



将来コライダー (ILC, FCC-ee) でできる先端素粒子物理研究



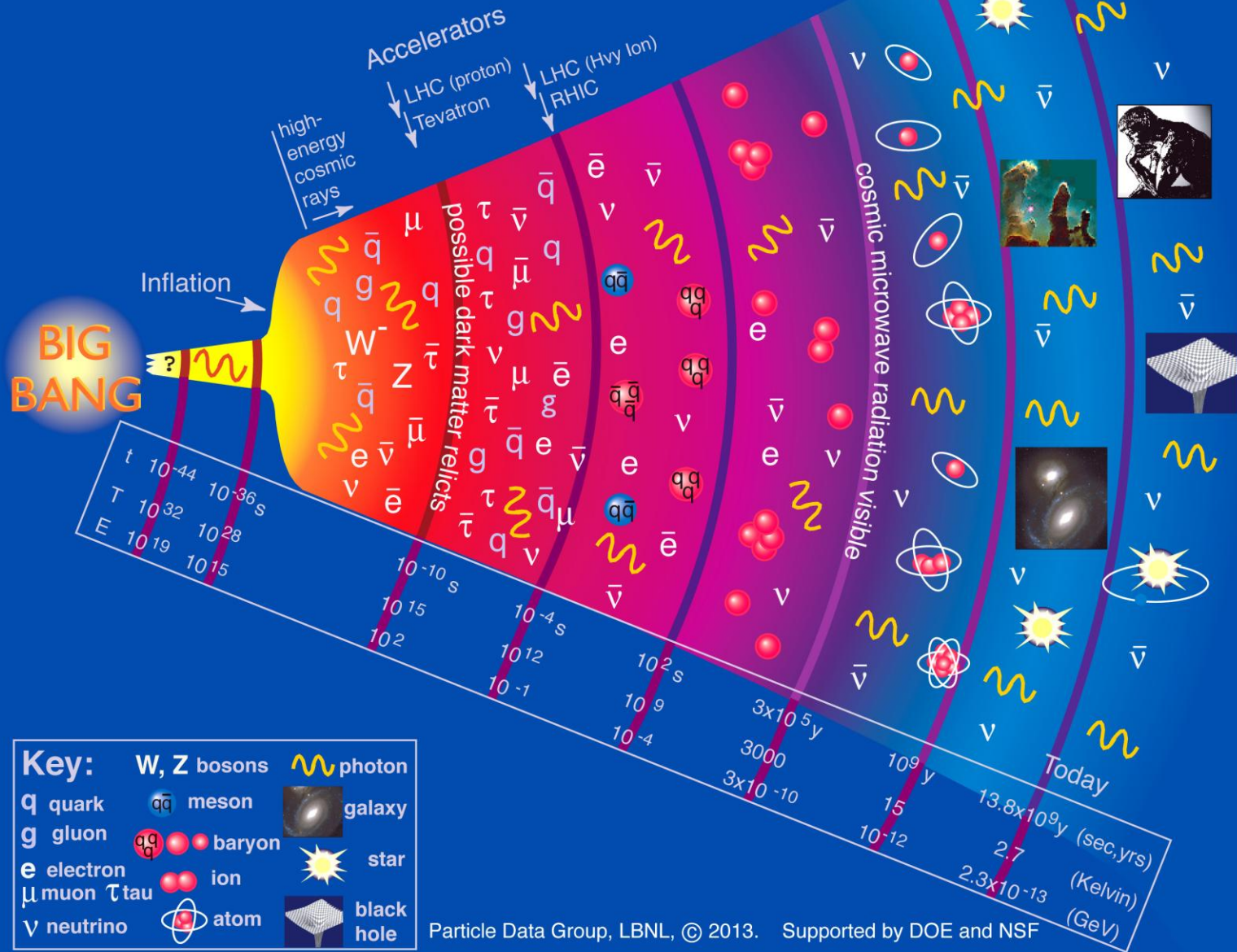
末原 大幹

もくじ

- Higgs factoryの物理
- Higgs factoryの現状
 - ILC in Japan
 - FCC-ee in Europe
 - そのほかのHiggs factories
- Higgs factory技術 (あまり時間がないかも)
 - 測定器 (省略)
 - 解析技術

e^+e^- Higgs factoryの物理

History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2013. Supported by DOE and NSF

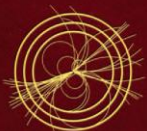
宇宙の「謎」

Questions for the Universe

- 1) Are there undiscovered principles of nature?
- 2) How can we solve the mystery of dark matter?
- 3) Are there extra dimensions of space?
- 4) Do all the forces become one?
- 5) Why are there so many kinds of particles?
- 6) What is dark matter? How can we make it in the lab?
- 7) What are neutrinos telling us?
- 8) How did the universe come to be?
- 9) What happened to the antimatter?

国際リニアコライダー

量子宇宙への旅



international linear collider

PASSPORT

宇宙の「謎」

1. 未発見の根本原理はあるのか？
2. ダークエネルギーとは何か？
3. 時空には余剰次元が存在するのだろうか？
4. すべての力は統一されるのか？
5. 素粒子の種類はなぜこんなに多いのか？
6. ダークマターとは何か？
実験室で作ることはできないのか？
7. ニュートリノは何を教えてくれるのだろうか？
8. 宇宙はどのようにして現在の姿になったのか？
9. 自然界に反物質が見当たらないのはなぜか？

















国際リニアコライダー

量子宇宙の旅

international linear collider

PASSPORT

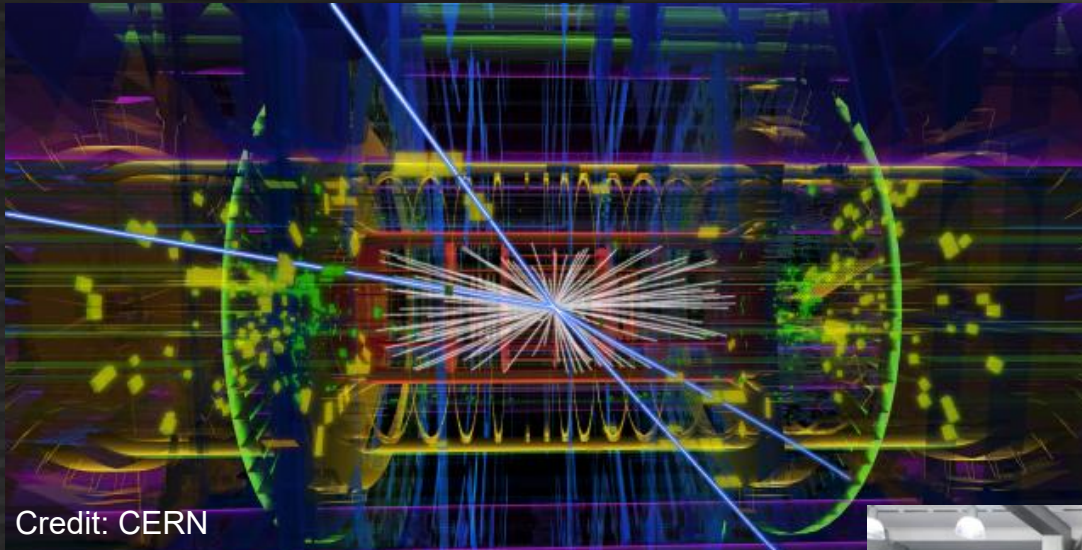
素粒子「標準模型」

物質粒子				ゲージ粒子	
	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	強い力  グルーオン	
	 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	弱い力  Wボソン	
				 Zボソン	
				 ヒッグス粒子	

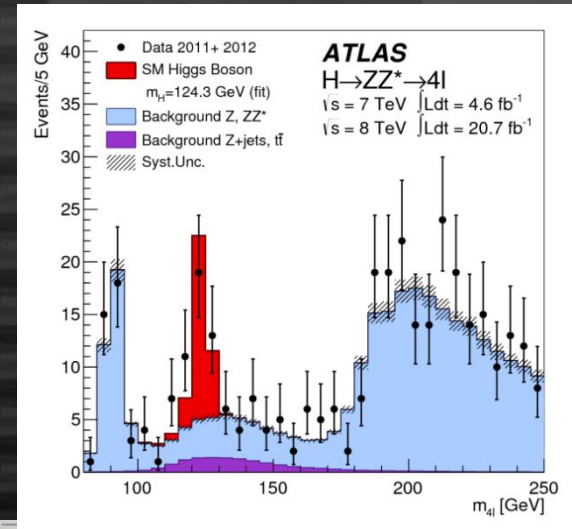
出典: 高エネルギー加速器研究機構

ヒッグス粒子が素粒子のミッシングピースだった
(1994年までに他の全ての素粒子は発見された)

「ヒッグス粒子」発見: 2012/7/4



Credit: CERN



2013年、ヒッグス、
アングラール両氏が
ノーベル物理学賞受賞

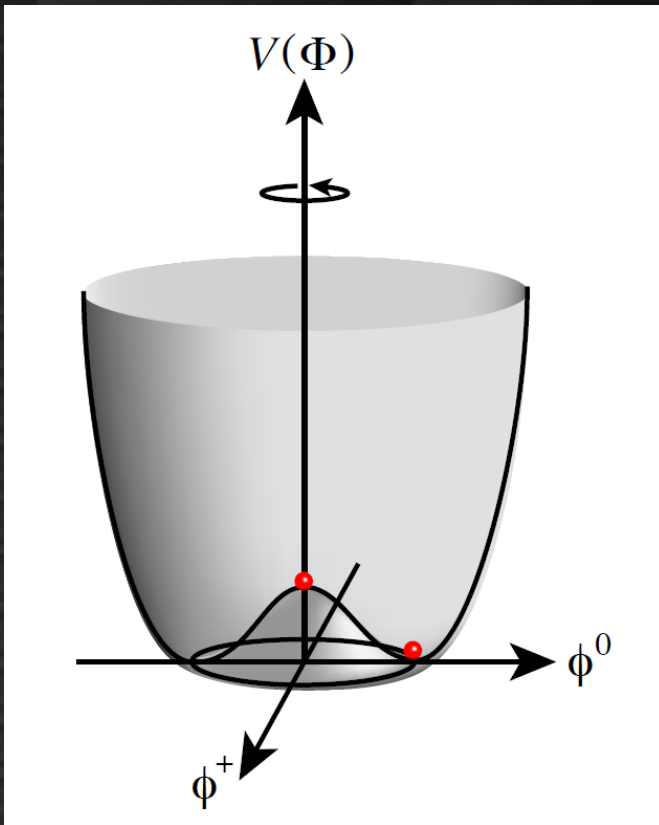


ヒッグス粒子とは

- 真空中に「凝縮」している(真空期待値246GeV)
- ヒッグス粒子と相互作用する粒子は真空中を通過するとヒッグス粒子から「抵抗」を受ける
 - 抵抗の大きさが
質量: 粒子に固有
- 唯一の「スカラー」素粒子 (spin 0)
 - フェルミオン: $\frac{1}{2}$
 - ゲージボゾン: 1



ヒッグスと自発的対称性の破れ



真空のスカラーポテンシャル $V(\Phi)$
 $\mu^2 < 0$ のとき、
 $\Phi=0$ の真空は不安定で、 Φ が0でない
真空に崩壊する (真空の相転移)
我々の宇宙ではヒッグスの真空期待値
 $v = 246 \text{ GeV}$

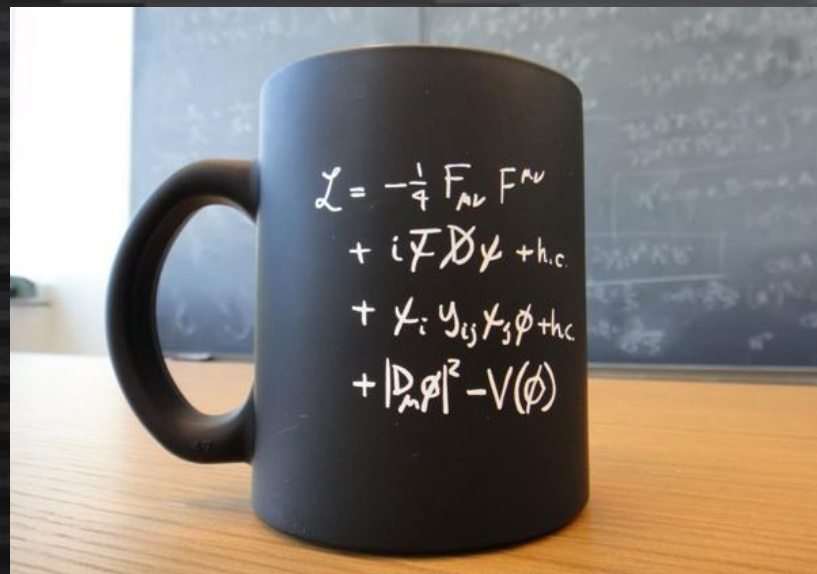
このとき、 μ はヒッグス粒子の質量項となり
 λ は自己結合定数となる

$$V(\Phi) = \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 + \text{h.c.}, \quad \mu^2 < 0, \lambda > 0$$

$$m_h^2 = 2 \lambda v^2$$

標準模型の問題点

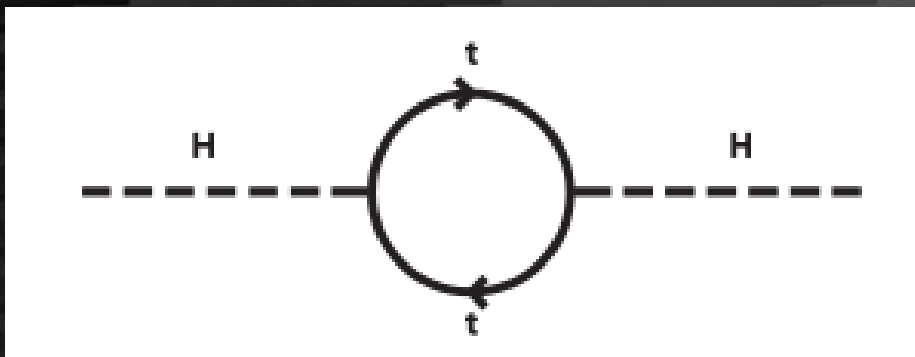
- ヒッグス粒子の「自然さ」
- ダークマター
- 宇宙の物質生成
- ニュートリノ質量
- クォーク・レプトンの世代
- ...



ヒッグス粒子と「自然さ」

- 2012年、ヒッグス粒子発見 → 質量125 GeV

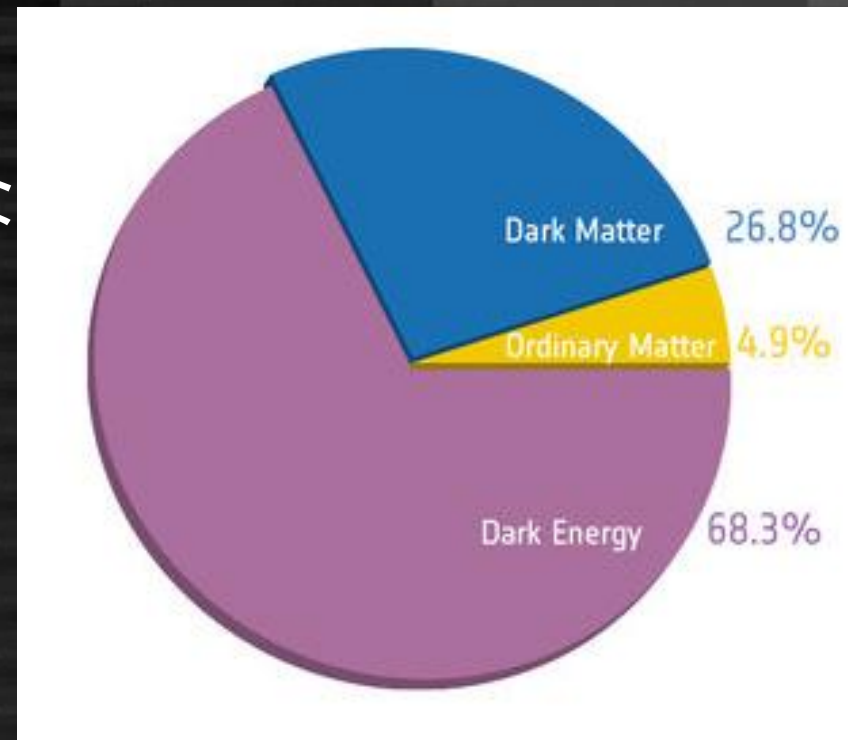
- ヒッグス粒子は図のようなダイアグラムによる自己エネルギーを持つ



- 閉線はエネルギーについて積分するが、非常に高いエネルギーまで標準模型が成り立つとすると、この図のエネルギーが発散する (それを打ち消す裸の質量を仮定すると不自然)
- 電弱エネルギーの近くに新物理の存在を示唆
 - ループの寄与を打ち消すような新物理を仮定する
 - 1 TeVで約2桁のfine tuning, 10 TeVで4桁のfine tuning

ダークマターとダークエネルギー

- 既存の「素粒子」は全体の4.9%
- 「ダークマター」が26.8%
 - ダークマターは物質なので、他の物質と何らかの反応をする。それを検出できると考えられている
(ただしまだ見つかっていないことから反応性は低い)
- 「ダークエネルギー」が68.3%
 - 宇宙の膨張に関わる量。
詳細はいっさい不明

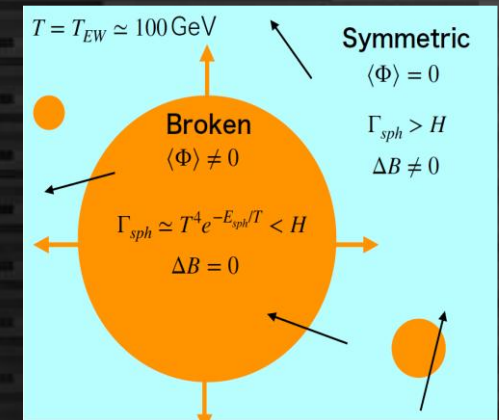
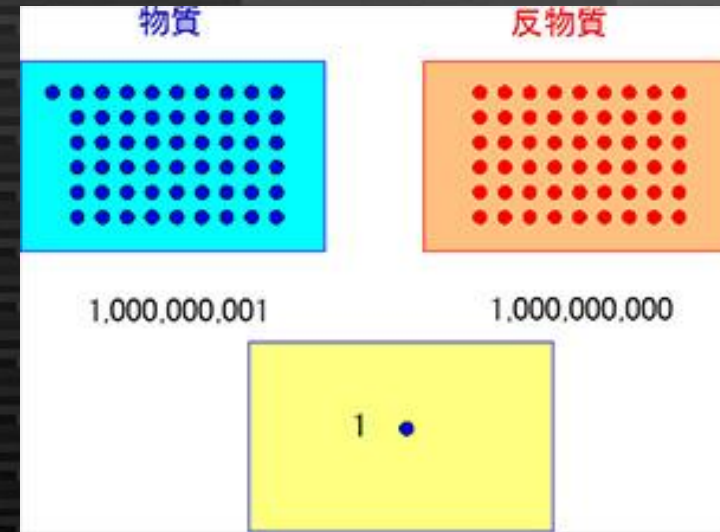


ダークマターの候補

- 新粒子(未知の相互作用)
 - 重くて反応しにくい中性粒子
Weakly Interacting Massive Particles (WIMP)
 - W, Zより少し重い電弱エネルギースケールの粒子
 - 「弱い力」のみにより標準模型の粒子と結合
 - 軽くて反応しにくい中性粒子
Weakly Interacting Slim Particles (WISP)
 - WIMPよりさらに反応しにくい
 - 低エネルギーの特殊な実験で探索
(今回は取り上げません)
- 既存の物体(ブラックホール、矮星など)

宇宙の物質生成

- ビッグバンの時に物質・反物質は真空からペアで生成した
 - 宇宙が冷えるとともに物質と反物質は対消滅し同数だけ消えていく
- いつのまにか物質が1/10億だけ多くなっていて、物質だけが残った
 - 物質と反物質で物理法則は厳密には等しくない。(弱い力のみ)
 - ただし現在わかっている非対称性では1/10億のずれを説明できない。(もっと小さい)
 - 物質生成に対する多数の仮説がある
 - レプトジェネシス・電弱バリオジェネシス...

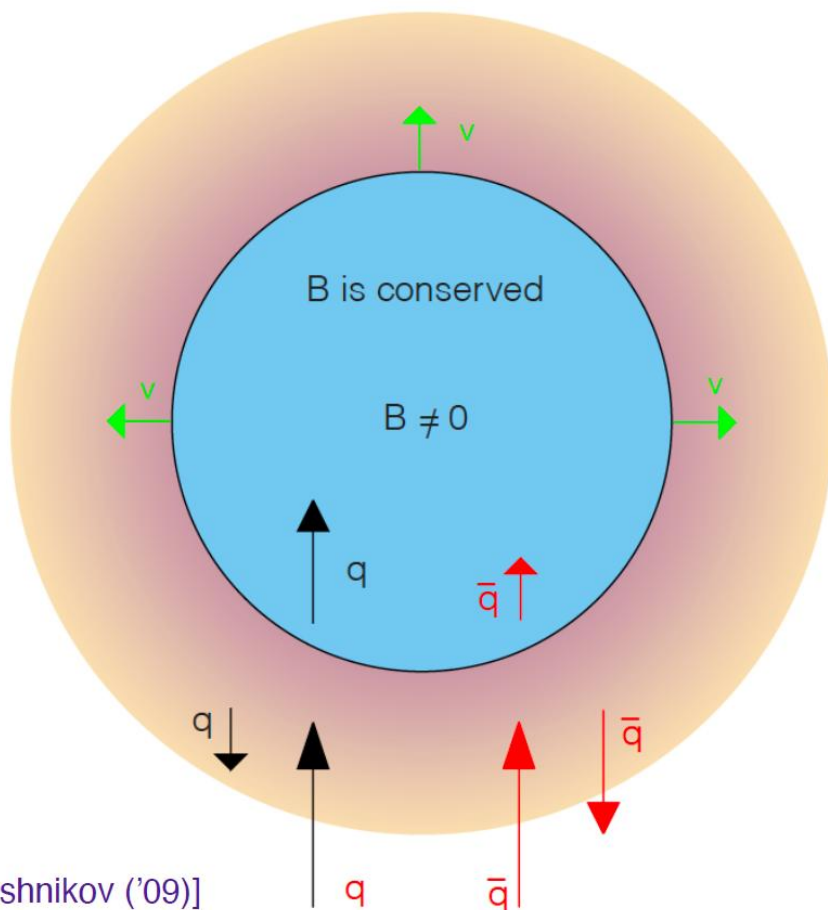


ヒッグス場の相転移により
非対称性ができる

Mechanism of EWBG

泡の周りで起きる現象

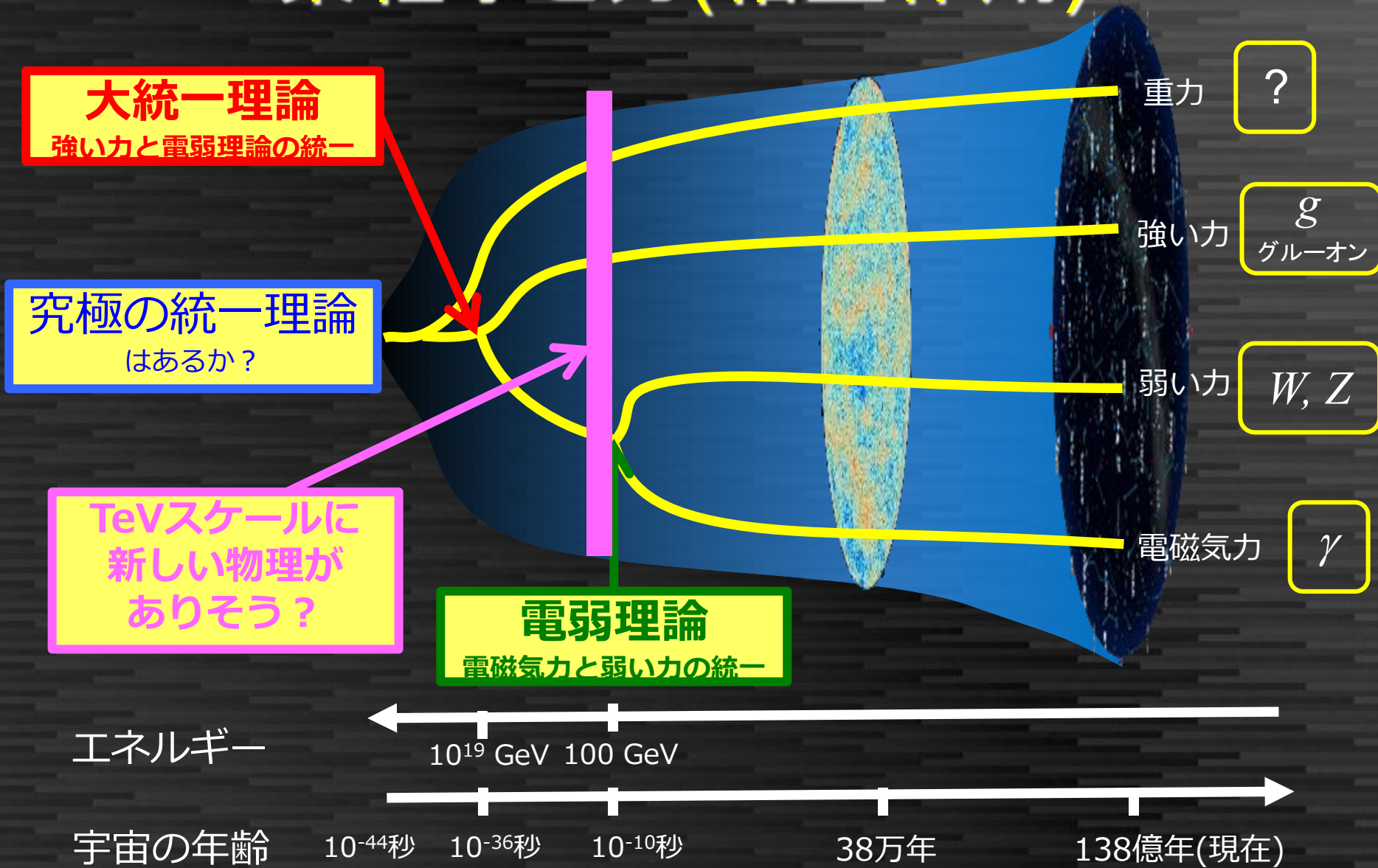
B is not conserved: $B = 0$



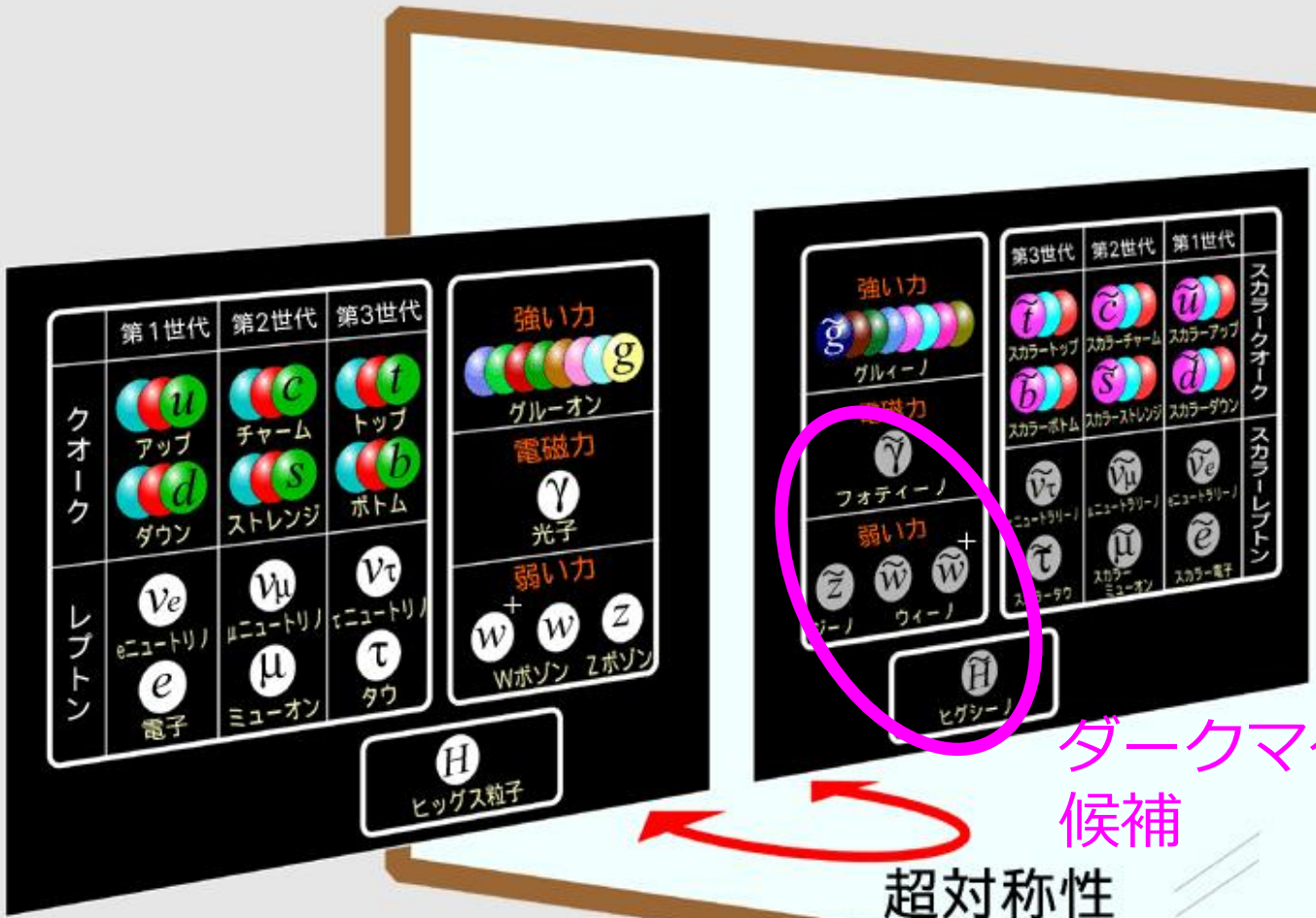
[Shaposhnikov ('09)]

1. 泡に q, \bar{q} が飛び込む。
2. 泡の壁における CP の破れによって、壁面での侵入と反射に q, \bar{q} 間の差ができる。
3. 泡内部では B が保存されているので、 $n_q \neq n_{\bar{q}}$ が維持される。
4. 泡外部では B が激しく変化しているため $n_q = n_{\bar{q}}$ となる。
5. 泡が拡大、衝突しながら上記過程を繰り返す。
6. 最終的に $B \neq 0$ の非対称相の宇宙となる。

素粒子と力(相互作用)



超対称性 (SUper SYmmetry: SUSY)



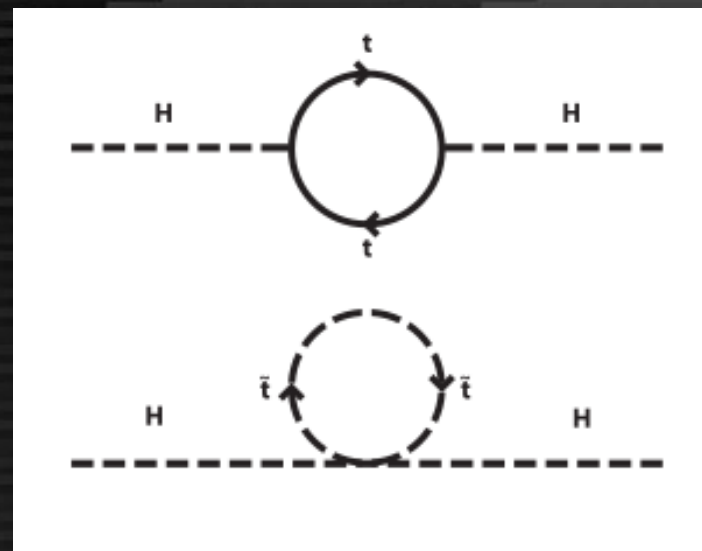
ダークマター候補

超対称性

スピンの異なるパートナー粒子

SUSYとヒッグス階層性問題

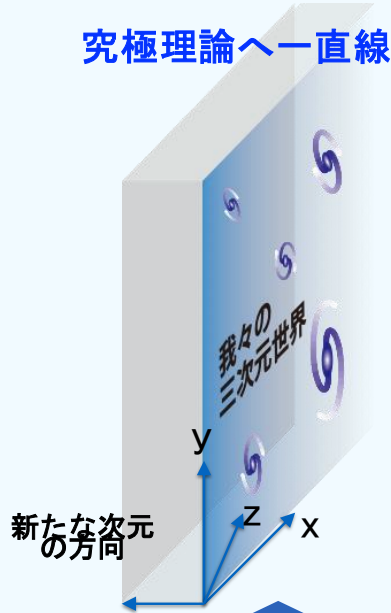
- ヒッグスには「自然さ」の問題があった
 - 巨大な輻射補正とそれを「たまたま」極めて高い精度(24ケタ)で打ち消す裸(輻射補正前)の質量
- 標準模型の全粒子にspinが1/2違うパートナーがいれば輻射補正を打ち消すことができる
 - 自然さの回復
- ただし、パートナーがあまり重いとやはり輻射補正がずれるので、TeV領域に新粒子を要求
- 最も軽いSUSY粒子は安定に
 - ダークマターの有力候補



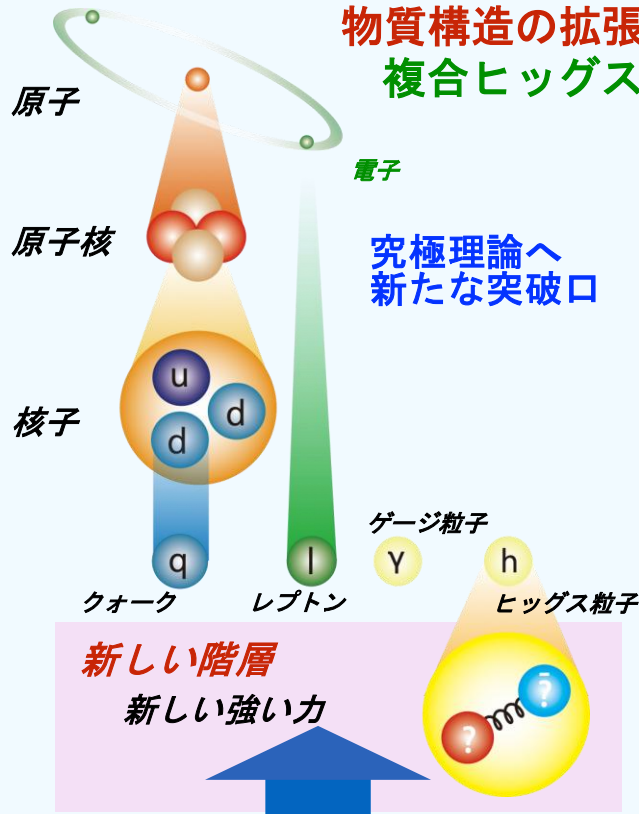
様々な可能性

時空概念の拡張
超対称性または余剰次元

究極理論へ一直線



物質構造の拡張
複合ヒッグス



全く新しい原理？
複数字宇宙+人間原理？

標準理論と究極理論が直結？



第二の道：「より深い階層」

標準理論からのズレが見られなかった場合

第一の道：「新たな次元」

現在地
(電弱スケール)

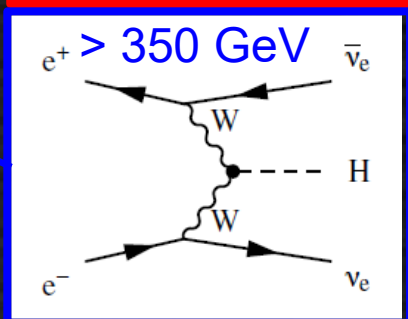
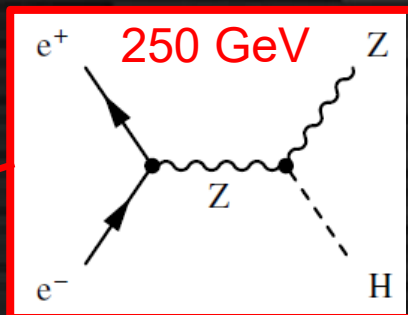
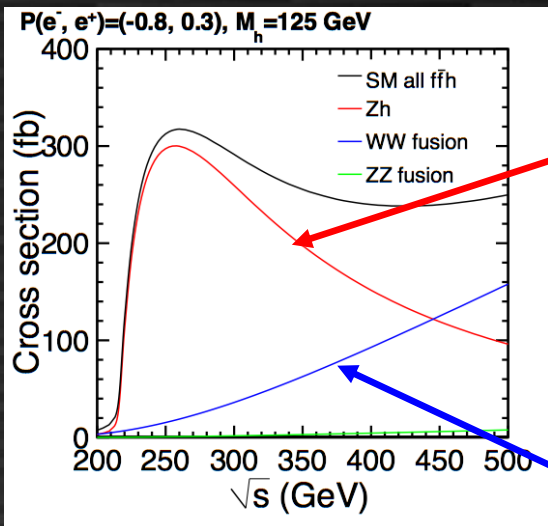
第三の道：「複数字宇宙？」

※: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

ヒッグスを巡る数々の謎

- 「自然さ」の問題 – TeV新物理を強く示唆
- 標準理論で「唯一の」スカラー粒子
 - ヒッグス粒子は他にないのか?
 - 他にヒッグスがある模型: Two Higgs doubletなど
 - ヒッグス粒子は本当に素粒子なのか?
 - 複合ヒッグス模型ではヒッグスは複合粒子
- 他の粒子との結合(=質量)はどう決まったのか?
 - クォーク、レプトンの世代との関係は?
- 暗黒物質やダークセクターとの結合は?
- 宇宙の物質生成に関わるか? etc...

ヒッグス生成@ILC



$$N_{\text{detected}} = \epsilon \sigma \mathcal{L}_{\text{int}}$$

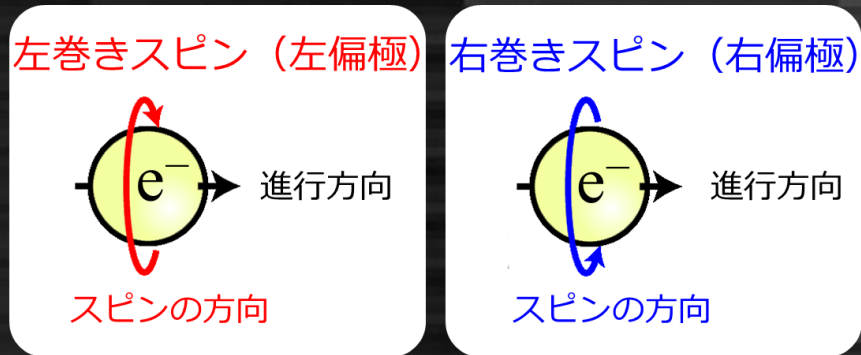
\mathcal{L}_{int} は積分ルミノシティ
 ILC 250 GeVでは
 2 ab^{-1} を想定
 (eLpR, eRpLを0.9 ab^{-1} ずつ)
 ϵ はほぼ100%。ただし
 背景事象を選ぶ過程で
 信号事象も一部が失われる
 (解析手法による)

250 GeVでは $e^+e^- \rightarrow ZH$ が重要
 断面積は電子・陽電子偏極にもよる
 電子左偏極、陽電子右偏極(eLpR)
 が最も生成断面積が大きい。

(eRpLで約6割程度)

$0.9 \times 300 \times (1+0.6) = 432,000$ 事象

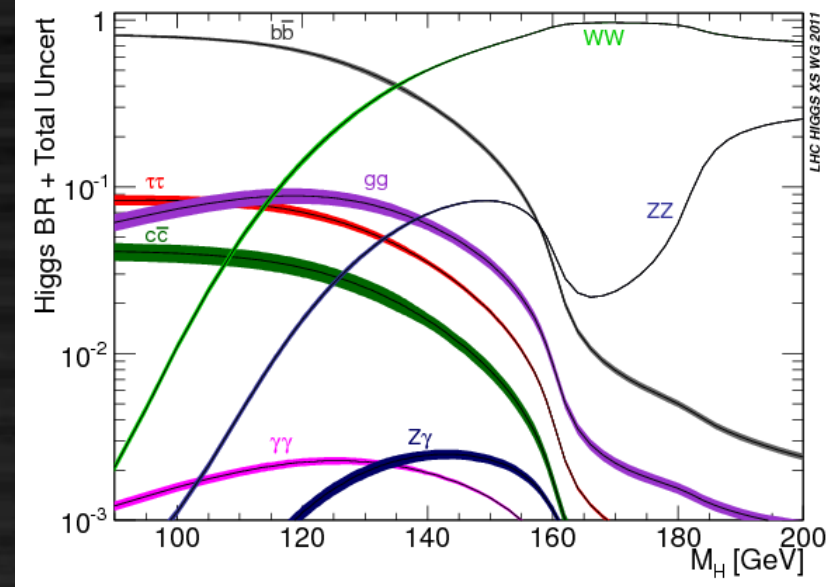
200日x5年走るとして、432/day



ヒッグスの崩壊

- 生成したヒッグス粒子は即座に崩壊する
 - ヒッグスは電荷もバリオン・レプトン数も持たないので粒子・反粒子ペアに崩壊
 - ヒッグス粒子の結合は質量の2乗に比例
 - 重い粒子に壊れやすい
 - ただしヒッグスの質量の $\frac{1}{2}$ を越えるとエネルギー保存を満たさないため確率は下がる (off-shell崩壊と呼ぶ)

崩壊モード	崩壊分岐比	ILC 事象数
bb	58.1%	290,000
WW	21.5%	110,000
gg	8.2%	41,000
$\tau\tau$	6.3%	32,000
cc	2.9%	15,000
ZZ	2.6%	13,000
$\gamma\gamma$	0.2%	1,000



ヒッグスの測定

崩壊モード	崩壊分岐比
bb	58.1%
WW	21.5%
gg	8.2%
$\tau\tau$	6.3%
cc	2.9%
ZZ	2.6%
$\gamma\gamma$	0.2%

- ヒッグスの崩壊生成物はさらに崩壊する

– b, c, gluon

→ ハドロンジェット

(多数のハドロンの束)

– $W \rightarrow qq$ (2/3), lv (1/3)

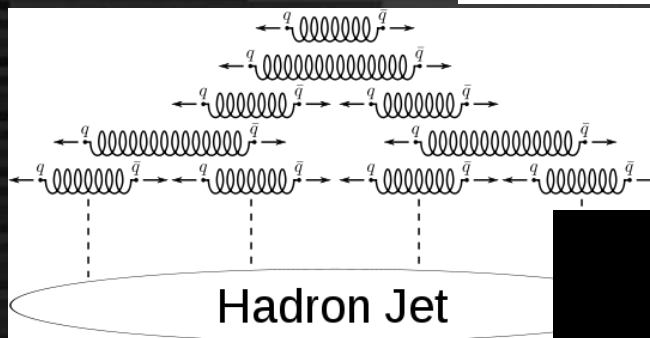
$Z \rightarrow qq$ (70%), $\nu\nu$ (20%), $\ell\ell$ (10%)

クォークはハドロンジェットになる

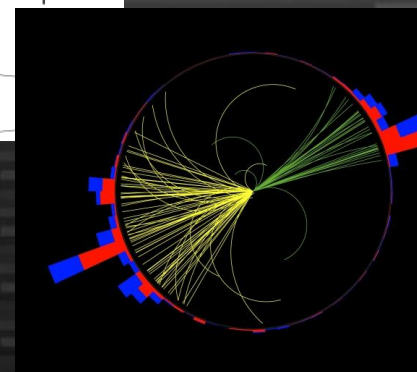
□ $\tau \rightarrow$ 1~数個のハドロン/レプトンに崩壊 (tau jet)

□ $\gamma \rightarrow$ 高エネルギー光子としてそのまま検出可能

- **ジェットやレプトンを測定器で検出する (後述)**

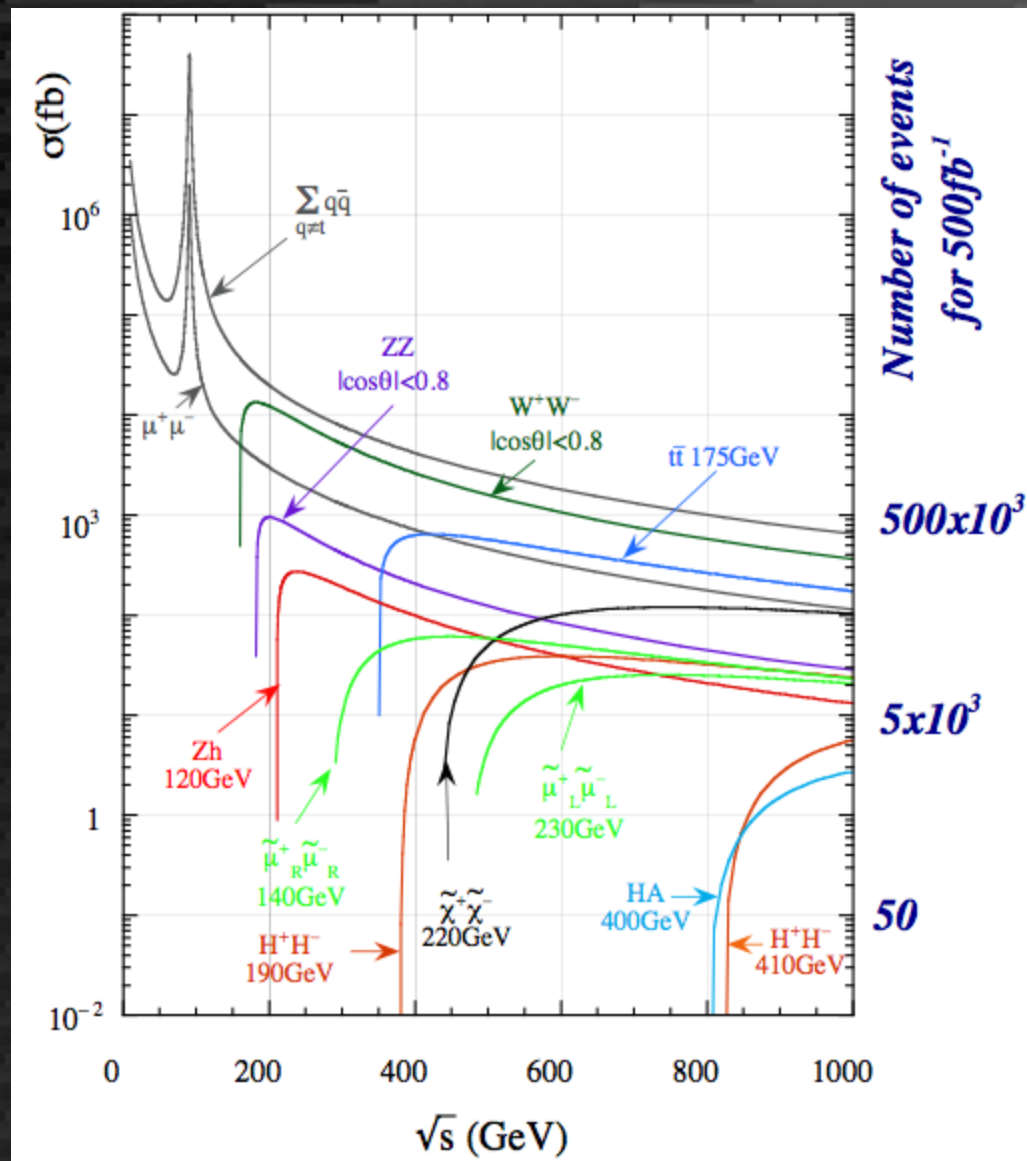


CMS



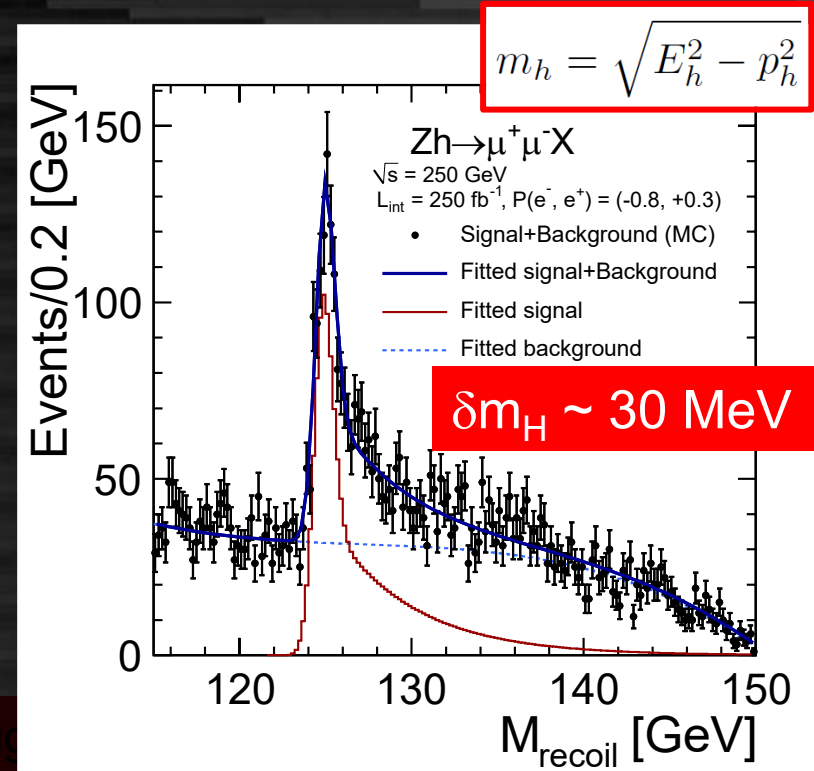
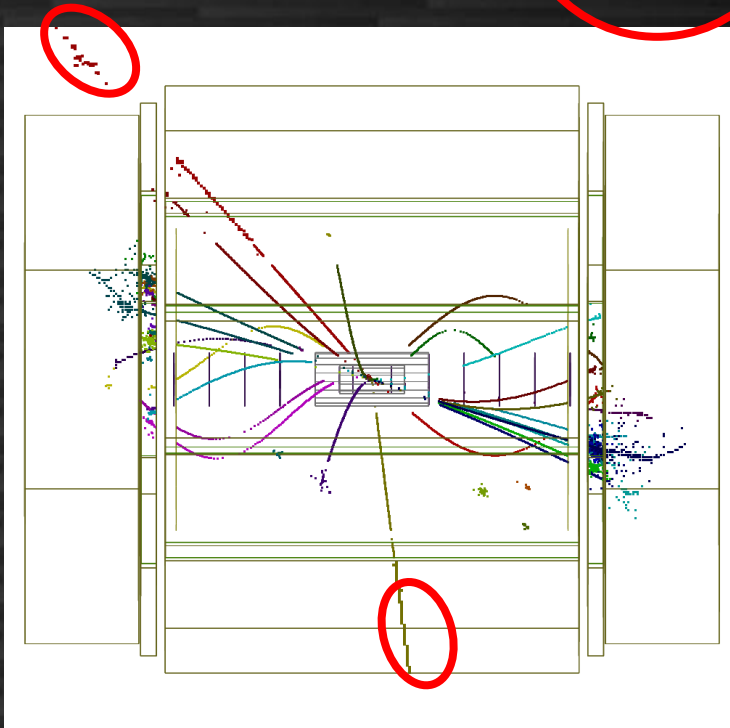
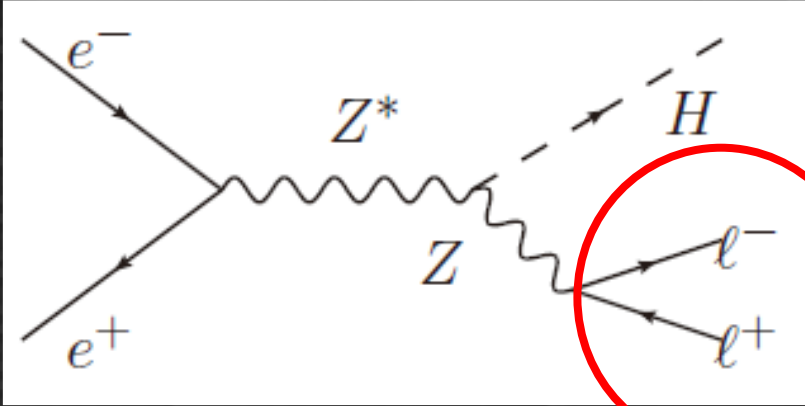
ヒッグスの測定 (2)

- 事象分離
 - 信号事象(ヒッグス)の10~100倍の背景事象がある
 - Z, Hの運動量・エネルギーや生成角、クォークの種類等の情報を駆使して背景と信号を分離する
 - ILCの始状態の4元運動量は明確



ヒッグス反跳質量測定

- “Higgsを見るのにHiggsを見ない”
→ 反跳されるZ → llのみを使う
(4-momentum conservation)
- “Higgsを見ない”のでどんな崩壊でも関係なく見える
→ ヒッグスの性質に依存しない



ヒッグスの結合定数測定

- 各崩壊の事象数を高精度測定

精度: $\frac{\sqrt{S + N}}{S}$
 S: 信号事象数
 N: 背景事象数

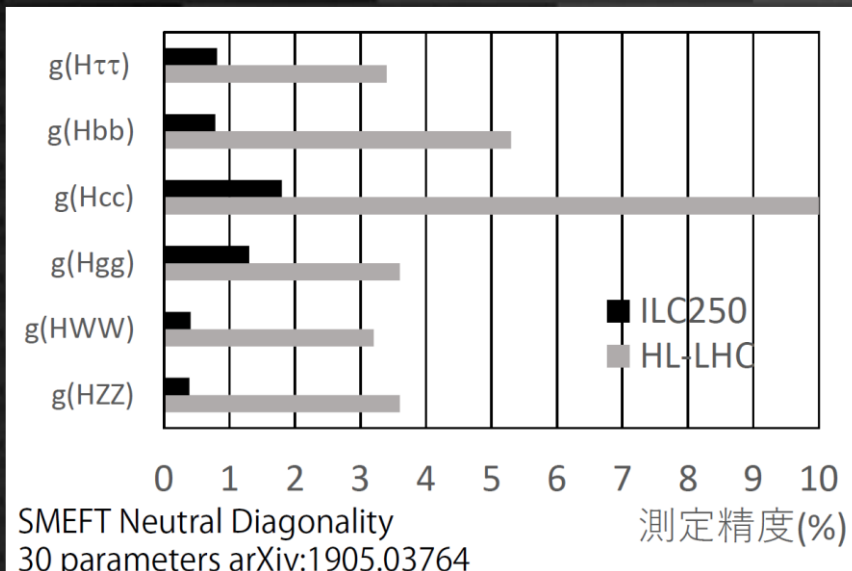
- 1万事象、背景なしで1%統計誤差
- 1万事象、背景10万で3%統計誤差

- 精度: 統計誤差と系統誤差による。

電子陽電子コライダーは理論予測の精度が高く系統誤差も1%以下に抑えられる。

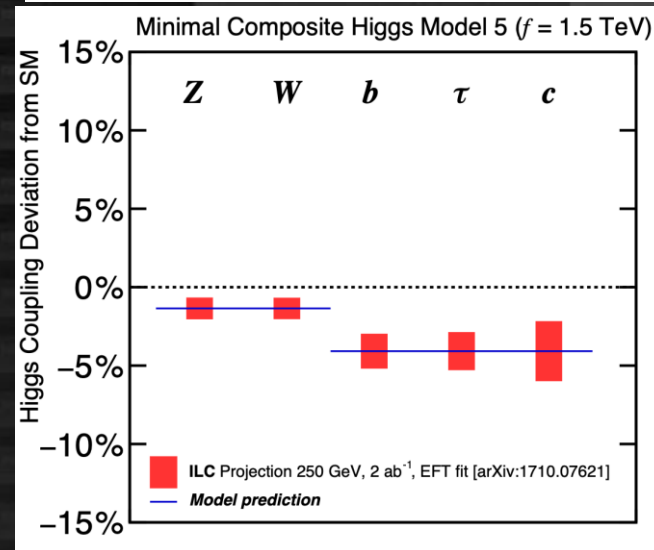
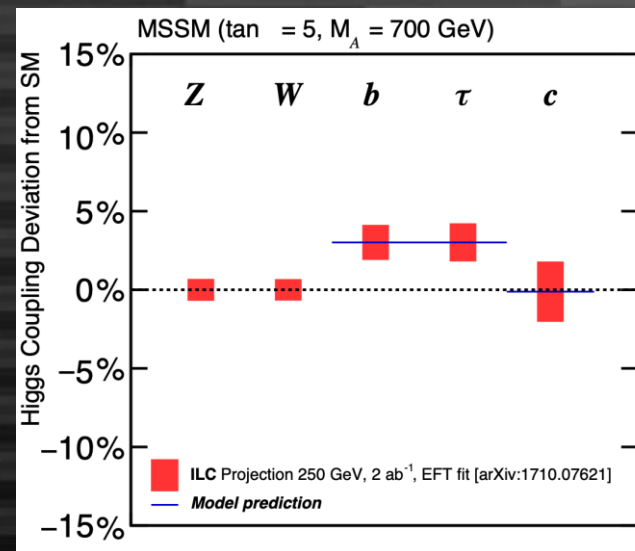
ILCでは概ね1%以下の精度で各結合定数を決定する。

崩壊モード	崩壊分岐比	ILC 事象数
bb	58.1%	290,000
WW	21.5%	110,000
gg	8.2%	41,000
$\tau\tau$	6.3%	32,000
cc	2.9%	15,000
ZZ	2.6%	13,000
$\gamma\gamma$	0.2%	1,000



ヒッグス結合定数による新物理探索

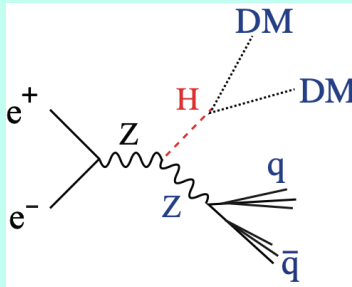
- ヒッグスの結合定数の標準理論からのずれが発見できれば、そのパターンから新物理を区別できる。
 - SUSY: b/τ の結合が上昇
 - 複合ヒッグス: フェルミオンの結合定数が下がる
- ずれが見えるかどうかは新物理のパラメータによるが、
ILCではTeV新物理の多くをカバーする



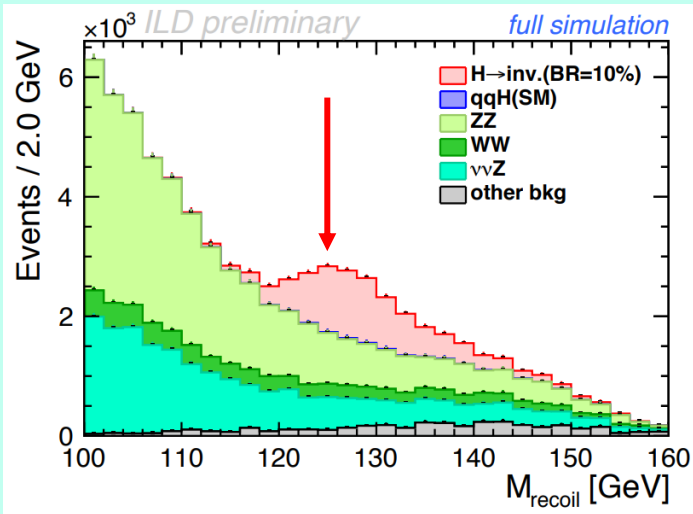
	ゲージ場との結合		湯川結合			2 HDの質量 与え方パターン	代表的なモデル
	hVV	$h\tau\tau$	hbb	hcc			
	K_V	K_τ	K_b	K_c			
Type-I	↓	↓	↓	↓		ν フィリクモデル (H1:SM H2: ν)	
Type-II	↓	↑	↑	↓		SUSY型	
Type-X	↓	↑	↓	↓		輻射シーソーモデル ($\mu g-2$ を説明)	
Type-Y	↓	↓	↑	↓		論理的に残された パターン	

ヒッグスと新粒子の直接結合探索

Higgs Invisible Decays

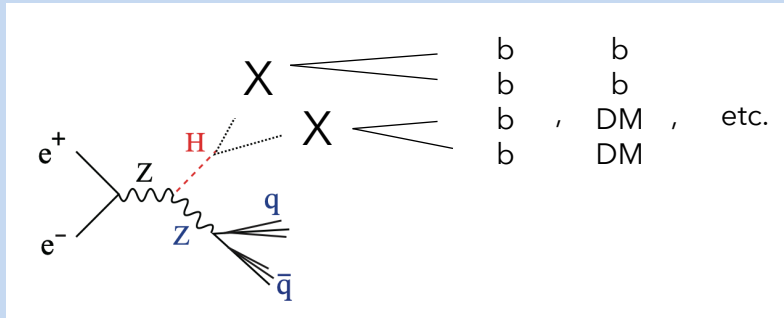


Hadronic Z decay (ILD), Kato, 2002.12048

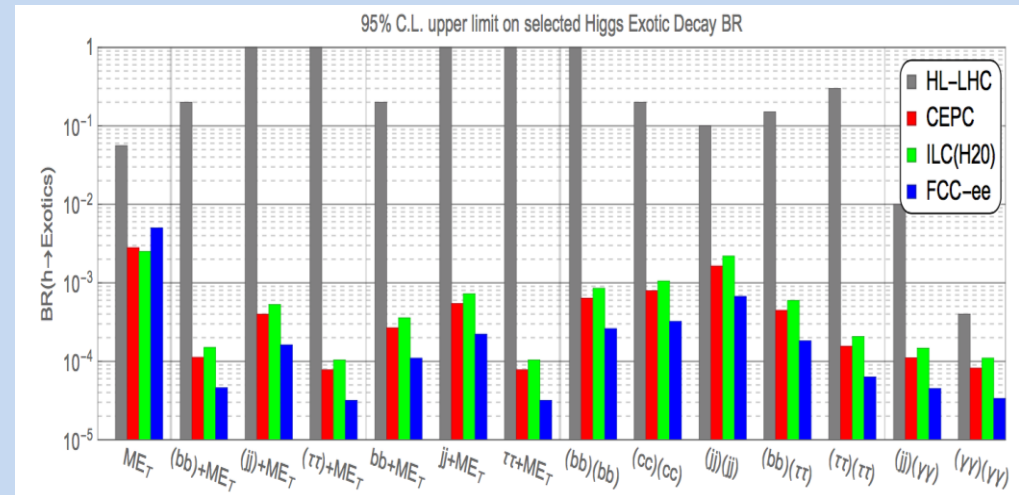


Invisible decay branching ratio: 0.3%
(95% CL upper limit)

Exotic Higgs Decays

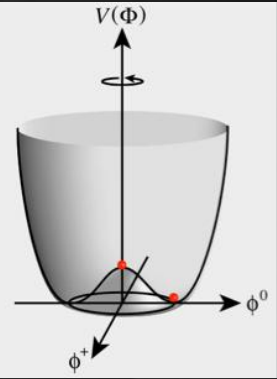


Liu, Wang, Zhang [1612.09284]

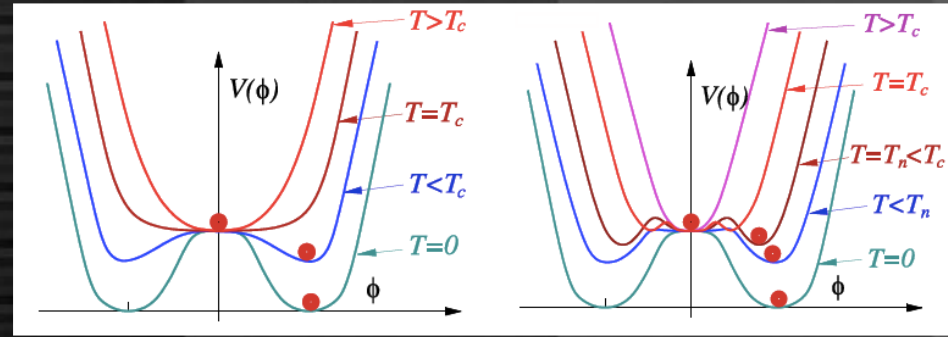


LC sensitive to various exotic Higgs decays

ヒッグス自己結合



ヒッグス
ポテンシャル
の4次の項
真空の構造
を決める



$$V(\eta_H) = \frac{1}{2} m_H^2 \eta_H^2 + \lambda v \eta_H^3 + \frac{1}{4} \lambda \eta_H^4$$

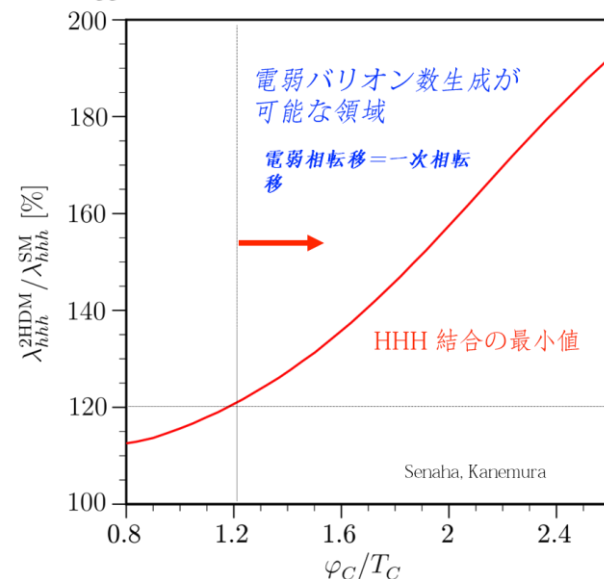
真空の2次相転移

真空の1次相転移
スファロンによる
電弱バリोजェネシス
に必要

宇宙の物質生成を解き明かす
二つのプローブ

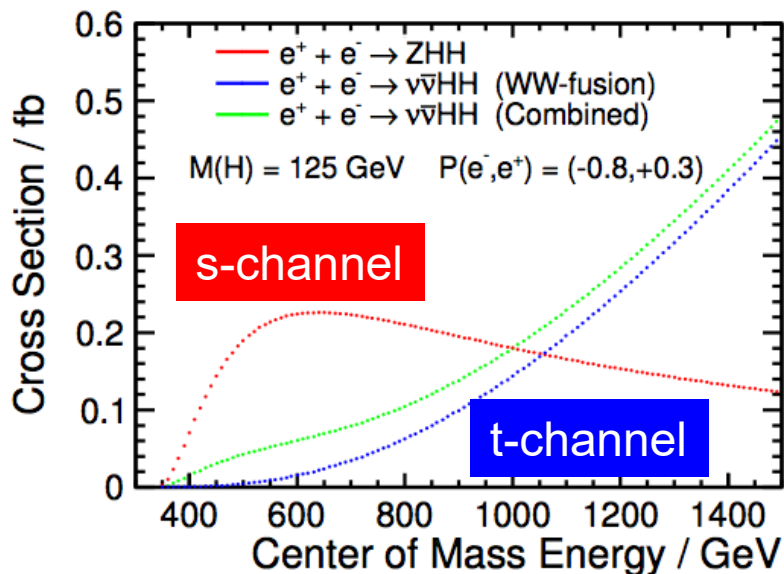
- ヒッグスと電弱バリोजェネシス
 - 真空の一次相転移
- ニュートリノとレプトージェネシス
 - 重いレプトン崩壊のCP破れ

例: 2 Higgs Doublet Model (2HDM)

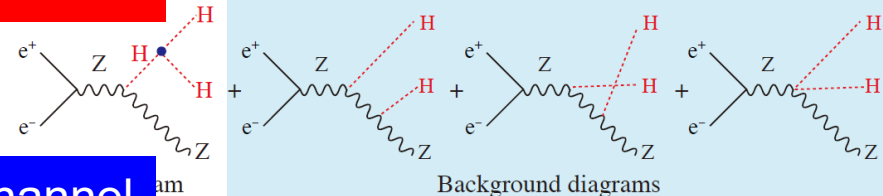


電弱バリオ
ジェネシスなら
λの値は
O(10%)以上
増加する

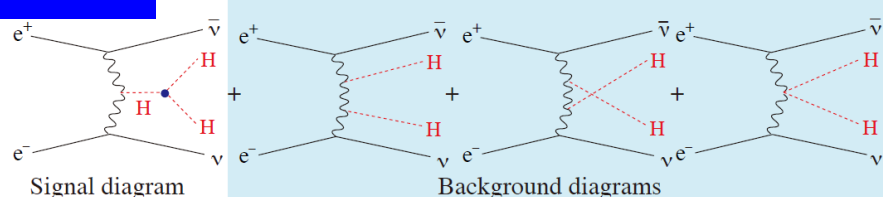
ヒッグス自己結合@ILC upgrade



s-channel

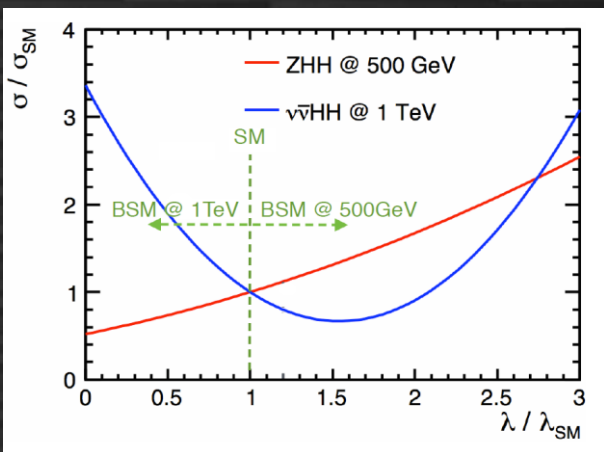


t-channel



干渉項の効果でさらに実質断面積低下

断面積が小さく困難。1 ab^{-1} でO(100)事象

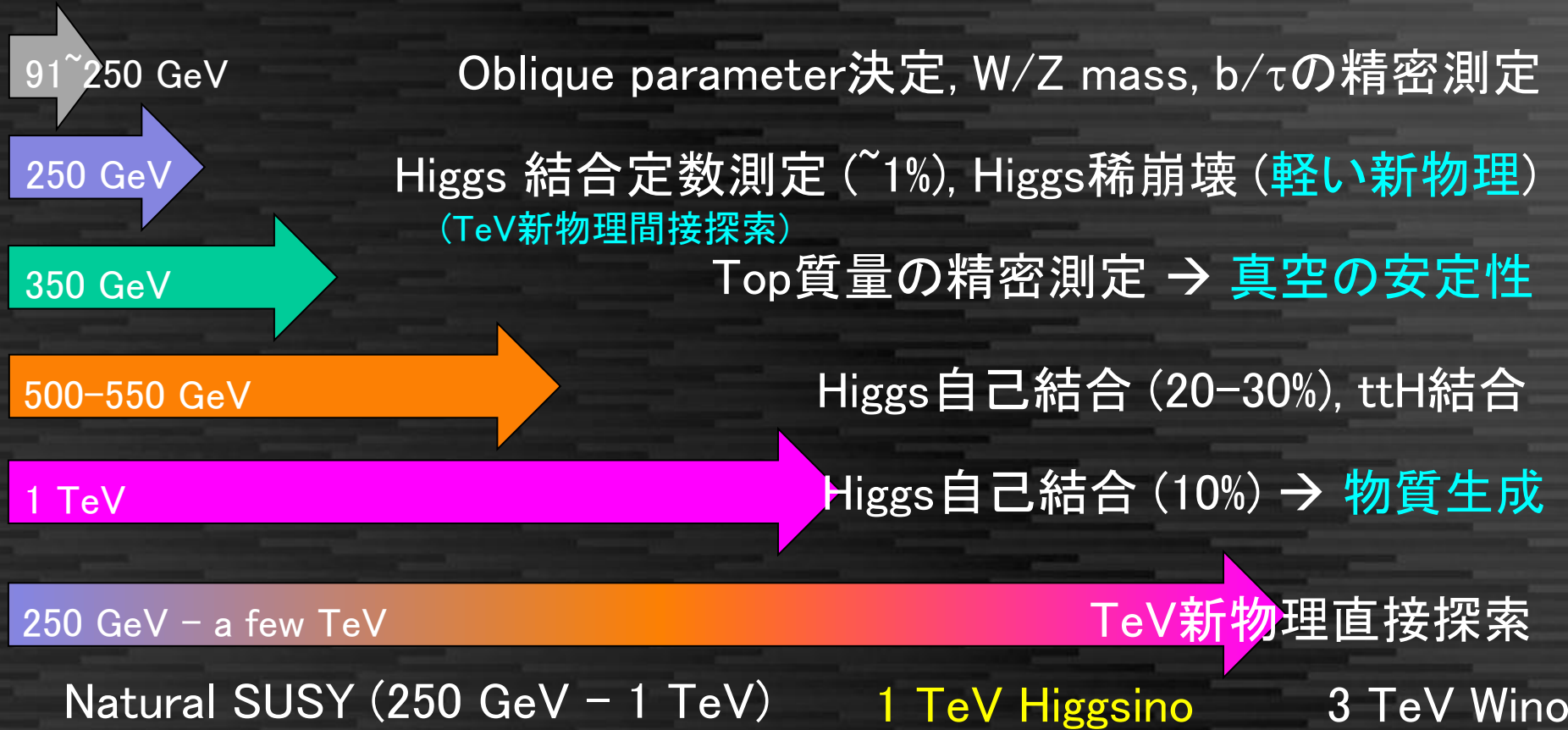


干渉項が3点結合の測定精度に影響
 s-channelは正の干渉,
 t-channelは負の干渉
 (LHCは負の干渉)

channel	$\sqrt{s}[\text{GeV}]$	λ 精度
s (正の干渉)	500-600	<20%
t (負の干渉)	>1000	<10%

深層学習によるジェット再構成性能の抜本的な改善に取り組んでいる

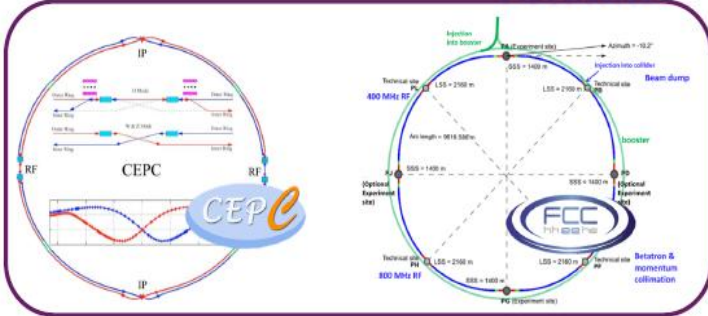
Targets of e+e- Higgs factory



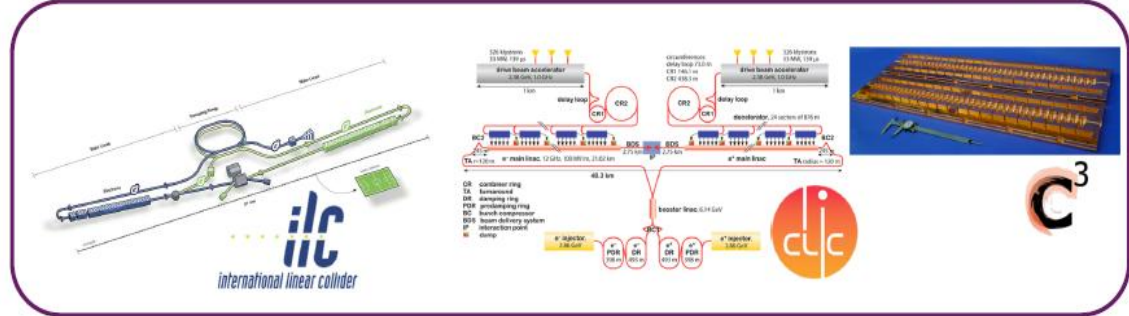
Higgs factory Projects

e+e- colliders

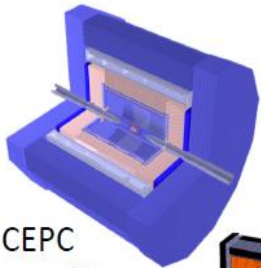
Circular



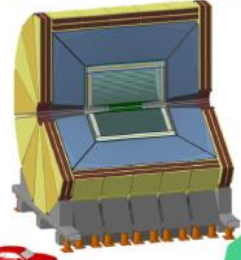
Linear



Detector Concepts



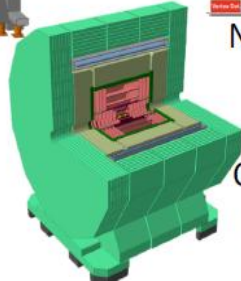
CEPC Baseline



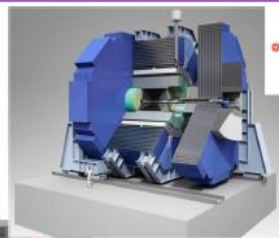
IDEA



Noble LAr/LC



CLD



SiD



ILD

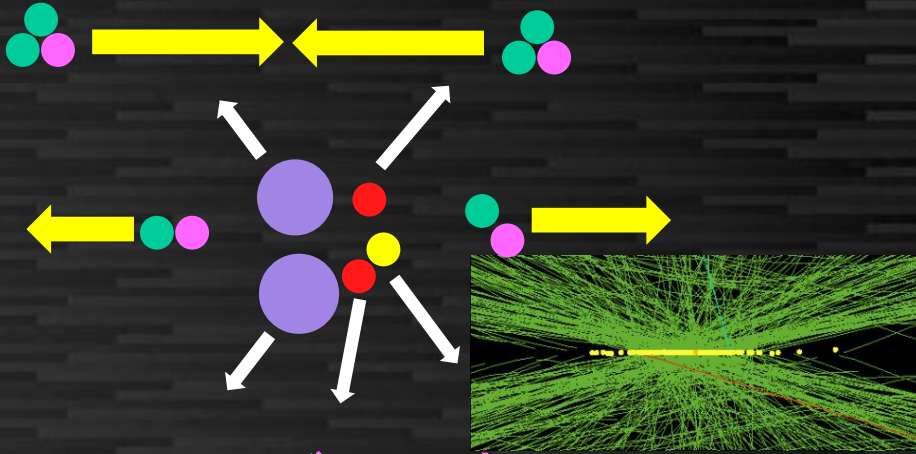


CLIC

M.C Fouz

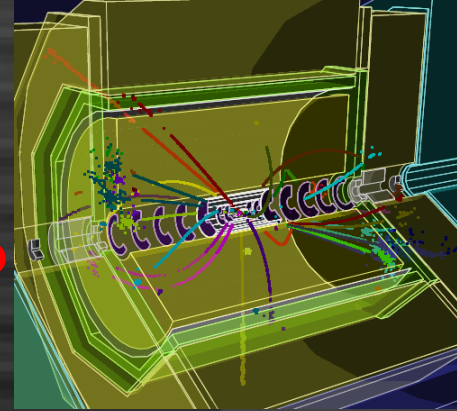
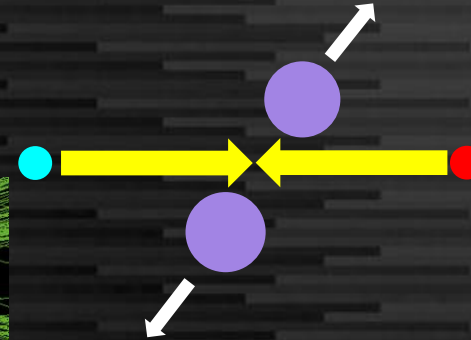
陽子・陽子衝突 13-14 TeV

電子・陽電子衝突 91-250
-1000 GeV



- エネルギーは高い
- 複合粒子同士の衝突のためエネルギーの大半は見たい反応に寄与しない
- 不要な生成粒子が多い

重いが見やすい状態が得意

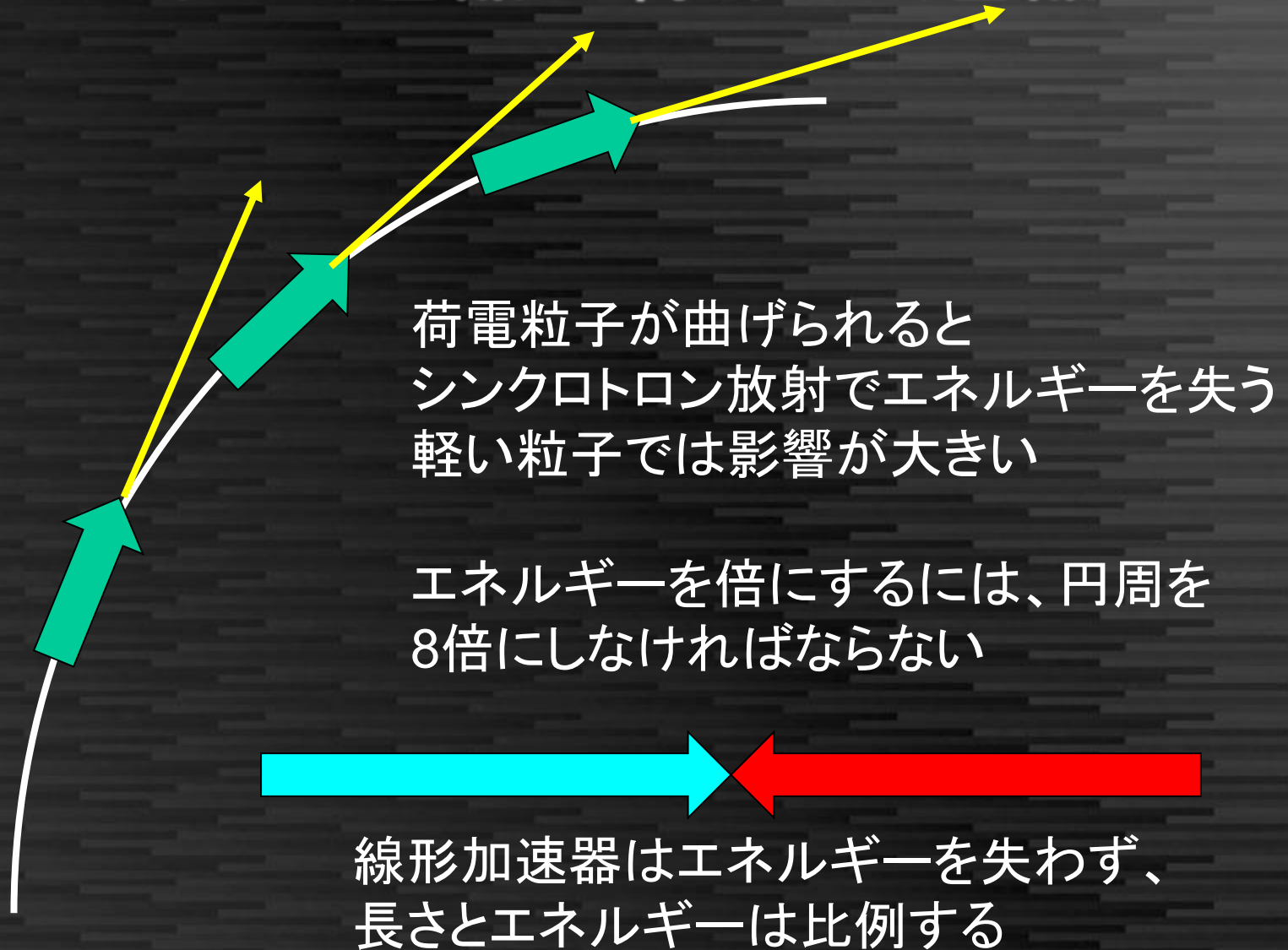


- エネルギーは低め
- 素粒子同士の衝突のためすべてのエネルギーを新粒子生成に利用できる
- 不要な生成粒子は少ない

軽ければ見にくい状態でも見える

得意分野を生かし、協力して新物理を探索

円形加速器と線形加速器



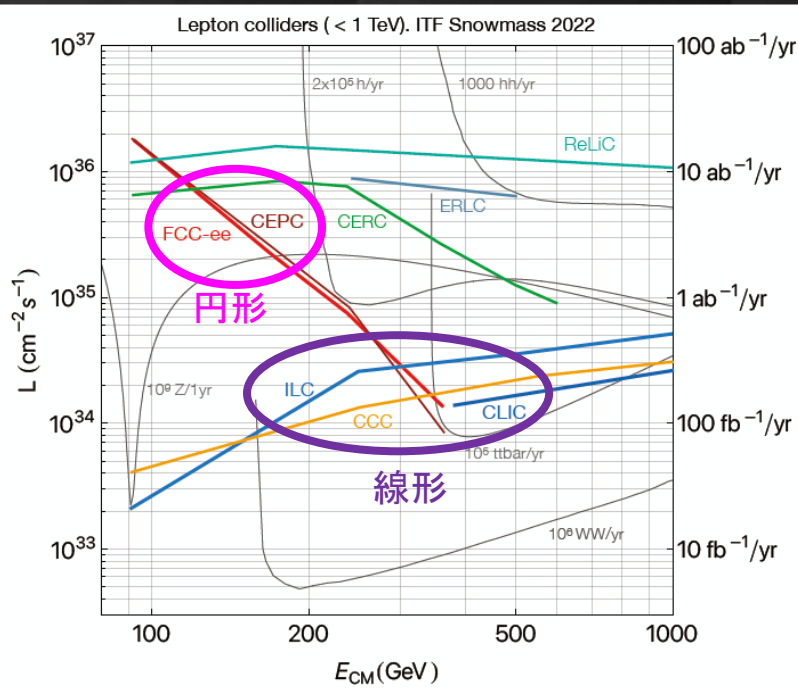
線形コライダーと円形コライダー

Luminosity:

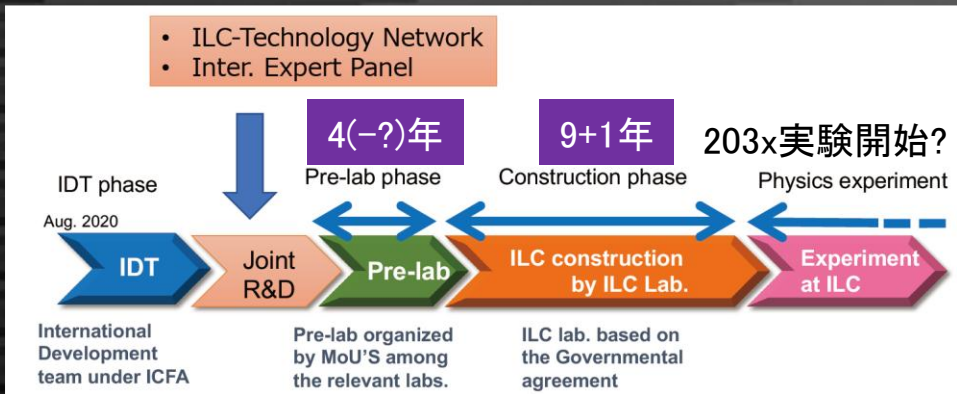
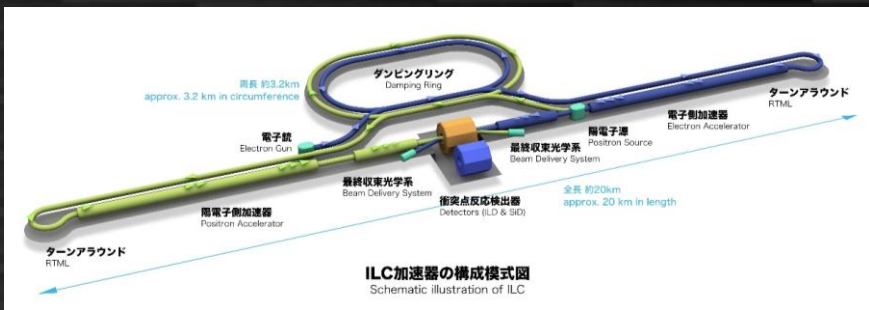
加速器の衝突頻度を表す量。積分Luminosityは全断面積の逆数になっていて、Cross sectionを掛けると期待する事象数を求められる。

円形加速器: 何度も衝突させてluminosityを稼げるが、シンクロトン放射で失うエネルギーを再加速する必要があり、電力で最終的に制限される。

線形加速器: 一回しか衝突できないので、もとの電荷とどれだけ絞れるかで決まる



- 91–160 GeV
円形コライダーが有利
(線形ERLでは円形に近いluminosityに到達可)
- 250 GeV
円形コライダーがやや高いluminosity
線形コライダーの偏極により物理reachは同等
- 350 GeV
円形コライダーでも可能だが線形が有利
- > 500 GeV
線形コライダーでのみ実現可能



「国際協力で日本に建設する国際プロジェクト」
超伝導加速空洞、加速部12 km, 全長20 km
加速勾配平均32 MV/m



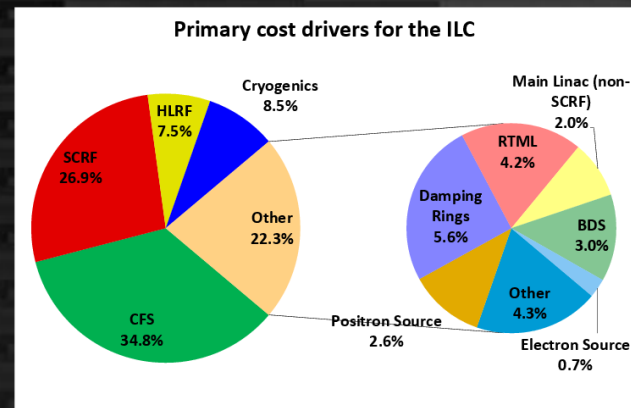
超伝導加速空洞を液体ヘリウムで冷却



超伝導加速空洞を8000本並べて
電子・陽電子を加速し衝突させる



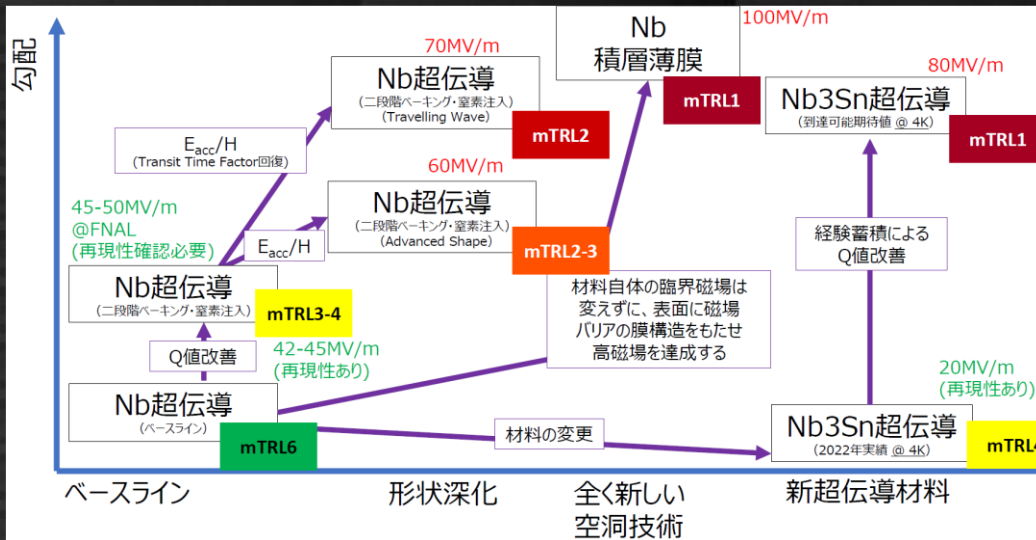
最終収束試験設備@KEK



ILC加速器のコスト見積もり: 約1.1兆円

ILC (upgrade path)

エネルギーアップグレードのためには加速勾配の向上が必要

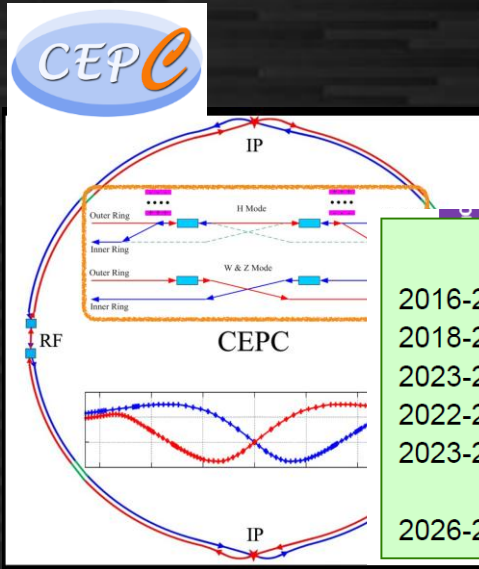


- 45–50 MV/m
空洞表面処理の改善
(うまくいけばILCにそのまま使える)
- 60–70 MV/m
空洞形状の改善・進行波加速管
(抜本的なデザイン変更, upgrade用)
- 100 MV/m
積層薄膜 (原理実証の段階)
- それ以上
新奇加速に置き換え or afterburner

Possible upgrade シナリオ

- –2050年: 250 GeV Higgs factory (表面処理の改善がよければ350 GeVも?)
- 2050年–: 550 GeV – 1 TeV with 60–70 MV/m (追加部分)
- 2070年–: 2–3 TeV with 100+ MV/m (薄膜) 既存空洞の置き換えが必要
(電力に対して抜本的な何かが必要?)

そのほかのHiggs factories

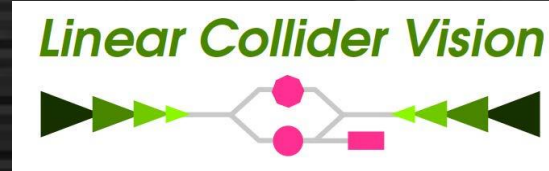


Ideal Accelerator Roadmap

2016-2021	MOST phase-1 accelerator R&D
2018-2023	MOST phase-2 accelerator R&D
2023-2028	MOST phase-3 accelerator R&D
2022-2023	Accelerator TDR completion
2023-2025	Site selection, engineering design, prototyping and industrialization
2026-2034	Construction and Installation

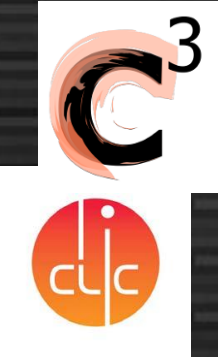
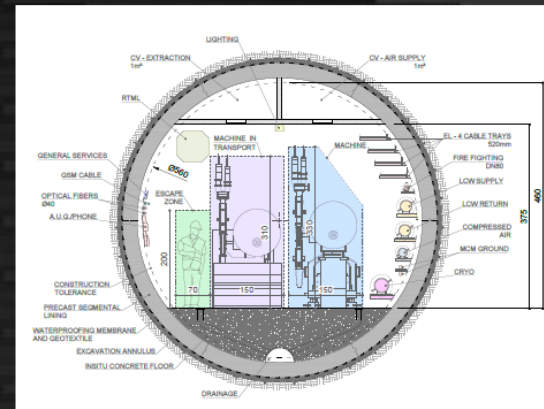
中国でもFCCと類似した計画が検討中
 2026-の中国5カ年計画への採用は見送られたが2030-を目指して再挑戦を検討
 (FCC-eeが決定の場合はそちらに合流)

Operation mode		ZH	Z	W*W	tt
\sqrt{s} [GeV]		~240	~91.2	158-172	~360
L / IP [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	CDR (2018)	3	32	10	
	Latest	5.0	115	16	0.5



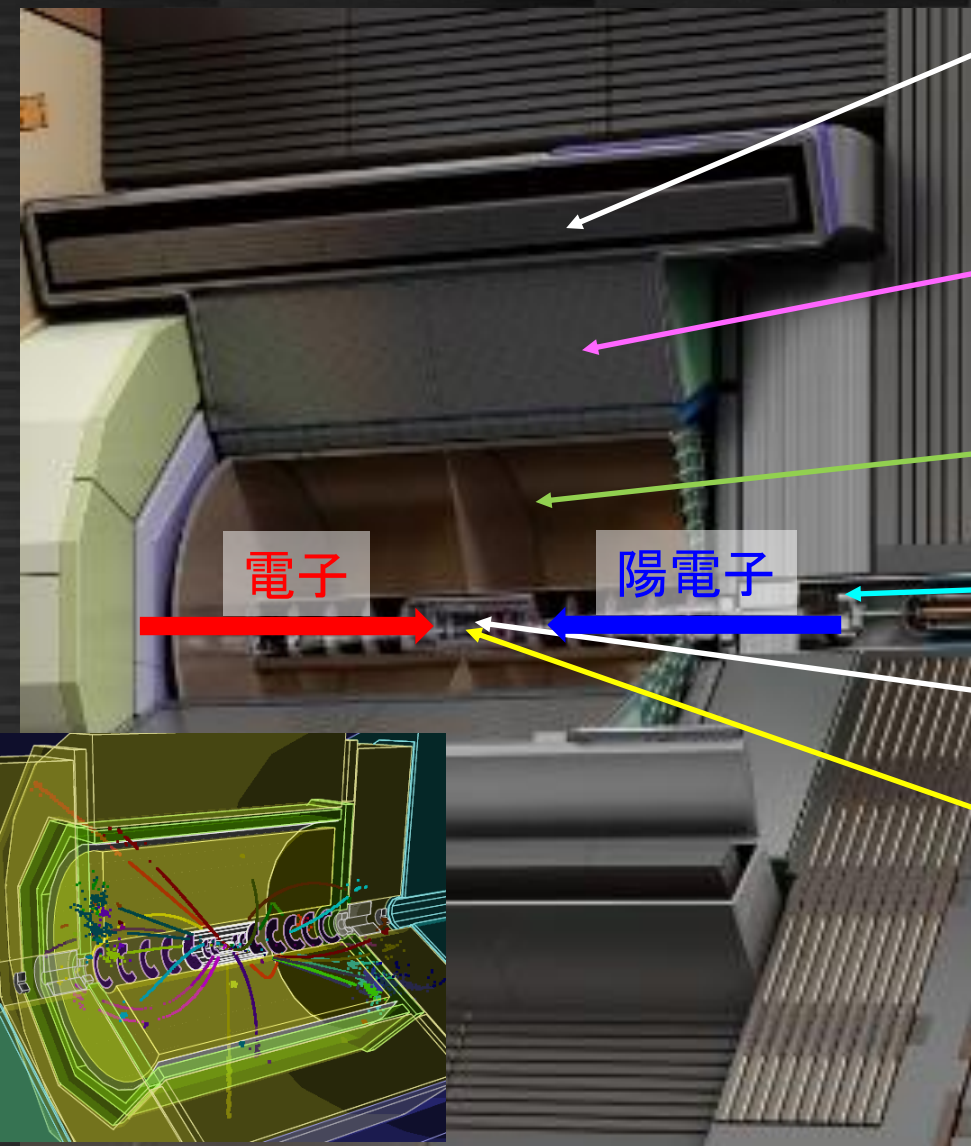
LCF@CERN

CERNでのリニアコライダー計画、ILCと同様の250 GeV超伝導加速ではじめるが、2IP, 550 GeV、高ルミノシティも含むより広い計画となっている。CLICやC3という常伝導コライダーのオプションもありさまざまなupgrade pathを検討



Higgs factoryをめぐる情勢

- $e+e-$ はLHCの次のコライダーとして最有力
 - 欧州、アメリカいずれもそのような位置づけ
 - FCC-eeがCERNの優先計画となった
 - 2028年頃に建設可否を決定する計画 (予算が最大の焦点)
- ILCはglobal projectの枠組み作りを進めている
 - リニアコライダーの優位性(energy upgrade, cost)はある
 - 日本にとって現状唯一可能なenergy frontierのcollider計画
 - 日本単独で作るのは困難、国際合意による建設を目指す
- 物理・測定器開発はILCもFCCeeも共通部分が多い
 - ただし、違う部分もある(バンチ構造、想定エネルギーなど)
 - どちらにも使える技術として開発を進める
 - 建設が決まればそのプロジェクトに特化していく



超伝導電磁石 (3.5 Tesla)
強力な磁場で荷電粒子を曲げる

カロリメータ
中性粒子の位置、エネルギーを測定

ガス検出器(TPC)
荷電粒子の運動量を正確に測定

ビームパイプ

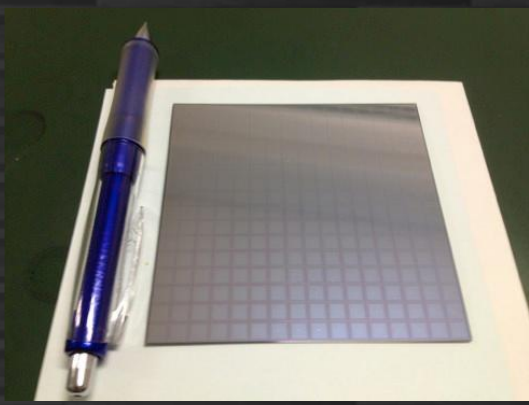
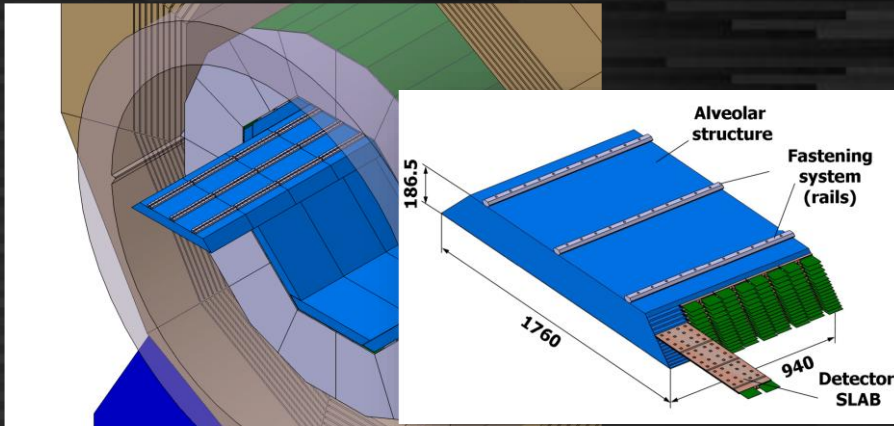
シリコン崩壊点検出器・飛跡検出器
荷電粒子の位置を精密に測定する

衝突点

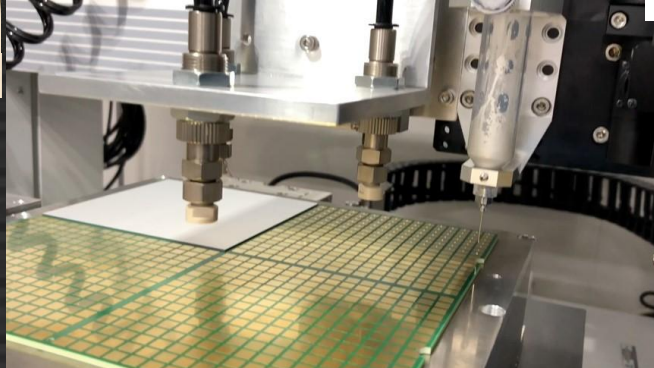
内側に荷電粒子の検出器、
外側にカロリメータがある
得られた粒子の情報から
元の反応を再構成していく

電磁カロリメータ

タングステンとセンサーの
多層カロリメータ (20-30層)
読み出し回路(ASIC, フロントエンド)
をセンサーと吸収層の間に
挟み込んでいる
合計 $10^7 \sim 8$ チャンネル



シリコンセンサー
(浜松ホトニクス製)
日仏共同開発

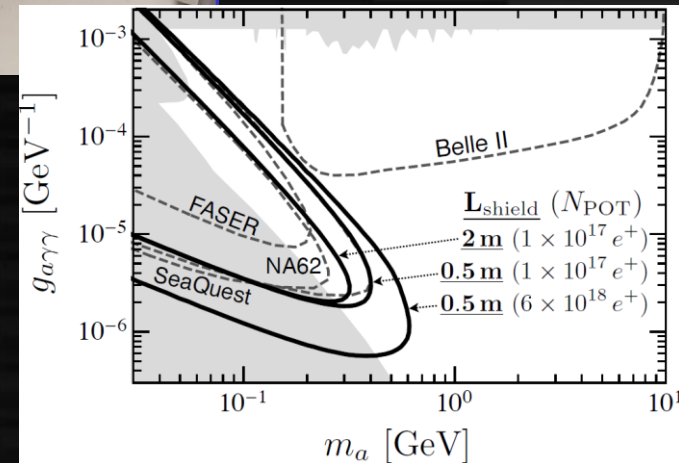
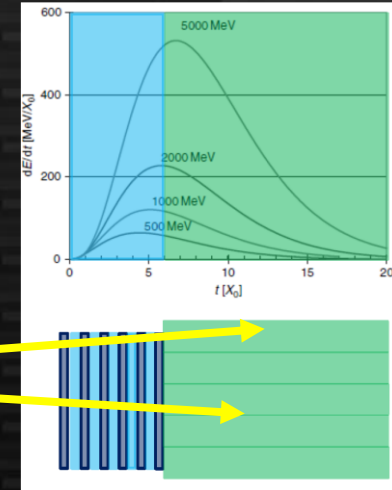
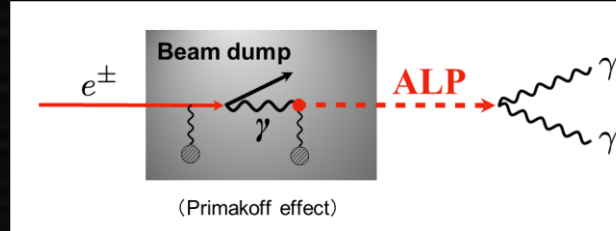
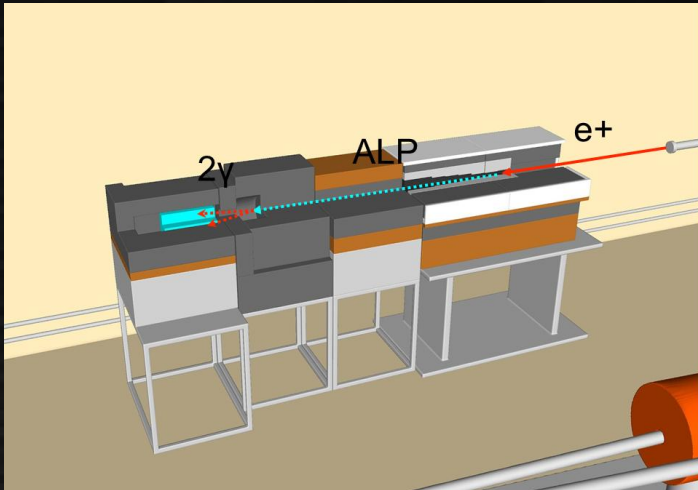


シンチレータ (日中独)

カロリメータ技術の応用: ビームダンプ実験

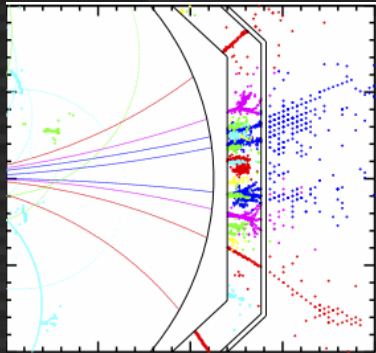
ILC電磁カロリメータ技術とKEK高輝度電子ビームを用いたビームダンプ実験によるALP(Axion-like-particle)探索

2 photon clusters should be seen as ALP signal

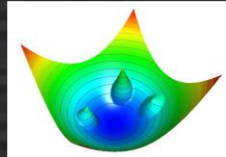
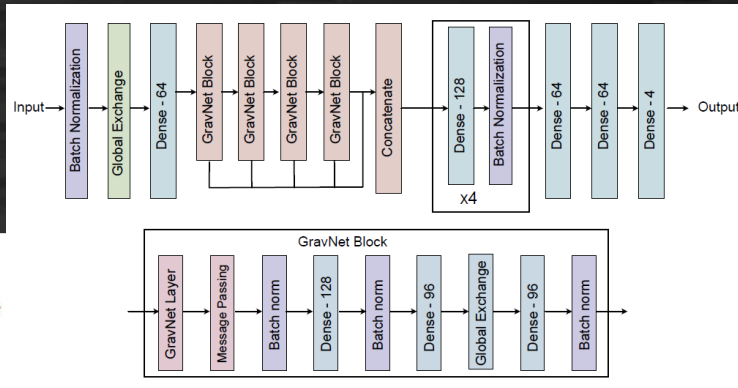


解析技術: 深層学習の活用

Particle flow



高精細カロリメータを使って
ジェットの中身の粒子を
一つ一つ分離して測定
従来の半分のエネルギー
分解能を実現

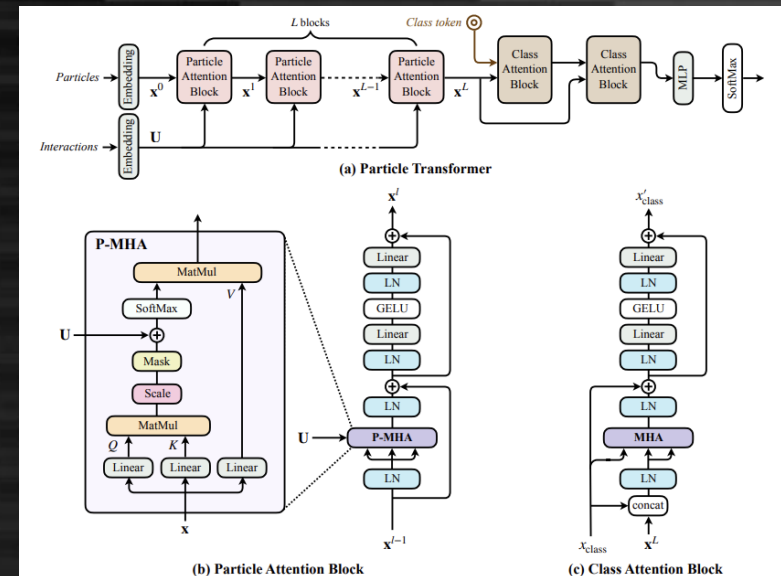


グラフニューラルネットワークやTransformer
を用いた方法で従来の方法を上回る性能が
得られ始めている。さらにピコ秒時間測定や
新しいカロリメータを組み合わせた性能も見たい。

ジェットフレーバー識別

ヒッグス崩壊等で生じるジェットの
種類を識別: 様々な物理測定の
性能に大きく寄与する

Particle Transformer (ParT)という
手法で従来を一桁も上回るS/N比を
実現。物理解析への性能を評価中。



さらなる情報は

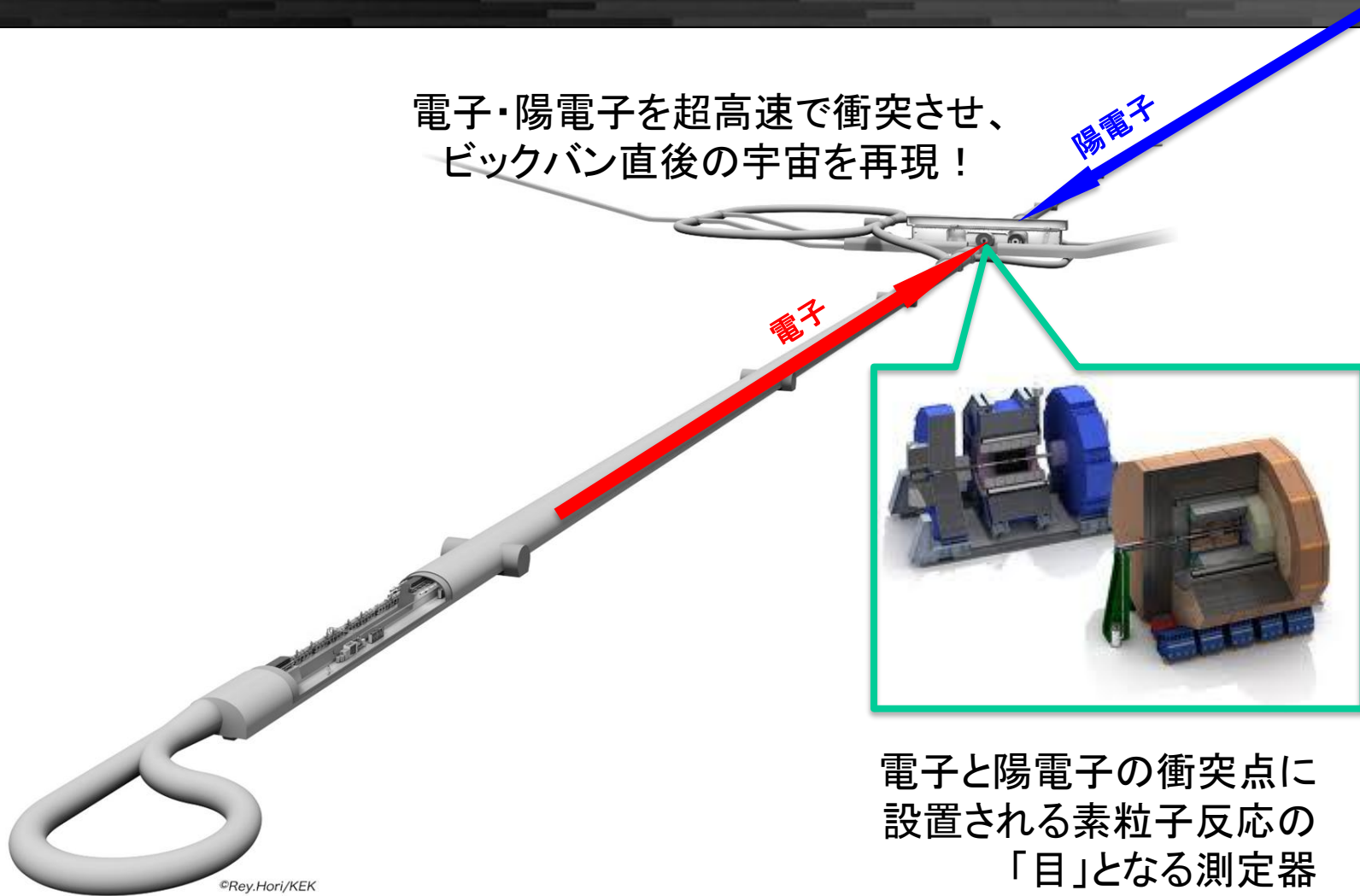
- ICEPP ILCグループページ
<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/ilc/index.html>
 - 各研究室のページにも飛べます
- ILC-Japan 大学訪問ページ
<https://agenda.linearcollider.org/category/297/>
 - ILCの物理・測定器・加速器紹介があります。
- ILC-Japan 物理ワーキンググループ
<https://agenda.linearcollider.org/category/283/>
 - セミナーを行っています。(やや専門的/英語)
- ぜひ直接話を聞きに来てください。
(石野、大谷、澤田、末原)
 - ICEPP webページに連絡先があります

まとめ

- HL-LHC後の将来コライダーとして、
e+e- Higgs factoryは最有力
 - ヒッグスを通じて新物理探索、時空の構造解明
 - 新物理直接探索も(今回は省略)
 - リニアコライダーならアップグレードで
50年以上にわたり新物理探索の最有力ツールに
 - Circular colliderは100 TeV ppコライダーへのステップになり得る
- ILCとCERNのFCC-ee, 中国など
様々なプロジェクトが進んでいる
 - いずれか一つは実現すると期待 (もちろんILCに強く期待)
 - 物理・測定器技術は共通技術が多く、協力して進めたい

ILCの測定器

電子・陽電子を超高速で衝突させ、
ビッグバン直後の宇宙を再現！

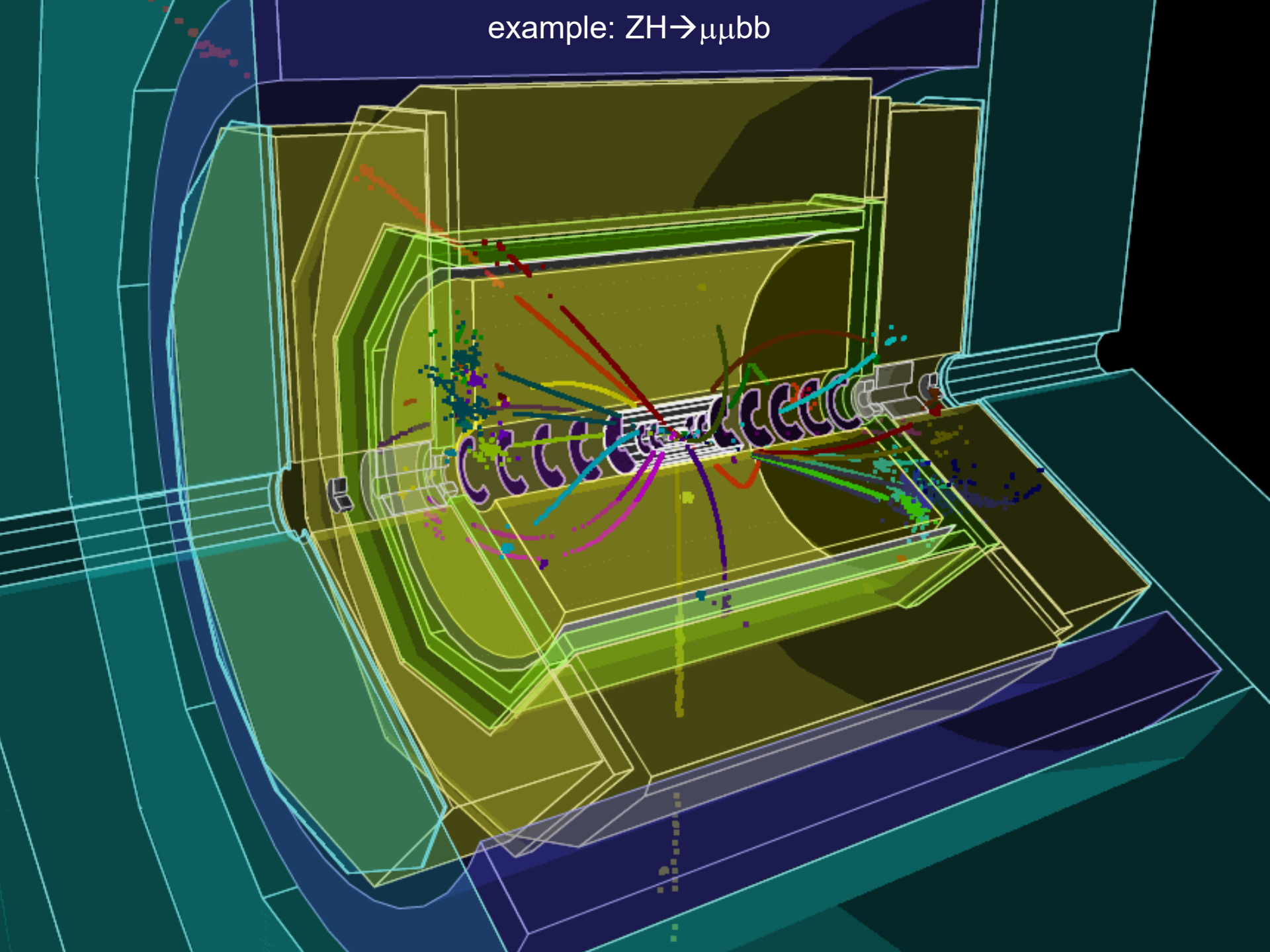


©Rey.Hori/KEK

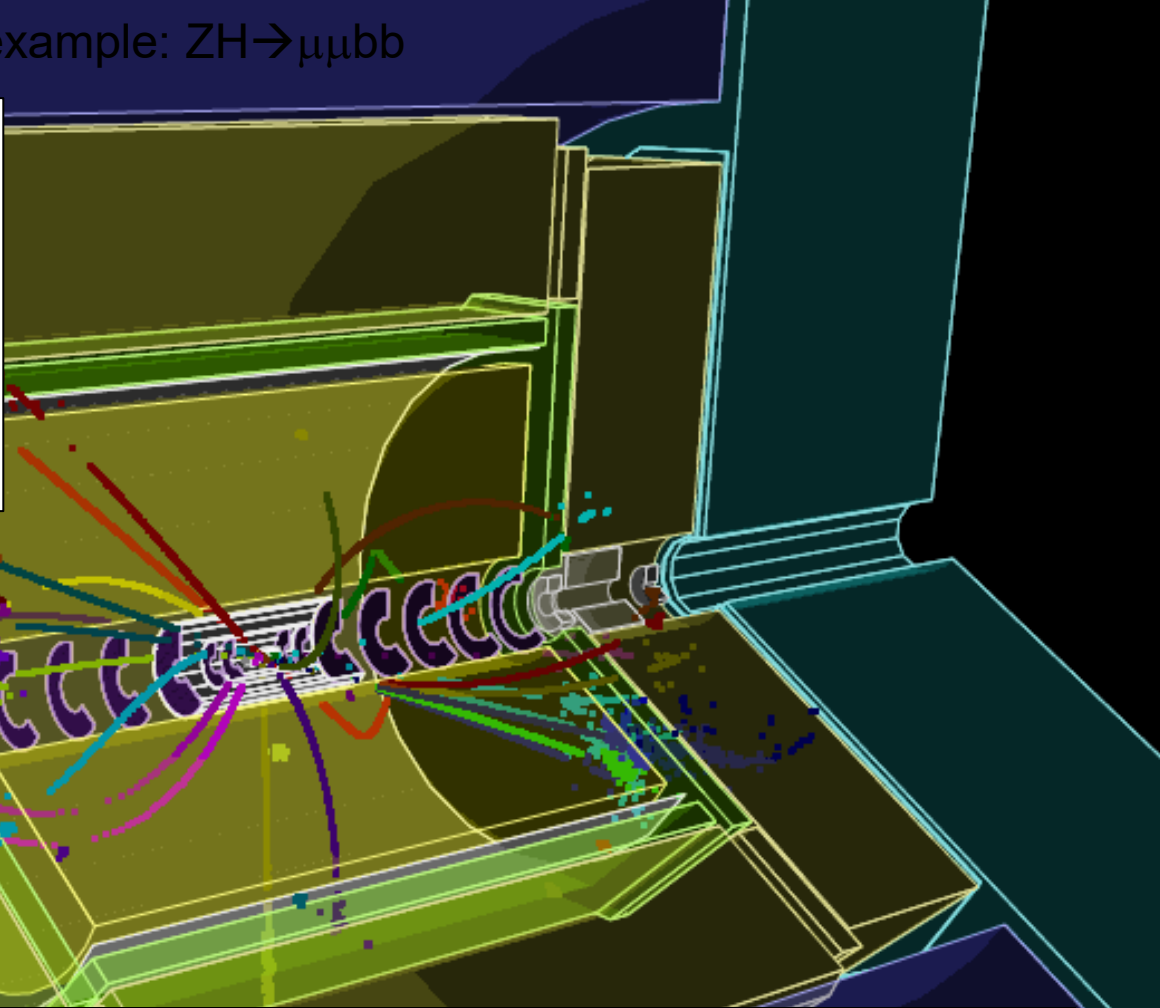
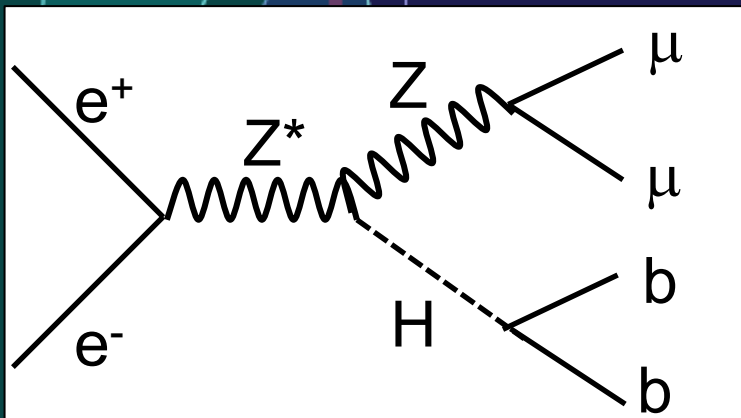
本日のトピック: 測定器

- 物質と粒子の相互作用
- ILC測定器の概要
- 検出器技術
- ILC測定器の検出器要素

example: $ZH \rightarrow \mu\mu bb$



example: $ZH \rightarrow \mu\mu bb$



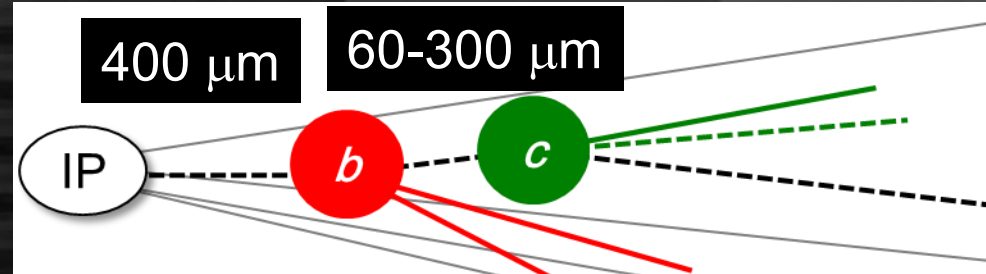
見たいのはZH反応

ただしZもHも即座に崩壊するため直接測定器では見えない
 μ とbの崩壊からできる多数の粒子(ジェット)を測定器で観測し、
それをもとにZとHの情報を再構成する

測定器で直接見えるのは、 $e, \mu, \gamma, \pi^\pm, K^\pm, K^0, n, p$ くらい

測定器で測れるもの

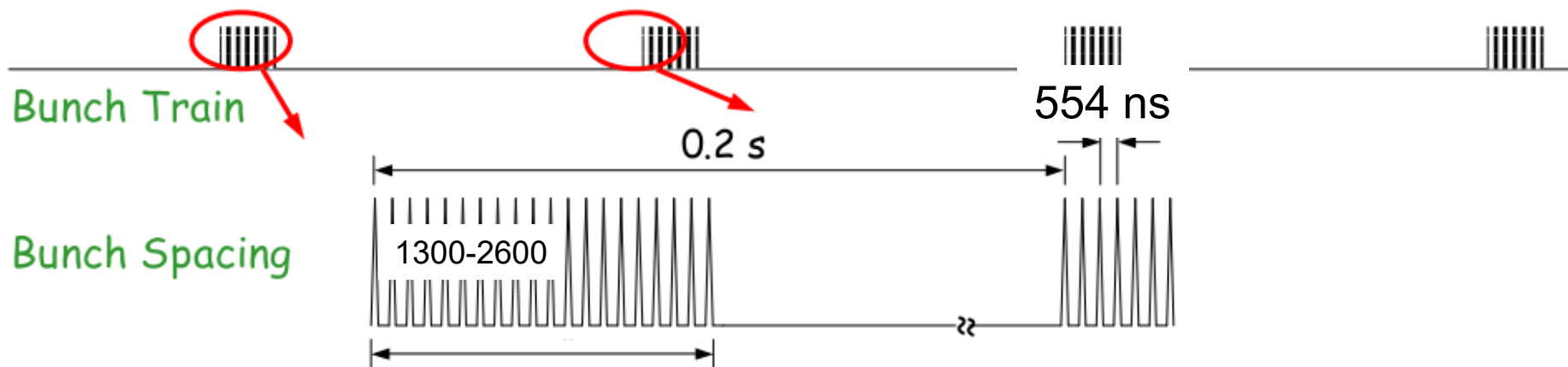
- 粒子の生成位置
 - 衝突点からのずれ (impact parameter)
- 粒子の生成時間
- 粒子の運動量・エネルギー
 - 荷電粒子は磁場で曲げて曲率から
 - 中性粒子はシャワーを起こしてカロリメータ
- 粒子の種類
 - 様々な識別パラメータを用いて総合的に評価



これらをいかに精度よく、間違いなく測れるかが測定器の性能

大規模実験の測定器のチャレンジ

- レート耐性、粒子分離
 - 同時/短時間に多数の粒子が飛来
- 放射線耐性
- 大量のデータ
 - 処理速度、蓄積速度、データ量、計算量

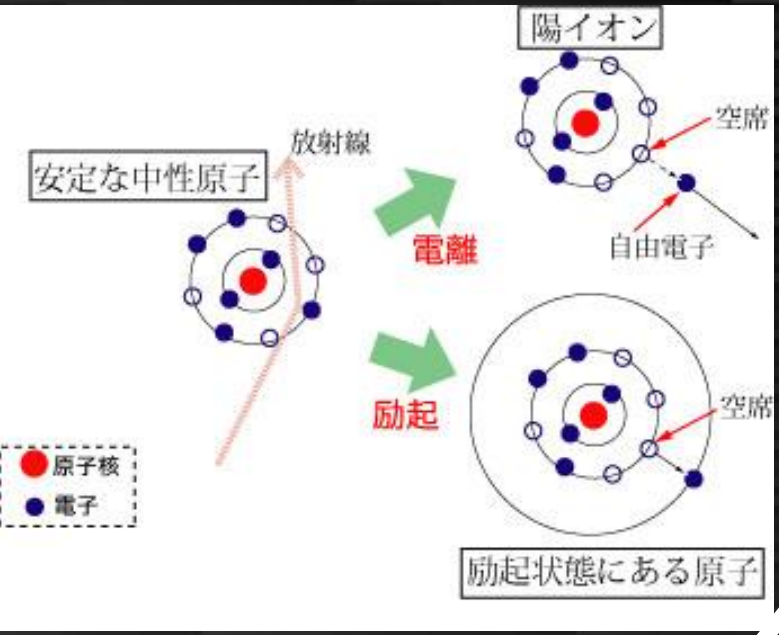


物質と粒子の相互作用

粒子と物質の相互作用

- 荷電粒子(のみ)の相互作用
 - 電離(ionization)
 - 制動輻射(bremsstrahlung) 電子のみ
 - チェレンコフ放射 etc.
- 光子の相互作用
 - 電子・陽電子対生成
 - コンプトン散乱(、トムソン散乱)
 - 光電効果 etc.
- その他(中性ハドロンなど)
 - 非弾性散乱など

ionization



charged particle

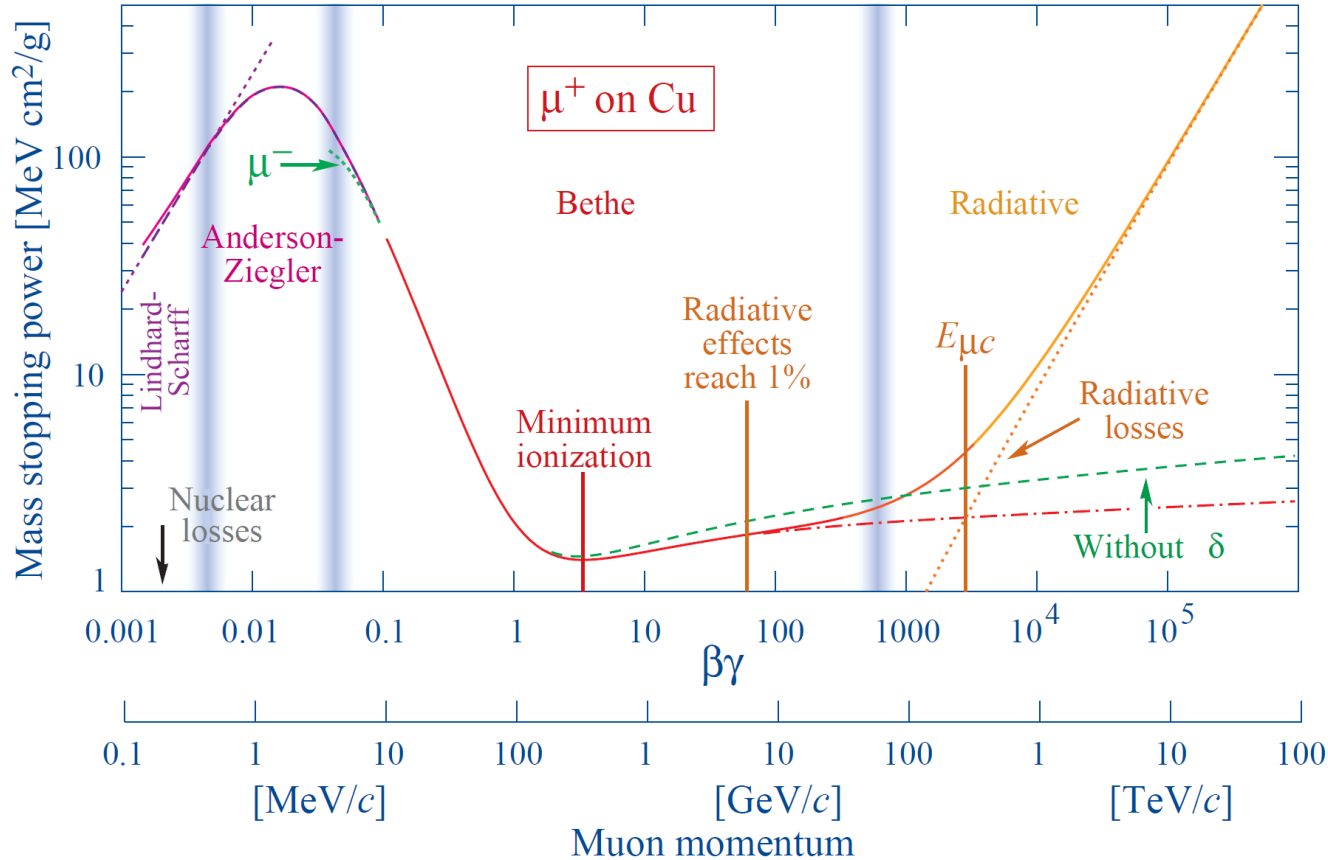
gas detector

e^+e^- pair

sensor layer

粒子のエネルギーと物質質量で生成するpairの数は決まる
pairの時間・空間情報を再構成するのが測定器

荷電粒子の検出

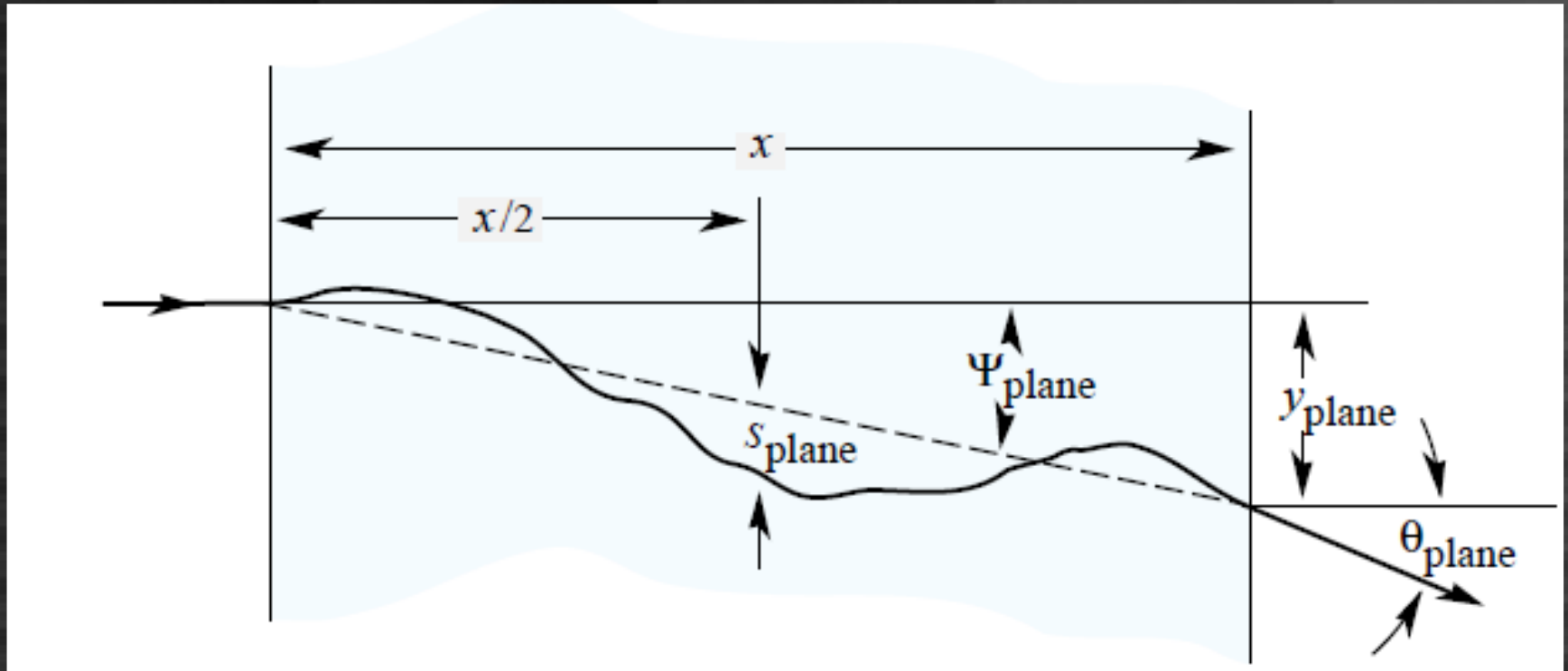


検出器で
見える主な
荷電粒子
 π (140 MeV)
K (494 MeV)
p (938 MeV)
e (0.511 MeV)
 μ (106 MeV)

jetの中身は
ほとんど π/K

electron以外は、希薄な物質中では主にionizationでエネルギーを落とす。

electron – multiple scattering

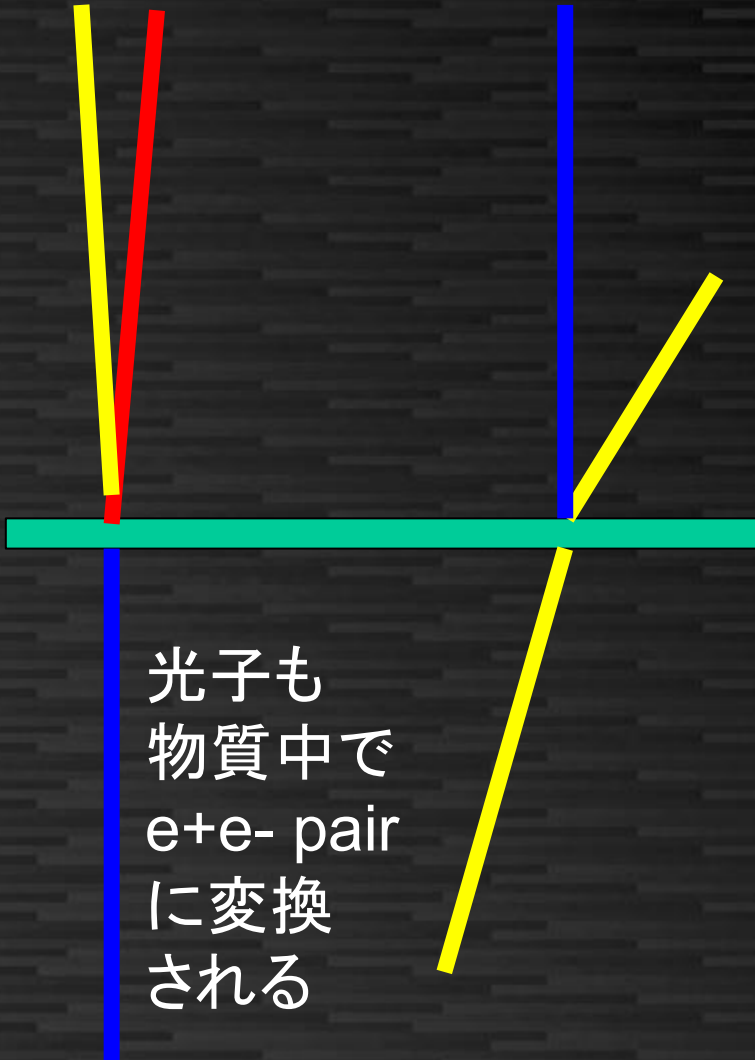


electronは衝突する相手が軽い近似が使えないので
1回1回の散乱の影響が大きい
よって直線上にトラックを描かない

制動放射

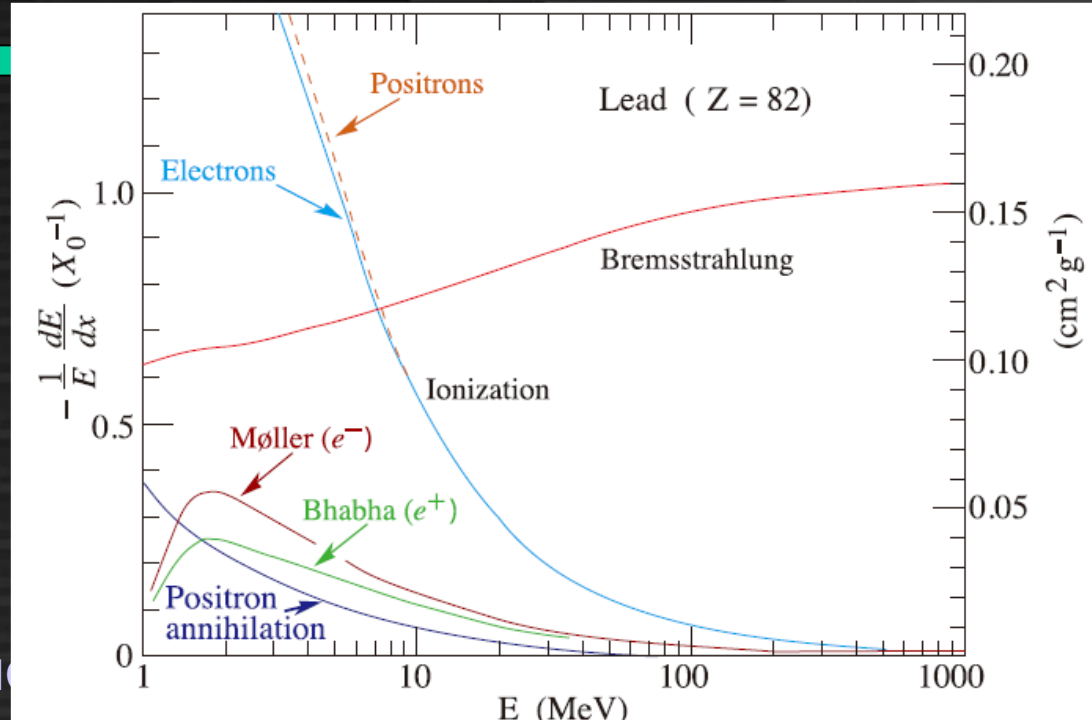
荷電粒子(特にelectron)が物質にぶつかるとbremsstrahlung(制動放射)やmultiple scatteringによりもとの電子の運動量が乱されることがある

物質量を減らすことで確率を減らせる
ILCのtrackerは低物質量



光子も
物質中で
e+e- pair
に変換
される

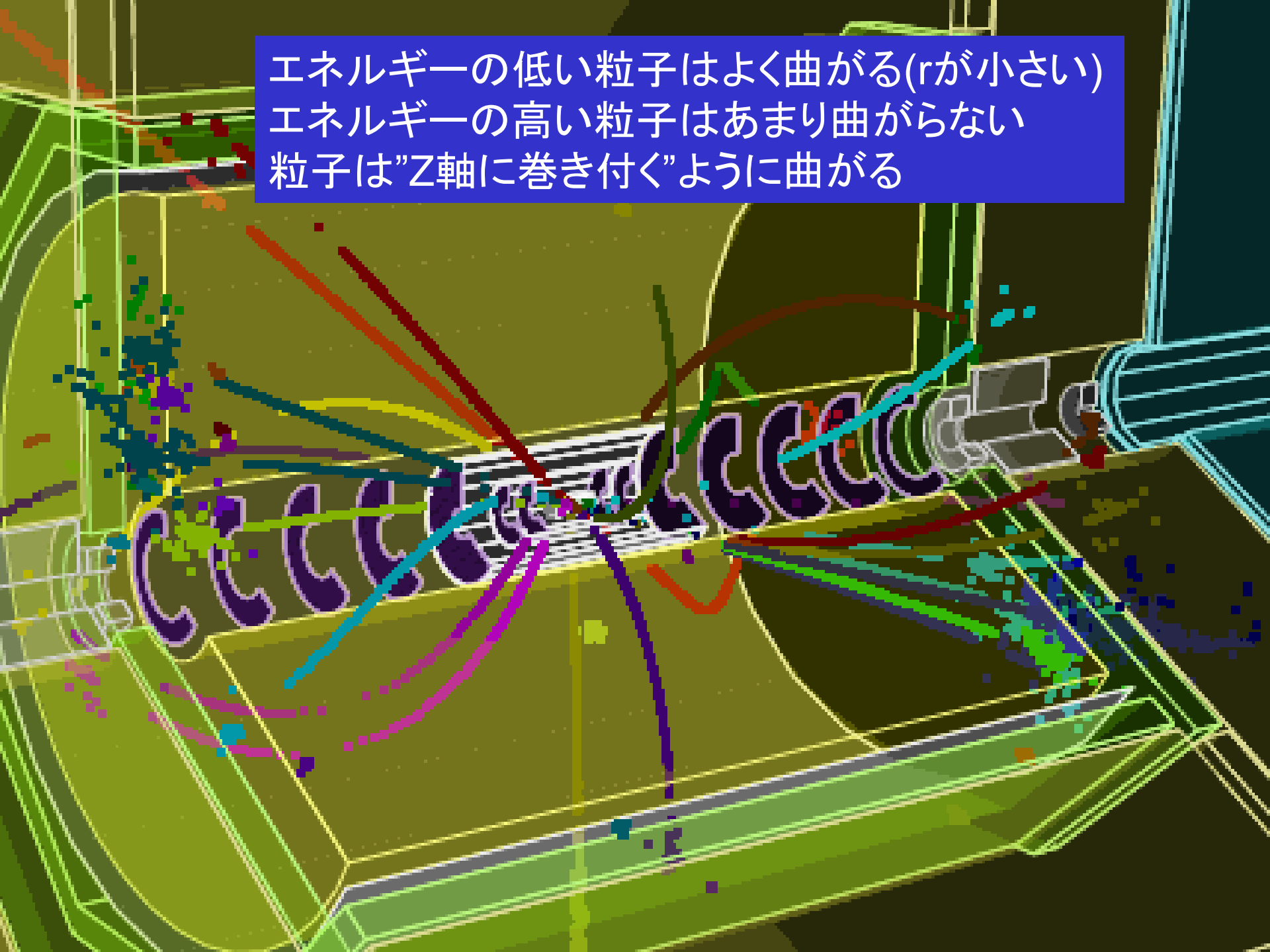
Taikan Suehara, I



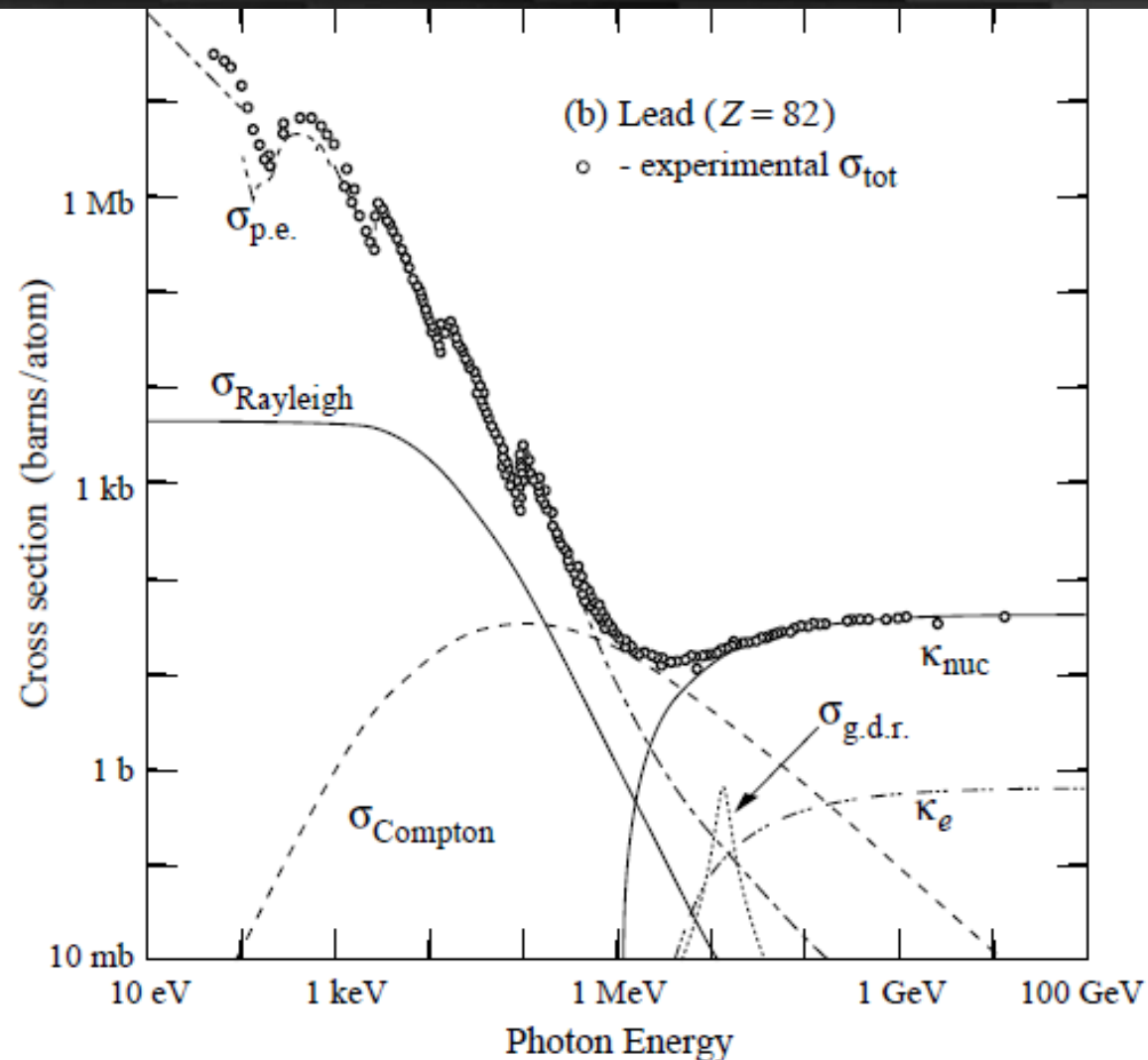
磁場と運動量

- 荷電粒子の飛跡がわかれば磁場から運動量が求められる
 - 磁場はビーム軸(Z)方向のソレノイド磁場
 - 一様性が重要
 - r方向に粒子はカールする。z方向は曲がらない
 - $p_T [\text{GeV}] = 0.3 B [\text{Tesla}] r [\text{m}]$
(ローレンツ力の式から求められる)
 - p_z と p_T の比は粒子の放出角から求められる → pが求められる
 - 精度はとても高い(カロリメータに比べ)

エネルギーの低い粒子はよく曲がる(r が小さい)
エネルギーの高い粒子はあまり曲がらない
粒子は”Z軸に巻き付く”ように曲がる



photonの反応



光電効果

高Eではほぼない

コンプトン散乱

中Eでややある

e^+e^- 対生成

中高Eでdominant

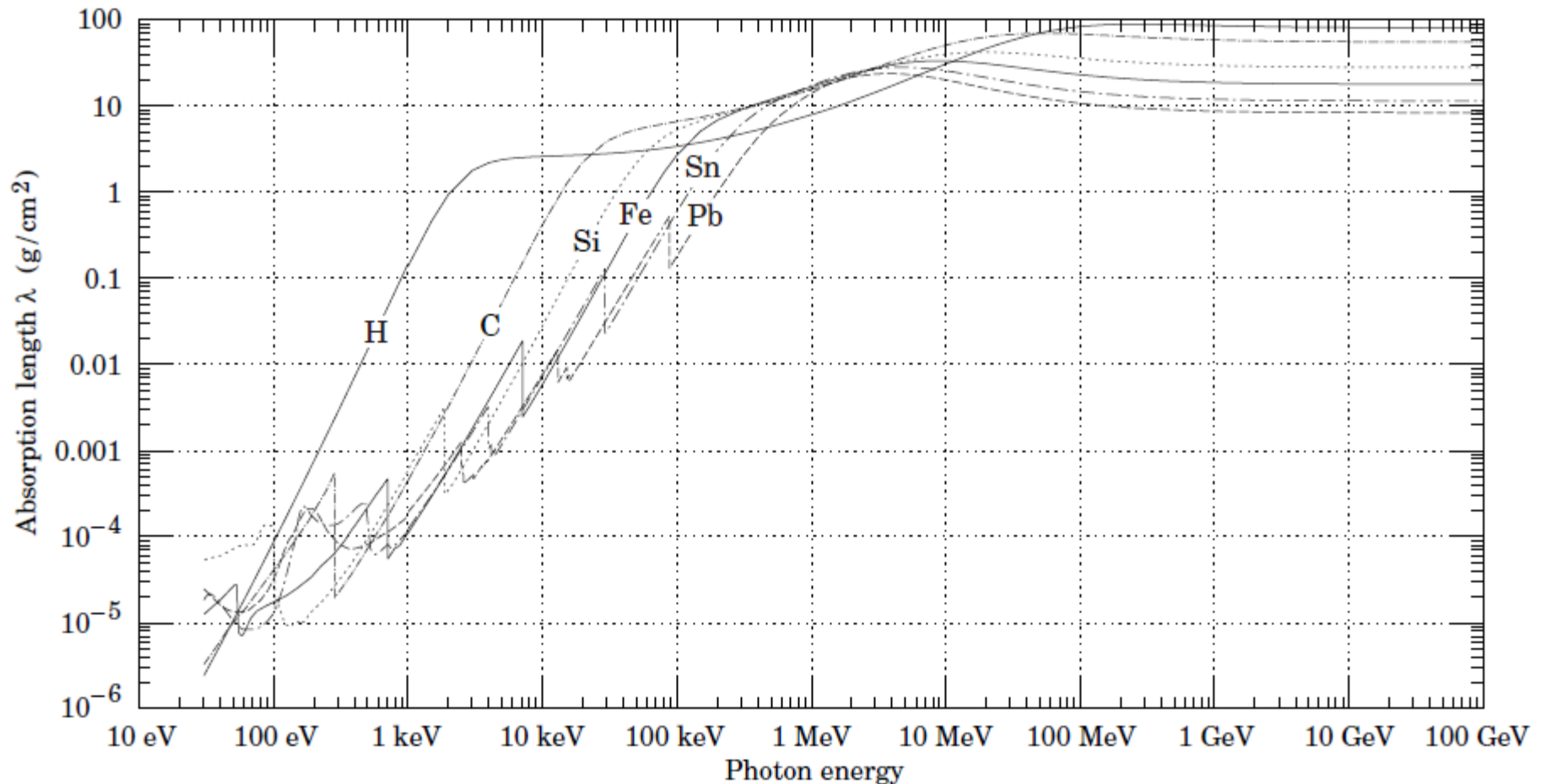
荷電粒子と違って
連続的な反応ではなく
大きな変化が
確率的に起こる

本質的には上記反応で
荷電粒子に変換して見る

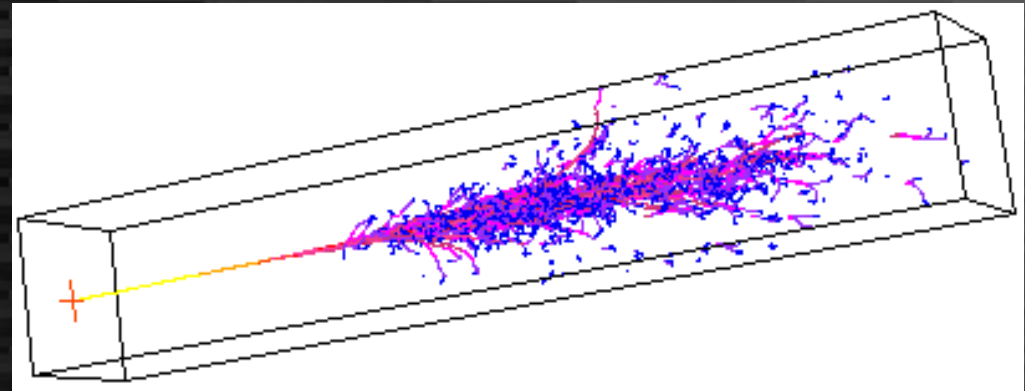
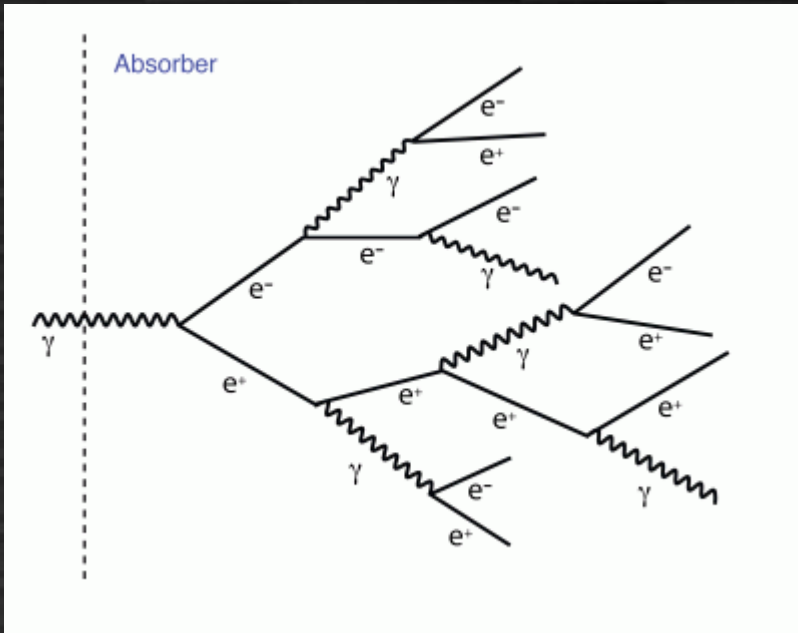
radiation length X_0

photonの対生成の平均自由行程の7/9

electronのenergyがbremsstrahlungで平均1/eになる物質質量



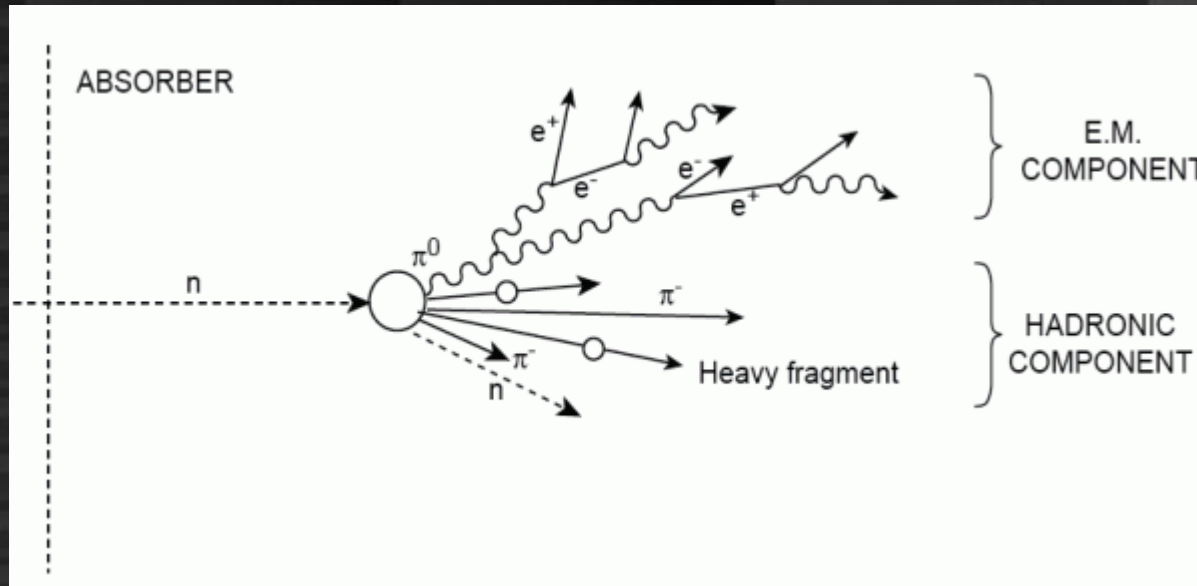
electromagnetic shower



対生成と制動放射が交互に起きて粒子がなだれ状に増大。1粒子のエネルギーが低下して対生成できなくなるまで続く。「電磁シャワー」
粒子数と元の光子のエネルギーはほぼ比例関係。

モリエール半径
(シャワーのエネルギーの90%が入る半径)
原子番号大、高密度の物質で小さくなる

neutral hadronとhadron shower



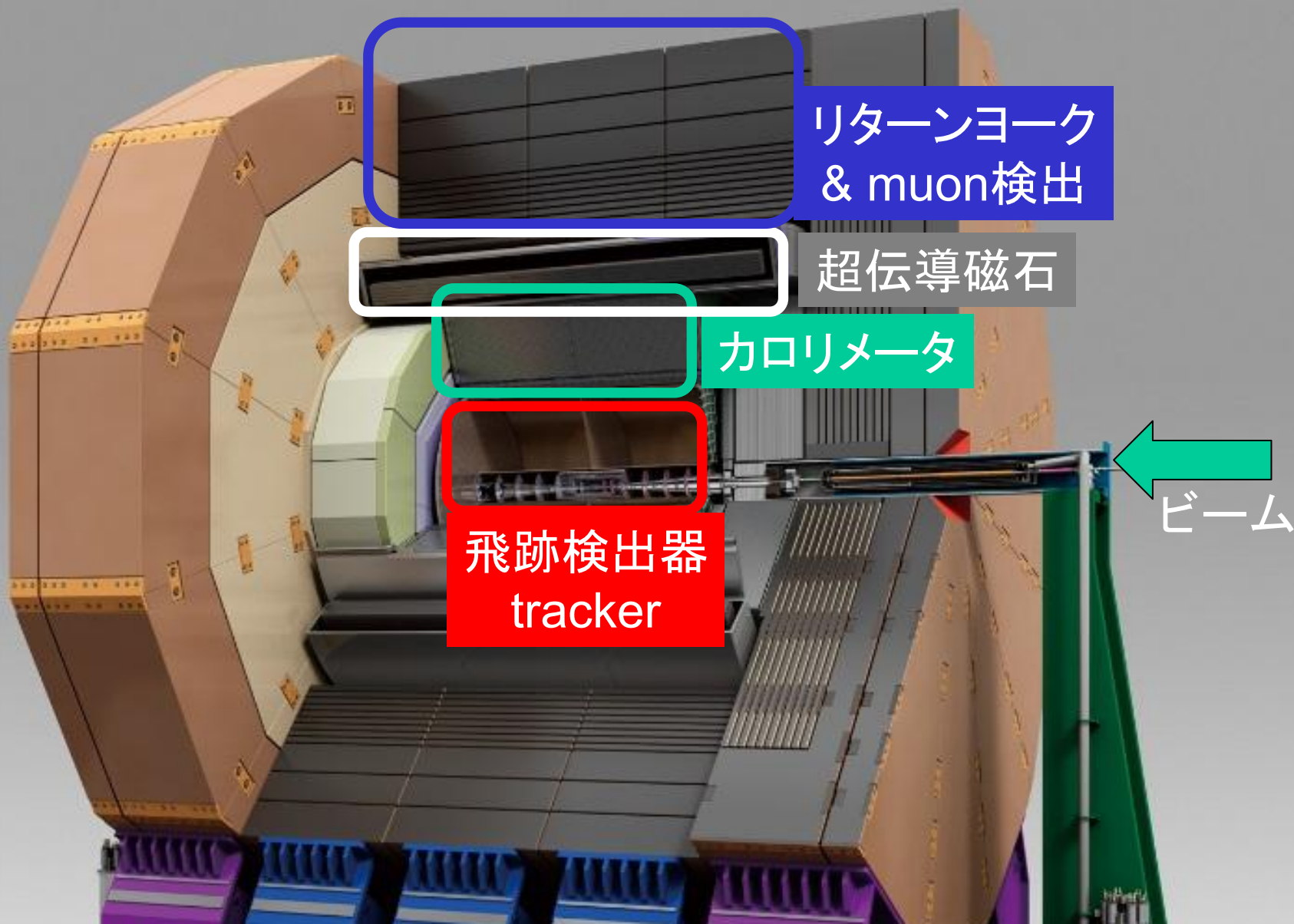
核破碎反応により主にpionを生成
 π_0 はすぐにphotonに崩壊、電磁シャワーを起こす
ニュートリノも発生するため全エネルギーを
荷電粒子に変換できない → resolutionが悪い
ハドロン相互作用長 λ は電磁シャワーよりずっと長い
→ 大きな測定器が必要となる

粒子と物質の相互作用まとめ

- 荷電粒子(のみ)の相互作用
 - 電離(ionization) 電子はmultiple scattering
 - 制動輻射(bremsstrahlung) 電子のみ
 - 磁場で曲がる (p_T [GeV] = 0.3 B [Tesla] r [m])
- 光子の相互作用
 - 電子・陽電子対生成 (> 10 MeV)
 - コンプトン散乱 (0.1 – 10 MeV)
 - 光電効果 (< 1 MeV)
- 中性ハドロンの相互作用
 - 非弾性散乱(核破砕)など

ILC測定器の概要

測定器の構造



リターンヨーク
& muon検出

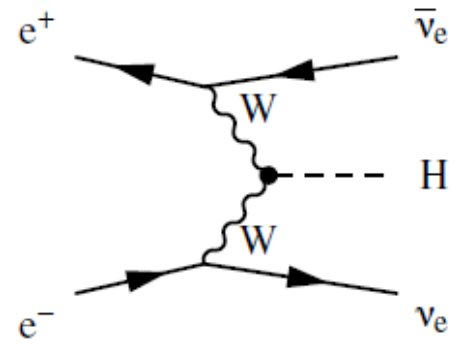
超伝導磁石

カロリメータ

飛跡検出器
tracker

ビーム

測定器の構造



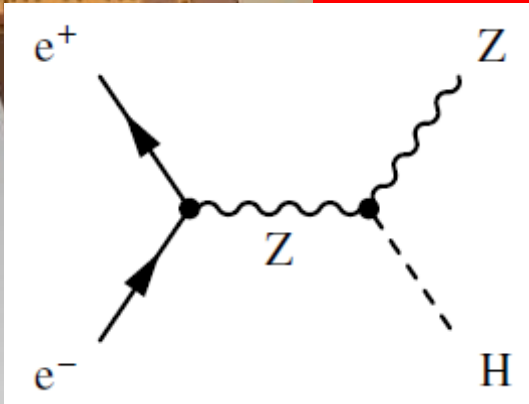
エンドキャップ

ビーム

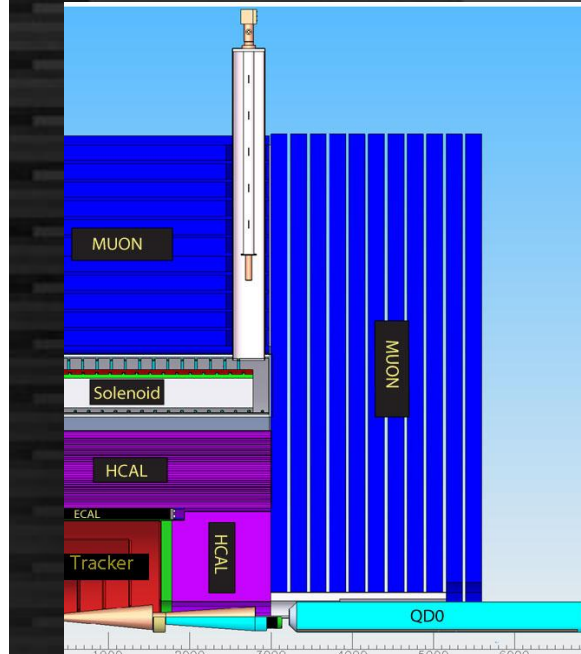
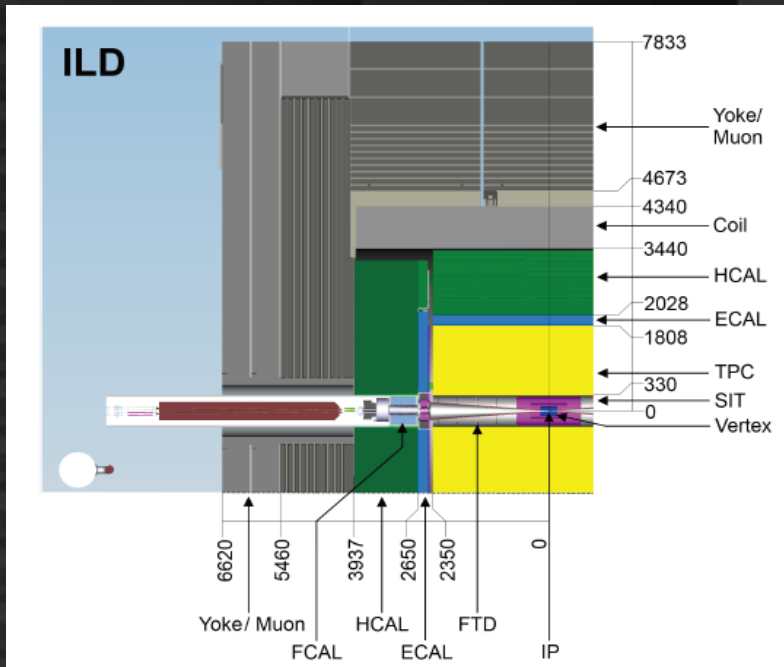
θ

バレル

Z軸



ILD & SiD



	ILD	SiD
Vertex	CMOS/CCD/...	Chronopixel/3D/...
Tracker	Silicon + TPC	Silicon
ECAL	Silicon/Scintillator	Silicon/MAPS
HCAL	Scintillator/GRPC	Scintillator/GRPC
Magnet	3.5 Tesla	5 Tesla
r_{ECAL}	1800 mm	1250 mm

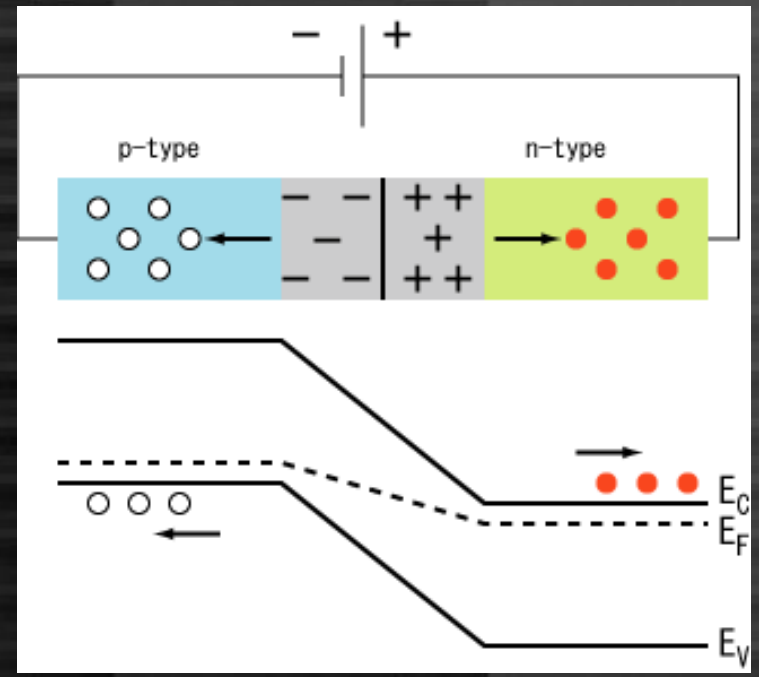
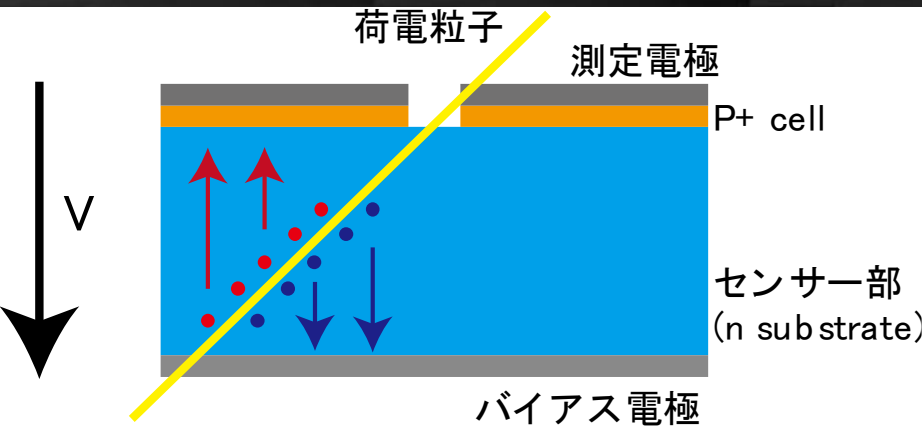
SiD is...

- Smaller
- Cheaper (~20%)
- More advanced
- Slightly worse in PFA performance

検出器技術

- 半導体検出器 (シリコン)
- ガス飛跡検出器
- シンチレーション検出器

半導体検出器 (PNダイオード)



P+側にホール、N側に電子が存在
 (逆)バイアス印加により
 ホール・電子が電極に吸い寄せられ
 間にキャリアのない空乏層が発生

荷電粒子が通過すると荷電子帯の
 電子・ホール対が伝導体に励起
 され電流が流れる

	Bandgap p	Z	特徴
Si	1.1 eV	14	安価
Ge	0.7 eV	32	低温必須
CdTe	1.4 eV	48-52	毒性
CVD	5.5 eV	6	放射線耐性

シリコンセンサー

- 半導体センサー
 - Bandgap energy 1.12 eV
 - Ionization energy 3.6 eV
 - 1 MeV で 3×10^5 e/h pair (cf. NaI: 2×10^4 pe/MeV)
 - Energy loss at MIP 80 e/h pairs / μm
- 常温で使用可 (cf. Ge: 冷凍機必要)
- 「産業のコメ」...
幅広く使われ入手性がよい
 - Siは石から取れる

従来型シリコンセンサー

- 原材料: High resistivity silicon wafer
 - Resistivity 大 → 浮遊電荷小
→ 低い電圧で空乏化
10 k Ω ·cmが目安 → 300 μ mのセンサーで<100V
- 厚み=信号量 (ゲインなし)
 - 厚い方が信号大、ただし物質量大
 - いくつか規格があり、そのまま使うと安くなる
(6インチ: 320/500 μ m、8インチ: 720 μ mなど)
 - 信号量 a few fC (MIP) アンプ必須(性能が重要)
- ウェハサイズ
 - 4インチ/6インチ/8インチ/12インチ

従来型シリコンセンサー: 種類

- センサーの種類

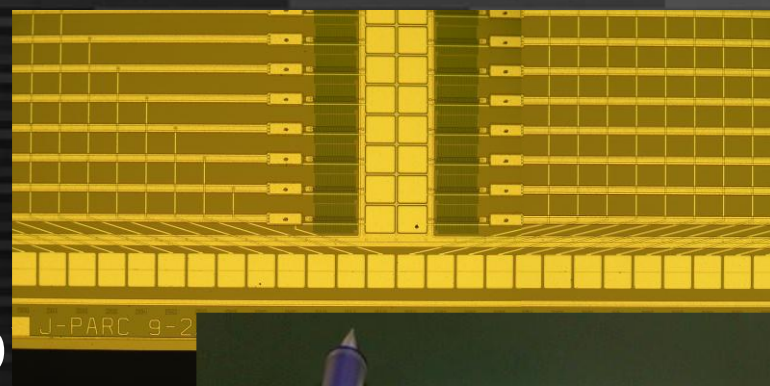
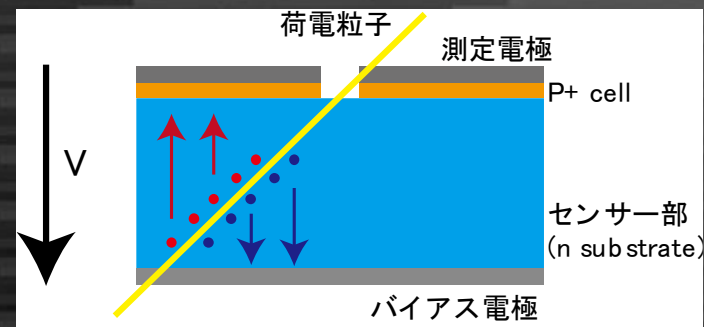
- ストリップセンサー (SIT/SET)

- P+部をstrip状に分割、
1次元位置検出

- 縦と横を組み合わせて
2次元位置検出 (2 x SSSD)
 - 裏面もパターンニングして
1枚で2次元検出も可能(DSSD)
 - Hit密度が高くとゴーストが生じる

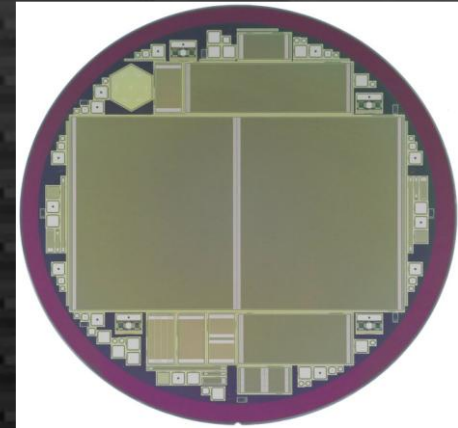
- パッドセンサー (ECAL)

- 2次元に分割したセンサー
 - 位置精度は低い
がゴーストはない



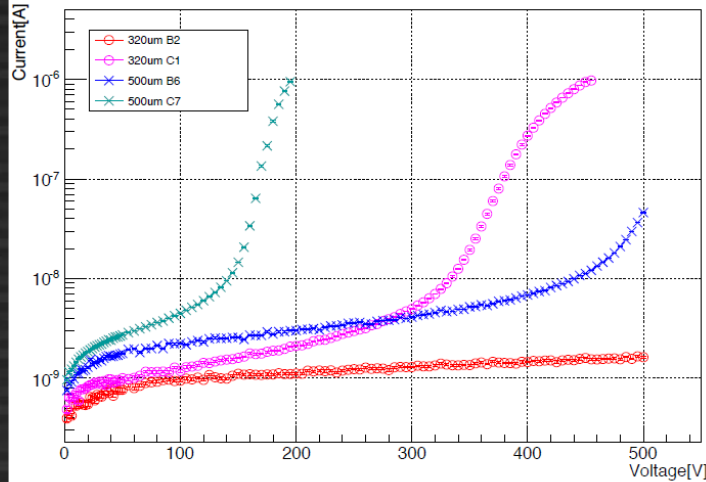
シリコンセンサーの製作 (HPK)

- フォトマスクの製作
 - ウェハ状にセンサーをレイアウト
 - センサーの大きさ、種類、cell/strip sizeなど
 - ガードリング構造
 - 読み出しパッドの構造 など
 - 概要を提示→HPKが詳細デザイン
- センサーの製作
 - フォトマスクを選択(既存のものも選べる)
 - センサーの厚み、抵抗率、枚数など
 - 納期数ヶ月



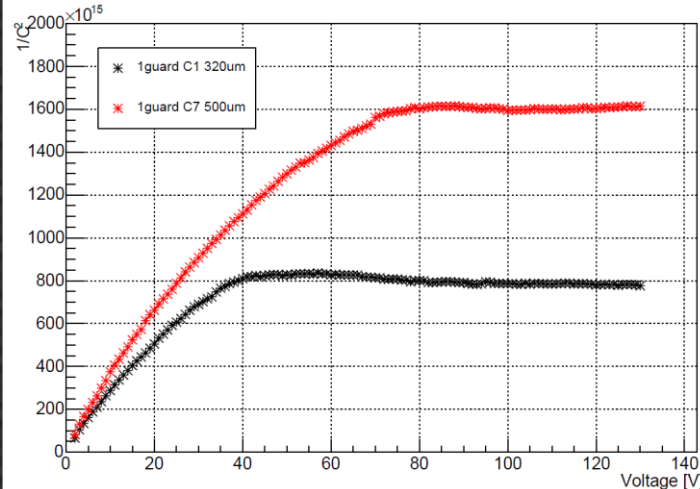
シリコンセンサーの性能評価

I-V curve (0 guardring Edge)

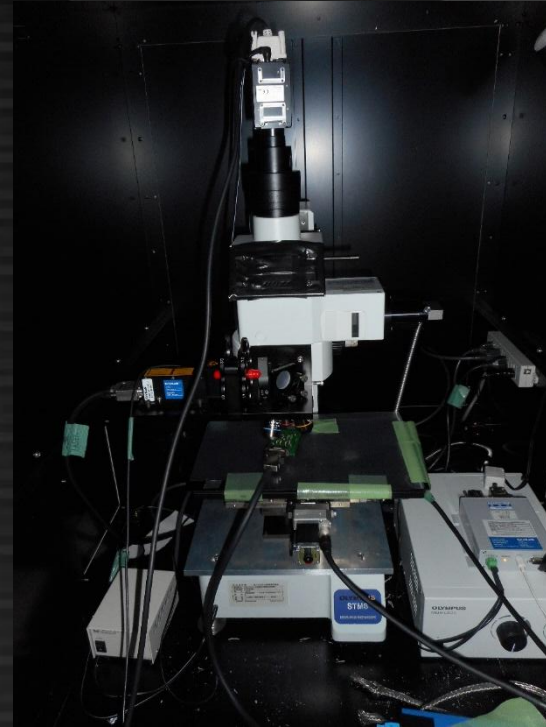


電圧電流特性
暗電流、breakdown電圧の測定

Capacitance



容量電圧特性
検出器容量、空乏化電圧の測定



レーザー照射試験
検出器応答を再現
(ただしセンサーに
開口部が必要)

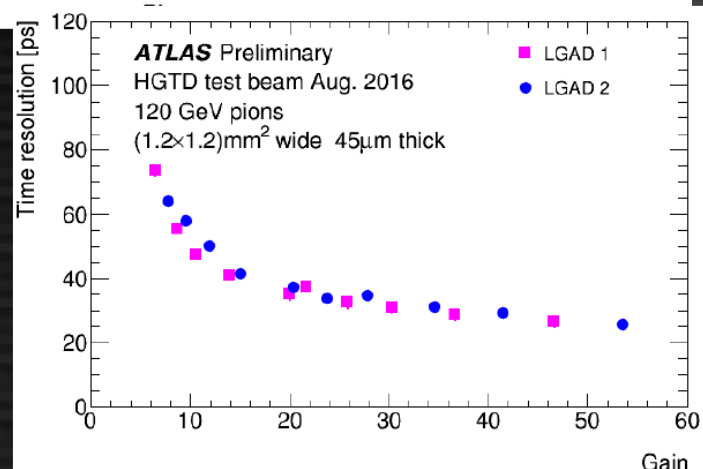
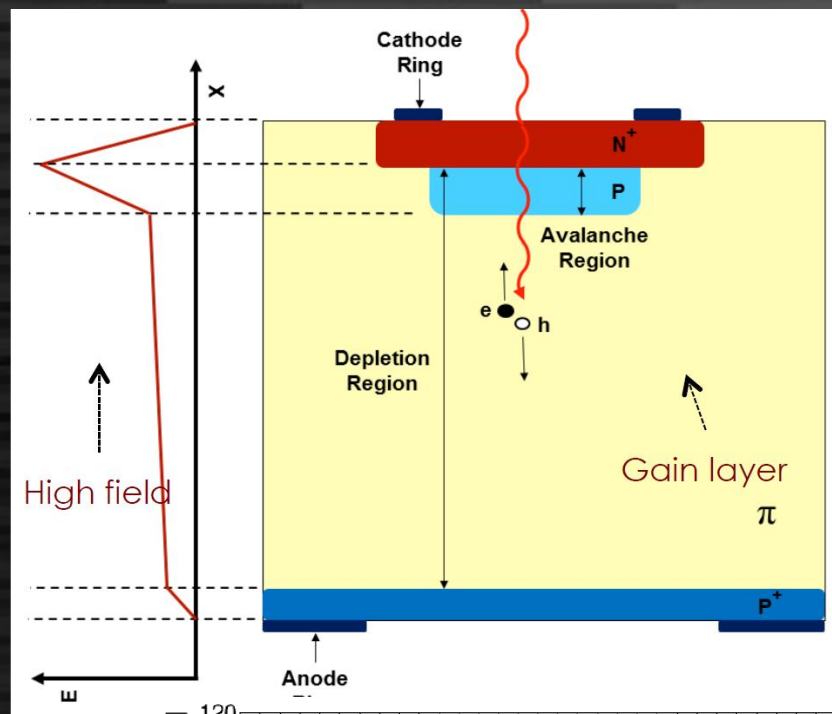
1064 nm pulsed
Nd:YAG レーザ

シリコンセンサーの放射線耐性

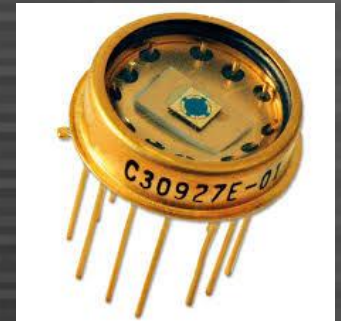
- Ionization Dose
 - 絶縁部にイオンが蓄積し、絶縁が悪くなる
 - 荷電粒子によるダメージ
 - センサー表面へのダメージ、センサー構造による
- Displacement Effect
 - バルク部のシリコンが原子核散乱によりたたき出される→格子構造が変化
 - 暗電流が増加する
 - ダメージは構造によらず、よく理解されている
 - ILCの場合、forwardを除き影響は小さい
 - N bulkは照射の蓄積によりP bulkに変化

アバランシェ増幅

- Breakdown電圧の付近で「制御された」なだれ増幅を起こすことができる
(通常は $V_{br} + \text{数}V$)
- 光検出器に用いられ大きな成果
- 最近荷電粒子のセンサーにも応用 (LGAD)
 - 速い時間応答 (数10ps)

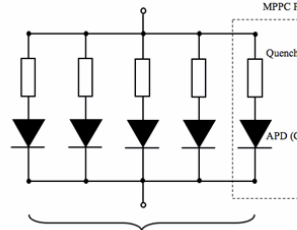
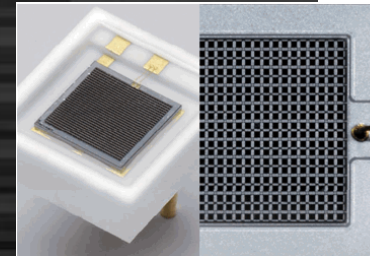


半導体光センサー



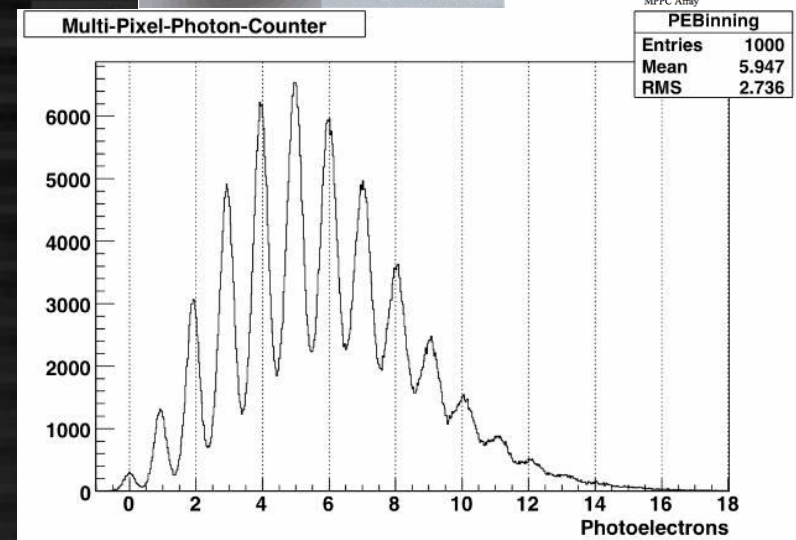
- APD (avalanche photo diode)

- 通常はG ~ 100程度
- 通常結晶シンチレータ等光量の多いシンチレータと組み合わせて使う
- 応答は速い



- SiPM/MPPC

- ガイガーモード、G ~ 10^6 , 原則アンプ不要
- 多数のピクセル(例: 1600)を一つのoutputに接続



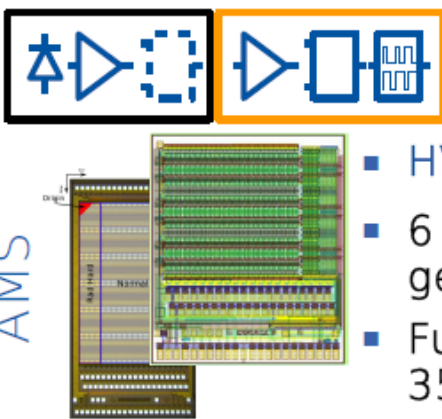
- 入ったセルの数を数える (photon counting)
- 1セルに複数hitした場合はカウントできない(数nsのrecovery time後は再びactive)

Monolithic Silicon Sensor

- 民生用シリコンチップ
 - バルク部は単なる保持材、上部に回路をパターン
- 測定器用シリコン
 - バルク部が信号生成部、上部に分割/接続部
→ 上部に回路を形成すれば一石二鳥
- 課題
 - 民生用は高抵抗でない(空乏化しない)
 - HVCMOS, HRCMOSなど開発が進んでいる
 - バイアス電圧をかけると回路特性が変化
 - 電圧をかけないと速度が遅い
 - 歩留まり (大きなチップは実現例があまりない)

Concepts and Prototypes

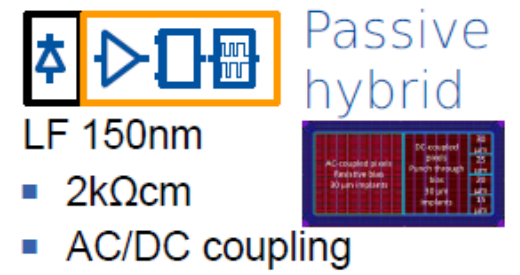
AMS



Active hybrid

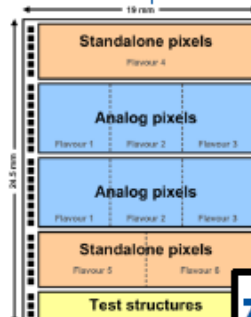
- HVMOS 180nm process
- 6 small prototype generations
- Full size demonstrator in 350nm process

Passive hybrid



LF 150nm

- 2kΩcm
- AC/DC coupling



19.5mm

24.5mm

Standalone pixels Flavour 4

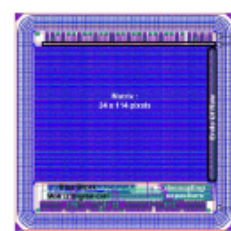
Analog pixels Flavour 1 Flavour 2 Flavour 3

Analog pixels Flavour 1 Flavour 2 Flavour 3

Standalone pixels Flavour 5 Flavour 6


Test structures

LFoundry



- 150nm HRCMOS process on 2kΩcm substrate
- CCPD_LF: initial prototype
- LF-CPIX: Large demonstrator adapted to FE-I4 readout

Monolithic readout



Matrix ring

Matrix : 34 columns of 168 pixels

Test structures = PADs + digital control + bias

MONOPIX

MALTA

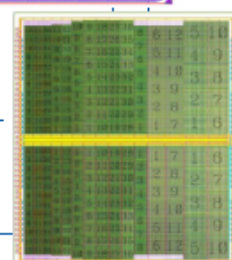
ATLASPIX

→ later

Also investigated: Global Foundry, ESPROS, Toshiba, STM, IBM, XFAB

TowerJazz Investigator

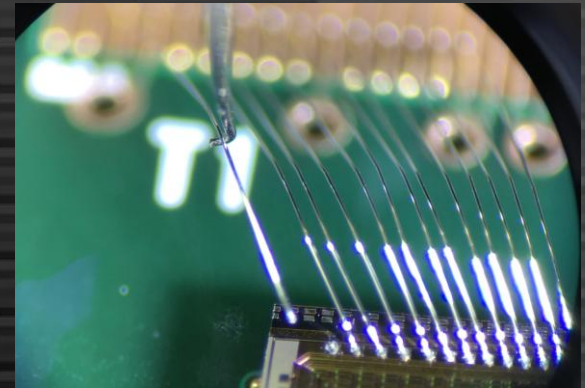
- 180nm 1kΩcm epi layer
- 3T source follower readout



センサーの接続方法

- ワイヤーボンディング

- 金属細線を熱/超音波で微細なパッドに接続
 - 細かいピッチ(0.1 mm以下)に対応
- 特殊な機器(wire bonder)が必要
- 物理強度が低い(取扱注意)

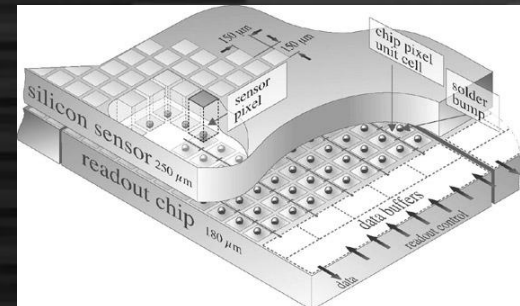


- バンプボンディング

- センサーに金属のバンプを形成、熱により融着
- ワイヤーより広いピッチだが、強度が高い

- 導電性接着剤(常温硬化)

- 熱をかける必要がない(圧をかける必要)
- 均一に塗布する方法に工夫が必要



読み出し技術(ASIC)

- シリコンセンサーの読み出しには高性能アンプが必要
 - 高速、低ノイズ
- 多チャンネルのため従来のディスクリット型アンプでの対応は困難(スペース・配線の問題)
- 多チャンネルの読み出しに対応したLSIを開発する必要あり
- Monolithicの場合はセンサーに統合されている
 - Pixelごとにデジタイズ機構がつく(CCD以外)
スペースに制限 (pixelが小さいと複雑なことができない)
process ruleを細かくすればよいが、値段UP

読み出し回路の一例(SKIROC2)

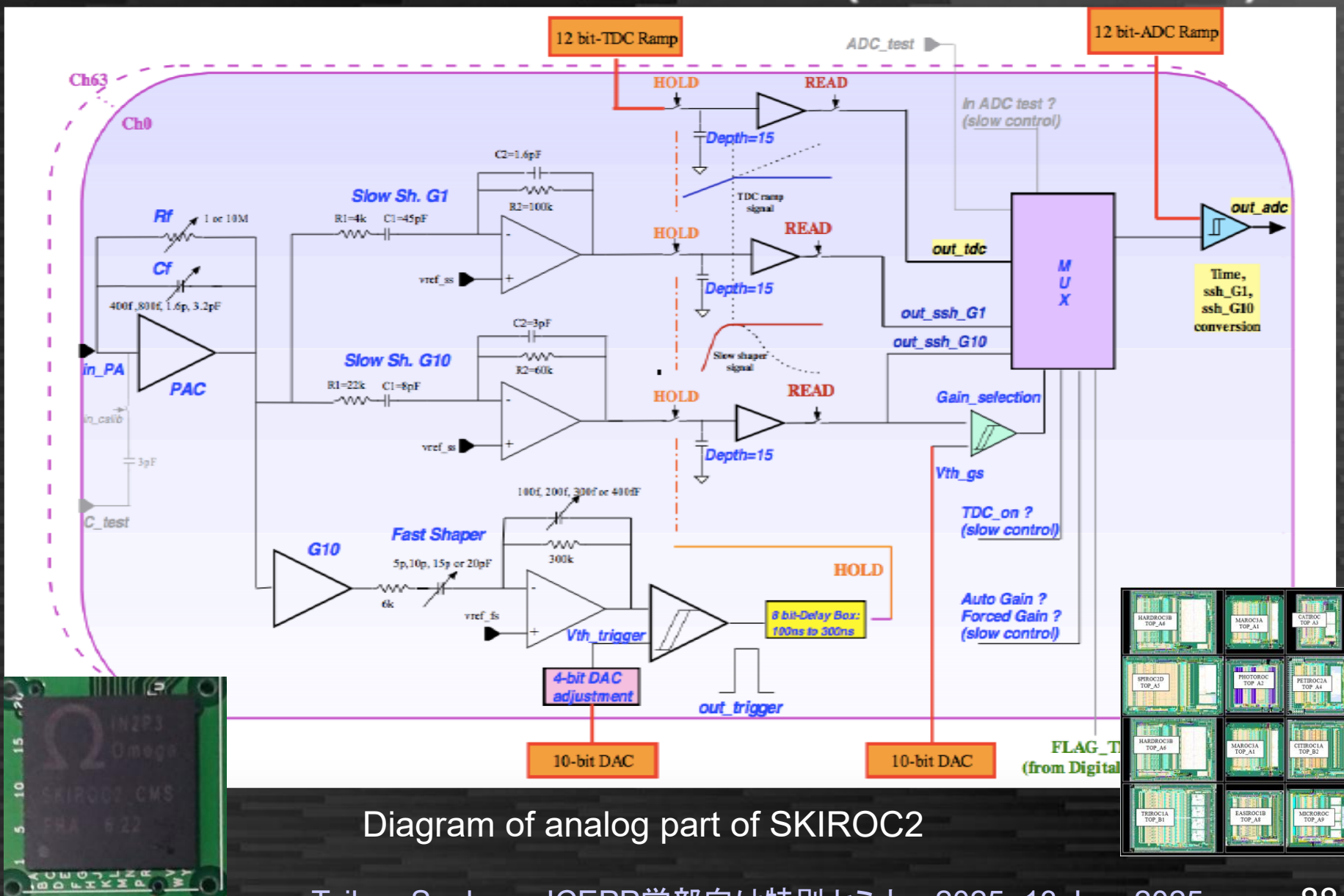
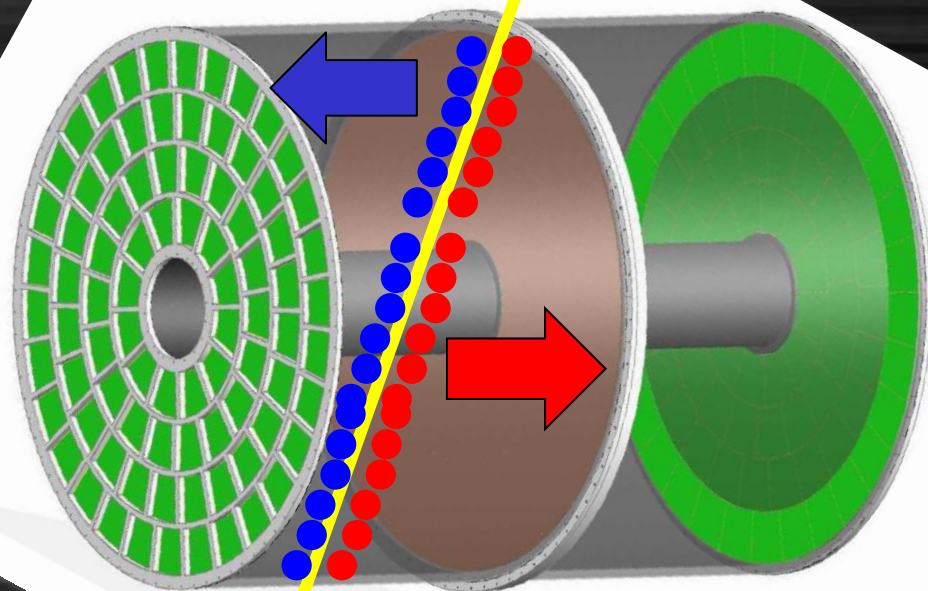


Diagram of analog part of SKIROC2

シリコンセンサー: まとめ

- シリコンは荷電粒子のセンサーとして応用が広い (高い分解能、常温利用可、放射線耐性)
- Monolithic or separate sensor
 - Monolithicは安くなるかもしれない (民生用)
 - ただし初期コスト(フォトマスク)が高いため小規模実験には向かない (大実験のものを流用は可能)
 - ノイズは小さいが、空乏層の厚みを取れない
 - 速度に課題
 - Separateタイプはお値段が課題
 - 技術は枯れている。チャンネルが増えると接続が困難
 - HPKが独占していて安くない...
- 新技術に注目 (LGAD, SOI, 3D, ...)

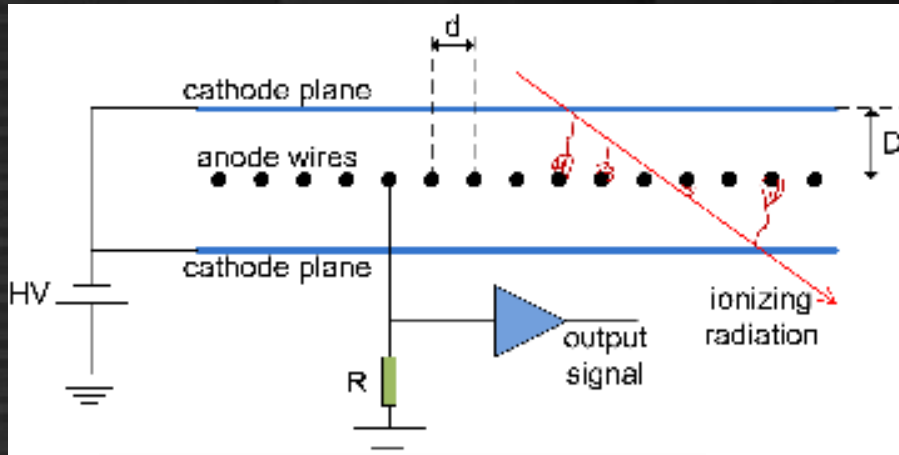
ガスTPC



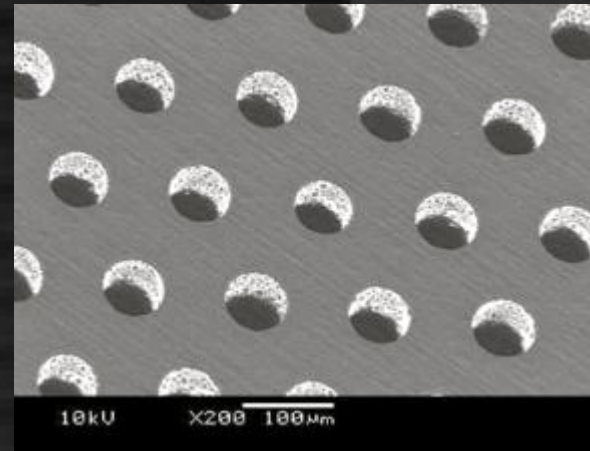
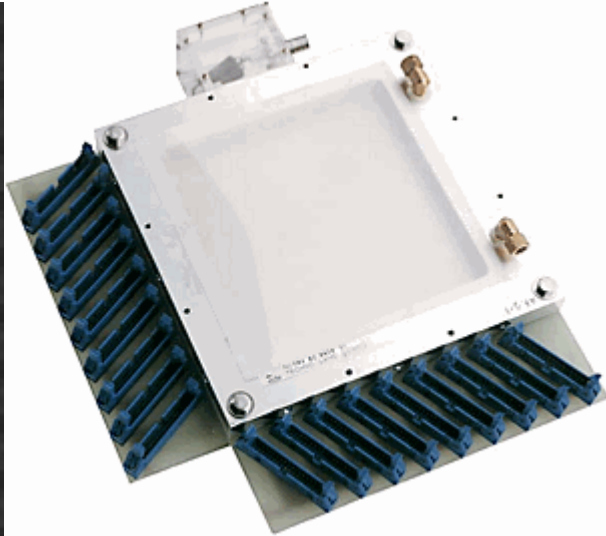
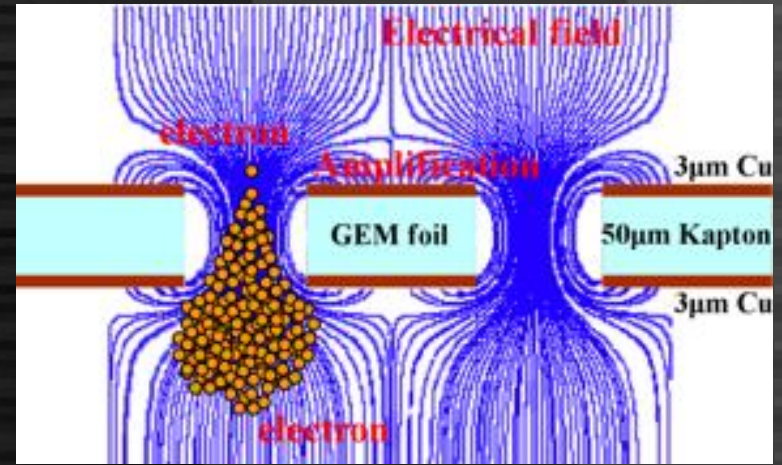
ガス中で多数の
イオン対を生成
電場によりイオン
がチェンバー内を
ドリフトして中央の
カソードと両端の
パッドに当たる
パッド付近で
ガス増幅を行い
たまった電荷を
読み出す
ドリフトは低速な
ので読み出し時間
からZ方向の位置が
求められる
連続三次元再構成
が可能

ガス増幅

MWPC



GEM (MPGD)



カロリメータ

中性粒子の検出方法

- 重い物質で荷電粒子に変換
 - シャワーが止まるまで大量の物質が必要
- 荷電粒子を検出器で検出
 - 半導体、シンチレータ etc

重い物質 兼 光検出器 = 全吸収カロリメータ

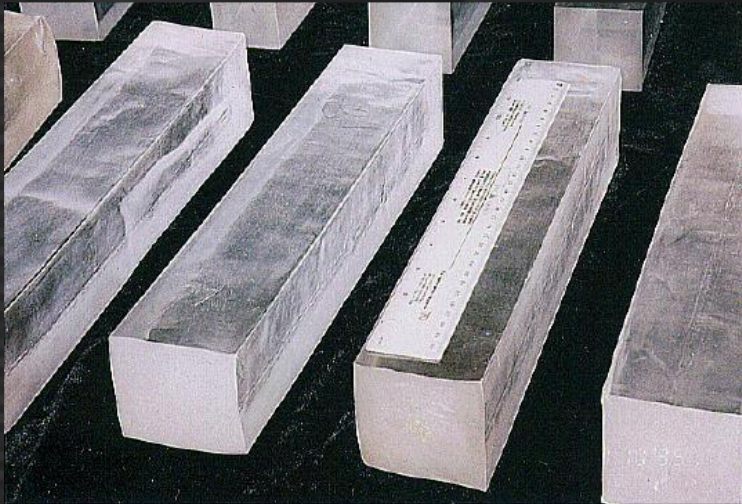
- 通常は重い無機結晶(NaI, CsI, BGO, etc.)を使う
- エネルギー分解能は高いが値段も高い、分割は困難

重い物質と検出器を交互に配置 = サンプリングカロリメータ

- 鉛、鉄、タングステン板と板状検出器の組み合わせ
- レイヤ数に分解能は依存、高分割可能、安い(検出器による)

シンチレータの原理

- 荷電粒子の通過により物質内の電子が励起される
- 電子が基底状態に戻るときに発光
 - 発光効率がよい物質を用いる
 - 可視光～紫外光 (O(eV)の励起エネルギー)

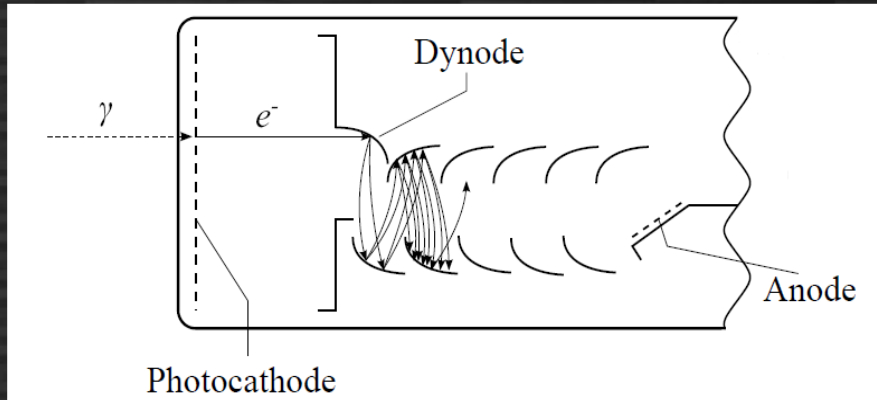


CsI(Tl) Belle

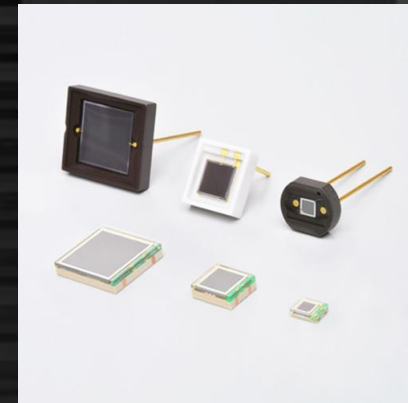


微弱光の検出

- 発生した微弱光を高精度&高速光検出器で検出
 - 光電子増倍管(PMT)
 - ゲインが安定するが大きく、kVの印加電圧が必要
 - 大型化可能 (Super-Kの20インチ管は有名)
 - 半導体光検出器 (SiPM/MPPC)
 - 小型で性能がよい、磁場に強い、面積単価は高め



光電子増倍管



MPPC (浜松ホトニクス)

超伝導電磁石 (3.5 Tesla)
強力な磁場で荷電粒子を曲げる

カロリメータ
中性粒子の位置、エネルギーを測定

ガス検出器(TPC)
荷電粒子の運動量を正確に測定

ビームパイプ

シリコン崩壊点検出器・飛跡検出器
荷電粒子の位置を精密に測定する

衝突点

内側に荷電粒子の検出器、
外側にカロリメータがある
得られた粒子の情報から
元の反応を再構成していく

電子

陽電子



崩壊点検出器 (vertex detector)

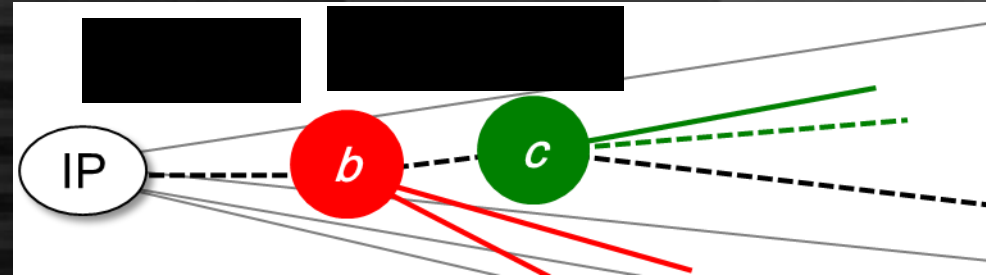
短寿命粒子の二次崩壊点検出

- Bottom, charmハドロンなど

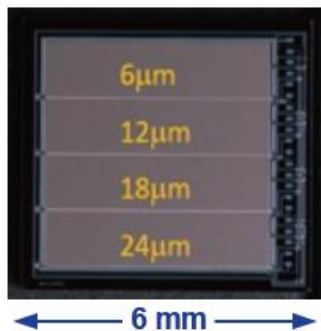
→ 衝突点近傍に高精細シリコン検出器を設置

(求められる位置分解能: 数 μm)

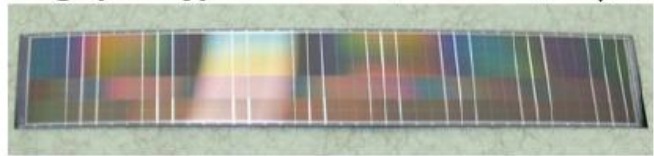
複数の測定器候補 ... 微細ピクセル、低物質質量、低発熱、高速、放射線耐性...



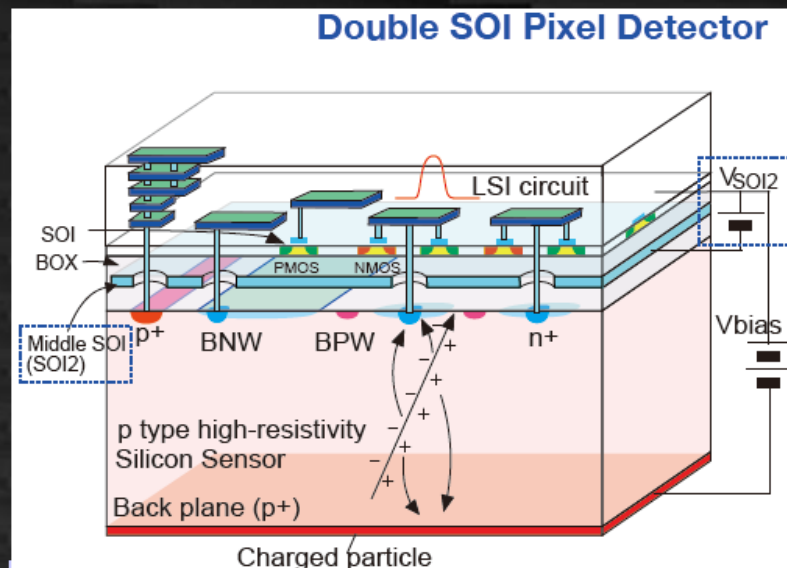
Fine Pixel CCD



Large prototype: 12.3 mm x 62.4 mm x 50 μm

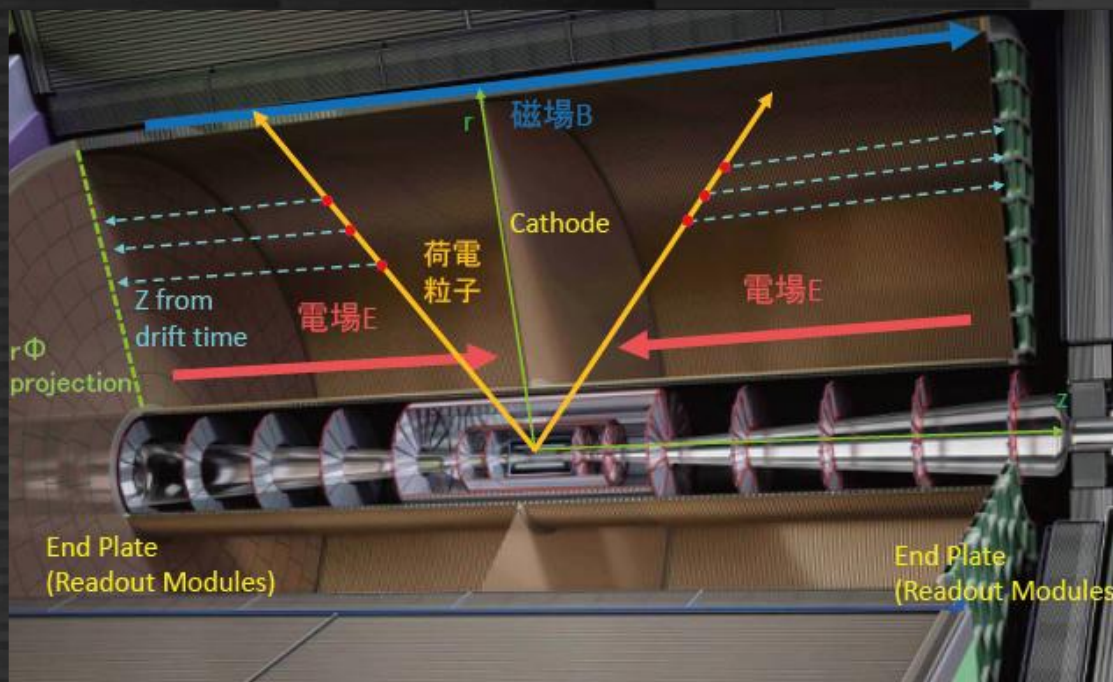


SOI detector



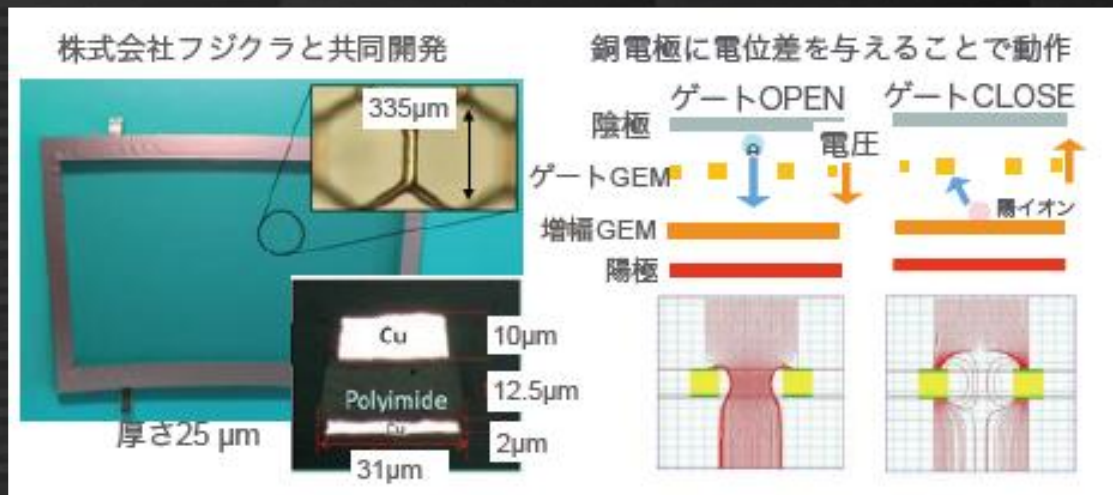
その他、
CMOS,
3D 等々

飛跡検出器 (TPC)



大型ガスチェンバー
(半径1.5-1.8m)
荷電粒子による電離電子
を端部で増幅し検出

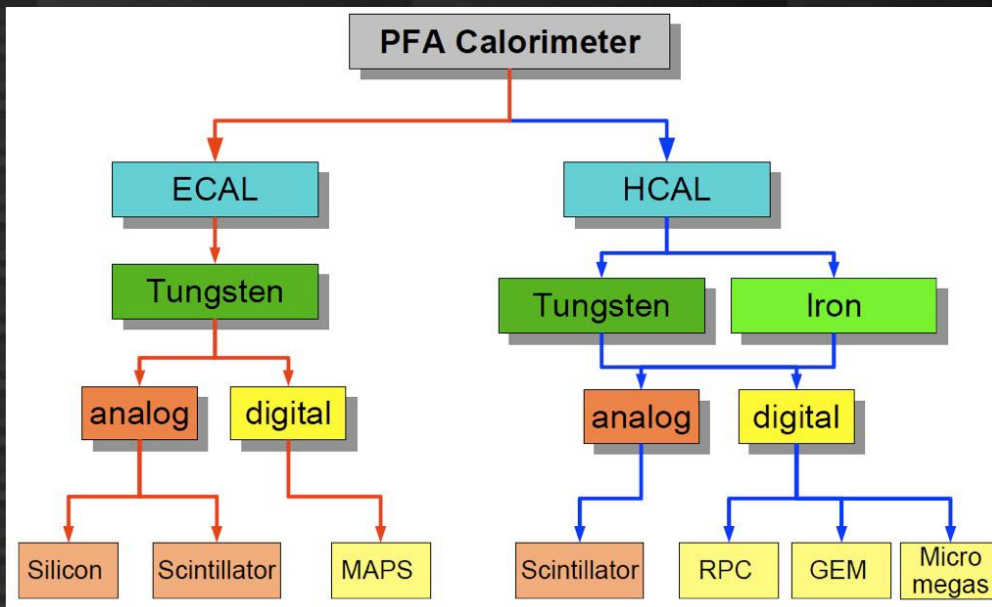
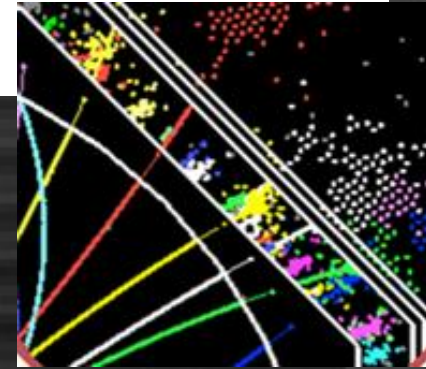
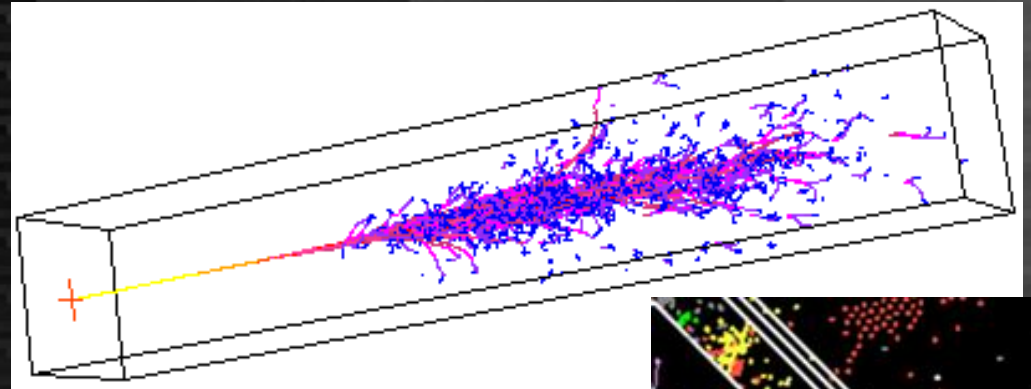
ドリフト時間から軸方向の
位置も特定可能



陽イオンがチェンバーに
戻るのを防ぐ高開口部
(>80%)のgating GEM
を開発

カロリメータ

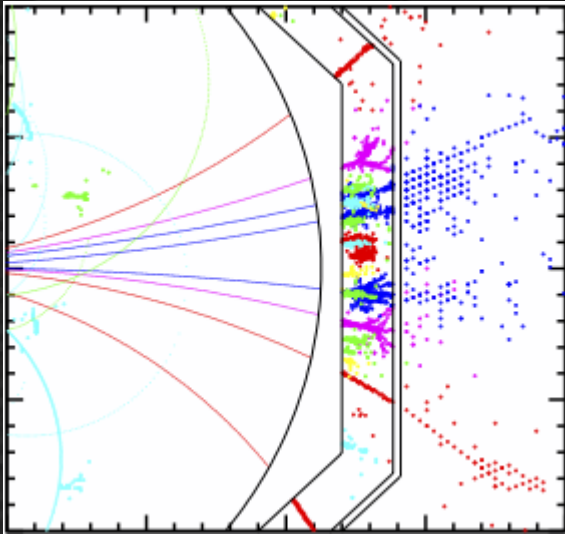
高エネルギー粒子が
重い物質に入射すると、
シャワー(電磁シャワー、
ハドロンシャワー)を起こす
→ シャワーの発展を
4次元で測定 → imaging calorimeter



電磁カロリメータと
ハドロンカロリメータに
分かれている

様々なテクノロジーが提案
されている

particle flow



ジェット中には多数の荷電粒子、中性粒子がある (荷電粒子~60%, 光子~30%, 中性ハドロン~10%)
カロリメータが微細分割されていれば
ジェット中の各粒子のシャワーを分離できる

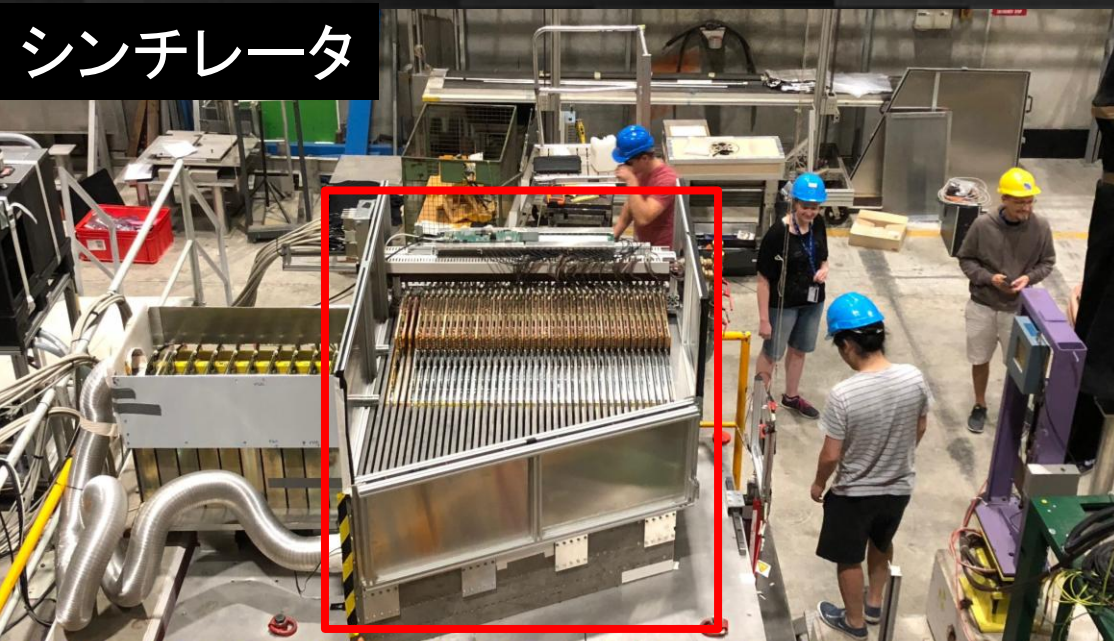
trackerの運動量(エネルギー)は非常に正確に決められるので
統計に左右され分解能の悪いカロリメータは使いたくない
※荷電粒子のほとんどはハドロン

→ クラスタが分離されていれば荷電粒子由来のクラスタは使わず
代わりに荷電粒子のエネルギーをジェットエネルギーに加算

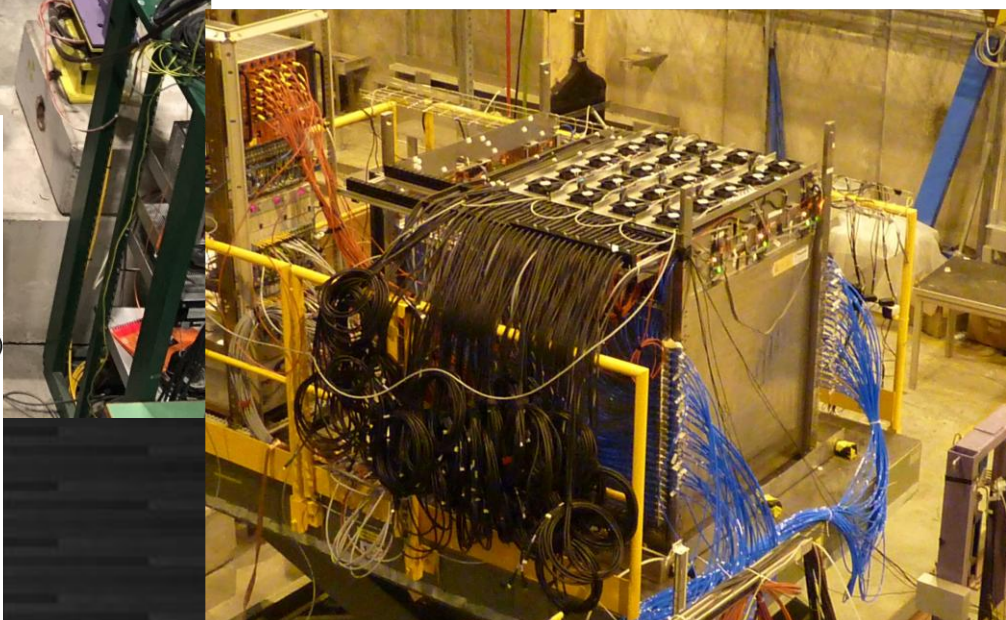
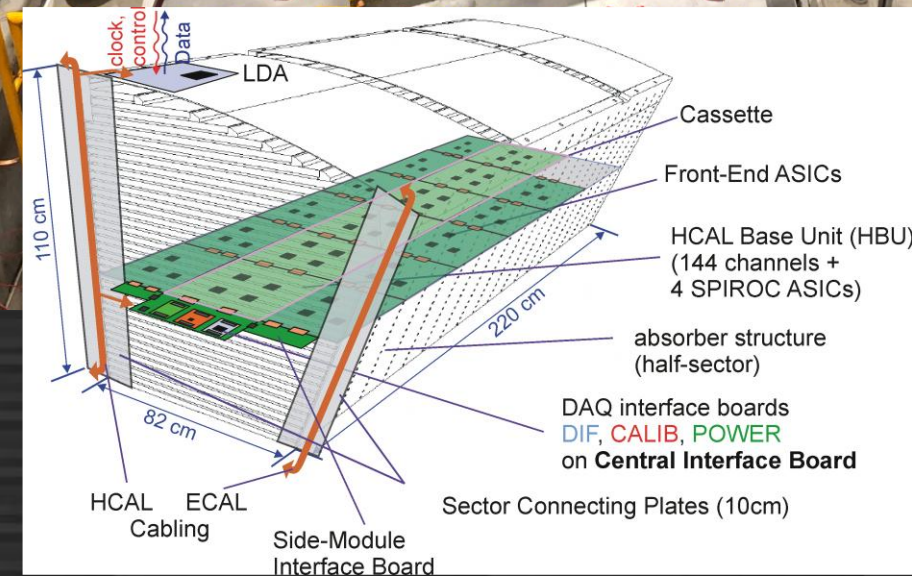
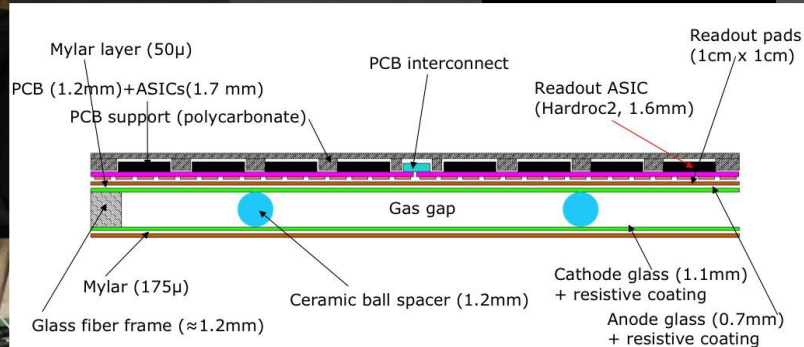
ハドロンのカロリメータによる寄与を減らし分解能は大幅に向上
ただし微細分割カロリメータが必要

ハドロンカロリメータ

シンチレータ



ガスRPC



コライダーのデータ解析の流れ

モデル

シグナル

バックグラウンド

- ・ 一致・不一致の検証
- ・ パラメータの決定

イベント生成
(シグナル/バックグラウンド)

モデル→粒子

測定器シミュレーション

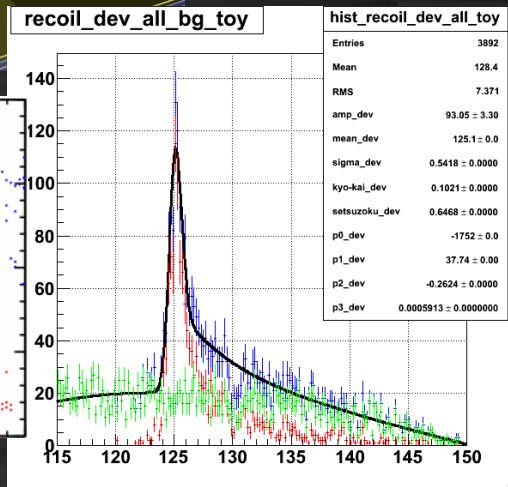
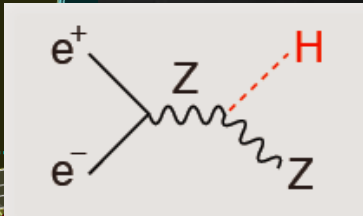
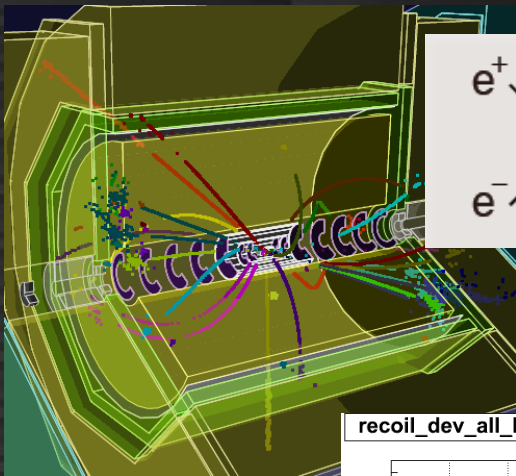
粒子→ヒット

再構成

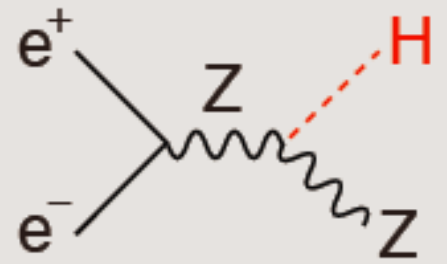
ヒット→粒子

解析 (カット、フィット、
物理パラメータ導出など)

粒子→モデル



イベント生成

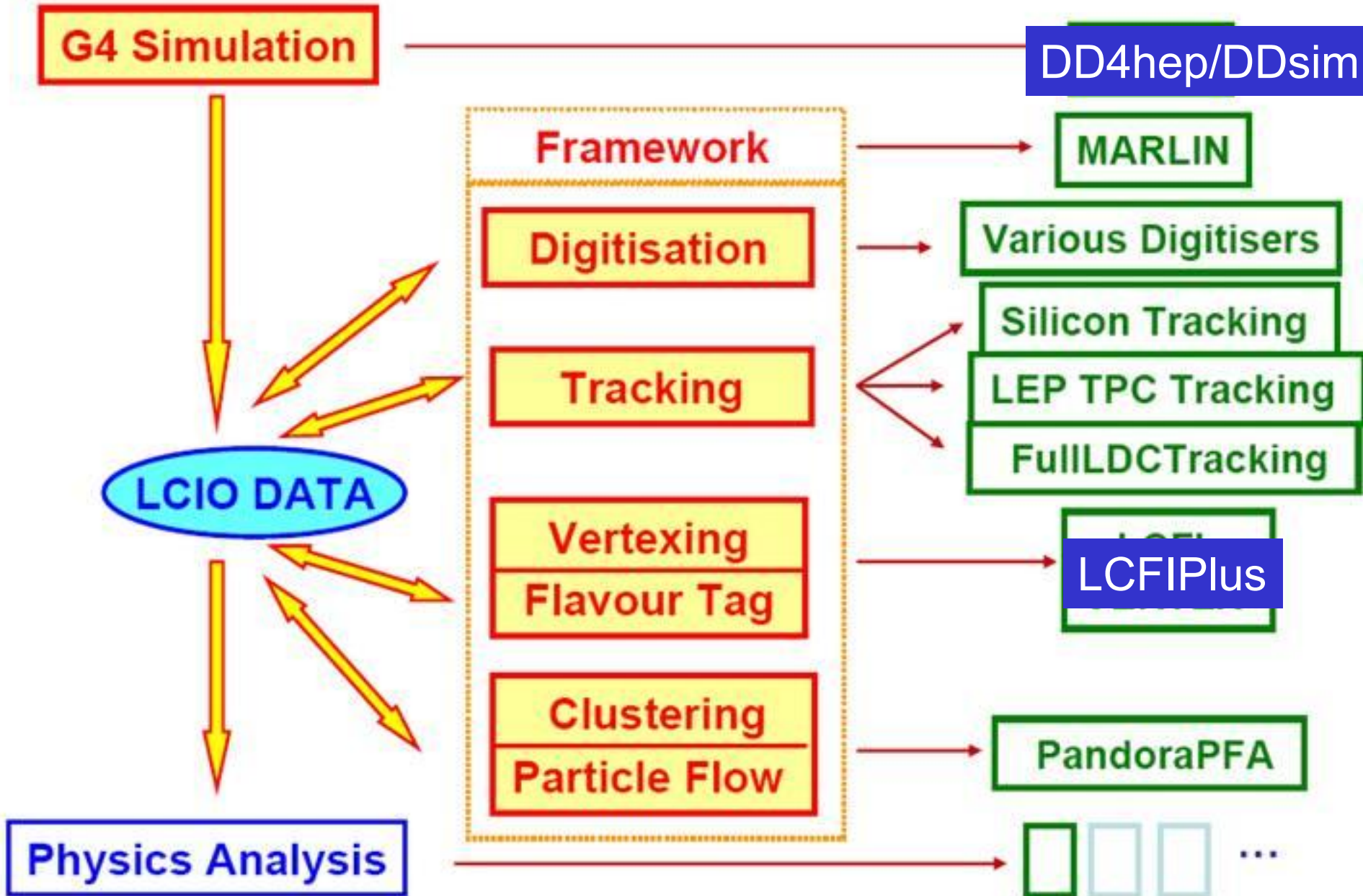


- モデルからMatrix elementを計算
 - 標準理論、いろんなBSM理論
 - シグナル / バックグラウンドそれぞれ
- Phase spaceを積分して微分断面積を計算
 - 4元運動量、偏極、各粒子
- 断面積の分布に従ってランダムにイベント生成
 - ビームスペクトル、ISR/FSRを考慮
- カラー粒子のハドロン化
 - 中寿命粒子(b,cハドロン)の崩壊
 - タウの崩壊は特別なコードを使う

測定器シミュレーション

- 生成した粒子を「測定器」内で発生させる
 - 衝突角(14 mrad), ビームスポット
 - 測定器中の物質との相互作用
 - 荷電粒子のionization, カロリメータでのシャワー等
 - 長寿命粒子の崩壊(K_0 など)
- 各「測定器」へのenergy deposit→「ヒット」
- Geant4 (高エネルギー汎用) ← **DD4hep**
- 精緻な測定器モデル(dead region, ladder etc)
- 多量の計算機パワーが必要 ($O(1分)/event$)

再構成フレームワーク

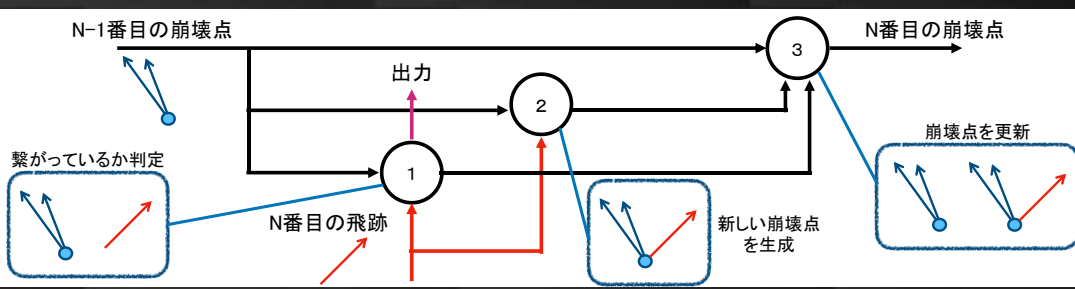


最近の展開: 機械学習の応用

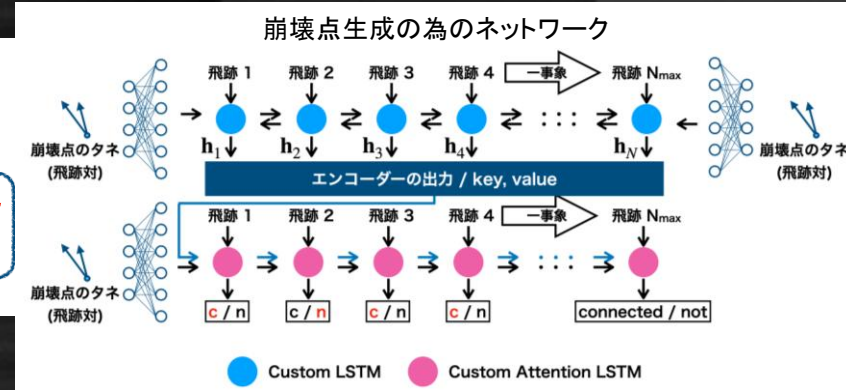
arXiv: 2101.11906

- LCFIPlusの基本戦略(build-up法)を元にDNN化
 - 1. 飛跡ペアを二次崩壊点、一次崩壊点、関係なし等に分類
 - 実際には二次/三次崩壊点、b-like/c-likeなどで7分類
 - 2. 上記の分類スコアを元に「タネ」を決めてそれを初期状態としてLSTM-likeなRNNネットワークで各飛跡に対し「結合/非結合」を判定
 - 順序を重視しないカスタムセルを構築
 - Encoder-decoderモデルとAttentionを活用

高効率な崩壊点
検出を達成
(mis-ID低減が必要)



RNNセルの構造



結合/非結合判定RNN

Tensorflow + Keras

推論はC++で動作可、ILCフレームワークに組み込み可能 ナー-2025, 13 Jun. 2025 page 105

計算機資源: GRIDと今後

- コライダーの解析
(シミュレーション、データ処理、物理解析)
には膨大な計算資源が必要
 - 世界の研究所の計算機に共通アクセスできる
Gridというシステムが使われている
 - 100万 CPUコア、1000ペタバイトのストレージ
 - ローカルのCPU@KEK等と組み合わせて使う
 - Gridはジョブ投入の手間や待機時間があり、
大量ジョブ向き
- 深層学習ではCPUよりGPUが必要になる。
今後計算機構成は変化する可能性も。

ILC測定器: まとめ

- 測定器は「物質と粒子の相互作用」により粒子を検出する
 - 荷電粒子: 電離、制動輻射
 - 光子: 電子陽電子対生成、コンプトン散乱 など
- 最先端の測定器技術
 - 半導体センサー(シリコン)
 - 高速微弱光検出
 - ガス飛跡検出器 など
- ILC測定器は国際協力で開発中
- ソフトウェアの性能や計算資源も重要

おまけ: ILCの情勢

ILCをめぐる状況

2020.7 ICFA (国際将来加速器委員会)により

ILC国際推進チーム(IDT)設立

→ 2021.6 IDTによるILC準備研究所提案

→ 4年間の準備期間を経て、建設(10年)へ
2030年代後半から実験開始

ILC建設に向けた
本格的な進展前夜

コミュニティのサポート

- 2017.9 高エネルギー物理学将来計画検討委員会の提言
「衝突エネルギーを250GeVとする国際リニアコライダー(ILC)の日本国内での建設をただちに開始すべきである。」(Hyper-Kの早期実現と並ぶ2大提言)
- 高エネルギー物理学研究者会議ILC推進パネル (2020.10～)
国内の主要実験(Belle2, ATLAS)の主要研究者を含み、ILC実現のためにコミュニティを代表して活動中。

コミュニティ内、近隣分野
との議論も活発化

各方面のサポート

- 地元自治体/産業界: 東北ILC事業推進センターなど
- 産業界(全国): 先端加速器科学技術推進協議会(AAA)
- 米国DoE, 国務省の全面的な支持
- ILC推進議員連盟など

ILC国際推進チーム (IDT: 2020/8~)

国際将来加速器委員会

ILC 国際推進チーム

執行部

執行部議長・作業部会1部会長	中田 達也(スイス連邦工科大学ローザンヌ校)
欧州地域代表	スタイナー・スタップネス(CERN)
米州地域代表	アンディ・ランクフォード(カリフォルニア大学アーバイン校)
アジア太平洋州地域代表	ジェフリー・テイラー(メルボルン大学)
作業部会2部会長	道園 真一郎(KEK)
作業部会3部会長	村山 斉(カリフォルニア大学バークレー校/東京大学)
KEKリエゾン	岡田 安弘(KEK)

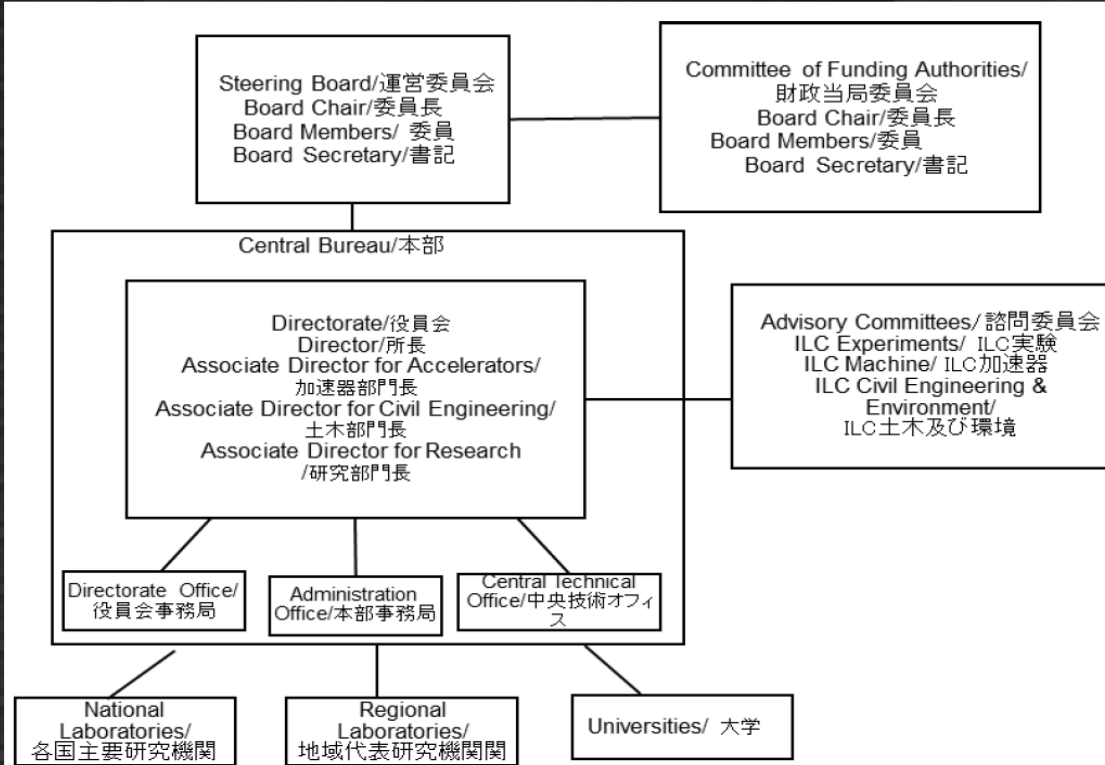
作業部会1
準備研究所設立

作業部会2
加速器

作業部会3
物理・測定器

2021年6月、ILC準備研究所提案書を発表

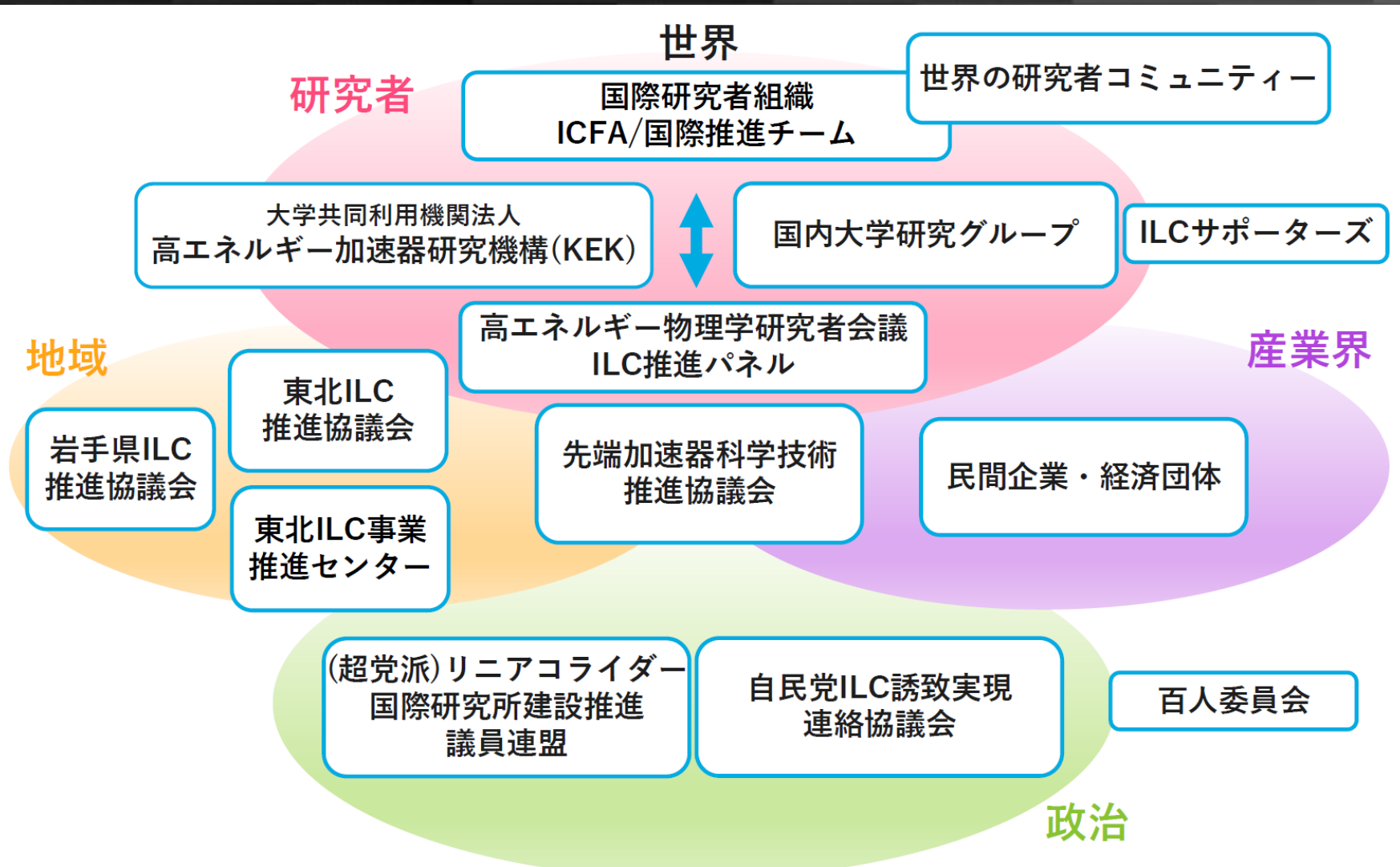
ILC準備研究所



- 技術的な作業と設計作業は、参加研究所からMoUによる物納貢献
- プレラボ事業には世界の研究機関から数百人が参加。全体を総括・調整するために小規模な本部を置く。(「一般社団法人」を想定)
- 少数の主要研究機関(必要に応じて資金配分機関)がプレラボ設立に合意し「共同宣言」によって開始
- 主要研究機関でプレラボ設立後、合意のできた研究機関が参加し、プレラボを拡大することを想定

- 運営委員会(参加研究機関の代表者の集まり): 最高意思決定機関
- 財務当局委員会: プレラボ活動の進捗状況を監督・助言を行う
- 役員会: プレラボの運営組織。所長と部門長で構成
- 本部: 役員会を支援。日本に設置
- 役員会事務局: 秘書業務等の機能でILC準備研究所の運営サポート
- 中央技術オフィス: 加速器に関するプロジェクト管理サポート
- 本部事務局: 事務作業の支援
- 諮問委員会: 役員会への助言を行う

国内のILC推進体制



世界の大学/研究機関・産業界・経済界・地域自治体/社会・政治・サポーターズが一体で推進



奥州市



JR一ノ関駅



盛岡



東京メトロ



子供向けのIILCの模型

ILCグループ

国際会議LCWS2016
@盛岡 (2016/12/5-9)
参加者 約300人



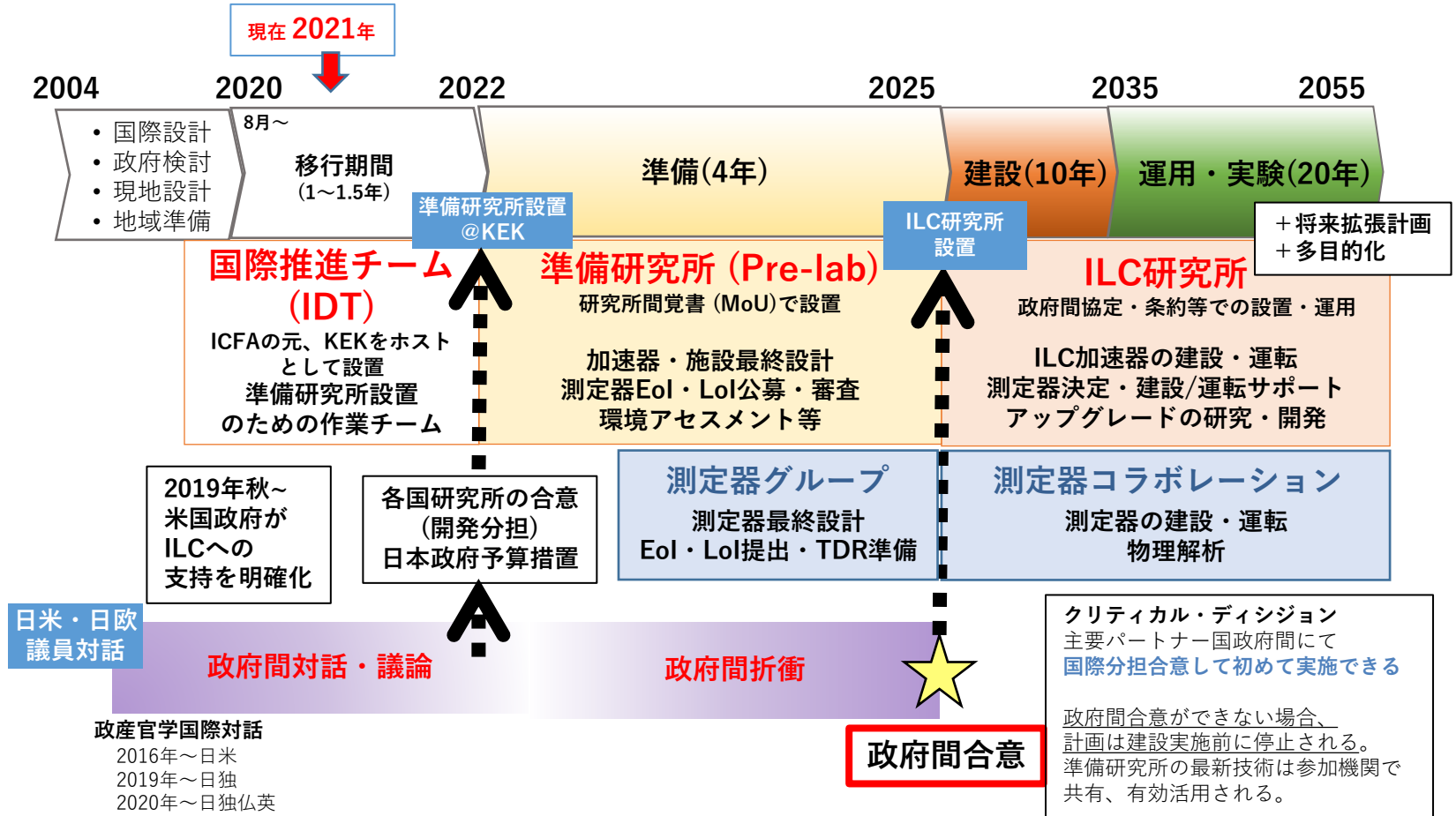
世界中の研究者が参加
(ILD測定器グループ)

ILC日本グループ:
KEK(高エネ研)・東大・京大・東北大・
九大・信州大・佐賀大・阪大・
岩手大・近畿大・広島大 ほか

Taikan Suehara, ICEPI



国際リニアコライダー計画 タイムライン





ILC中央研究所のスケッチ

ILCを中心とした、

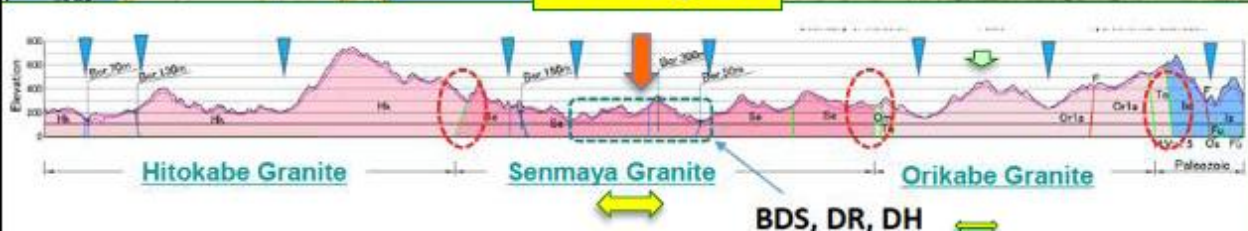
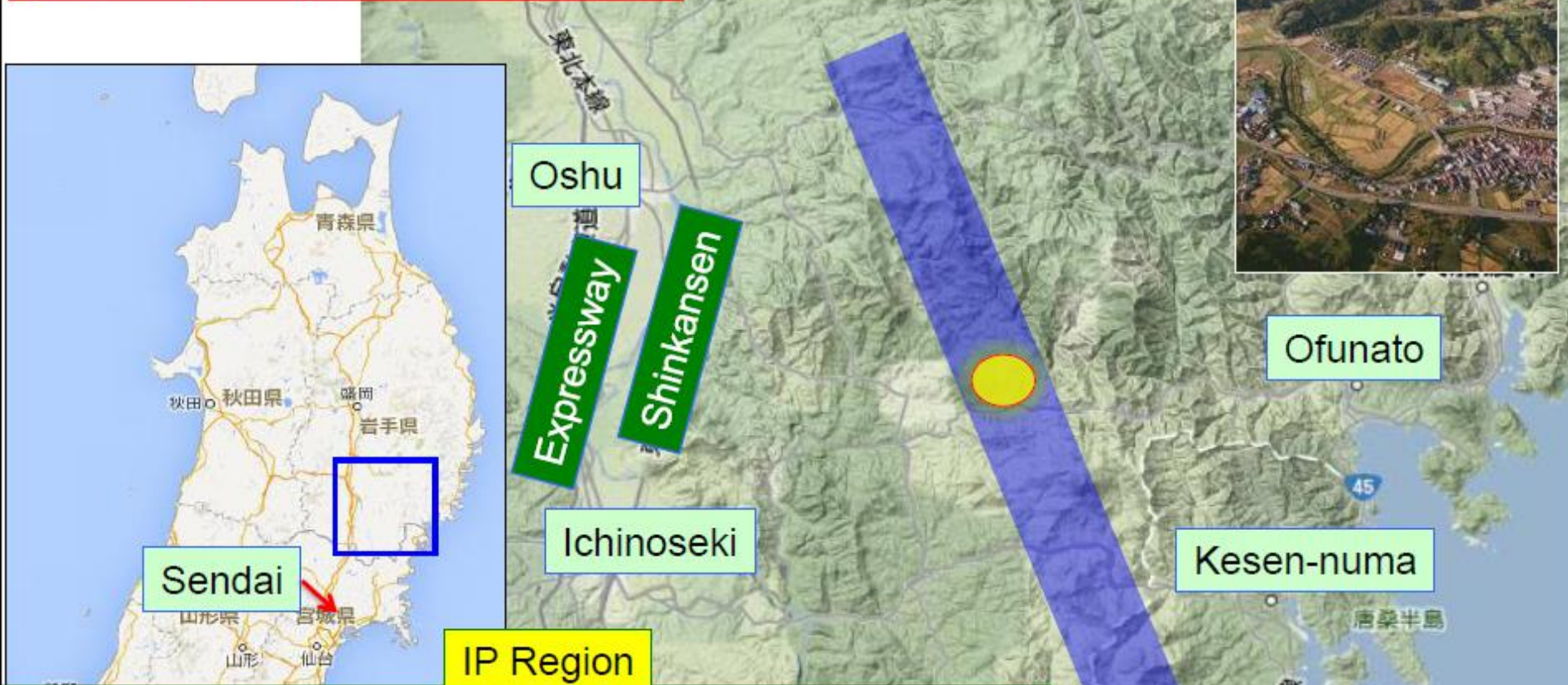
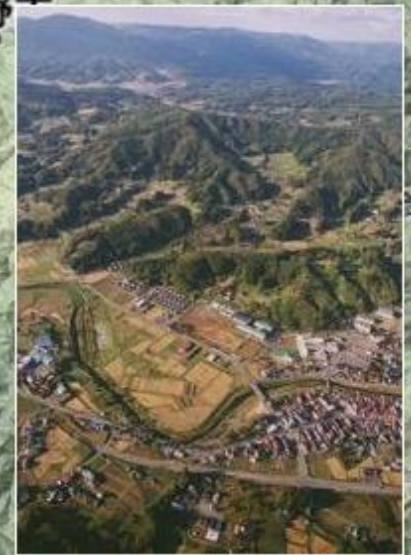
- 電子・陽電子ビーム活用
- 加速器・測定器技術開発

- 物理 (理論・実験) 研究
- 将来計画のための開発・他実験への応用を含む総合的な研究所の建設を想定

ILC Site Candidate Location in Japan: Kitakami

JAHEP proposed to host the ILC as a truly international project (2012).

Earthquake-proof stable bedrock of granite.
No faults cross the line.



Higgsは新物理の窓

GeV world

SMが有効理論

湯川力
Fermionの質量生成

TeV world
SM相互作用は
 E^{-2} で減少
新物理が本質

Electroweak
symmetry breaking

標準理論の最後の
本質的要素



Higgs boson

ヒッグスカ
ヒッグス真空凝縮
の直接的な証拠

Higgsへの疑問

- Naturalness
- Composite Higgs?
- Multiple Higgs?

BSM
(SUSY?)

Dark
Matter?

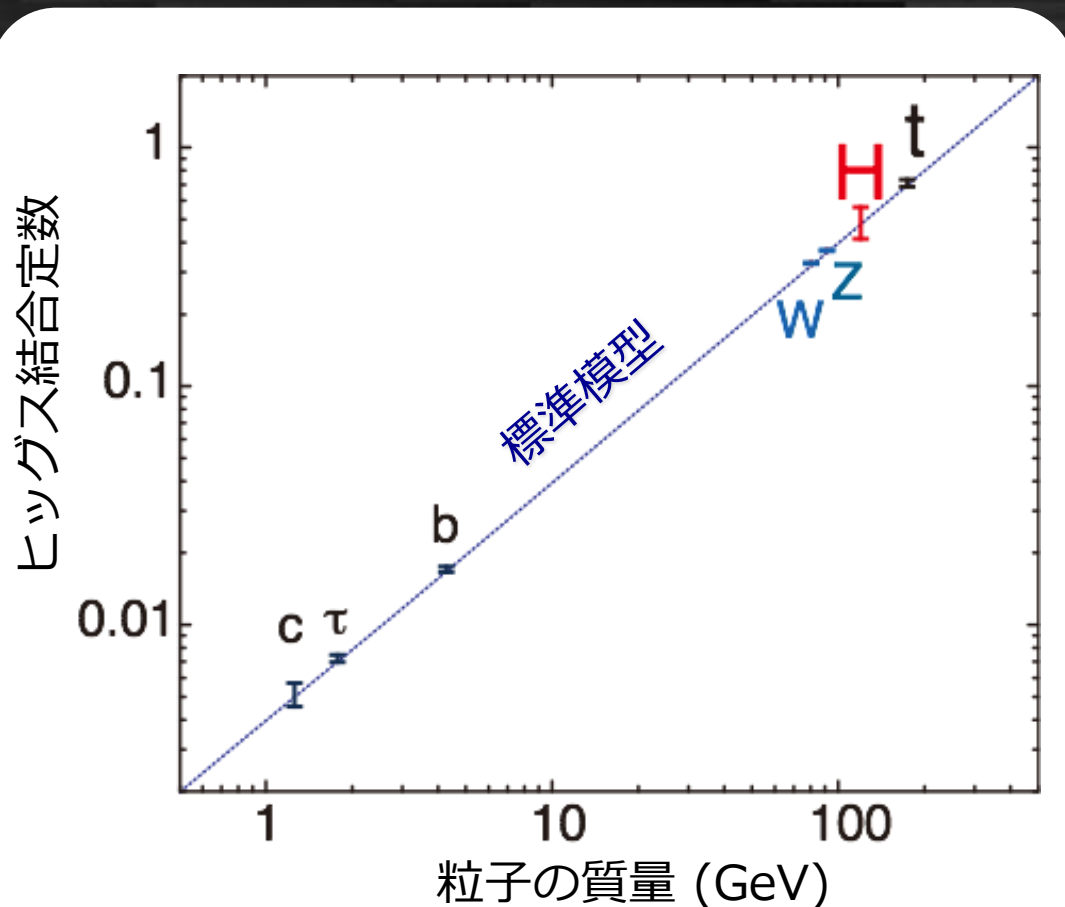
Baryon
Asymmetry

Neutrino
mass?

Inflation?

ヒッグス結合定数の精密測定

標準理論：素粒子の質量はヒッグス結合定数に比例する



新物理があると
ヒッグスと各粒子の結合
定数が標準模型から
ずれることが多い

(多くの新物理が複数の
ヒッグスを予言し、真空へ
の凝縮度合いが変わる
ため)

新物理のエネルギーが高い
ほどずれは小さくなる
→精密測定が必要

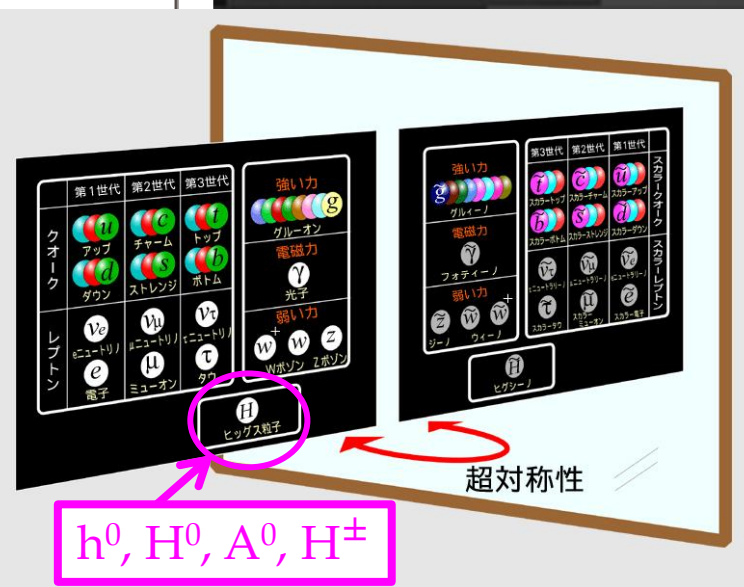
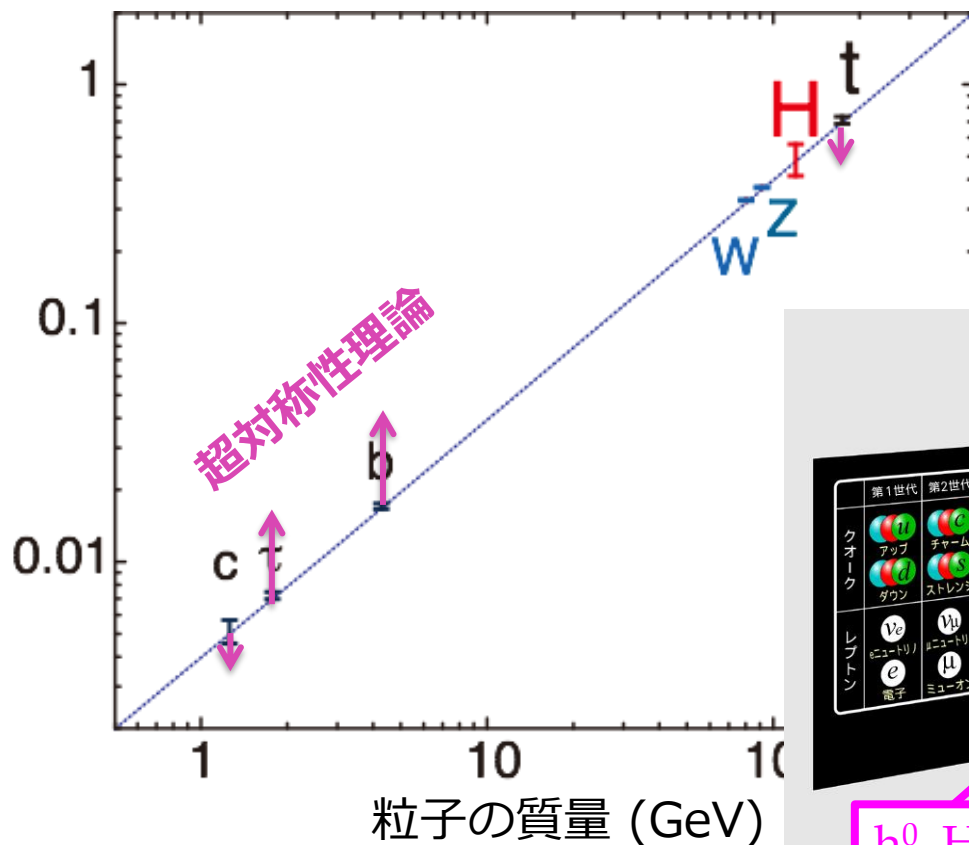
ヒッグス結合定数の精密測定

標準理論：素粒子の質量はヒッグス結合定数に比例する

超対称性理論では
ヒッグス粒子が
複数個ある

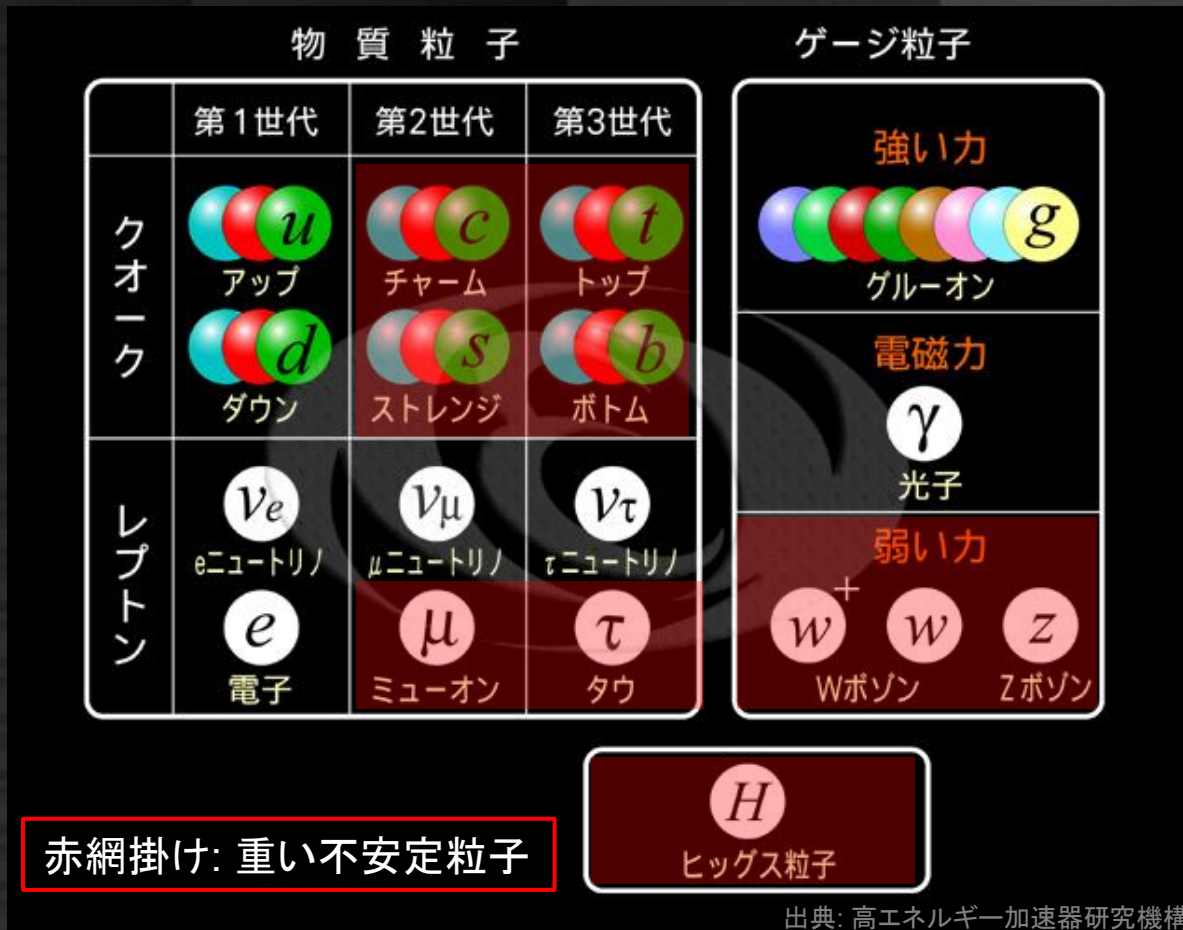
そのせいで
線も複数になる

ヒッグス結合定数



ずれの大きさとパターンで新物理にせまる

素粒子「標準模型」



世の中のすべての現象(重力を除く)は、この17種の素粒子(と反粒子)の相互作用で記述できる。

素粒子と力(相互作用)

大統一理論

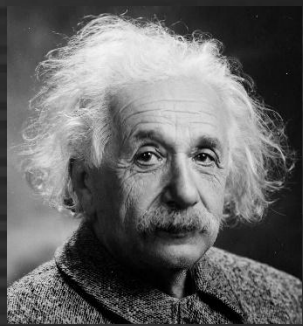
強い力と電弱理論の統一

究極の統一理論

はあるか？

$$E = mc^2$$

質量とエネルギー
は等価
宇宙初期に
重い粒子が
生成



電弱理論

電磁気力と弱い力の統一

重力

?

強い力

g
グルーオン

弱い力

W, Z

電磁気力

γ

エネルギー

10^{19} GeV 100 GeV ← 陽子の静止質量の約100倍

宇宙の年齢

10^{-44} 秒

10^{-36} 秒

10^{-10} 秒

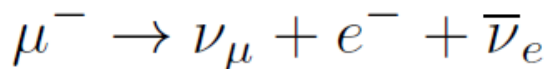
38万年

138億年(現在)

ファインマン図

- 素粒子の反応を
図示できる便利な図

- 横軸は時間を表す
 - 左端が始状態
 - 右端が終状態



- 点が変わるところ
(vertex)で反応が起こる

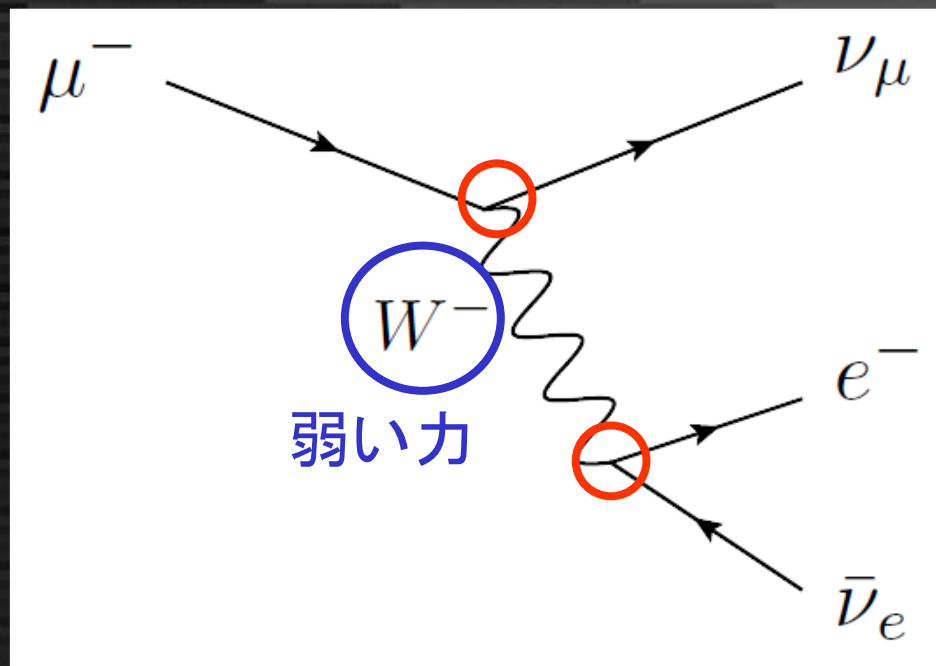
- ミューオンがW⁻とニュートリノに崩壊する上部のvertexと、W⁻から電子と反ニュートリノが発生する下部のvertex

- 各点で保存則を満たす必要がある

- 電荷、レプトン数など

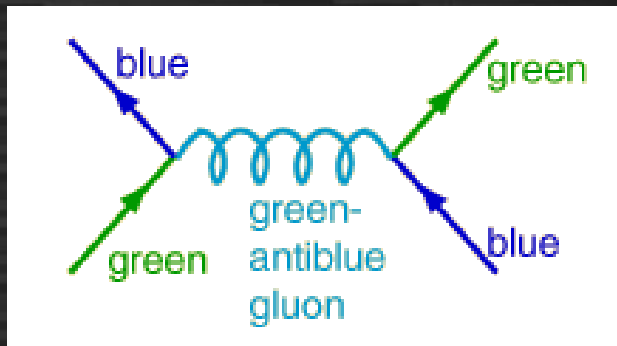
- 不確定性原理により、エネルギー保存は中間では満たさないこともある

$$\Delta E \Delta t \lesssim \hbar$$



重力・強い力

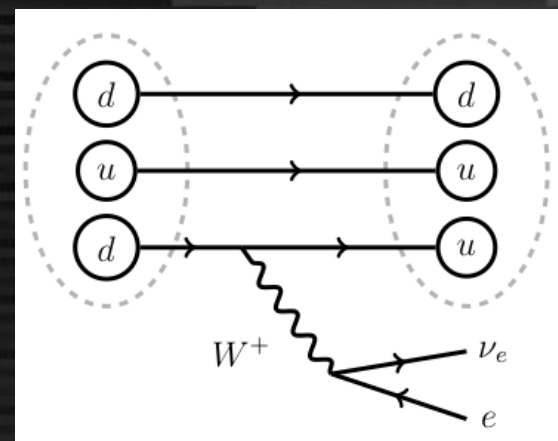
- 重力: 日常的な力だが、量子力学と整合性を持つ理論はない
 - 超弦理論が重力を含めた統一理論の候補:
ただし現実に対する予言能力は現状なし
- 強い力: クォーク同士を結びつける力。
質量のないグルーオンにより媒介される
量子色力学(QCD)により記述される



クォーク: 赤青緑の3色のカラー荷を持つ
グルーオン: 3色と反3色の2つのカラー荷
強い力はカラーを持つ粒子間に働く
力は距離が離れるほど強くなるため、マクロな距離では常に「白色」(カラーの閉じ込め)

弱い力

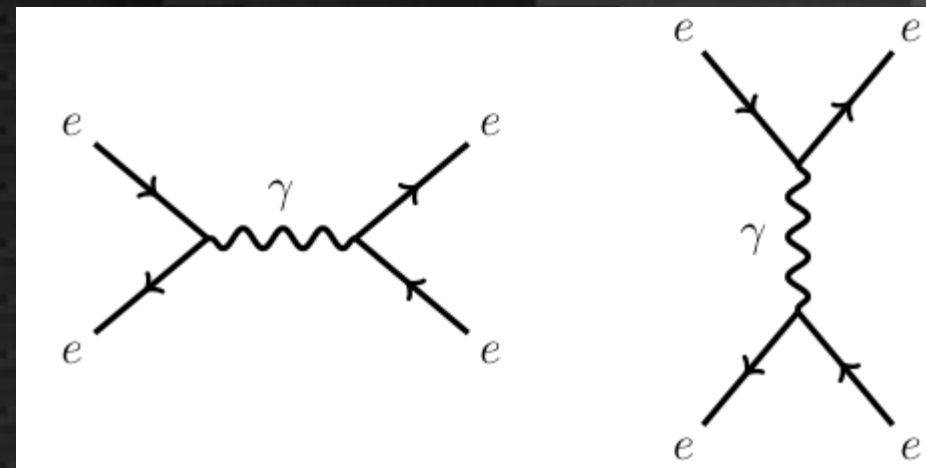
- 弱い力: フレーバー(u, dなど)の違う粒子間に働く力。フレーバーを転換させる(中性子→陽子など)ことにより、放射性崩壊などを引き起こす
 - 重いクォーク、レプトンはすべて弱い力により軽いクォーク、レプトンに崩壊する
ただしレプトン数、バリオン数は保存する
 - 媒介する粒子の質量が大きい
(W: 80.4 GeV, Z: 91.2 GeV)ため、低いエネルギーでは結合が非常に弱くなる(不確定性原理)
 - パリティが保存しない



電磁気力

- 電磁気力

- 電荷を持つ粒子の間に働く
- 光子が媒介する
- 光子は質量がないため、長距離力
- 低いエネルギーでは弱い力より強く、強い力より弱い (ただし超ウラン原子核などでは電磁気力と強い力が拮抗し結合が不安定となる)

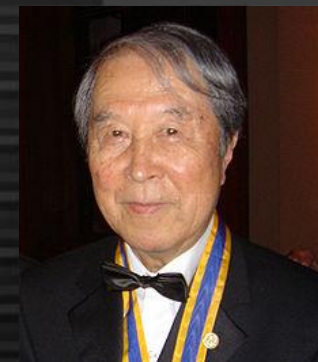


電弱理論 (Weinberg-Salam theory)

- あるエネルギー(電弱エネルギースケール: 約100 GeV) より高いエネルギーでは弱い力と電磁気力は一つの力だった
- 「自発的対称性の破れ」により、「電弱力」を媒介する粒子が混合し、弱い力を媒介する重いW, Zボゾンと電磁気力を媒介する質量のない光子が生まれる
- W, Zに質量を与えるのが「ヒッグス機構」で、電弱理論の核となる部分
 - 当時未発見の「ヒッグス粒子」を预言する
- 電弱理論 + 量子色力学 = 「素粒子標準模型」



Steven Weinberg
(1933-) 1979年
ノーベル物理学賞
UT Austin教授(現役)



南部陽一郎 (1921-2015)
「自発的対称性の破れ」により
2008年ノーベル物理学賞

素粒子と力(相互作用)

大統一理論

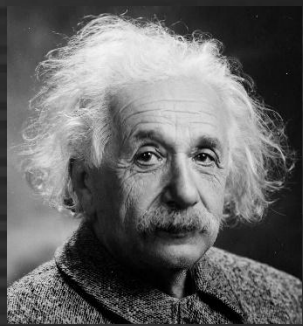
強い力と電弱理論の統一

究極の統一理論

はあるか？

$$E = mc^2$$

質量とエネルギー
は等価
宇宙初期に
重い粒子が
生成



電弱理論

電磁気力と弱い力の統一

重力

?

強い力

g
グルーオン

弱い力

W, Z

電磁気力

γ

エネルギー

10^{19} GeV 100 GeV ← 陽子の静止質量の約100倍

宇宙の年齢

10^{-44} 秒

10^{-36} 秒

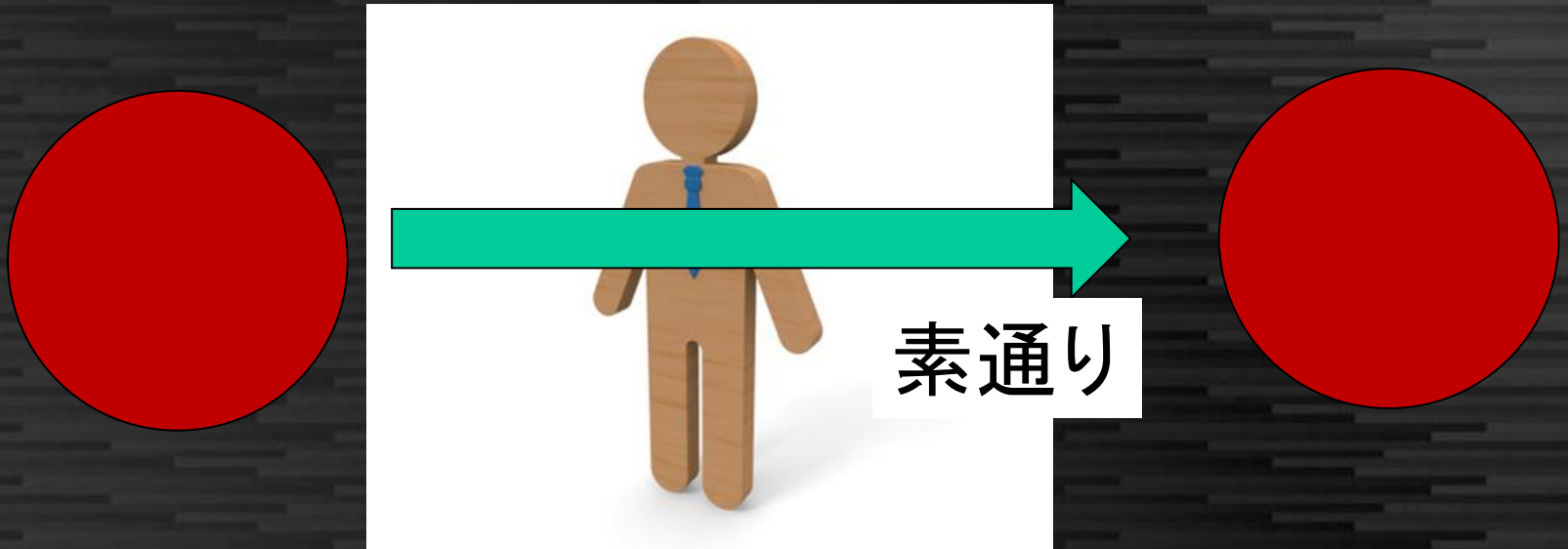
10^{-10} 秒

38万年

138億年(現在)

ダークマターとは？

正体不明な何かの物質
(いまの理論には存在しない物質)
重さはある。重力の影響は見える。
物質をほとんど通り抜けるので
直接見るのはとても難しい

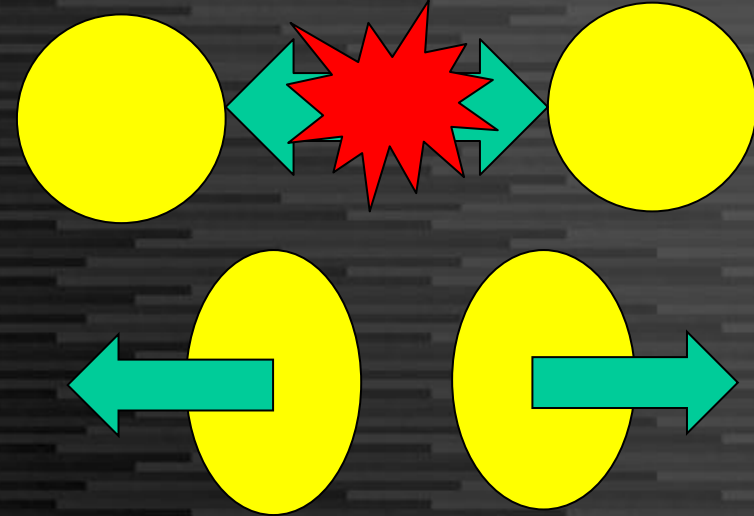


ダークマターの証拠

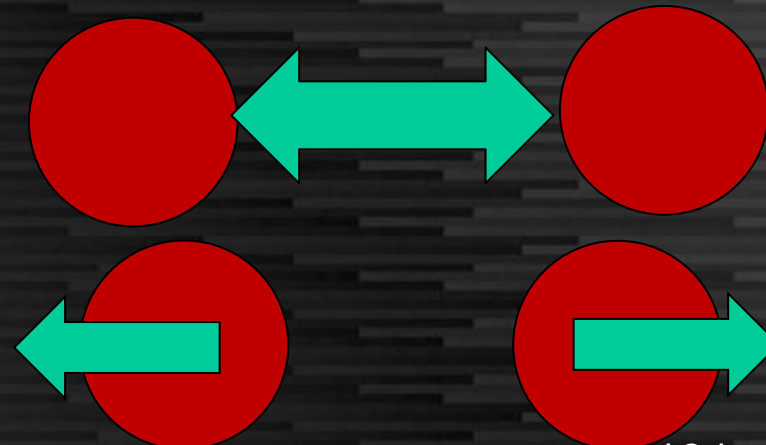


銀河同士の衝突後の星の位置と
重力中心の位置を測定
重力中心がより離れている
→ 反応しない物質(ダークマター)が多い

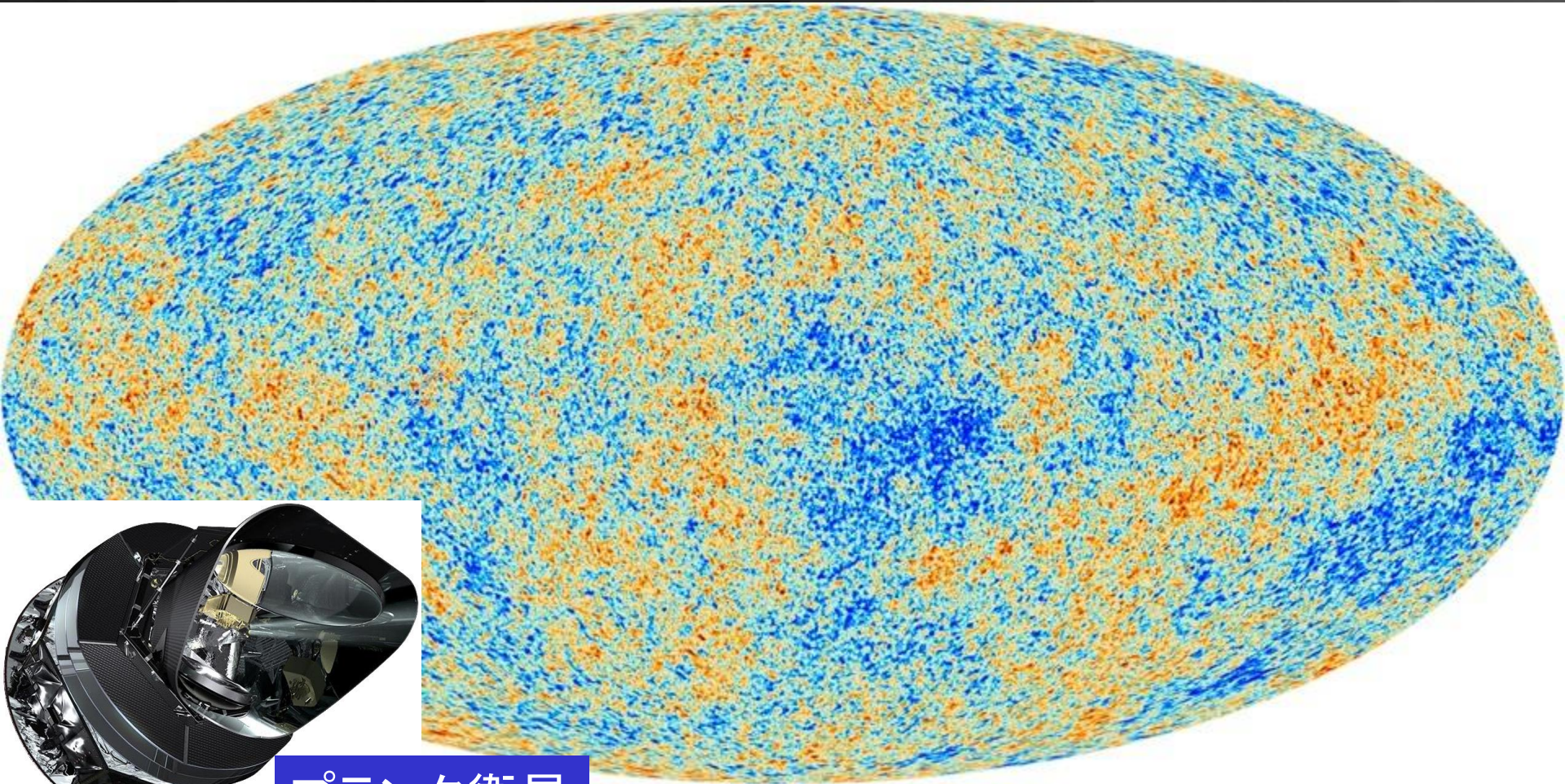
物質: 衝突して反応



ダークマター: 素通り



宇宙背景輻射の測定

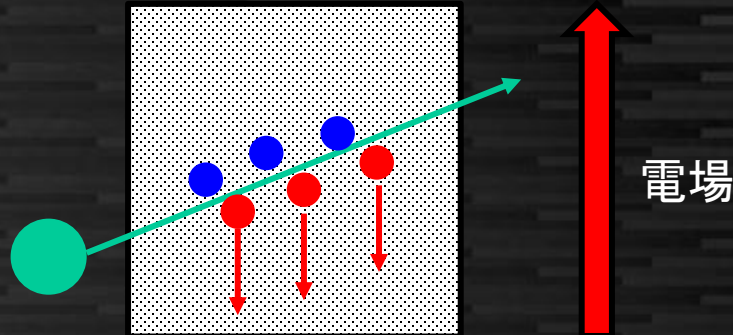


プランク衛星

宇宙からやってくる電波を調べると、ダークマターの量がわかる

ダークマターによる反跳の検出

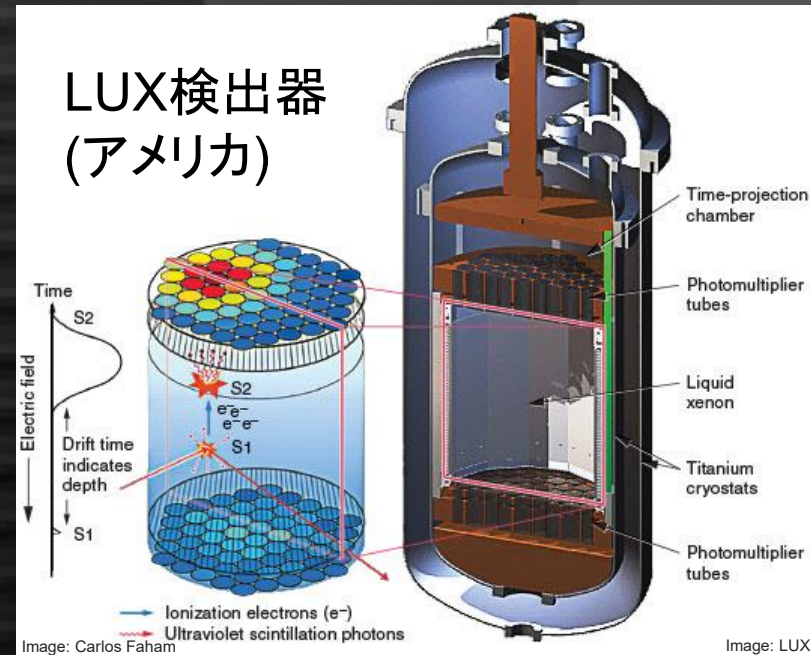
電荷を持つ粒子が物質を通過すると電子・イオン対が生成(電離)



イオンは周りの物質と反応して光を発生(シンチレーション光)

電子は電場に引かれて電極に向かう
電極の近くはガス中に高電場をかけてあり
電子が加速されて多数の光子を発生、
検出される(2次光子検出)

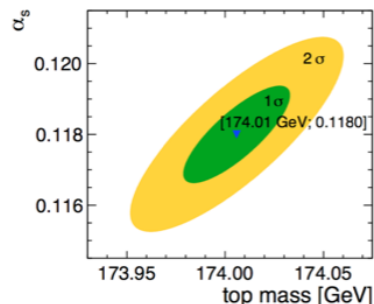
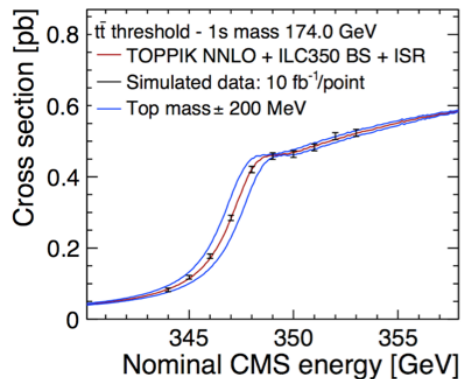
ダークマターの信号は微弱で低頻度なため
大気中や測定器中の放射性物質を
極限まで排除。また宇宙から来る放射線
を防ぐため地下深くに設置する。



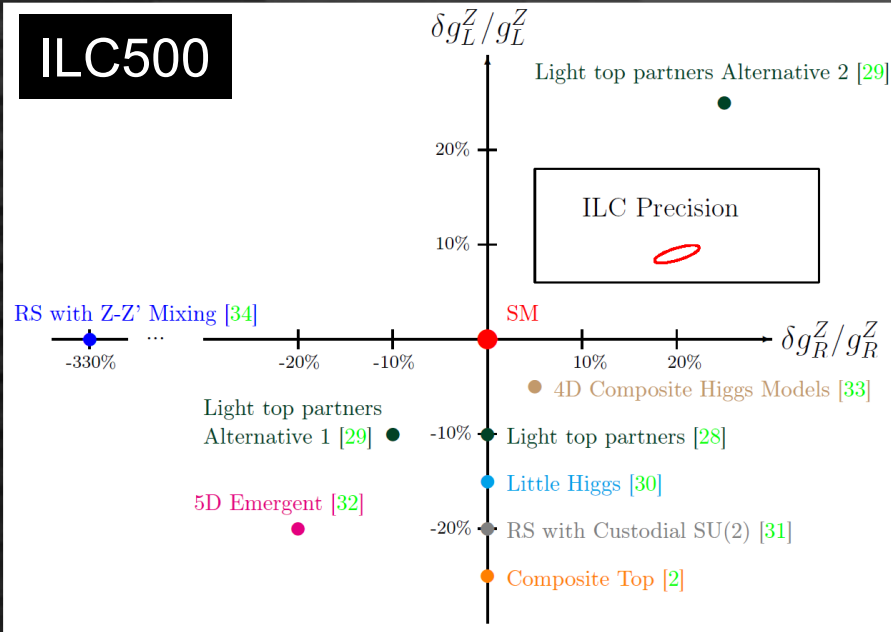
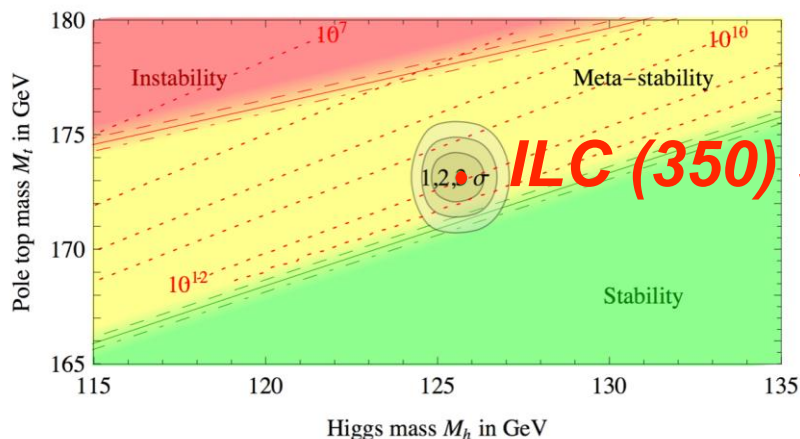
XMASS検出器 (東大宇宙線研)

トップ測定 @ ILC 350 GeV

topの精密測定



Threshold scanによるtopの精密測定
MSbarに直接変換できる「理論的に扱いやすい」質量を直接求められる



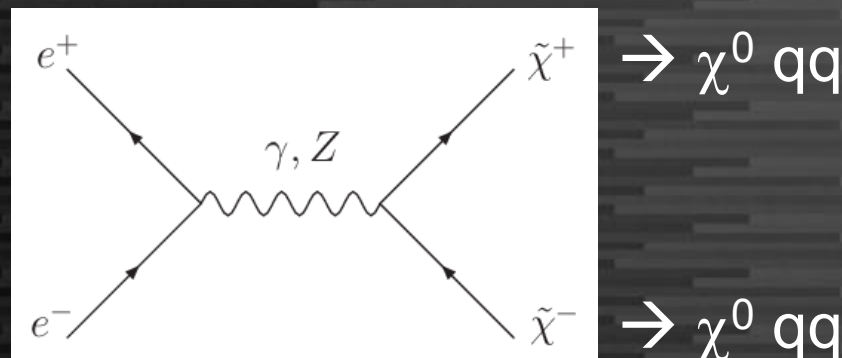
偏極を用いて左巻き、右巻きの結合定数を求め、Topが関係する新物理の探索・モデル識別が可能

$\Delta m_t(\overline{MS}) \lesssim 50 \text{ MeV}$
 $\Delta m_h \simeq 14 \text{ MeV}$
 ILCで真空の位置を正確に決定

SUSY直接探索 @ ILC any energy

• SUSY粒子の探し方

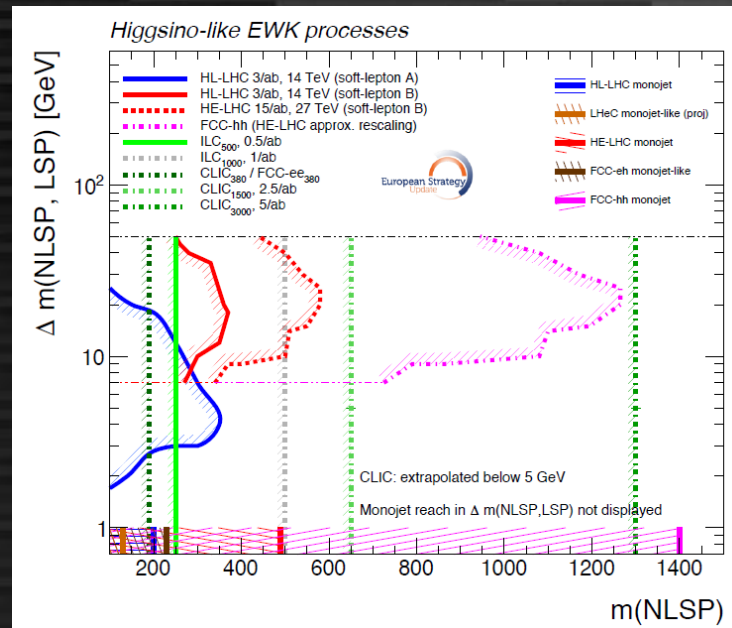
- 重い新粒子を対生成
→ LSP (暗黒物質)と
通常の粒子に崩壊
例) $\tilde{\chi}^+ \rightarrow \chi^0 qq$



□ χ^0 は検出不可可能 (暗黒物質)

□ $\tilde{\chi}^+$ と χ^0 の質量差が小さい場合、qqのエネルギーが小さくなりLHCでは検出困難に
→ Compressed SUSY

- ILCでは検出・精密測定可能



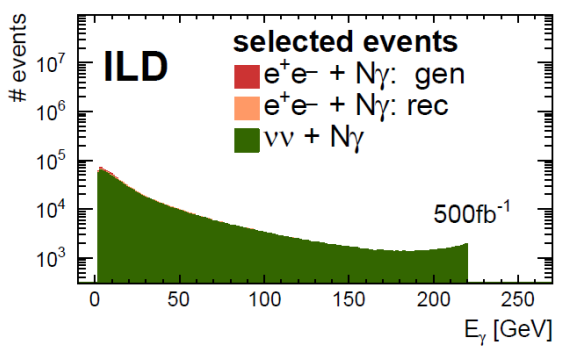
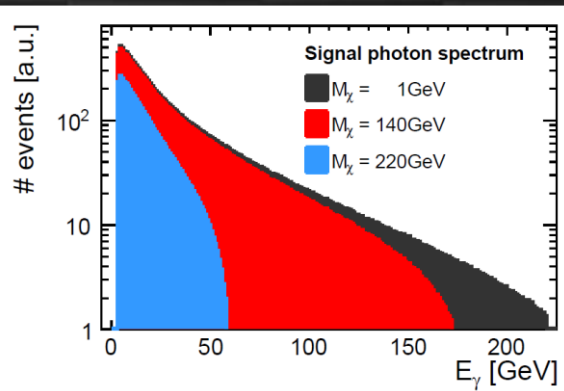
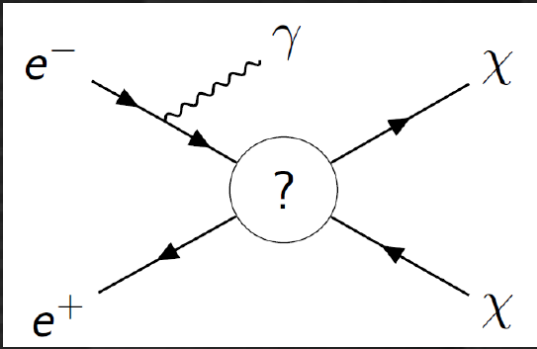
Mono-photon search

arXiv:2001.03011

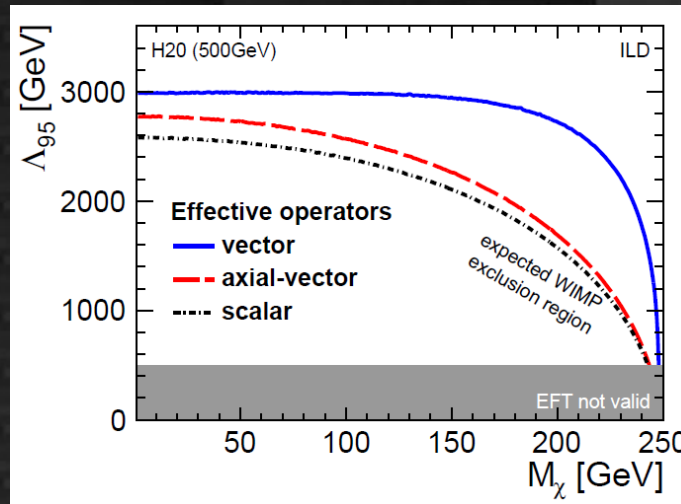
モデル非依存に $m < \sqrt{s}/2$ の
暗黒物質を直接探索

偏極を用いて暗黒物質のスピンの情報が得られる

	four-fermion operator	$\sigma(e_L^-, e_R^+) = \sigma(e_R^-, e_L^+)$	$\sigma(e_L^-, e_L^+) = \sigma(e_R^-, e_R^+)$
vector	$(\bar{f}\gamma^\mu f)(\bar{\chi}\gamma_\mu \chi)$	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$	0
axial-vector	$(\bar{f}\gamma^\mu \gamma^5 f)(\bar{\chi}\gamma_\mu \gamma_5 \chi)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$
scalar	$(\bar{\chi}\chi)(\bar{f}f)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$



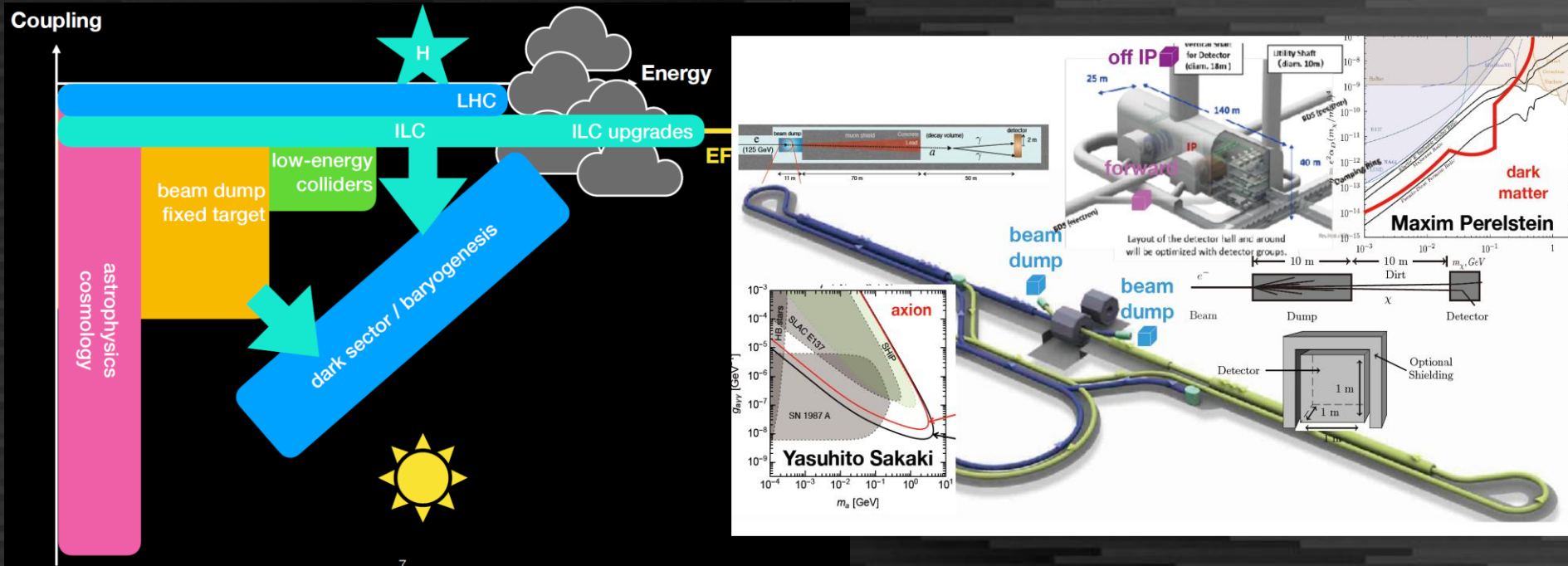
Λ は新物理のエネルギースケール



複数の
衝突エネルギー
での測定により
スピン・質量を
さらに感度よく
決定できる

単一光子信号 ~3 TeVスケールの新物理に感度
とバックグラウンド

固定標的実験@ILC



エネルギーは高いが結合が大きい
 → コライダーでの新物理探索
 エネルギーが低く結合が小さい
 → 固定標的実験

ILCでもビームダンプや
 取り出しラインを用いて
 様々な実験が可能
 現在検討中