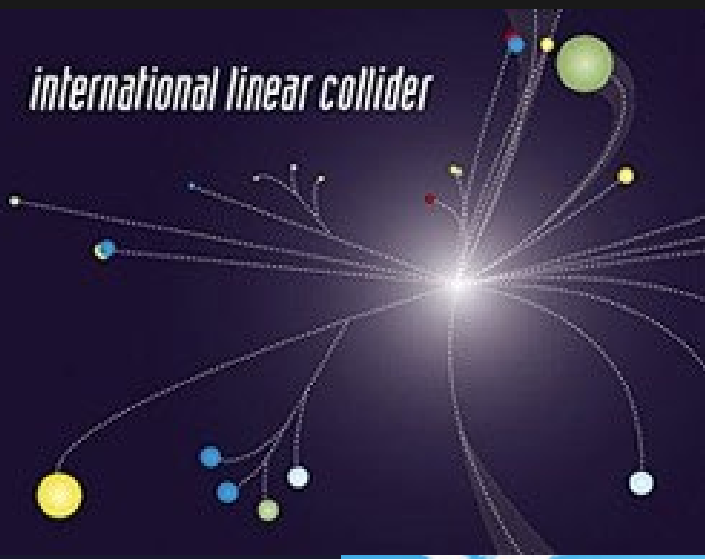
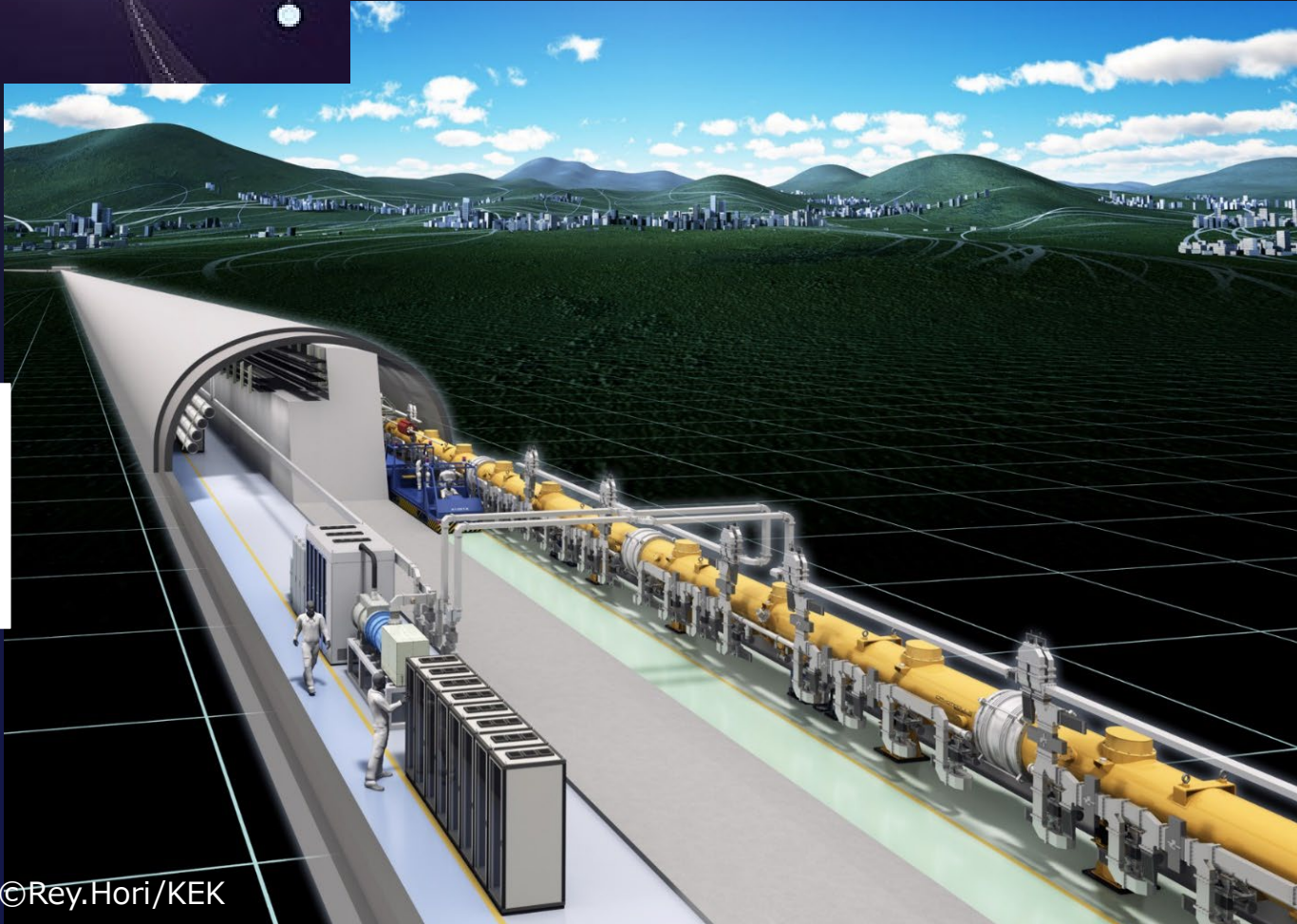


international linear collider



# 国際リニアコライダー International Linear Collider ILC

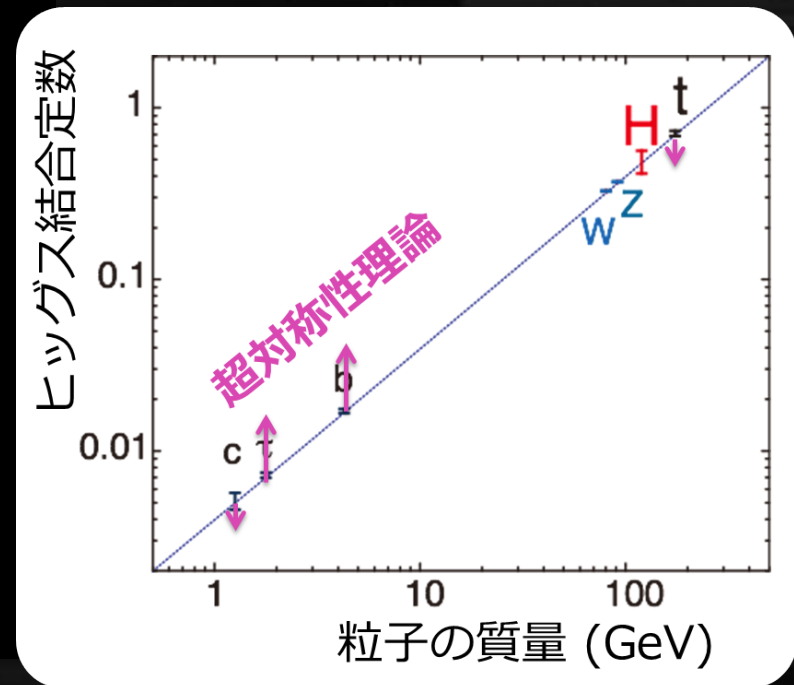


担当教員:  
石野 雅也 (センター長)  
森 俊則 (教授)  
大谷 航 (准教授)  
末原 大幹 (特任准教授)  
Junping Tian(助教)

# ヒッグス粒子と新物理

## 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 $u$	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 $b$		電磁力 光子 $\gamma$		
レプトン	$\nu_e$ ニュートリノ	$\nu_\mu$ ニュートリノ	$\nu_\tau$ ニュートリノ			弱い力 $W^+$ $W^-$ $Z$	
	$e$ 電子	$\mu$ ミューオン	$\tau$ タウ				
	$H$ ヒッグス粒子						



### ヒッグスの結合定数で見ると

時空概念の拡張  
超対称性または余剰次元

**SUSYの場合:**  
bと $\tau$ が上にずれる

MSSM ( $\tan \beta = 5, M_t = 700 \text{ GeV}$ )

Higgs Coupling Deviation from SM

Z W b  $\tau$  c

ILC Projection 250 GeV, 2 ab<sup>-1</sup>, EFT fit [arXiv:1710.07621]

物質構造の拡張  
複合ヒッグス

**複合ヒッグスの場合:**  
全体が下にずれる

Minimal Composite Higgs Model 5 ( $f = 1.5 \text{ TeV}$ )

Higgs Coupling Deviation from SM

Z W b  $\tau$  c

ILC Projection 250 GeV, 2 ab<sup>-1</sup>, EFT fit [arXiv:1710.07621]

全く新しい原理?  
複数学宇宙+人間原理?

標準理論と究極理論が直結?

ずれない

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」

第二の道: 「より深い階層」

第三の道: 「複数学宇宙?」

**現在地**  
(電弱スケール)

※ 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える類いタイプの次元

ヒッグスボゾン:  
標準模型最後の粒子  
2012年にLHCで発見された

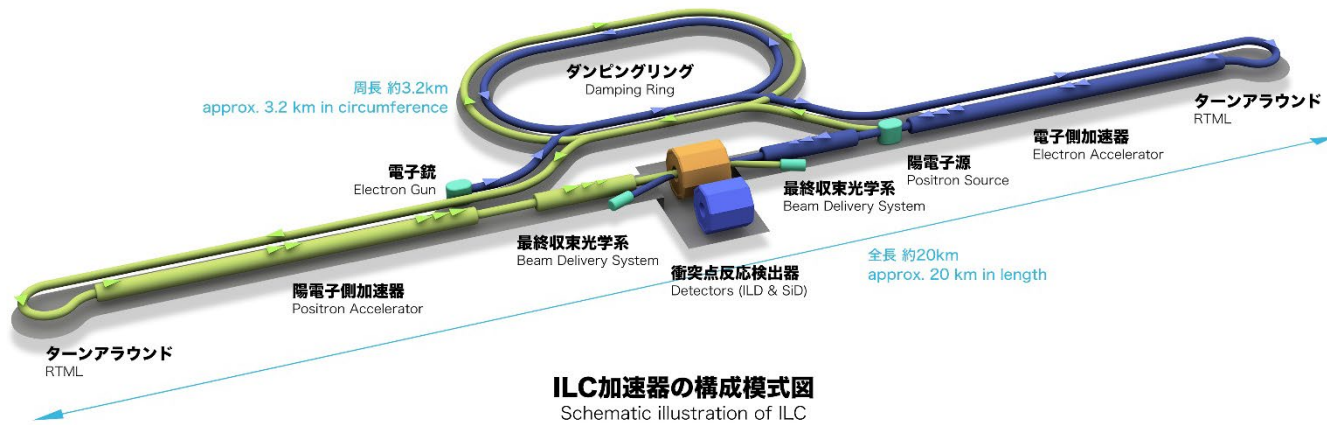
ヒッグスと他の粒子の結合は  
粒子の質量に比例する  
→ 「ヒッグスが質量を知っている」  
「新物理」が存在すると比例関係  
がずれる (新物理の証拠になる)

結合定数のずれから新物理  
の構造を探ることができる

ヒッグスファクトリーによる  
ヒッグス精密測定が重要

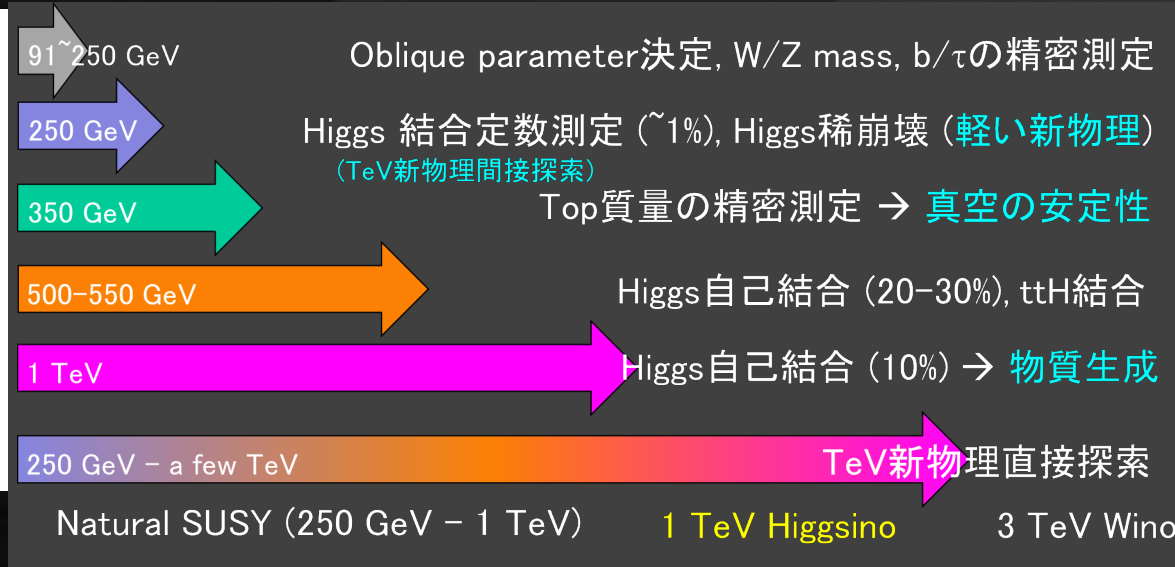
# ILC as a Higgs factory

## 国際リニアコライダー (ILC)



全長約20 km (第一期: 250 GeV衝突によるヒッグス精密測定が主要ターゲット)の直線型電子陽電子コライダー  
 2005年頃より国際組織により実現を推進  
 国際協力(費用分担)による日本国内への実現を目指している (欧米の研究者も賛同)  
 実現には各国政府との協議を経て国際合意を成立させる必要がある (2030年代の実現を目指す)

## ILCの物理ターゲット

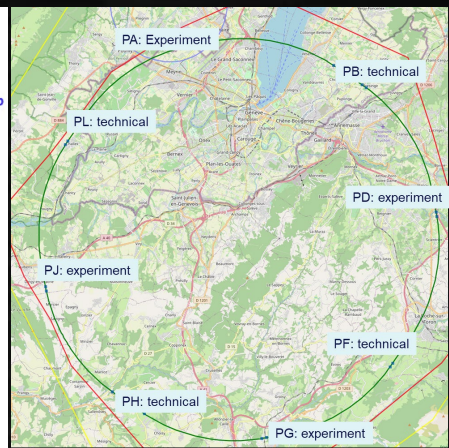
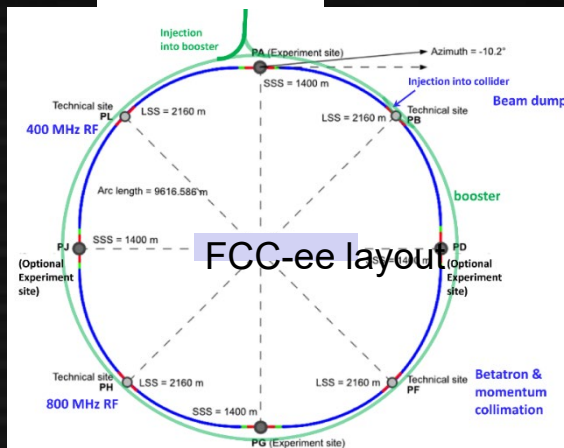


線形コライダーの特徴はエネルギー拡張性  
 将来的なエネルギー増強により、  
 トップ粒子(真空の安定性)、ヒッグス自己結合 (宇宙の物質生成に関連)、暗黒物質の残存量を説明できる超対称性粒子の探索など  
 様々な新物理探索が可能  
 50~100年に渡る実験計画がILCで検討できる

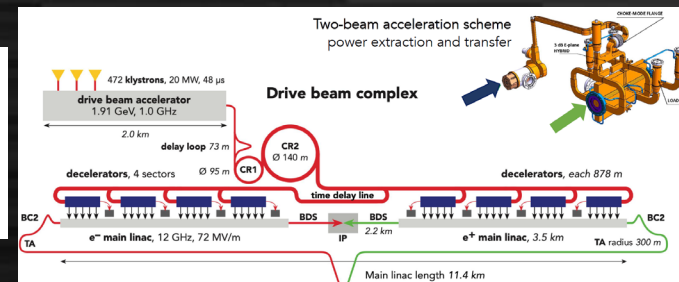
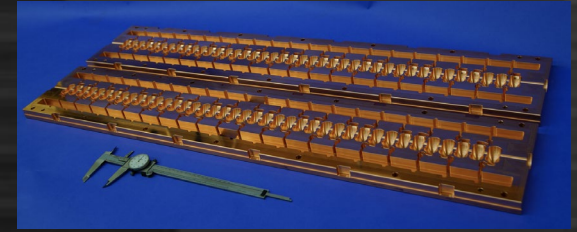
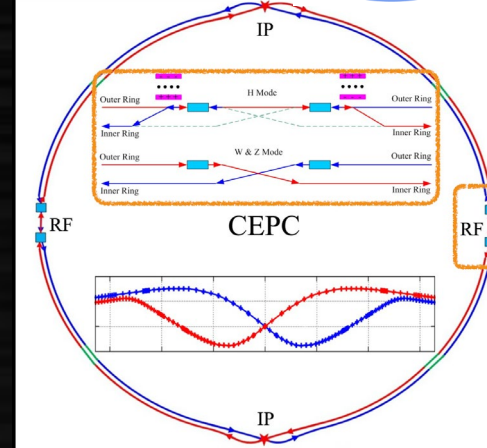
# 他のHiggs factory計画



FCCee



CEPC



欧州(CERN)で検討されている周長91km (cf. ILCは20km)の超大型円形コライダー (予算もILCの2倍以上) 衝突エネルギーは**91-365 GeV** 将来的にはLHCの後継となる100 TeVの陽子陽子コライダーに置き換える壮大な計画 現在**実現性評価**を行っており、2025-6年の欧州戦略アップデートで何らかの方針が示される? 実現は**最短で2045年**以降、陽子陽子衝突は2070年以降とされている

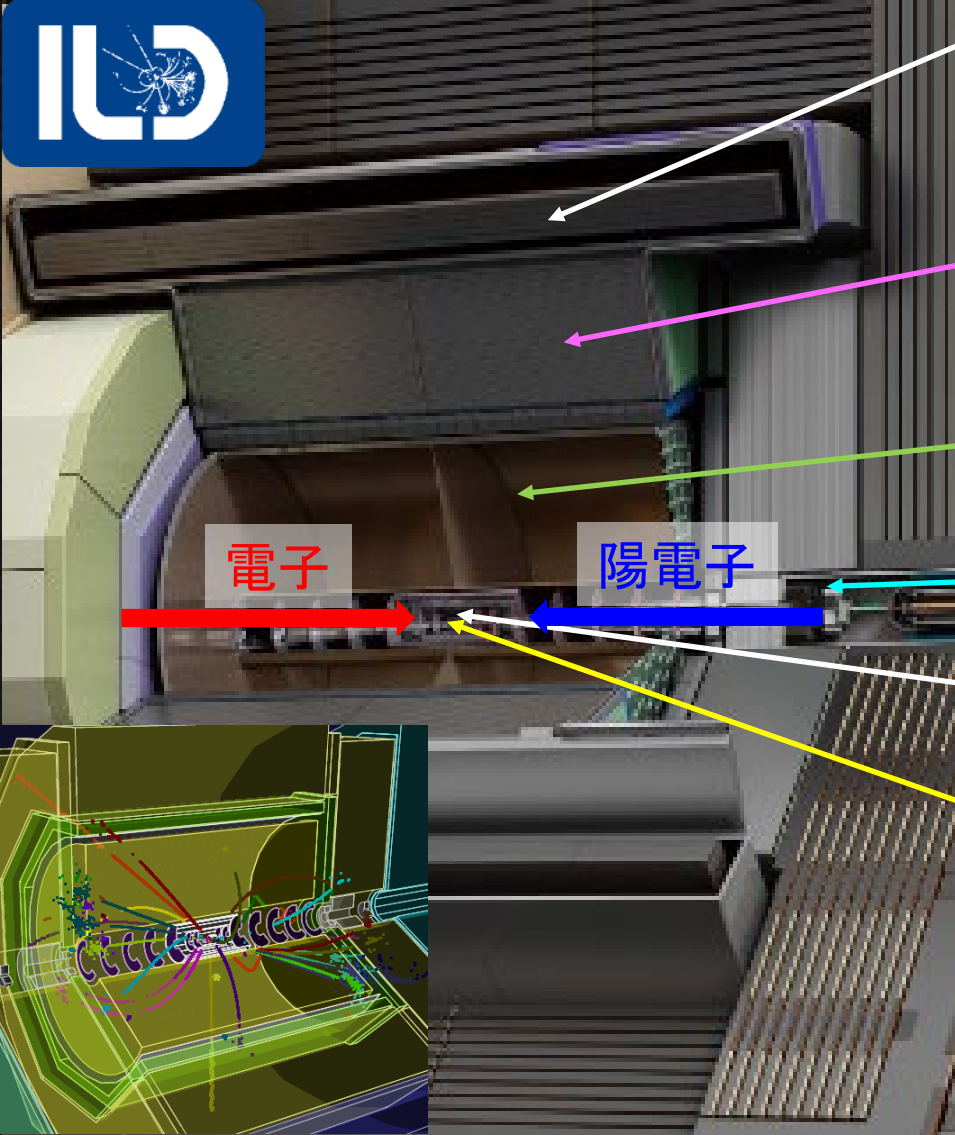
中国でもFCCと類似した計画が検討中 こちらは**2035年**頃の実現を目指す (中国国内計画)

米国、欧州にも線形コライダーの計画もあるが、技術面、設計検討の進展においてILCが進んでいる ILCエネルギー拡張に有用な技術を含む

**Higgs factoryの実現はLHC後の世界共通戦略**  
最初に建設決定したコライダーを世界で協力して作るのが現実方針? 加速器技術は違うが物理/測定器技術は共通部分が多い。(ILC開発は他の計画にも使える)

# ILC物理・測定器開発@ICEPP

## ILC測定器(ILD)の概念図



超伝導電磁石 (3.5 Tesla)  
強力な磁場で荷電粒子を曲げる

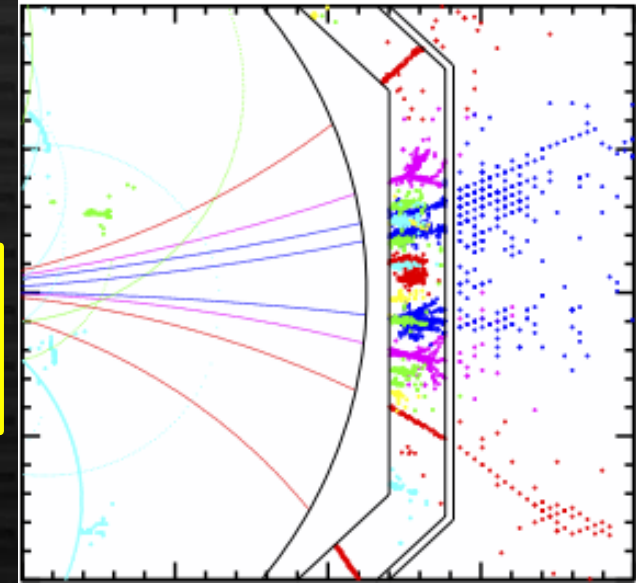
カロリメータ  
中性粒子の位置、エネルギーを測定

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



Particle flowの概念図。  
ヒッグス等から発生する  
ハドロンジェット中の粒子  
を分離・再構成することで  
画期的な測定性能を実現

ILC測定器コンセプトの鍵となるParticle flow実現のため

- 高精細カロリメータ技術の開発・新技術の評価
- 最新の深層学習を用いた再構成アルゴリズムの開発
- ヒッグス等の物理測定に与える影響の評価

を国際協力で推進している。

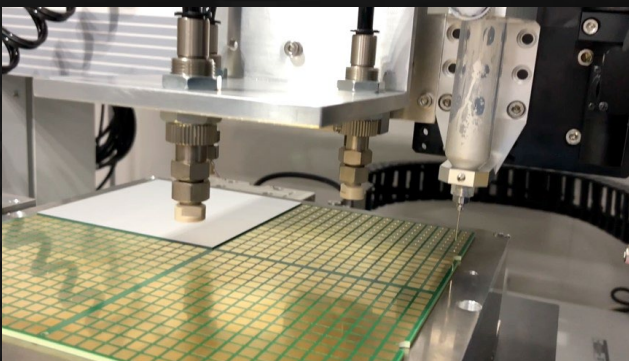
# ILCのカロリメータ開発

## シリコン電磁カロリメータ

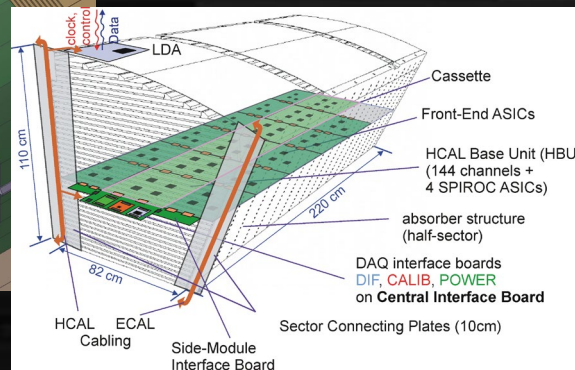
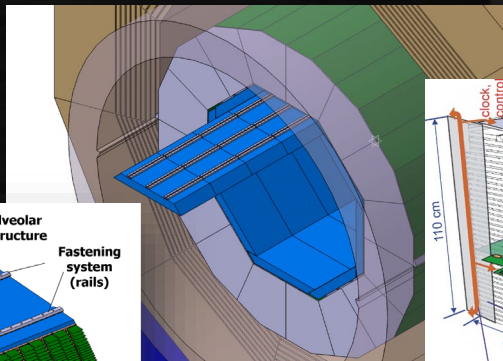
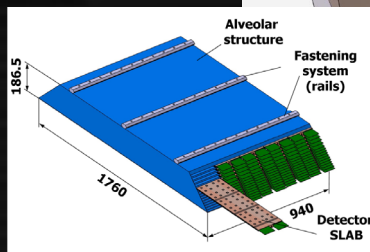
(主担当: 末原)



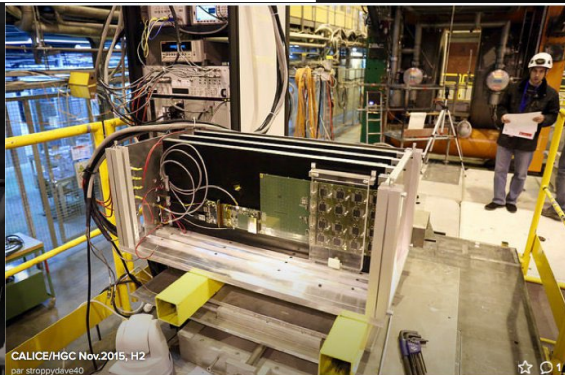
浜松ホトニクス製  
シリコンセンサー (9 x 9 cm)



センサーの組み立て工程



ハドロンカロリメータ  
の構造



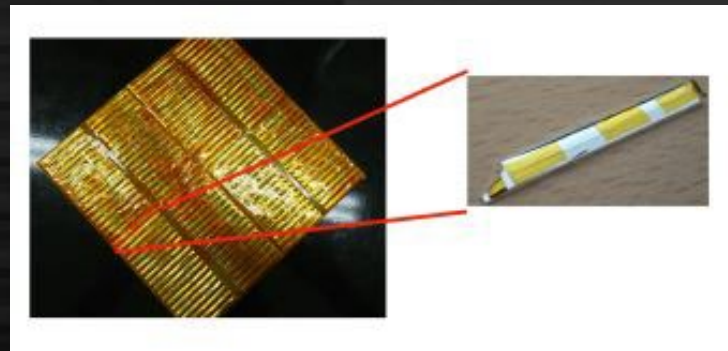
ビーム試験@CERN

大型プロトタイプ  
試験@CERN



## シンチレータカロリメータ

(主担当: 大谷)



短冊型シンチレータと小型光センサ  
(SiPM)を組み合わせて粒子を検出

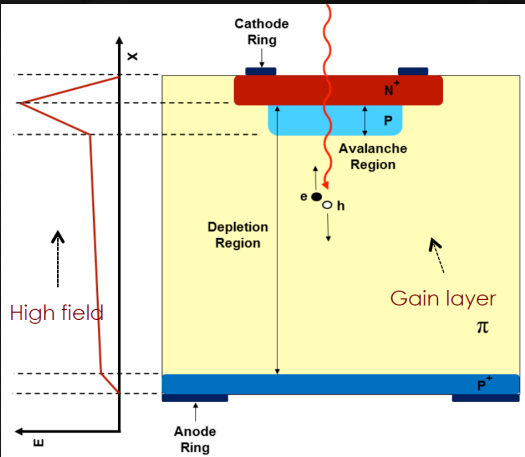


ドイツ・中国の研究者と協力して  
センサー設計・製作・ビーム試験  
の解析等が進行中

フランス・スペイン等の研究者と協力してセンサーの仕様決定、読み出し回路、IC製作、組み立て、ビーム試験等全般を推進

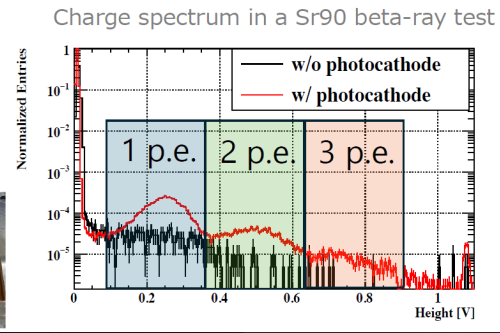
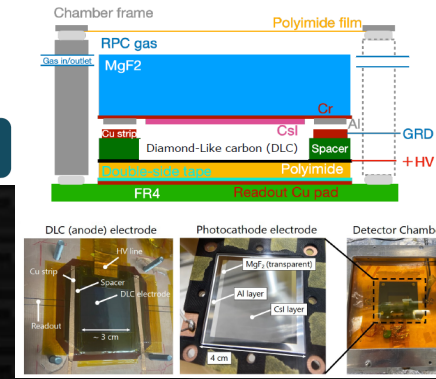
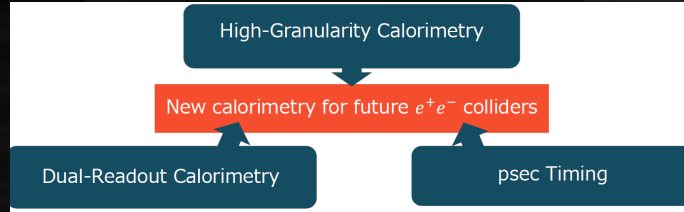
# カロリメータ関連の新技術の開発

## LGADによるピコ秒タイミング測定



LGAD: 低ゲイン (<1000)増幅層を持つシリコンセンサー  
薄型化・信号強度増加によりO(10psec)の時間分解能を目指す

## シンチレーション・チェレンコフ両読み出しによる性能改善



薄型高速チェレンコフ検出器の開発 (既存のシンチレータと併用可)

## 量子ドットを用いた発光物質の開発

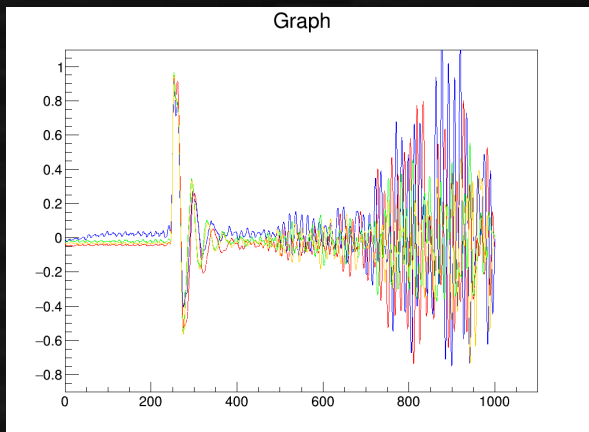


ペロブスカイトナノ粒子を添加した物質により吸収・放出波長をコントロールした材料を開発し、それを用いて高速応答センサーの開発を検討中

新規材料・新型センサーの開発を進め、これらを用いて現在のカロリメータ設計からの大幅性能向上を実現、Higgs factoryカロリメータとしての設計・提案を目指す



高速応答アンプ (by KEK)を用いて信号増幅/収集

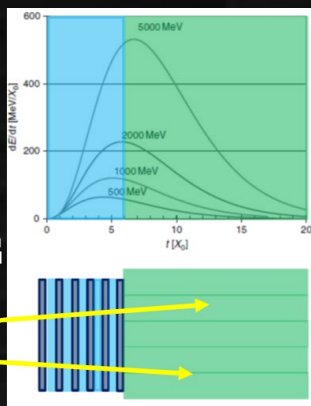
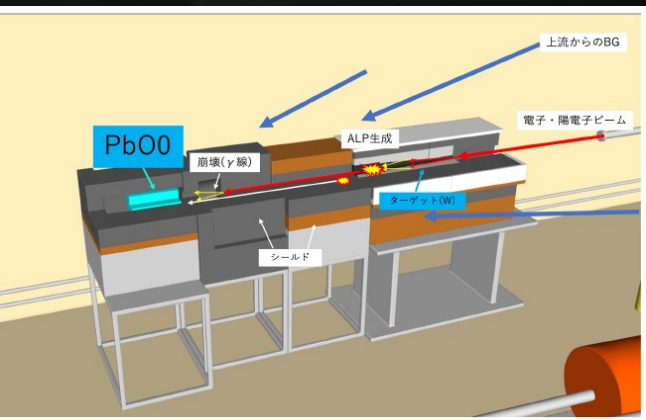


波形収集, 解析により37 psec程度の時間分解能を確認 (ノイズの影響あり)

# 小実験への応用・深層学習・物理解析

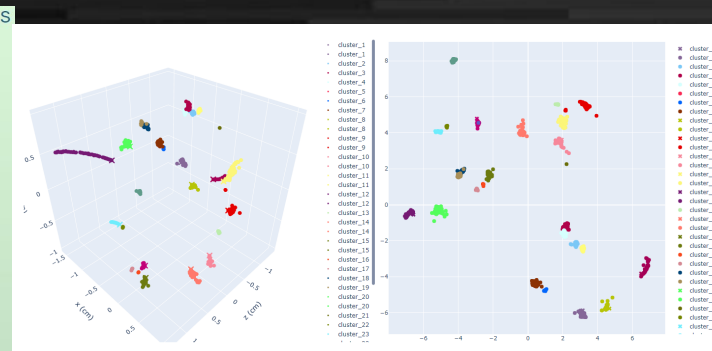
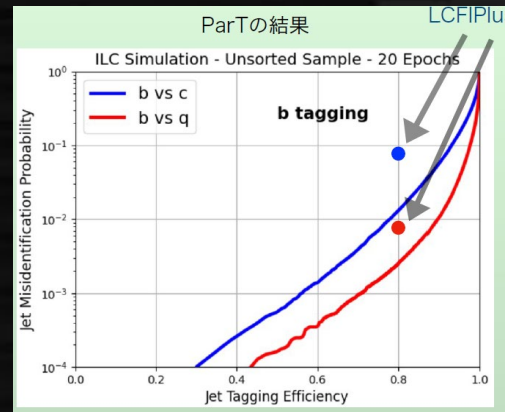
カロリメータの小実験への応用:  
測定器開発に加えて、実際の実験での運用により運用の経験を積むことが重要  
(加えて、物理成果も期待)

## KEK Linac ビームダンプ実験 (EBES)



## 深層学習による事象再構成 (AIグループと協力)

Particle flowやヒッグスの解析には高度なパターン認識が必要。最新のTransformerなどを使った再構成アルゴリズムを開発中で、成果も出始めている。



Transformerを使って従来より  
一桁近くジェット識別性能を向上

Graph neural network  
を使ったParticle flow

大幅な性能向上の物理感度に対する影響を物理解析で調べる。(現在は他大学の学生や留学生(internship)と協力して推進中)

軽い未知粒子 (ALP: Axion-like-particle)の探索  
電子ビーム (4GeV)がビームダンプでALPに変換し、ダンプ後方の空間で2光子に再変換される事象を探索。カロリメータ前方にシリコン層を設置することで背景分離、信号の2光子分離性能を向上。**2025-26に物理成果を得る予定。**



# 研究者(技術者)への道 ～キャリアパス～

- 将来計画であるILC/Higgs factoryにはchallengingなテーマが多数
  - 新技術を用いた測定器開発、最新深層学習の適用、etc.
  - 「できるかわからない」ということ自体も魅力 (自分の成果でILCが実現するかも?)
- 最大の問題はプロジェクトが確実に実現する保証がないこと
  - また、建設期間が長いので物理成果が出るのはかなり先になる
  - 実際に物理測定に携わる経験は重要
- (特に博士取得/研究者になることを目指す場合)  
現行実験と関連させながら研究を進めることが望ましい (以下、例)
  - シリコン検出器開発 + ビームダンプ実験 (+ 深層学習/物理解析)
  - シンチレータ開発 + MEG
  - ILC深層学習/物理解析 + ATLAS
  - 測定器/深層学習/物理 + 加速器開発 など
- 希望と興味に応じたキャリアパスを一緒に考えましょう。
  - お任せにはしないで自分で調べる/考えるのはとても大事です (将来計画に限りませんが、特に)