

CiRfSE 宇宙史国際研究拠点 素粒子構造部門 2016 成果報告

CiRfSEワークショップ
2017年1月24日

筑波大学・数理物質系・物理学域 受川史彦



数理物質融合科学センター

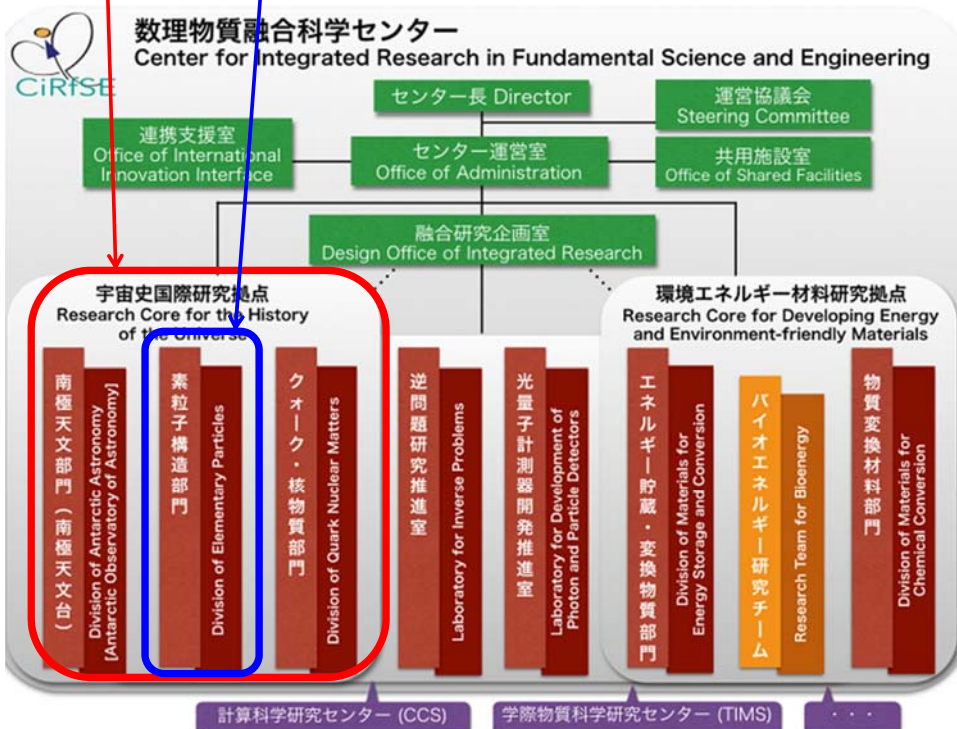
Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba



宇宙史国際研究拠点

素粒子構造部門

数理!



素粒子構造部門の研究・構成員

赤字： 2016年度より

• 陽子陽子衝突実験 ATLAS

欧州 CERN 研究所 LHC 加速器
大規模な国際共同実験
ヒッグス粒子精査, 新物理探索など
HL-LHC に向けたシリコン検出器開発

受川, 原, 佐藤構, 大川(国際TT助教)

池上(KEK, クロスアポイントメント教員, 2016/12 -)

• 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索

ニュートリノ質量の決定, 質量起源・階層性の解明, 宇宙論の検証
筑波大学グループを主とする国際チームによる研究

武内, 金, S. B. Kim (海外教育研究ユニット招致 PI, ソウル国立大, 2016/7 -)

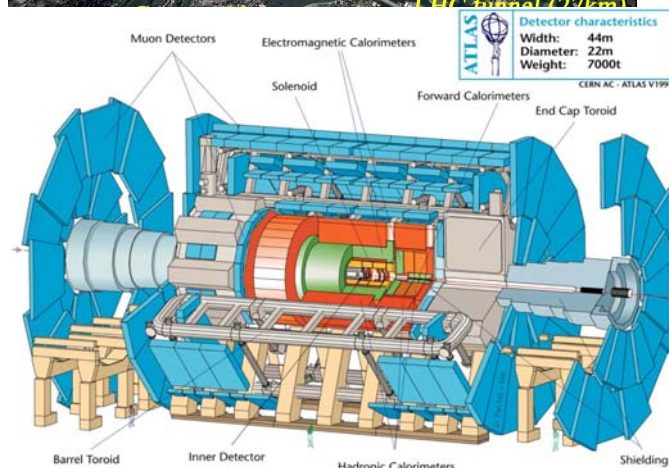
吉田拓生(福井大, クロスアポイントメント教員, 2016/10 -)

• 超弦理論の研究

重力の量子場の理論
4つの力の統一

石橋, 佐藤勇, 伊敷

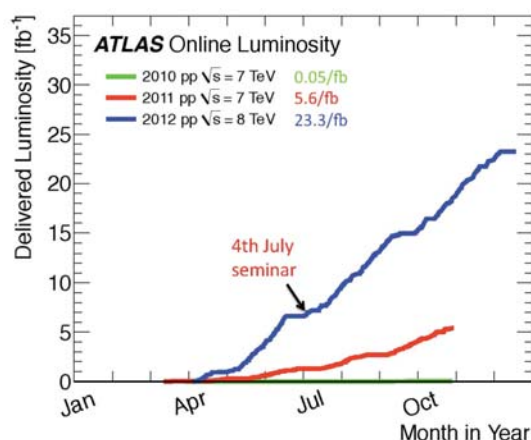
LHC 加速器 と ATLAS 実験



2008年9月に初のビームが周回

2009年11月 実験開始

2011・2012年 本格運転, データ収集



ATLAS 実験

38ヶ国, 176 機関

~3000 人

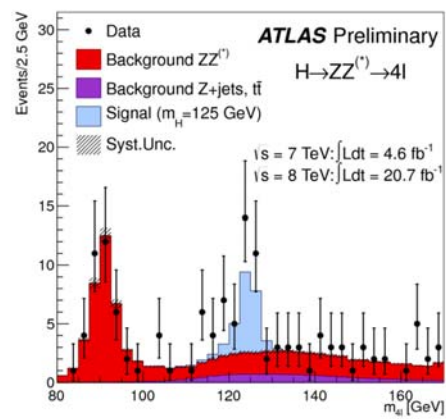
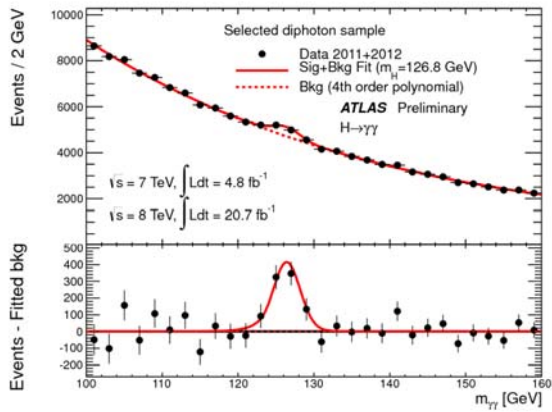
日本: 16 機関, ~110 人

ヒッグス粒子発見

発見チャンネル

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$$



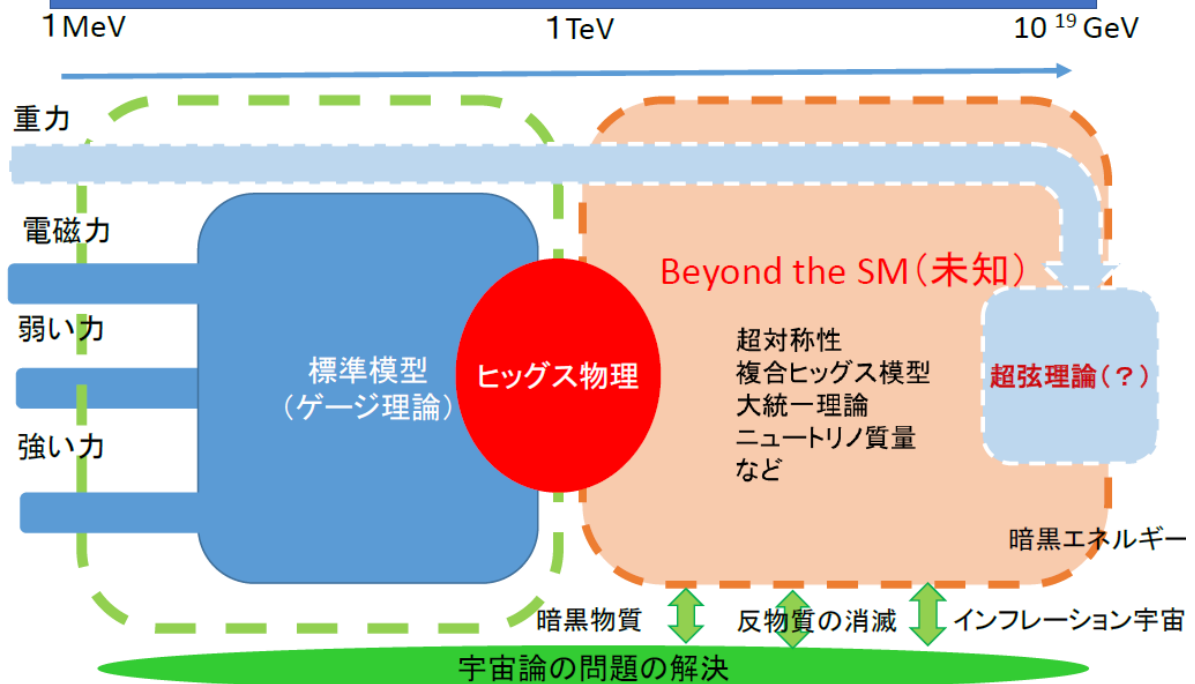
2012年夏: 125 GeV 付近に新粒子を発見

2013年夏: ある種のヒッグス粒子であることが確定

THE STANDARD MODEL						
		Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers	
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson		
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson		
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon		
Leptons						

標準理論の素粒子をすべて実験的に確認

素粒子標準理論は非常にうまくできた理論だが
究極の理論だと思っている人はいない

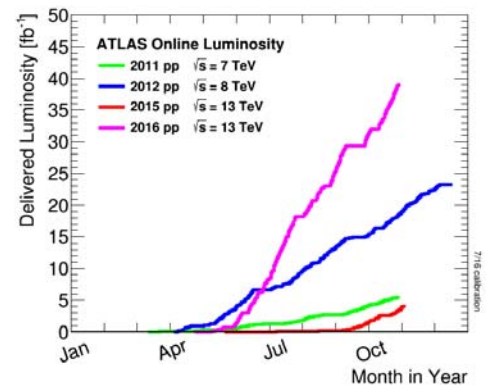


ヒッグスを手掛かりに未知の領域へ

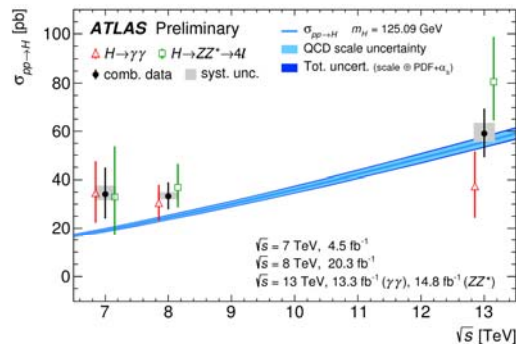
素粒子構造部門 2016

■ LHC-ATLAS 実験 陽子陽子衝突 CERN 研究所

- Run-2実験継続 (2015 -)
- 重心系エネルギー 13 TeV
- 積分輝度 $\sim 45 \text{ fb}^{-1}$
- 瞬間輝度 $1.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



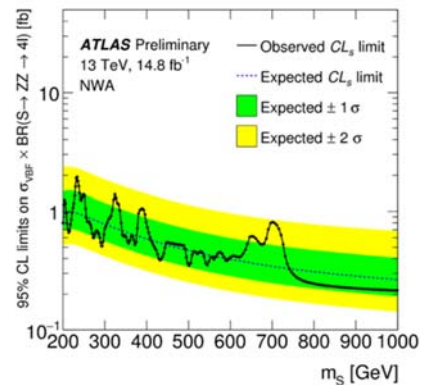
ヒッグス粒子の精査



他に:

- ttH 過程
- $H \rightarrow b\bar{b}$
- 不可視粒子への崩壊や重いヒッグスの探索

新物理の探索 : 新粒子 $\rightarrow ZZ$?



質量 700 GeV/c² 付近に excess?
有意度 2 σ 程度, 要確認

CiRfSE 素粒子構造部門 / 筑波大学 の寄与・成果

ATLAS 実験

- 国際テニュアトラック助教 大川英希 (CERN 研究所 常駐)
ヒッグス粒子の精査・新物理の探索

• 物理解析・博士論文

木内健司 2015年3月修了
 瀧 遼亮 2016年3月修了
 永田和樹 2017年1月修了
 伊藤史哲 近く提出予定
 笠原宏太 2017年3月修了予定
 萩原睦人 D2
 本多俊介 D2

ヒッグス $\rightarrow$ ボトム・クォーク対
 ヒッグス対生成の探索
 荷電ヒッグス粒子探索
 ヒッグス $\rightarrow$ ボトム・クォーク対
 重いヒッグス等の探索
 荷電ヒッグス粒子探索
 ttH

CiRfSE
若手教員

佐藤

大川
佐藤

• 検出器運転

現行 SCT 検出器の運転, データ品質チェック 大川, 伊藤, 萩原, 本多, 原, 佐藤

• 検出器増強

岩渕周平 M2
 佐藤和之 M2
 鈴木淳貴 M1
 和田 冨 B4

ストリップ検出器
 ピクセル検出器
 ピクセル検出器
 LGAD

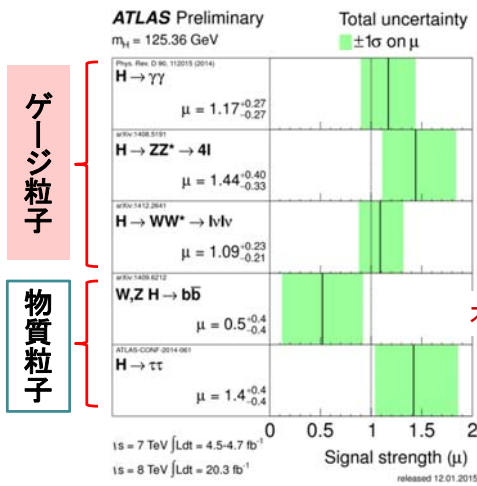
ATLAS 実験 物理論文(査読あり, 公表済み)

2014年 103 篇, 2015年 110 篇, 2016+2017年 124+5 篇

検出器開発

論文 2014年度 2篇, 2015年度 1篇
 国際会議発表 2014年度 2件, 2015年度 1件
 学会発表 2014年度 2件, 2015年度 3件, 2016年度 2件

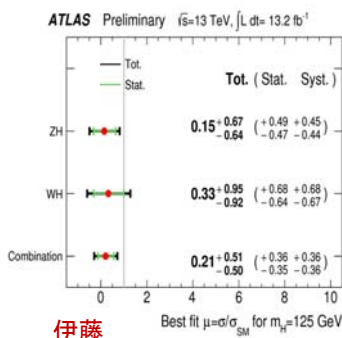
ヒッグス粒子は物質粒子と結合するか？



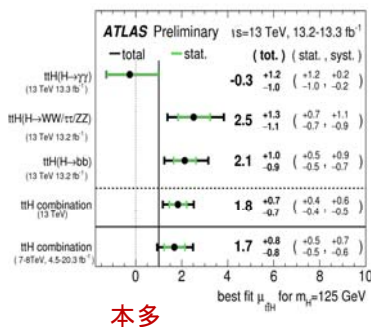
木内 2015/3 修了

埴 2013/3 修了

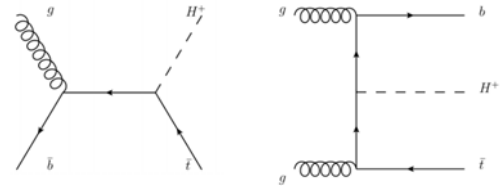
$H \rightarrow b\bar{b} @ 13 \text{ TeV}$



$t\bar{t}HX @ 13 \text{ TeV}$

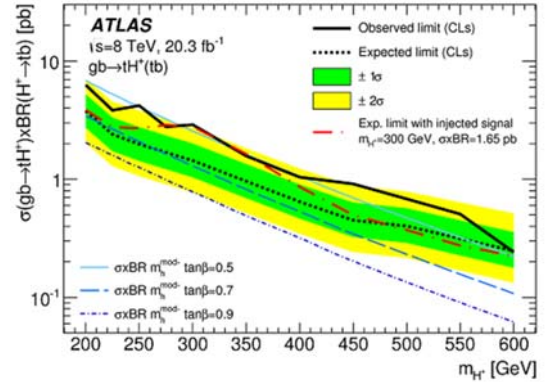


重い荷電ヒッグス粒子の探索



$H^\pm \rightarrow t\bar{b}$ 崩壊を探索

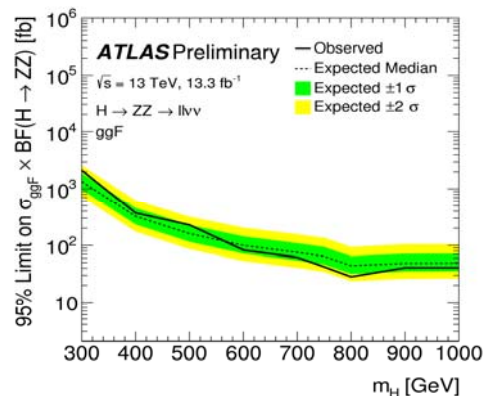
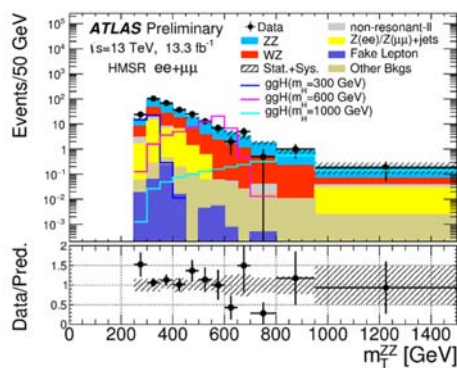
生成断面積上限値を設定



Z ボソン + 消失運動量からなる終状態を用いた新物理探索

重いヒッグス粒子 $\rightarrow ZZ$

生成断面積上限値を設定



笠原 2017/3 修了予定

ATLAS 実験の現在・今後

・ ヒッグス粒子の精査

- さまざまな性質の精密測定
 - 標準理論の予言する粒子？
 - あるいは、似て非なるもの？
 - 自己結合

唯一無二
複数のうちのひとつ？
真空の相転移

・ 標準理論を超える新粒子・新現象の直接探索

- 超対称性？
- 余剰次元？ ブラックホール？
- 暗黒物質粒子？

・ より高い衝突エネルギー

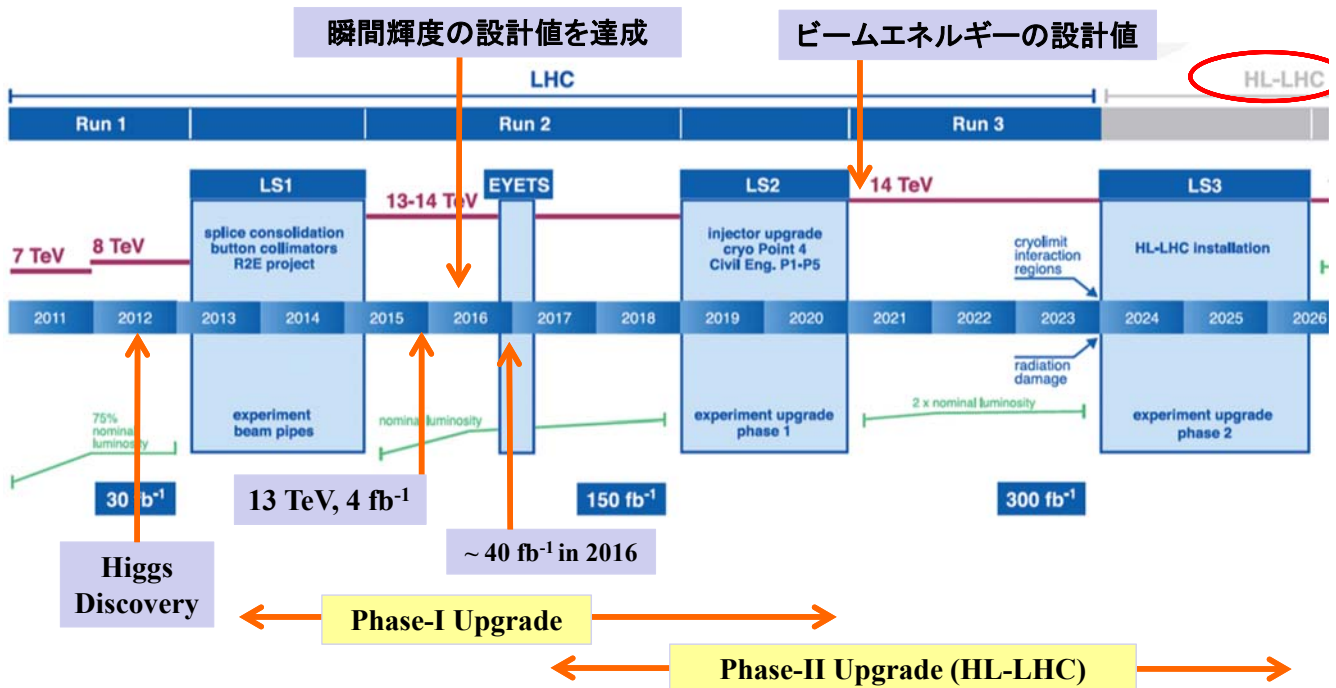
2015年～ 8 TeV → 13/14 TeV

・ 高統計のデータ

2026年～ 加速器増強(HL-LHC) 瞬間輝度 10倍
2030年代 データ量 Run-1 の >100 倍

物理解析： データ量の増大 → 解析手法・計算機環境
検出器増強： 高輝度環境への対応 → 新型シリコン飛跡検出器
拠点・センターを超えた連携（KEKなど）

LHC加速器の長期計画



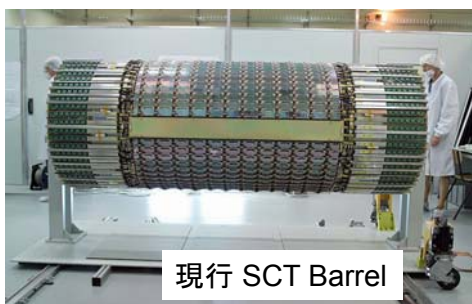
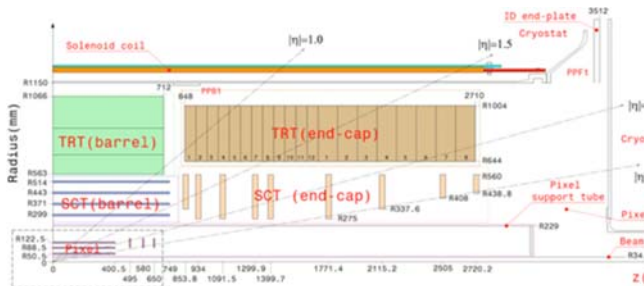
- 2015-2018年に 150 fb⁻¹ (Run 2)
- 2021-2023年に 300 fb⁻¹ (Run 3)
- 2030年代半ばに 3000 fb⁻¹ (実験計画 to be approved)
 - Run1(2011-2012): 25 fb⁻¹ ヒッグス粒子発見: 11 fb⁻¹

ATLAS 実験 内部飛跡検出器 増強 (HL-LHC, ~2026)

加速器の高輝度環境への対応

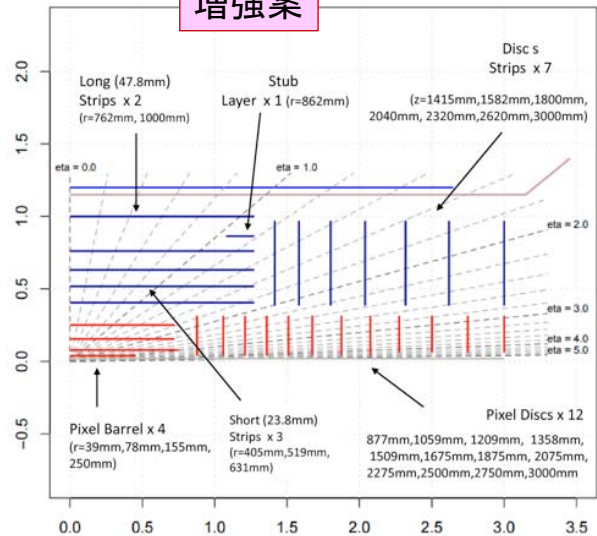
→ 新型シリコン飛跡検出器の開発
高放射線耐性, 細分化

現行の検出器



現行 SCT Barrel

増強案



現行TRT 部分も含めすべて半導体検出器に

- ストリップ検出器
- ピクセル検出器

午後の講演

池上, 岩淵, 佐藤和, 和田, 大川

素粒子構造部門: ニュートリノ研究

ニュートリノ:

例えば, 中性子の β 崩壊において生成される

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

- 物質粒子のひとつ
- 電荷を持たない
- 弱い相互作用のみ行う

長いこと質量が零であると思われてきたが,
2000年前後にニュートリノ振動現象が確立

→ 小さいながら, 零でない質量を持つ
2015年ノーベル物理学賞の対象

- ◆ 他の物質粒子と比べても格段に軽い
なぜ? 特別な理由がある?
- ◆ 質量が零でないことは判ったが, その絶対値は測定されていない

ヒッグス粒子とともに, 素粒子の質量起源の解明のカギを握る

THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

*Yet to be confirmed



Source: AAAS

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

- 素粒子の質量がなぜ11桁以上違うのか？
- 同じ性質の(質量のみ異なる)粒子の繰り返し：なぜ？

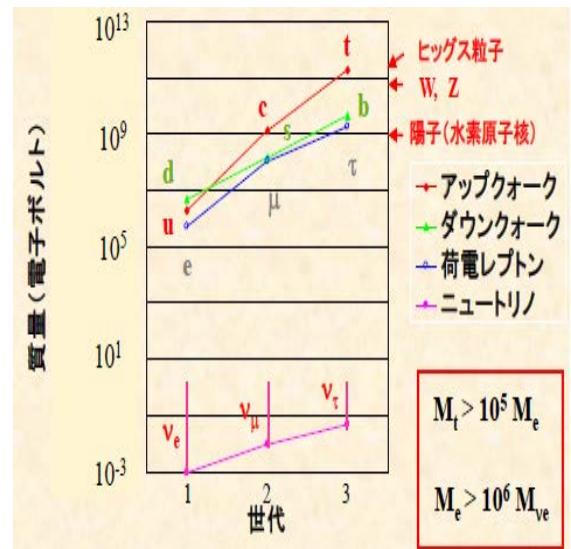
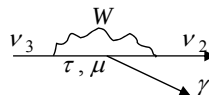
ニュートリノ質量の理解が先決

- まだ測定されていない
- 質量二乗差 Δm^2 はニュートリノ振動実験により既知

本研究：ニュートリノ崩壊を観測し、質量を決定

重いニュートリノ → 軽いニュートリノ + 光子
光子(赤外線領域)のエネルギーを測定
→ ニュートリノ質量の決定

$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$



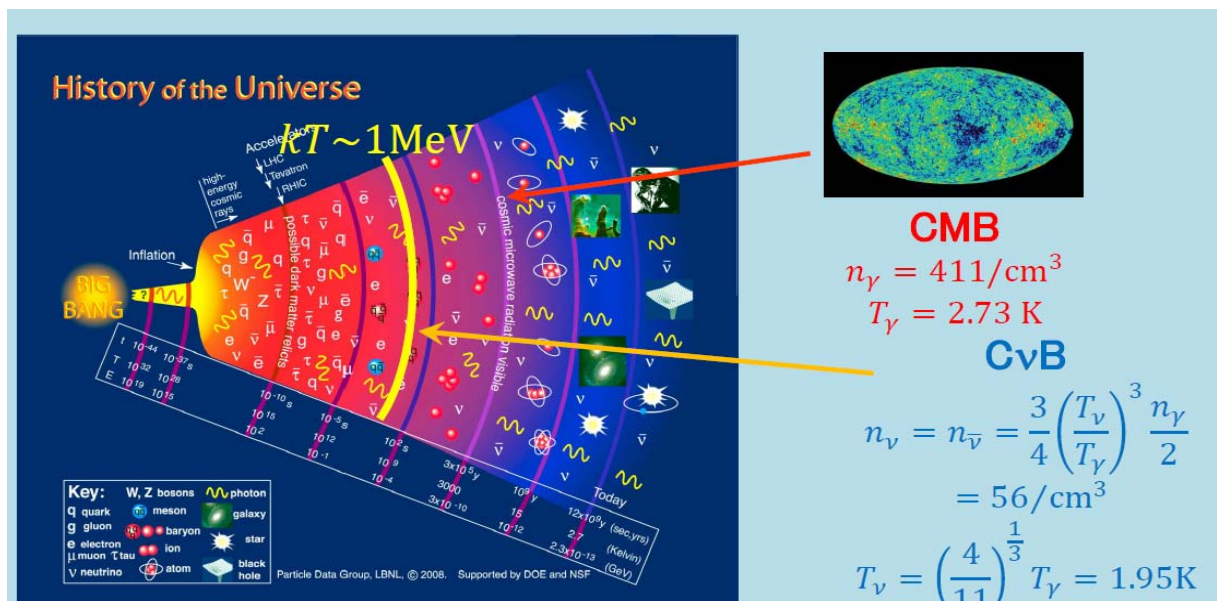
- ニュートリノ：寿命が長く、まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 = 10^{12} 年
探索には大量のニュートリノが必要
加速器で作るのは不十分
宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の解

宇宙論で予言されるが未観測 → その観測は宇宙論検証の意義を持つ

ニュートリノ崩壊発見によるニュートリノ質量の測定
宇宙背景ニュートリノ の発見

それぞれが
極めて重要な成果となる

ビッグバン宇宙論と宇宙背景ニュートリノ (CνB)



- ビッグバン宇宙誕生の数秒後 → 宇宙背景ニュートリノ CνB
- ビッグバン宇宙誕生の30万年後 → 宇宙背景マイクロ波放射 CMB

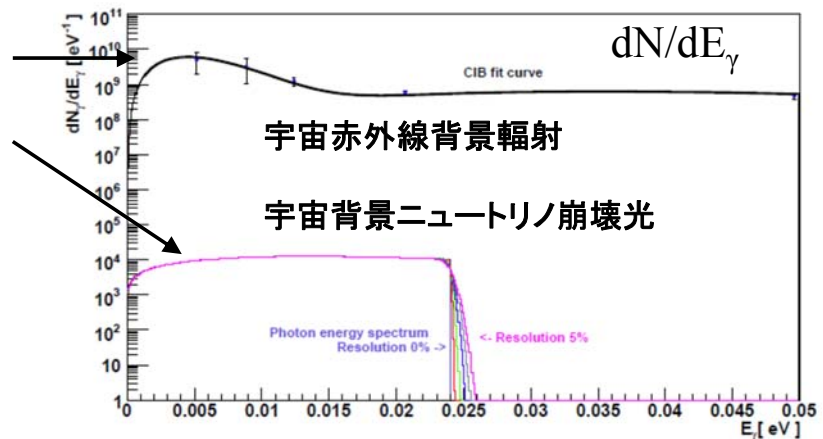
CνB：

宇宙の極初期の情報を持つ → 宇宙起源の理解の重要な鍵
約100個/cm³ と大量に存在 → ニュートリノ崩壊探索のニュートリノ源

ニュートリノ崩壊信号検出の可能性

宇宙赤外線背景輻射 +
ニュートリノ崩壊からくる光子の
エネルギー分布
($E_0=25\text{meV}$, $\tau=1.5 \times 10^{17}\text{年}$)

直径20cm、視野0.1度の望遠鏡
10時間の測定、検出効率100%



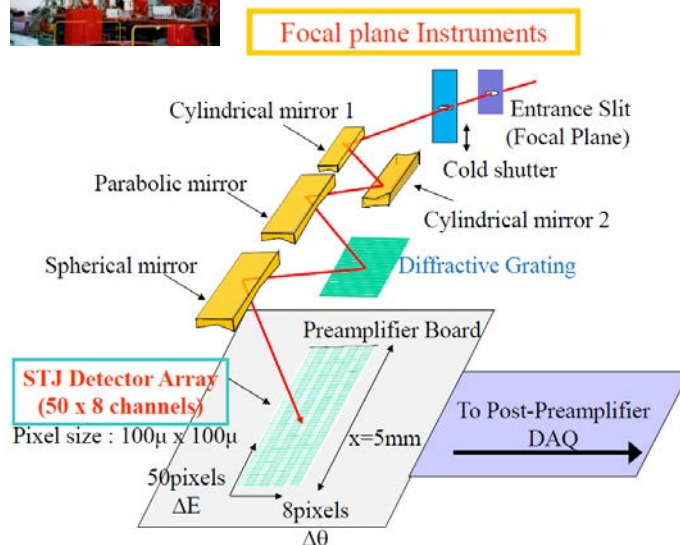
- 2%以下のエネルギー分解能が必要。
- 質量50meV, 寿命 $1.5 \times 10^{17}\text{年}$ (LR対称模型予言)の ν_3 の崩壊は 6.7σ で観測可能。
- 現在の寿命下限 (AKARI) $3 \times 10^{12}\text{年}$
S.H. Kim et al. JPSJ 81 (2012) 024101

2019年に予備実験としてロケット実験を行う。
寿命下限を 10^{14}年 まで上げる。

ニュートリノ崩壊探索ロケット実験

2019年に実験予定。200 km 以上の高度で5分間データ収集
ニュートリノ寿命下限を2ケタ向上 ($\sim 10^{14}\text{年}$)

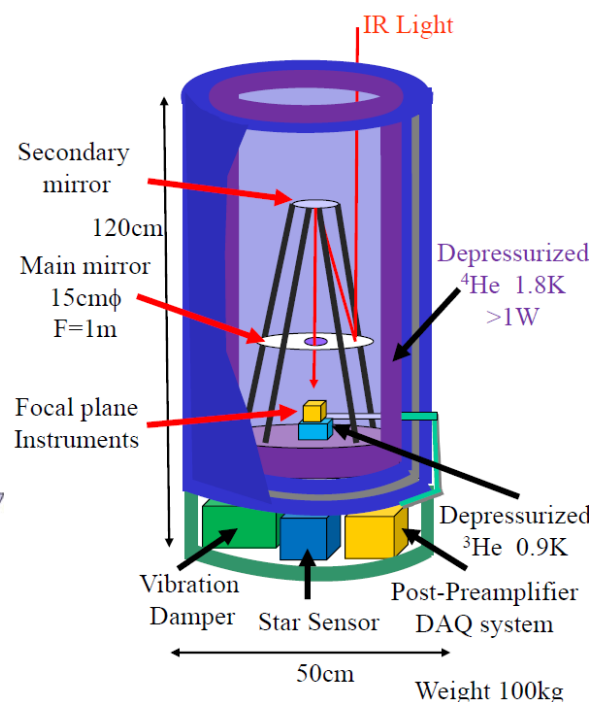
JAXA Rocket CIB Experiment
(Feb 2, 1992)



赤外線検出器部:

超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を用いる

高分解能, 信号微弱



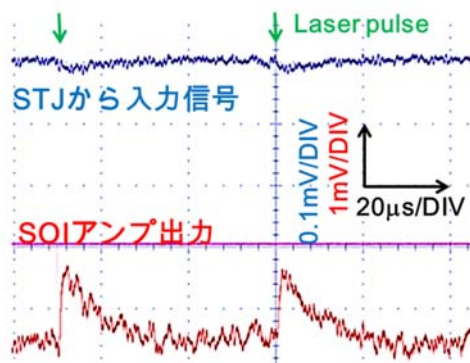
ニュートリノ崩壊探索 2016

■ ニュートリノ崩壊の観測に向けた超伝導接合素子 STJ を用いた光検出器の開発

- 遠赤外線の単一光子測定を目標 (エネルギー分解能 数%)
- STJ 検出器にて原理的に実現可能 → 実証・製作へ (産総研と共同)
- 極低温下の小信号の読み出し(低ノイズ化)が課題 → SOI 技術の導入

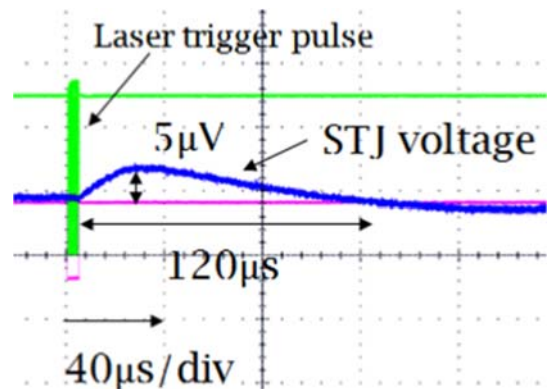
極低温SOIアンプによるNb/Al-STJ 信号の冷凍機内増幅

産総研CRAVITY製20 μ m角Nb/Al-STJの可視光パルス(465nm)に対する応答信号を同じく冷凍機内の極低温SOI増幅回路による読み出しに成功



ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子の開発

ハフニウム酸化層の上に薄いアルミニウム層を用い, 従来のHf-STJよりリーク電流密度を約1/16に低減に成功. このサンプルで可視光パルス(465nm)応答を確認.



ニュートリノ崩壊探索 研究成果

論文

- "Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search",
Y. Takeuchi et al., I2MTC, 2015 IEEE International, 551-555 (2015).
- "Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors",
K. Kiuchi et al., Proceedings of International Workshop on SOI Pixel Detector, arXiv:1507.07424.
- "Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search",
Y. Takeuchi et al., PoS(TIPP2014)155.
- "Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino",
K. Kasahara et al., PoS(TIPP2014)074.

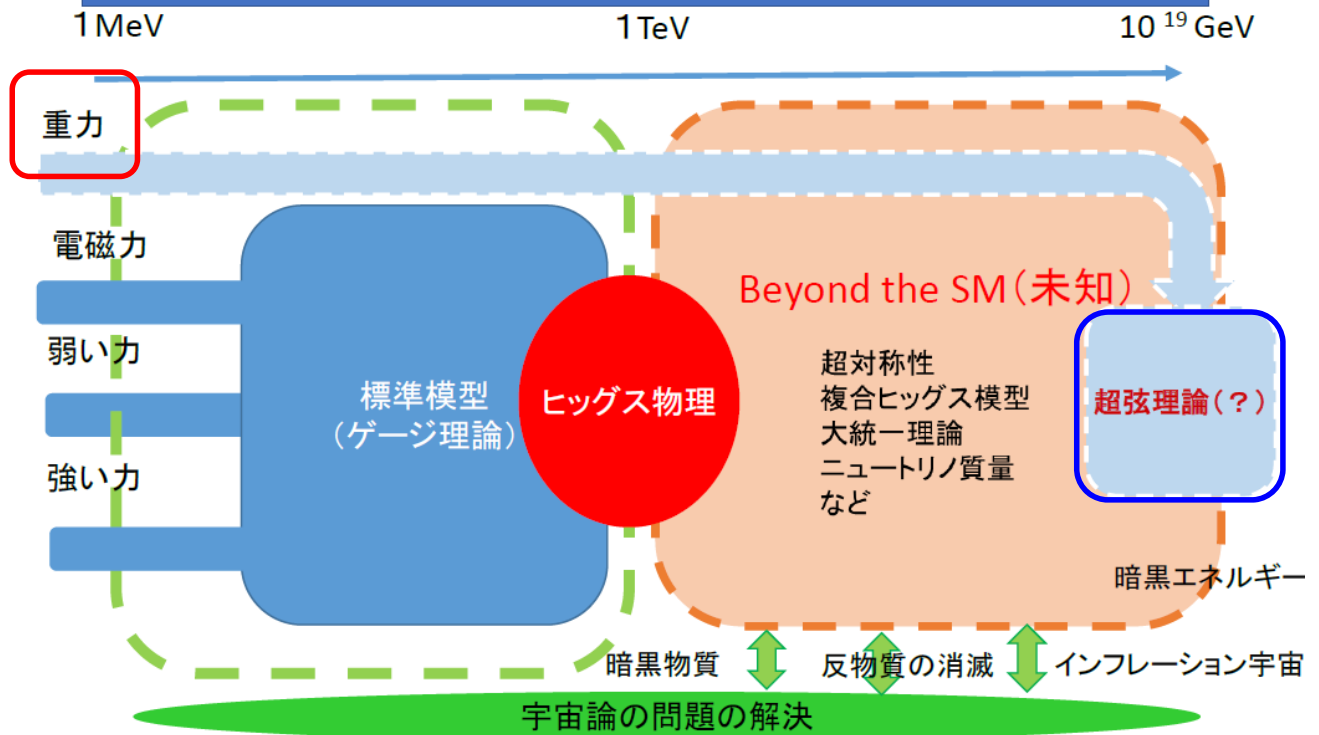
国際会議発表

- "Development of Superconducting Tunnel Junction Detector and Cold Amplifier for COBAND experiment",
K. Takemasa et al., IWSSD2016, International Workshop on Superconducting Sensors & Detectors, Tsukuba, Japan, Nov 14-16, 2016
- "Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers",
K. Kiuchi et al., IEEE NSS/MIC, San Diego, USA, Nov 1-7, 2015

修士論文

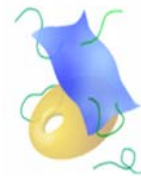
- 2014年3月修了 笠原
- 2015年3月修了 市村, 奥平, 金丸
- 2016年3月修了 先崎, 森内
- 2017年3月修了予定 八木

重力の量子論は、標準理論に含まれていない

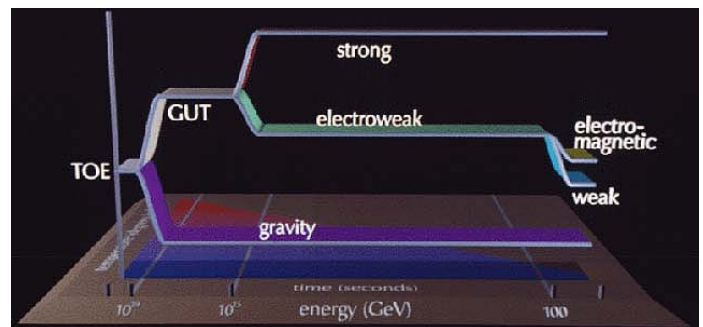


超弦理論の研究

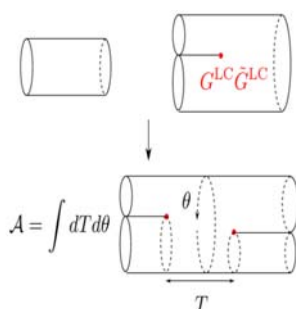
素粒子は点ではなく長さを持つ弦である



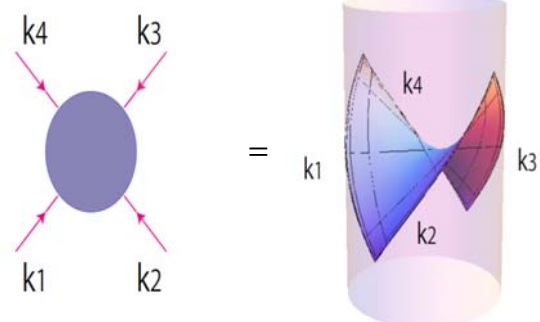
- 重力の量子論
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一
ヒッグス粒子の質量を説明する



◆ 弦の場の理論



◆ AdS/CFT対応を用いた強結合ゲージ理論の研究



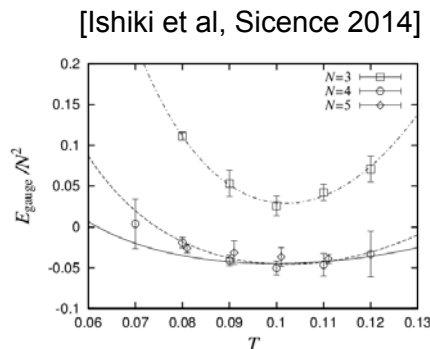
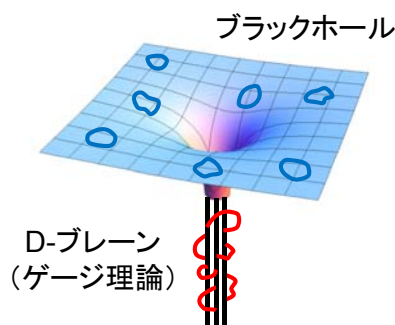
◇ 行列模型

- ・ 超弦理論の非摂動的定式化の構築
- ・ 行列を用いた新しい幾何学(非可換幾何)の理解

◇ 超弦理論への数値的アプローチ

- ・ 行列模型
- ・ ゲージ/重力対応

➡ 例えば、超弦理論のブラックホールの性質を、
対応するゲージ理論の数値計算により理解することが出来る



ブラックホールの内部エネルギーについてゲージ理論と超弦理論の計算結果が一致！

超弦理論 研究成果

石橋延幸, 佐藤勇二, 伊敷吾郎

論文

- "Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories",
N. Ishibashi and T. Tada, Int. J. Mod. Phys. A 31, 1650170 (2016).
- "Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces",
N. Ishibashi and K. Murakami, JHEP 06, 087 (2016).
- "Exact mass-coupling relation for the homogeneous sine-Gordon model",
Z. Bajnok, J. Balog, K. Ito, Y. Satoh and G. Zsolt Toth, Phys. Rev. Lett. 116, 181601 (2016).
- "Non-supersymmetric asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant",
Y. Satoh, Y. Sugawara and T. Wada, JHEP 1602, 184 (2016).
- "On the mass-coupling relation of multi-scale quantum integrable models",
Z. Bajnok, J. Balog, K. Ito, Y. Satoh and G. Zsolt Toth, JHEP 1606, 071 (2016).
- "Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry",
G. Ishiki, JHEP 08, 042 (2016).
- "Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N",
M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, Phys. Rev. D 94, 086010 (2016).

国際会議発表

- "Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop amplitudes",
N. Ishibashi, String field theory and related aspects VII, SFT2015, (ChengDu, China, May 11-15, 2015).
- "Conformal field theories for non-geometric backgrounds in string theory",
Y. Satoh, New trends in low dimensional physics: Quantum integrability and applications, (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, September 1 - 15, 2016).
- "Matrix Geometry and Coherent States",
G. Ishiki, Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity (Corfu, Greece, Sep. 21-26, 2015).

午後の Parallel Session

開始	終了	題目	氏名	所属
13:00	13:20	COBAND実験概要	武内 勇司	CiRFSE 素粒子構造部門
13:20	13:40	COBAND実験におけるSOI-STJ開発1	八木 俊輔	数理物質科学研究科 物理学専攻
13:40	14:00	COBAND実験におけるSOI-STJ開発2	若狭 玲那	数理物質科学研究科 物理学専攻
14:00	14:20	COBAND実験における較正用遠赤外光源開発	坂井 誠	福井大学工学研究科物理工学専攻
14:20	14:40	COBAND実験におけるHf-STJ 開発	武政 健一	数理物質系物理学域/ CiRFSE素粒子構造部門
14:40	15:00	休憩		
15:00	15:15	ATLAS実験の概要	佐藤 構二	CiRFSE 素粒子構造部門
15:15	15:40	ATLAS実験におけるヒッグス・電弱セクターでの新物理探索	大川 英希	CiRFSE 素粒子構造部門
15:40	15:55	ATLAS実験における重心系衝突エネルギー8 TeVでの陽子-陽子衝突のデータを用いたトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索	永田 和樹	数理物質科学研究科 物理学専攻
15:55	16:10	ヒッグス → b b-bar	伊藤 史哲	数理物質科学研究科 物理学専攻
16:10	16:25	New physics searches in Z + MET events	笠原 宏太	数理物質科学研究科 物理学専攻
16:25	16:40	Charged Higgs (Run 2)	萩原 睦人	数理物質科学研究科 物理学専攻
16:40	16:55	休憩		
16:55	17:15	HL-LHC 内部飛跡検出器増強 全体像	池上 陽一	CiRFSE / KEK
17:15	17:30	HL-LHCへ向けたビクセル検出器のビームテスト解析	佐藤 和之	数理物質科学研究科 物理学専攻
17:30	17:45	HL-LHC ATLAS実験用シリコンストリップセンサーの放射線耐性評価	岩渕 周平	数理物質科学研究科 物理学専攻
17:45	18:00	HL-LHC 用内部飛跡検出器の開発	和田 冴	理工学群 物理学類
18:00	18:15	CMOS センサー開発の現状	大川 英希	CiRFSE 素粒子構造部門