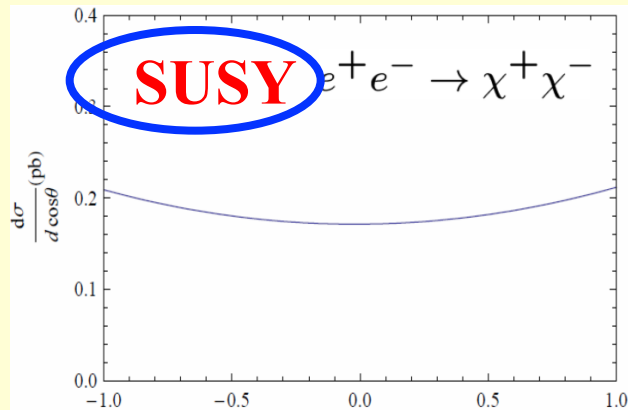
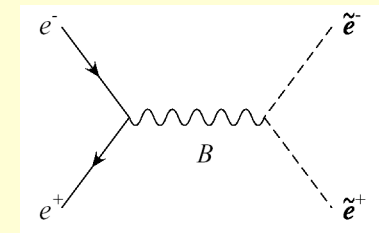
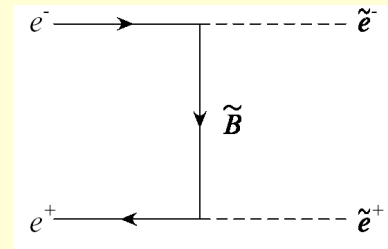
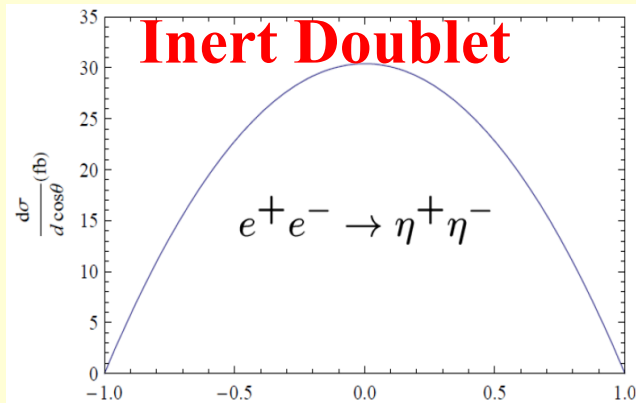
Neutralino / Chargino



ダークマター対生成



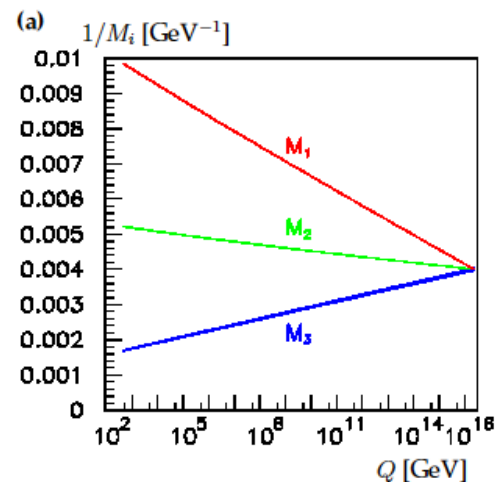
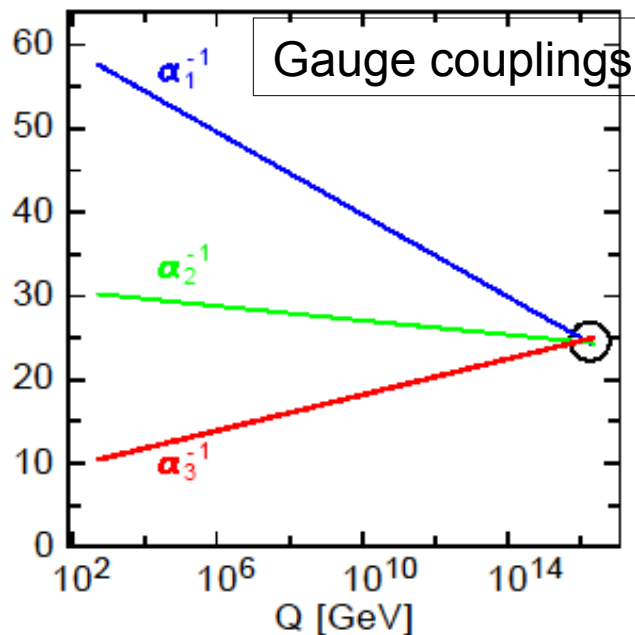
超対称性原理の発見



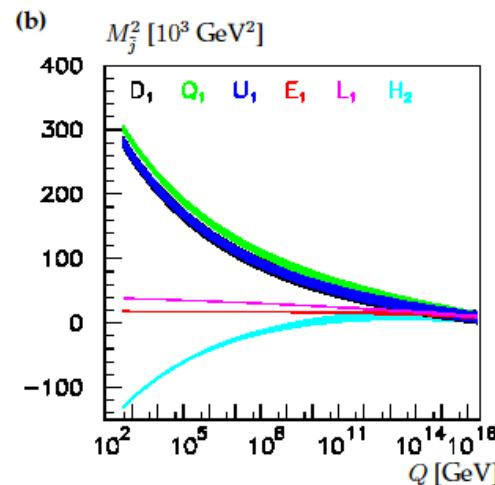
[Nojiri, Fujii, Tsukamoto]

[N.Okada, etal]

GUT : 大統一理論



Gaugino masses



Scalar masses

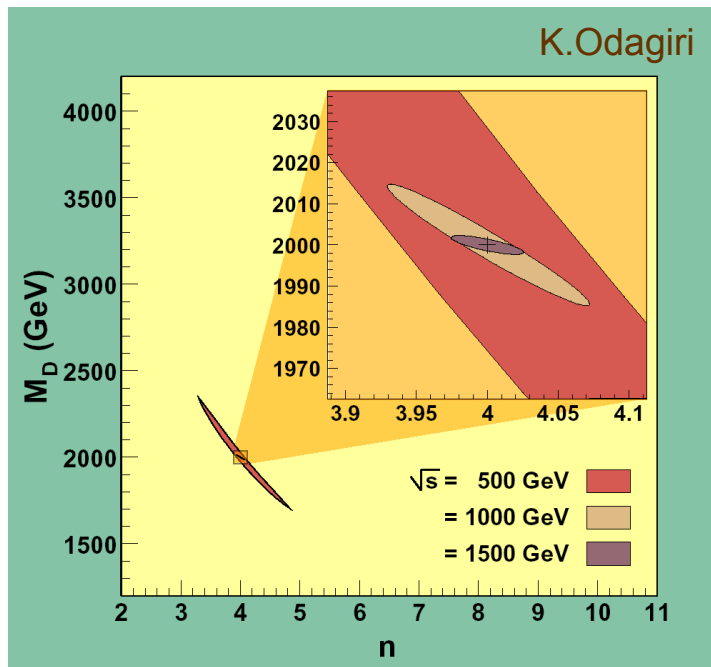
LHC+ILC
Combined analysis

SUSY breaking scenario

Super-Gravity, Gauge-Mediation,,,

Many Other Discoveries

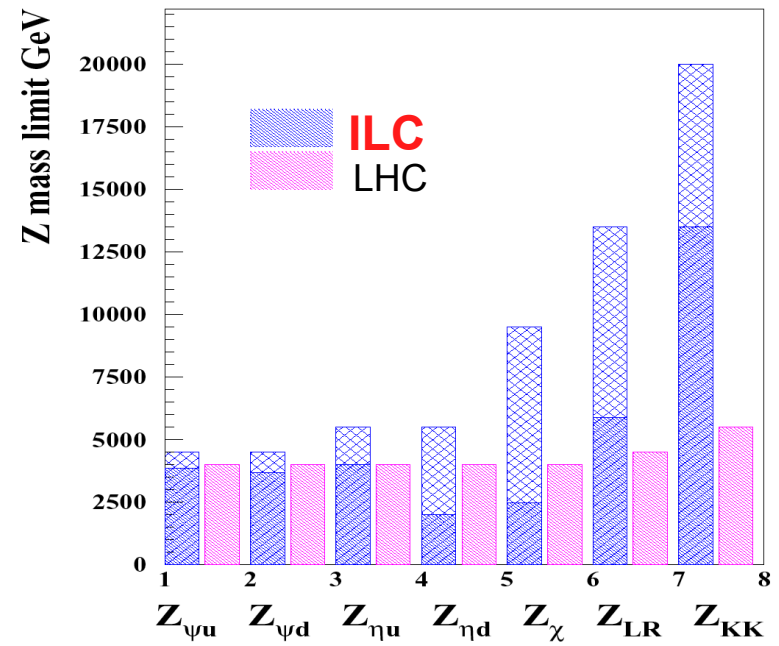
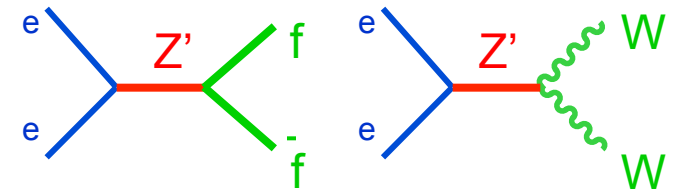
Large Extra Dimension



of extra-dimensional space

The size and number of the extra-space to be determined at ILC.

Z' Mass Reach



Z' models

Richard 2003

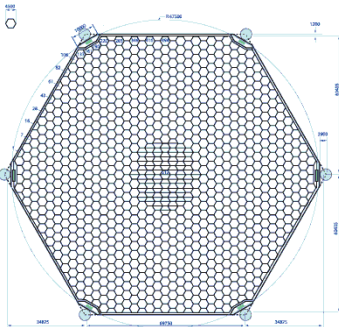
CALorimeter for the LInear Collider Experiment



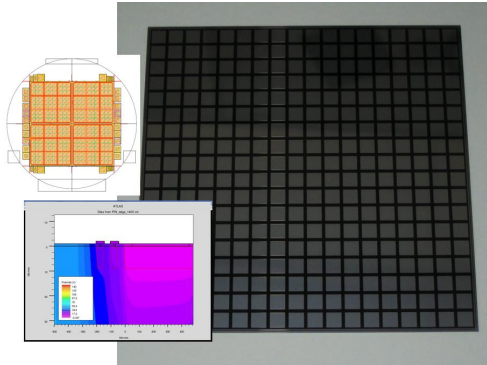
281 physicists/engineers from 47 institutes and 12 countries coming from the 3 regions (Asia, America and Europe)

Electromagnetic CAL :

- Scintillator-Tungsten
- Silicon-Tungsten
- MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)

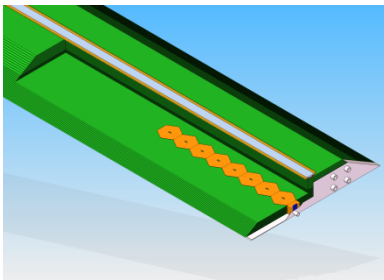
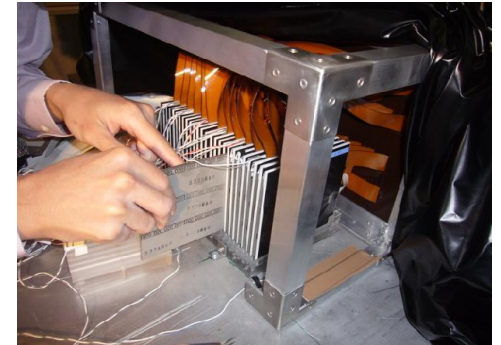


Si sensor prototype with 5x5mm² pad size

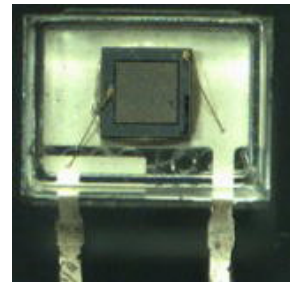


Hadron CAL :

- Analog HCAL (scintillator-based)
- Digital HCAL



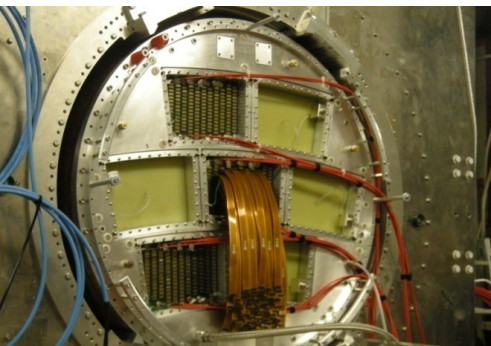
MPPC prototype



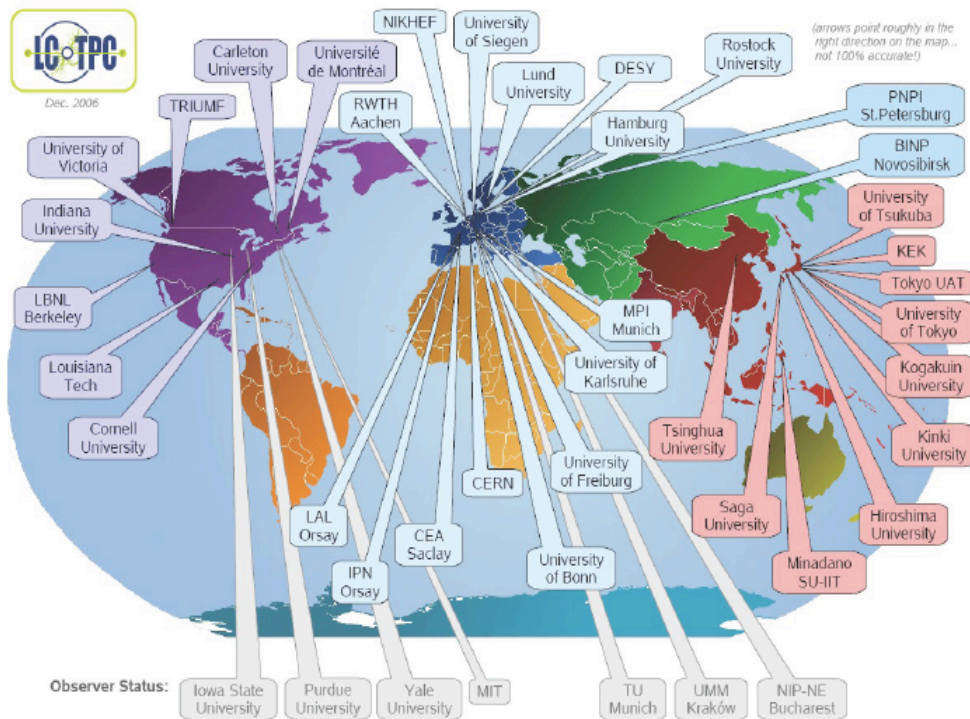
TPC



LCTPC Collaboration



テスト・ビーム (DESY)



TIPP09
March 12, 2009

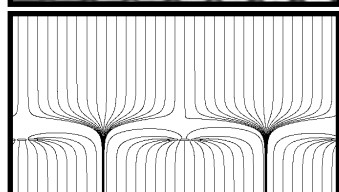
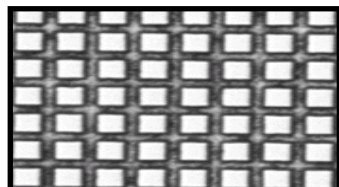
2



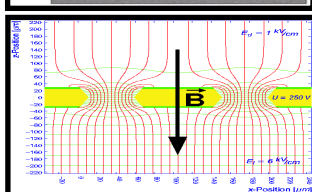
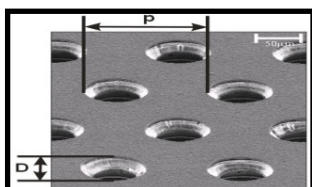
K. Dehmelt



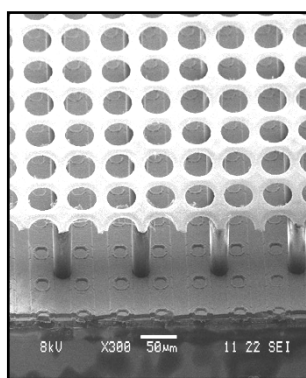
MicroMEGAS



GEM



Ingrid TimePix

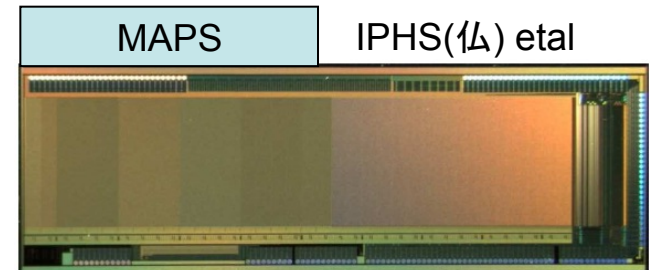
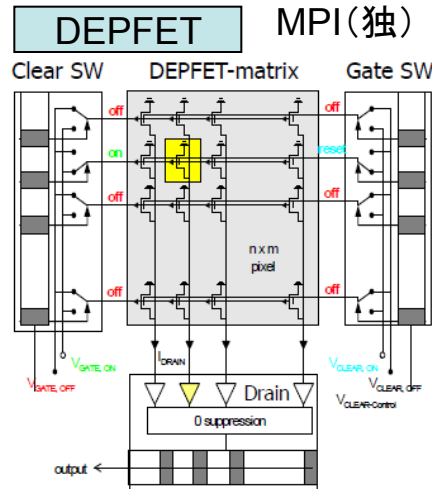
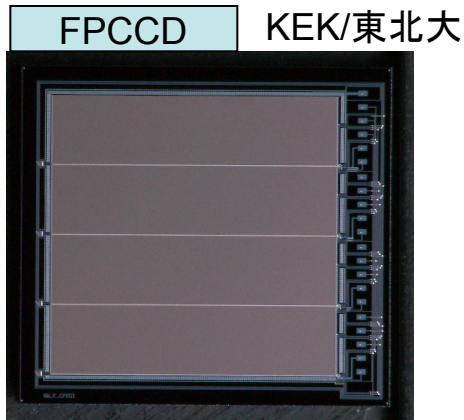


10カ国
32機関
約100名

Vertex detector • Challenges

- Various Sensor technologies
 - Fine pixel CCD (FPCCD)
 - Monolithic active pixel sensor (MAPS)
 - Depleted FET sensor (DEPFET)
 - 3D pixel sensors (SOI)

- High hit rate by e^+/e^- pair background
 - High readout speed ($\sim 20/1\text{ms}$)
 - Very fine pixel size ($\sim 5 \times 5 \mu\text{m}^2$)
- Very low mass ($0.1 - 0.2 \%X_0/\text{layer}$) wafers and support structure
- Excellent spatial resolution ($\sigma < 3\mu\text{m}$)



- Possible spin-offs
 - X-ray astronomy
 - Protein crystallography
 - Electron microscopy
 -

