

# CiRfSE 宇宙史国際研究拠点 素粒子構造部門 2015 成果報告

CiRfSEワークショップ  
2016年1月19日

筑波大学・数理物質系・物理学域 受川史彦



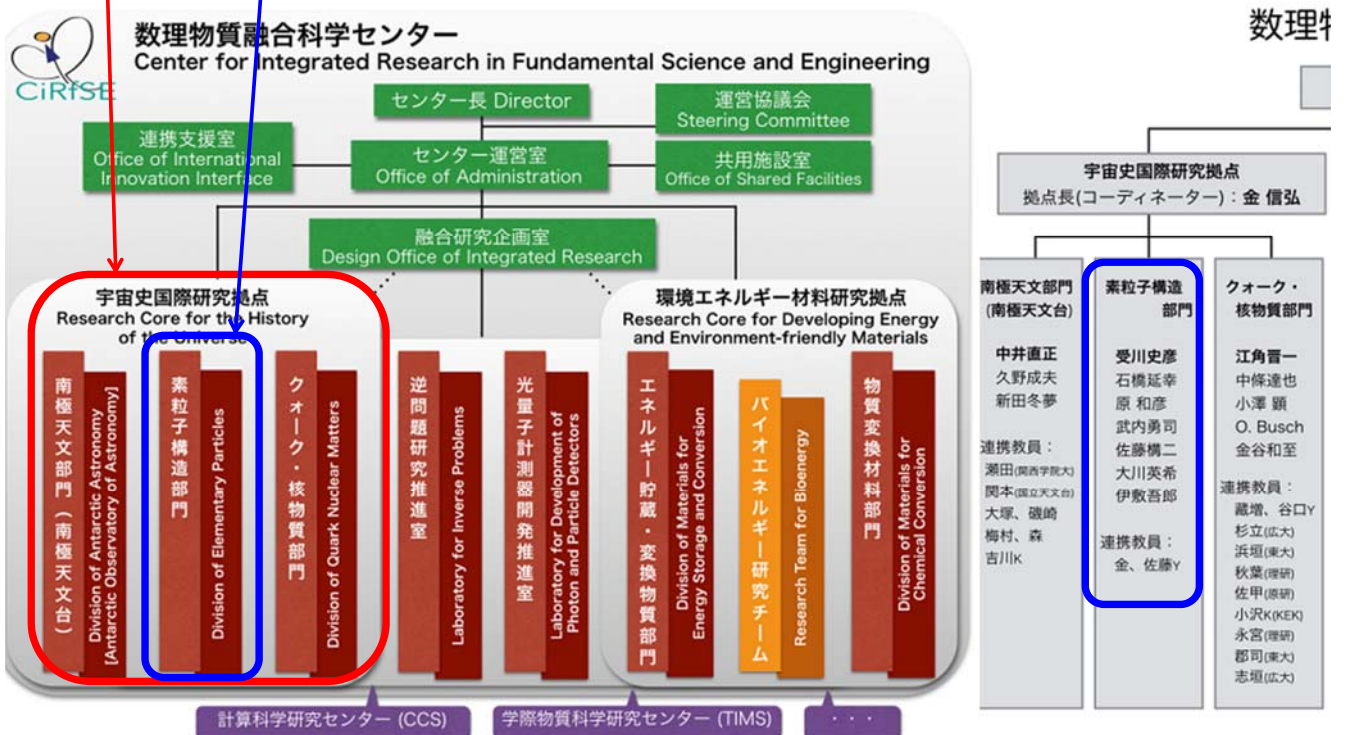
数理物質融合科学センター

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



# 素粒子構造部門の研究

- 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

受川, 原, 佐藤構, 大川(国際TT助教)

- 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

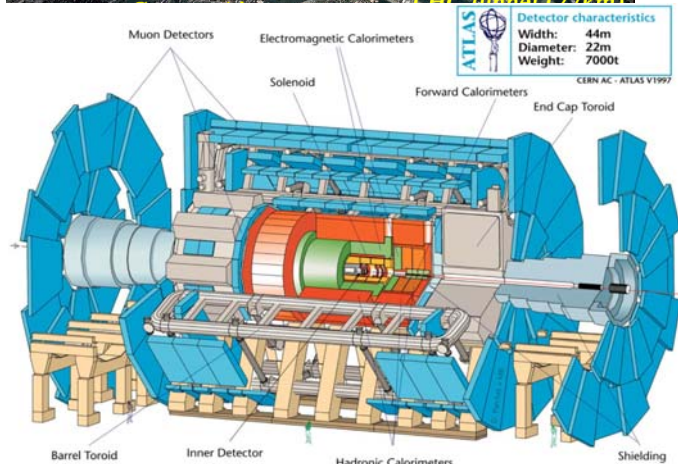
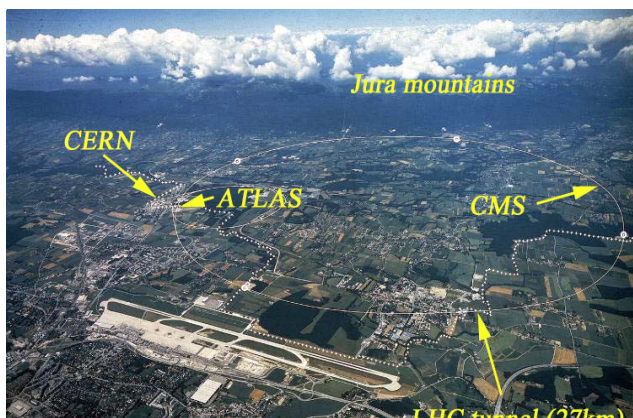
武内, 金

- 超弦理論の研究

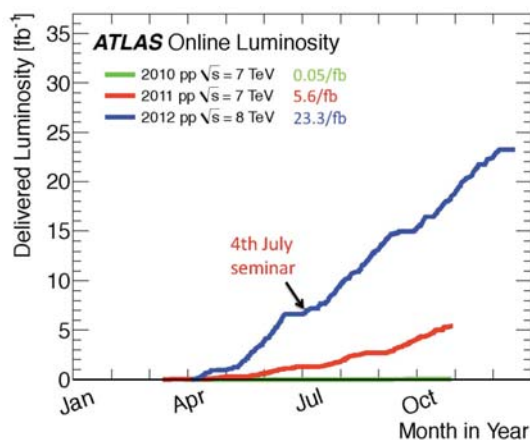
重力の量子場の理論  
4つの力の統一

石橋, 佐藤勇, 伊敷(2015/12 -)

## 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

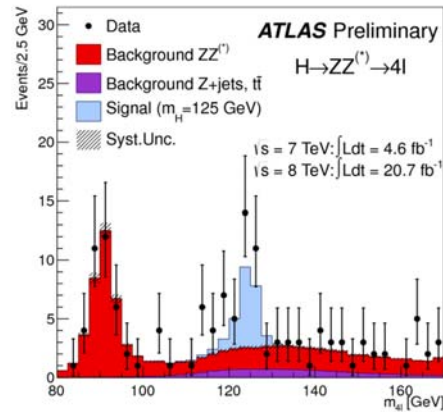
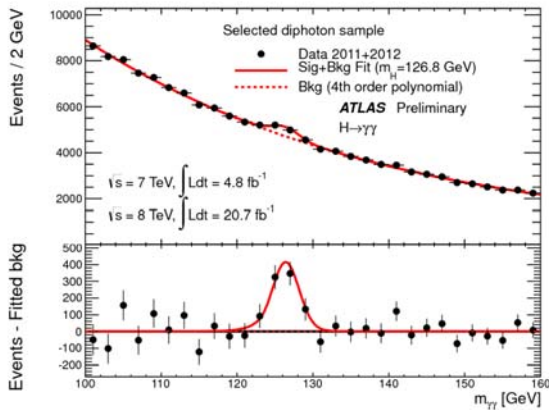
日本: 16 機関, ~110 人

# 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

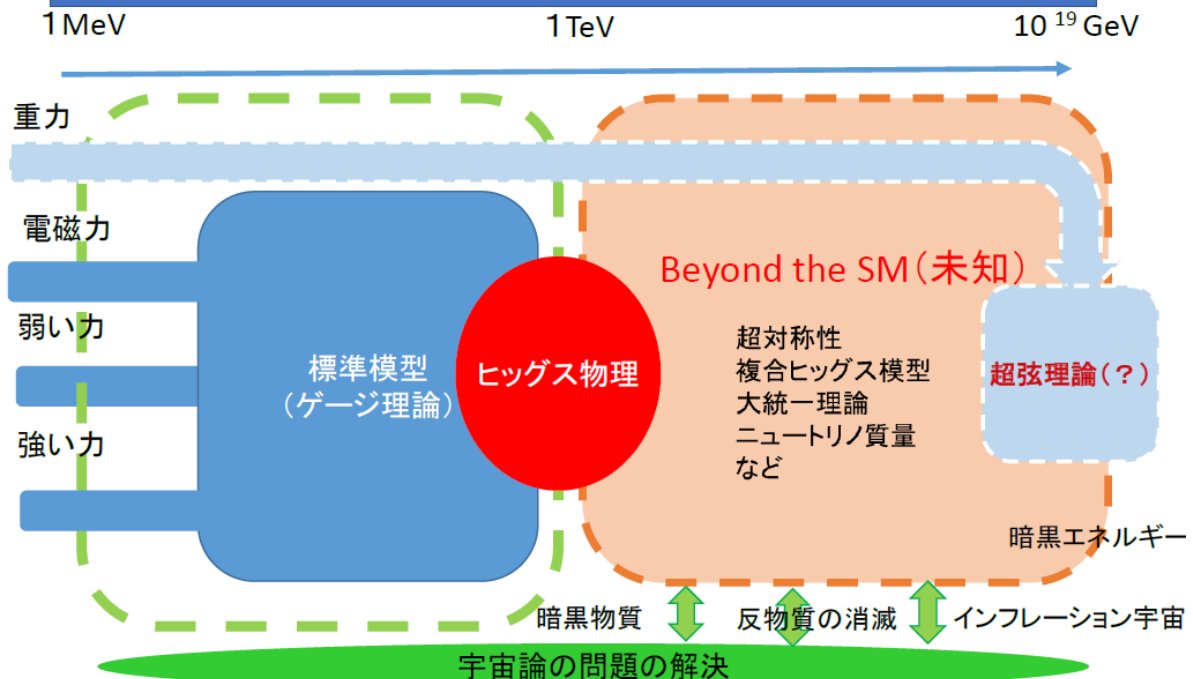
THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons		
Quarks	u up	c charm	t top	$\gamma$ photon	Force carriers	Z Z boson
	d down	s strange	b bottom	W W boson		
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	g gluon		
Leptons	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	Higgs boson*		

\*Yet to be confirmed Source: AAAS

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

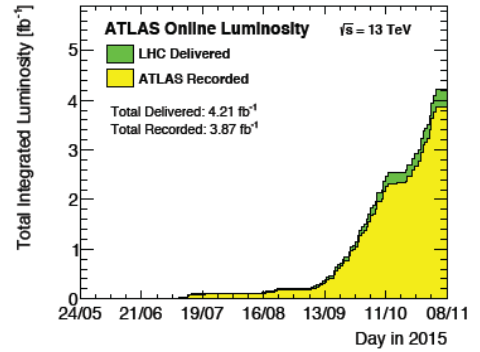


ヒッグスを手掛かりに未知の領域へ

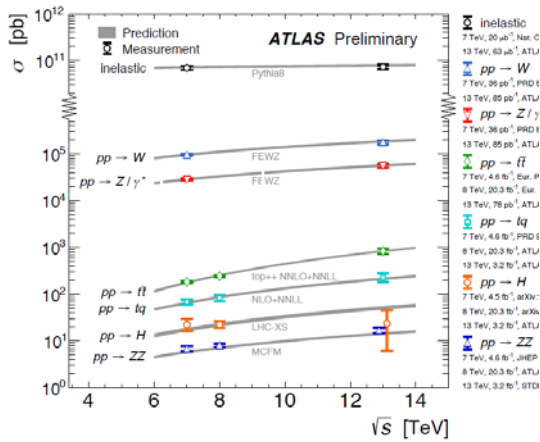
# ATLAS 実験 2015

## ■ LHC加速器 陽子陽子衝突 CERN 研究所

- データ取得再開 (2012 以来)
- 重心系エネルギー 8 TeV → 13 TeV
- 積分輝度  $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$  瞬間輝度  $5.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 2018年末まで長期の中断なしに運転  $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$

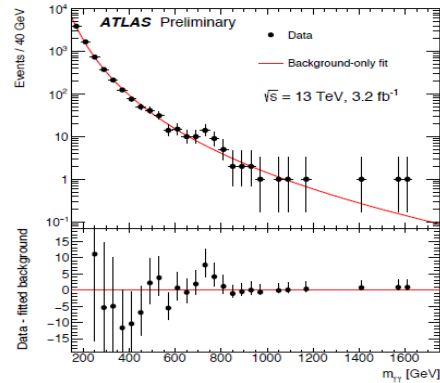


## 種々の標準理論過程の生成断面積 vs. 重心系エネルギー



重心系エネルギーの増加により生成断面積 ~ 数倍

## 新物理の探索の例 : 新粒子 → 2光子?



質量 750  $\text{GeV}/c^2$  に excess  
 有意度 3.6  $\sigma$  local (2.0  $\sigma$  global)

## CiRfSE 素粒子構造部門 / 筑波大学 の寄与・成果

## ATLAS 実験

- 国際ニュートラック助教** 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  
 このあと本人による発表

### 物理解析・博士論文

木内健司 2015年3月修了  
 瀧 遼亮 2016年3月修了予定  
 永田和樹 近く提出予定  
 伊藤史哲 D2  
 笠原宏太 D2  
 萩原睦人 D1  
 本多俊介 D1

ヒッグス → 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 → ボトム・クォーク対  
 重いヒッグス・未知粒子への崩壊  
 荷電ヒッグス粒子探索  
 ttH

CiRfSE  
 若手教員

佐藤

大川  
 佐藤

### 検出器増強

岩瀨周平 M1                      ストリップ検出器  
 佐藤和之 M1                      ピクセル検出器  
 2015年3月修士課程修了者 2名(萩原, 臼井)

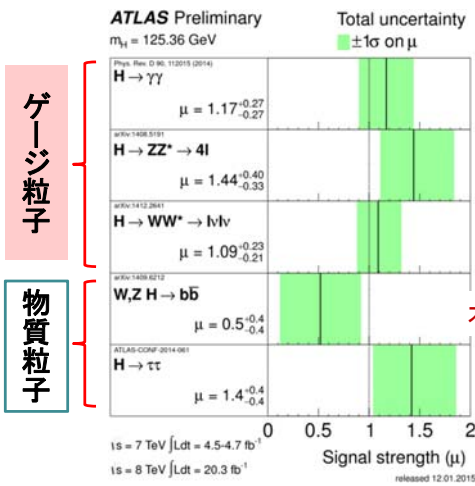
### ATLAS 実験 物理論文(査読あり, 公表済み)

2014年 103 篇, 2015+2016年 109+7 篇

### 検出器開発

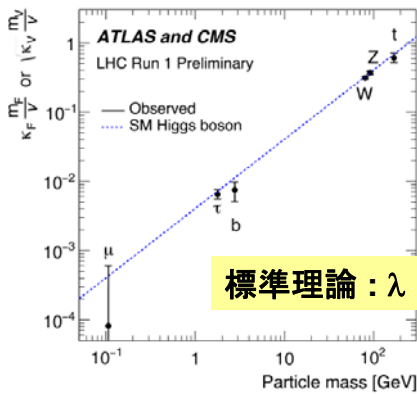
論文                      2014年度 2篇  
 学会発表                2014年度 2件, 2015年度 3件

## ヒッグス粒子は物質粒子と結合するか？

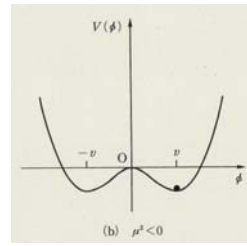


木内 2015/3 修了

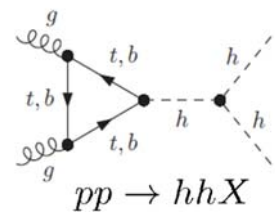
埴 2013/3 修了



## ヒッグス粒子は自己結合するか？



### Higgs 対生成

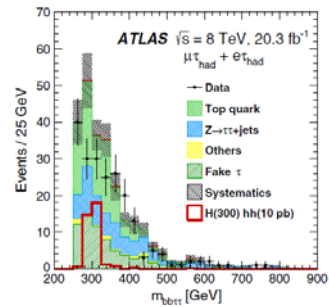
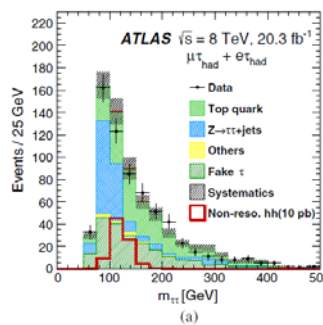


現在のデータ量では標準理論の感度はない

- 結合の異常
- 重いヒッグスの  $hh$  への崩壊

$hh \rightarrow \tau^+\tau^- b\bar{b}$  チャンネルで探索

生成断面積上限値を設定・改善



澁 2016/3 修了予定

## ATLAS 実験の現在・今後

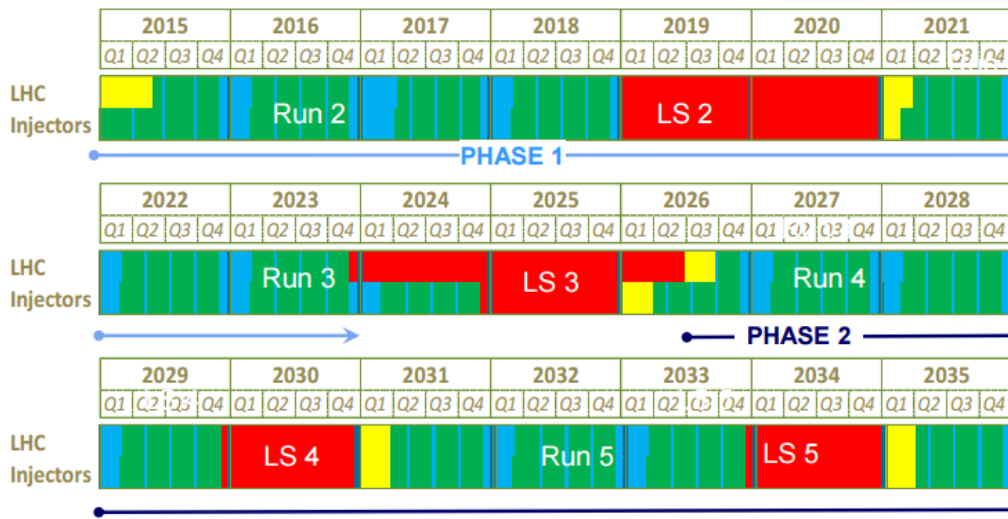
- **ヒッグス粒子の精査**
  - さまざまな性質の精密測定
    - 標準理論の予言する粒子？ **唯一無二**
    - あるいは、似て非なるもの？ **複数のうちのひとつ？**
- **標準理論を超える新粒子・新現象の直接探索**
  - 超対称性？
  - 余剰次元？ ブラックホール？
  - 暗黒物質粒子？
- **より高い衝突エネルギー**  
2015年～ 8 TeV → 13/14 TeV
- **高統計のデータで測定精度を向上**  
2026年～ 加速器増強(HL-LHC) 瞬間輝度 10倍  
2030年代 データ量 現在の >100 倍

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

## LHC roadmap: according to MTP 2016-2020 V1

LS2 starting in 2019 => 24 months + 3 months BC  
 LS3 LHC: starting in 2024 => 30 months + 3 months BC  
 Injectors: in 2025 => 13 months + 3 months BC



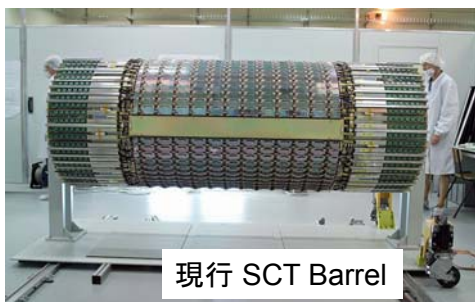
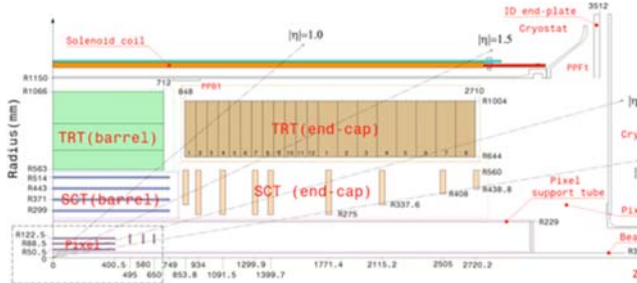
- 2015-2018年までに100 fb<sup>-1</sup> (Run 2)
- 2021-2023年までに300 fb<sup>-1</sup> (Run 3)
- 2035年までに3000 fb<sup>-1</sup> (実験計画 to be approved)
  - Run1(2011-2012): 25 fb<sup>-1</sup> ヒッグス粒子発見: 11 fb<sup>-1</sup>



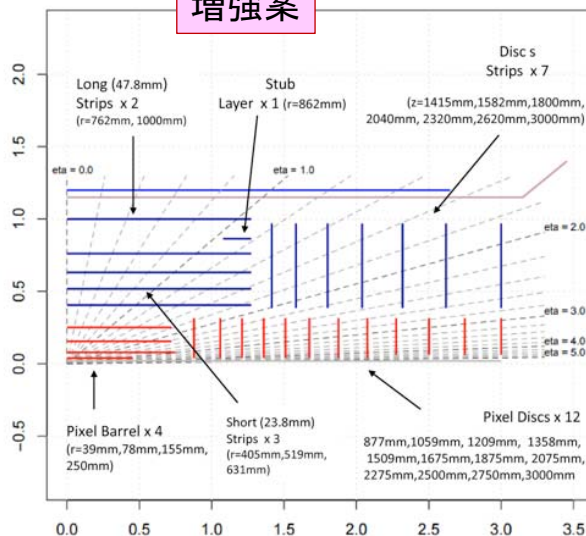
## ATLAS 実験 内部飛跡検出器 増強 (HL-LHC, ~2026)

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



### 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

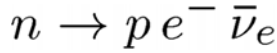
放射線耐性  
 テストビームによる性能評価

午後の講演  
 岩淵, 佐藤和

# 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  $\beta$  崩壊において生成される

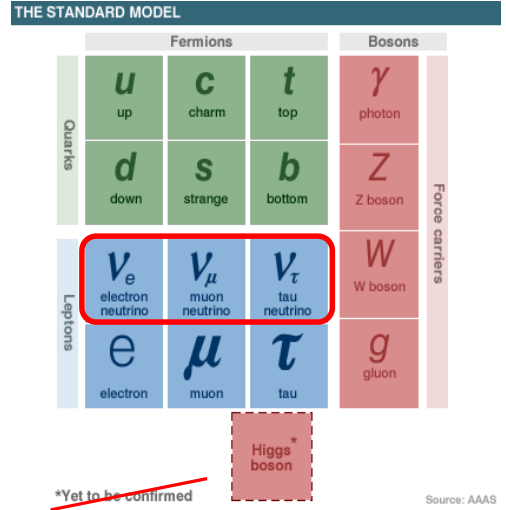


- 物質粒子のひとつ
- 電荷を持たない
- 弱い相互作用のみ行う

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



## 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

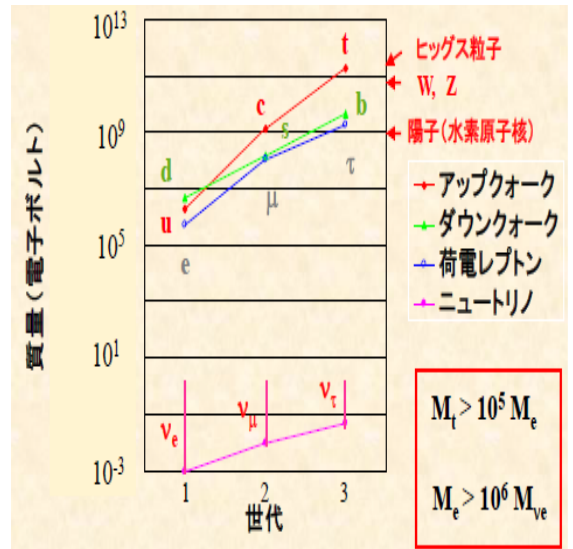
- 素粒子の質量がなぜ11桁以上違うのか?
- 同じ性質の(質量のみ異なる)粒子の繰り返し:  
なぜ?

### 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  $\Delta m^2$  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  $\rightarrow$  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  
 $\rightarrow$  ニュートリノ質量の決定

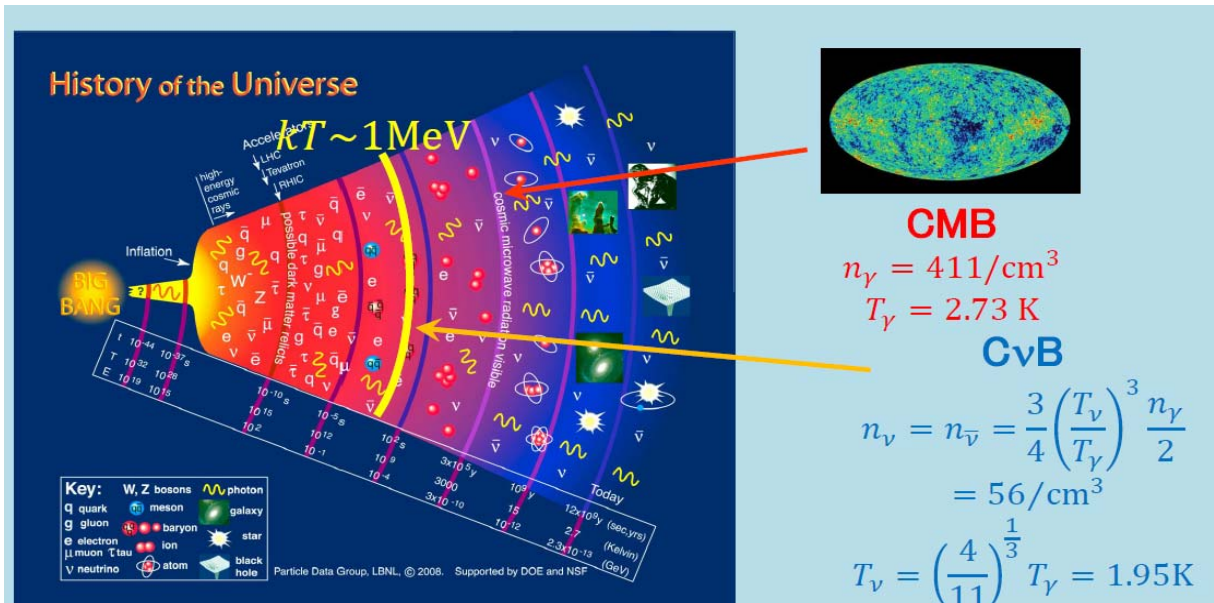


- ニュートリノ: 寿命が長く, まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 =  $10^{12}$ 年  
探索には大量のニュートリノが必要  
加速器で作るのは不十分  
宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の解

宇宙論で予言されるが未観測  $\rightarrow$  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 } それぞれが  
宇宙背景ニュートリノの発見 } 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

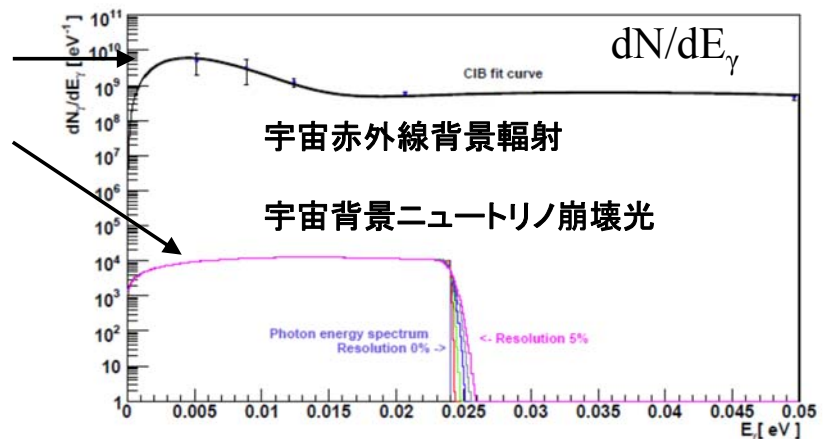
CνB :

- 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/cm<sup>3</sup> 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

宇宙赤外線背景放射 +  
 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 $\nu_3$ の崩壊は $6.7\sigma$ 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

2017年に予備実験としてロケット実験を行う。  
 寿命下限を $10^{14}\text{年}$ まで上げる。



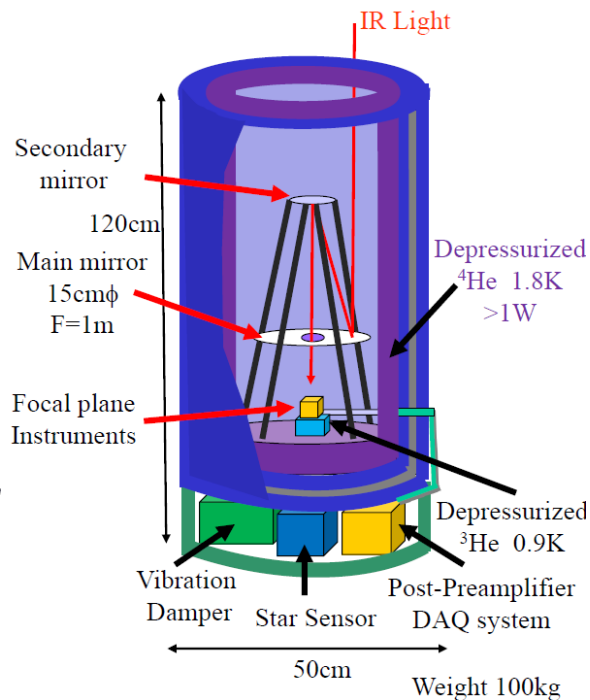
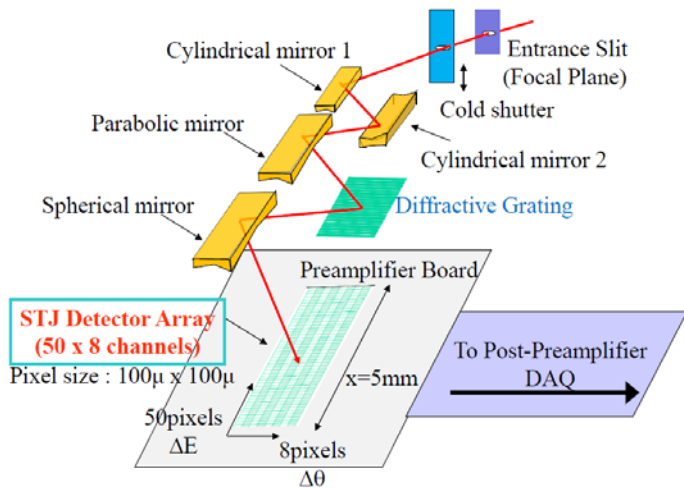
# ニュートリノ崩壊探索ロケット実験

2017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 ( $\sim 10^{14}$  年)

JAXA Rocket CIB Experiment  
 (Feb 2, 1992)



## Focal plane Instruments



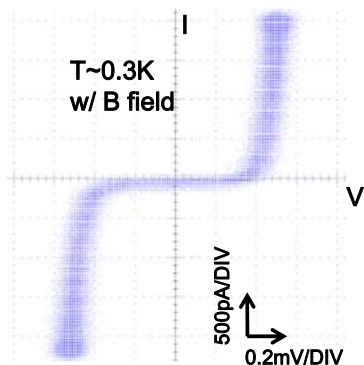
赤外線検出器部:  
 超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器を用いる **高分解能, 信号微弱**

## ニュートリノ崩壊探索 2015

### ■ 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

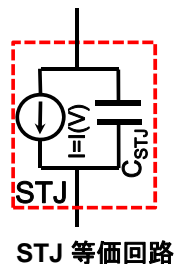
- 遠赤外線単一光子測定を目標 (エネルギー分解能 数%)
- STJ 検出器にて原理的に実現可能 → 実証・製作へ (産総研と共同)
- 極低温下の小信号の読み出し(低ノイズ化)が課題 → SOI 技術の導入

### Nb/Al-STJ(産総研 CRAVITY) の電流-電圧特性

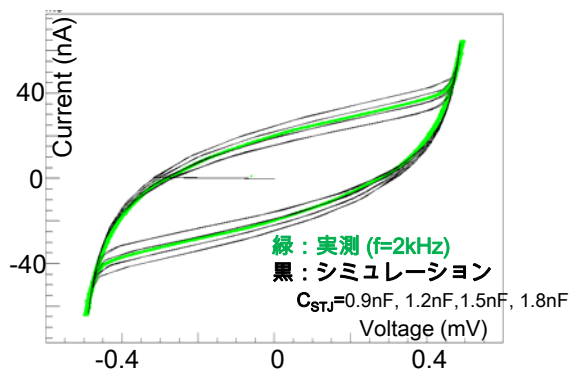


低漏れ電流 200 pA @  $V = 0.4$  mV を達成  
 単一光子測定ではさらに有利に

### Nb/Al-STJ の静電容量の測定



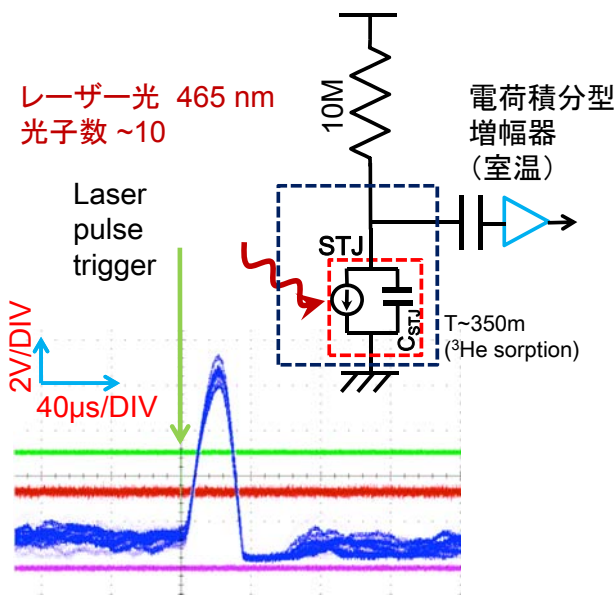
STJ 素子の静電容量が比較的大きい  
 信号読み出し用の増幅器の設計に理解が必要



電流-電圧特性から静電容量を  
 実測する手法を開発

- 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

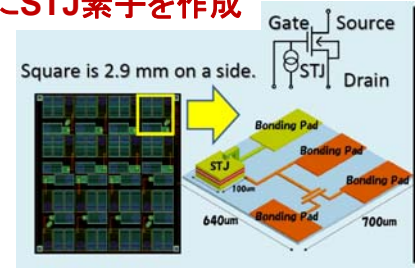
### Nb/AI-STJ 信号の読み出し



単一光子測定には、読み出し系のノイズ低減が必要

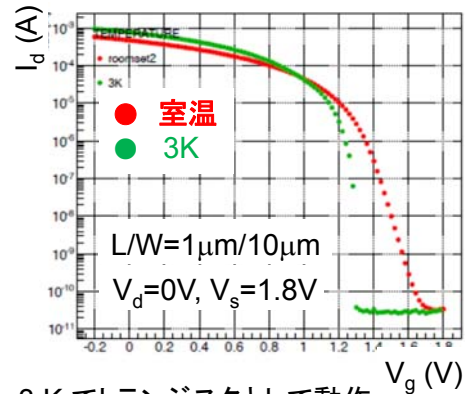
→ 極低温電荷積分型増幅器の開発

### SOI基板上にSTJ素子を作成



### SOIプロセスによる P-MOS FET の電流-電圧特性

電荷積分型増幅器の要素



3 K でトランジスタとして動作

特性は室温から変化

→ 理解・simulation, 増幅器の設計

## 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 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. Takahara et al., PoS(TIPP2014)155.
- "Search for Cosmic Background Neutrino Decay", S. H. Kim et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014).

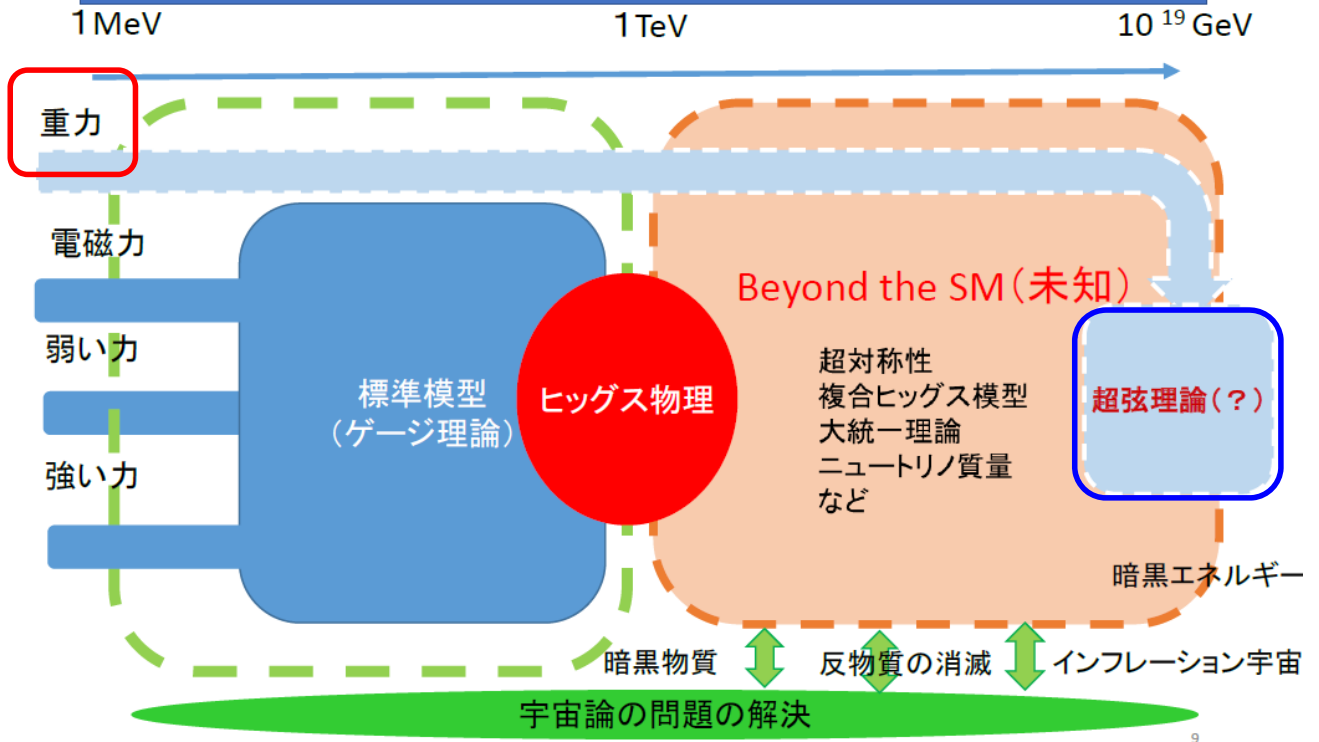
### 国際会議発表

- "Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a Far Infrared Photon-By-Photon Spectrometer for Neutrino Decay Search", Y. Takeuchi et al., 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Pisa, Italy, May. 11-14, 2015
- "Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors", K. Kiuchi et al., International Workshop on SOI Pixel Detector, Sendai, Japan, June 2-5, 2015

### 修士論文

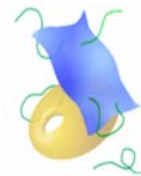
- 2014年3月修了 笠原
- 2015年3月修了 市村, 奥平, 金丸
- 2016年3月修了予定 先崎, 森内

重力の量子論は、標準理論に含まれていない

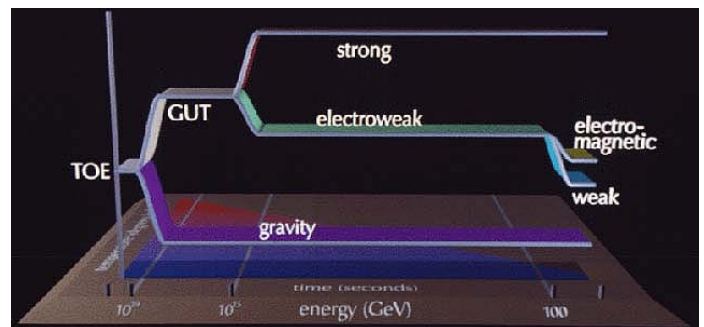


## 超弦理論の研究

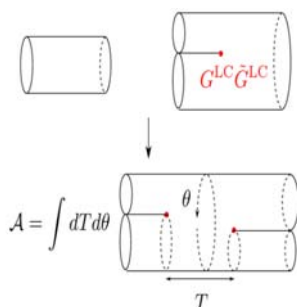
素粒子は点ではなく長さを持つ弦である



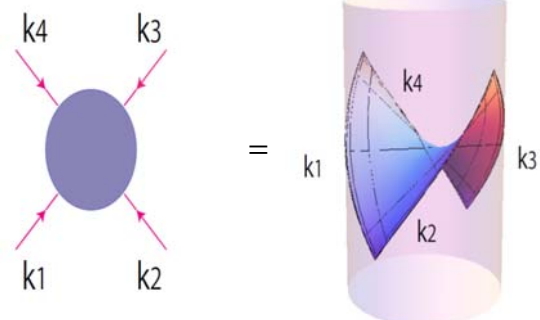
- 重力の量子論  
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一  
ヒッグス粒子の質量を説明する



### ◆ 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



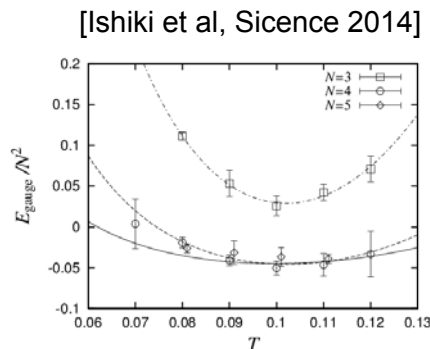
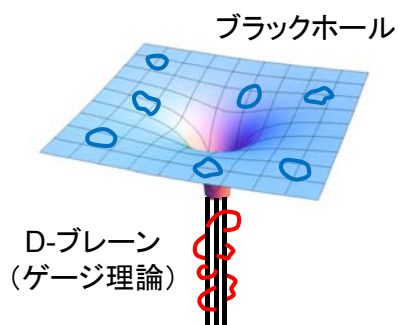
## ◇ 行列模型

- ・ 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

- ・ **伊敷吾郎(助教, テニュアトラック普及定着事業)**
  - ・ 弦理論, 行列模型, ゲージ/重力対応
  - ・ 数値的研究+数値的研究 → 計算科学研究センターとの連携強化
  - ・ 2015/12 より CiRfSE 構成員に
- ・ **論文**
  - ・ "Comments on Takahashi-Tanimoto's scalar solution", N. Ishibashi, JHEP 1502, 168 (2015).
  - ・ "Infinite circumference limit of conformal field theory", N. Ishibashi and T. Tada, J. Phys. A: Math. Theor. 48 (2015) 315402.
  - ・ "Quantum Wronskian approach to gluon scattering amplitudes at strong coupling", Y. Hatsuda, K. Ito, Y. Satoh and J. Suzuki, JHEP 1408, 162 (2014).
  - ・ "Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability", Y. Satoh, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 251-252, 123-128 (2014).
  - ・ "Non-geometric backgrounds based on topological interfaces", Y. Satoh and Y. Sugawara, JHEP 07 (2015) 022.
  - ・ "Matrix Geometry and Coherent States", G. Ishiki, Phys. Rev. D 92, 046009 (2015).
- ・ **国際会議発表**
  - ・ "Comments on the Takahashi-Tanimoto tachyon vacuum solution", N. Ishibashi, String field theory and related aspects VI, SFT2014, (SISSA, Trieste, Italy, July 24-August 1, 2014).
  - ・ "Quantum wronskian relation and gluon scattering amplitudes at strong coupling", Y. Satoh, Finite-size Technology in Low Dimensional Quantum System (VII), (Eotvos University, Budapest, Hungary, June 16 - 27, 2014).
  - ・ "Scattering amplitudes in N=4 SYM and integrable models", Y. Satoh, Amplitudes in Asia 2015 (National Taiwan University, Taipei, November 2 - 6, 2015).

# 素粒子構造部門の研究

## 拠点の session で詳細を

開始	終了	題目	氏名	所属
13:30	13:50	ニュートリノ崩壊探索概要	武内 勇司	CIRfSE 素粒子構造部門
13:50	14:10	Hf-STJ 開発	武政 健一	数理物質系物理学域
14:10	14:30	SOI極低温アンプ設計	木内 健司	数理物質系物理学域
14:30	14:50	STJ較正用遠赤外光源開発	浅野 千紗	福井大学工学研究科物理工学専攻
14:50	15:10	SOI-STJ4評価	先崎 蓮	数理物質科学研究科物理学専攻
15:10	15:30	CRAVITY製Nb/Al-STJ評価	森内 航也	数理物質科学研究科物理学専攻
15:30	16:00	休憩		
16:00	16:20	ATLAS実験の概要	佐藤 構二	CIRfSE 素粒子構造部門
16:20	16:50	ATLAS実験におけるダイボソン共鳴事象の探索	大川 英希	CIRfSE 素粒子構造部門
16:50	17:10	ATLAS実験におけ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
17:10	17:30	ATLAS実験におけるヒッグス粒子対生成の探索	淵 遼亮	数理物質科学研究科物理学専攻
17:30	17:45	HL-LHCへ向けたピ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
17:45	18:00	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	岩淵 周平	数理物質科学研究科物理学専攻