

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



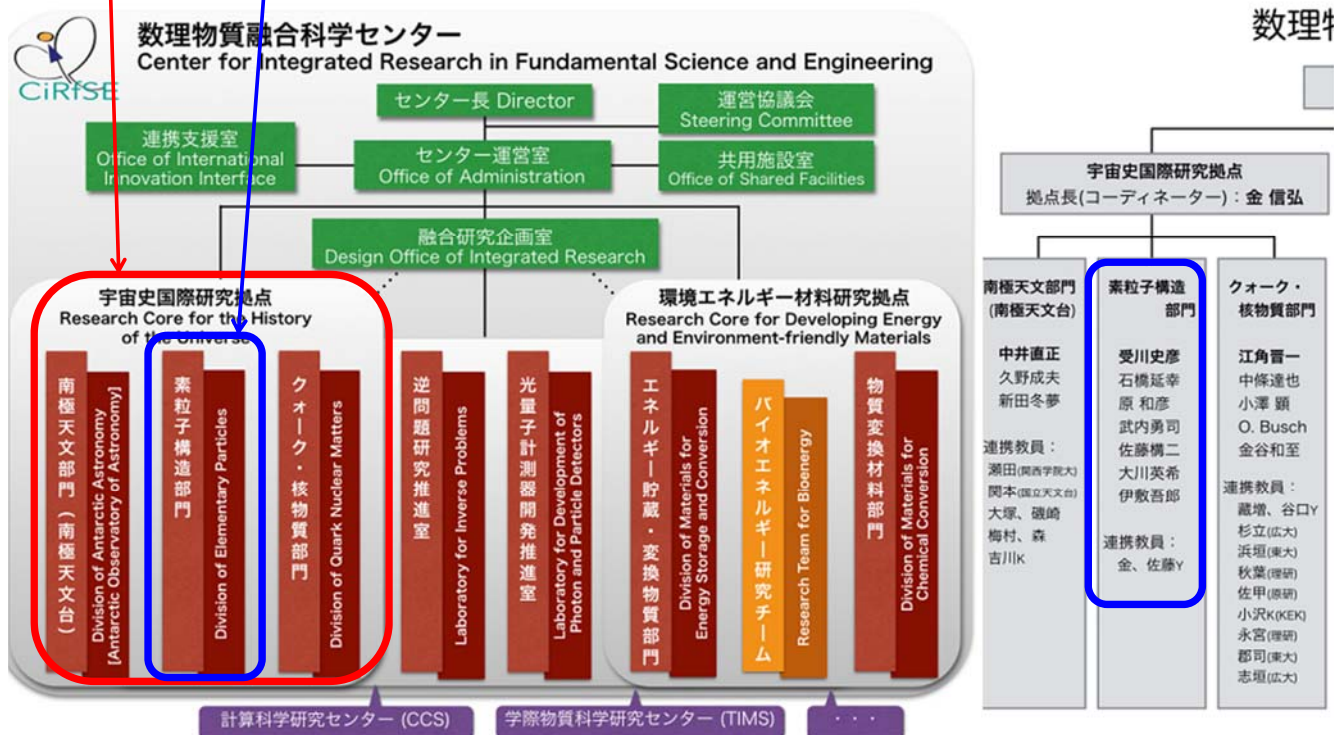
数理物質融合科学センター

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

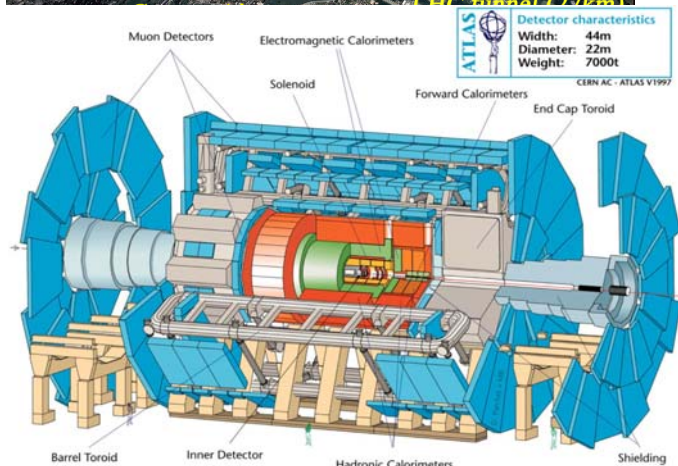
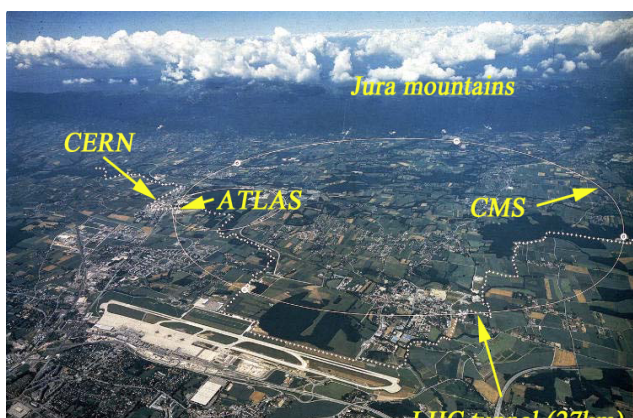
武内, 金

- 超弦理論の研究

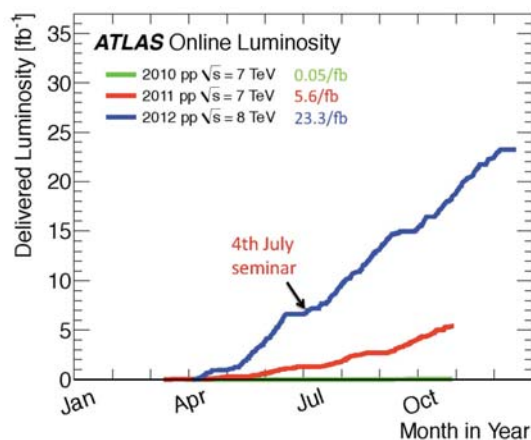
重力の量子場の理論
4つの力の統一

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

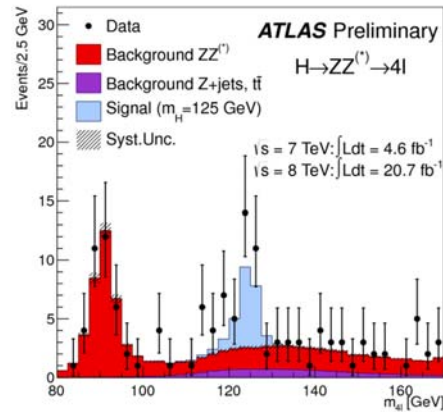
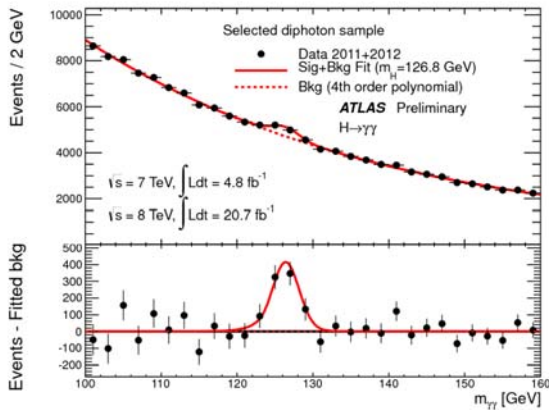
日本: 16機関, ~110人

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

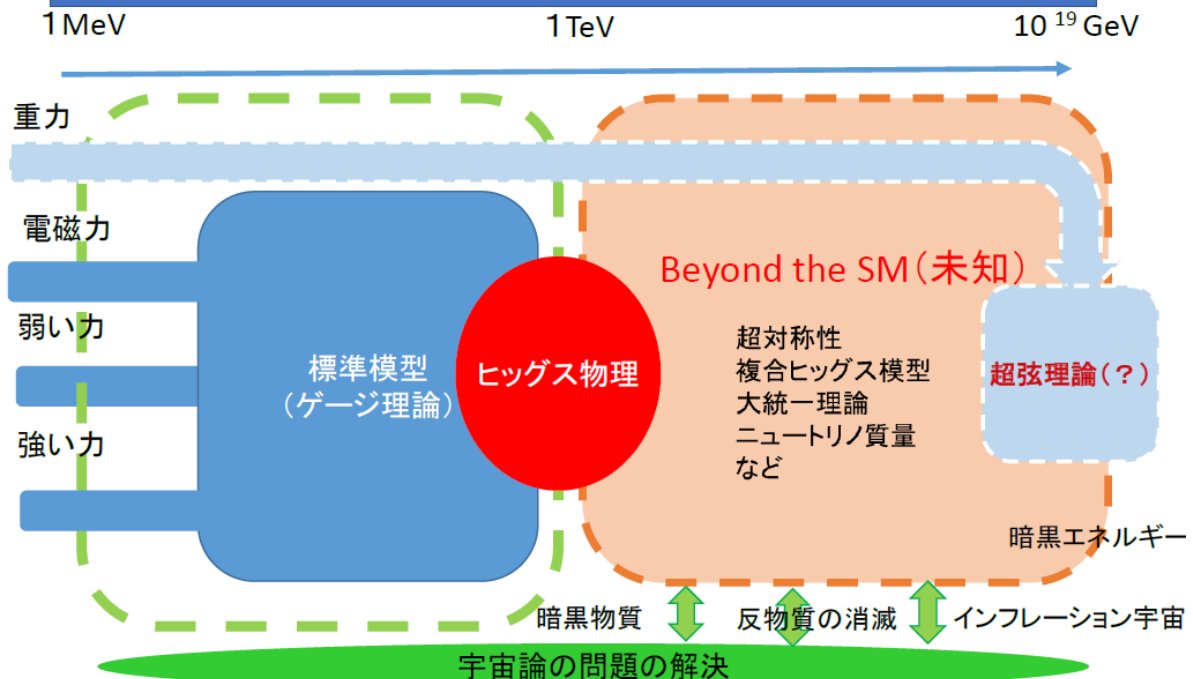
THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	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	
	Higgs boson*				
	*Yet to be confirmed				

Source: AAAS

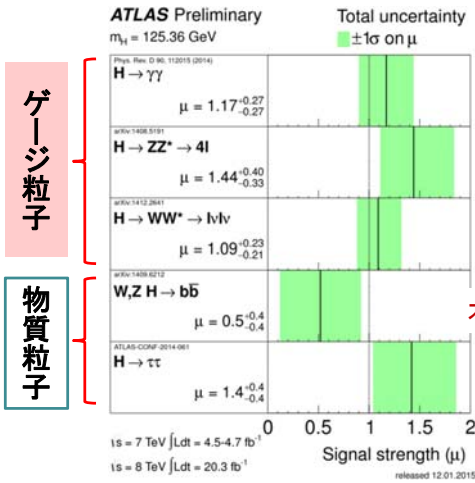
標準理論の素粒子をすべて実験的に確認

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



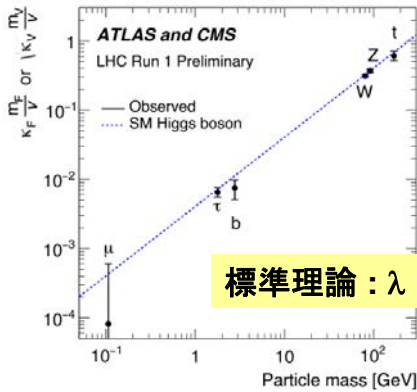
ヒッグスを手掛かりに未知の領域へ

ヒッグス粒子は物質粒子と結合するか？

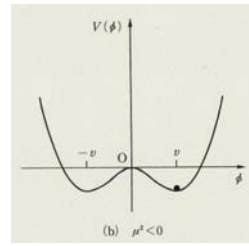


木内 2015/3 修了

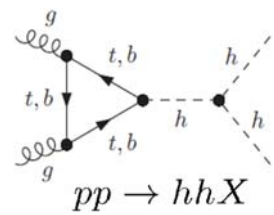
埴 2013/3 修了



ヒッグス粒子は自己結合するか？



Higgs 対生成

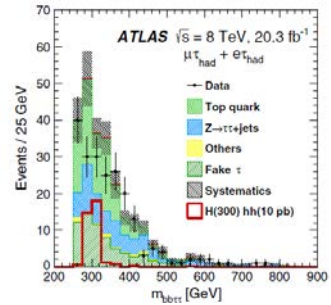
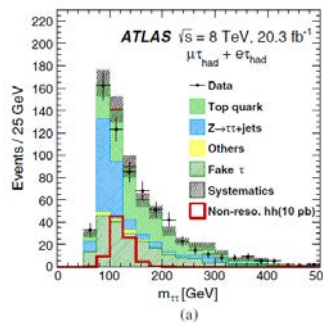


現在のデータ量では標準理論の感度はない

- 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

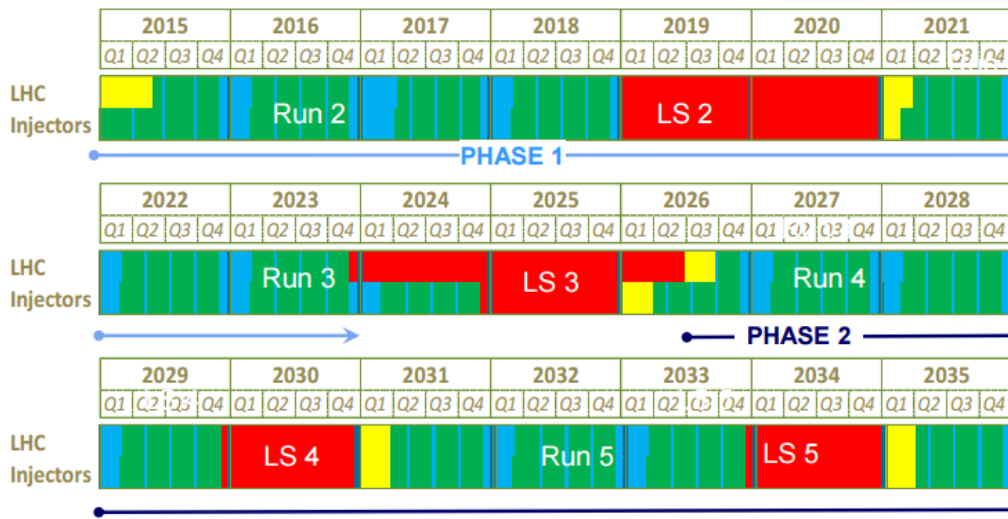
- **ヒッグス粒子の精査**
 - さまざまな性質の精密測定
 - 標準理論の予言する粒子？ **唯一無二**
 - あるいは、似て非なるもの？ **複数のうちのひとつ？**
- **標準理論を超える新粒子・新現象の直接探索**
 - 超対称性？
 - 余剰次元？ ブラックホール？
 - 暗黒物質粒子？
- **より高い衝突エネルギー**
2015年～ 8 TeV → 13/14 TeV
- **高統計のデータで測定精度を向上**
2026年～ 加速器増強(HL-LHC) 瞬間輝度 10倍
2030年代 データ量 現在の >100 倍

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



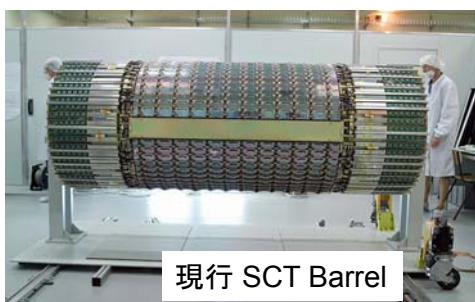
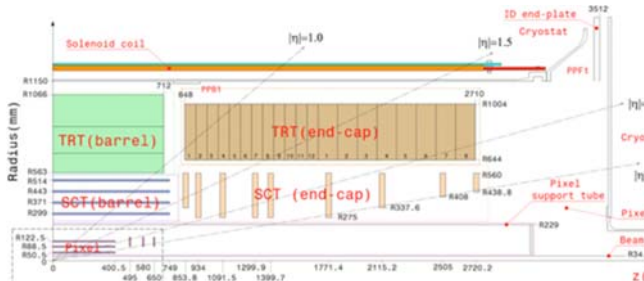
- 2015-2018年までに100 fb⁻¹ (Run 2)
- 2021-2023年までに300 fb⁻¹ (Run 3)
- 2035年までに3000 fb⁻¹ (実験計画 to be approved)
 - Run1(2011-2012): 25 fb⁻¹ ヒッグス粒子発見: 11 fb⁻¹



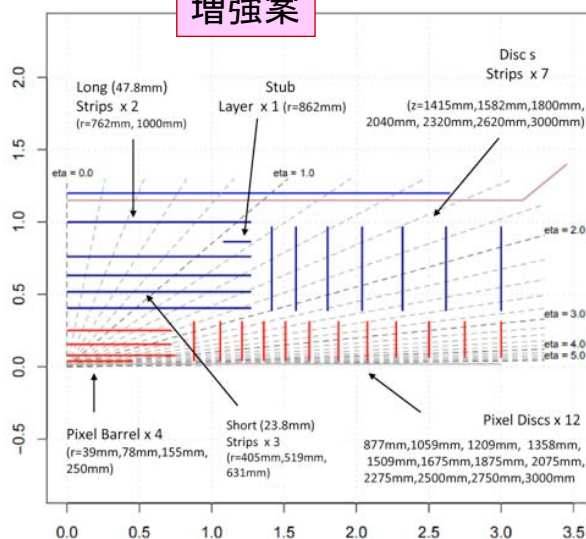
ATLAS 実験 内部飛跡検出器 増強 (HL-LHC, ~2026)

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



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

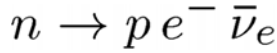
放射線耐性
 テストビームによる性能評価

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 β 崩壊において生成される

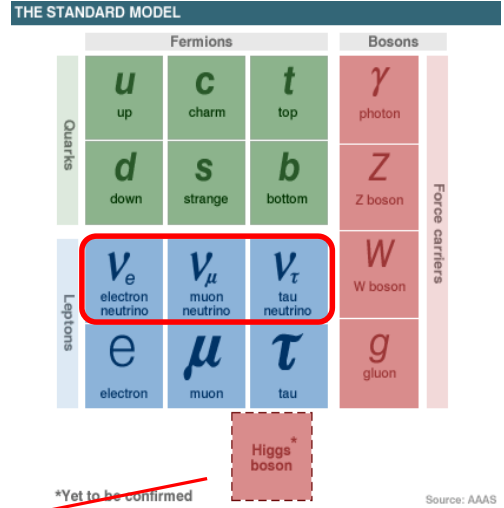


- 物質粒子のひとつ
- 電荷を持たない
- 弱い相互作用のみ行う

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

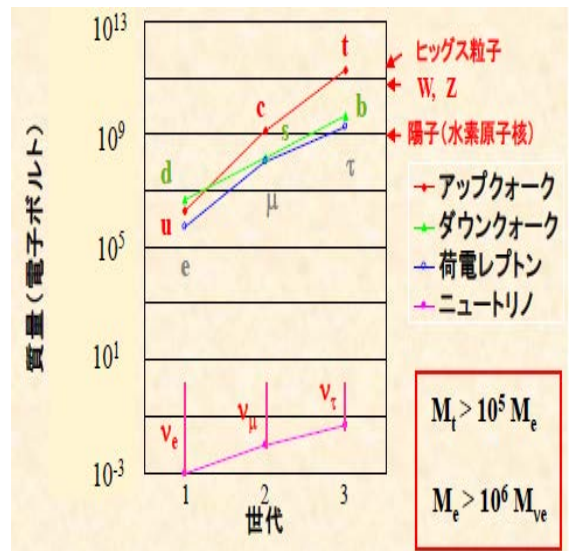
- 素粒子の質量がなぜ11桁以上違うのか?
- 同じ性質の(質量のみ異なる)粒子の繰り返し:
なぜ?

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 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 \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
→ ニュートリノ質量の決定

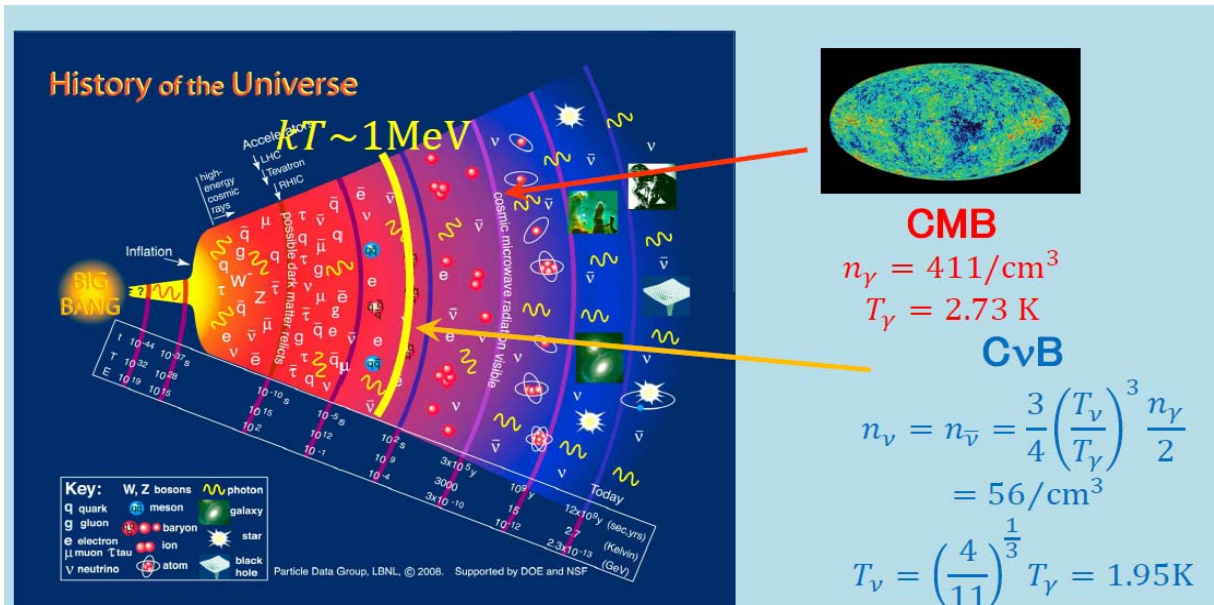


- ニュートリノ: 寿命が長く, まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 = 10^{12} 年
探索には大量のニュートリノが必要
加速器で作るのは不十分
宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の解

宇宙論で予言されるが未観測 → 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

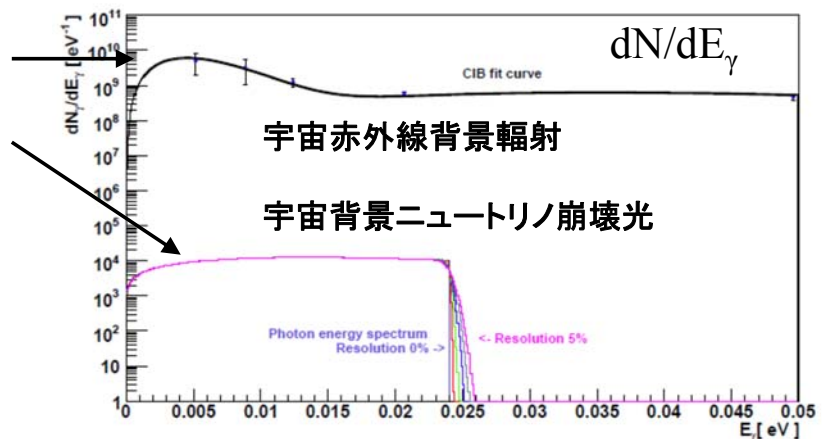
CνB :

- 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/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%



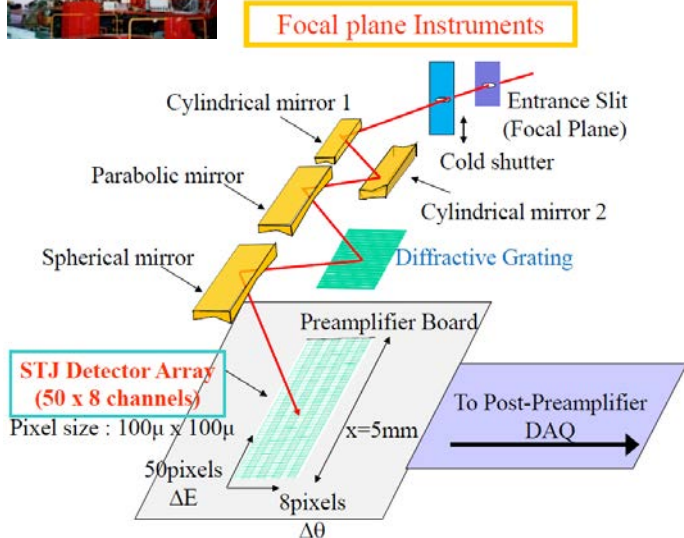
- 2%以下のエネルギー分解能が必要。
- 質量50meV, 寿命 $1.5 \times 10^{17}\text{年}$ (LR対称模型予言)の ν_3 の崩壊は 6.7σ で観測可能。
- 現在の寿命下限 (AKARI) $3 \times 10^{12}\text{年}$
 S.H. Kim et al. JPSJ 81 (2012) 024101

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}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)

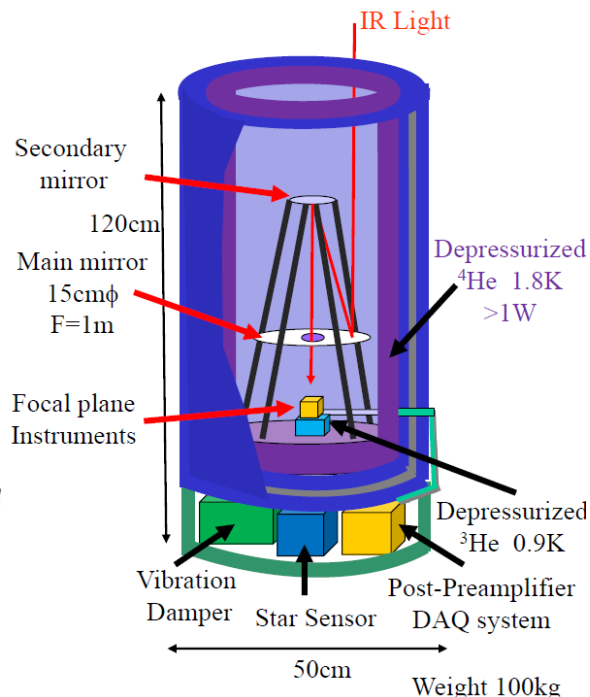
JAXA Rocket CIB Experiment
 (Feb 2, 1992)



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

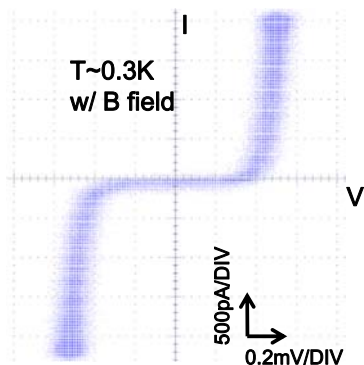


ニュートリノ崩壊探索 2015

■ 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

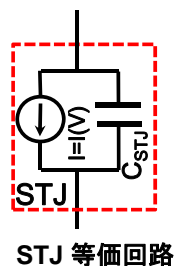
Nb/AI-STJ(産総研 CRAVITY) の電流-電圧特性



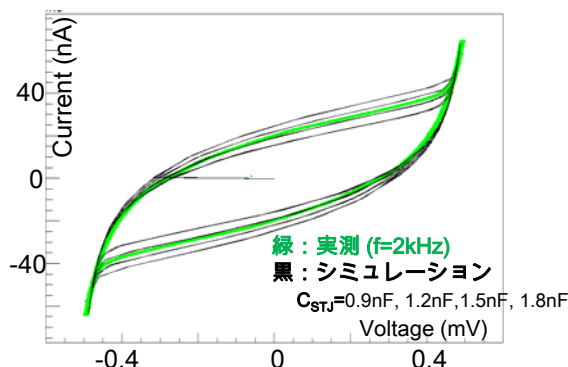
低漏れ電流 200 pA @ V = 0.4 mV を達成
 単一光子測定ではさらに有利に

Nb/AI-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



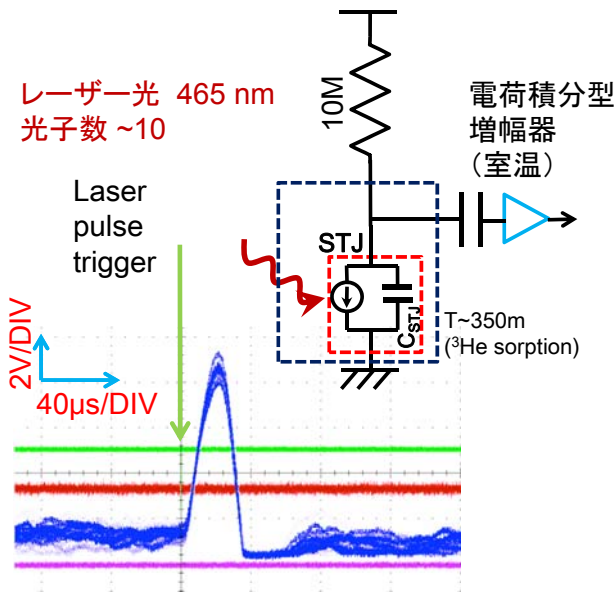
STJ 等価回路



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

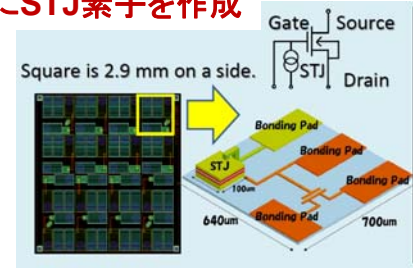
Nb/AI-STJ 信号の読み出し



単一光子測定には、読み出し系のノイズ低減が必要

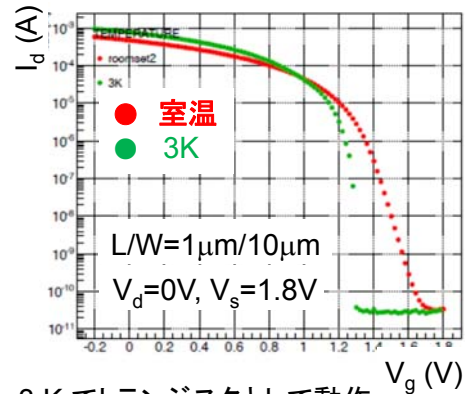
→ 極低温電荷積分型増幅器の開発

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

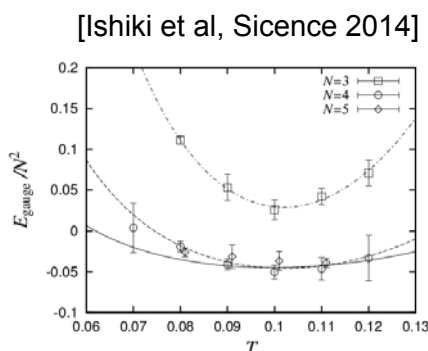
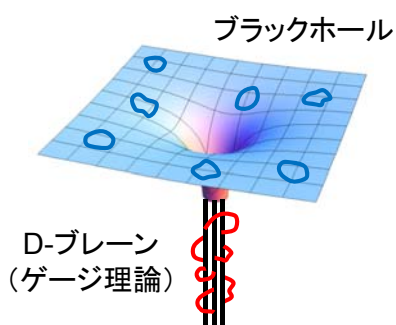
◇ 行列模型

- ・ 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
 - ・ 数理的研究+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