

宇宙史国際研究拠点の活動報告

数理工質融合科学センター 運営協議会
2017年10月3日

宇宙史国際研究拠点長

受川 史彦 (2017/4 - 2017/9)
金 信弘 (2014/9 - 2017/3)

宇宙史国際研究拠点

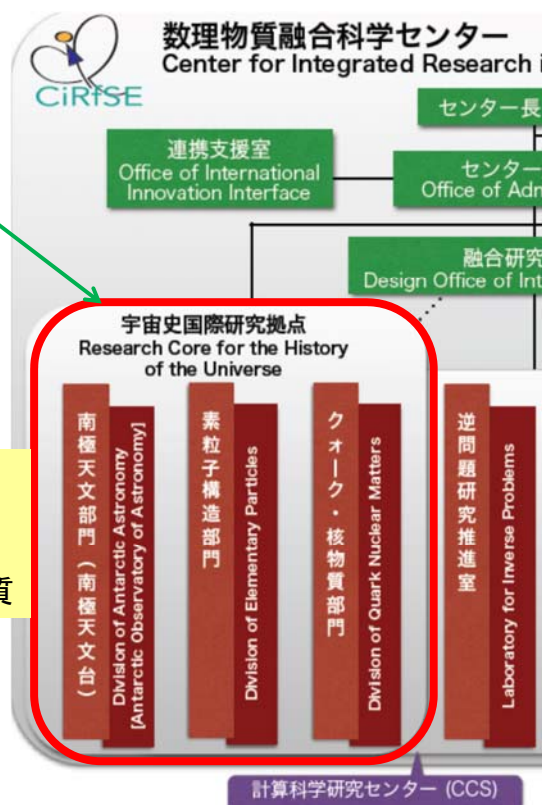
Research Core for the History of the Universe

数理工質融合科学センター

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



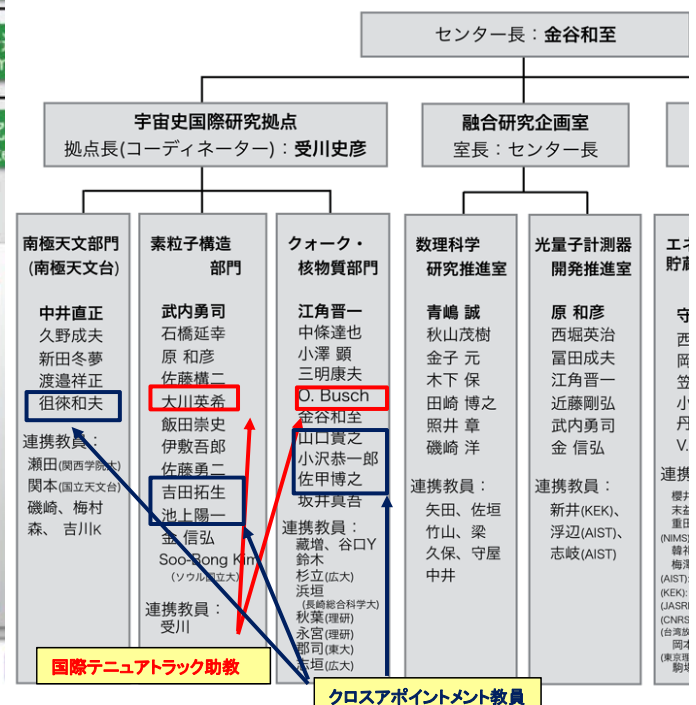
宇宙史国際研究拠点



3つの部門:

- ・ 南極天文
- ・ 素粒子構造
- ・ クォーク・核物質

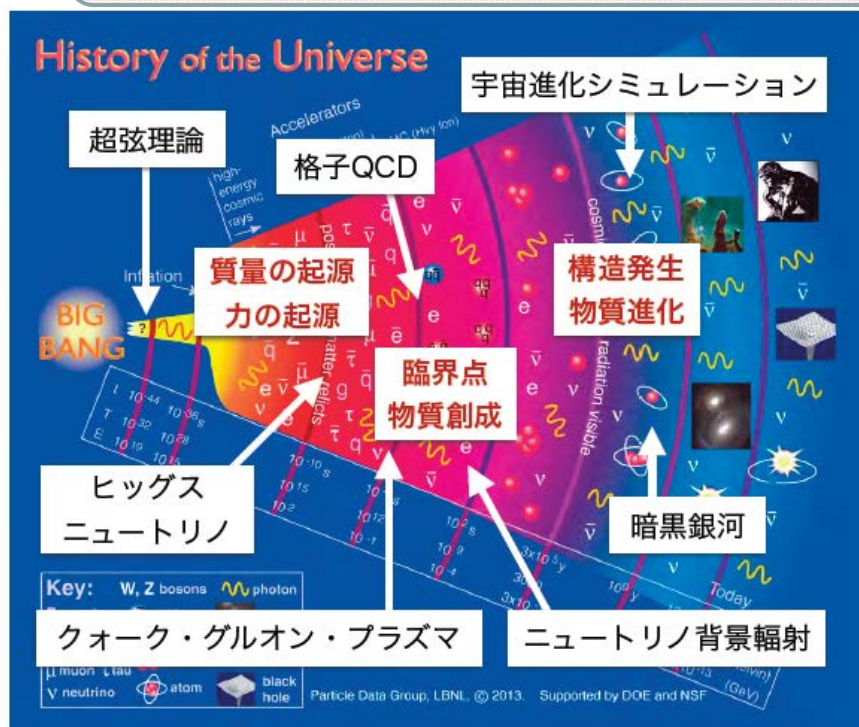
数理工質融合科学センター



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， 実験・理論の協調 → 宇宙史の統一的理解

宇宙史の統一的理解の構築
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

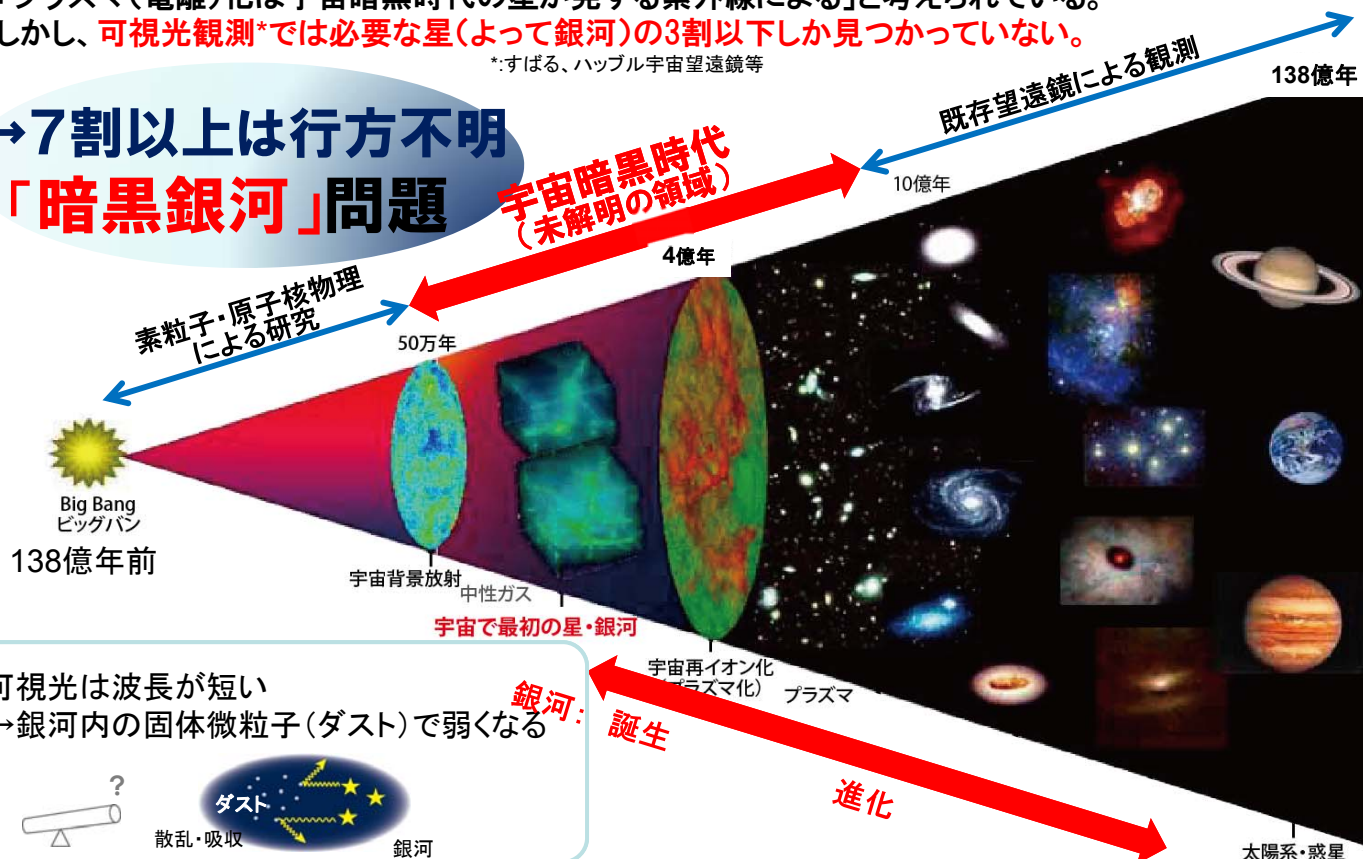
南極天文部門

南極天文学の創成
南極望遠鏡による暗黒銀河の探査

宇宙空間はほぼすべてがプラズマ(電離ガス)。
「プラズマ(電離)化は宇宙暗黒時代の星が発する紫外線による」と考えられている。
しかし、可視光観測*では必要な星(よって銀河)の3割以下しか見つかっていない。

*:すばる、ハッブル宇宙望遠鏡等

→7割以上は行方不明
「暗黒銀河」問題

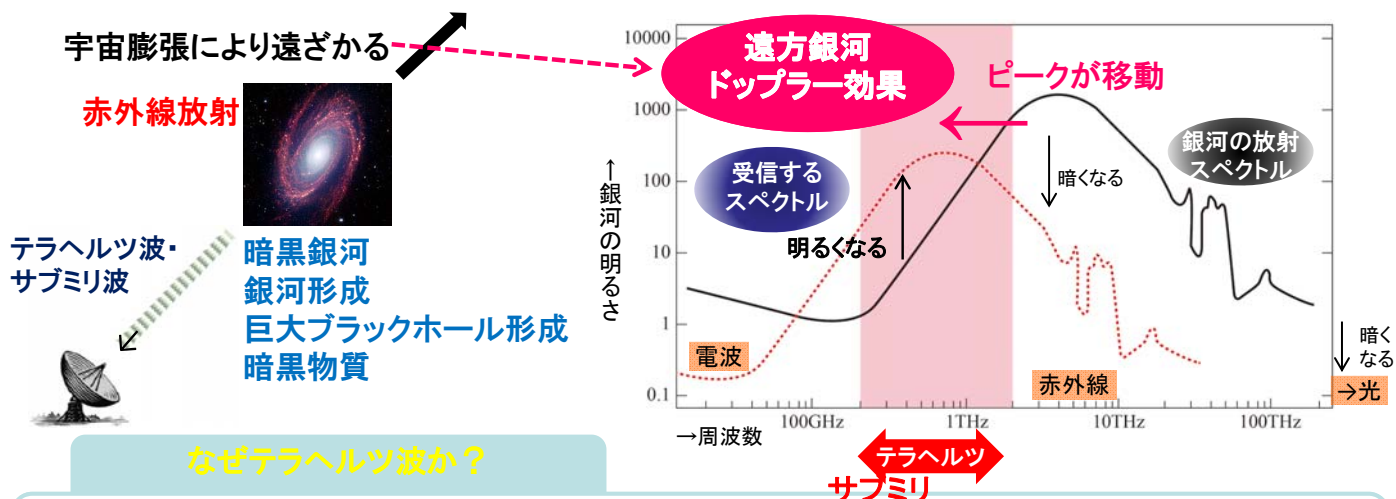


可視光は波長が短い
→銀河内の固体微粒子(ダスト)で弱くなる



ダスト
散乱・吸収
銀河

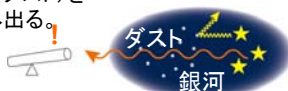
テラヘルツ観測による暗黒銀河の探査



なぜテラヘルツ波か？

①波長が長い

銀河内の固体微粒子(ダスト)をすり抜けて銀河の外へ出る。



②銀河は赤外線で最も明るい

宇宙膨張に乗って遠ざかっている遠方銀河から放射された赤外線は、ドップラー効果で地上ではテラヘルツ波となる。

③テラヘルツ波では遠方銀河は暗くならない！

むしろ明るくなることもある。

●「暗黒銀河」探索には、テラヘルツ波で観測するのがベスト

●スペクトルも決定

・ピークの移動量→銀河の距離を決定

しかし

大気中の水蒸気に吸収されて地上では観測できなかった

5

南極内陸部は地上唯一の観測場所

①南極内陸部：水蒸気の影響が非常に少ない地上で唯一の場所

◆高地(3000m~4000m、空気が薄い)

◆極寒の地(気温 $-20^{\circ}\text{C} \sim -80^{\circ}\text{C}$)

→大気中の水蒸気が極めて少ない

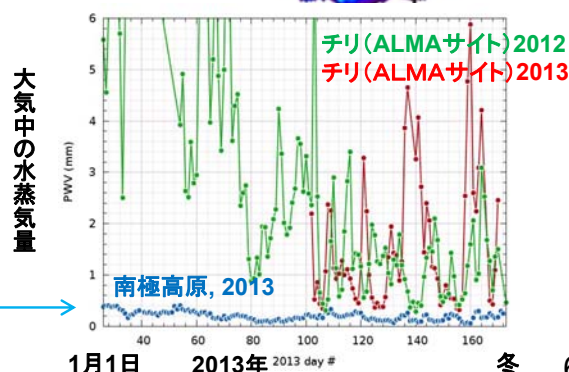
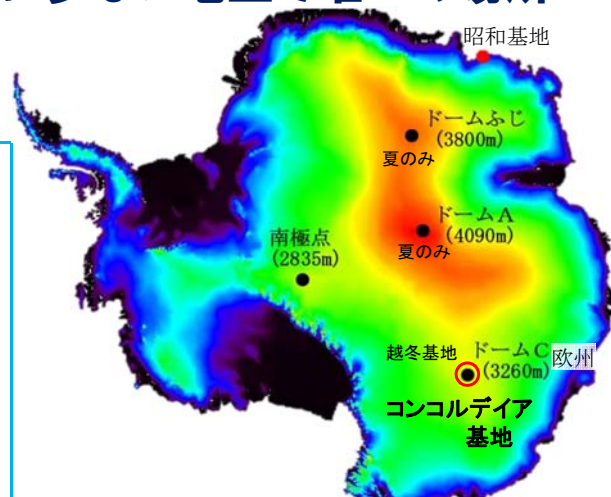
- ・宇宙からのテラヘルツ波が地上で唯一届く
- ・大気放射(ノイズ)が非常に少ない
- ・大気が安定

②越冬基地(ドームC)がある

→ここにテラヘルツ望遠鏡を設置し観測すればよい

10mテラヘルツ望遠鏡

- ・口径10m
- ・超広視野(1度四方=従来の100倍)
- ・世界最大の電波カメラ(2万画素)
- ・高精度
アンテナ主鏡面の凹凸 $<0.02\text{mm}$
(髪の毛の太さの約4分の1以下)

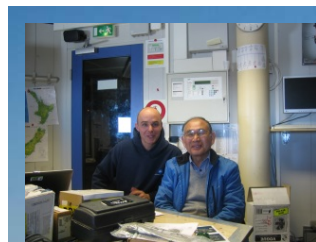


建設場所

コンコルディア基地@ドームC

- ・フランス・イタリアが共同で運用
- ・越冬基地(定員16名)(夏は60名)
- ・設備・運用が非常に優れている。
- ・重機(130トンクレーン等)あり。

南極10mテラヘルツ望遠鏡の設置を合意



現地調査・協議
2016年1月～2月



ダゲラス DC3



宿泊研究棟

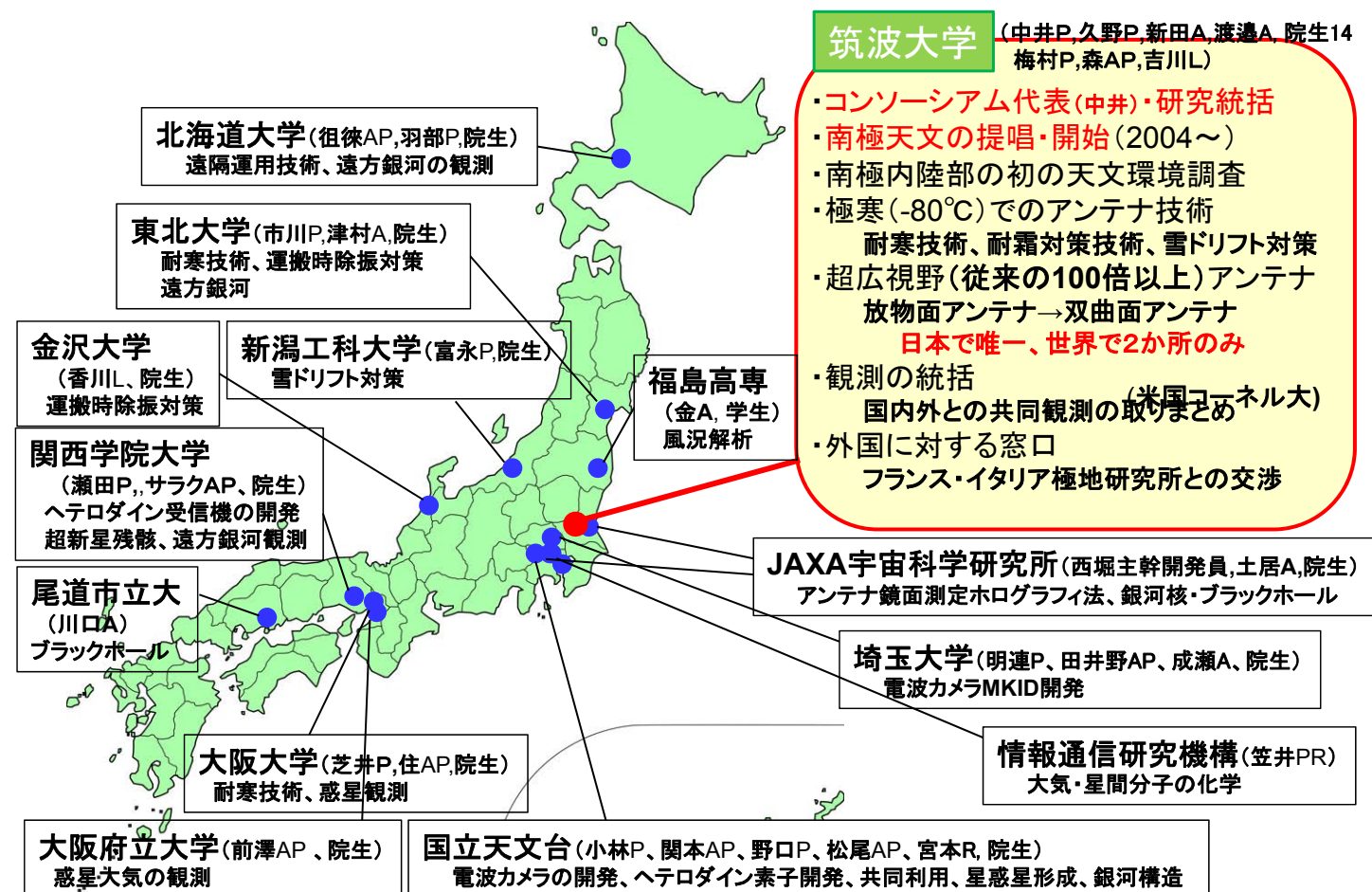
滑走路

小型望遠鏡群
(仏伊)

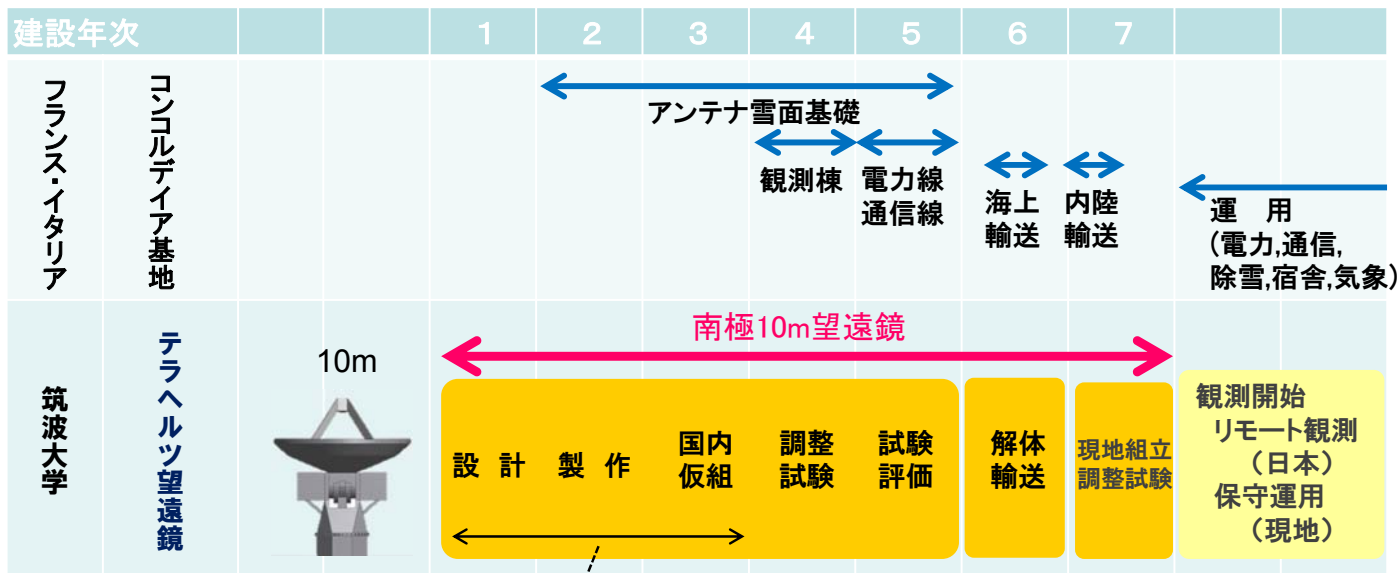
電力線→

10m望遠鏡
建設候補地

推進体制ー南極天文コンソーシアム



建設計画



建設経費： 26億円／7年

概算要求： 当初18億円／3年（アンテナ製造経費）

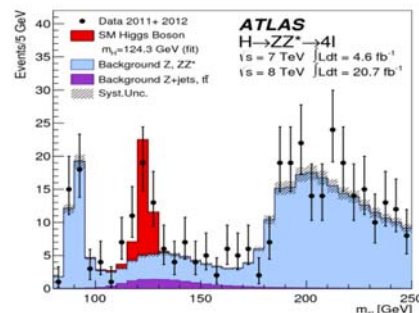
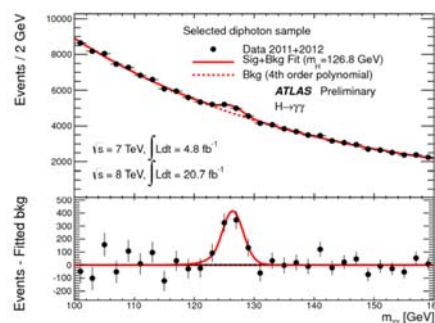
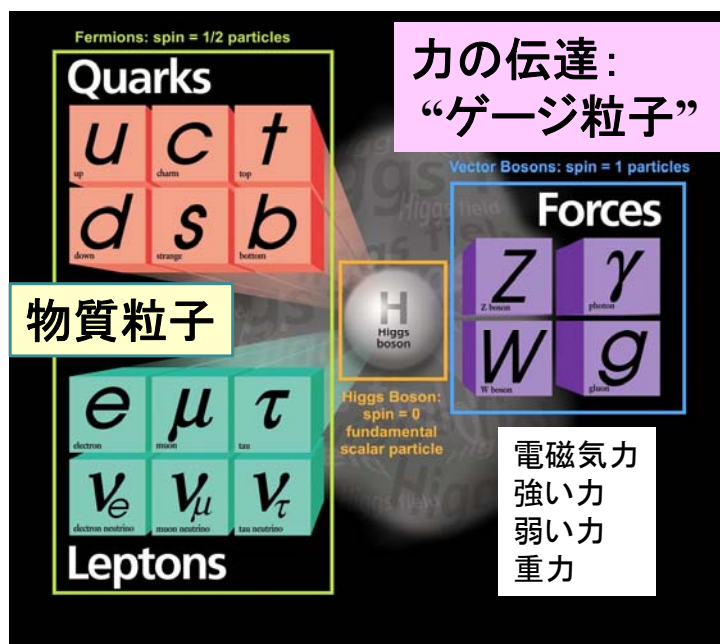
・・・鋭意、努力中

当該分野・一般の理解、強い支持支援：

- ・当該天文分野の推薦→日本学術会議「大型計画マスターマップ」
- ・全国26か所講演会→文科大臣宛署名2000名以上
- ・寄付金(クラウドファンディング)→1230万円(目標額1000万円)

9

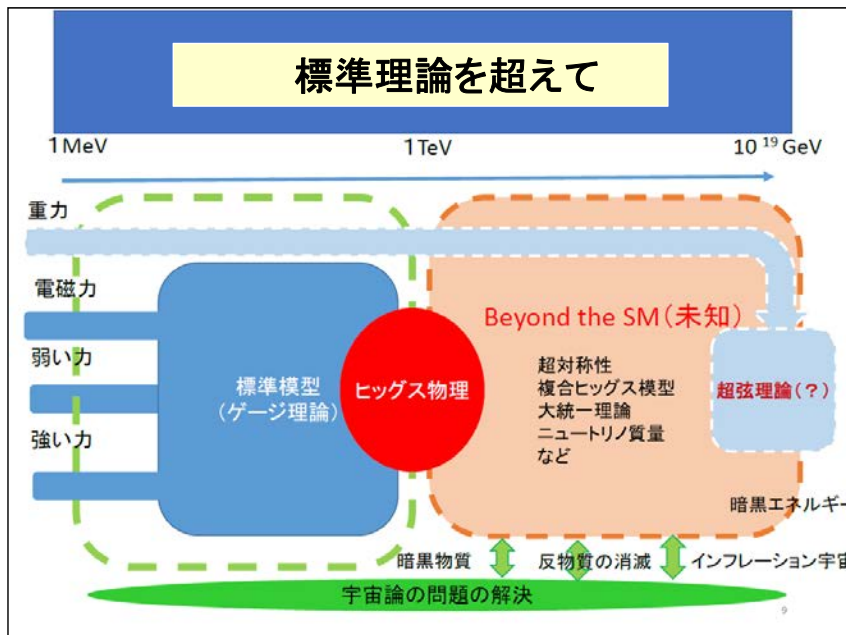
素粒子構造部門 CERN ATLAS 実験 ヒッグス粒子研究



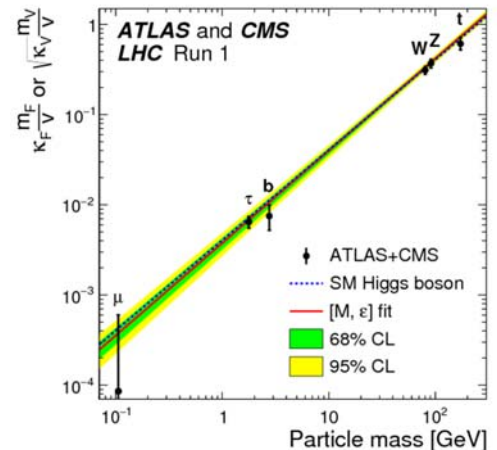
相対論的な量子場の理論により定式化： **素粒子標準理論**
理論の整合性のために **ヒッグス粒子** が必要（1960年代に予言）
長いこと探索していた → 2012年に発見

なぜヒッグス粒子 か？

標準理論を超える物理があるはず
ヒッグス粒子が鍵をにぎる



- 新粒子・新現象の直接探索
超対称粒子
余剰次元
暗黒物質粒子
- ヒッグス粒子の精査
種々の粒子との結合
未知粒子への崩壊



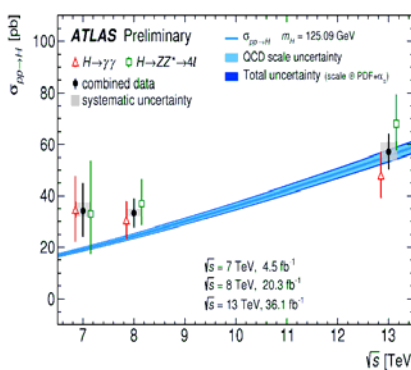
11

素粒子構造部門 2014 - 2017

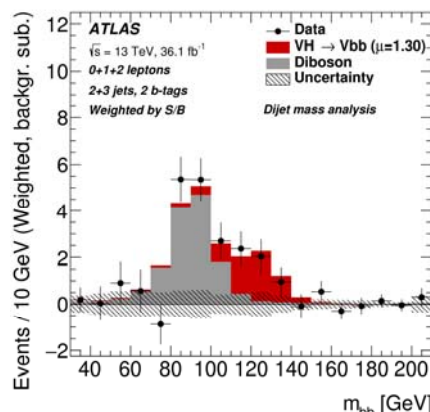
- LHC-ATLAS 実験 陽子・陽子衝突 CERN 研究所
- Run-2 実験 2015 - 継続中
- 重心系エネルギー 13 TeV
- 積分輝度 $\sim 64 \text{ fb}^{-1}$ 瞬間輝度 $1.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ヒッグス粒子: 発見から精査へ

生成断面積 vs. $\sqrt{s}$



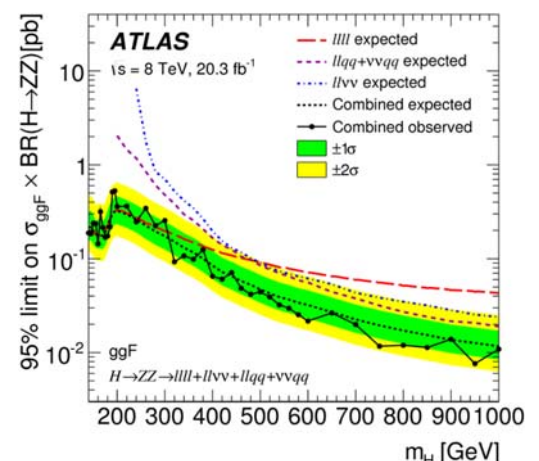
H → b b-bar の初観測



他に:

t t-bar H 過程による生成
不可視粒子への崩壊

新物理の探索: 重いヒッグス → Z Z

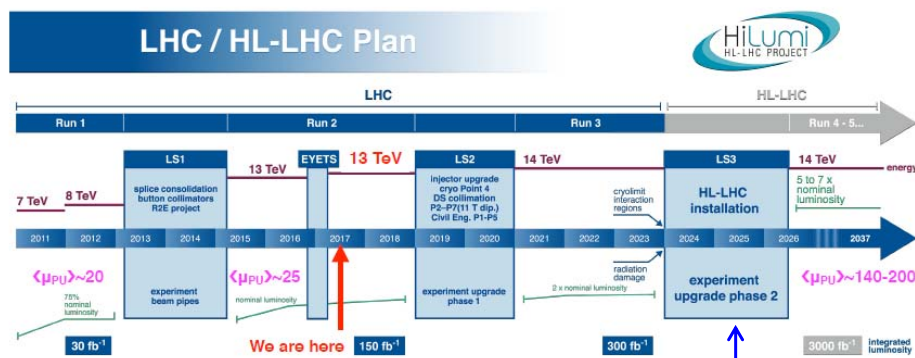


一時、質量 700 GeV/c² 付近に
excess → 消えた

125 GeV のヒッグス粒子： 標準理論の予言する(唯一無二の)ヒッグスと無矛盾
他の直接探索(超対称粒子など)も、これまでのところ兆候は無し

➔ データ蓄積を継続し、より精密な測定、探索範囲の拡大

➔ 2020年代半ばに LHC 加速器の大幅増強 Hi-Lumi LHC (輝度が一桁向上)

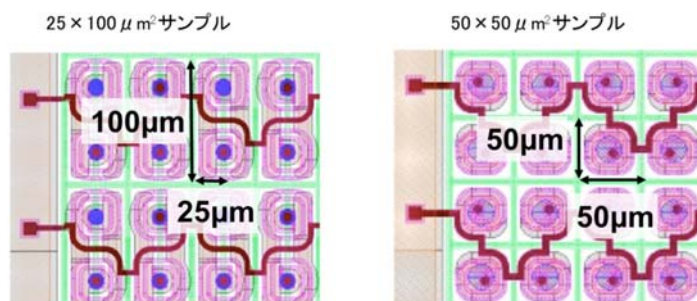


ATLAS 検出器： 高輝度に対応するための増強(入れ換え)が必要

新型シリコン飛跡検出器 (ピクセル型, ストリップ型)

KEK 等と共同で開発・性能評価

➔ 実機製作に向けた最終設計



13

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

● 素粒子の質量がなぜ11桁以上も異なるのか？

● 同じ性質の(質量のみ異なる)粒子の繰り返し：

ニュートリノ質量の理解が先決

➢ まだ測定されていない

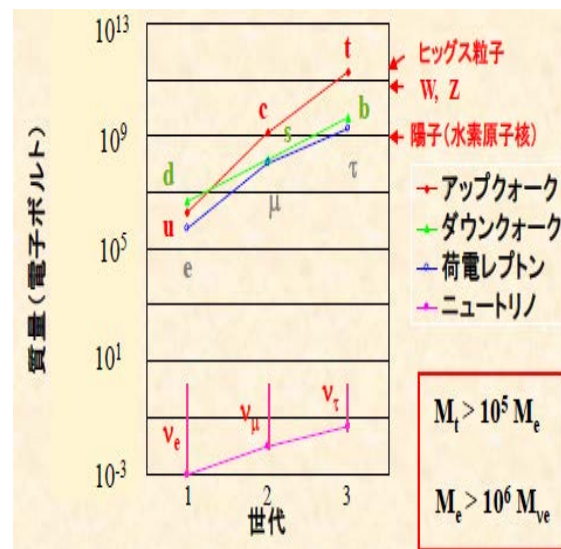
➢ 質量二乗差 Δm^2 はニュートリノ振動実験により既知

本事業：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

宇宙背景ニュートリノ の発見

それぞれが
ノーベル賞級の発見

14

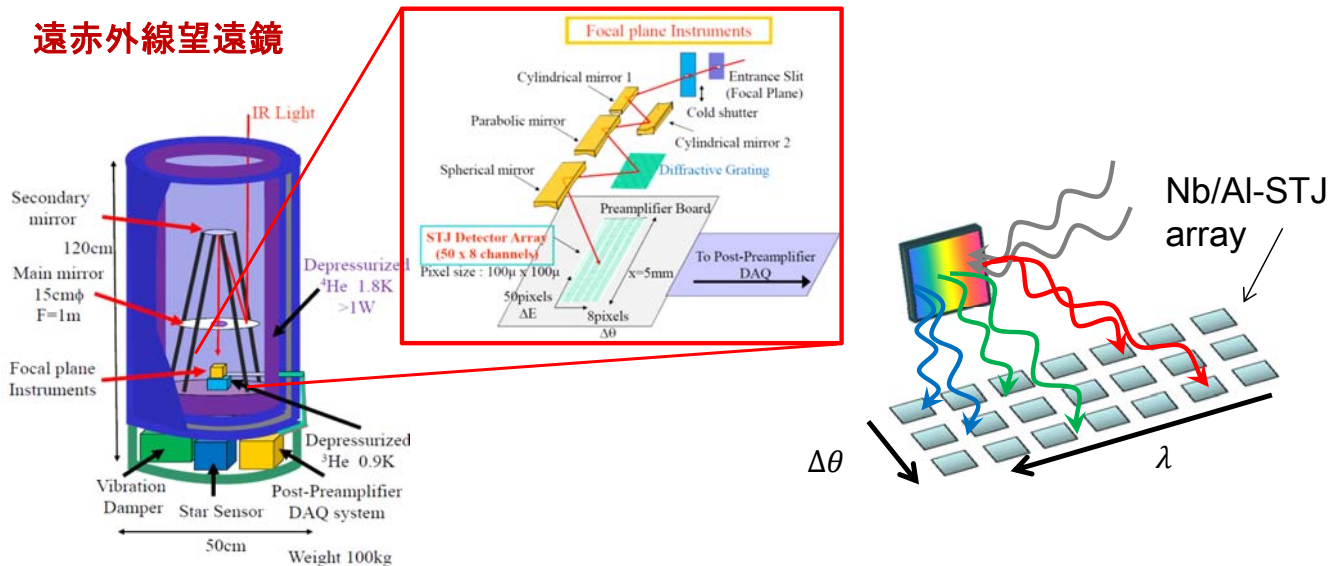
宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験・衛星実験

ロケット実験計画: 2019年に高度200 kmで5分間データ収集

ニュートリノ寿命が 10^{14} 年以下なら観測可能 (現在の寿命下限は 3×10^{12} 年).

»超伝導トンネル接合素子(STJ) 赤外線検出器を開発

50 Nb/Al-STJ ピクセルアレイと回折格子で遠赤外線のエネルギー測定



2020以降に衛星実験 → 寿命 $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年なら観測可能

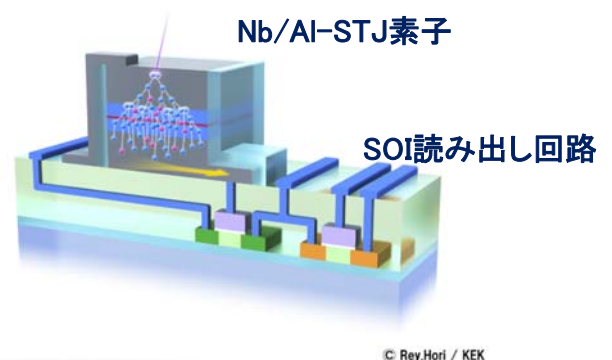
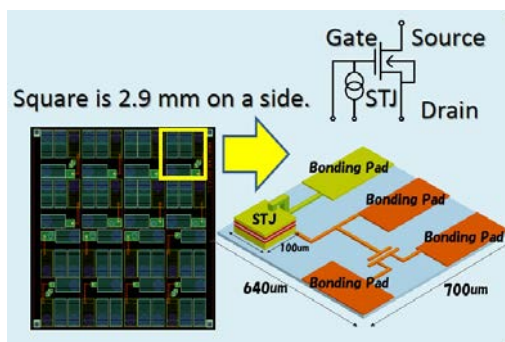
> Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験 (S. H. Kim et al. JPSJ 81, 024101 (2012))

● ハフニウムの超伝導エネルギーギャップ 小 → 回折格子なしのエネルギー測定が可能

15

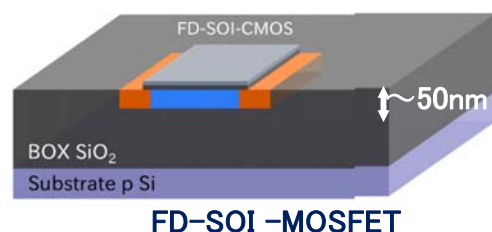
超伝導トンネル接合素子STJ検出器の開発

1. **SOI-STJ:** 筑波大, KEK, 産総研等との共同研究で, SOI(Silicon-On-Insulator)技術を用いた極低温増幅器と超伝導トンネル接合素子STJを一体化したSOI-STJ検出器を開発中



+ SOI (Silicon-On-Insulator) 技術
MOSFET4Kで動作
(by T. Wada (JAXA) et al. J. Low Temp Phys. 167 602 (2012))

+ SOI回路と一体化したSTJ検出器
Nb/Al-STJをSOI回路基板上に作成



SiO₂絶縁膜上にMOSFETを形成→非常に薄いチャンネル層
3K以下の極低温でも動作

2. **Hf-STJ:** 筑波大, KEK等との共同研究で, Hfを用いた超伝導トンネル接合素子Hf-STJを開発中

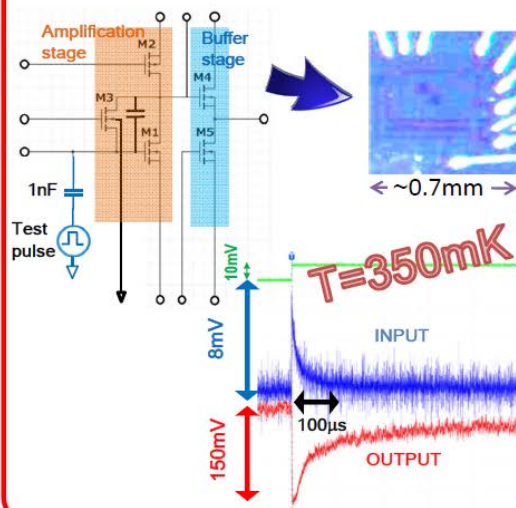
16

遠赤外一光子検出のための超伝導検出器の開発(2014-2017)

SOI極低温アンプの開発

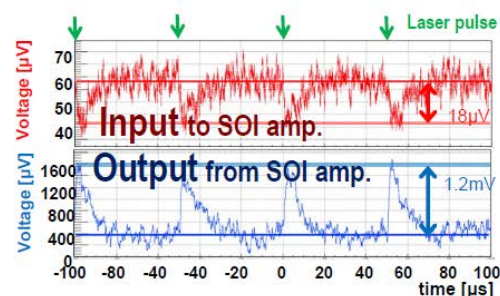
SOI(Silicon-on-Insulator)技術を用いて作製された増幅回路の極低温動作実証テスト

冷凍機内極低温下でパルス信号増幅を確認



超伝導トンネル接合素子Nb/Al-STJ 信号を冷凍機内極低温下で増幅

産総研CRAVITY製20μm角Nb/Al-STJの可視光(465nm)パルスに対する応答信号を冷凍機内極低温部に配置したSOI増幅回路によって増幅読み出しを行う実証試験に成功



今後の展望：極低温アンプによるSTJ信号の究極低ノイズ読み出しの実現

- ・ 冷凍機内部の極低温下での増幅によるS/N改善を実証
- ・ SOI極低温オペアンプなど、より実用的な増幅回路の開発

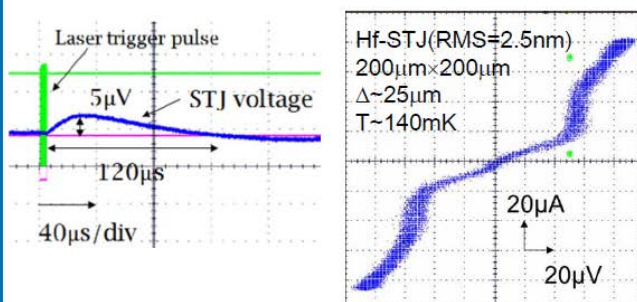
17

Hf STJ 将来の衛星実験に向けた順調な進展あり

遠赤外一光子検出のための超伝導検出器の開発(2014-2017)

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に低減し、リーク電流を5μA(200μm角, T=128mK)を達成。このサンプルで可視光パルス(465nm)応答を確認(左)



ハフニウム薄膜形成の条件を変更し、表面粗さの小さい条件(RMS=2.5nm)のハフニウム薄膜を用いたHf-STJを作製。アルミニウム層を用いないHf-STJにおいても同等のリーク電流7μA(200μm角, T=140mK)を達成(右)

今後の展望：Hf-STJの実用化による世界最高感度の光検出器の実現

- ・ 熱励起によるリーク電流を低減するためにより低い温度での測定を目指す。
- ・ STJのサイズを小さくし、リーク電流を目指す。

18

Schedule of COBAND project



Japanese FY	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Setup design	Satellite exp.				Rocket exp.		
	Rocket exp.						
STJ detector	Nb/Al-STJ (SOI-STJ) R&D		Production				
	Hf-STJ R&D						
Cryogenic electronics, readout circuit	R&D		Production				Design
Optics	Design		Production				Design
Rocket-borne refrig.	Design		Production				Design
Measurement Analysis	Analysis tool devel.				Analysis		
	Simulation						

14

14

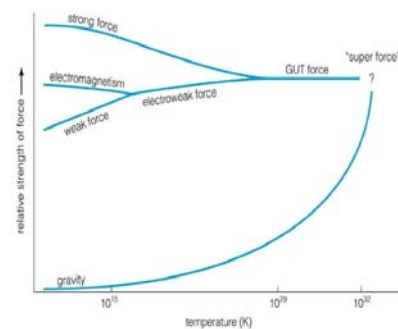
19

素粒子構造部門: 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
ヒ格斯粒子の質量を説明する

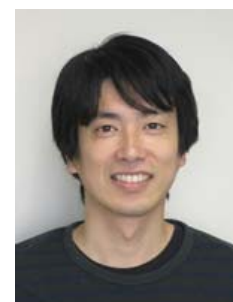


Copyright © 2014 Pearson Education, publishing as Addison-Wesley

伊敷吾郎

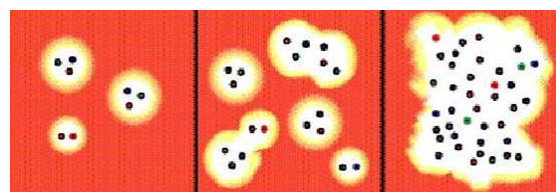
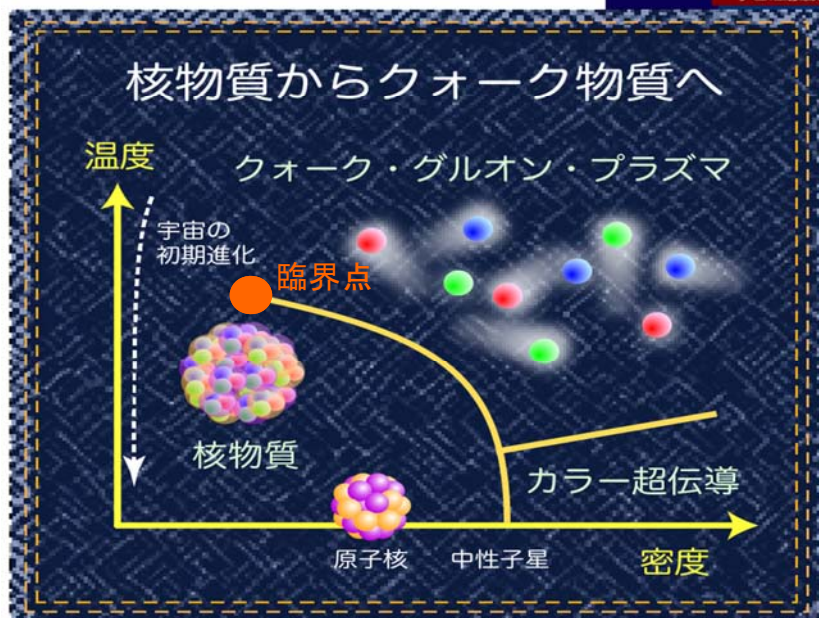
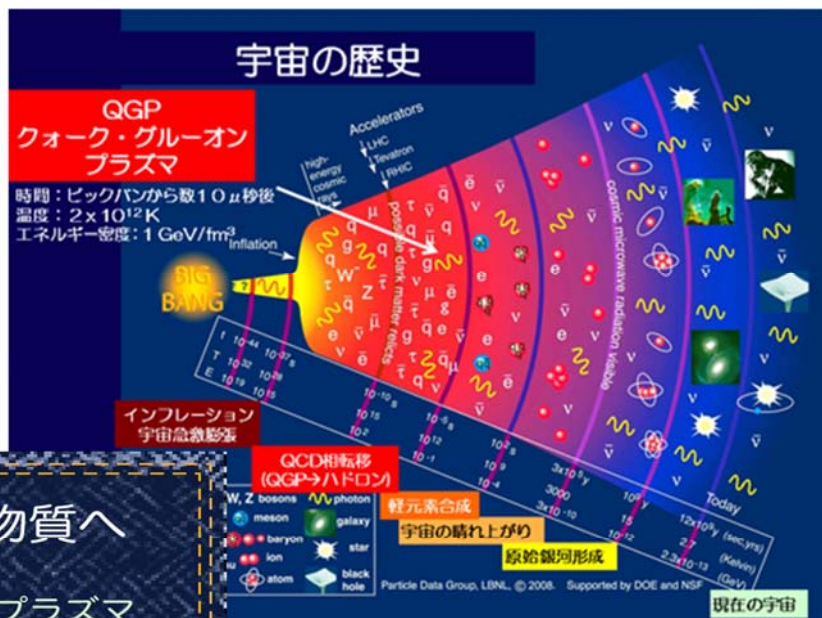
第12回(2017年度) 素粒子メダル奨励賞 受賞

"Emergent bubbling geometries in the plane wave matrix model", JHEP 1405 (2014) 075



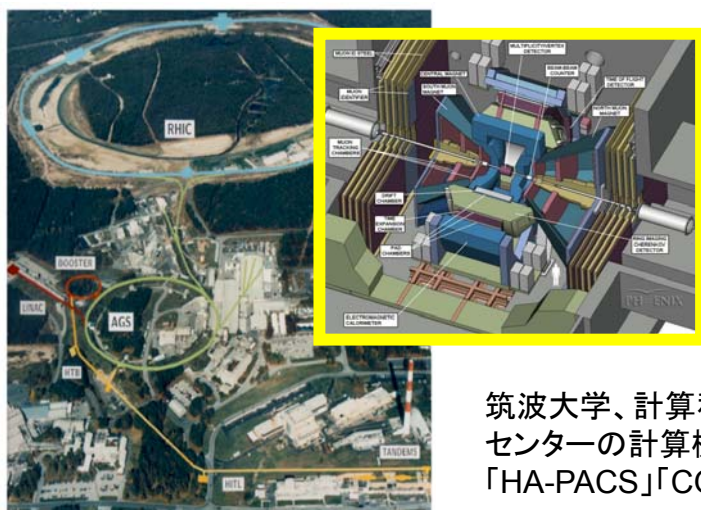
数理物質融合科学センター
宇宙史国際研究拠点
クォーク・核物質部門

新たな物質相の研究
クォーク・グルーオン・プラズマ
Quark Gluon Plasma (QGP) 研究



ハドロン相からクォーク相への相転移

アメリカ合衆国、ニューヨーク郊外、
ブルックヘブン国立研究所(BNL)、
超相対論的重イオン加速器(RHIC)
を使ったPHENIX実験



スイス・フランス国境のジュネーブ郊外、
欧州共同原子核研究機構(CERN)、
LHC加速器を使ったALICE実験



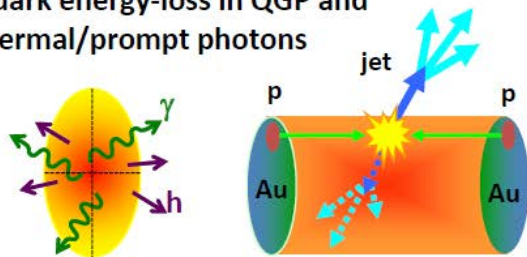
筑波大学、計算科学研究
センターの計算機システム:
「HA-PACS」「COMA」等



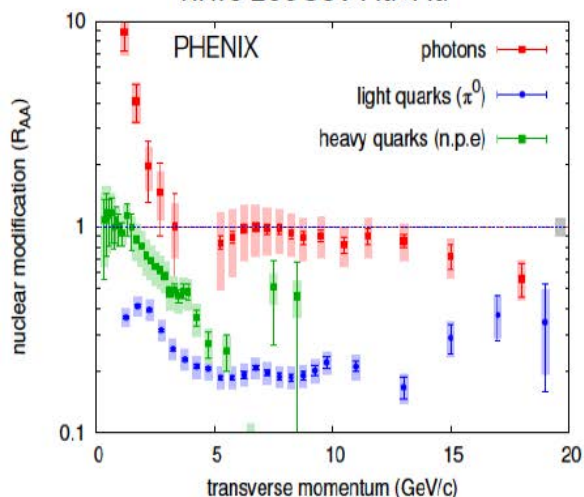
種々の測定による QGP 生成の証拠

ハドロン生成の抑制 / 光子の非抑制

Quark energy-loss in QGP and thermal/prompt photons

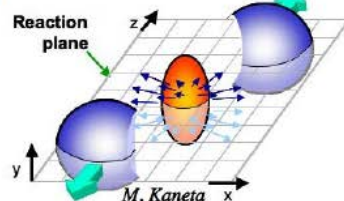


RHIC 200GeV Au+Au

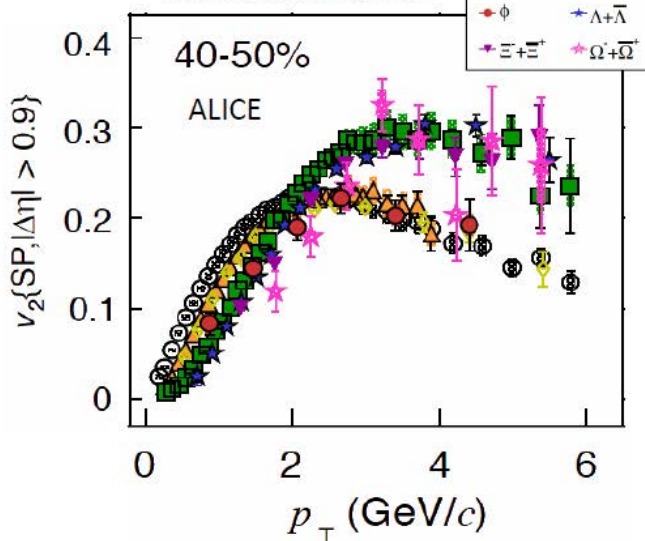


ハドロン生成の非等方性

Collective expansion of QGP - elliptic flow



LHC 2.75TeV Pb+Pb

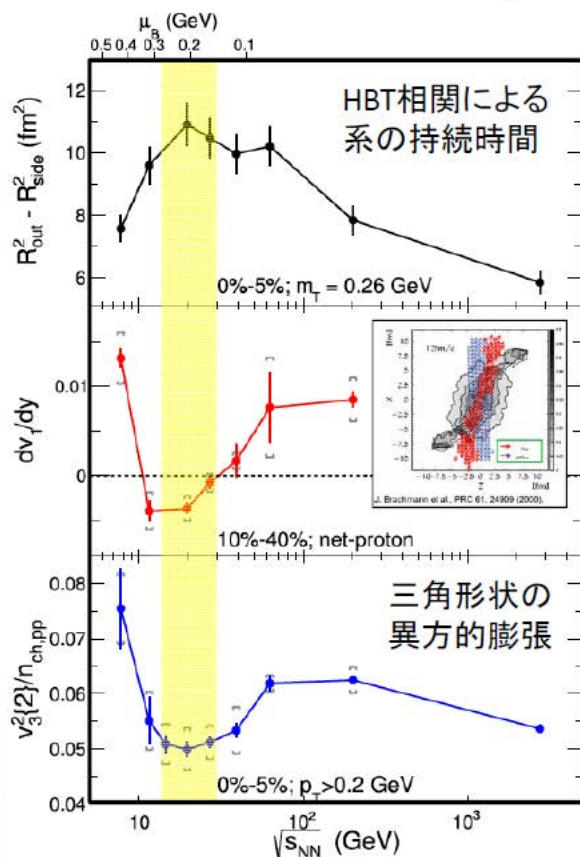


23

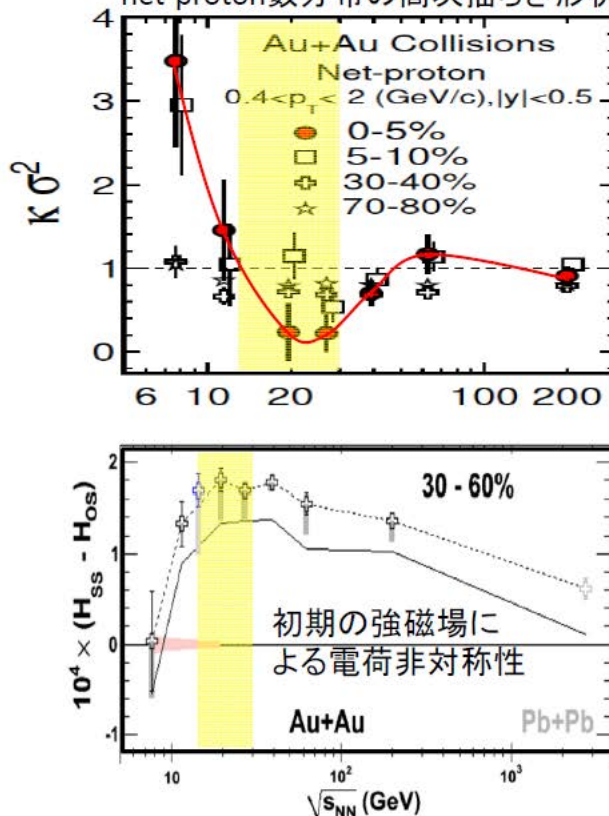
臨界点を示唆？

種々の物理量の衝突エネルギー依存性

Possible signatures of Critical Point



net-proton数分布の高次揺らぎ形状

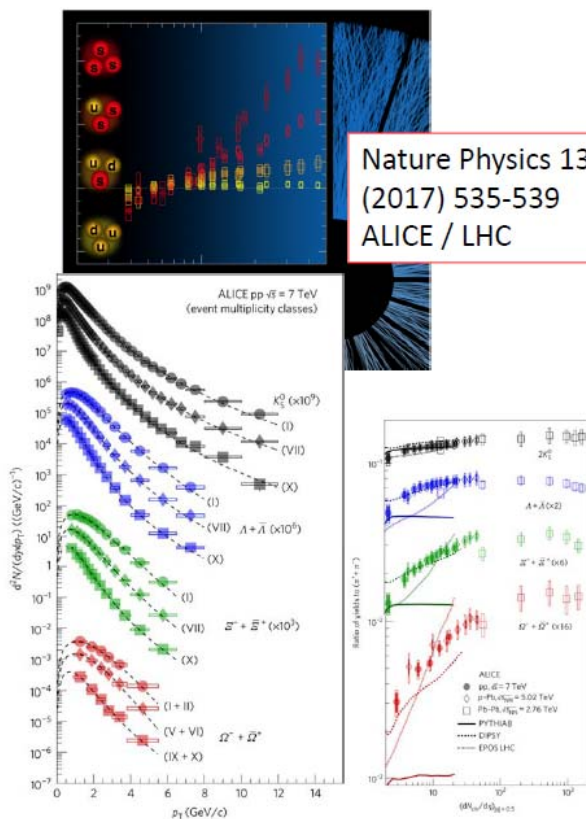


24

Strange 粒子の生成・偏極度

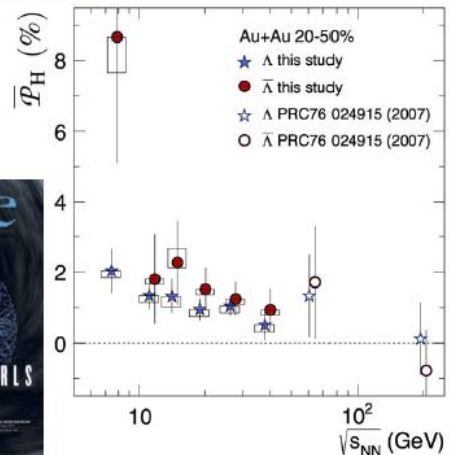
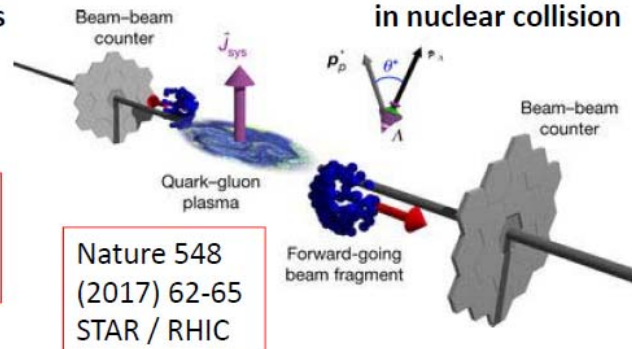
陽子陽子衝突における QGP の兆候を観測

Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions



QGP 由来と思われる偏極を初めて観測

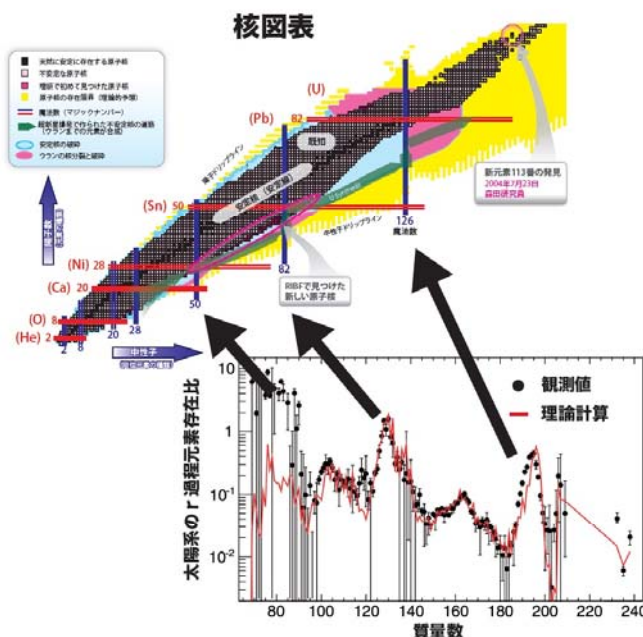
Global Λ hyperon polarization in nuclear collision



25

不安定核・元素合成

中性子過剰核の質量測定による宇宙元素合成解明への挑戦（原子核実験低エネルギーグループ）



理研 RIBF



希少 RI リング (Rare-RI Ring)



恒星内元素合成では鉄 (26 番) までしか生成されないのに、何故ウラン (92 番) や金 (79 番) などの重元素が存在しているのだろうか？爆発的要素合成 (r 過程) が起こった証拠。(超新星爆発、中性子星合体？) r 過程はどのような経路を通ったのかは謎のまま。

中性子過剰核の質量測定により r 過程の経路を決定する。

中性子過剰な原子核ほど寿命が短い (0.1 秒以下)。加速器を用いて中性子過剰核を生成し (光速の 50~70%)、崩壊する前に飛行時間 (1 ミリ秒) の測定から質量を決定する。

本格的な実験を開始

26

宇宙史国際研究拠点の研究成果のまとめ（3年間）

（部門別）

南極天文部門

論文数 48

国際会議報告数(国内研究会報告数) 22 (112)

素粒子構造部門

論文数 409

国際会議報告数(国内研究会報告数) 60 (120)

クォーク核物質部門

論文数 203

国際会議報告数(国内研究会報告数) 63 (64)

27

大型科研費・外部資金の獲得状況と計画申請

素粒子

ニュートリノ

新学術領域「ニュートリノ」計画研究（代表 金） H25～H29 7800万円

挑戦的萌芽「SOI-STJ」（代表 武内） H28～H30 351万円

基盤(S)「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験」(代表 金) H30～ 1.95億円

基盤(A)「SOI-STJ 開発と sub-GeV 暗黒物質探索への応用」(代表 武内) H30～ 4610万円

日米科学技術協力事業「Developments of far-infrared photo-detectors based on superconductors for the cosmic background neutrino decay search」(代表 武内) H30 2000万円

ヒッグス

新学術領域「ヒッグス」計画研究 （分担 受川） H23～H27 5000万円

新学術領域「真空と時空」計画研究 （分担 受川） H28～H32 約4200万円

原子核

QGP

日米科学技術協力事業「PHENIX実験」（代表 江角） H23～ 累計～1億円

基盤(B)「グルオン衝撃波の探索」(代表 三明) H25～H28 1430万円

基盤(B)「Di-jet 識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索」(代表 三明) H29～H31 1196万円

基盤(B)「ALICE実験前方光子検出器」(代表 中條) H25～H27 1911万円

基盤(A)「ALICE実験 ジェットと前方光子」(代表 中條) H29～H32 4368万円

日米「クォークグルオンプラズマとQCDの相図の研究」(代表:江角) H30 1000万円

基盤(S)「原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究」(代表:江角) H30～ 1.7億円

新学術領域「高密度クォーク物質」

宇宙観測

南極望遠鏡

基盤(A)「大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測」(代表 中井) H26～H30 3250万円

国立極地研究所「南極地域観測第9期計画一般研究」(代表 中井) H32～H33 1000万円

概算要求 ～18億円(3年間)

センター拠点として

学振 研究拠点形成事業 Core-to-Core Program (代表 江角) H30～H34 8100万円