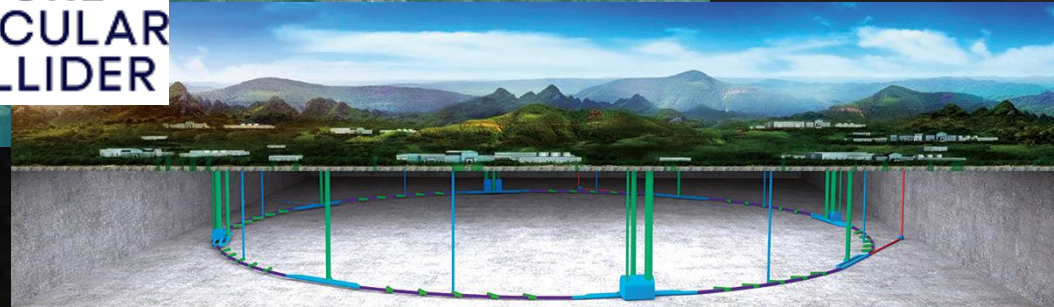
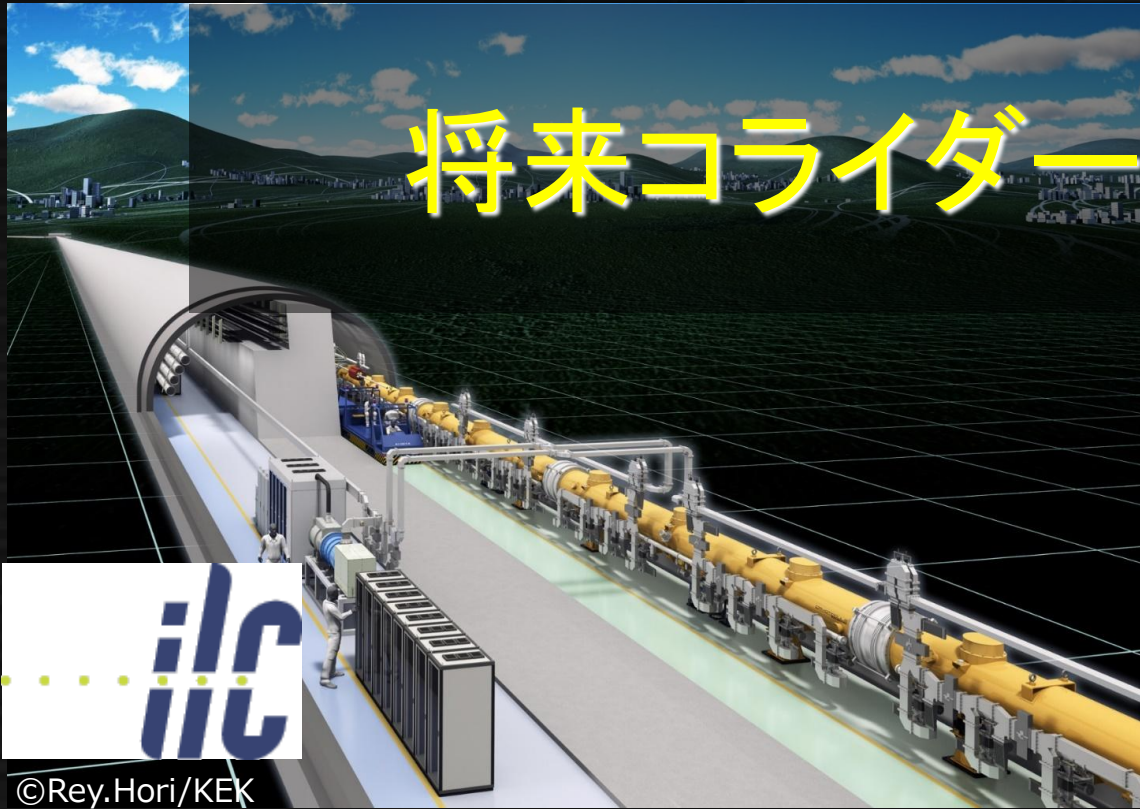


将来コライダー (ヒッグスファクトリー)



担当教員:

石野 雅也

(センター長)

澤田 龍

(准教授)

Junping Tian

(助教)

大谷 航

(教授)

末原 大幹

(特任准教授)

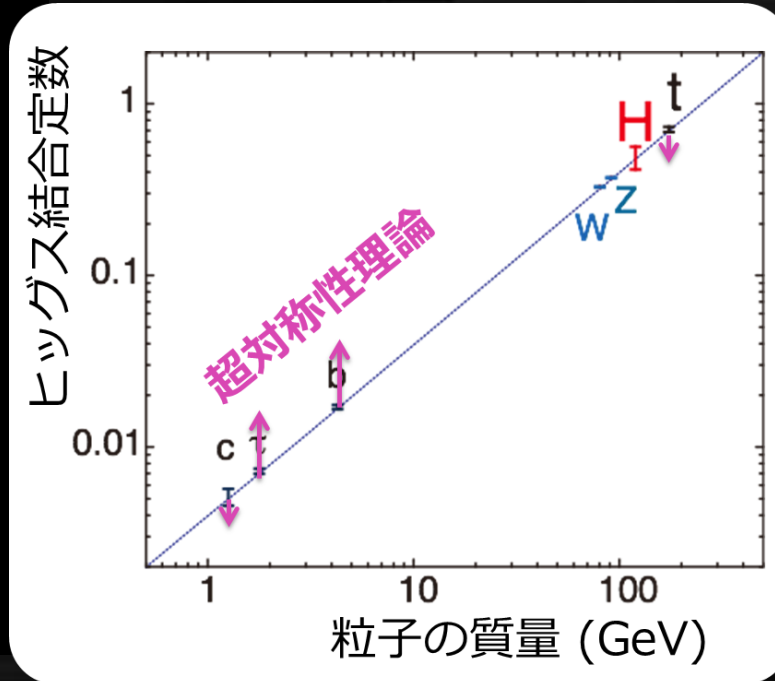
森 俊則

(名誉教授)

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 γ		
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューオンニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	弱い力 W^+ W^- Z		
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	弱い力 W^+ W^- Z		
				弱い力 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 τ が上にずれる

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

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?

ずれない

第一の道: 「新たな次元」

第二の道: 「より深い階層」

第三の道: 「複数字宇宙?」

現在地 (電弱スケール)

標準理論からのズレが見られなかった場合

※ 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

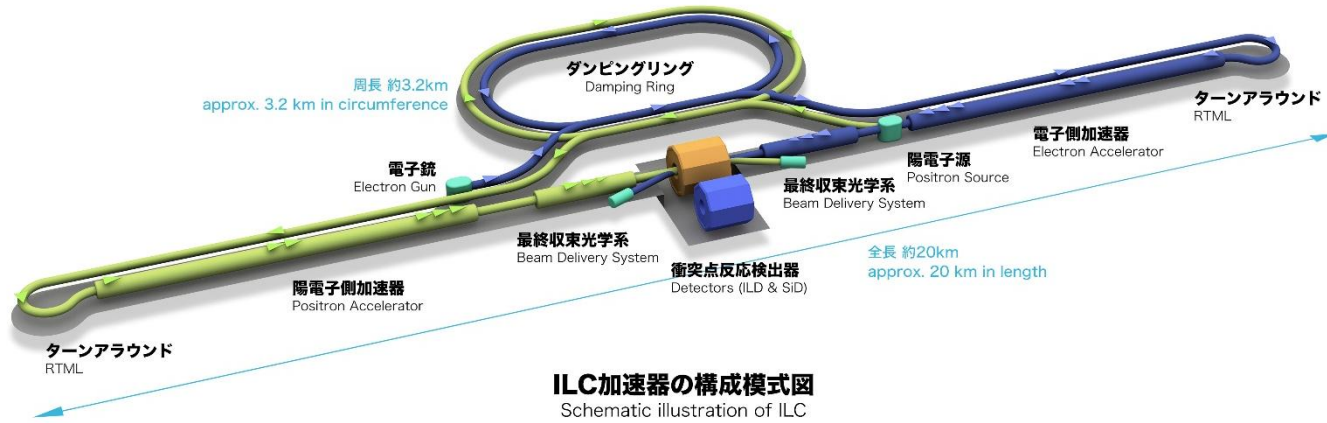
ヒッグスと他の粒子の結合は
粒子の質量に比例する
→ 「ヒッグスが質量を知っている」
「新物理」が存在すると比例関係
がずれる (新物理の証拠になる)

結合定数のずれから新物理
の構造を探ることができる

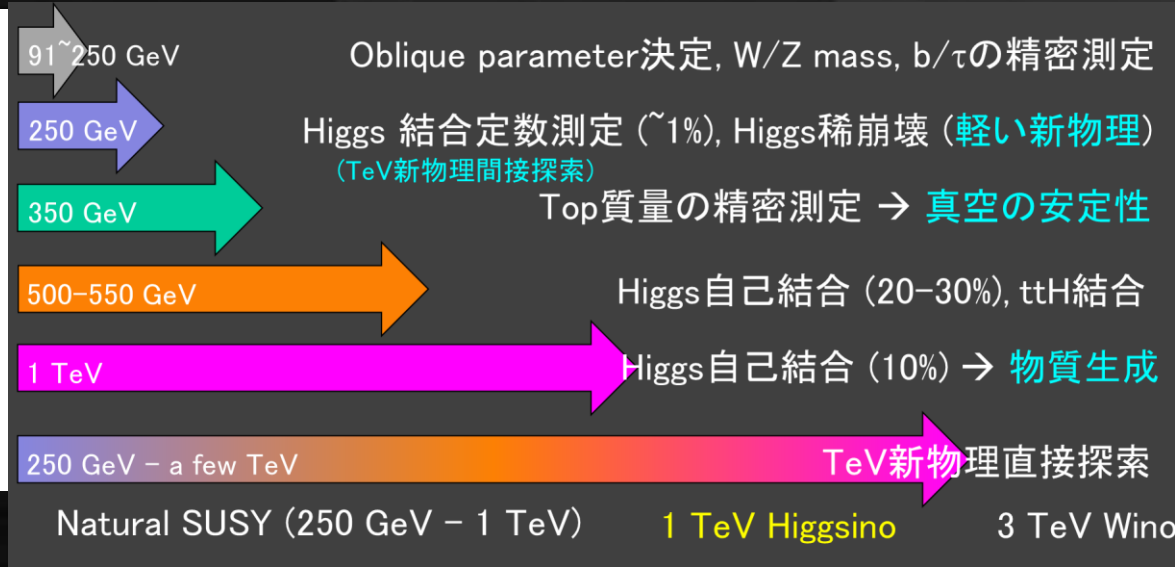
ヒッグスファクトリーによる
ヒッグス精密測定が重要

ILC as a Higgs factory

国際リニアコライダー (ILC)



ILCの物理ターゲット



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
 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
 実現には国際合意が必要
 (2040年頃の実現を目指す)

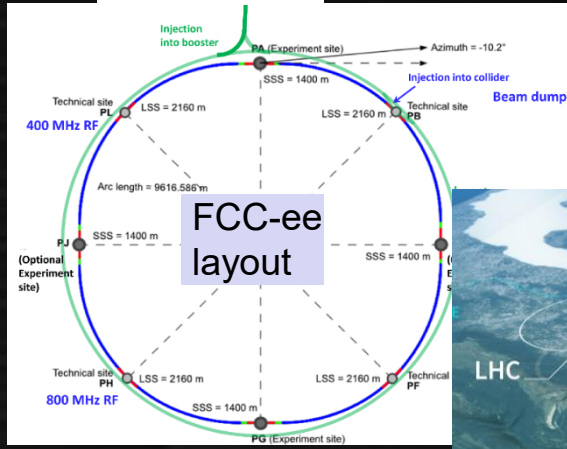
線形コライダーの特徴はエネルギー拡張性
 トップ粒子(真空の安定性)、ヒッグス自己結合(宇宙の物質生成に関連)、暗黒物質の残存量を説明できる超対称性粒子の探索など
 様々な新物理探索が可能
 50~100年に渡る実験計画がILCで検討できる

他のHiggs factory計画

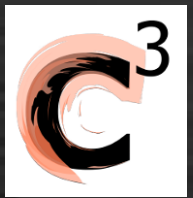
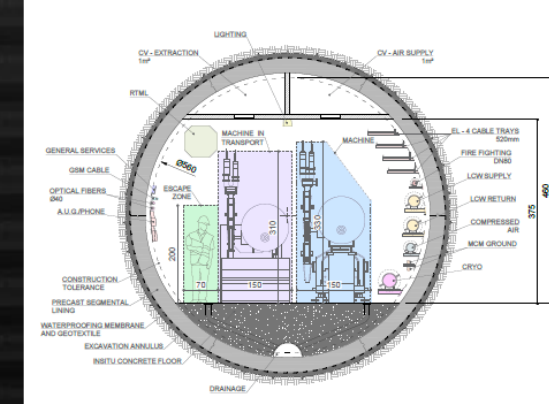
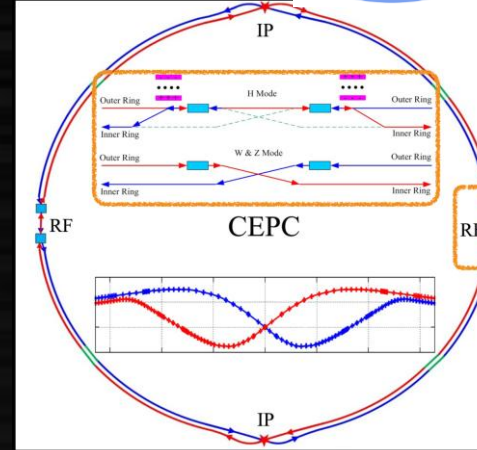
LCF@CERN



FCCee



CEPC



ILCと同様の線形コライダーを欧州に作る計画も検討されている。常伝導による線形コライダーも

欧州(CERN)で検討中の周長91km (cf. ILCは20km)の円形コライダー
衝突エネルギーは91-365 GeV、将来100 TeVのppコライダーに置き換え

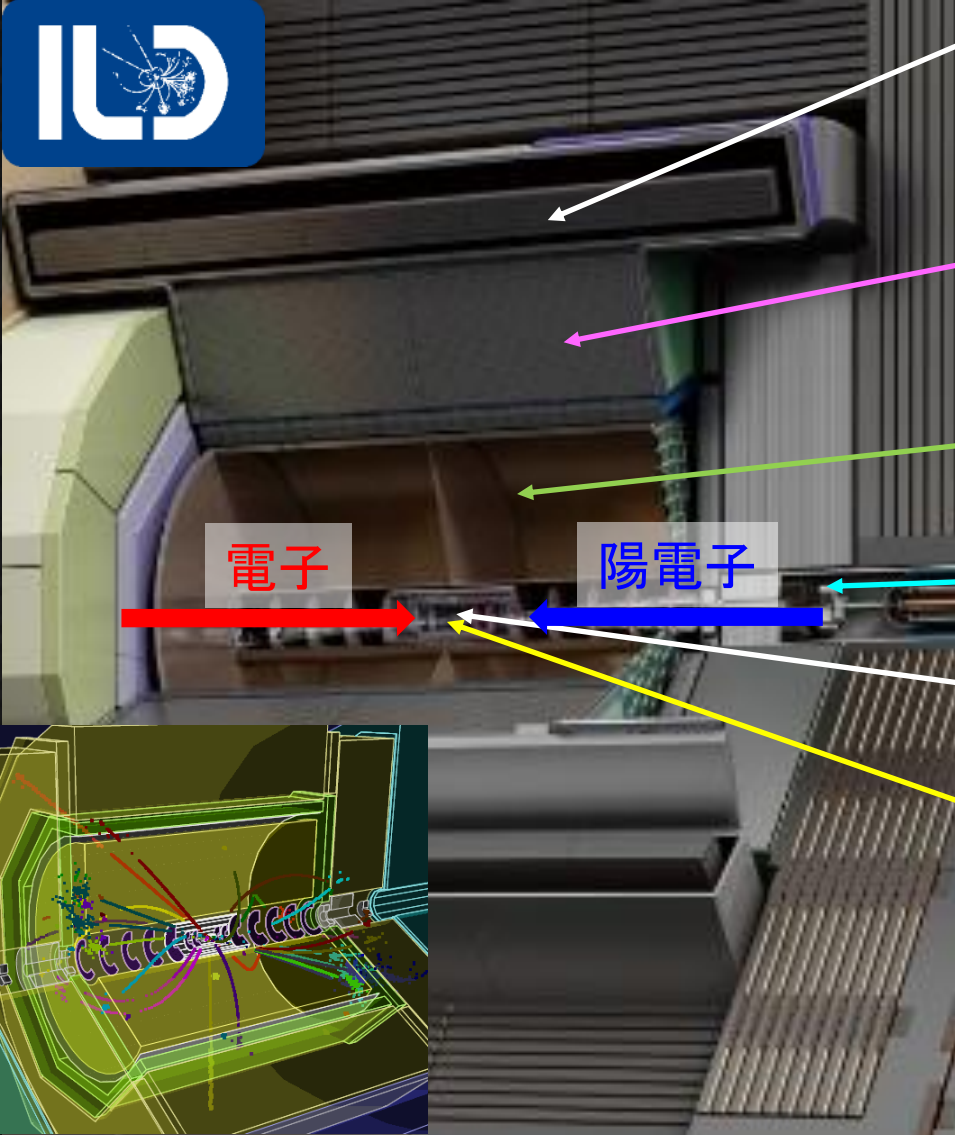
FCC類似の円形コライダー, 2030年に中国政府の採択を目指す

2026年に欧州戦略で優先計画に指定、2028年頃に建設可否を決定
実現は2040年台後半目標、ppは2070年～

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? 物理/測定器技術は円形/線形によらず共通部分が多い。

Higgs factory 物理・測定器開発@ICEPP

HF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

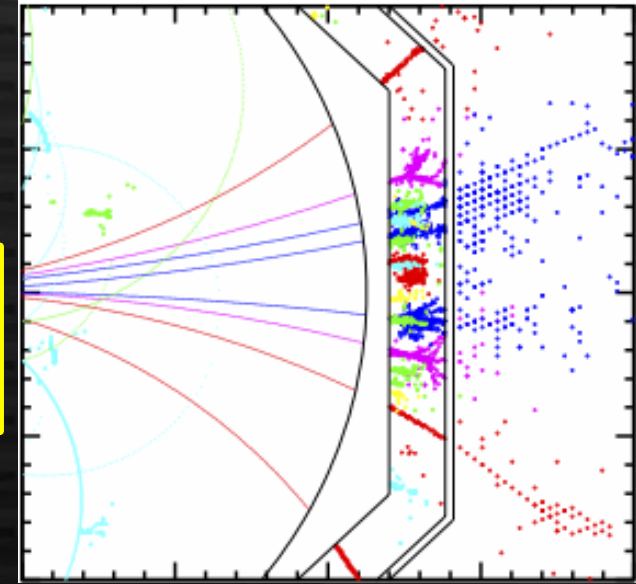
カロリメータ
中性粒子の位置、エネルギーを測定

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。
ハドロンジェット中の粒子を分離・再構成することで大幅に性能UP

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。

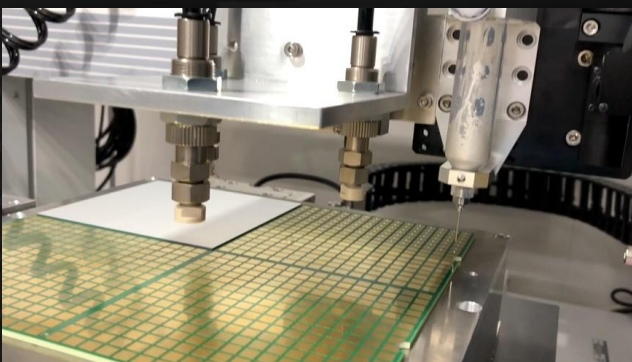
カロリメータ開発

シリコン電磁カロリメータ

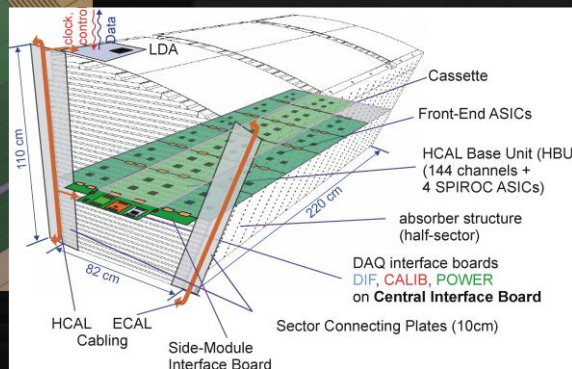
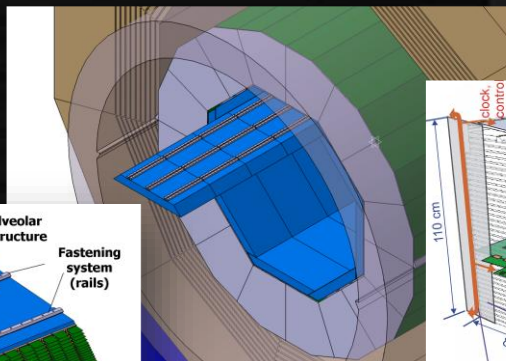
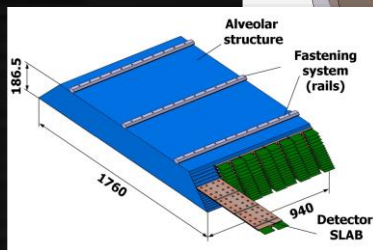
(主担当: 末原)



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



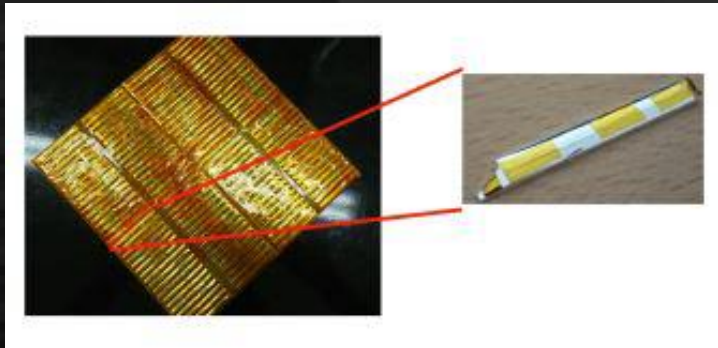
ビーム試験@CERN

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

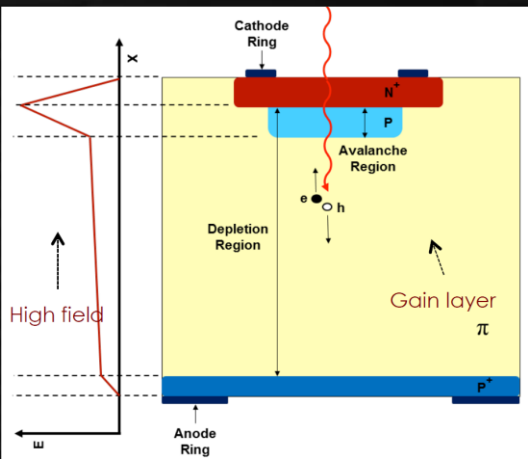


ドイツ・中国の研究者と協力して
センサー設計・製作・ビーム試験
の解析等が進行中

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

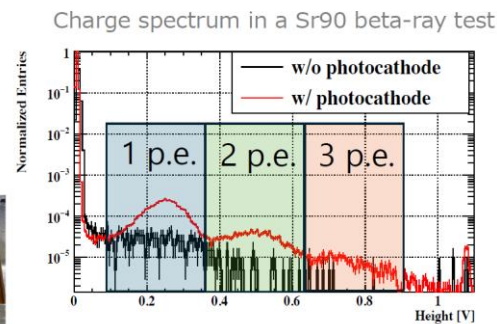
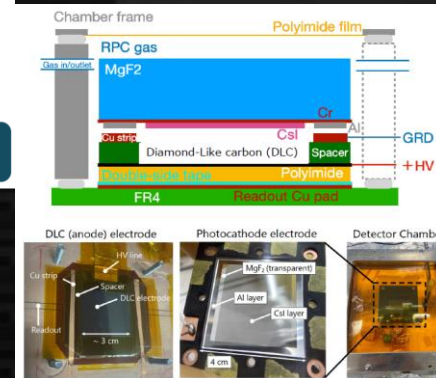
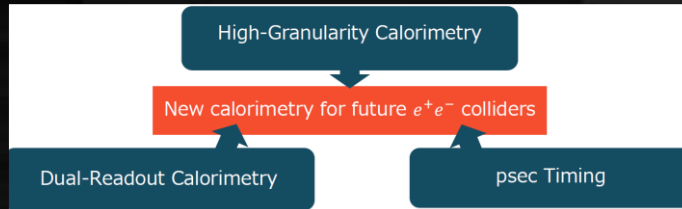
カロリメータ関連の新技術の開発

LGADによるピコ秒タイミング測定



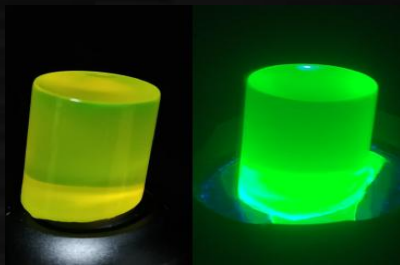
LGAD: 低ゲイン (<1000)増幅層を持つシリコンセンサー
薄型化・信号強度増加によりO(10psec)の時間分解能を目指す

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

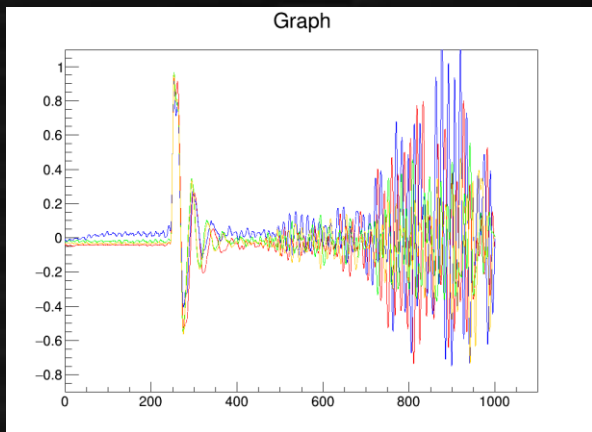


ペロブスカイトナノ粒子を添加した物質により吸収・放出波長をコントロールした材料を開発し、それを用いて高速応答センサーの開発を検討中

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

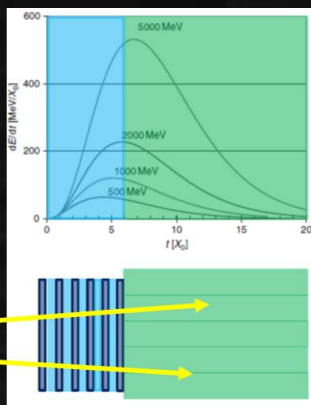
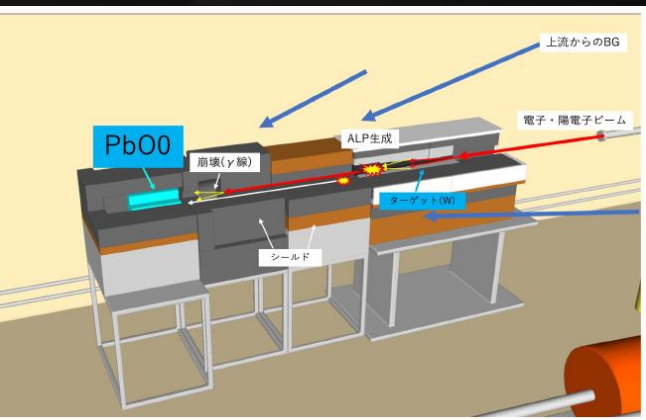


波形収集, 解析により37ピコ秒程度の時間分解能を確認 (ノイズの影響あり)

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:
コライダー測定器の技術を活用して
少人数・短期間で物理成果を出す
(測定器運用の経験も積める)

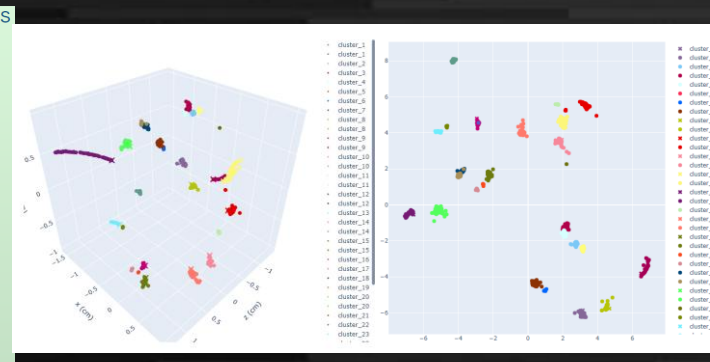
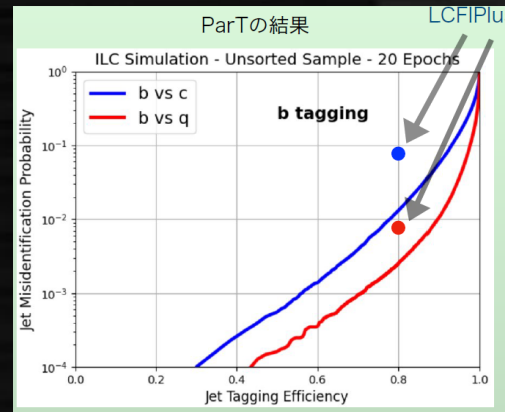
KEK Linac ビームダンプ実験 (EBES)



軽い未知粒子 (ALP: Axion-like-particle) の探索
電子ビーム (4-7 GeV) 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。シリコンセンサーにより
信号の分離性能を向上。 [arXiv:2605.07108](https://arxiv.org/abs/2605.07108)
最初の物理結果を最近発表、2028年頃完成へ

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

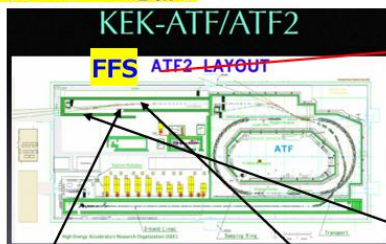
大幅な性能向上の物理感度に対する影響を
物理解析で調べる。(ヒッグスのストレンジ結合
の探索やヒッグス自己結合の解析を推進中)

加速器関連の研究 (at KEK)

ナノビーム開発の目標と最近のナノビーム開発 (ATF) (JFY2023-2024)

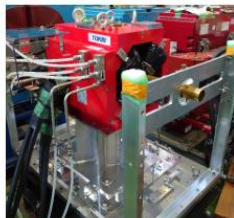
WPP-15: 最終収束系 under ITN

安定なナノビームを創る



1.28 GeV

ATF2 final focus magnet installed in beam line



Wakefield effect for nanobeam (see next)



Test chamber prepared.

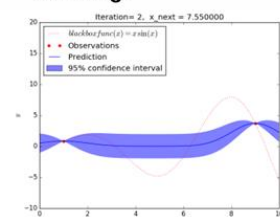
- ◆ ATF2ビームラインは、リニアコライダーの最終焦点システム (FFS) をテストするための**世界で唯一のテスト加速器**である。
- ◆ 以下の3つの研究テーマは、ATFで進めるべき重要なテーマである。
 - ◆ ウェークフィールド緩和
 - ◆ 高次収差の補正
 - ◆ ビームチューニング (機械学習)
- ◆ 今迄のナノビーム開発 (IP測定、FONT)とさらにこれらをもとにした**ナノビーム (37nm)の生成と長期安定化**が最終目的。
- ◆ ATF2ビームラインでの技術研究は、**ATF国際コラボレーション**で進められている。
- ◆ 2023年度は14週運転。2024年度は20週運転。2025年度は14週を予定。

Improvement of nano Beam measurement Systems by using laser interference



Beam size measurement by laser interference pattern

Stabilization beam size by optics tuning and machine learning.

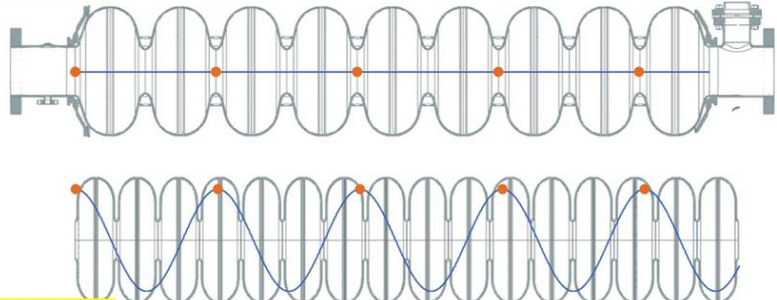


Traveling waveでの加速

Standing Wave in 9-cell structure

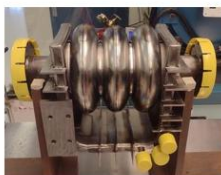
Increase Transit Time Factor (TTF) for HG

Conceptual design by Pavel Avrakhov



Traveling Wave in 16-cell structure

定在波(SW)に対してTWはずっと高いfieldで加速できる。



FY23 US-Japan "Developing high-gradient traveling wave SRF accelerating cavity" in collaboration between KEK-Jlab-FNAL is awarded

積層薄膜構造の導入による超伝導加速空洞の最大加速電場の大幅向上

超伝導加速空洞(図1):

- 極低温に冷却した超伝導材料からなる空洞共振器の内部に誘起した高周波電磁場の電場成分を用いて粒子を加速する
- 現在、ほぼ全ての空洞は良好な加工性と高い超伝導性能を併せ持つ**ニオブ (Nb)**で製作されている
- **超伝導の特性**: わずか 200 W の電力の投入で ~40 MV/m もの加速電場を発生できる (ILC目標: 35 MV/m)



図1: 1.3 GHz 9 セルニオブ製超伝導空洞



図2: 磁束の雪崩的な侵入が生じている様子 (緑: 磁場、黒: 超伝導体)



図3: 積層薄膜構造 (S-I-S 構造)

超伝導空洞の性能を制限するもの:

- **最大加速電場**: 表面磁場が母材の物性で決める上限に達すると、その時点で磁束の雪崩的な侵入・増幅が生じて、それ以上超伝導空洞としての性能を維持できなくなる (図2)
- **表面欠陥**: 最大加速電場を理論で予想される物性値の上限から大幅に低下させる効果があるため、その克服が本質的に重要

解決のためのアイデア (積層薄膜構造)

- Nb の上に**絶縁薄膜**と**超伝導薄膜**を積層した構造(図3)
 - **超伝導層の役割**: Nb 以上の性能の超伝導薄膜 (Nb₃Sn等) を用いて母材への表面磁場の防護・遅延を行う
 - **絶縁層の役割**: 表面欠陥がトリガーした磁束が雪崩状に増幅する前に防止して影響を除去する
- **理論**: 最大加速電場の**2倍以上の増大**を予言

Nb	Nb ₃ Sn-I-Nb
40 MV/m	110 MV/m

図4: 積層薄膜構造の最大加速電場の理論計算の結果 (Nbの最大加速電場を40 MV/mとして計算)

現在: KEK で積層薄膜構造の成膜研究を進めている

KEKと協力してILC等のための加速器の性能向上等の研究を行う。博士論文にすることも可能。

研究者(技術者)への道 ～キャリアパス～

- 将来計画である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HFが実現するかも?)
- 一方、将来計画の実現は10年以上先で、**確実に実現する保証もない**
- (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 + MEG2
 - HF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/考えることもとても大事です

もっと知りたい方へ

- 研究室訪問 / website (大谷研, 末原研, 澤田研)
 - 大谷研: カロリメータ (シンチレータ)、加速器
 - MEG2, その将来計画(PIONEER, MEG3)
 - 末原研: 物理/AI、カロリメータ (シリコン)、ビームダンプ実験
 - AI応用 (加速器運転等)
 - 澤田研: 物理/AI
 - ATLAS実験, DarQ実験
- ILC/Higgs factoryの様々な情報
 - KEKのILCページ
 - ILC通信
(以下英語)
 - ILC International Development Team
 - FCC / CEPC / LC Vision (paper)

ICEPP学部向けセミナー
「将来コライダー(ILC, FCC-ee)で
できる先端素粒子物理研究」
5/29(金) 17:10~
<https://indico.global/event/17757/>