

宇宙史国際研究拠点 素粒子構造部門

CiRfSEワークショップ
2015年3月12日

筑波大学・数理物質系・物理学域 受川史彦



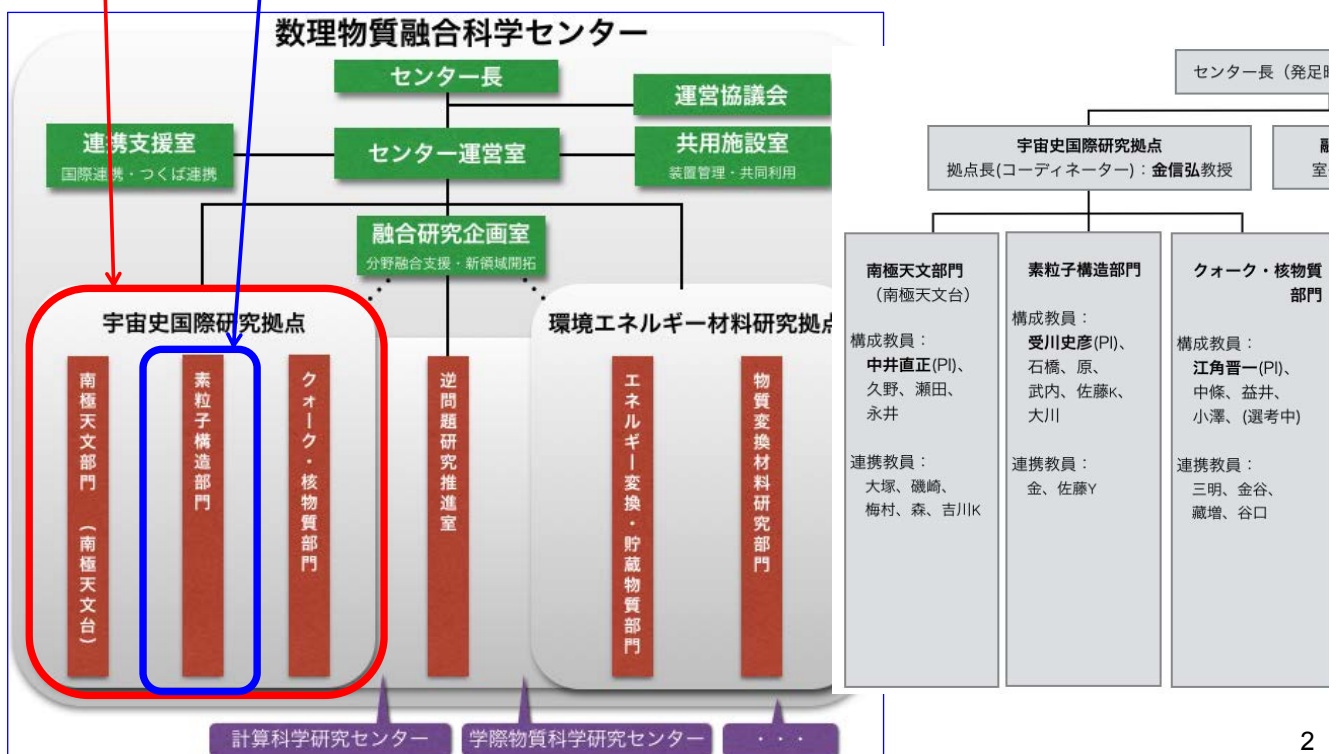
数理物質融合科学センター

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



宇宙史国際研究拠点

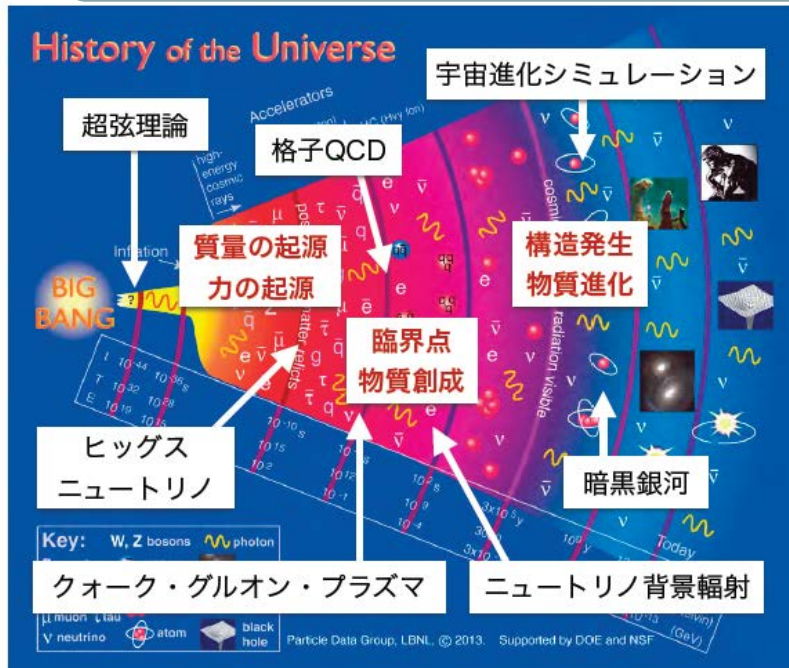
素粒子構造部門



宇宙史国際研究拠点(朝永センター)

目標: 素粒子・原子核・宇宙物理学の融合と、実験・理論の協調により、宇宙史の統一的理解

宇宙史の統一的描像の構築
質量起源・クォークグルオンプラズマ・銀河ブラックホール形成の包括的理解
暗黒物質・暗黒エネルギーの謎の解明



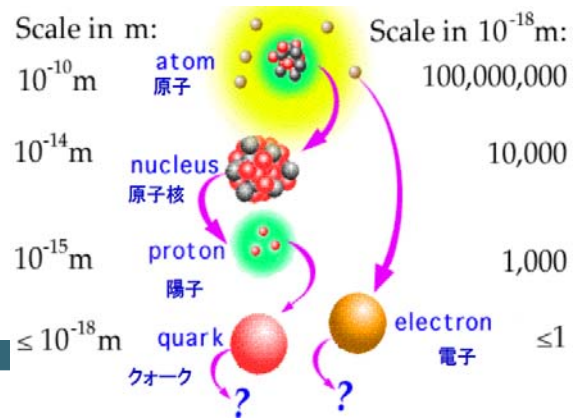
ヒッグス・ニュートリノ・
クォークグルオンプラズマ・
ブラックホール・銀河形成
を手掛かりとして国際共同
研究の推進, 研究拠点の
形成

- 10^{-10} 秒後
ヒッグス場の凝縮
素粒子が質量を獲得
- 10^{-4} 秒後
クォークが結合して核子に
- 1秒後
宇宙背景ニュートリノ
- 1億年
第1世代天体

素粒子構造部門の研究

- 高エネルギー加速器を用いた陽子陽子衝突実験
欧州 CERN 研究所 LHC 加速器 ATLAS 実験
大規模な国際共同実験
ヒッグス粒子
- 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索
筑波大学グループを主とする国際チームによる研究
ニュートリノ
- 超弦理論の研究
重力の量子場の理論
4つの力の統一

素粒子



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

力の伝達:
“ゲージ粒子”

電磁気力
強い力
弱い力
(重力)

相対論的な量子場の理論により定式化: **素粒子標準理論**

素粒子の基本相互作用

- | | |
|-----------|-----------------------|
| 1. 強い相互作用 | 核力, クォーク, グルオン |
| 2. 電磁相互作用 | 電気力, 磁気力, 光子 |
| 3. 弱い相互作用 | β 崩壊, 重い粒子の崩壊など |
| 4. 重力 | ニュートン, アインシュタイン |

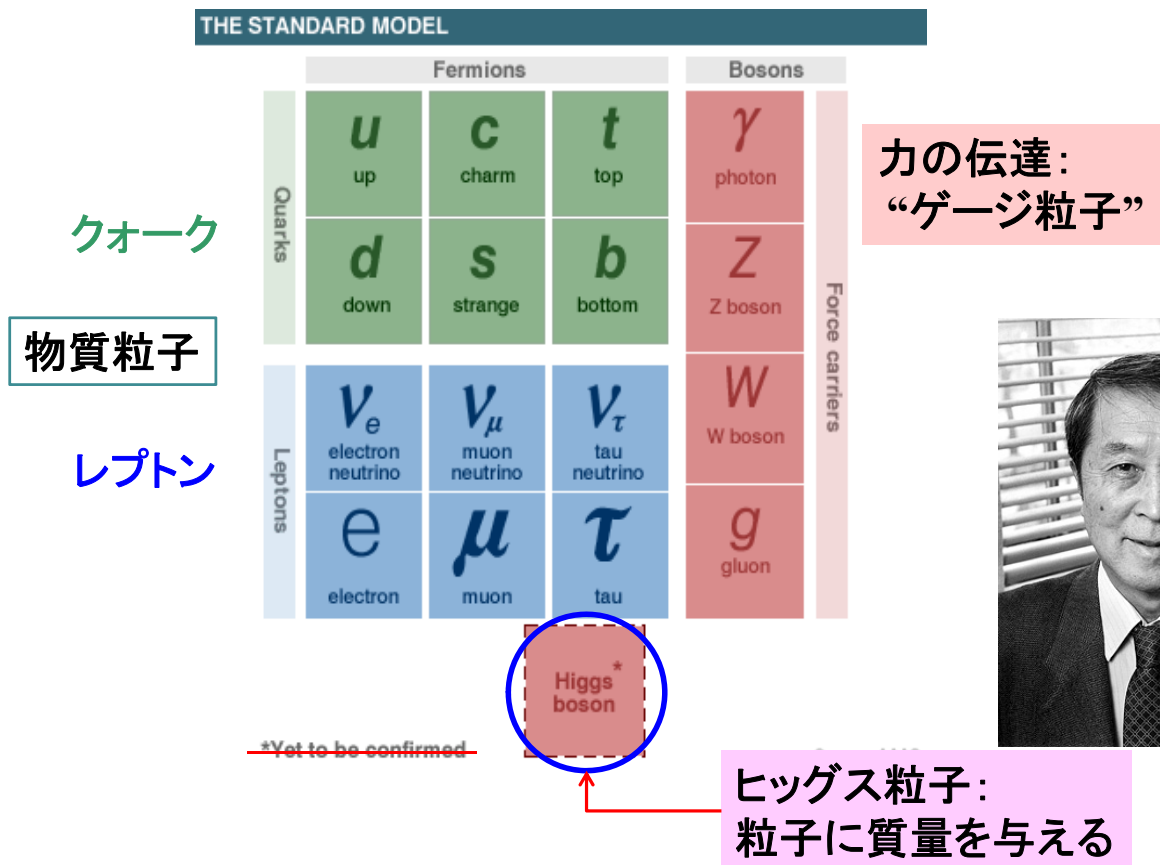
最初に電磁相互作用の理論(量子電気力学)が完成.
朝永振一郎, J. Schwinger, R. Feynman らによる.
1940年代



その後, 弱い相互作用(電磁相互作用との統一理論),
強い相互作用の理論が, 電磁相互作用を手本として構築された.

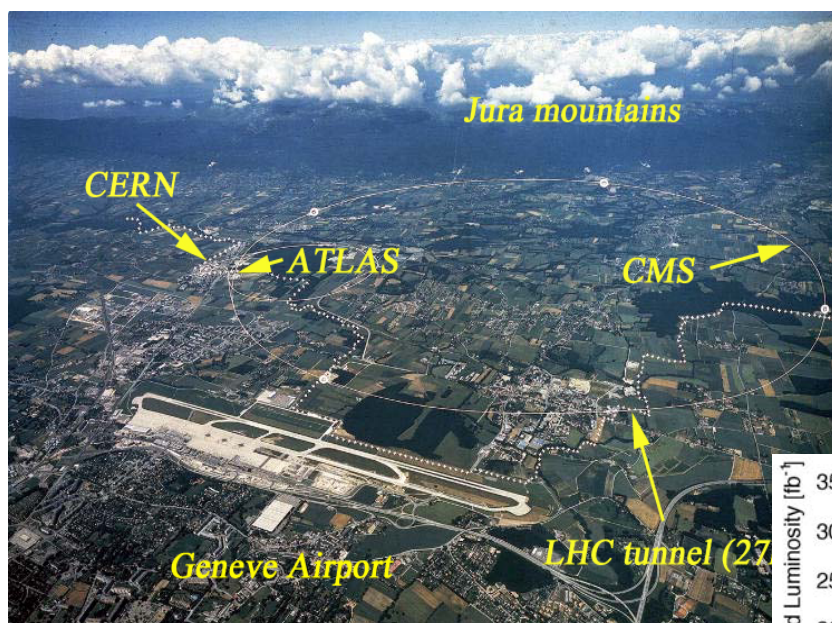
すべて同じ枠組みを持つ. **ゲージ相互作用**, くりこみ可能, ...

素粒子構造部門： ヒッグス研究



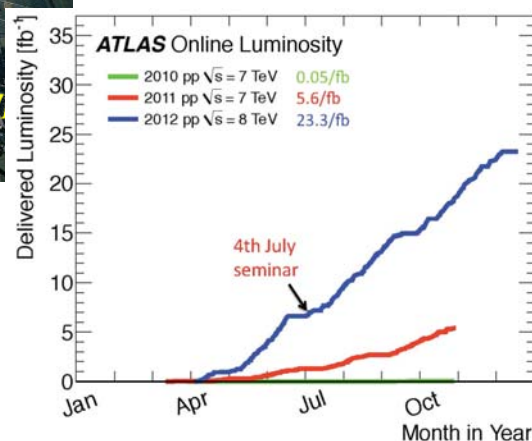
7

LHC 加速器, CERN 研究所



← スイス・フランス国境

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

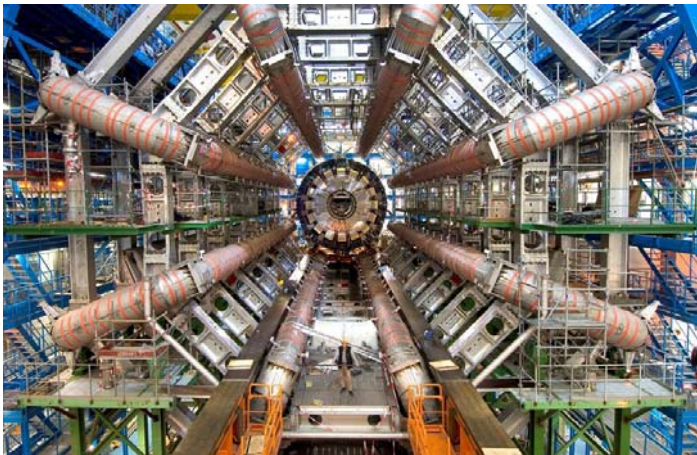
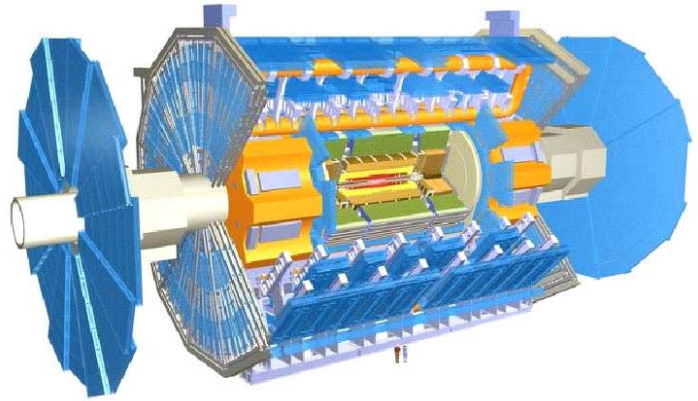


ATLAS 実験・検出器

38 ヶ国, 176 機関

~3000 人

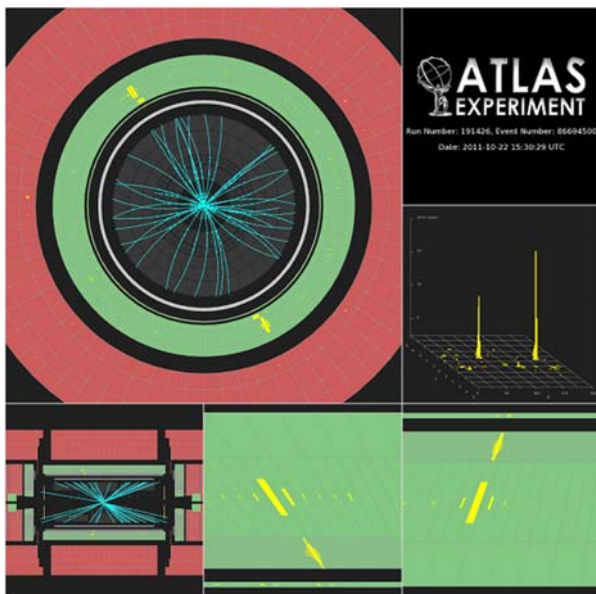
日本: 16 機関, ~110 人



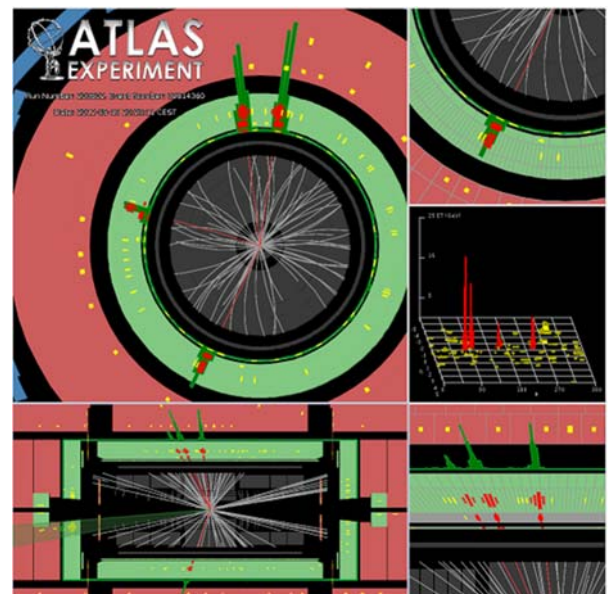
- 22 m × 44 m, 重量 7000 トン
- 読み出しチャンネル総数 1.1×10^8

ATLAS 実験

ヒッグス粒子の候補事象の例



$H \rightarrow \gamma\gamma$ 候補事象



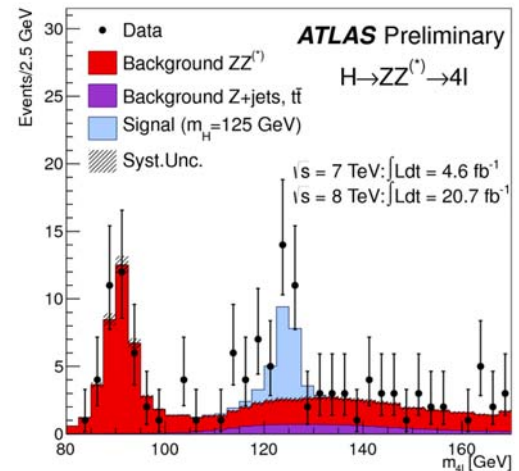
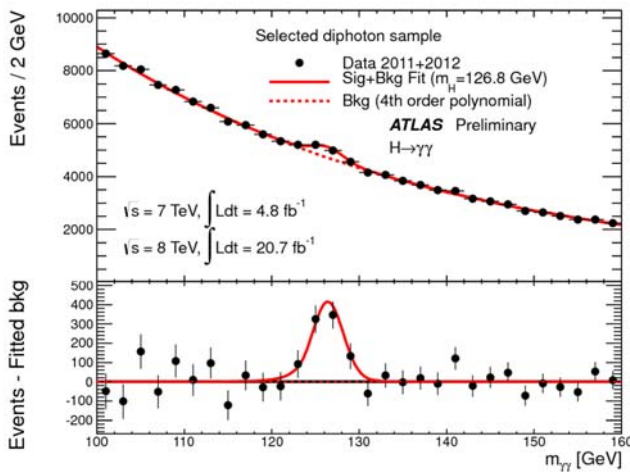
$H \rightarrow ZZ$ 候補事象

Higgs 探索

発見チャンネル

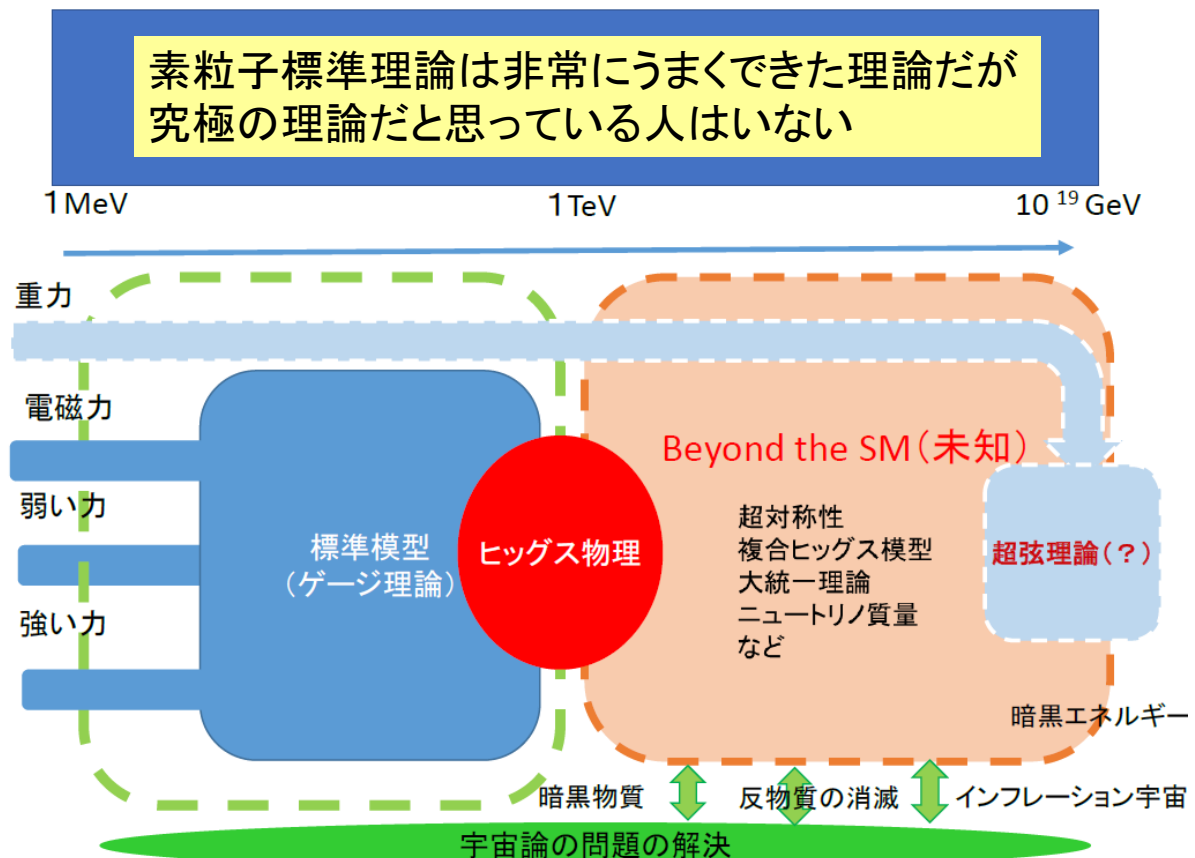
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



2012年夏： 125 GeV 付近に新粒子を発見

2013年夏： 新粒子 = ある種のヒッグス粒子であることが確定



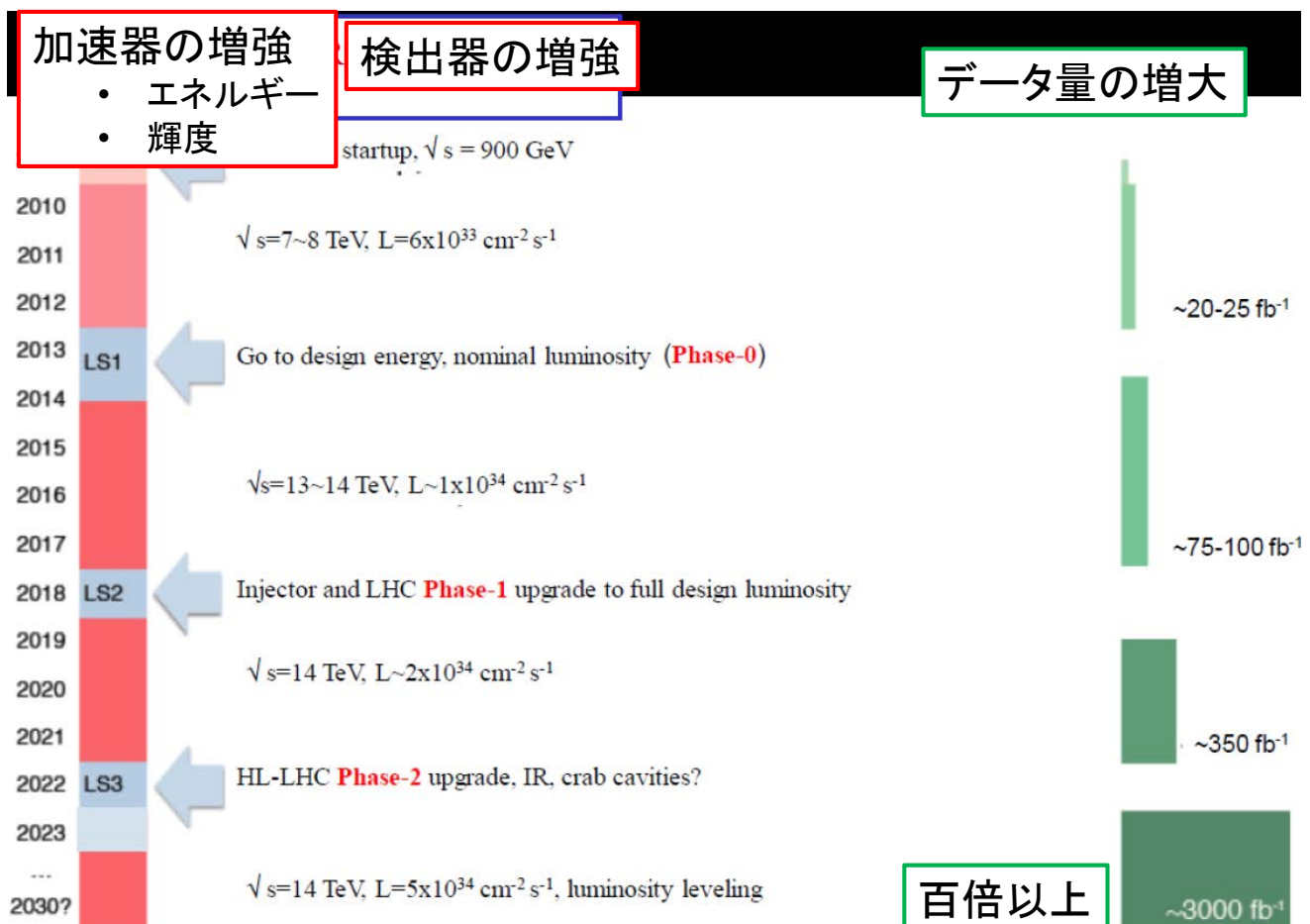
ヒッグスを手掛かりに未知の領域へ

ATLAS 実験の今後

- **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？
- **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**
2022年～ 加速器増強 輝度 10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）

3

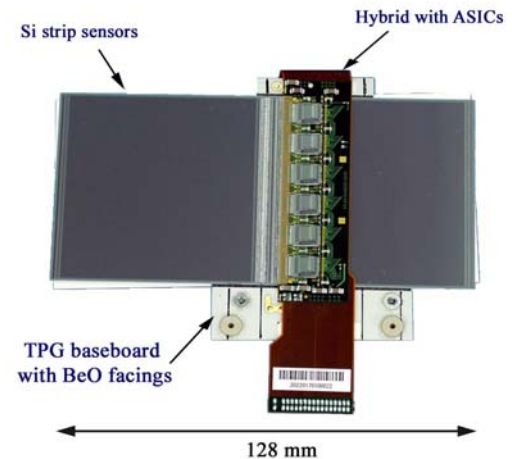
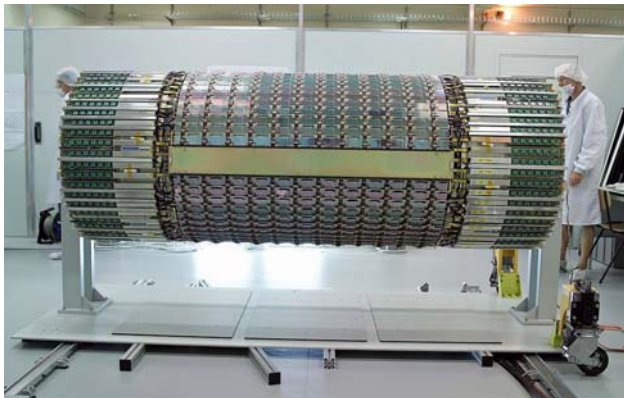


ATLAS 実験 検出器増強

高輝度環境への対応

→ 新型シリコン飛跡検出器の開発
高放射線耐性, 細分化

現行のシリコン検出器



素粒子構造部門：ニュートリノ研究

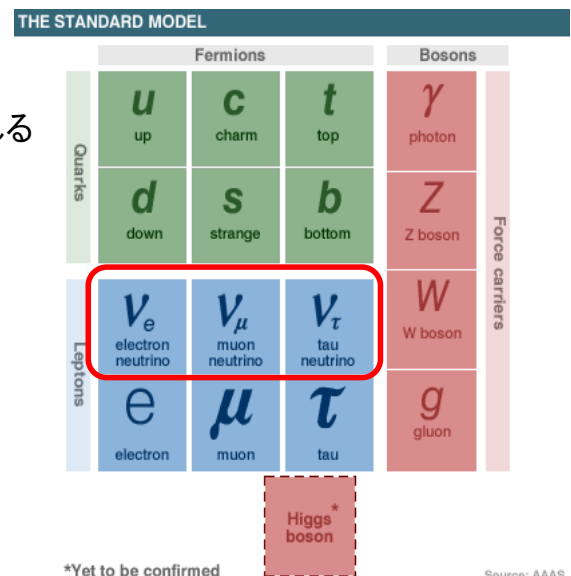
ニュートリノ:

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



- ◆ 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？

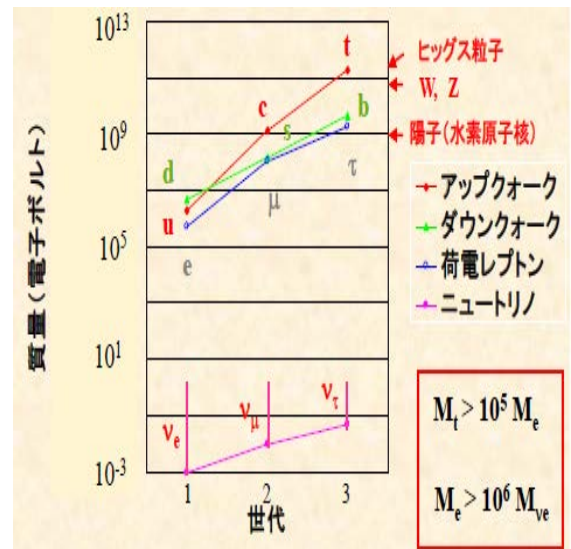
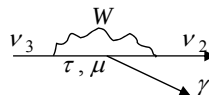
ニュートリノ質量の理解が先決

- 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 → 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

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



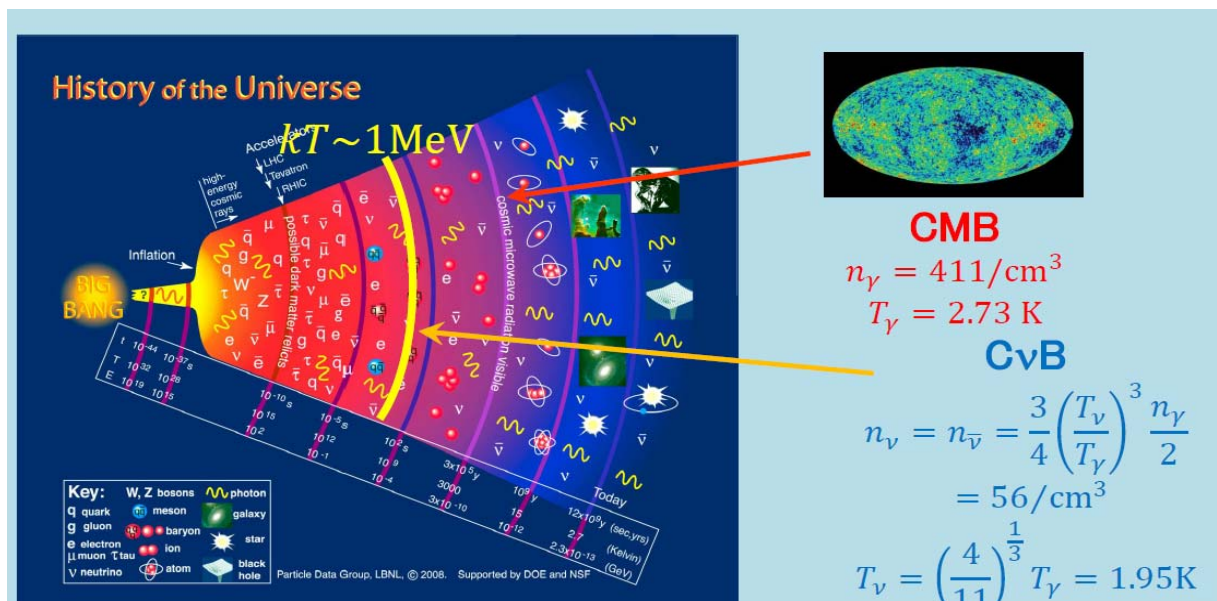
- ニュートリノ：寿命が長く、まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 = 10^{12} 年
探索には大量のニュートリノが必要
加速器で作るのは不十分
宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の解

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

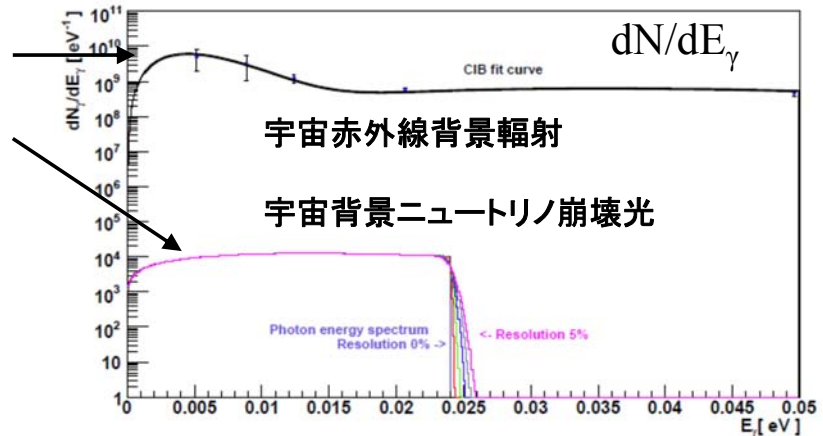
CνB：

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%



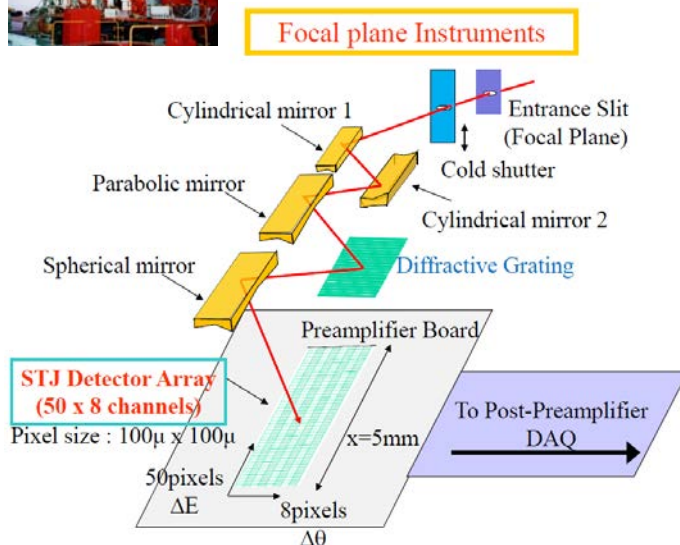
- 2%以下のエネルギー分解能が必要。
- 質量50meV, 寿命 $1.5 \times 10^{17}\text{年}$ (LR対称模型予言)の ν_3 の崩壊は 6.7σ で観測可能。
- 現在の寿命下限 (AKARI) $3 \times 10^{12}\text{年}$
S.H. Kim et al. JPSJ 81 (2012) 024101

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。200km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 ($\sim 10^{14}\text{年}$)

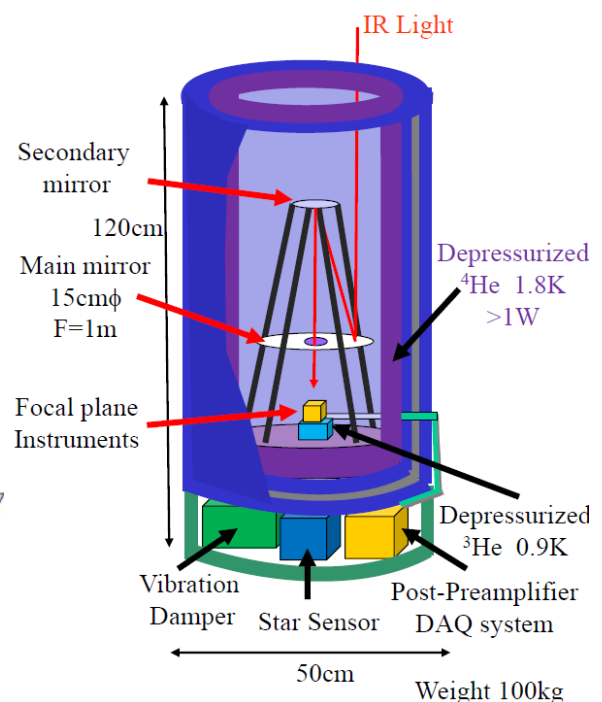
JAXA Rocket CIB Experiment
(Feb 2, 1992)



赤外線検出器部:

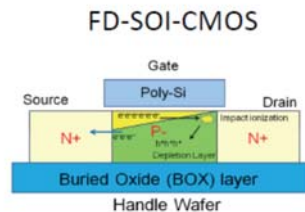
超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を用いる

高分解能, 信号微弱

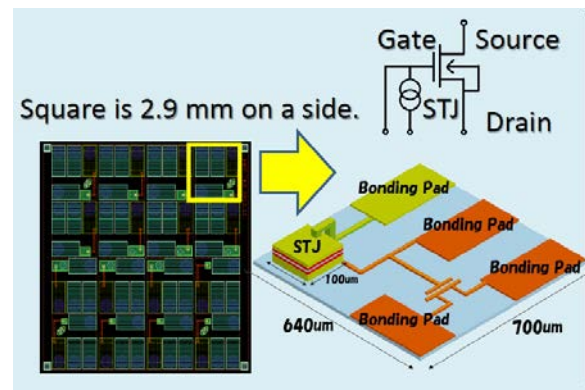


SOI-STJ 一体型検出器の試作・試験

SOI (Silicon-On-Insulator)前置増幅器：
極低温(0.9K)で作動する
低ノイズ前置増幅器。
Tsukuba-KEK-Lapis
が共同開発。

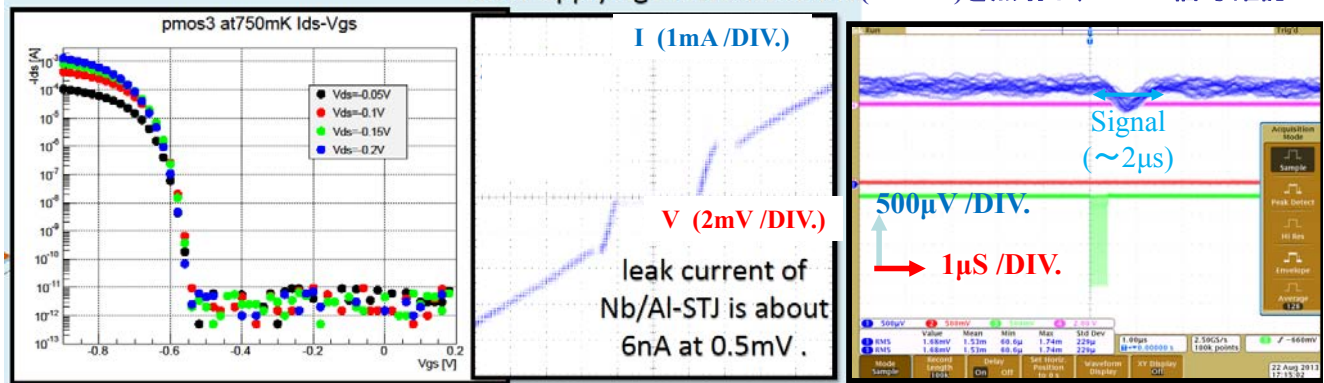


SOIトランジスタ基板の上に Nb/Al-STJ を作成
してSOI-STJ一体型検出器1号試作機を製作。
極低温(0.75K)でNb/Al-STJ検出器と
SOI MOSFETが共に正常に動作した。

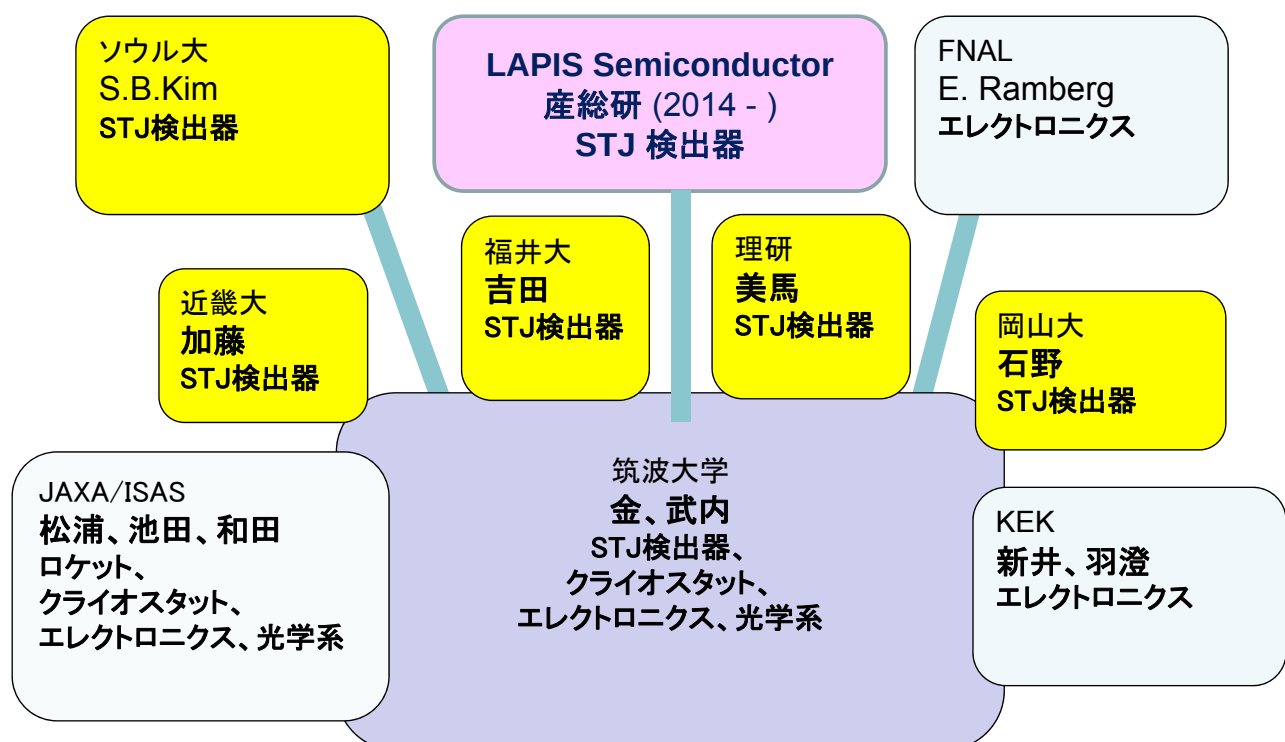


50 μ m角のSTJに可視光レーザー

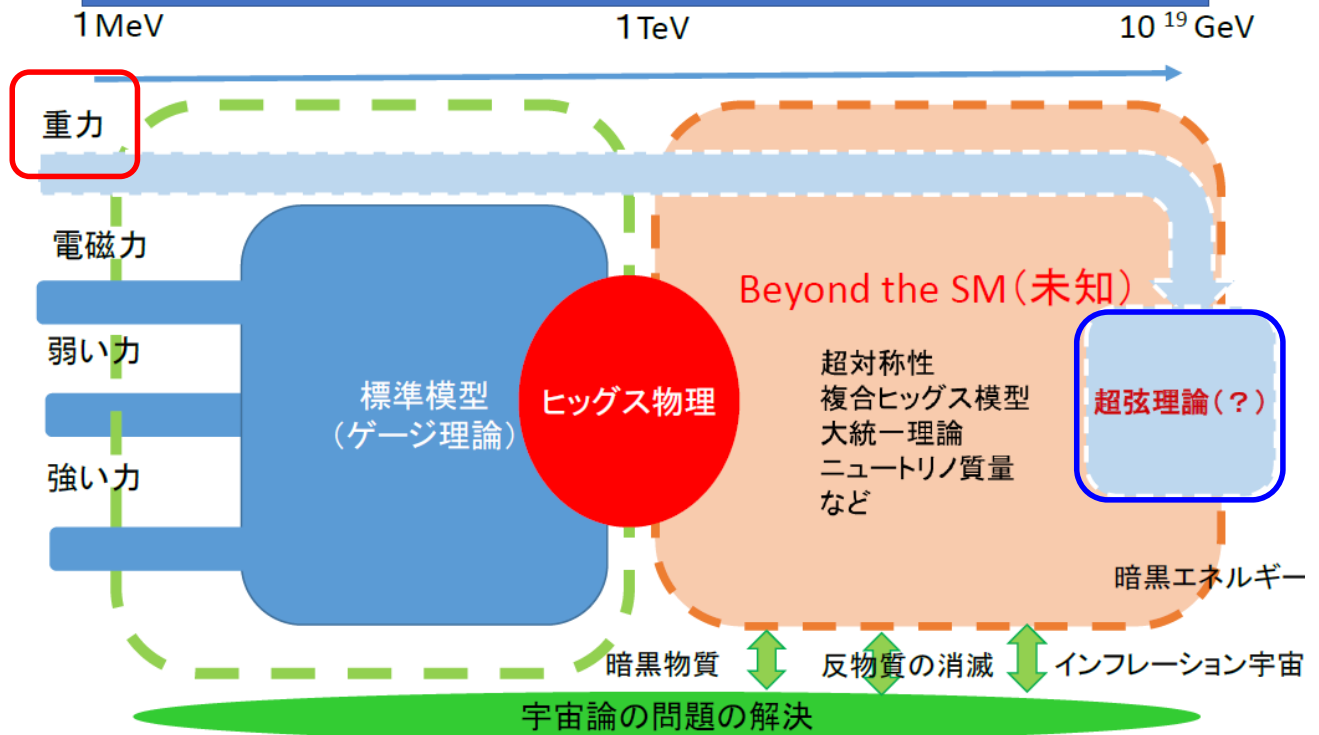
After applying 150 Gauss to STJ (465nm)を照射し、STJの信号確認



宇宙背景ニュートリノ崩壊探索研究グループ

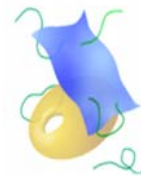


重力の量子論は、標準理論に含まれていない

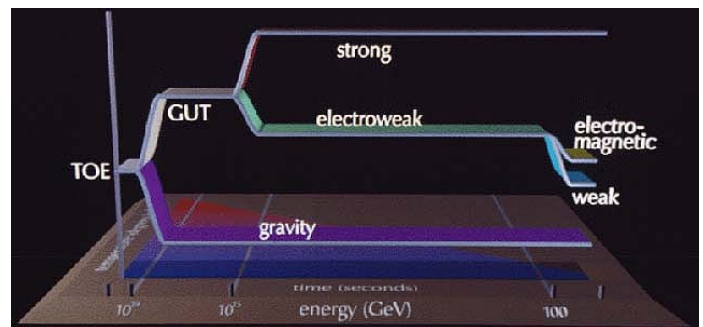


超弦理論の研究

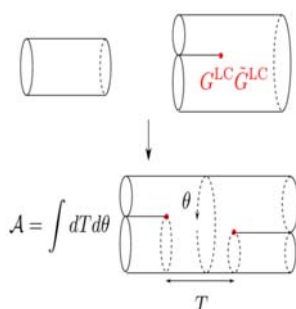
素粒子は点ではなく長さを持つ弦である



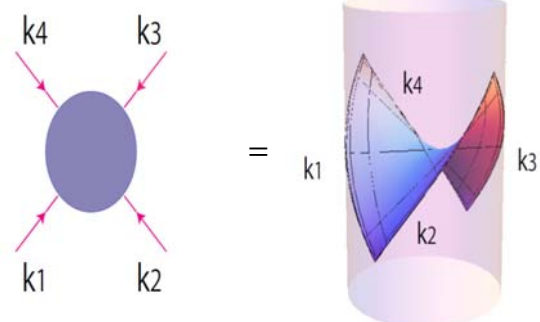
- 重力の量子論
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一
ヒッグス粒子の質量を説明する



◆ 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



素粒子構造部門の研究

拠点の session で詳細を

- 高エネルギー加速器を用いた陽子陽子衝突実験

欧州 CERN 研究所 LHC 加速器 ATLAS 実験

大規模な国際共同実験

ヒッグス粒子

原 和彦

本日 16:20

大川英希

明日 12:15

- 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索

筑波大学グループを主とする国際チームによる研究

ニュートリノ

武内勇司

明日 11:50

- 超弦理論の研究

重力の量子場の理論

4つの力の統一