

宇宙史国際研究拠点

拠点長： 金 信弘（物理学域）

センター発足式
2014年9月1日

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

数理物質融合科学センター

連携支援室

国際連携・つくば連携

センター長 (発足時)

宇宙史国際研究拠点

拠点長(コーディネーター): 金信弘教授

融合

室長

宇宙史国際研究拠点

南極天文部門

(南極天文台)

素粒子構造部門

クォーク・核物質部門

南極天文部門
(南極天文台)

構成教員:

中井直正(PI)、
久野、瀬田、
永井

連携教員:

大塚、磯崎、
梅村、森、吉川

素粒子構造部門

構成教員:

受川史彦(PI)、
石橋、原、
武内、佐藤K、
大川

連携教員:

金、佐藤Y

クォーク・核物質
部門

構成教員:

江角晋一(PI)、
中條、益井、
小澤、(選考中)

連携教員:

三明、金谷、
藏増、谷口

3つの部門:

- ・ 南極天文
- ・ 素粒子構造
- ・ クォーク・核物質

宇宙の歴史： いかにして現在の姿に到ったか？

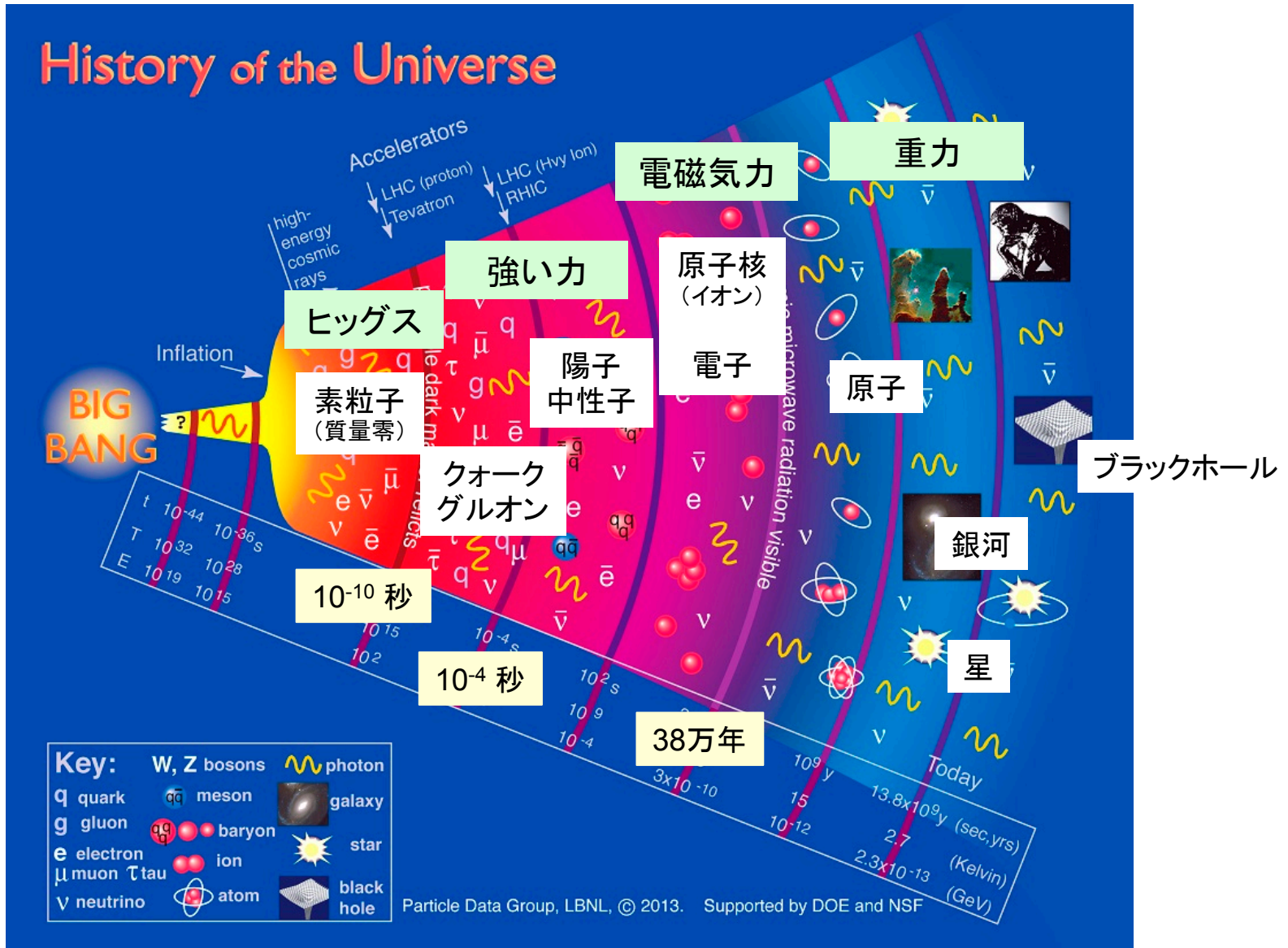
始まり



膨張・冷却



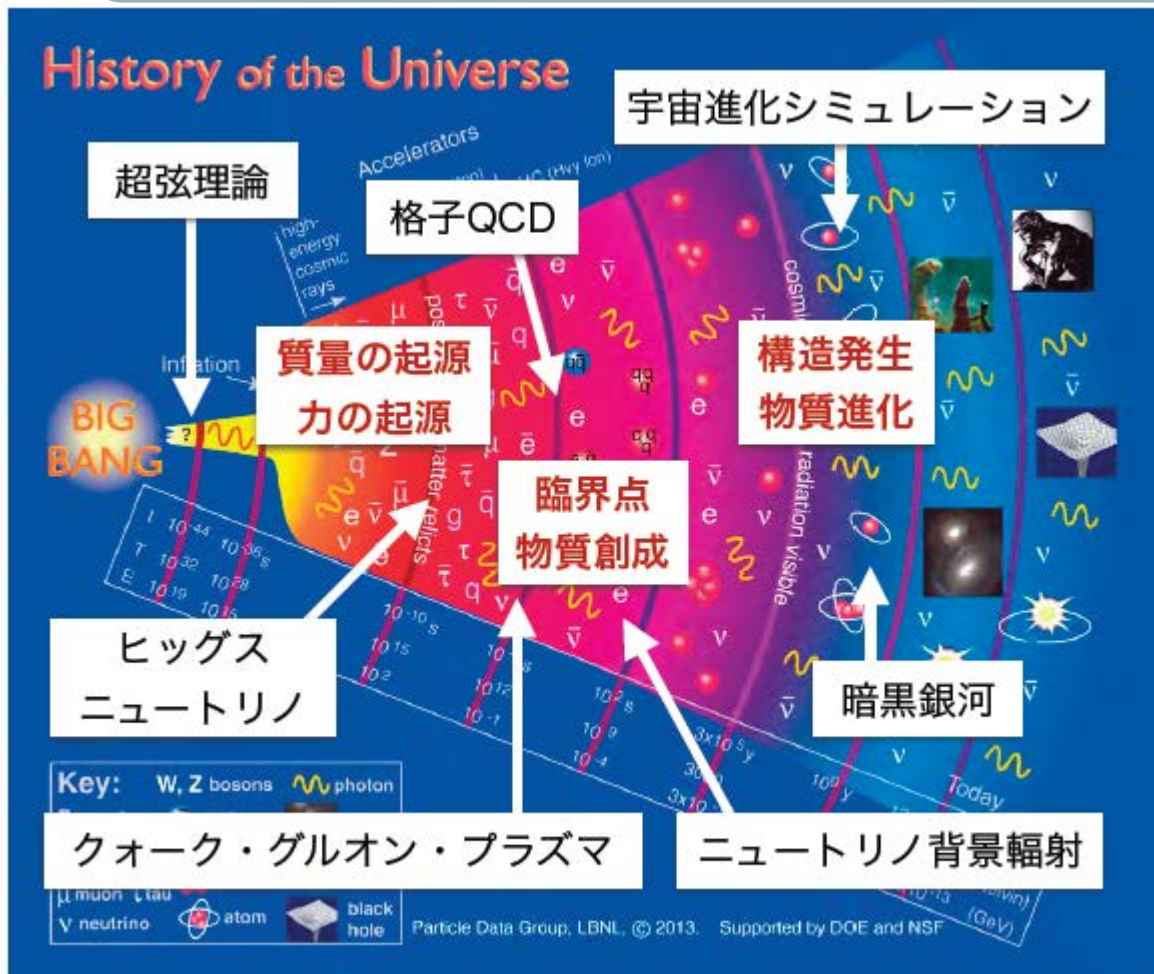
現在 (137億年)



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

南極天文部門（南極天文台）

南極天文部門

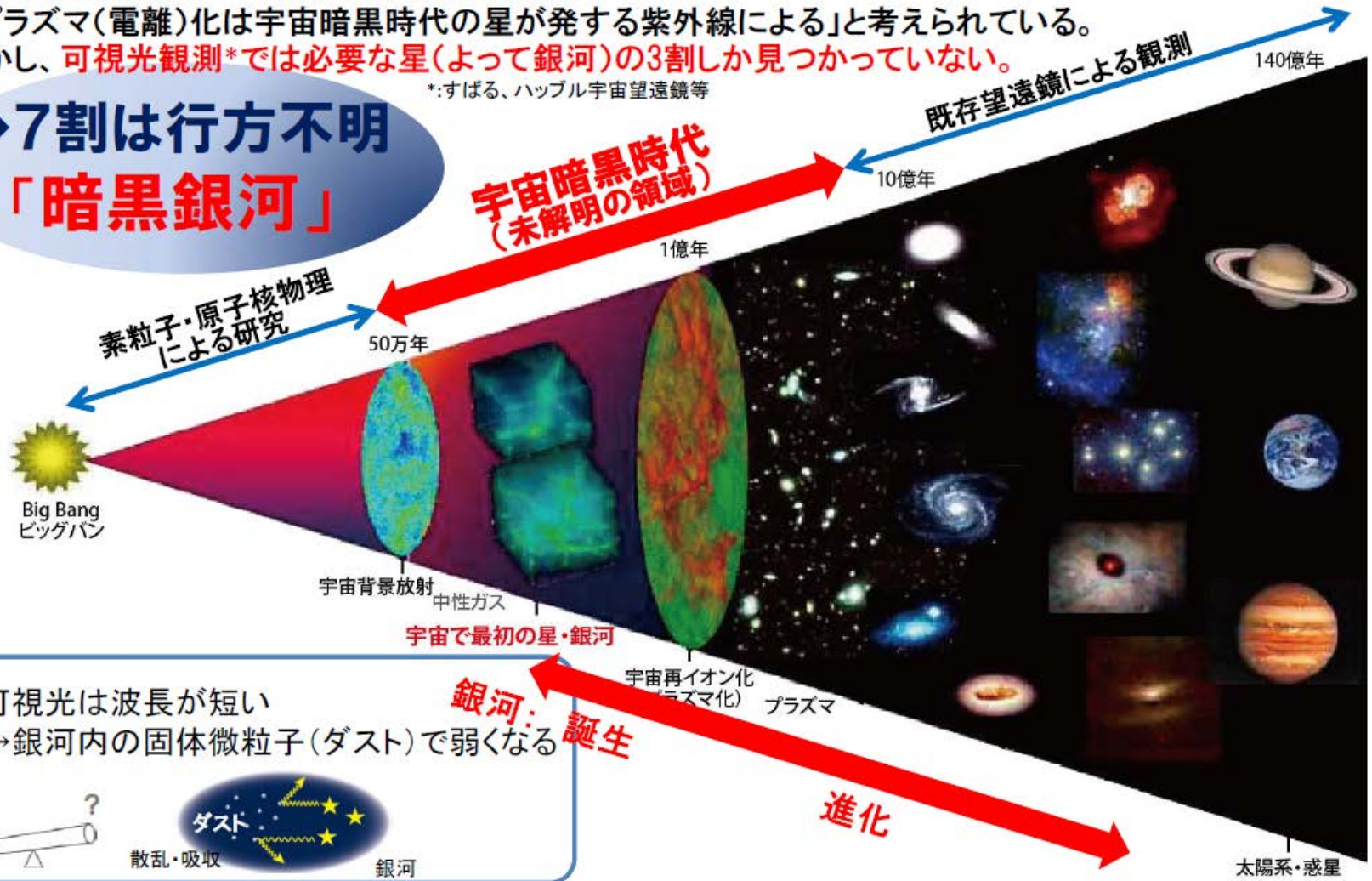
宇宙空間はほぼすべてがプラズマ(電離ガス)。

「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割は行方不明
「暗黒銀河」

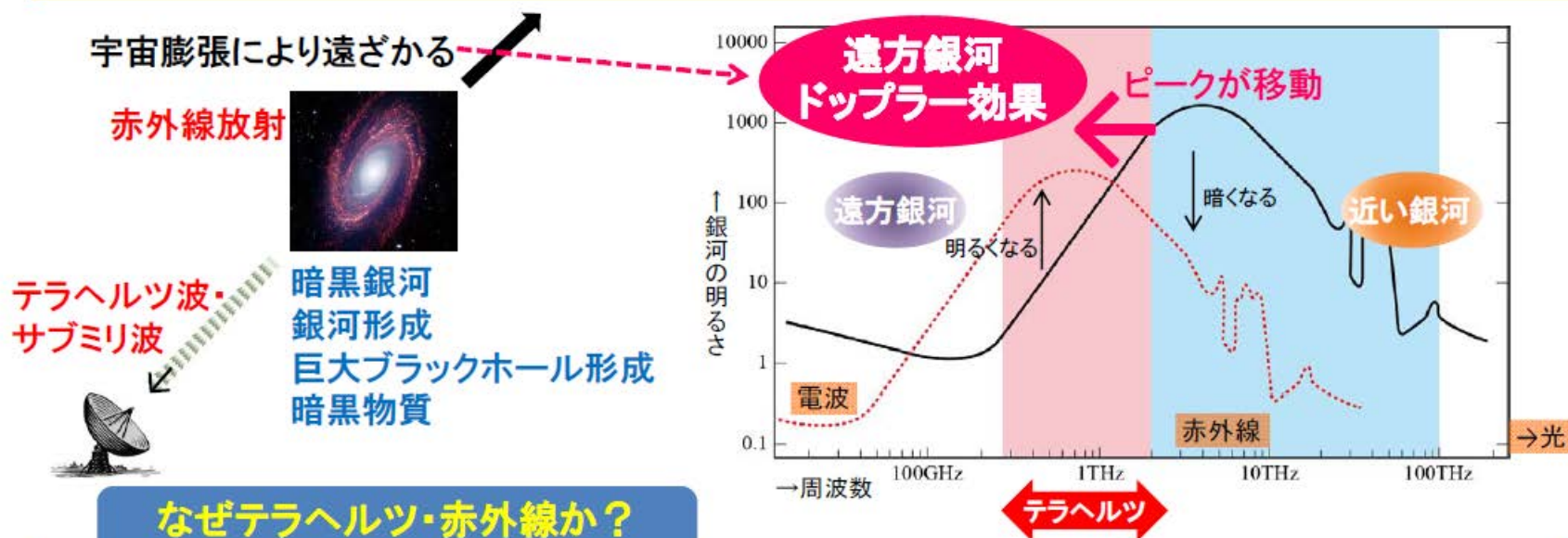


可視光は波長が短い

→銀河内の固体微粒子(ダスト)で弱くなる



テラヘルツ観測による暗黒銀河の探査



なぜテラヘルツ・赤外線か？

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となる。

③ テラヘルツ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、テラヘルツで観測するのがベスト

● テラヘルツ+赤外線でスペクトルを決定

・ピークの移動量: 銀河の距離を決定

・銀河の性質(形状、星の形成率など)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

南極は地上唯一の観測場所

①南極：水蒸気の影響が非常に少ない地上で唯一の場所

- ◆高地(3800m、空気が薄い)
- ◆極寒の地(気温 $-20^{\circ}\text{C} \sim -80^{\circ}\text{C}$)
→大気中の水蒸気が非常に少ない

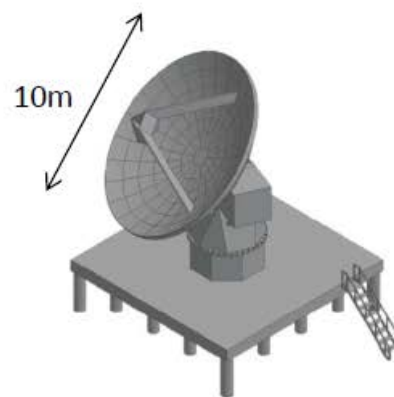
- ・宇宙からのテラヘルツが地上で唯一届く
- ・大気放射(ノイズ)が非常に少ない

②日本の基地「ドームふじ」がある

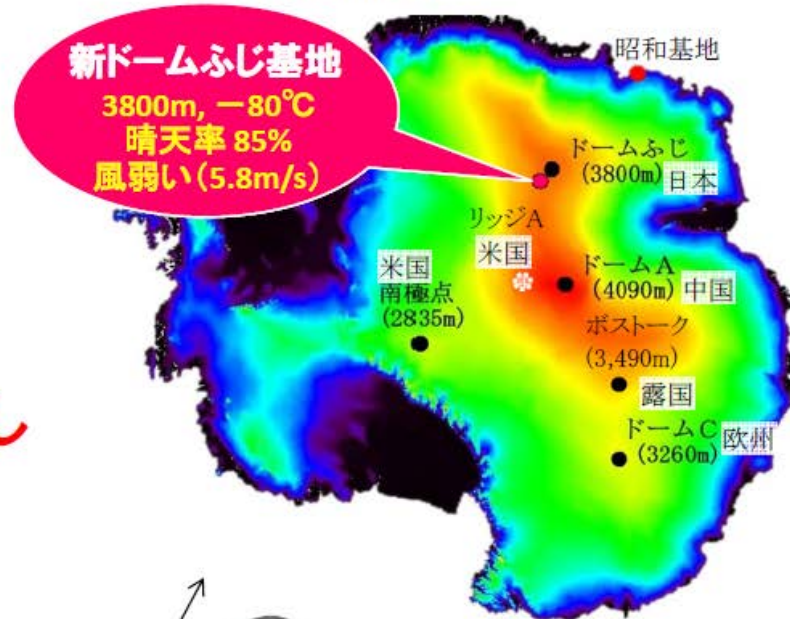
→ここにテラヘルツ望遠鏡を設置し観測すればよい

10mテラヘルツ望遠鏡

- ・口径10m
- ・高精度
アンテナ主鏡面の凹凸 $<0.02\text{mm}$
- ・指向精度(1度の1万分の1)
- ・耐寒対策(-80°C)



昭和基地から~1000 km



南天全体の暗黒銀河のサーベイ観測

南天全体

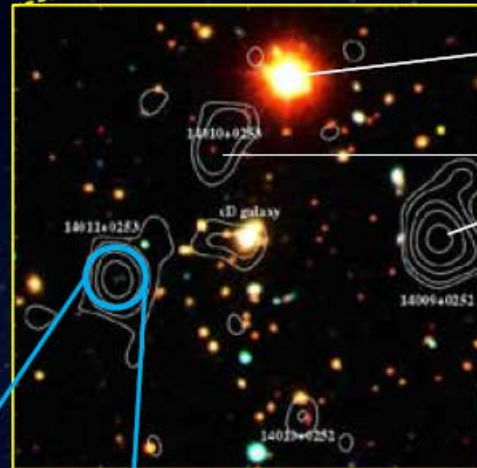
発見!

南極テラヘルツ望遠鏡

①南天全体から暗黒銀河を
発見

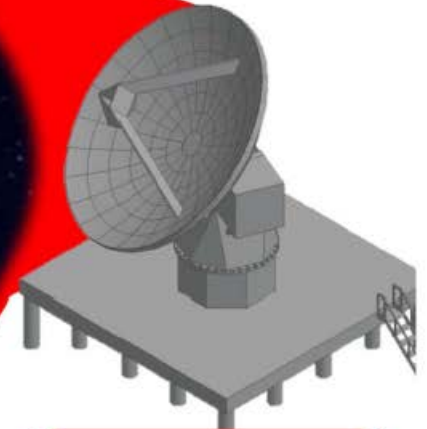
拡大

光学写真

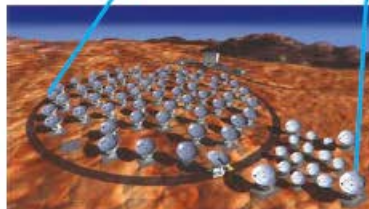


近くの銀河(光学写真)

遠方銀河(暗黒銀河)
(サブミリ・テラヘルツ)



- 超伝導電波カメラ
2万画素
:世界最大
- 超広視野
サーベイが得意



**アルマ望遠鏡(チリ)、
すばる、TMTなど**

②発見した暗黒銀河の
詳しい内部構造を調べる

アルマ望遠鏡(チリ): 超高感度、
超高角分解能。しかし視野が狭い

- 暗黒銀河の正体の解明
- 銀河と最初の星がいつ、ど
のようにして誕生したか
- 銀河の進化
- 暗黒物質(ダークマター)の
量と宇宙進化
- ブラックホールの形成進化

推進体制

南極天文コンソーシアム

筑波大学 数理工学融合科学センター

南極天文部門(南極天文台)



構成教員
中井(代表P)、久野(P)、瀬田(L)、永井誠(A)
学内連携教員
大塚(P)、磯崎(P)、梅村(P)、森(AP)、吉川(L)

研究の統括

- ・アンテナの開発
- ・超伝導電波カメラの開発
- ・ヘテロダイン受信機の開発



国立天文台
代表:小林 秀行

大学支援

望遠鏡運用支援
観測装置維持運用支援
天文観測支援

共同利用支援

共同利用業務支援
データ解析システム開発支援
データ公開支援

大型望遠鏡計画

望遠鏡技術開発
望遠鏡運用技術開発
計画立案策定



国立極地研究所
代表:本吉 洋一

内陸基地整備・電力供給



居住用建物(イメージ)

燃料・食料等の内陸輸送



雪上車
雪上トラクター
ソリ



国立極地研究所

低温対策
輸送時の振動対策
傾斜計開発

大阪府立大学

情報通信研究機構

地球大気観測
惑星大気観測

金沢大学

日本大学

新潟大学

低温対策
輸送時の振動対策



東北大学

赤外線望遠鏡開発
大気・気象測定
低温対策

大阪大学

立教大学

低温対策
惑星観測

国立天文台

埼玉大学

超伝導電波カメラの
開発
超伝導ミキサの開発

関西学院大学

ヘテロダイン受信機の
開発

素粒子構造部門

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

クォーク

物質粒子

レプトン

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**

電磁相互作用の相対論的量子場の理論の完成

朝永振一郎 1906 - 1979

- 湯川秀樹(1907 - 1981)とともに日本の素粒子物理学を開拓
- 東京文理科大学・東京教育大学にて
戦中・戦後に量子電気力学の研究に従事,
くりこみ理論を構築
- 1965年, 上記業績によりノーベル物理学賞
Julian Schwinger, Richard Feynman
と共同受賞



素粒子構造部門： ヒッグス研究

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	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	



南部陽一郎
2008 ノーベル物理学賞

ヒッグス粒子：
粒子に質量を与える



~~*Yet to be confirmed~~

Source: AAAS

クォーク
物質粒子
レプトン



Nobelpriset 2013

The Nobel Prize 2013

The Nobel Prize in Physics 2013



François Englert
Université Libre de Bruxelles, Belgium



Peter W. Higgs
University of Edinburgh, UK

"För den teoretiska upptäckten av en mekanism som bidrar till förståelsen av massans ursprung hos subatomära partiklar, och som nyligen, genom upptäckten av den förutsagda fundamentala partikeln, bekräftats av ATLAS- och CMS-experimenten vid CERN:s accelerator LHC."

"For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."

#NobelPrize

Nobelprize.org

11%の
という。
求める
よ」
が少なく
このだか
然です」



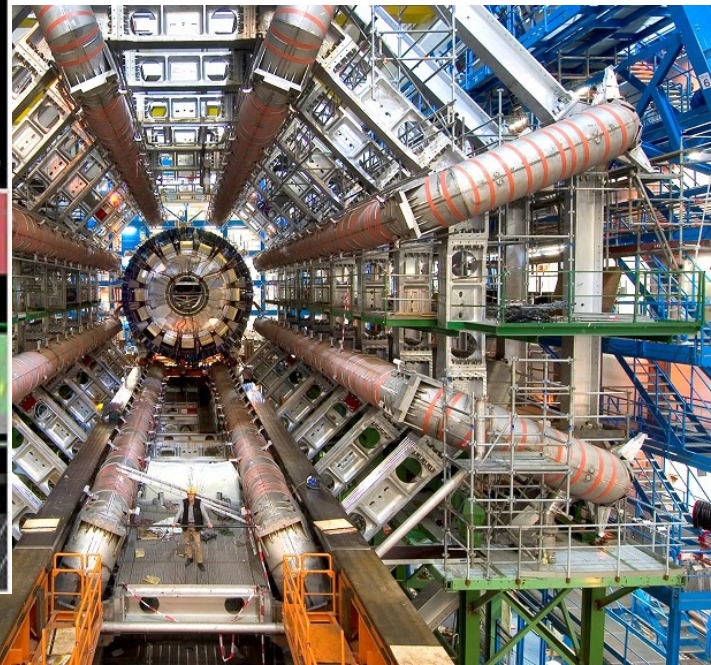
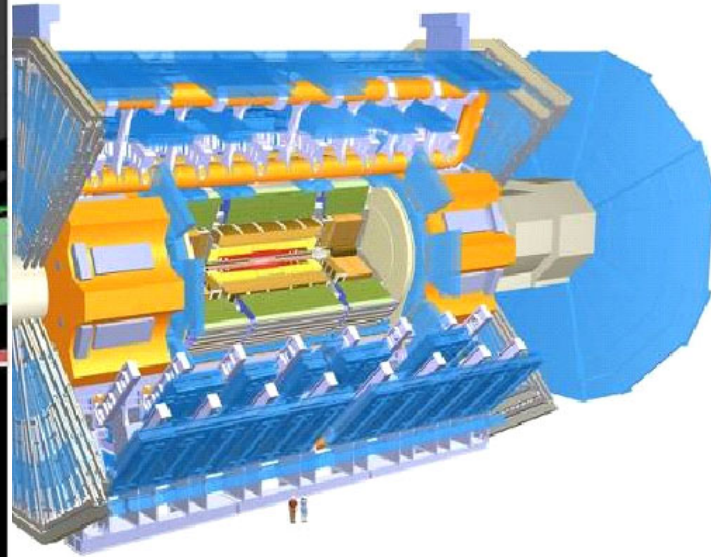
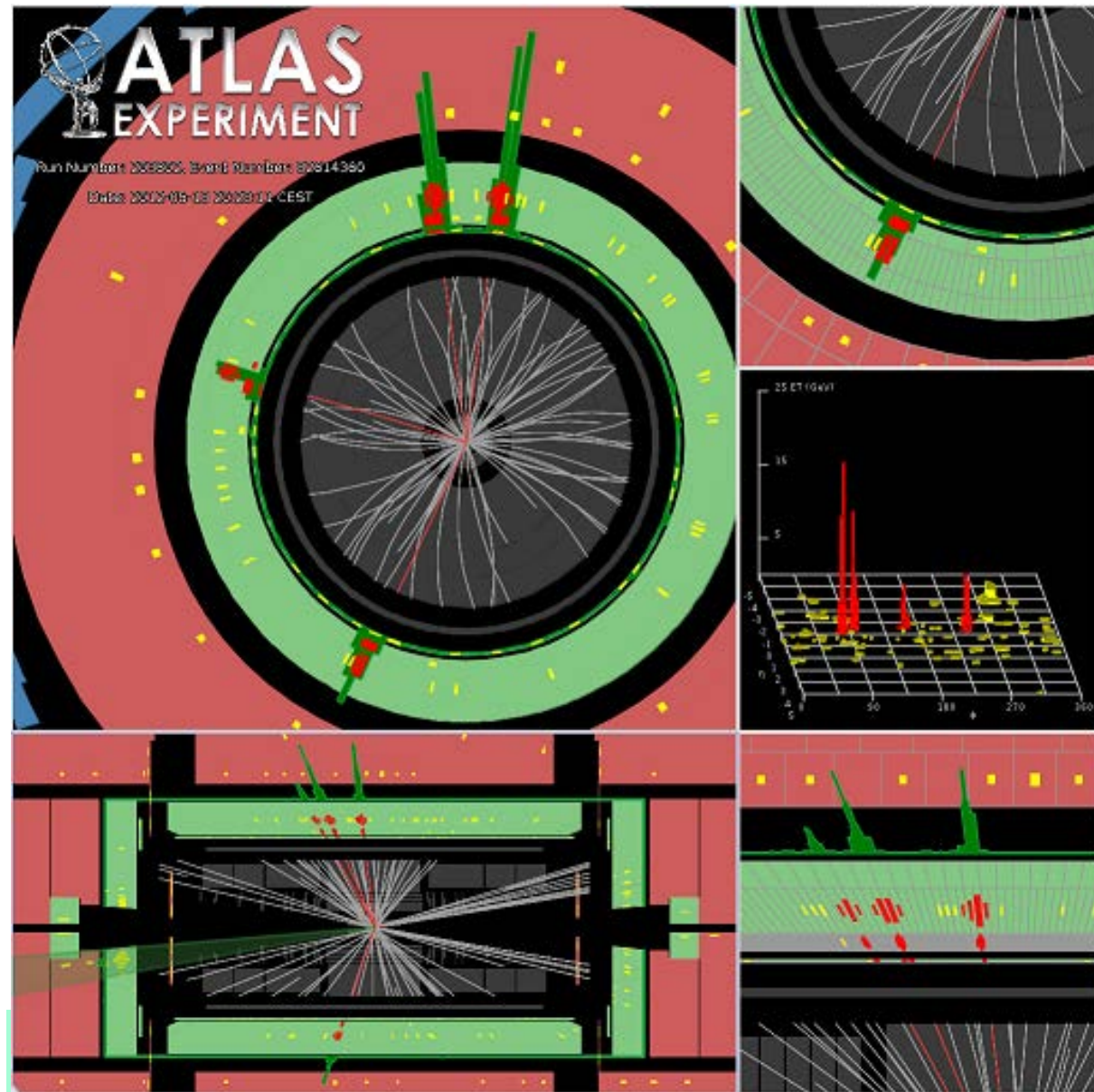
LHCに設置されている検出装置「ATLAS」=CERN、アトラス実験グループ提供

成果では、CMS、A
共に、実験によって未
子が生まれた確率を99
9%とはじきだした。
であれば物理的に「発
定できる。だが、新粒
グス粒子であることを
るには、なおデータを
かある。今年中にデー
重ねて発見を確定する
Nのロルフ・ホイヤー
ヒッグス粒子とみられ
発見について、「歴史
か、これからの様々な
めの始まりに過ぎな
つ見解を発表した。
Nの発表会場には、約
にヒッグス粒子の存在
た英エディンバラ大の
・ヒッグス名誉教授
かれ、拍手で祝福され
(田中誠士)

発見

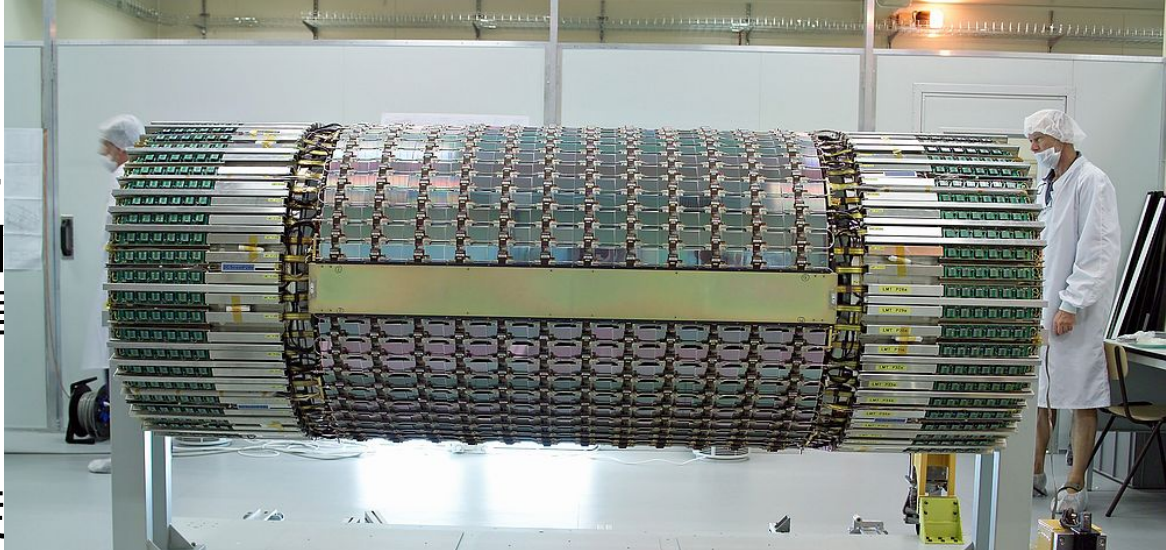
ヒッグス粒子の候補事象の例

AS 実験 検出器

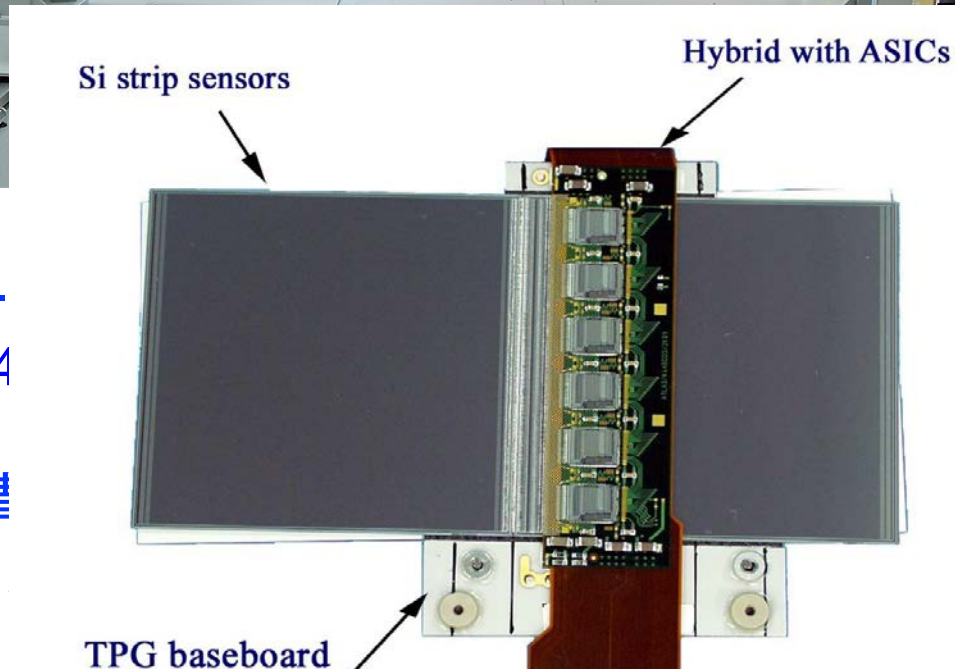


ATLAS 実験の今後

- ヒッグス粒子
 - さまざまな性質
 - 標準理論
 - あるい
- 標準理論を越える
 - 超対称性?
 - 余剰次元?
 - 暗黒物質粒



- より高い衝突エネルギー
2015年～ 8 TeV → 13/14
- 高統計のデータで測定精
2022年～ 加速器増強



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

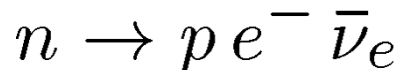
→ 新型シリコン飛跡検出器

拠点・センターを超えた連携

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

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	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
				Higgs* boson	

*Yet to be confirmed

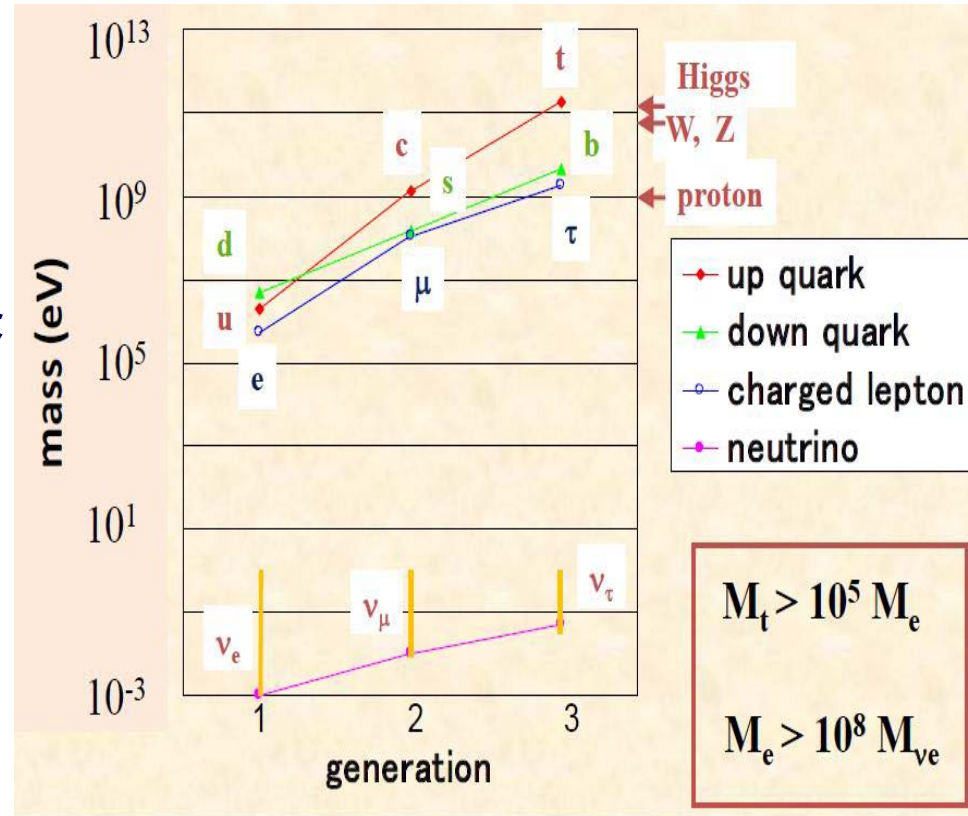
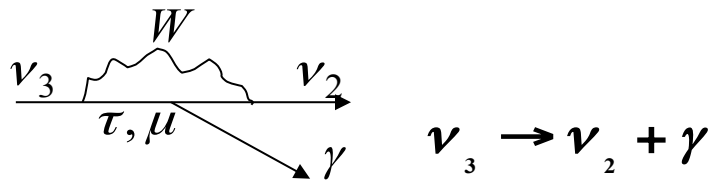
Source: AAAS

- ◆ 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

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

現在、素粒子の中でニュートリノの質量のみが測定されていない。そのニュートリノ質量を決定することは質量の起源を解明するためにヒッグス粒子の性質の研究を行うのと同様に重要である。

ニュートリノの異なる質量固有状態間の質量二乗差 Δm^2_{ij} はニュートリノ振動実験で高精度で測定されているが、質量そのものは測定されていない。ニュートリノ崩壊を検出することによって、ニュートリノ振動とは独立な量を測定することができ、それによってニュートリノ質量を決定することができる。



$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} \approx \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

Using $\Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.09) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$E_\gamma = 10 \sim 25 \text{ meV}$ at ν_3 rest frame.

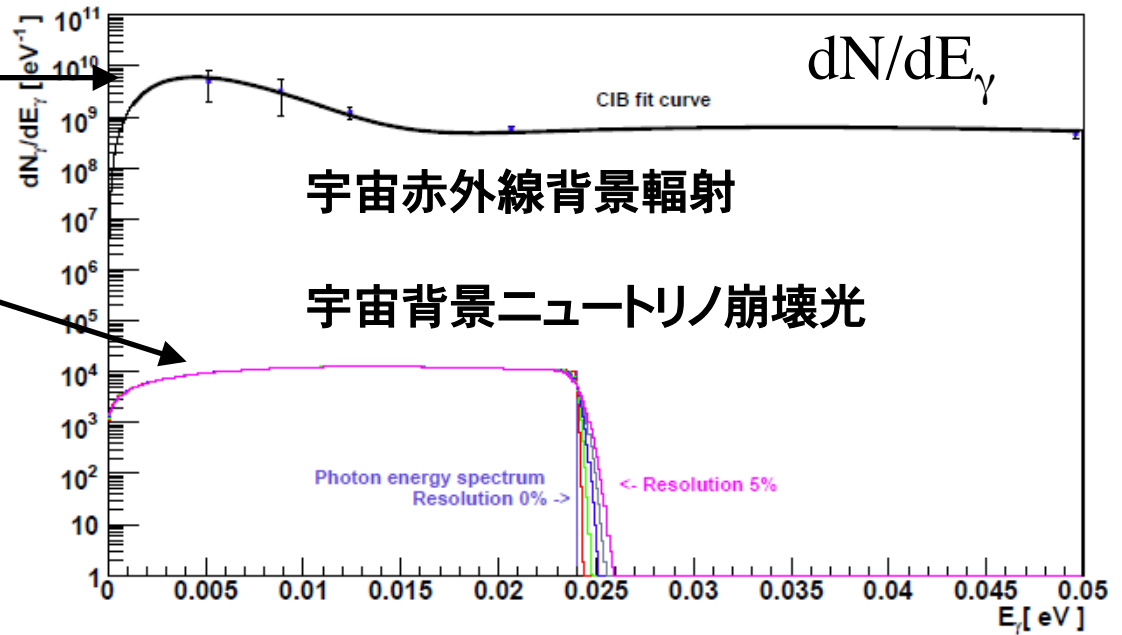
(Far - Infrared region $\lambda = 50 \sim 125 \mu$)

ニュートリノの寿命は非常に長いので、崩壊観測するためのニュートリノ源として、宇宙背景ニュートリノ (CνB) を用いる。したがって、このニュートリノ崩壊を観測することは宇宙論で予言されている宇宙背景ニュートリノの発見となる。

ニュートリノ崩壊信号検出の可能性

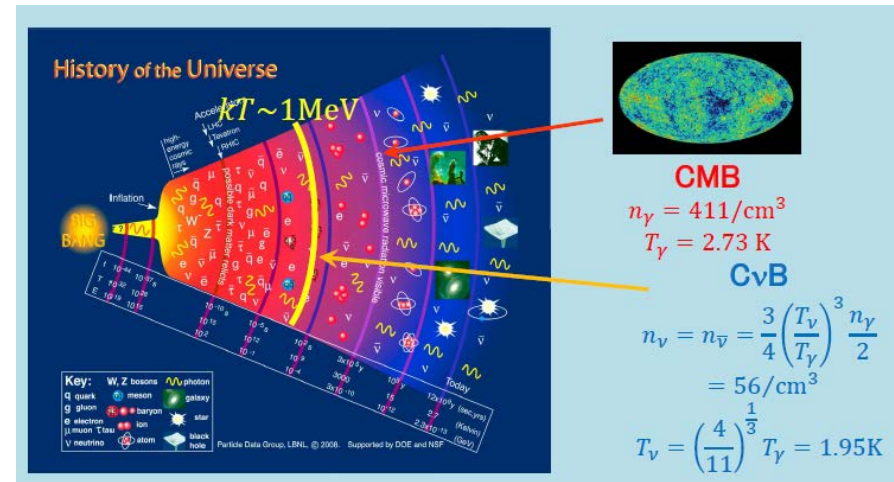
宇宙赤外線背景輻射 +
ニュートリノ崩壊からくる光子の
エネルギー分布 ($E_0=25\text{meV}$,
 $\tau=1.5 \times 10^{17}\text{年}$)

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

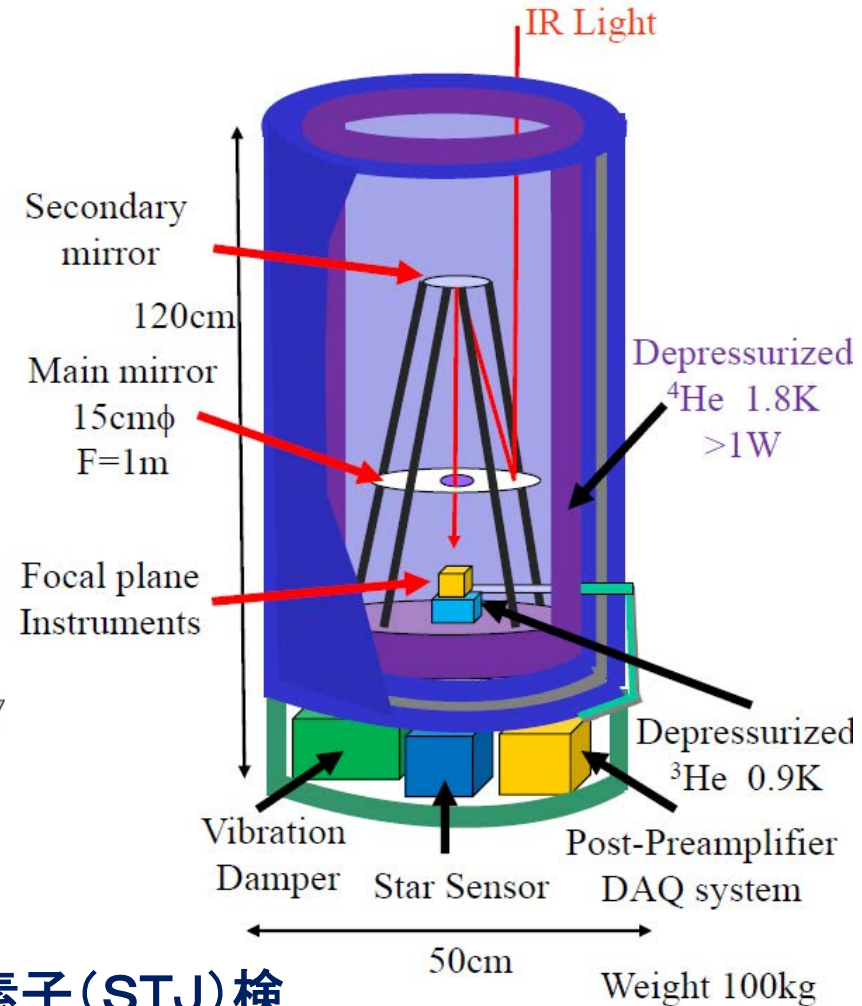
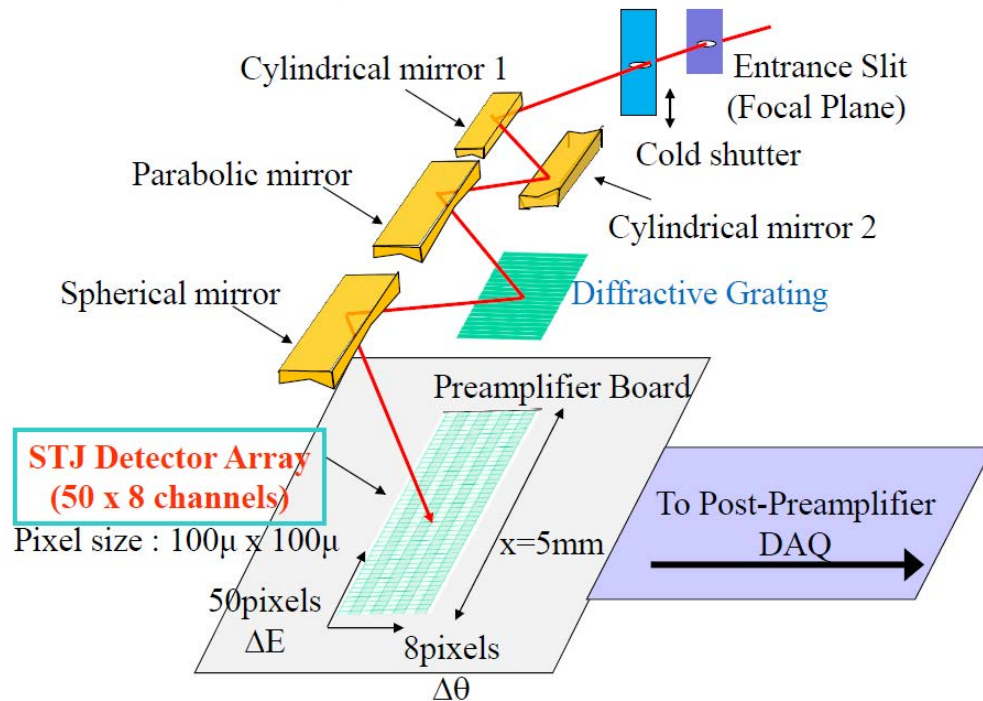
2017年に実験予定。200km以上の高度で5分間データ収集。ニュートリノ寿命下限を2ケタあげる ($\sim 10^{14}$ 年)。

JAXA Rocket CIB Experiment

(Feb 2, 1992)



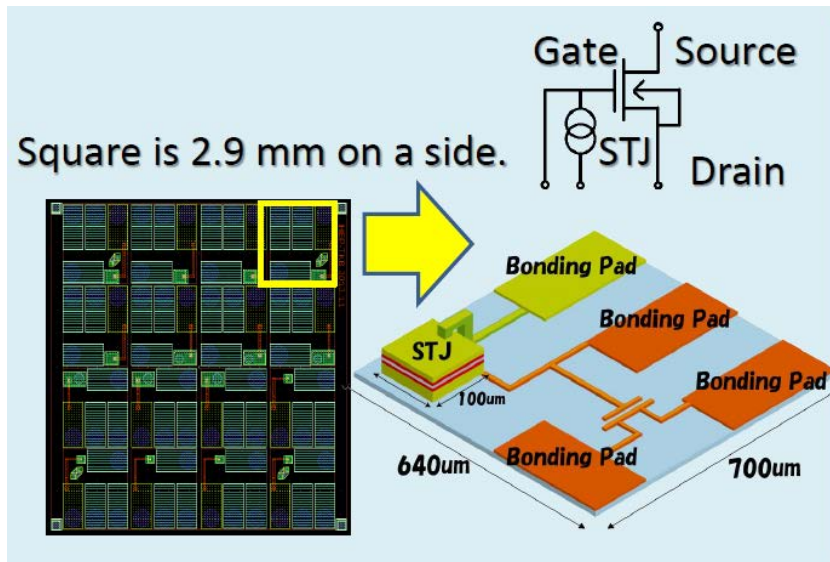
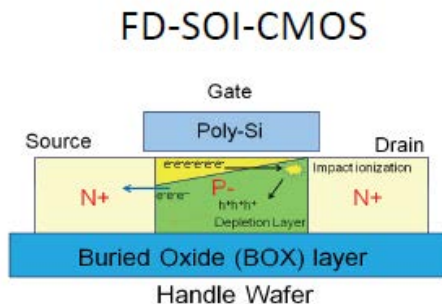
Focal plane Instruments



赤外線検出器部には超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器を用いる。

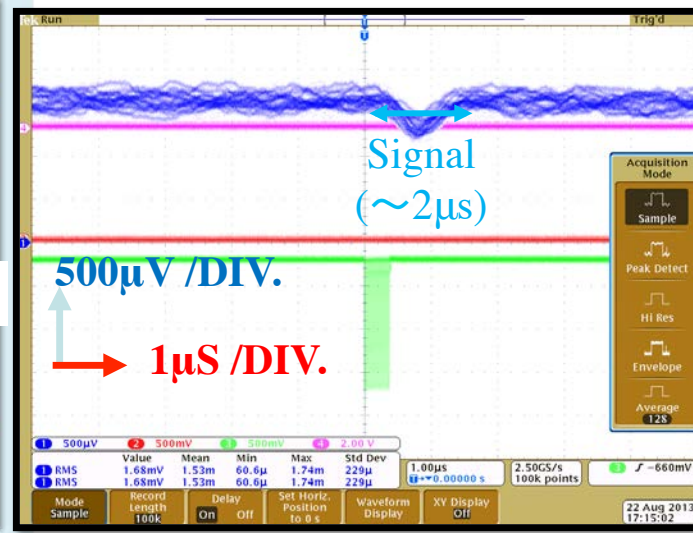
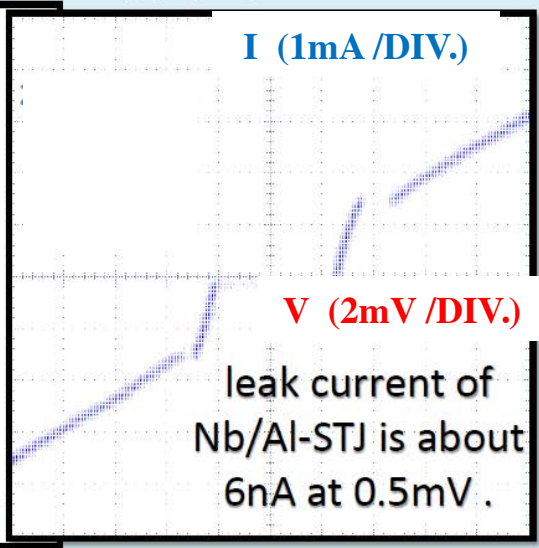
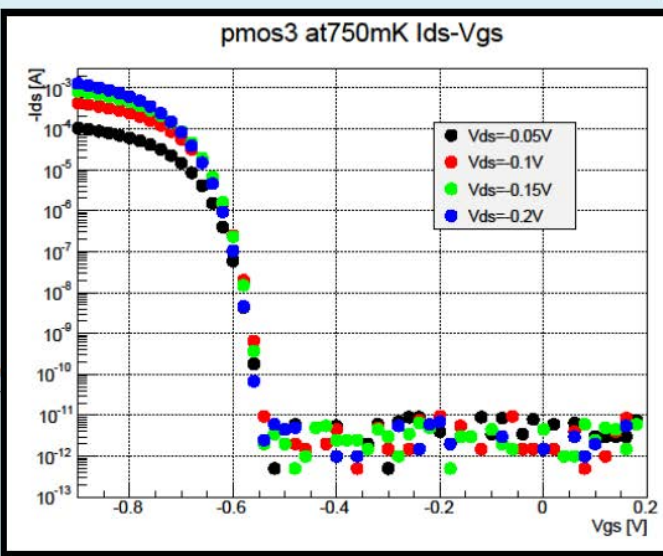
SOI-STJ一体型検出器の試作・試験

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

ソウル大
S.B.Kim
STJ検出器

FNAL
E. Ramberg
エレクトロニクス

近畿大
加藤
STJ検出器

福井大
吉田
STJ検出器

理研
美馬
STJ検出器

岡山大
石野
STJ検出器

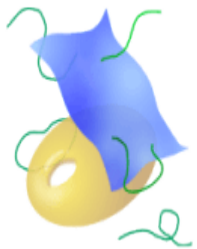
JAXA/ISAS
松浦、池田、和田
ロケット、
クライオスタット、
エレクトロニクス、光学系

筑波大学
金、武内
STJ検出器、
クライオスタット、
エレクトロニクス、光学系

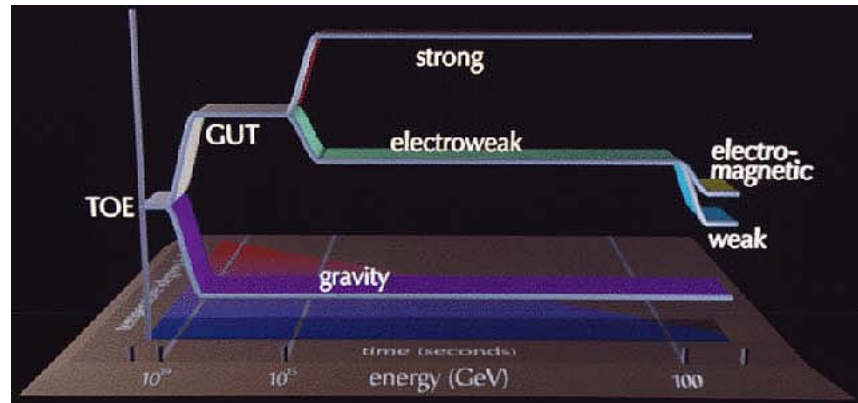
KEK
新井、羽澄
エレクトロニクス

超弦理論の研究

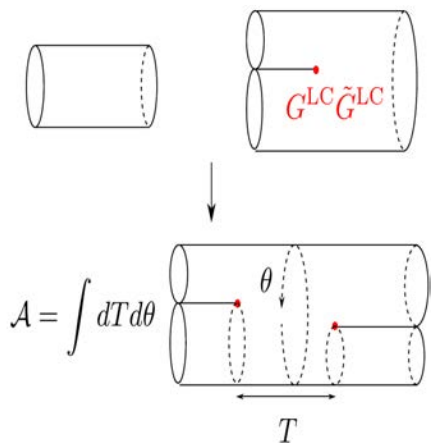
素粒子は点ではなく長さを持つ弦である



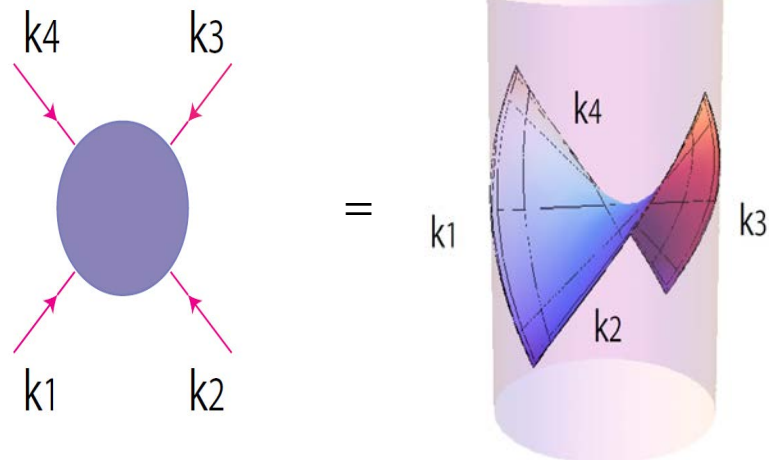
- 重力の量子論
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一
ヒ格斯粒子の質量を説明する



○弦の場の理論



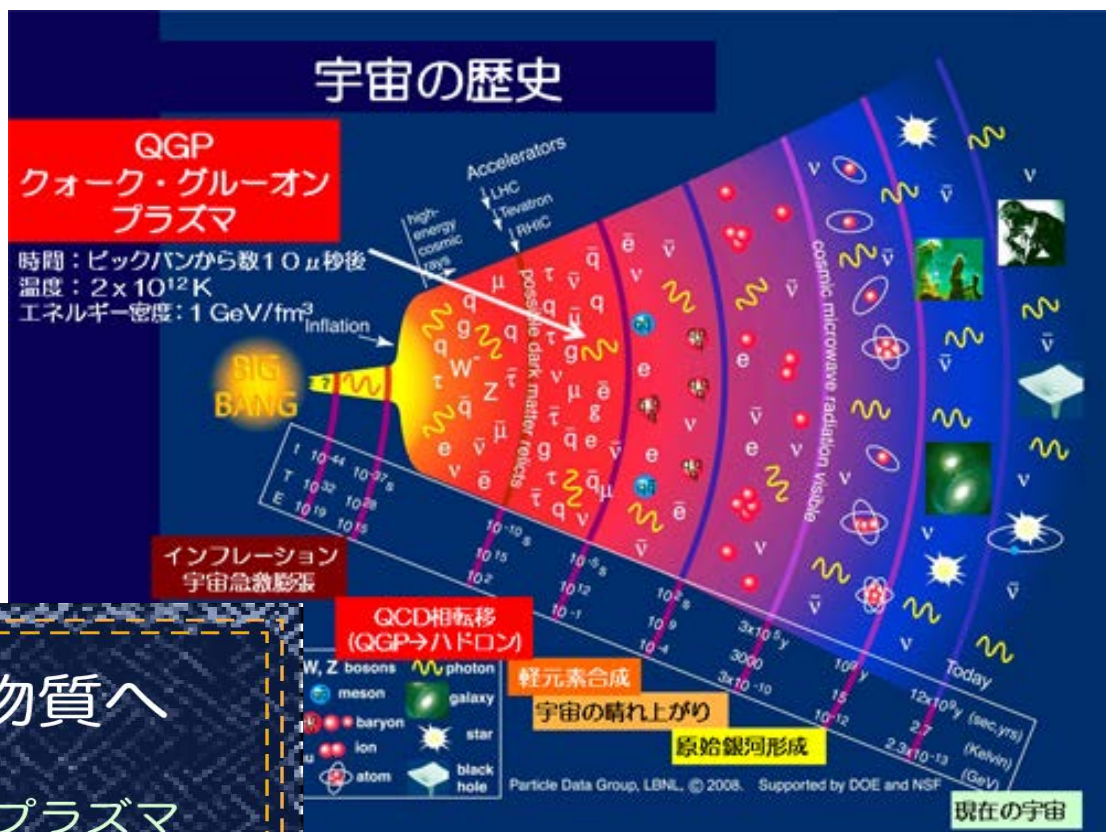
○AdS/CFT対応を用いた強結合ゲージ理論の研究



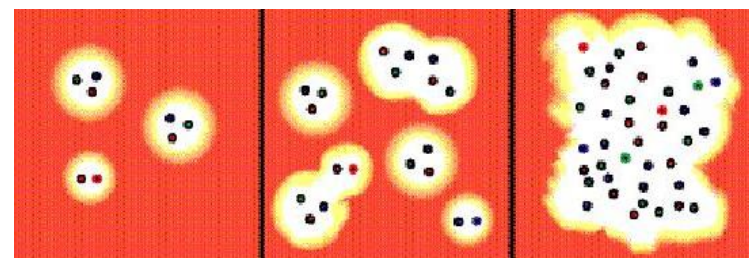
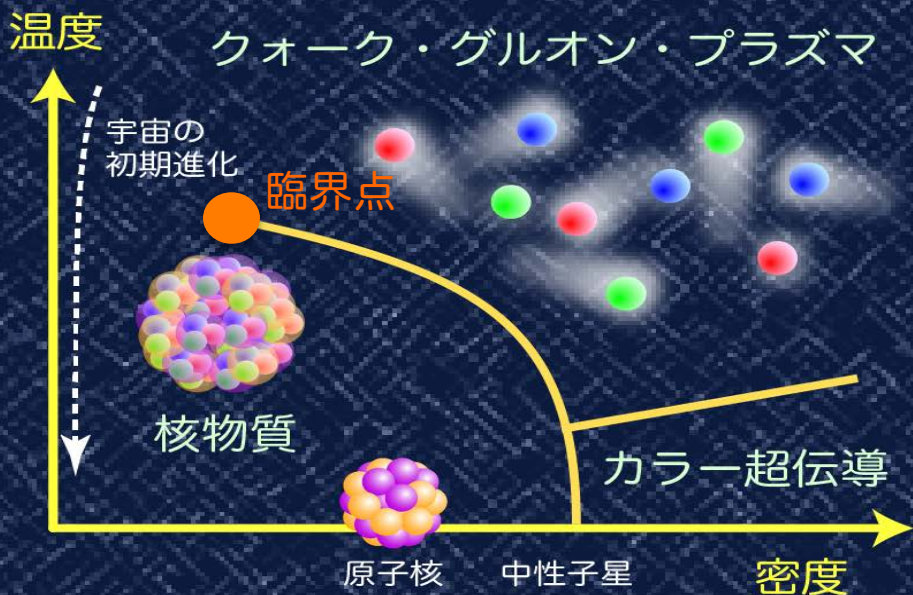
クォーク・核物質部門：クォーク・グルオン・プラズマ研究

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

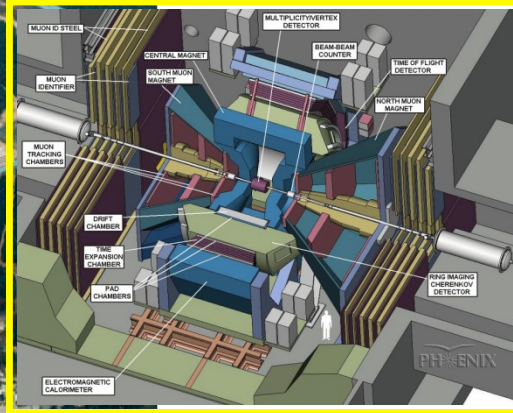
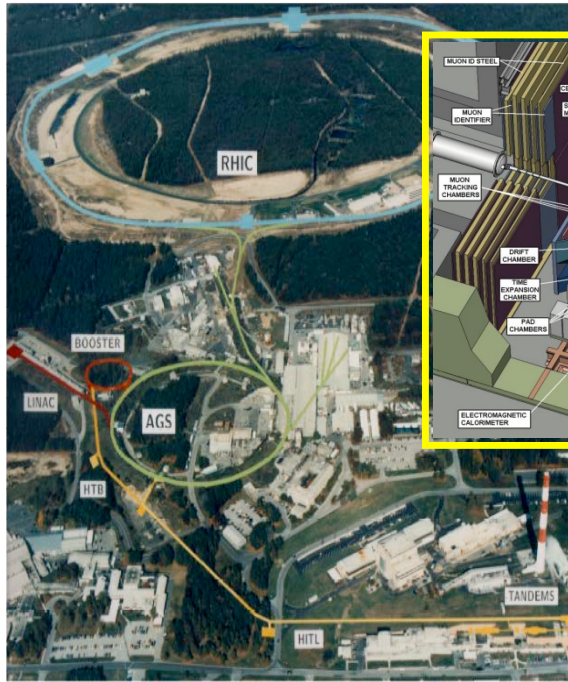


核物質からクォーク物質へ



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

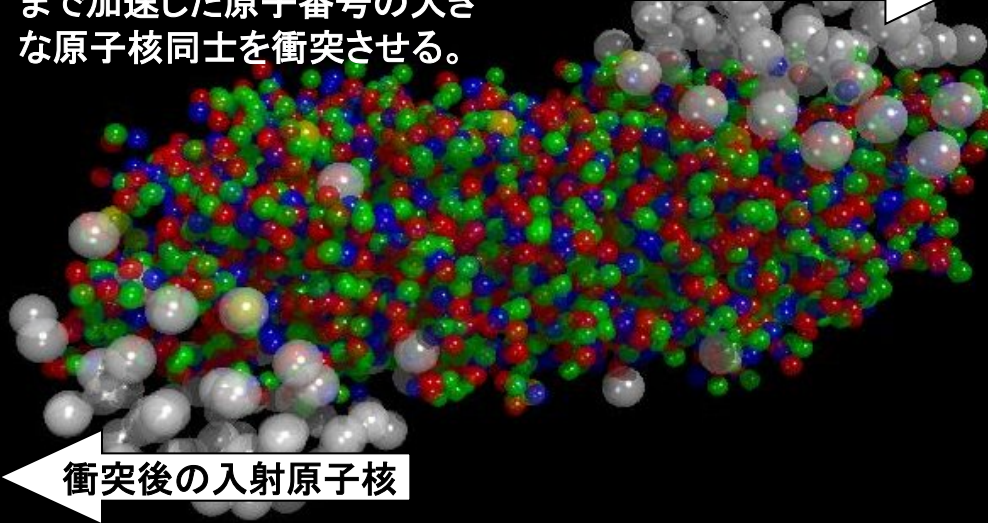


筑波大学、計算科学研究センターの計算機システム：「HA-PACS」「COMA」等



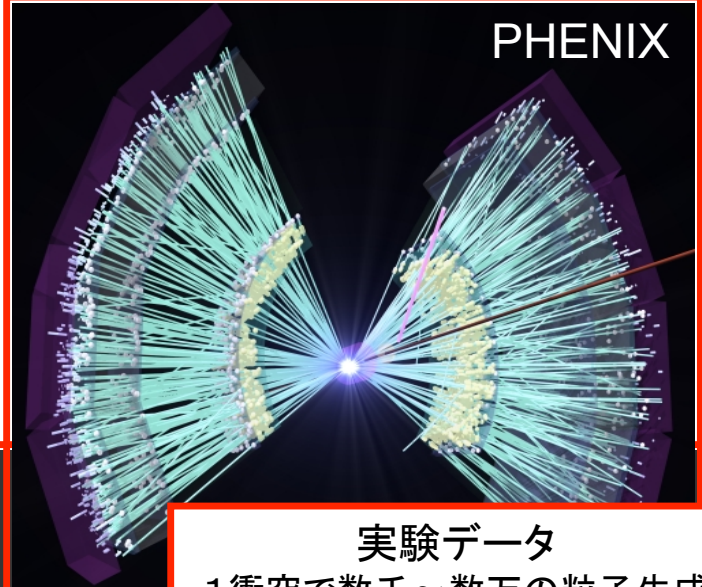
巨大加速器を用いて光速近くまで加速した原子番号の大きな原子核同士を衝突させる。

衝突後の入射原子核

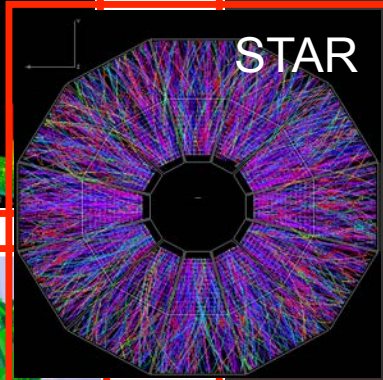
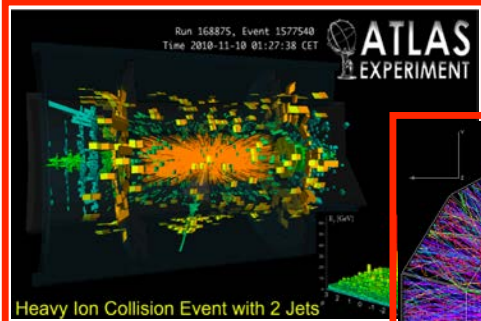


衝突後の入射原子核

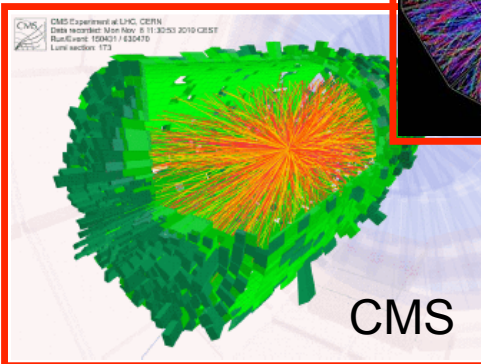
PHENIX



実験データ
1衝突で数千～数万の粒子生成



STAR

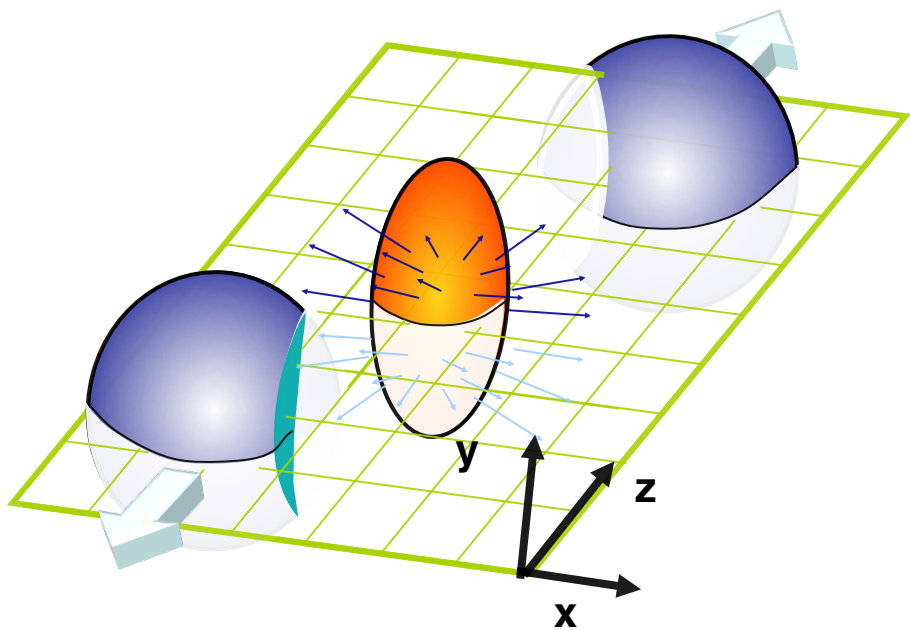


CMS

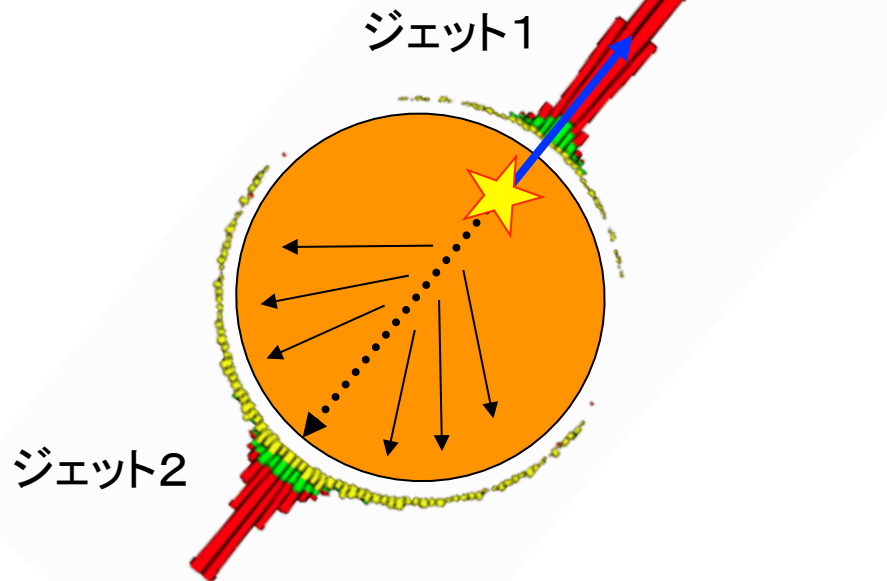


Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV
2010-11-08 11:30:46
Fill : 1482
Run : 137124
Event : 0x00000000D3BBE693

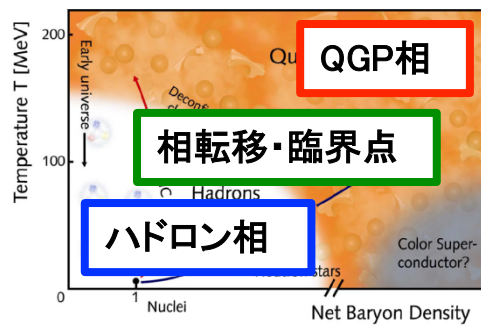
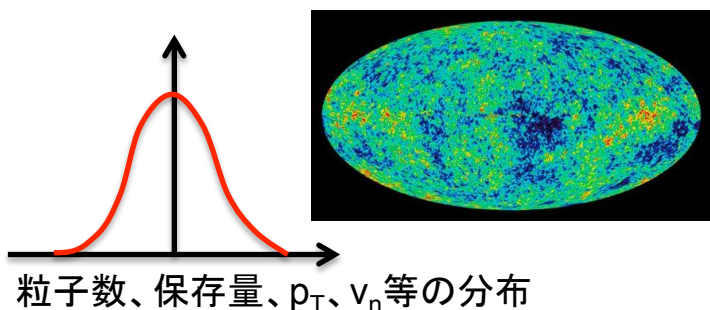
QGPの楕円型集団膨張



パートンのQGP中でのエネルギー損失



QGP発展中の事象揺らぎと臨界点



クォーク・核物質部門

研究体制

理化学研究所

シリコン軌跡検出器
重いクォーク物理
秋葉康之、他

CERN研究所

LHC加速器
ALICE、ATLAS実験
Yves Schutz、他

筑波大学

カロリメータ検出器
ハドロン・ジェット物理
江角晋一、中條達也、
益井宙、小沢顕、
三明康郎、金谷和至、他

東京大学CNS

GEM-TPC検出器
電子・光子物理
浜垣秀樹、郡司卓、他

BNL研究所

RHIC加速器
PHENIX、STAR実験
Dave Morrison、他

広島大学

光子検出器
光子物理
杉立徹、志垣賢太、他

拠点の計画と体制

- 測定器開発室
- 逆問題推進室との連携

- 宇宙史コンソーシアム

- 年次計画

- 外部資金

検出器開発室

宇宙史研究のための実験・観測に用いる検出器技術に関する情報共有を密にしながら、先端検出器の開発を推進する。

検出器開発室

超微細加工検出器 技術

SOIピクセル飛跡検出器
高放射線用シリコン飛跡検出器

極低温超伝導検出器技術

超伝導トンネル接合素子(STJ)
赤外線検出器
超伝導多素子共振器(MKID)

検出器高速読み出し 技術

新型カロリメータ
飛行時間測定器

この先端検出器開発の多くはTIA連携(KEK、産総研)のもとに進められている。
検出器開発室は将来、数理物質融合科学センター全体で先端測定器技術の開発を
推進する。

宇宙史コンソーシアム

筑波大を中心とするオールジャパンチームと海外研究所・大学が宇宙史の統一的理解を目指した素粒子・原子核・宇宙物理学の融合研究を推進。

ソウル大
S.B.Kim教授
ニュートリノ:超伝導検出器

欧州CERN研究所
Y. Schutz (IN2P3/CERN)
ヒッグス、QGP:LHC加速器

米国フェルミ研究所
E. Ramberg
ニュートリノ:エレクトロニクス

岡山大
石野宏和准教授
ニュートリノ:超伝導検出器

筑波大学
金信弘教授、受川史彦教授、江角准教授
ヒッグス:シリコン飛跡検出器、
QGP:カロリメータ
ニュートリノ:超伝導検出器、
クライオスタット、エレクトロニクス

東京大
浜垣秀樹教授
QGP:GEM-TPC

福井大
吉田拓生教授
ニュートリノ:遠赤外線源

広島大
杉立徹教授 QGP:
光子カロリメータ

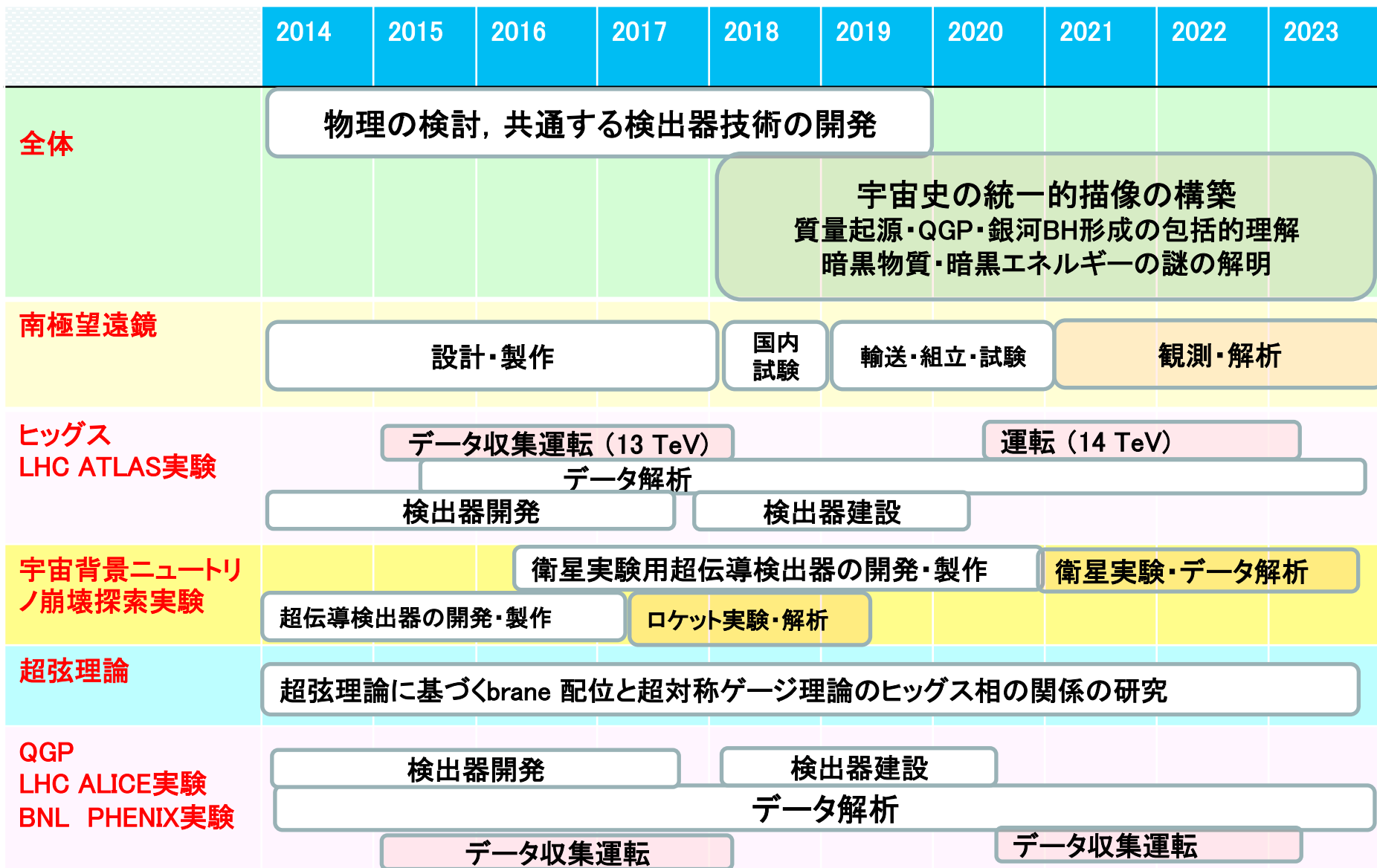
近畿大
加藤幸弘准教授
ニュートリノ:データ収集

JAXA/ISAS
松浦周二助教
ニュートリノ:ロケット、
クライオスタット、
エレクトロニクス、光学系

KEK
新井康夫教授
ニュートリノ:エレクトロニクス
ヒッグス:シリコン飛跡検出器

理研
秋葉康之グループリーダー
QGP::シリコン飛跡検出器
ニュートリノ:超伝導検出器

宇宙史国際研究拠点(朝永センター)研究年次計画



上記の南極望遠鏡、ATLAS実験、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験・ALICE実験の4実験はマスタープラン大型研究計画に内定している

大型科研費・外部資金の獲得状況と計画

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

日米科学技術協力事業「ニュートリノ崩壊」（代表 金） H24～ 1800万円

基盤(S)「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験」(代表 金) H27～ 2億円

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「ATLAS実験」 H28～ 5000万円

原子核

QGP

日米科学技術協力事業「PHENIX実験」（代表 江角） H23～ 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)「ALICE実験前方光子検出器」(代表 中條) H25～H27 1911万円

特別推進研究「QGP」 H27～ 2億円(あるいは素粒子と合同で5億円の提案を検討中)

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(直接経費)

他に

基盤(C)「重いクォーク生成の物理」（代表 受川） H25～H27 468万円

基盤(C)「ヒッグス湯川結合の測定」（代表 原） H25～H27 455万円

新学術領域「イメージング」計画研究（分担 原） H25～H29 598万円/H25

新学術領域「中性子星」公募研究（代表 江角） H25～H26 299万円