

東京大学 素粒子物理国際研究センター

山下研究室・研究紹介

■ 国際リニアコライダー計画(ILC)

田辺 友彦、倉田 正和、片山 領、家城 斉

■ J-PARC中性子寿命・時空対称性の破れ

片山 領、山田 崇人、家城 斉、長倉 直樹

■ 先端加速器開発：ILC加速空洞&超伝導高周波電子顕微鏡

東 直、藤倉 昇平

■ 半導体光検出器PPDの開発

家城 斉

■ 山下研の様子 ～修士1年の視点～

加藤 悠

■ 卒業生の軌跡

久保田 隆至(LHC ATLAS)、森田 裕一(J-PARC加速器)、
音野 瑛俊(PPD、中性子寿命)、生出 秀行(PPD、RHIC実験)

ウェブ <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/>

Eメール satoru@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

■ 世界最高を目指す挑戦

- ILC超伝導加速空洞
- J-PARC主加速空洞
- 超伝導高周波顕微鏡

加速器 開発

- ILC測定器全体設計(ILD)
- 先端光量子センサー(PPD)

測定器 開発

物理 研究

- LHC-ATLASミュオン・トリガーを用いた物理
- 中性子の寿命・時空対称性の破れ(J-PARC)
- RHIC-PHENIXでの陽子の内部構造

熱意のある方、詳しく知りたい方、訪問大歓迎です。
興味のある方は是非ご連絡ください！

Eメール satoru@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/>



東京大学 素粒子物理国際研究センター

やました さとる

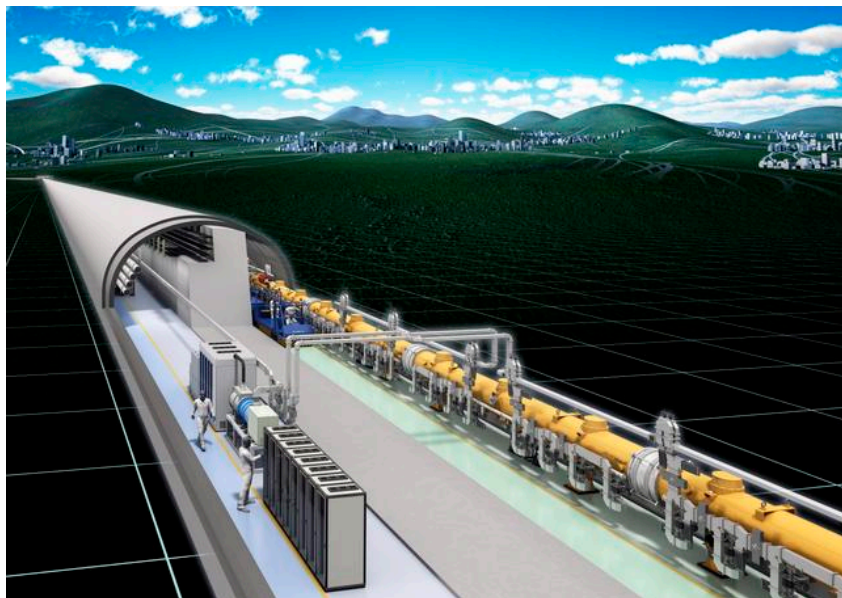
山下 了 特任教授

■ 国際リニアコライダー計画 ILC

次世代を担うフロンティア加速器

International Linear Collider (ILC)

電子陽電子衝突型線形加速器



重心系エネルギー 500 GeV~1 TeV
対消滅により全エネルギーを変換
新しい原理の解明を目指す

2028年頃の運転開始を目指し欧・米・アジアの
国際協力のもと、研究開発を進めている。

日本国内の建設を目指している。

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

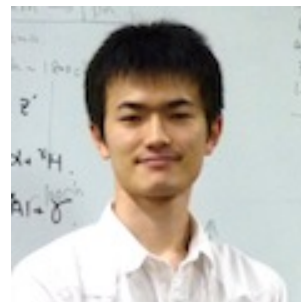
LHCで発見された『新粒子・新現象』を
ILCは精密測定で『新しい物理原理』と
『大統一理論』の解明を目指す



たなべ ともひこ
田辺 友彦
特任助教



くらた まさかず
倉田 正和
特任研究員

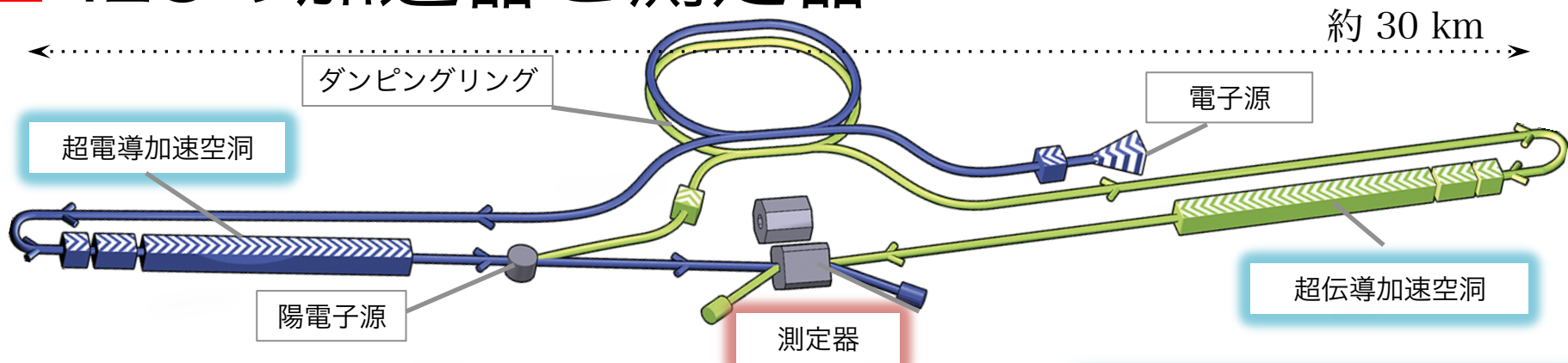


かたやま りょう
片山 領
博士5年



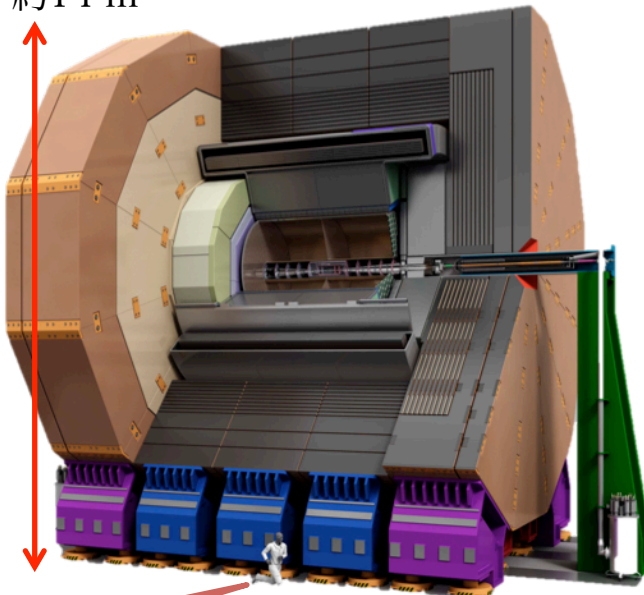
いえき せい
家城 齊
博士2年

ILCの加速器と測定器



ILD (International Large Detector)測定器

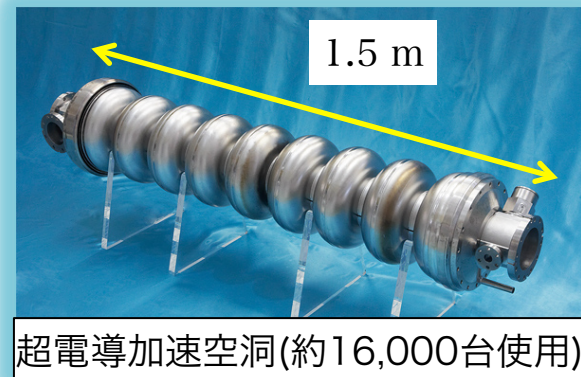
約14 m



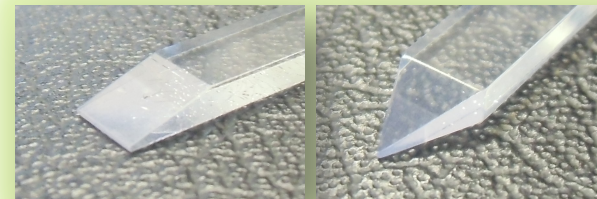
Hi!

ILD測定器

- ・新しい原理をもちいた
高精細・高分解能測定器
- ・クォークのエネルギー
分解能を飛躍的に向上
- ・シリコンのバーテックス
検出器、ガスの飛跡検
出器(TPC)、細分化され
た電磁およびハドロンカ
ロリメータ等から成り、
それぞれの開発・性能評
価が進められている。



電磁カロリメータに用いる
シンチレータ (約1000万本使用)

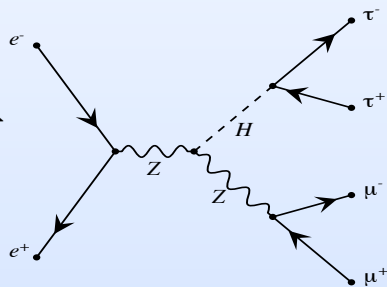


高精細かつ量産可能な検出器をつくるために
シンチレータの形状の最適化を行う。

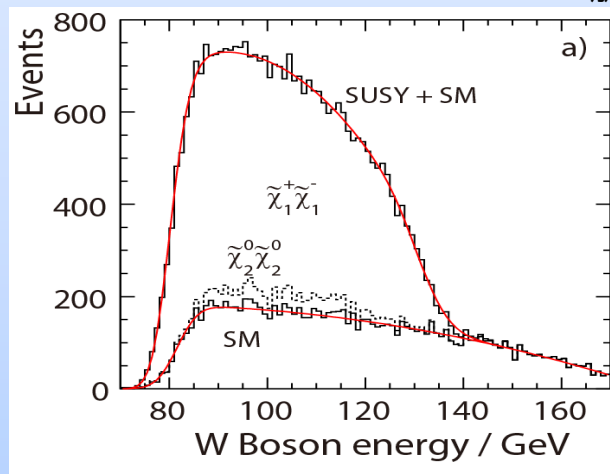
ILCの物理解析

物理解析

ILCにおけるヒッグス粒子
や超対称性粒子の研究



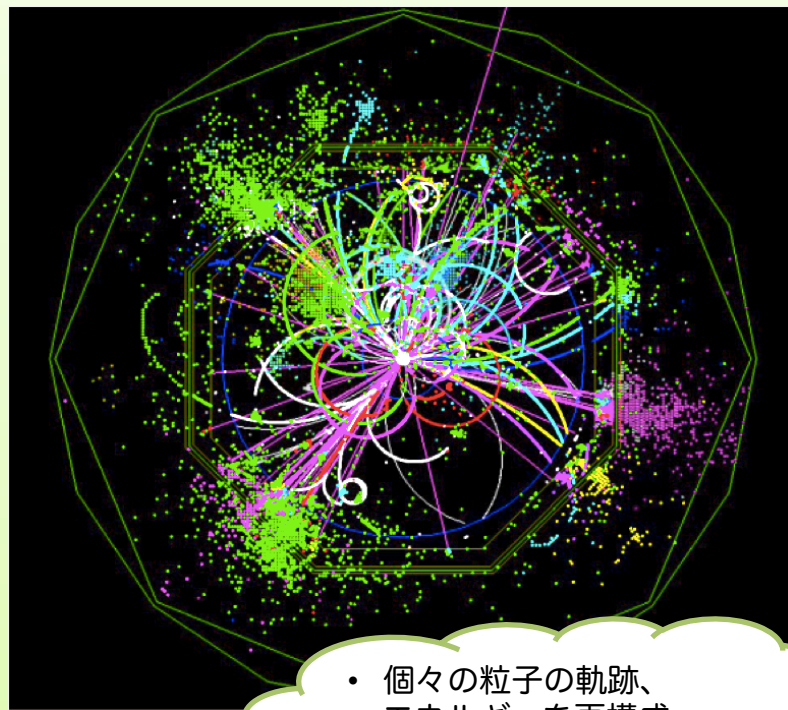
ヒッグスがタウ粒子に
崩壊する事象



超対称性粒子の質量を1%の精度で測定

再構成システムの開発

再構成システムのコア部分の研究開発
→解析精度の向上に貢献



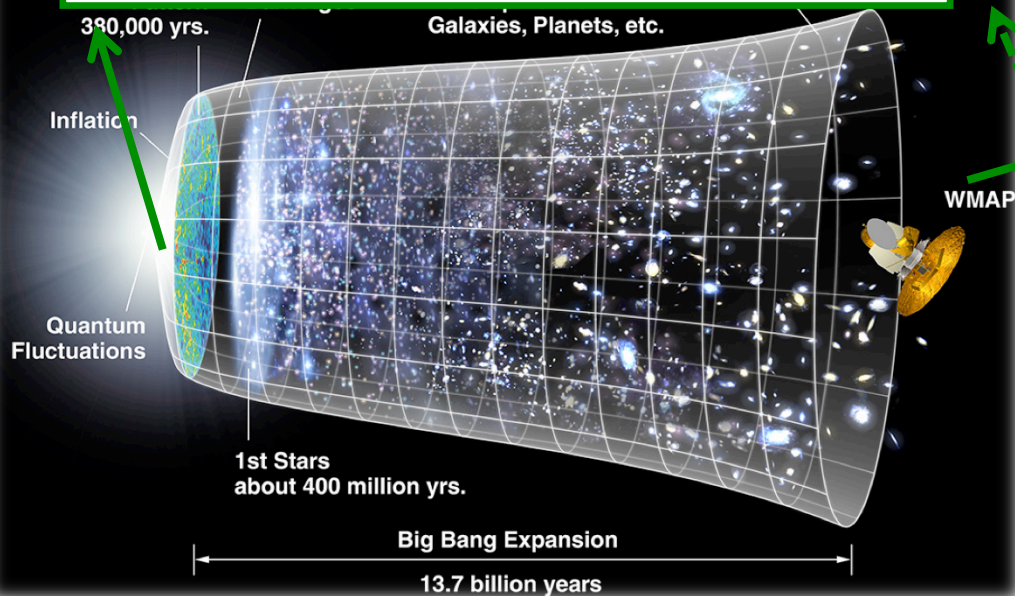
- 個々の粒子の軌跡、エネルギーを再構成
- クォークの種類を同定

ILC研究の魅力

- 大実験の立ち上げに関わる重要な仕事ができる
(既に開始した実験では根幹部分に関わるのが難しい)
- 物理／測定器／加速器の多岐の分野から自分に合った研究テーマを選べる
- 国際会議で発表できる機会が多い

中性子寿命の精密測定

ビッグバンから3～20分後の世界
陽子と中性子の結合による軽元素生成



軽元素合成理論と中性子寿命

初期宇宙の元素構成を決定

WMAP, Planckなどによる
宇宙の物質密度の測定

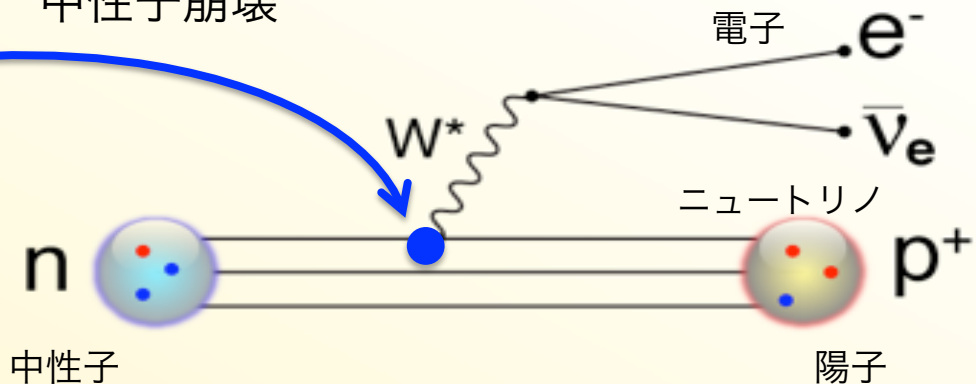
標準理論を超える
新物理の探索

中性子寿命(～10分)の精密測定

小林益川理論の検証 | V_{ud} |の精密測定

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

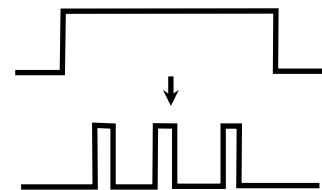
中性子崩壊



■ もうひとつのフロンティア: 超低エネルギー実験

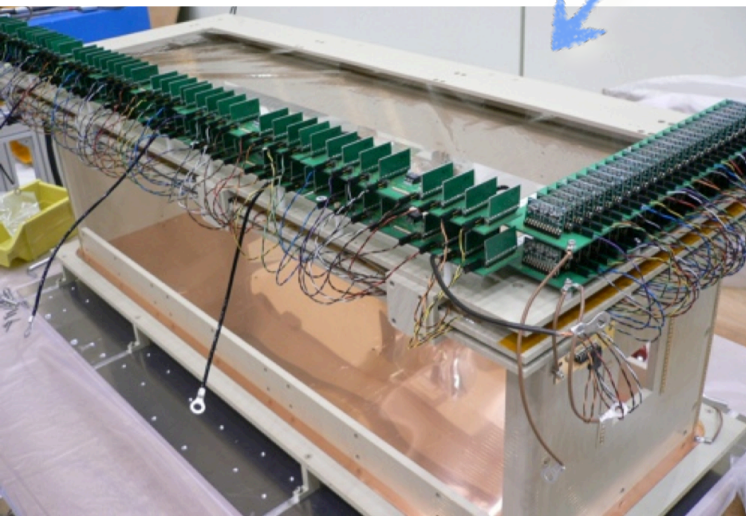
スピン・フリップ・チョッパー(SFC)

多層膜ミラーと磁場で中性子ビームを切り出す
→中性子が飛来する時間をより細かく特定できるため、測定精度が向上する



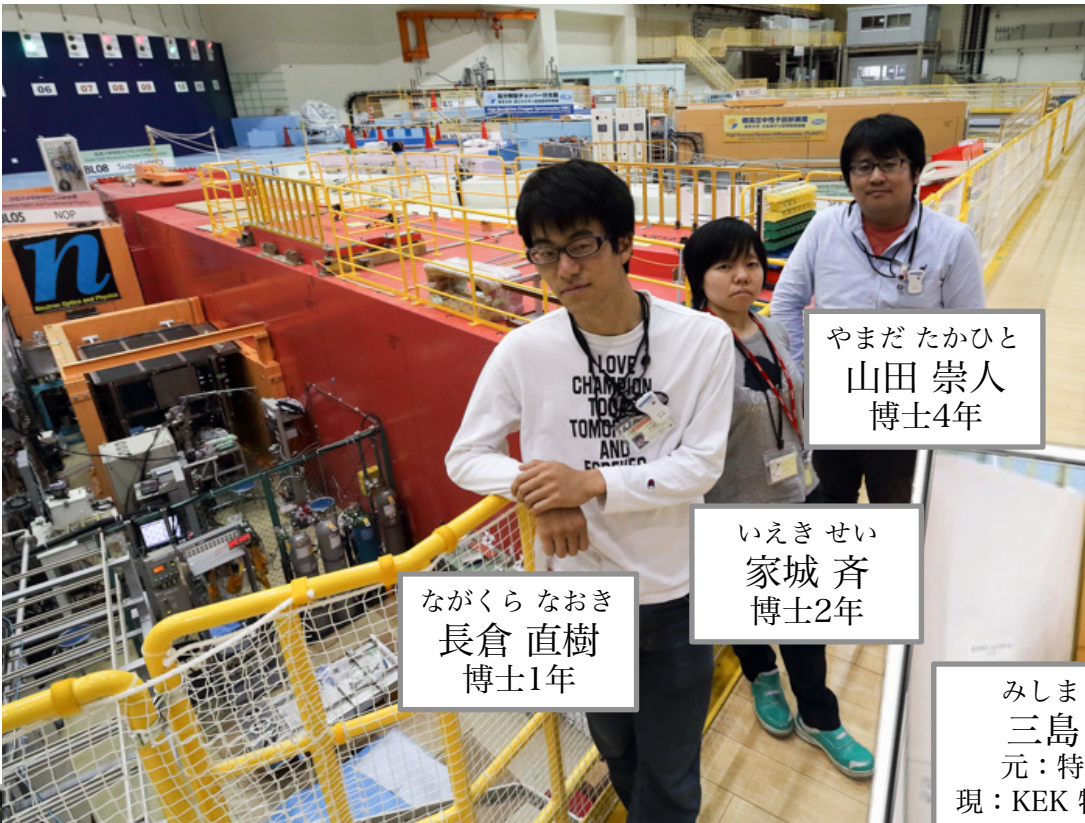
タイム・プロジェクション・チェンバー(TPC)

中性子崩壊後の電子・中性子フラックスの同時測定を行う



- ・ J-PARCに新設されたビームラインで実験
- ・ **2014年に物理実験を開始 →まもなく最初の結果を発表**
- ・ 若手主体のチームで全システムを構築・研究
(現場はポスドクと学生がリーダー) 名古屋大学・九州大学と連携
- ・ その他の中性子基礎物理実験も多数計画

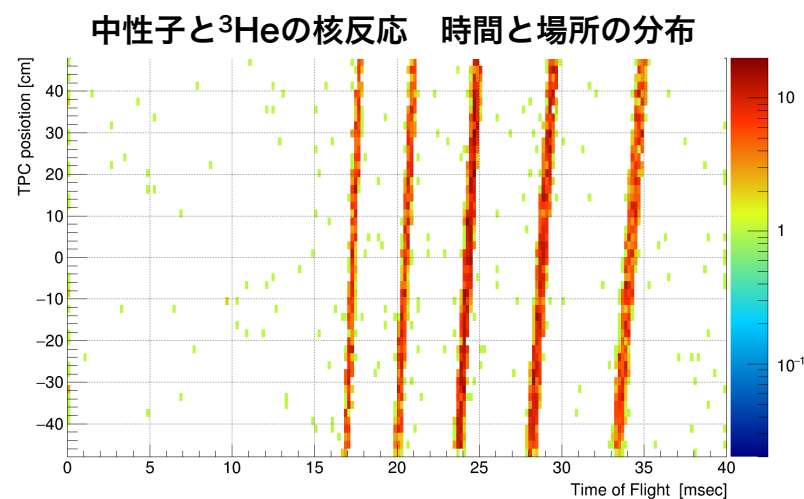
<http://nop.kek.jp/>



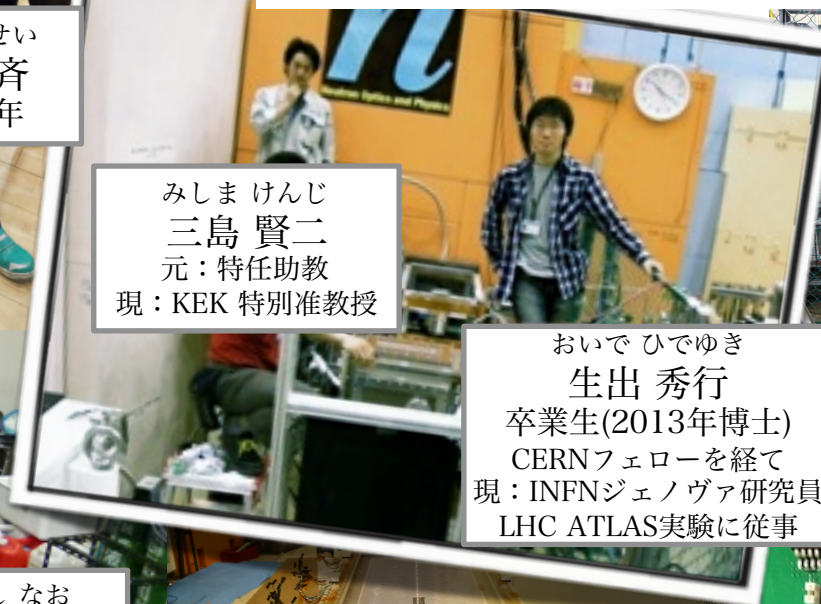
やまだ たかひと
山田 崇人
博士4年

ながくら なおき
長倉 直樹
博士1年

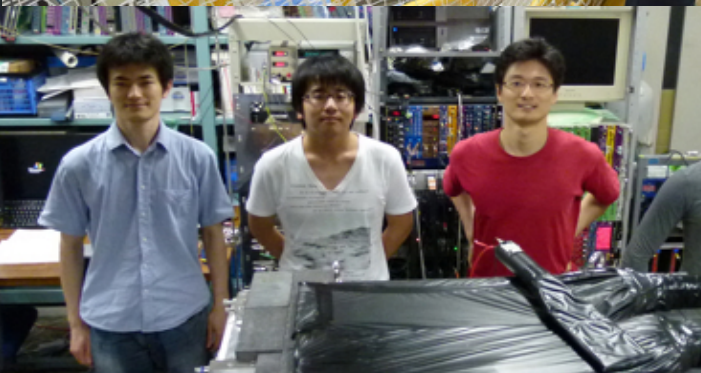
いえき せい
家城 斉
博士2年



みしま けんじ
三島 賢二
元：特任助教
現：KEK 特別准教授



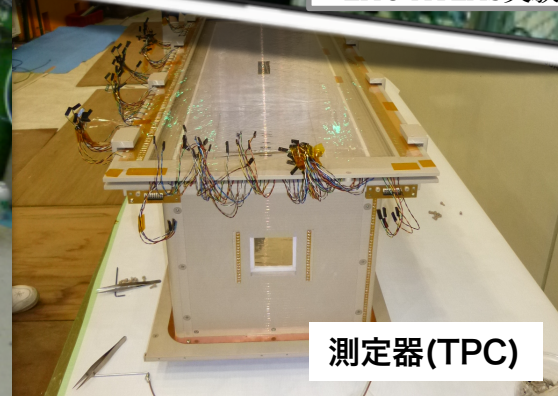
おいで ひでゆき
生出 秀行
卒業生(2013年博士)
CERNフェローを経て
現：INFNジェノヴァ研究員
LHC ATLAS実験に従事



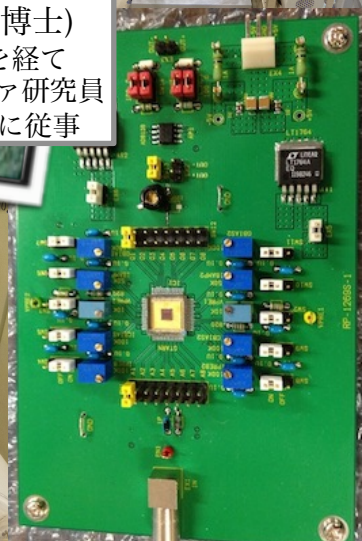
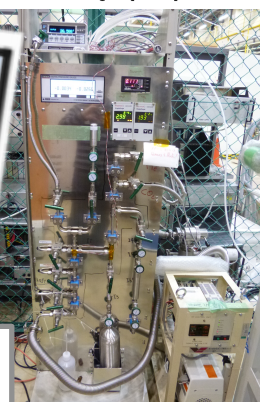
ひがし なお
東 直
博士4年

おとの ひでとし
音野 瑛俊
卒業生(2012年博士)
現：九州大学 助教
LHC ATLAS実験に従事

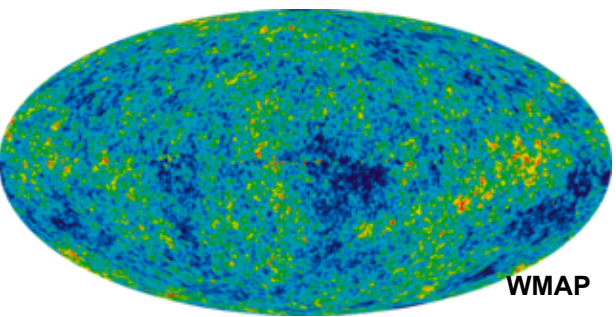
かたやまりょう
片山 領
博士5年



測定器(TPC)



■ 超冷中性子で探る時空の対称性の破れ



宇宙物質密度の精密測定
物質 >> 反物質



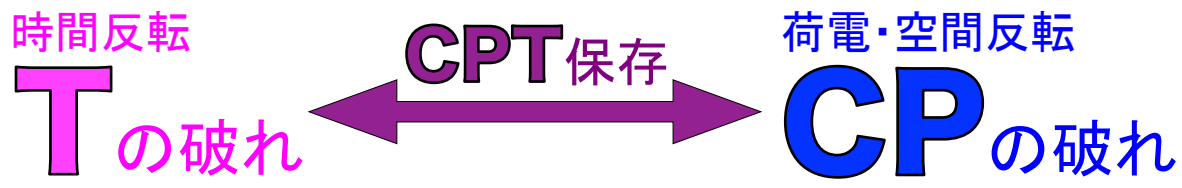
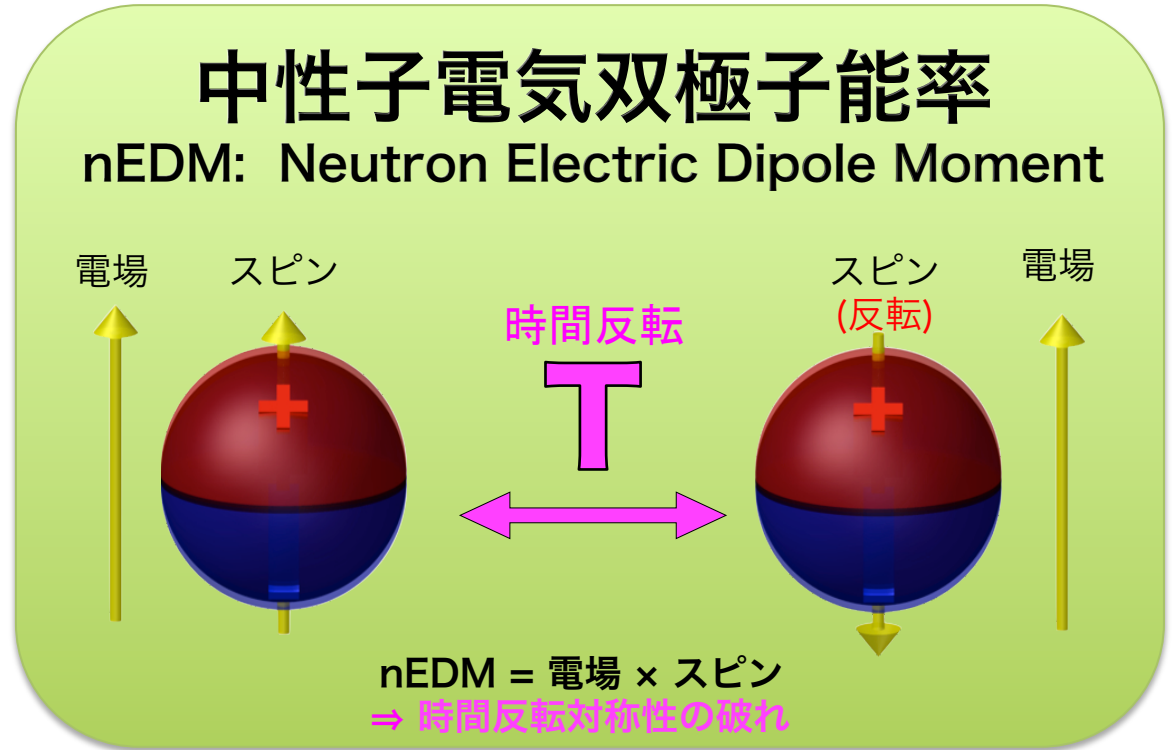
小林・益川理論
[2008年ノーベル物理学賞]
が予測する標準理論の
CP対称性の破れは
物質と反物質の
非対称性
を説明するには**小さすぎる**
ことが分かっている

未知の**CP対称性の破れ**の起源があれば

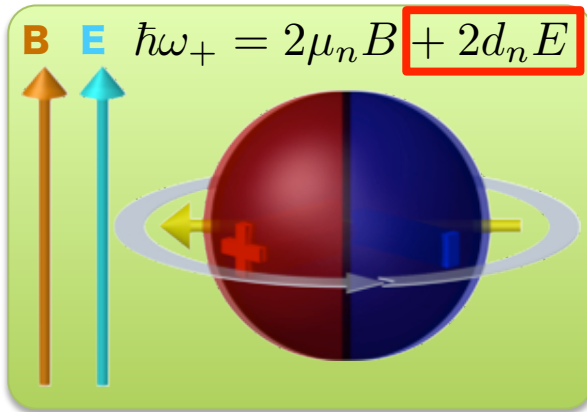
nEDM

の値を大きく変えうる！

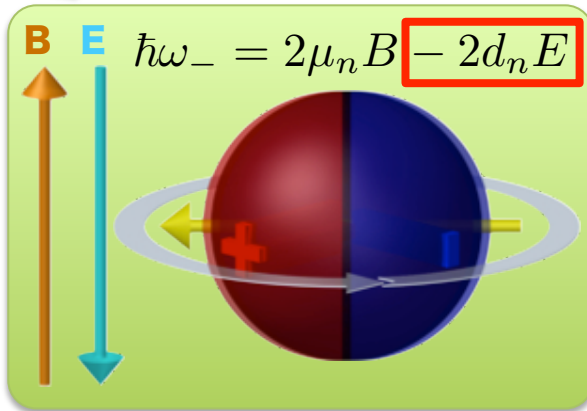
例：超対称性粒子



■ 中性子電気双極子モーメント精密測定

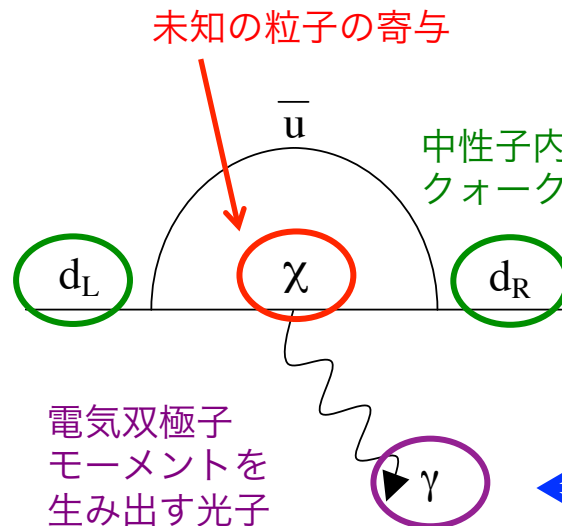


電場と磁場の向きを変えたときの超冷中性子の歳差運動周波数の差から電気双極子モーメントを測定する



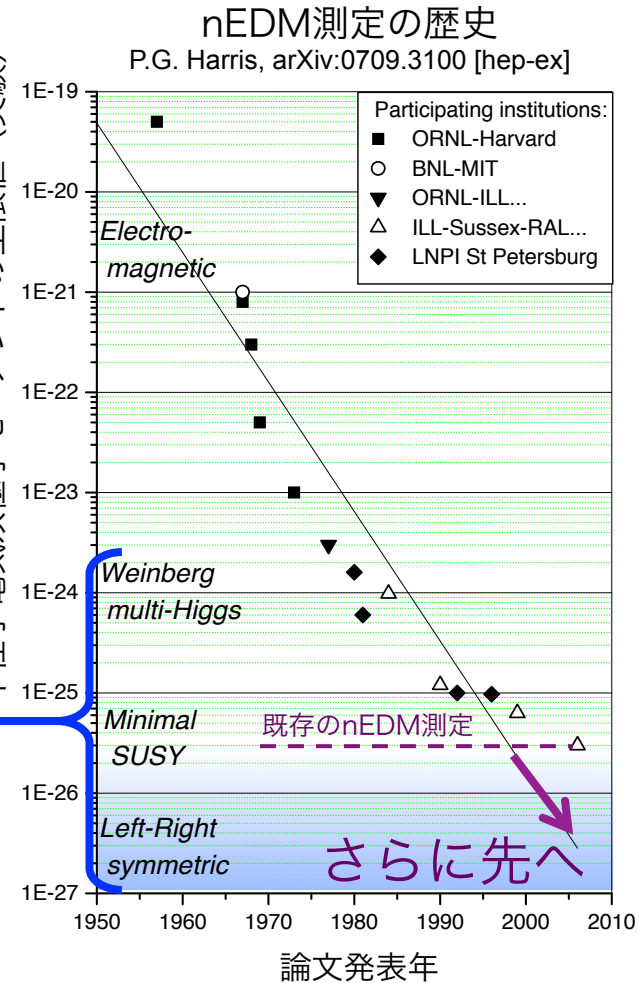
中性子電気双極子モーメント精密測定で
世界最高感度を目指して
未知の物理に迫る

量子効果により現れる 新しい物理の効果



標準模型の寄与も量子効果で現れる (=小さい) ため
新物理に対し高い感度を持つ

中性子電気双極子モーメントの上限値 (実験)



J-PARC中性子ビームをもちいたnEDM精密測定

J-PARCの中性子ビームを
Doppler Shifterで減速→超冷中性子化する

超冷中性子の特徴

- ・ 速度 7 m s^{-1} 以下の遅い中性子
- ・ 容器に貯めることが可能
- ・ 重力に敏感(到達高さ $\sim 2.5 \text{ m}$)
- ・ 磁場に敏感(全反射 $\sim 5 \text{ T}$)
- ・ 貯蔵により精度の良い測定が可能



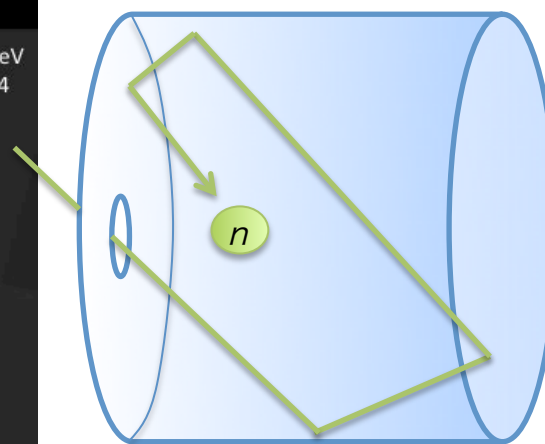
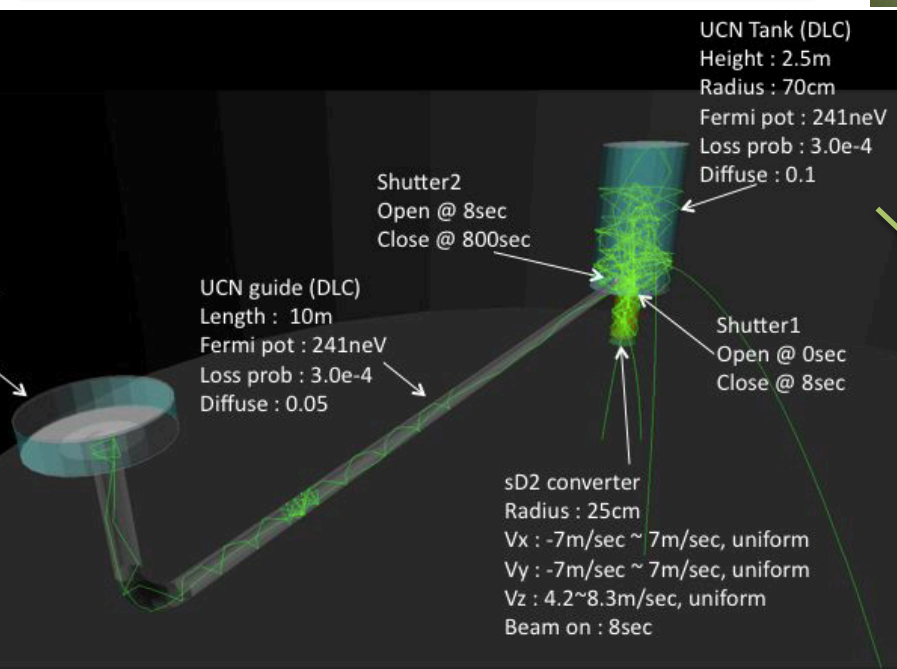
超冷中性子を貯蔵して歳差運動を測定



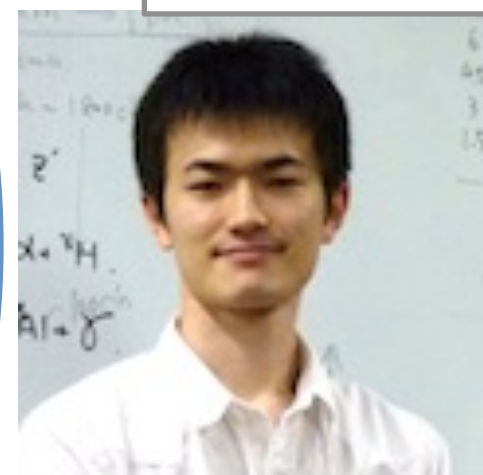
中性子を減速させる
Doppler Shifter



みしま けんじ
三島 賢二
元：特任助教
現：KEK 特別准教授



現在、中性子貯蔵容器の開発および
nEDM測定のための準備実験が進行中

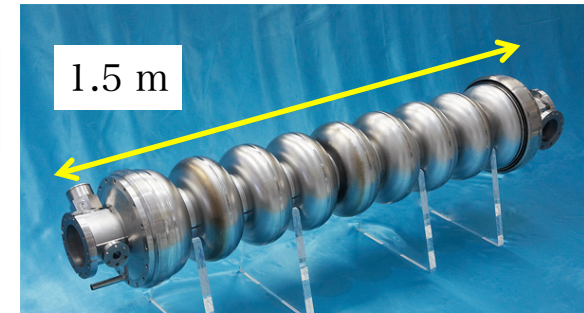


かたやま りょう
片山 領
博士5年

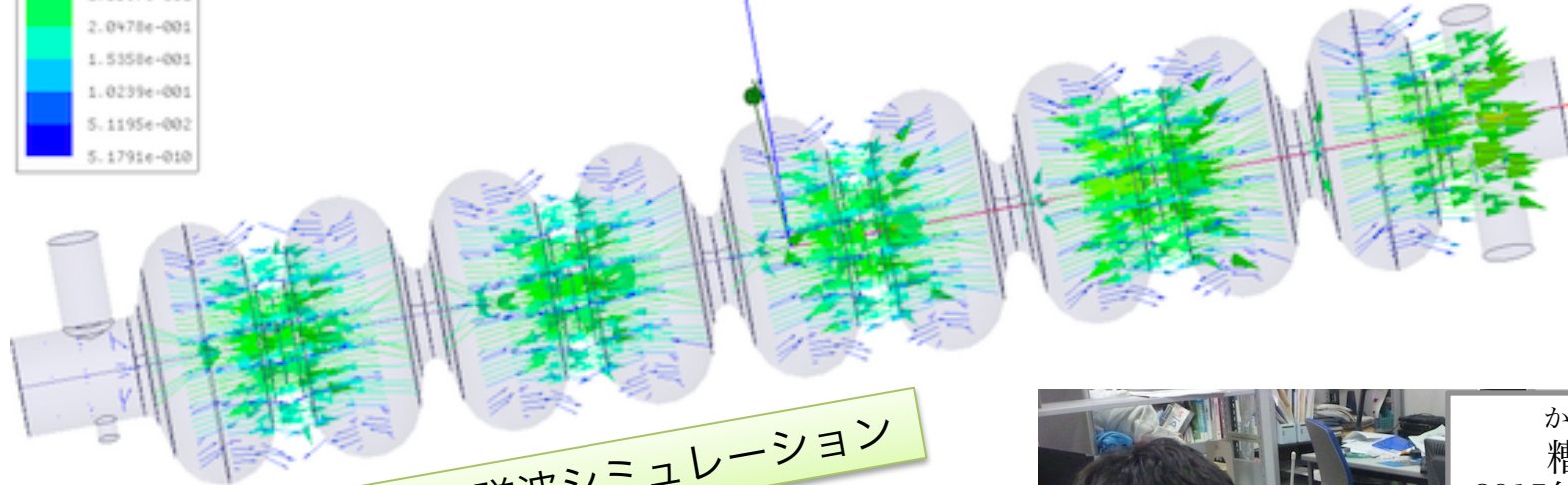
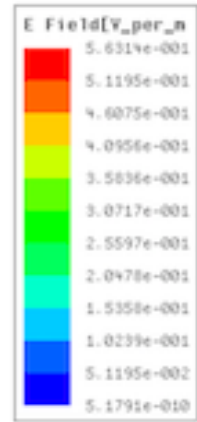
■ 先端加速器開発～ILC用超伝導加速空洞～

空洞内に電磁波を蓄え、電子を加速
未知のエネルギー領域に挑む

- 電場の波に電子をうまく乗せて大きな加速勾配(35MV/m)を得る。
- 超伝導のため消費電力が小さい。



超電導加速空洞(約16,000台使用)



加速空洞の電磁波シミュレーション

ILCで約16,000台並べる加速空洞の中心軸を
高精度で揃えるための手法を研究開発中。



かすや けんと
糟谷 健登
2015年 修士課程卒業
現：NTTデータ

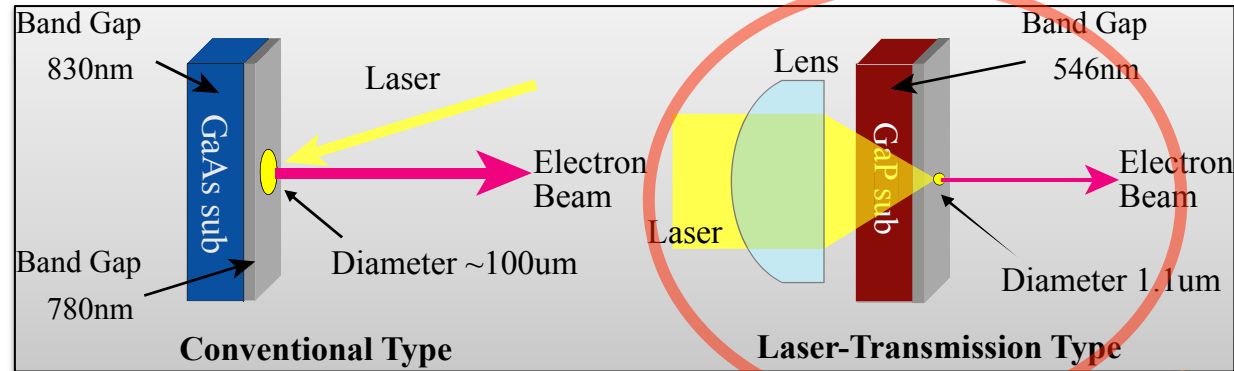
■ 先端加速器開発～超伝導伝導高周波加速電子顕微鏡～

加速器技術を転用し**世界最高電圧**を持つ電子顕微鏡を実現させる研究

様々なメリット

- ・透過力の向上
- ・高時間分解能の獲得
- ・世界最高位置分解能の達成
- ・コンパクト化

現在KEKにて
原理実証実験が進行中

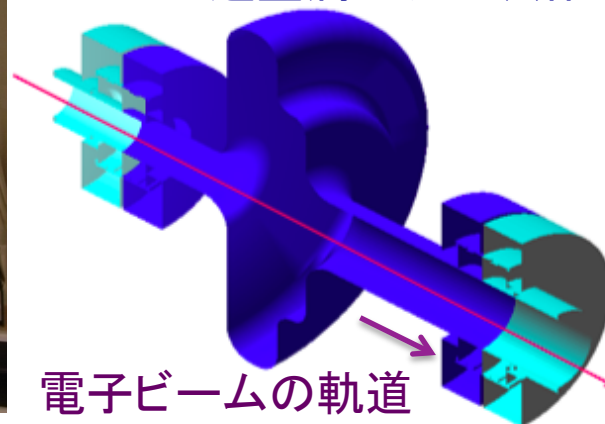


ILC技術の
スピノフ

静電加速の
熱電子銃

光陰極電子銃と
超伝導高周波加速空洞

加速空洞モデル(断面)



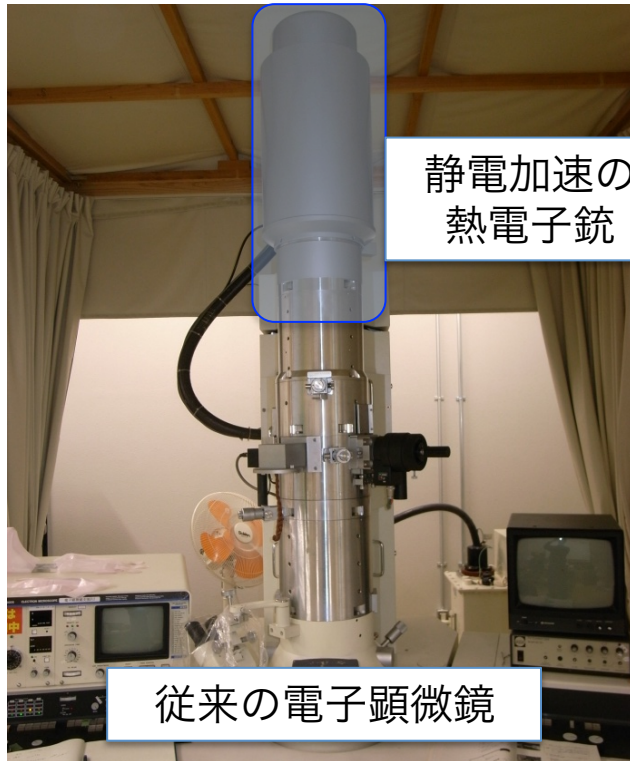
**世界初、2つのモード
を同時に共振させる**

→ エネルギー分散を抑え、
高位置分解能を得る

超伝導を採用

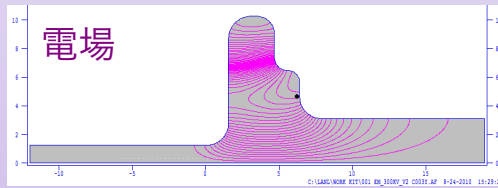
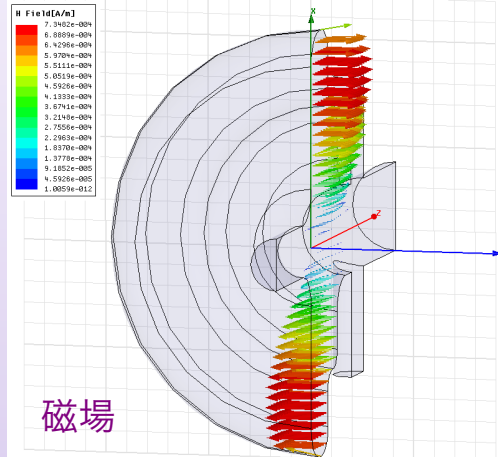
→ 2モードを同時にコントロー
ルすることが可能になる

従来の電子顕微鏡

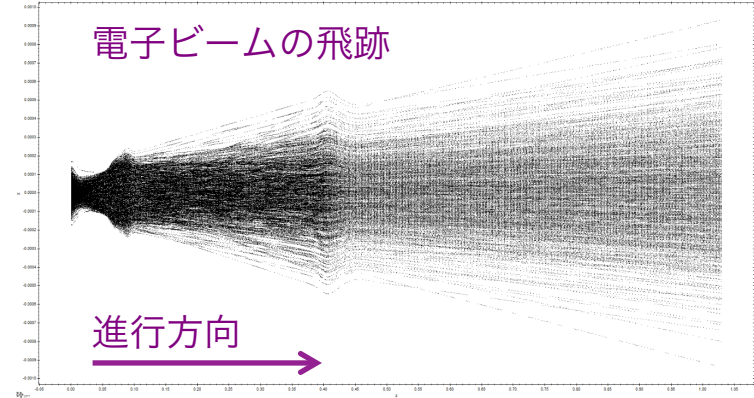
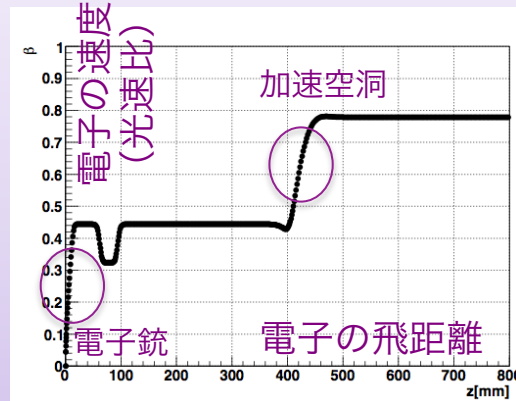


先端加速器開発～超伝導伝導高周波加速電子顕微鏡～

加速空洞設計のための 電磁場シミュレーション



空洞内で加速される 電子ビームのシミュレーション



超伝導加速空洞製作の様子



製作した空洞を液体ヘリウムで4.2ケルビン
まで冷やして超伝導状態での性能評価

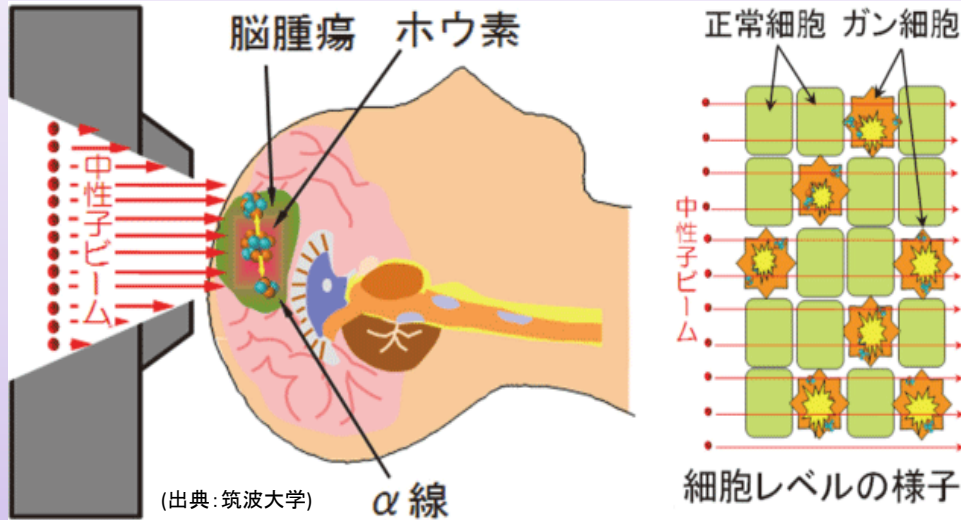
ひがし なお
東 直
博士4年

IPAC国際会議@上海にて

加速器の根幹を成す、ビームダイナミクス、電子銃、
加速空洞などを研究するとともに、新たな応用で社会に貢献する

■ 先端加速器開発 ～BNCT用大強度陽子加速器～

BNCT : 中性子捕捉療法 Boron Neutron Capture Therapy



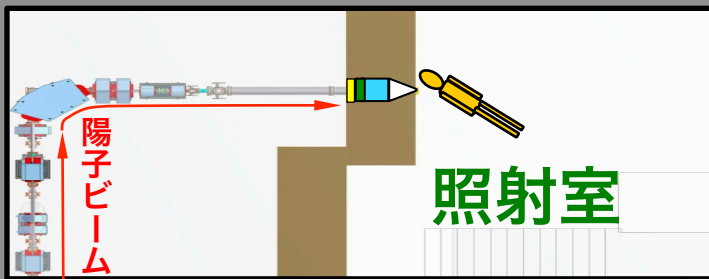
研究目標

- 加速器の小型化 (→医療施設に設置)
- 大強度ビームの実現 (→治療時間短縮)

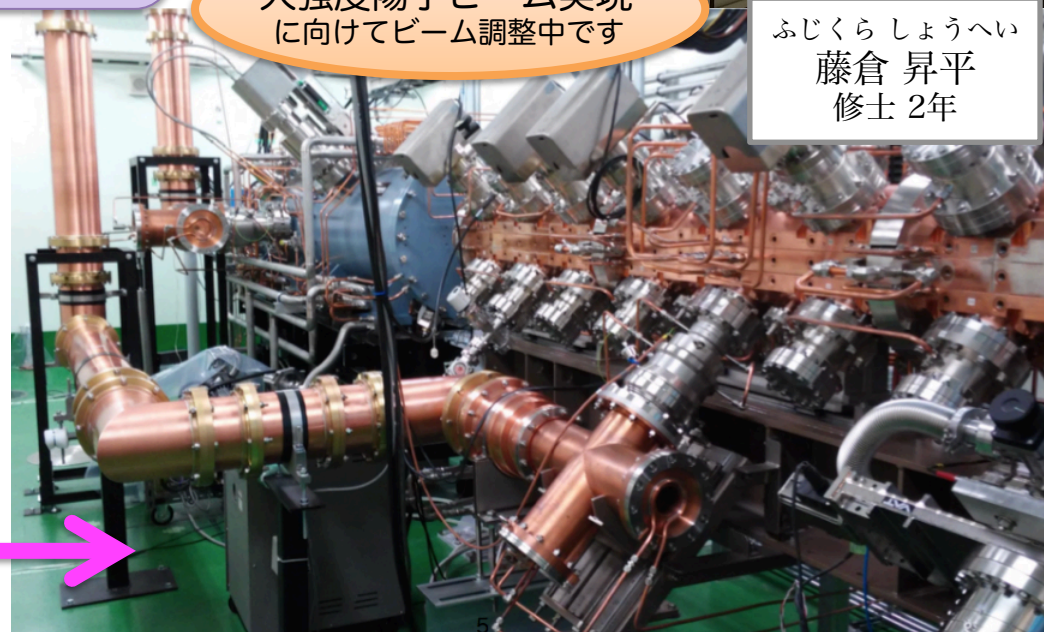


大強度陽子ビーム実現
に向けてビーム調整中です

ふじくら しょうへい
藤倉 昇平
修士 2年



DTL RFQ イオン源
加速器室

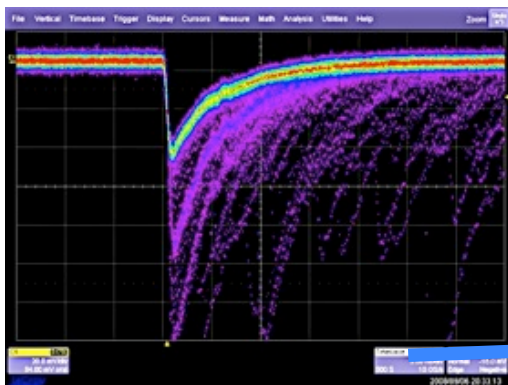


■ 半導体光検出器PPDの開発

Pixelated Photon Detector

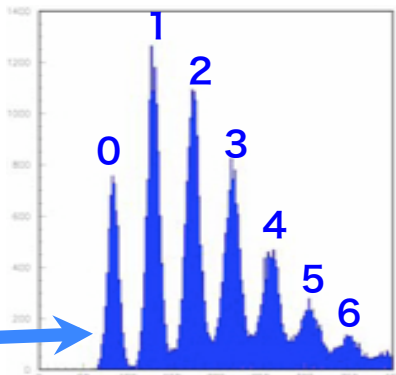
半導体センサーでありながら、
光電子増倍管に匹敵する、新しいタイプの光検出器

- ・ 半導体光検出器
- ・ 超小型、極薄
- ・ ガイガーモードでの駆動
- ・ 1光子検出能力
- ・ 高検出効率 ~80%
- ・ 磁場に対する耐性
- ・ 低い動作電圧(~100V)

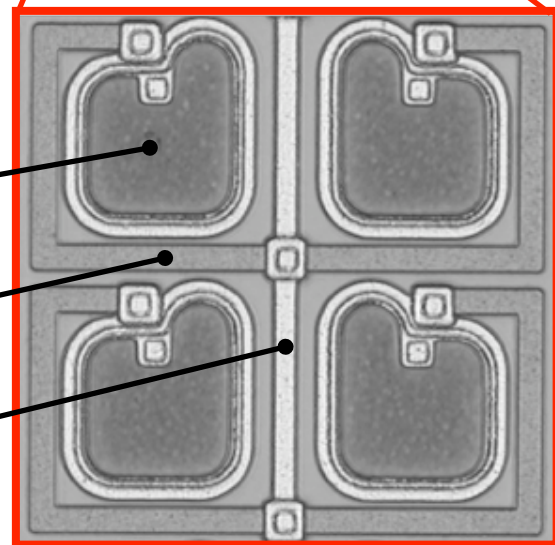
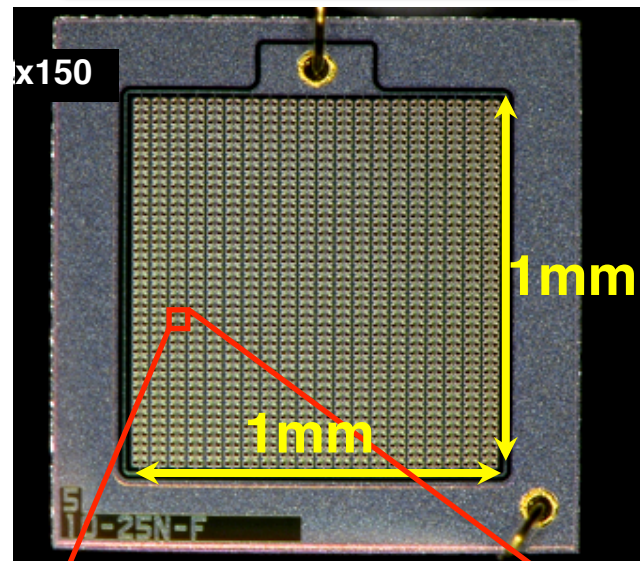


離散化した出力信号

“フォトン・カウンティング”



世界最先端の検出器



山下研・PPD開発研究班



音野 瑛俊
(卒業生)



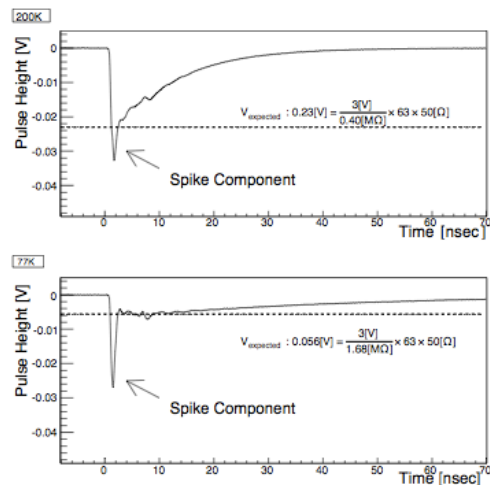
生出 秀行
(卒業生)



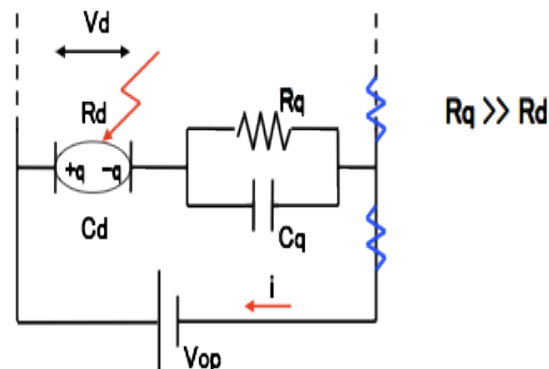
家城 斉 博士2年

半導体基礎物理に立脚した光検出器開発

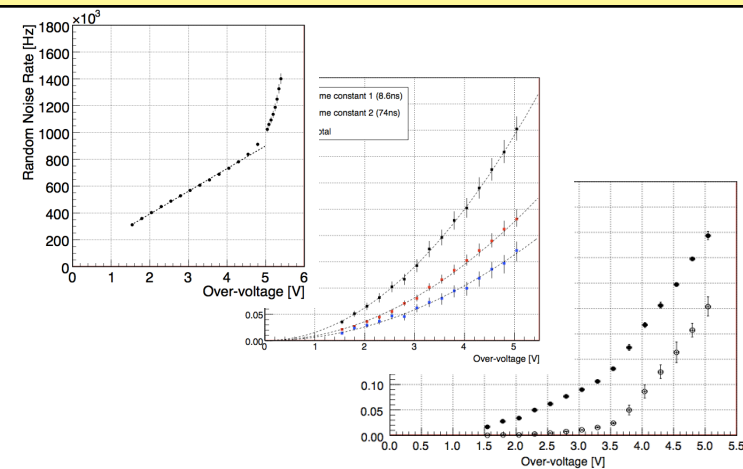
1. 波形のモデル化とそれを応用した新PPDの製造



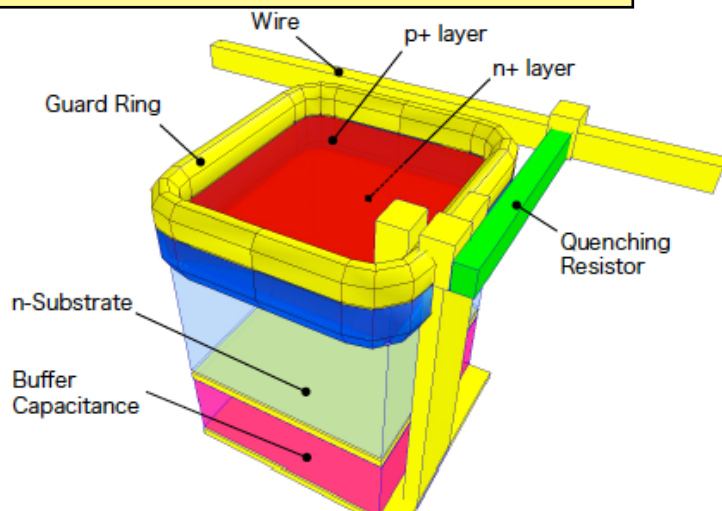
< Equivalent circuit of MPPC by Otono et al. >



2. ノイズの内部物理メカニズムからの理解

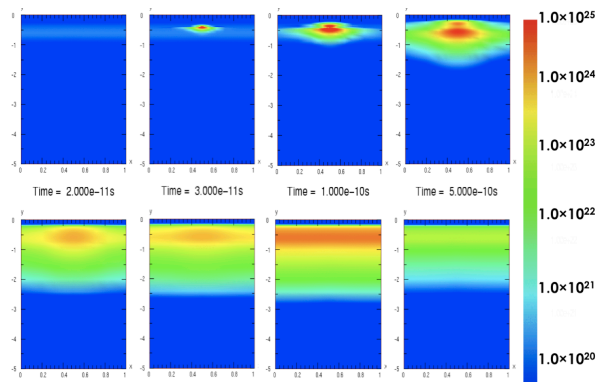


3. 高増倍率・低ノイズを実現する新構造の提案

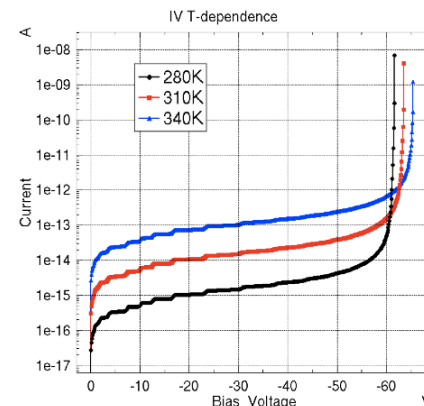


4. TCAD 3次元プロセス・デバイスシミュレータをもちいたPPD内部構造の解明研究

衝突電離過程のシミュレーション

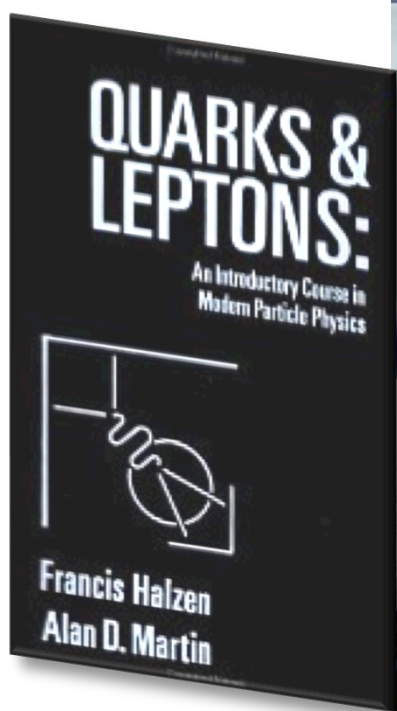


温度依存性

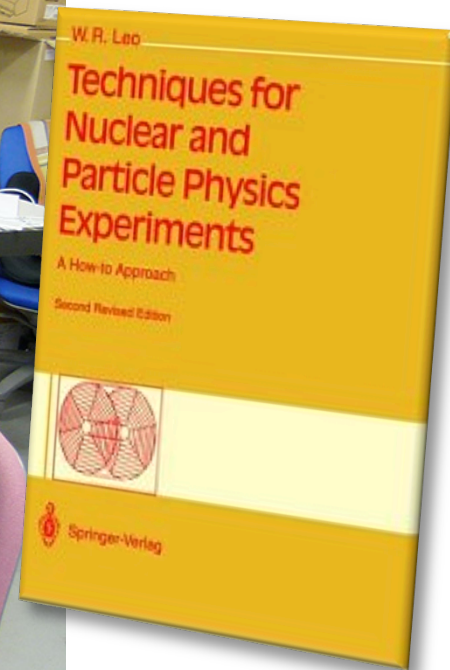


次世代の素粒子実験を切り開く究極の光検出器の開発

■ M1から見た山下研



かとう ゆう
加藤 悠
修士 1年



Q M1は何をしていますか？

A. 前期は授業メインですが、自由な時間があるので**好きな勉強ができます**。また、**MPPC**という光検出器を使った実験や**ILC**のシミュレーションもやっています。

■ 普段の生活は？

授業の後に実験や解析、勉強をやって過ごしています。時には趣味の楽器を吹いて息抜きしたりすることも。

■ 山下研のいいところは？

メンバーの**研究テーマが多彩**なところです。どの研究も興味深いものばかりで、実際にお手伝いなどをしながら様々な知識を吸収することができます。

■ ゼミはしていますか？

他の研究室も含めたM1で素粒子物理の教科書を読むゼミをしています。同期で**気軽に質問や議論ができる**のでとても有意義です。

卒業生の軌跡 (1) ～ATLASミュオン・トリガーを用いた物理～

世界最強の加速器

Large Hadron Collider (LHC)

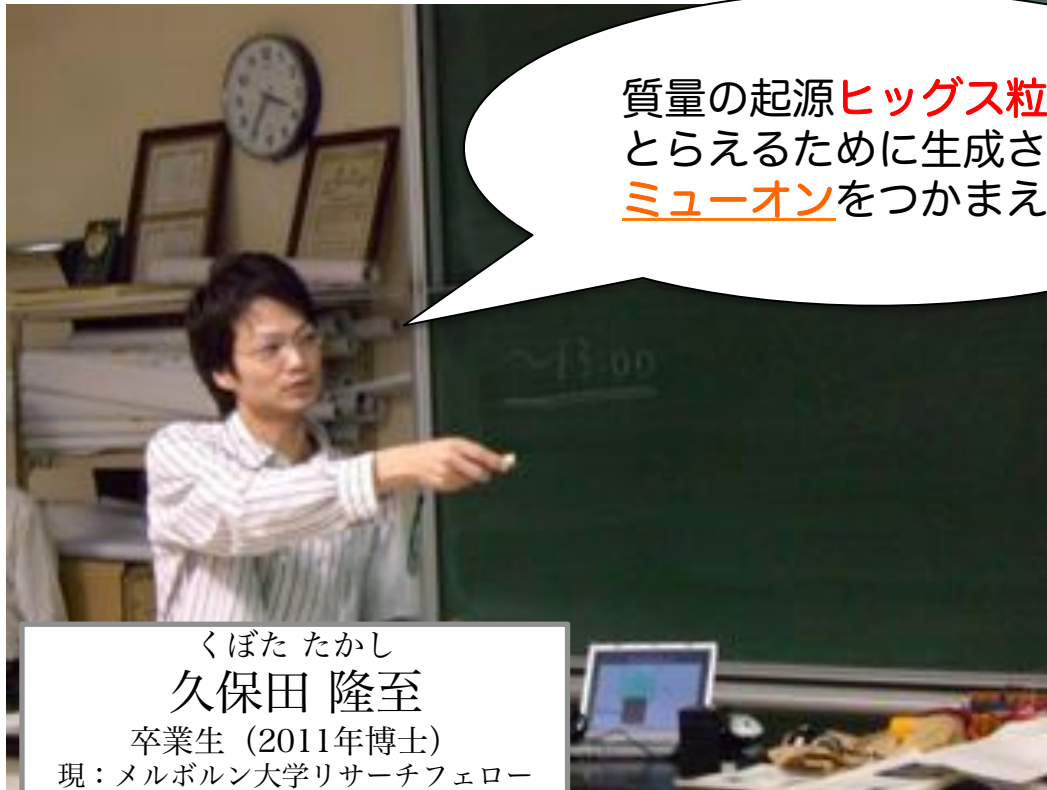
14 TeVの重心系エネルギー

10^{34} のルミノシティ

スイス・ジュネーヴのCERN研究所にて、
2009年11月より衝突実験開始



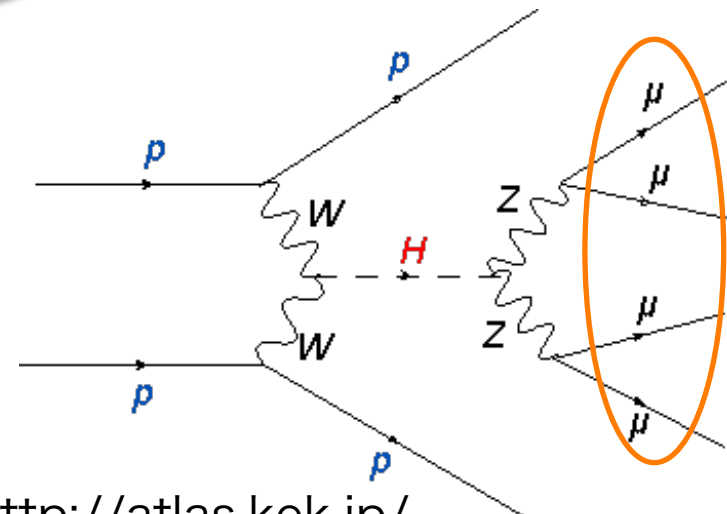
質量の起源**ヒッグス粒子**を
とらえるために生成される
ミュオンをつかまえる！



くぼた たかし
久保田 隆至

卒業生 (2011年博士)

現：メルボルン大学リサーチフェロー
LHC ATLAS実験に従事

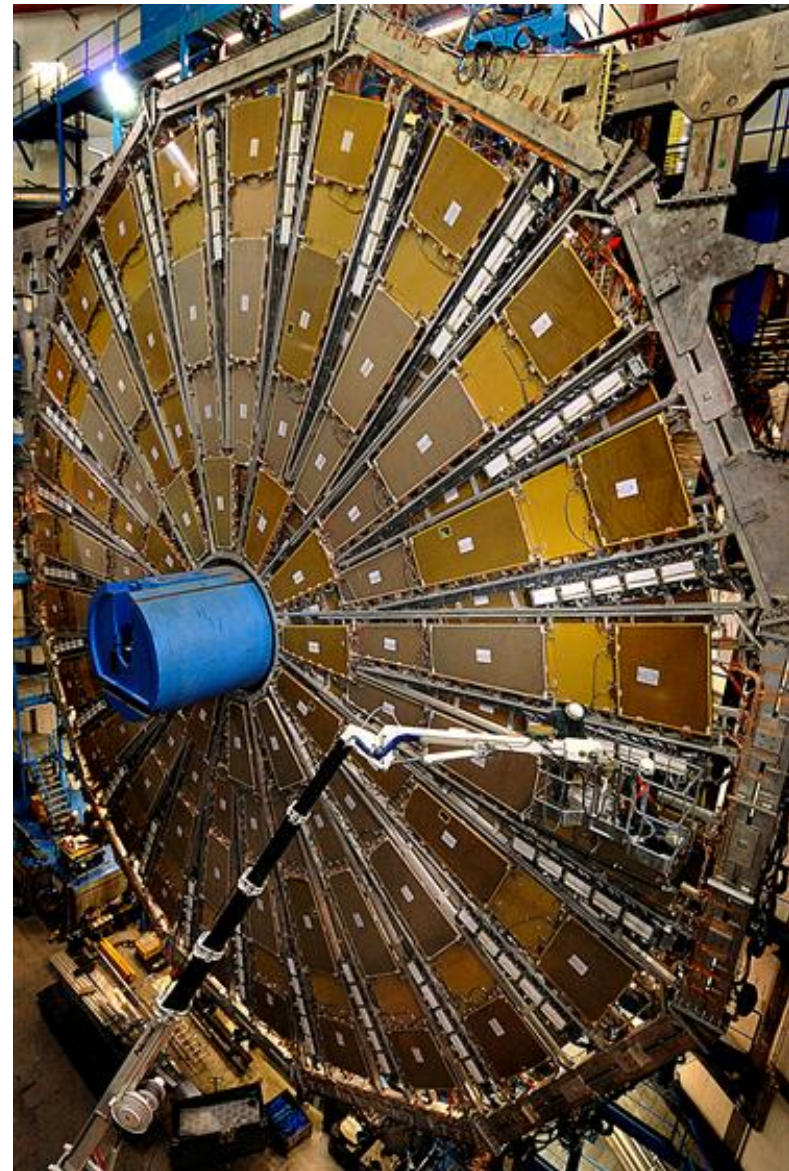
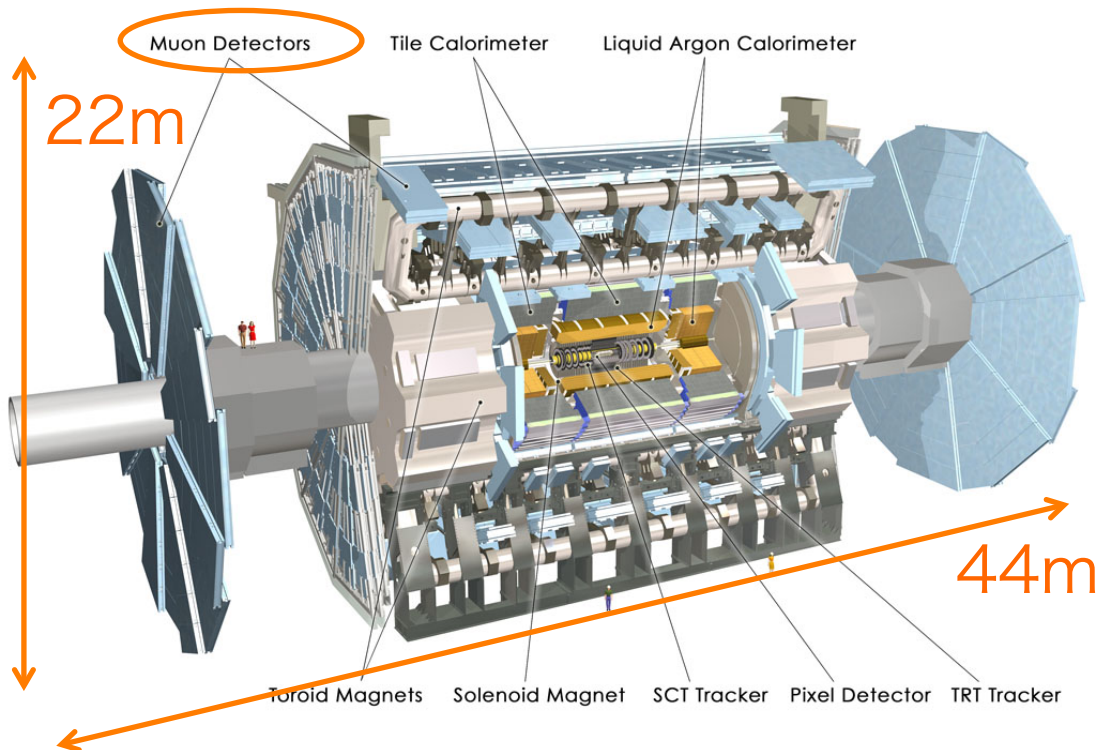


<http://atlas.kek.jp/>

■ ATLASミュオン・トリガー検出器

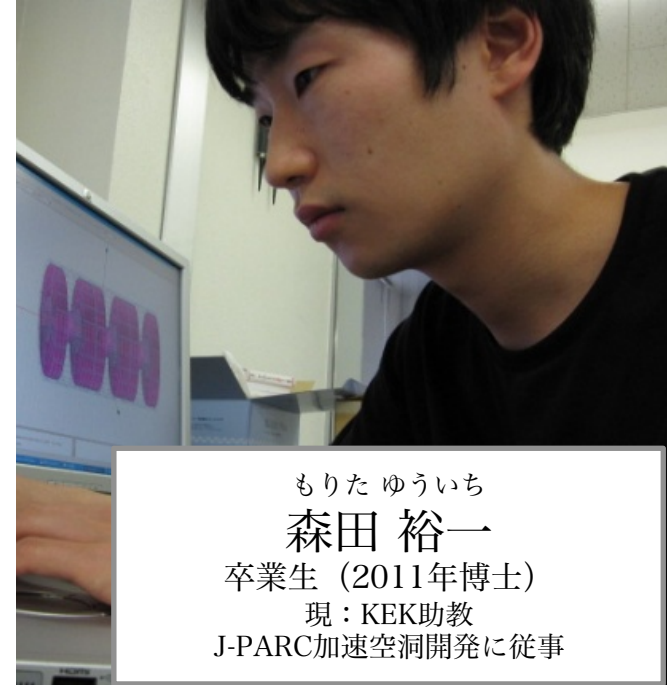
運動量分解能 $\propto 1 / (\text{検出器の大きさ})^2$
- 横幅ビル15階、高さビル8階に相当

25ナノ秒の時間分解能を持つ
- 衝突の頻度を増やすことで効率的に実験ができる



■ 卒業生の軌跡 (2) ～J-PARC加速空洞の開発～

Japan Proton Accelerator Research Complex @ 茨城県東海村
陽子ビームを加速して実験に利用する施設



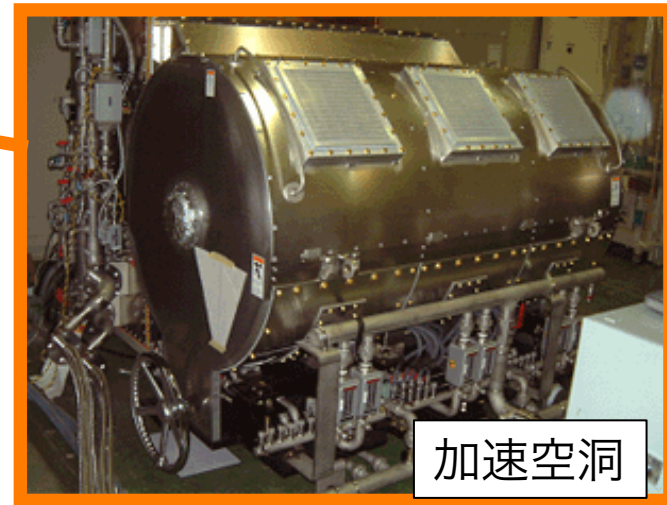
3 GeV シンクロトロンに加速空洞が11台設置されている

J-PARCの三大問題のひとつを解決しました!

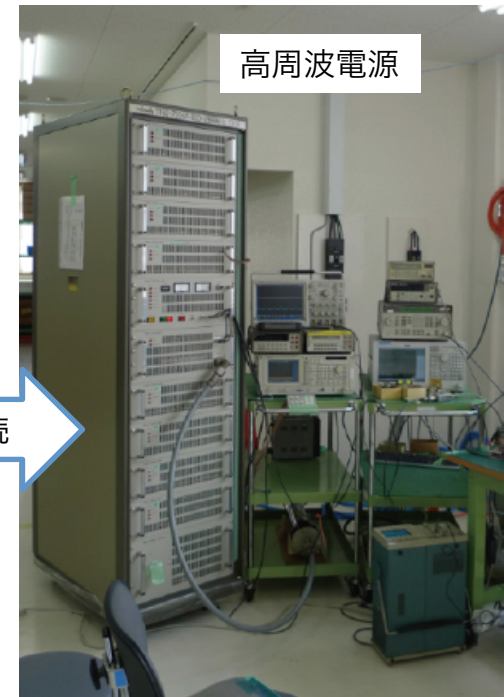
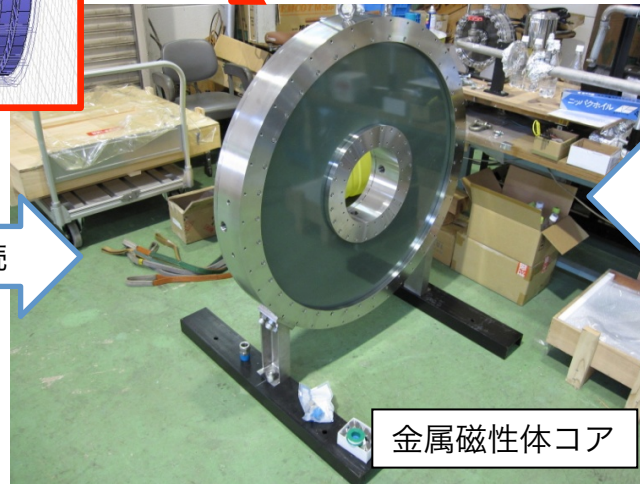
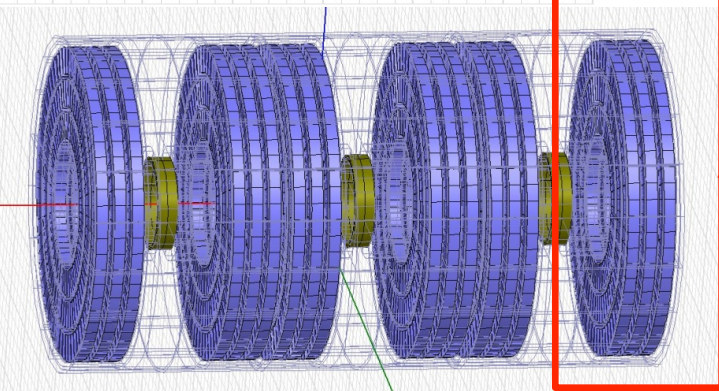
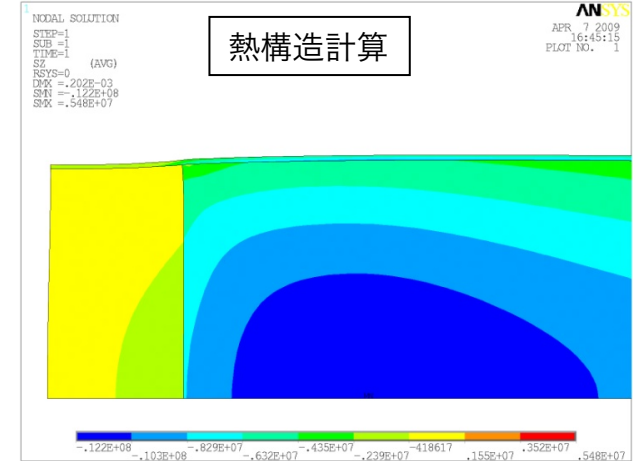
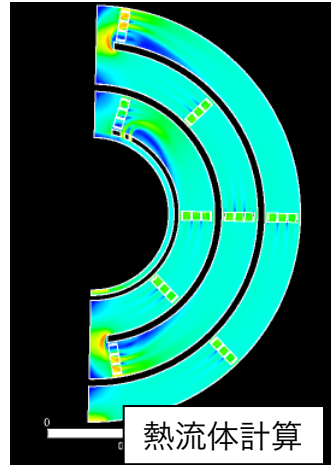
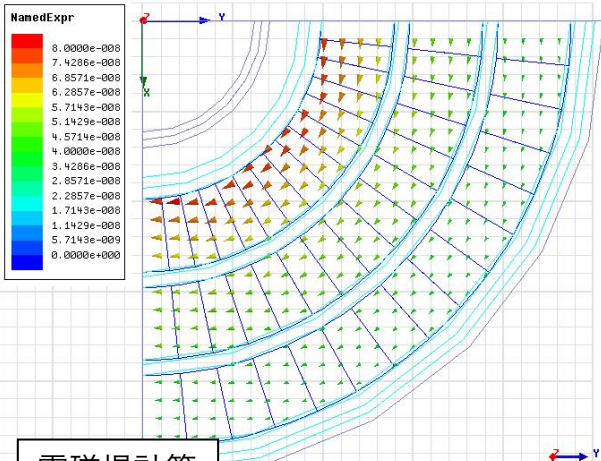
「磁性体コアの腐食・座屈問題」の原因を**実験と数値計算をもちいて特定**
解決方法を提案し導入された

現在ビーム増強に向けて**新しい加速空洞を開発中**

<http://j-parc.jp/Acc/ja/acc.html>



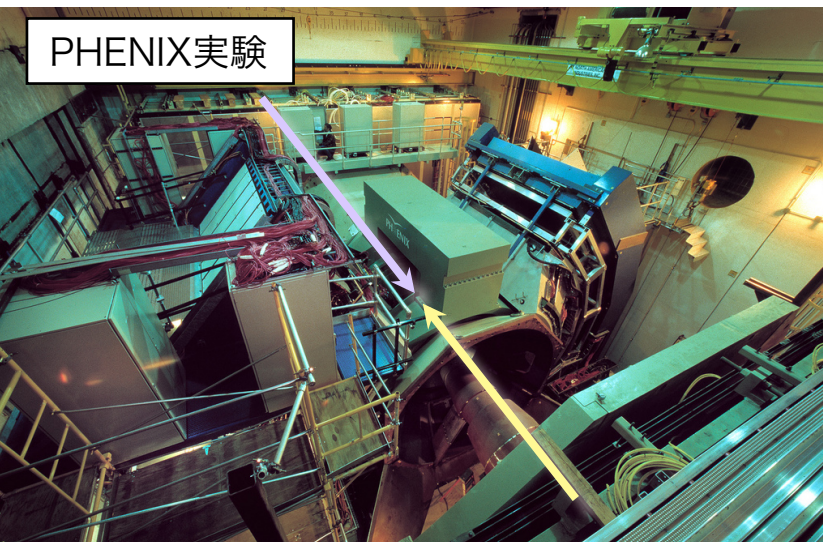
J-PARC加速空洞・試験機の設計・製作



卒業生の軌跡 (3) 偏極陽子衝突による陽子内部構造究明

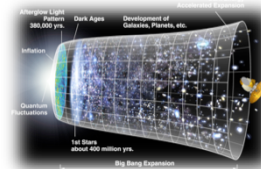


RHIC加速器 (米国ブルックヘヴン研究所)

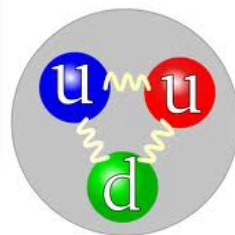


重イオン衝突実験

- ・クォークとグルーオンのプラズマの研究
- ビッグバン直後の宇宙を再現 (LHC ALICE実験でも行われている)

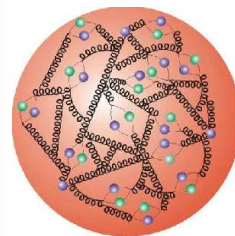


世界最高エネルギーでの 『偏極』陽子衝突実験 ～陽子スピン起源の解明～



陽子を構成する3つのクォークだけでは陽子スピンを説明することができないことが実験的に分かっている

謎の陽子です

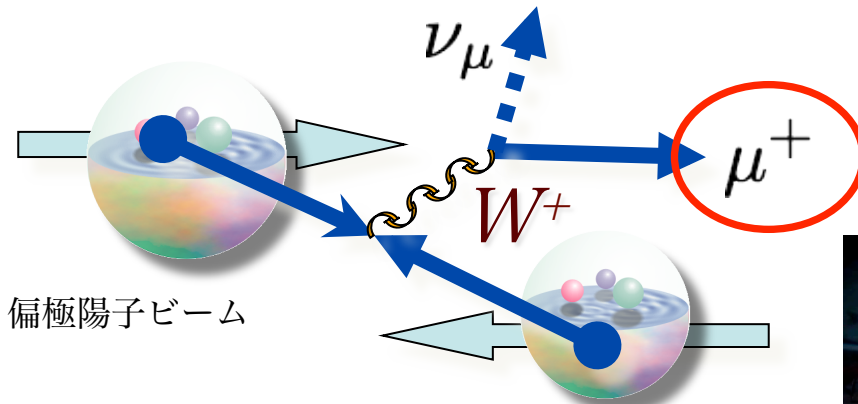


不確定性原理により湧いては消える
グルーオンや、そのグルーオンから一瞬だけ
対生成するクォーク (海クォーク) が
陽子スピンの一部を担っていると考えられる
→ 陽子の構造を決める実験

偏極陽子衝突による陽子内部構造究明

「海クォークのスピンの寄与はどのくらいあるか？」

※偏極：粒子の集団（ビーム）の中で統計的にスピンの向きに偏りがあること

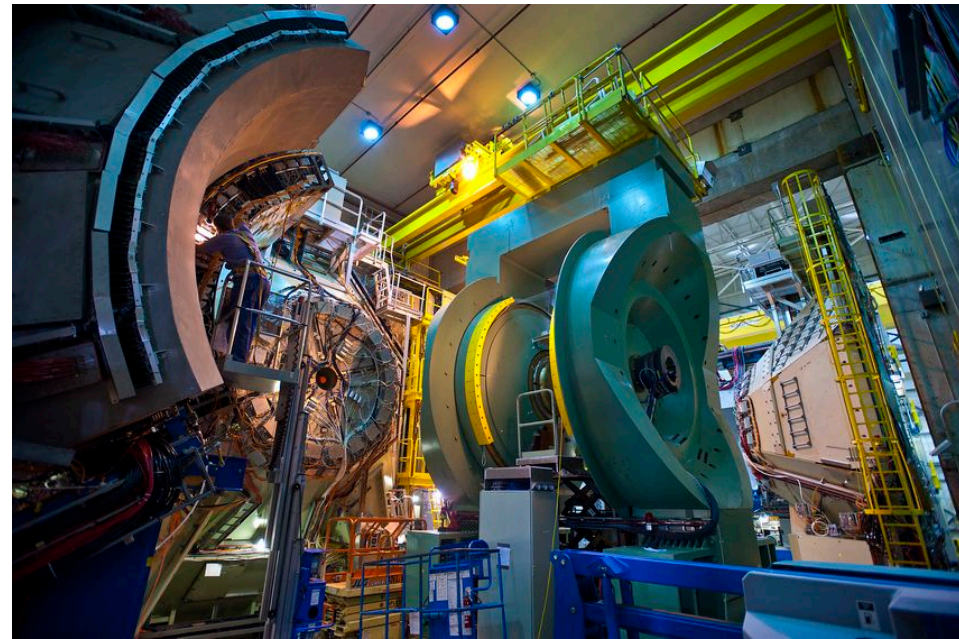


W崩壊からのミュオンを捉える

海クォークを見るためのプローブとしてW粒子を使う
(強い相互作用を見るために弱い相互作用を利用する)

→ 陽子偏極の向きを変えて実験を行うとW粒子の生成個数に差が出る。これを測定することにより陽子の内部構造を探る。

おいで ひでゆき
生出 秀行
卒業生 (2013年博士)
CERNフェローを経て
現：INFNジェノヴァ・研究員
LHC ATLAS実験に従事



PHENIX実験 @ RHIC加速器 (米国)

2009：中心付近での $W \rightarrow e\nu$ イベントの測定

2011：W粒子測定のためのミュオン測定器のアップグレードを完了し、前後方向での $W \rightarrow \mu\nu$ イベントのデータ取得