

宇宙史国際研究拠点の活動報告

数理物質融合科学センターワークショップ・運営協議会
2015年1月18日

金 信弘（宇宙史国際研究拠点長）

宇宙史国際研究拠点

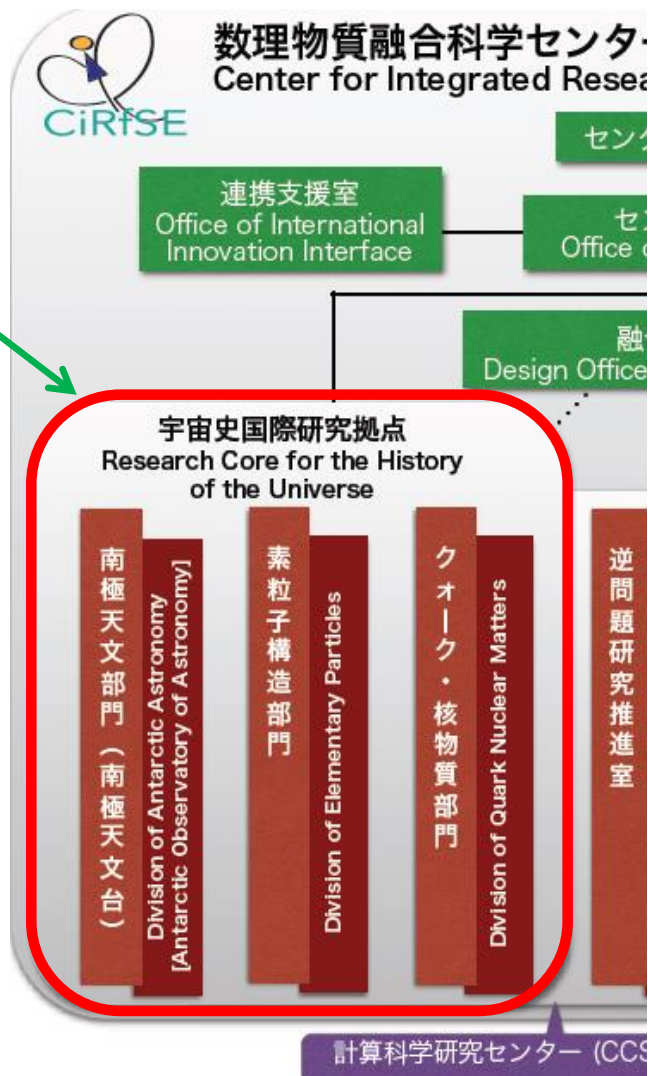
Research Core for the History of the Universe

数理物質融合科学センター

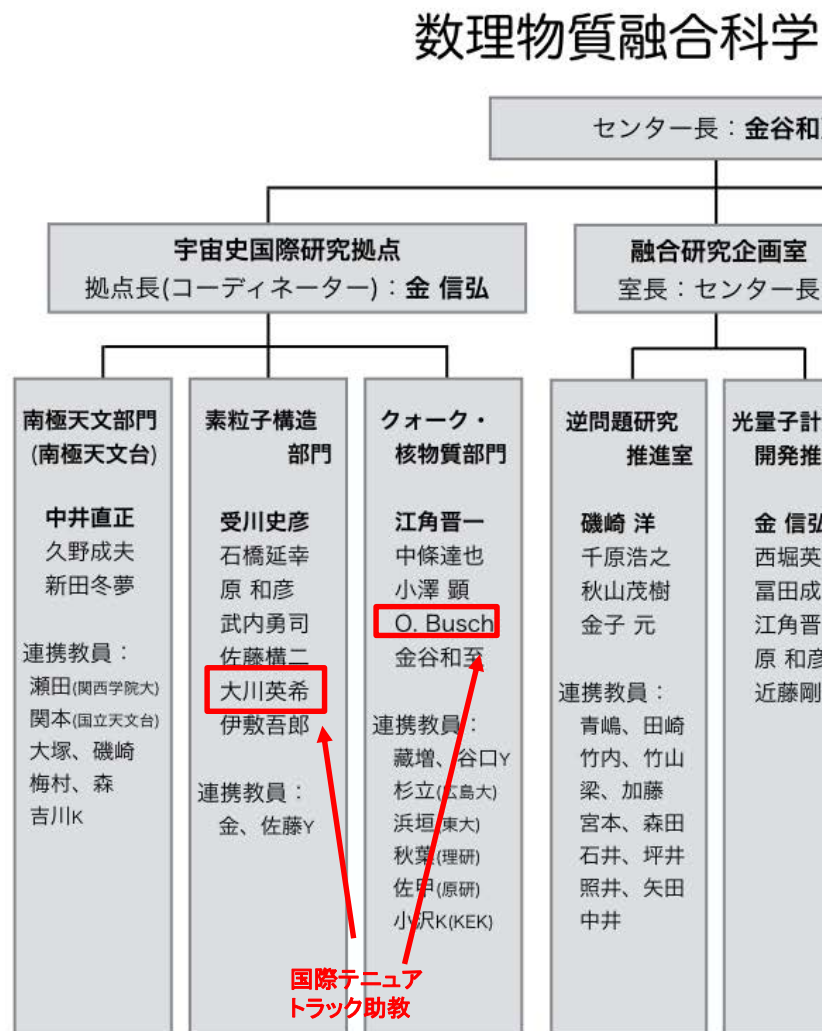
Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba



宇宙史国際研究拠点



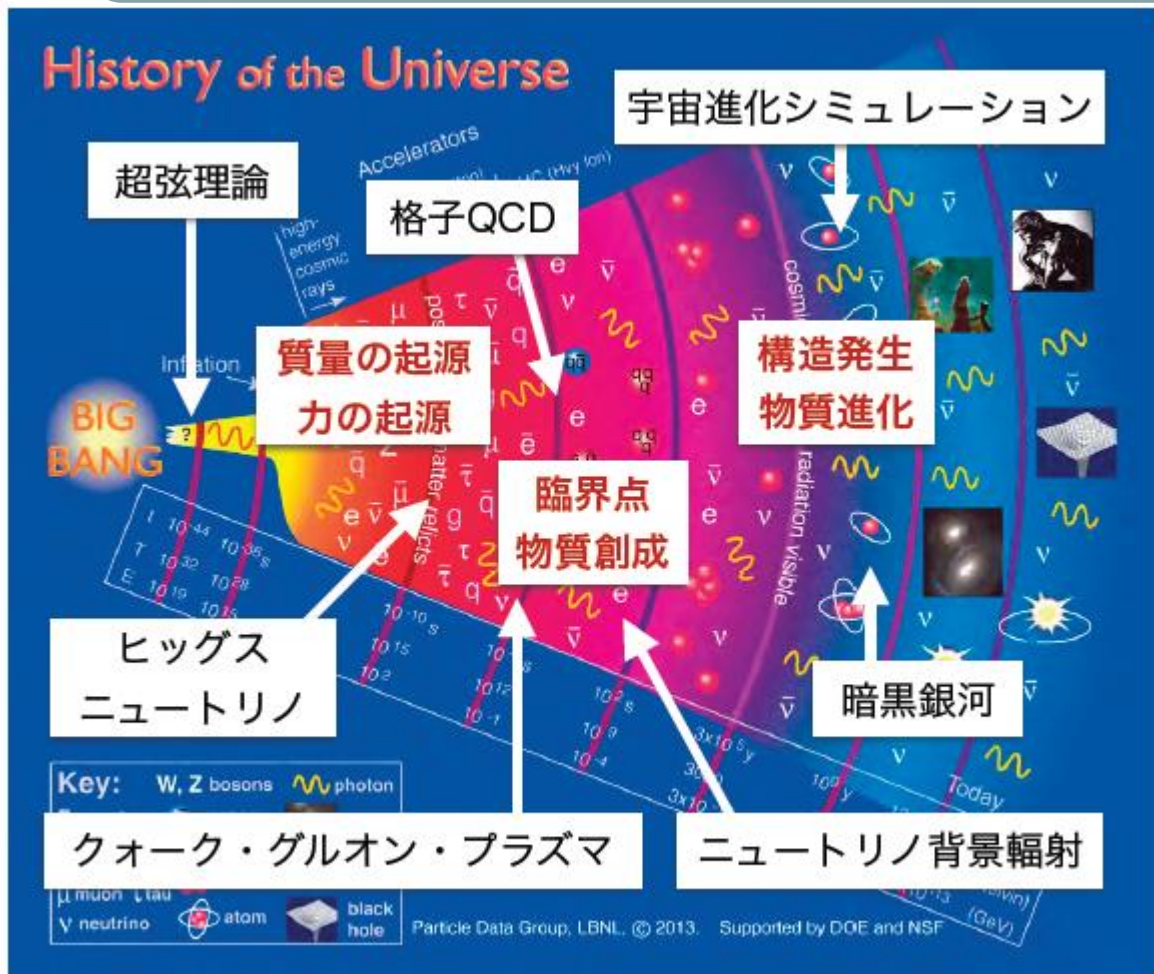
- 3つの部門:
- ・ 南極天文
 - ・ 素粒子構造
 - ・ クォーク・核物質



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

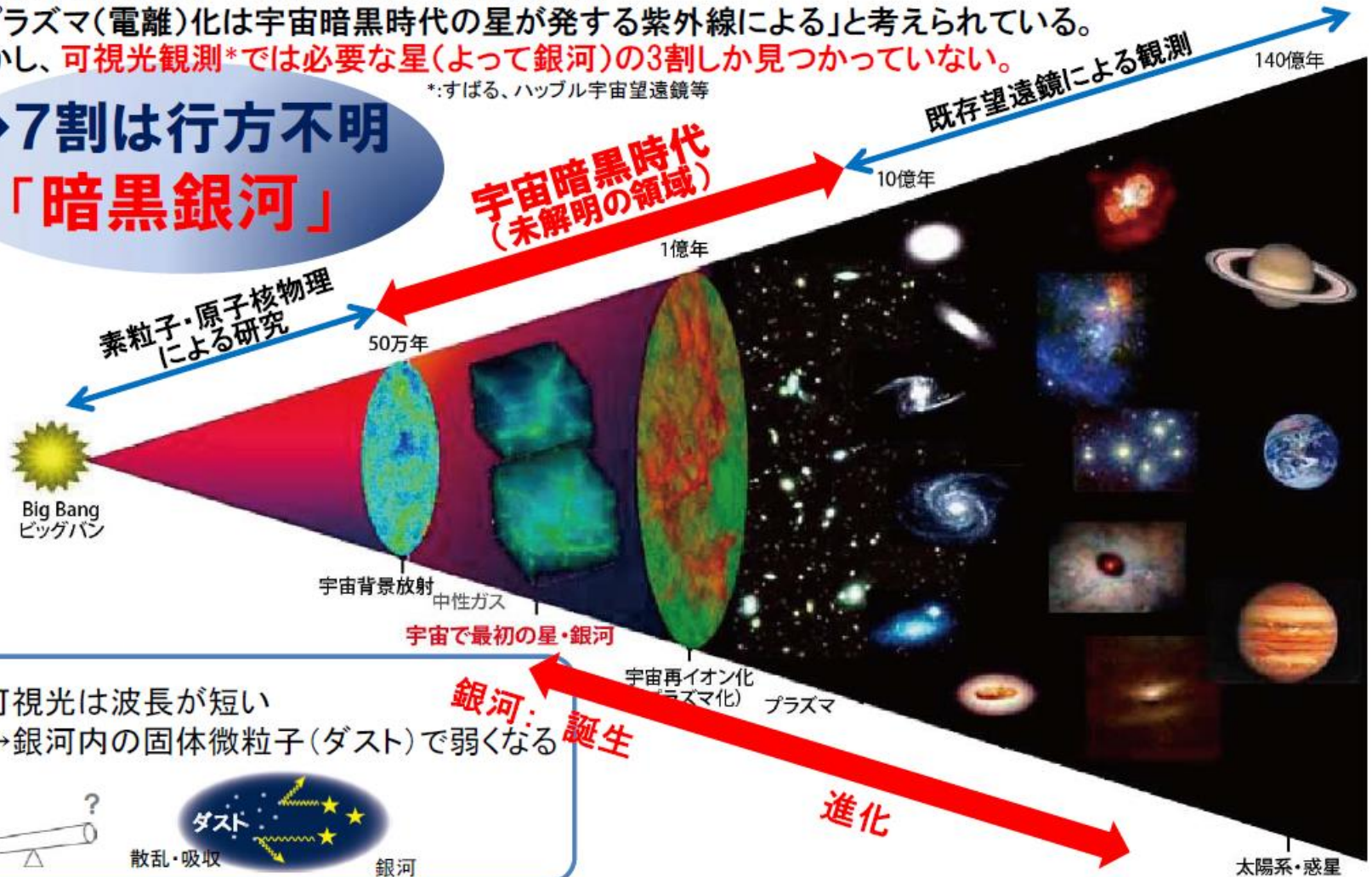
宇宙空間はほぼすべてがプラズマ(電離ガス)。

「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

ダスト
散乱・吸収

銀河

銀河: 誕生

進化

太陽系・惑星

南天全体の暗黒銀河のサーベイ観測

南天全体

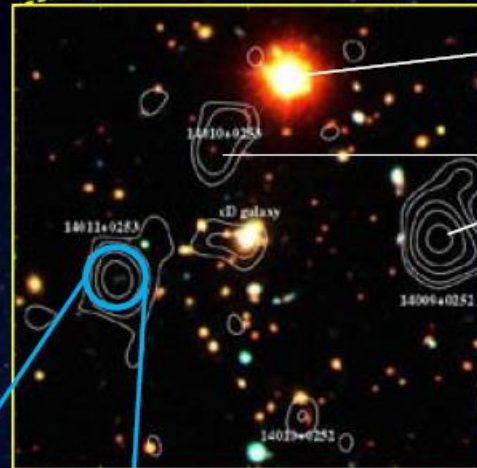
発見!

南極テラヘルツ望遠鏡

①南天全体から暗黒銀河を
発見

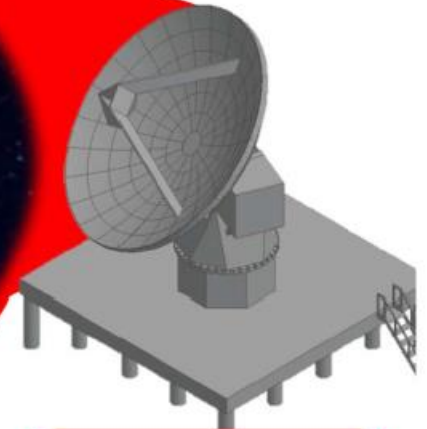
拡大

光学写真

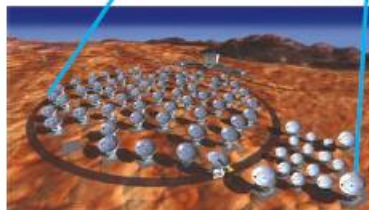


近くの銀河(光学写真)

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

最近の成果(宇宙観測)

系外銀河NGC3079のアンモニアガスの観測

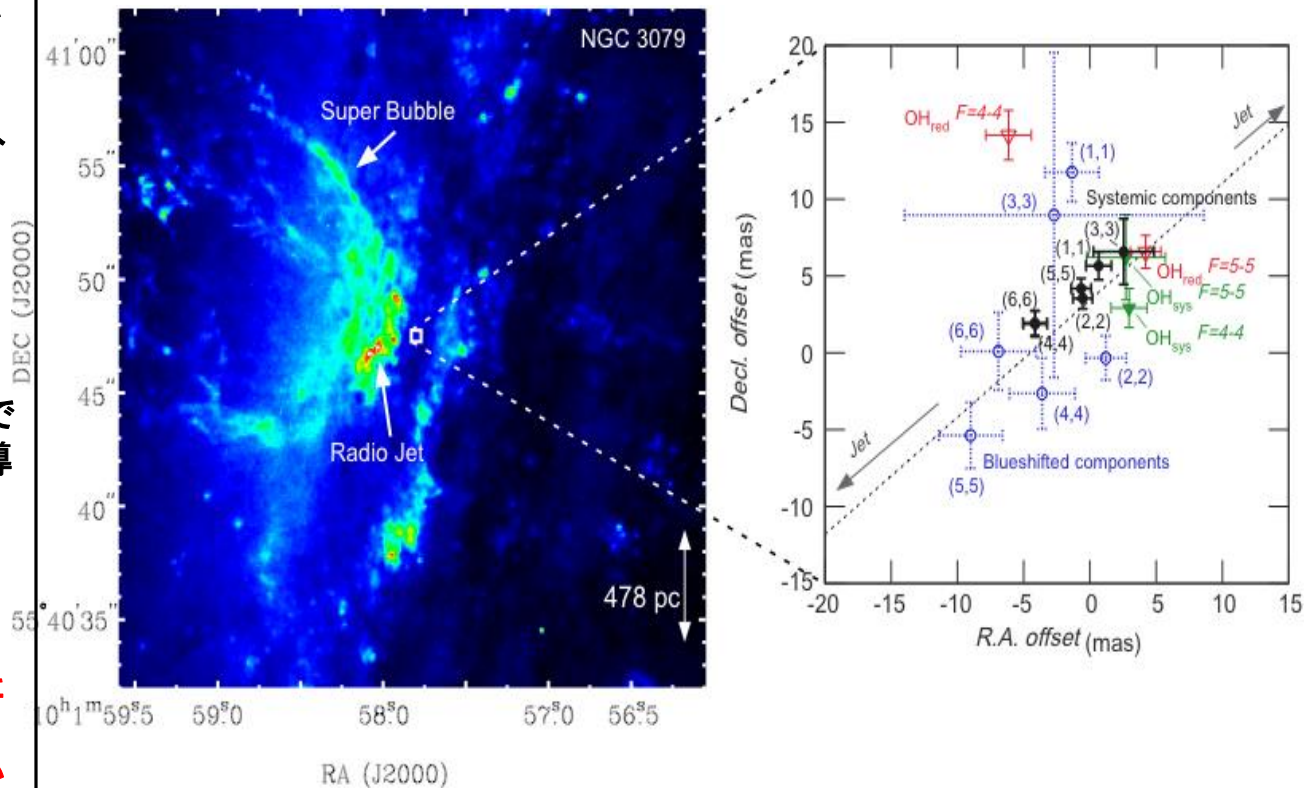
系外銀河NGC 3079(中心から数kpcに渡るスーパーバブル)中心の主たるエネルギー源の探索

つくば32m望遠鏡+VLA(空間分解能0.09")を用いたアンモニア分子観測

アンモニアの(J, K) = (1, 1) - (6, 6)遷移が二つの速度成分(システム速度成分と青方偏移成分)で検出。これらの輝線強度比から導出される温度と柱密度は、これまでに報告されている他の近傍銀河に比べて高い。

アンモニアのピーク位置を求めた結果、分布がNGC 3079のAGNジェットに沿っていることが明らかになった。

これらはAGNジェットが中心領域ガスの加熱に大きく寄与していることを示唆している



NGC 3079中心付近のH α スーパーバブル(左)と中心核のアンモニア分子の分布(右)。

推進体制

南極天文コンソーシアム

筑波大学 数理物質融合科学センター

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

関西学院大学

ヘテロダイン受信機
の開発

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

素粒子構造部門 ヒッグス粒子研究

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	

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**



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 accelerators 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」



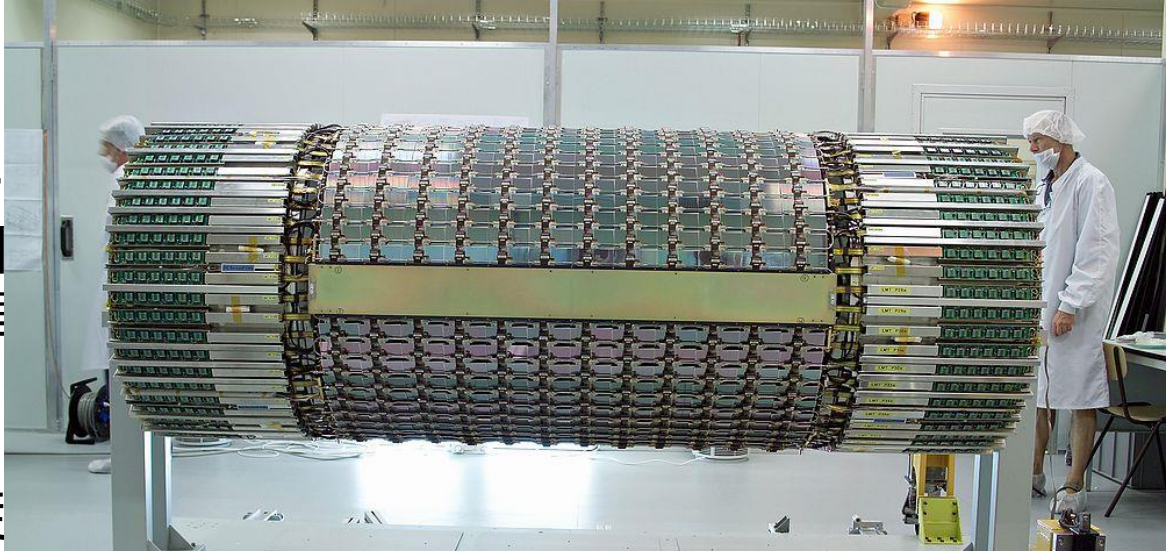
LHCに設置されている検出装置「ATLAS」=CERN、アトラス実験グループ提供

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)

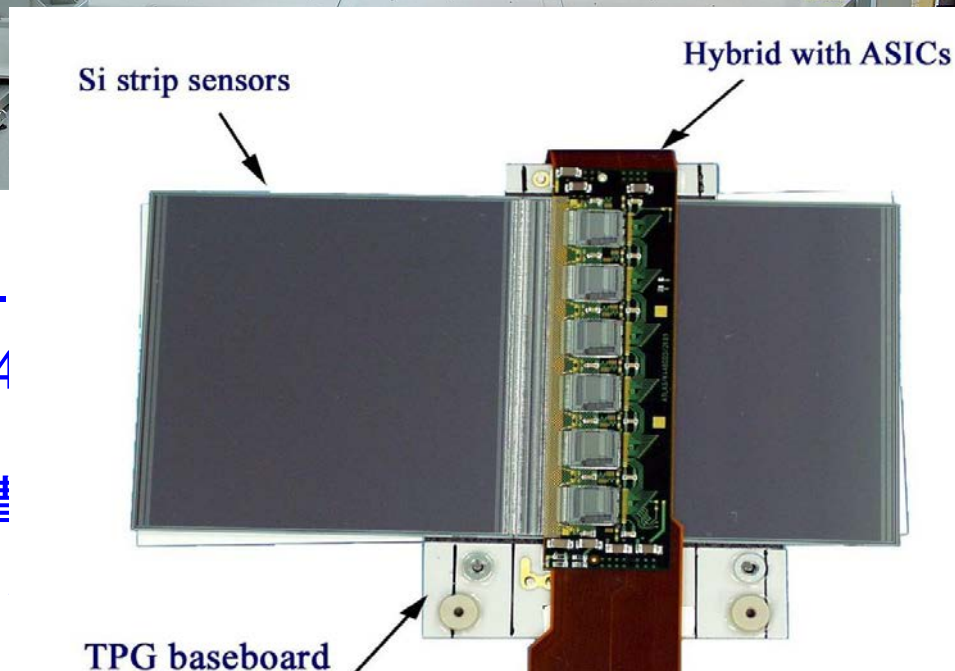


ATLAS 実験の今後

- 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

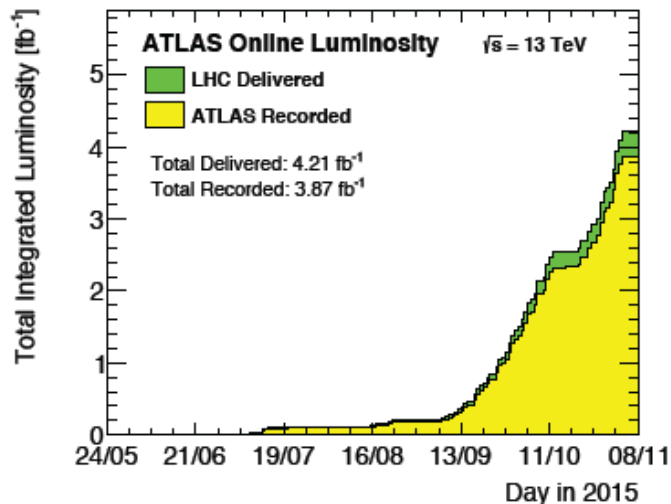
→ 新型シリコン飛跡検出器

拠点・センターを超えた連携

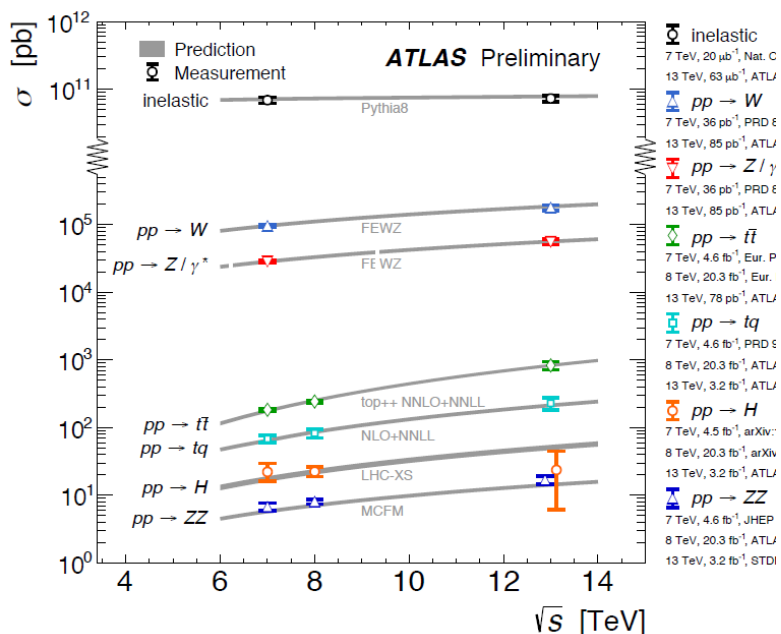
素粒子構造部門 2015

■ LHC-ATLAS 実験 陽子陽子衝突 CERN 研究所

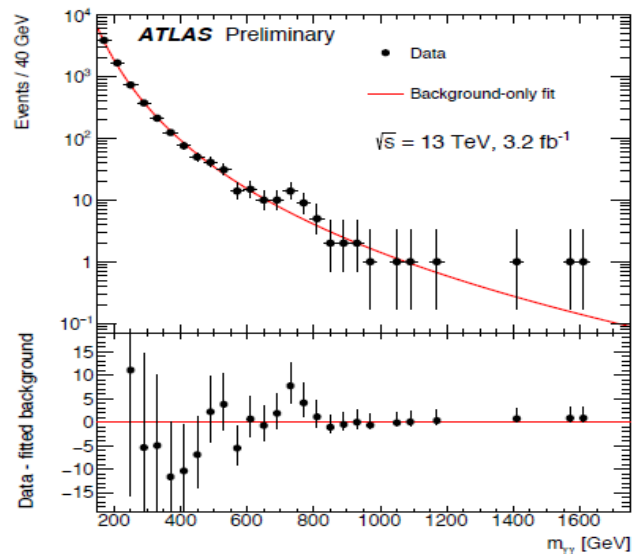
- データ取得再開 (2012 以来)
- 重心系エネルギー 8 TeV → 13 TeV
- 積分輝度 $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ 瞬間輝度 $5.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



種々の標準理論過程の生成断面積 vs. 重心系エネルギー



新物理の探索の例 : 新粒子 \rightarrow 2光子?

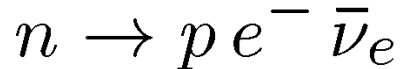


質量 $750 \text{ GeV}/c^2$ に excess
有意度 3.6σ local (2.0σ global)

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、
1998年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

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

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？

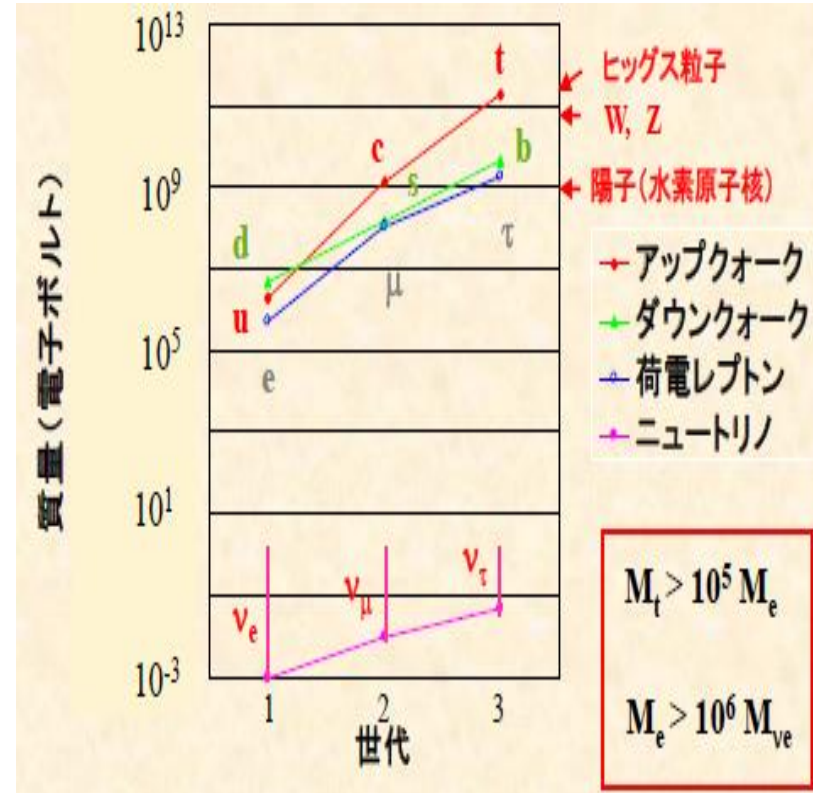
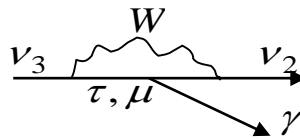
ニュートリノ質量の理解が先決

- 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
 \rightarrow 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 \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
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

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: 2018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).

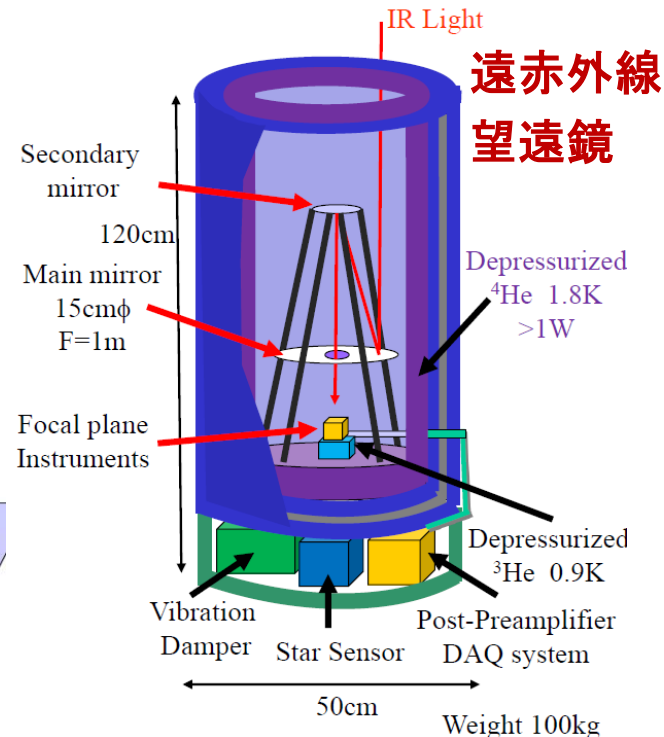
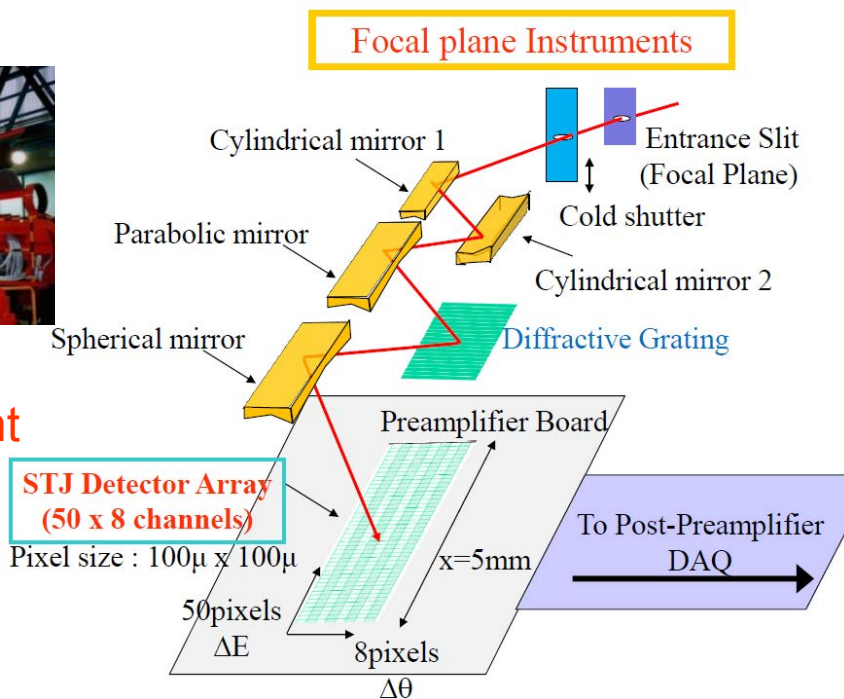
»超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を開発

50 Nb/Al-STJ ピクセルアレイと回折素子で遠赤外線エネルギー測定



JAXA Rocket
CIB Experiment

(Feb 2, 1992)



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

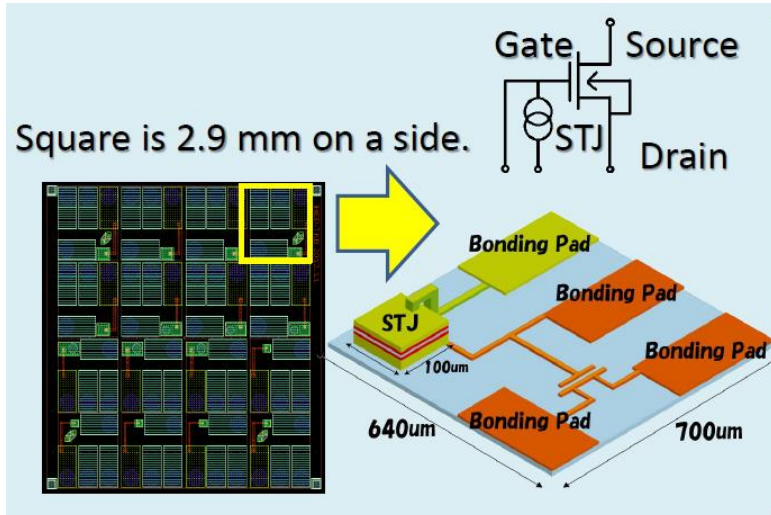
> Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験 (S. H. Kim et al. JPSJ 81,024101 (2012))

- $\Delta = 20\mu eV$: ハフニウムの超伝導エネルギーギャップが小さいので、回折格子なしでエネルギー測定。

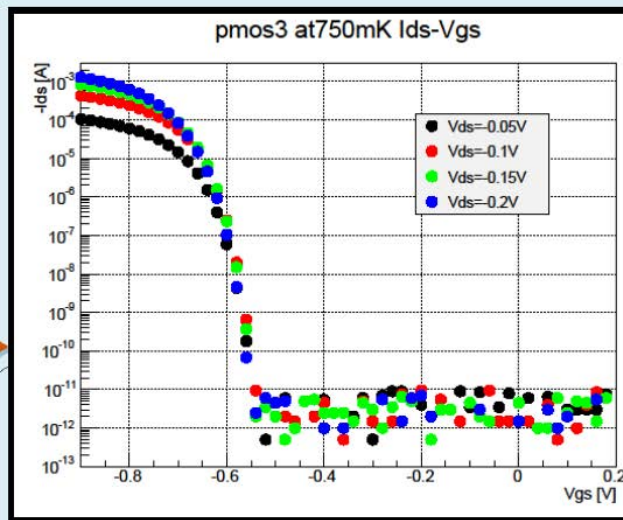
新型超伝導検出器SOI-STJの開発

SOI (Silicon-On-Insulator) 前置増幅器：
極低温 1 Kで動作する低ノイズ前置増幅器。

Nb/Al-STJ(Superconducting Tunnel Junction)を SOIトランジスタの基板上一体型で作成した。Nb/Al-STJ 赤外線検出器とSOIトランジスタが共に750mKで正常に動作した。



After applying 150 Gauss to STJ.



200nA / DIV.

I (1mA / DIV.)

2mV / DIV.

V (2mV / DIV.)

leak current of
Nb/Al-STJ is about
6nA at 0.5mV .

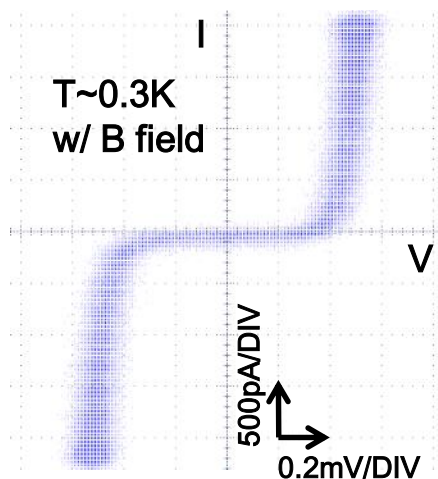
産学連携： 筑波大・K E Kグループが設計したSOI前置増幅器基板をLAPISセミコンダクター社が製作、産総研が基板上にSTJをプロセスする。試作機の試験を筑波大で行っている。

現在、ノイズを低減する改善を順調に進めており、今後2年間で開発を終了して実際の測定装置の製作に着手する。製作開始の2年後の2018年に完成した測定装置をロケットに搭載して、ロケット実験を実施。

■ 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/Al-STJ(産総研 CRAVITY) の電流-電圧特性

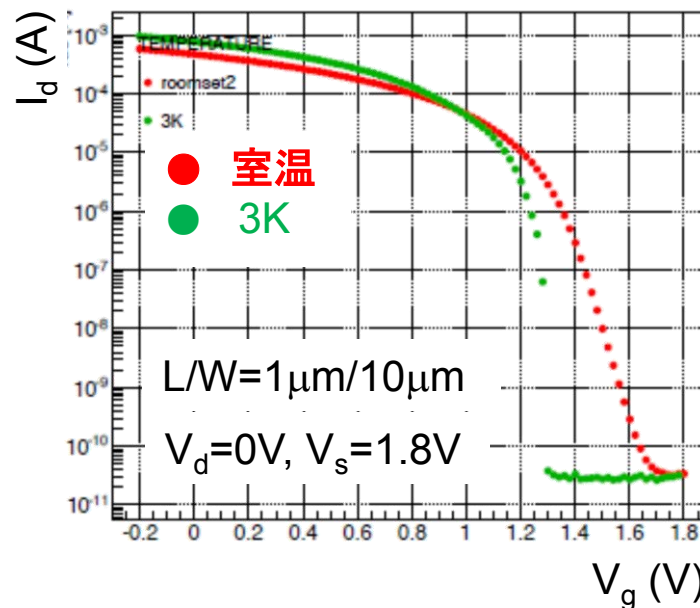


低漏れ電流 200pA@V=0.4mV を達成
単一光子測定ではさらに有利に

他に, STJ 素子の静電容量の測定など

SOIプロセスによる P-MOS FET の電流-電圧特性

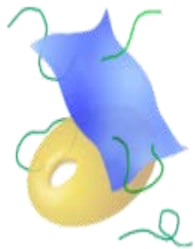
電荷積分型増幅器の要素



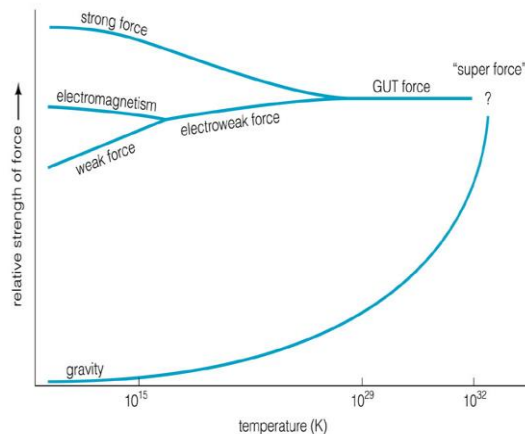
3 K でトランジスタとして動作
特性は室温から変化 → 理解・simulation

素粒子構造部門：超弦理論の研究

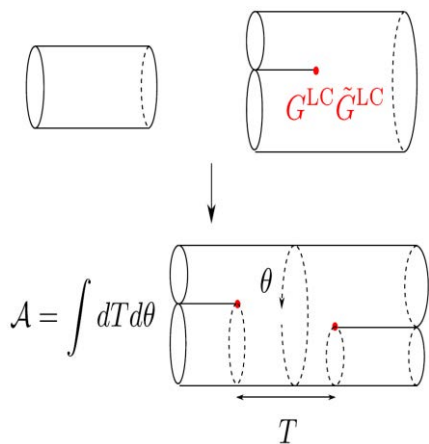
素粒子は点ではなく長さを持つ弦である



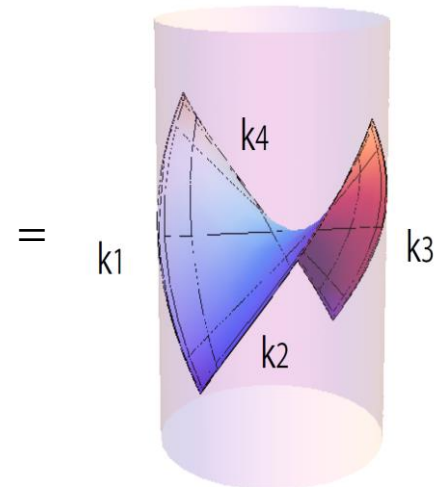
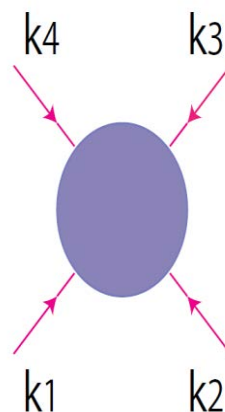
- 重力の量子論
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一
ヒ格斯粒子の質量を説明する



○弦の場の理論

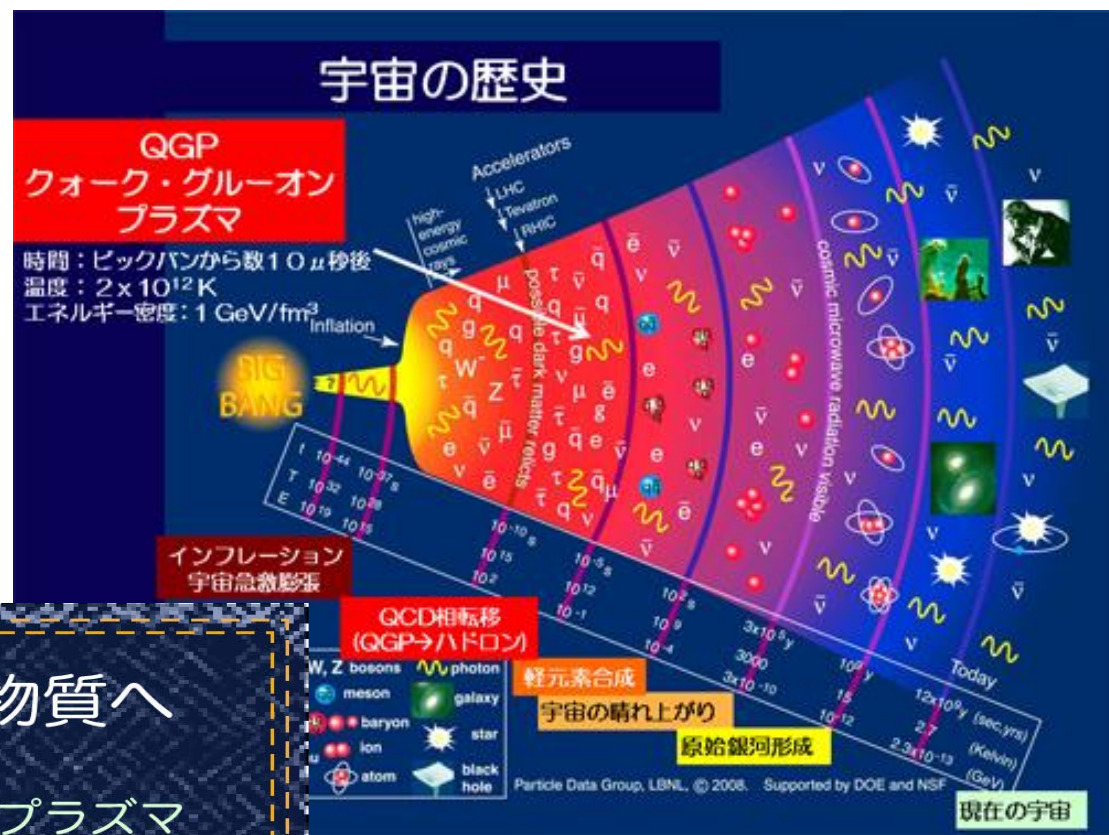


○AdS/CFT対応を用いた強結合ゲージ理論の研究

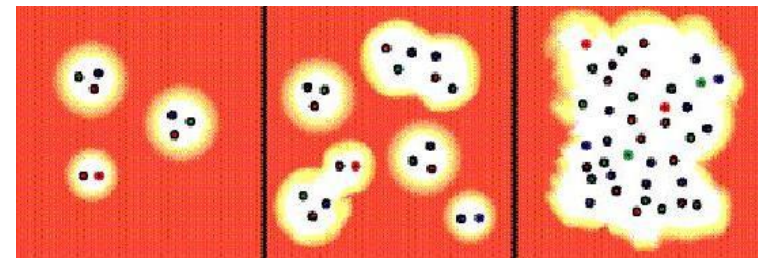
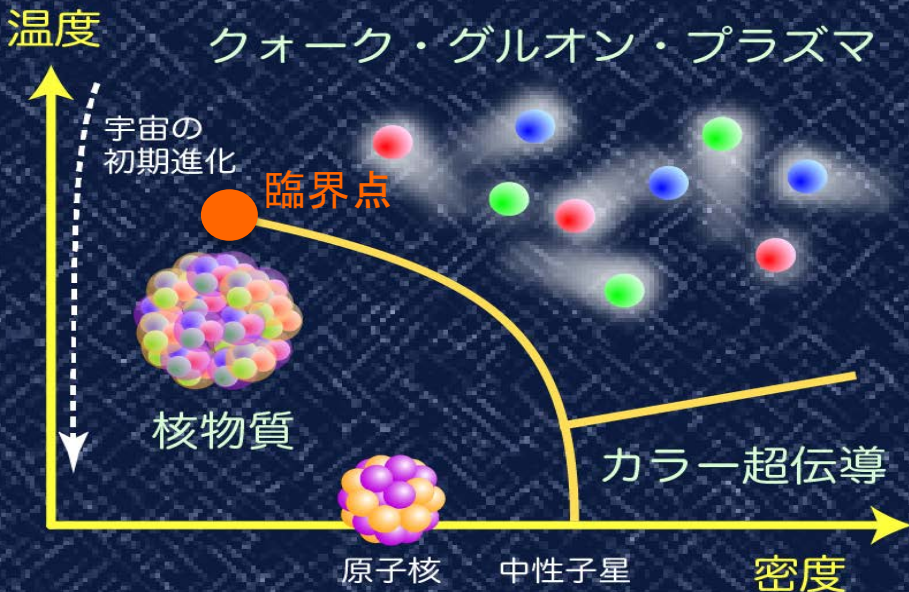


クォーク・核物質部門

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

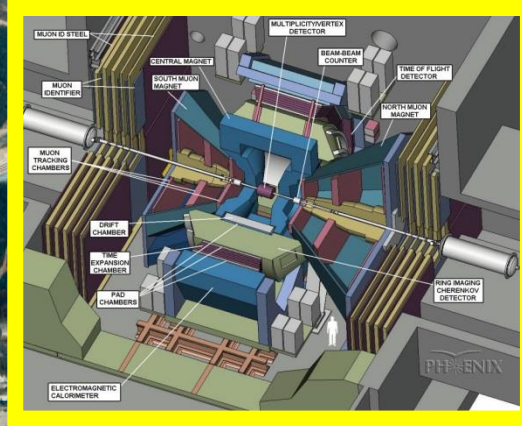
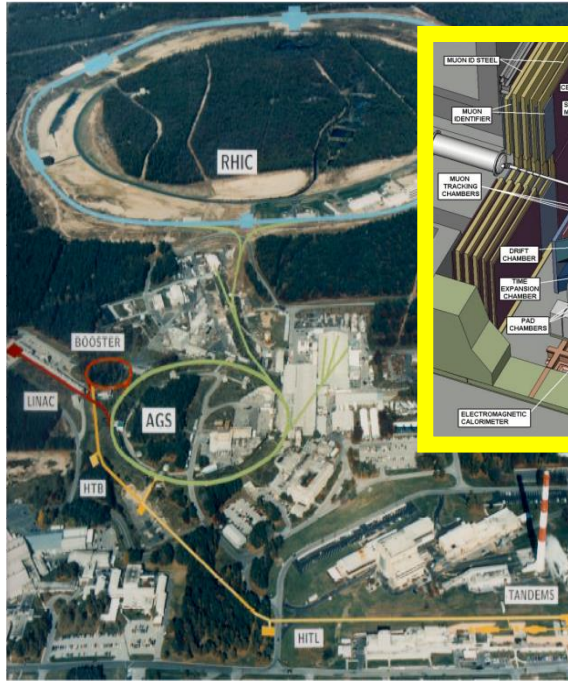


核物質からクォーク物質へ



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

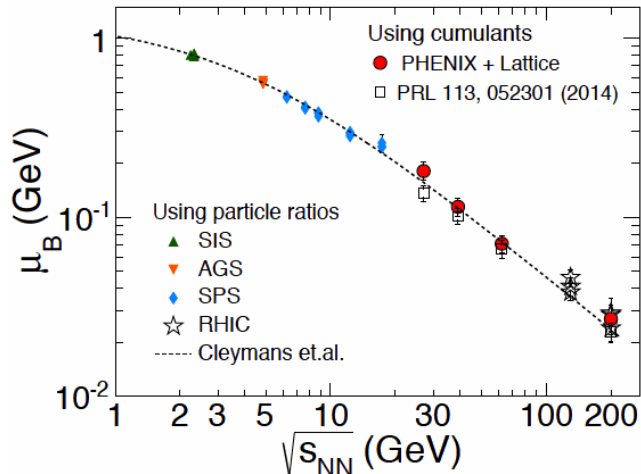
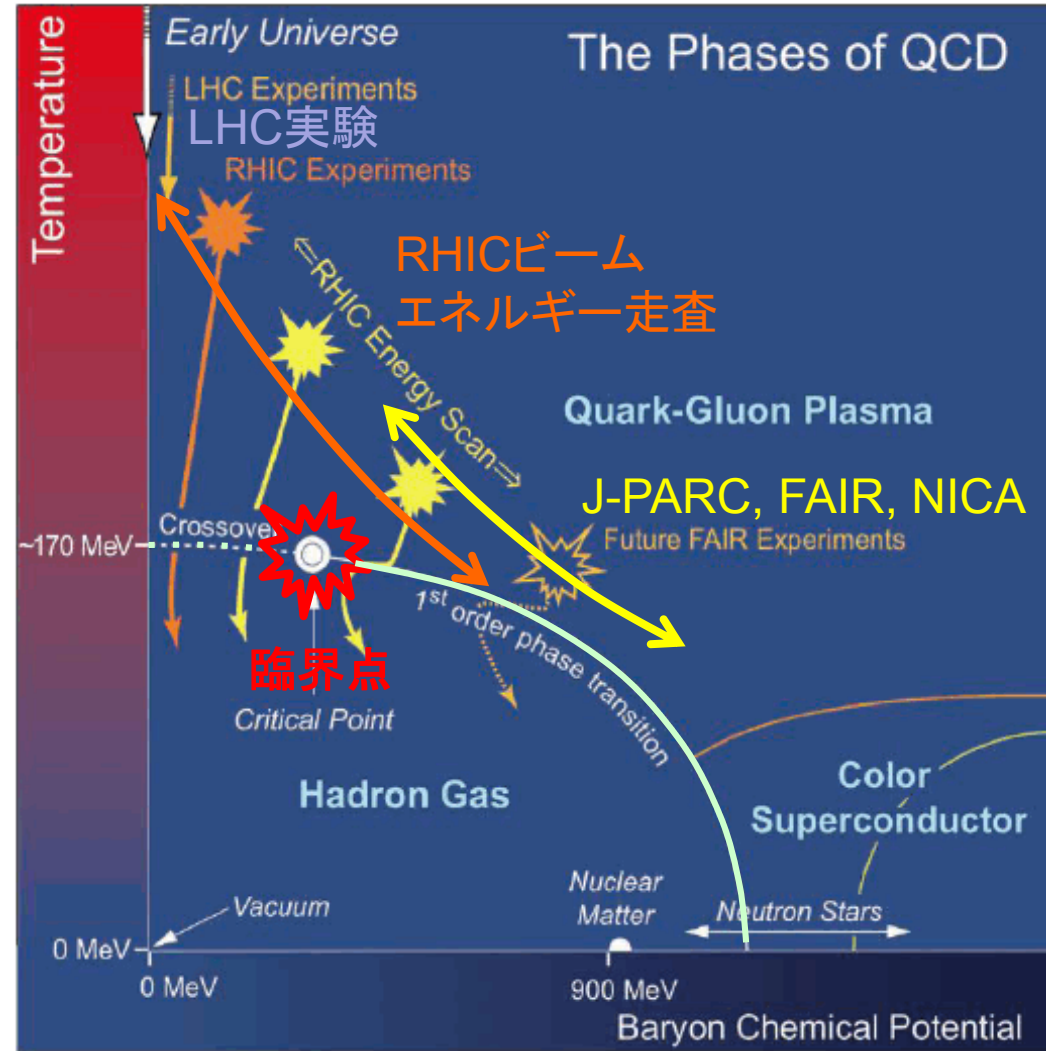
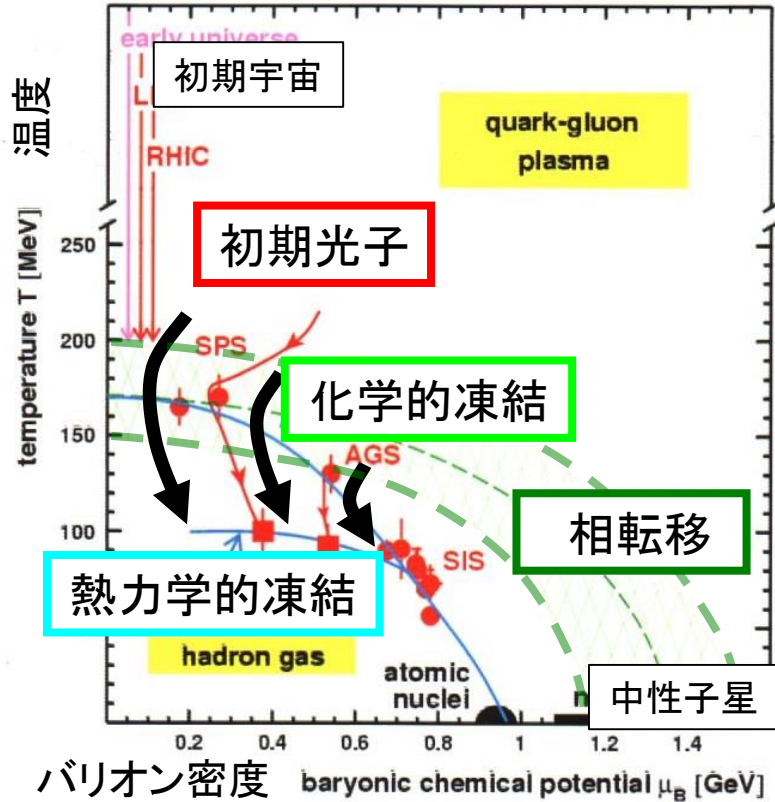


QCD相図 (Hadron-QGP相転移)

重イオン衝突における系の発展

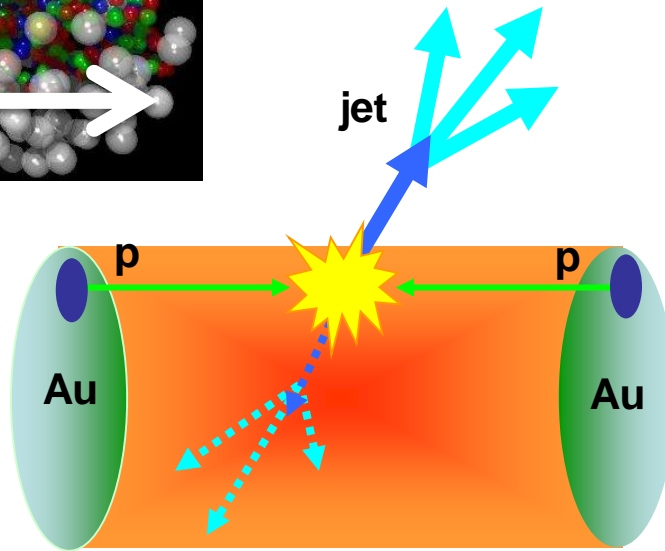
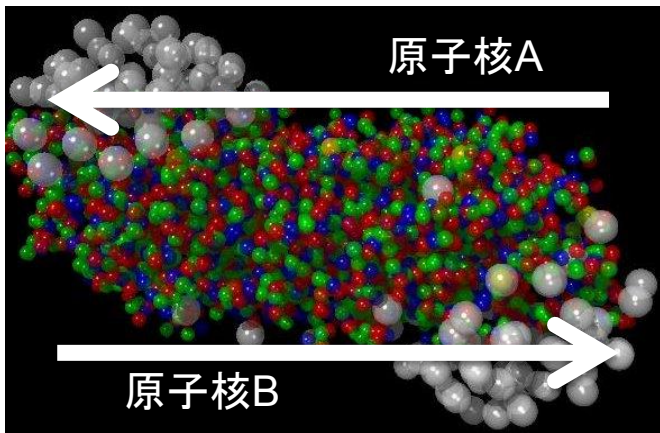
→

QCD臨界点探索

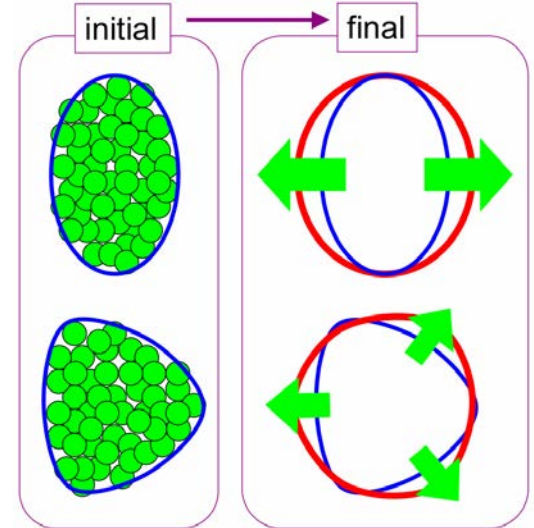


Baryon density from beam energy scan,
20-200GeV Au+Au, RHIC-PHENIX,
arXiv:1506.07834

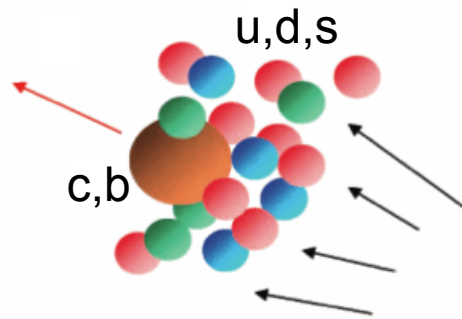
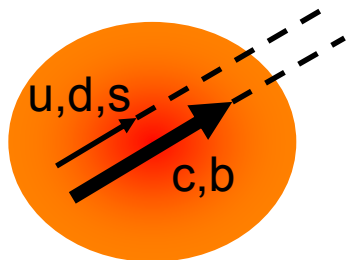
高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)研究



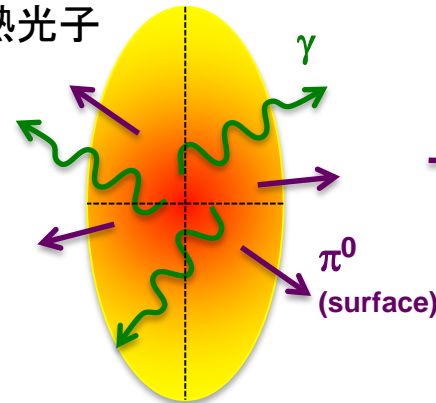
異方性の発展、膨張



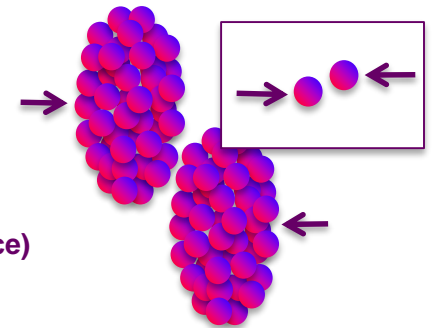
クォーク世代、質量依存性



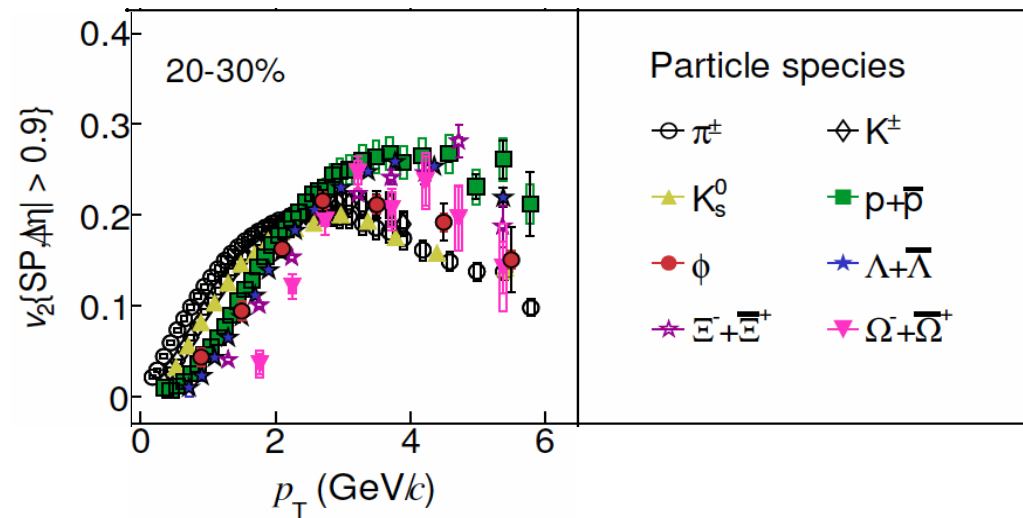
透過プローブ
熱光子



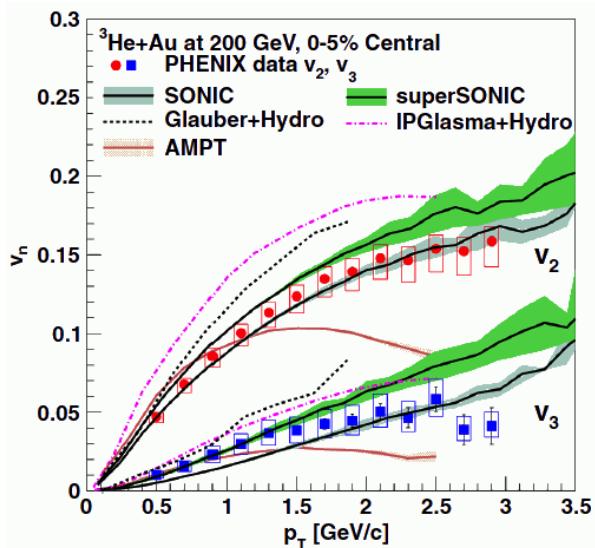
小さな高密度系



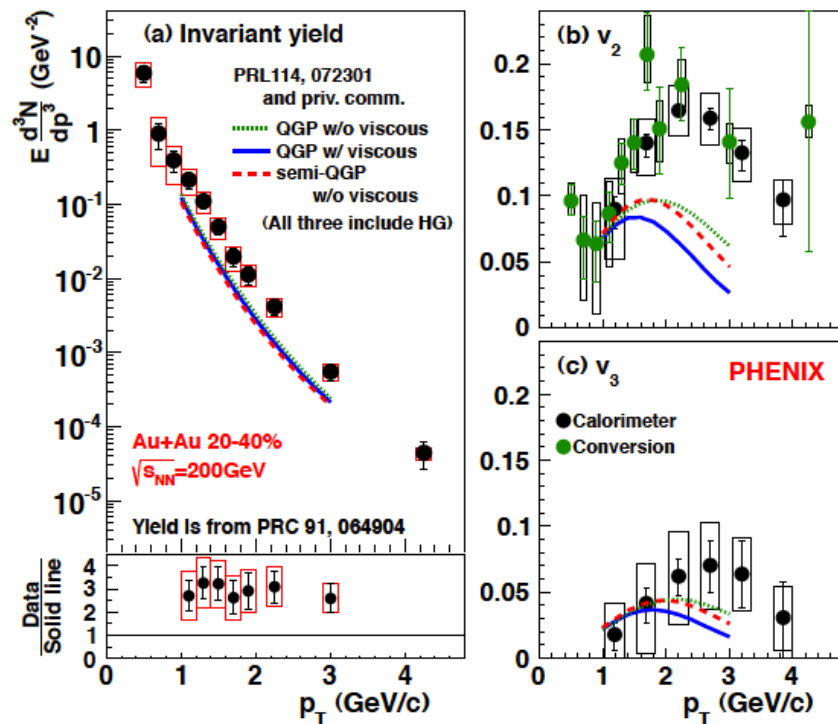
Elliptic Flow, 2.76TeV Pb+Pb,
LHC-ALICE, JHEP06(2015)190



Flow in small system, 200GeV $^3\text{He}+\text{Au}$,
RHIC-PHENIX, PRL115(2015)142301



Direct photon, 200GeV Au+Au,
RHIC-PHENIX, arXiv:1509.07758



宇宙史国際研究拠点の研究成果発表のまとめ(H26年度)

論文 184件

国際会議報告 29件

国内研究会報告 75件

(部門別)

南極天文部門

論文数 18

国際会議報告数(国内研究会報告数) 1 (43)

素粒子構造部門

論文数 93

国際会議報告数(国内研究会報告数) 13 (23)

クォーク核物質部門

論文数 73

国際会議報告数(国内研究会報告数) 15 (9)

拠点の計画と体制

- 光量子計測器開発推進室・逆問題推進室との連携
- 宇宙史コンソーシアム
- 宇宙史ワークショップ
- 年次計画
- 外部資金
- 概算要求

光量子計測器開発推進室

センター共有の光量子計測機器開発基盤+つくば地区連携大学拠点

筑波大およびつくば研究機関における理工学分野の密接な連携により、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測器技術の産業社会応用を推進する。

数理物質融合科学センター

宇宙史国際研究拠点

融合研究企画室

環境エネルギー材料研究拠点

光量子計測器開発推進室

開発室員：金(室長)、富田、江角、原、西堀、近藤

超伝導検出器の開発, SOIピクセル検出器の開発, MPPC読み出しミュー粒子検出器等+公募プロジェクト

2015/10/19 発足

TIA-ACCELERATEの光量子センシングスクエア(光量子計測技術開発を目的とする)における筑波大学の活動拠点。

つくばの他機関との連携

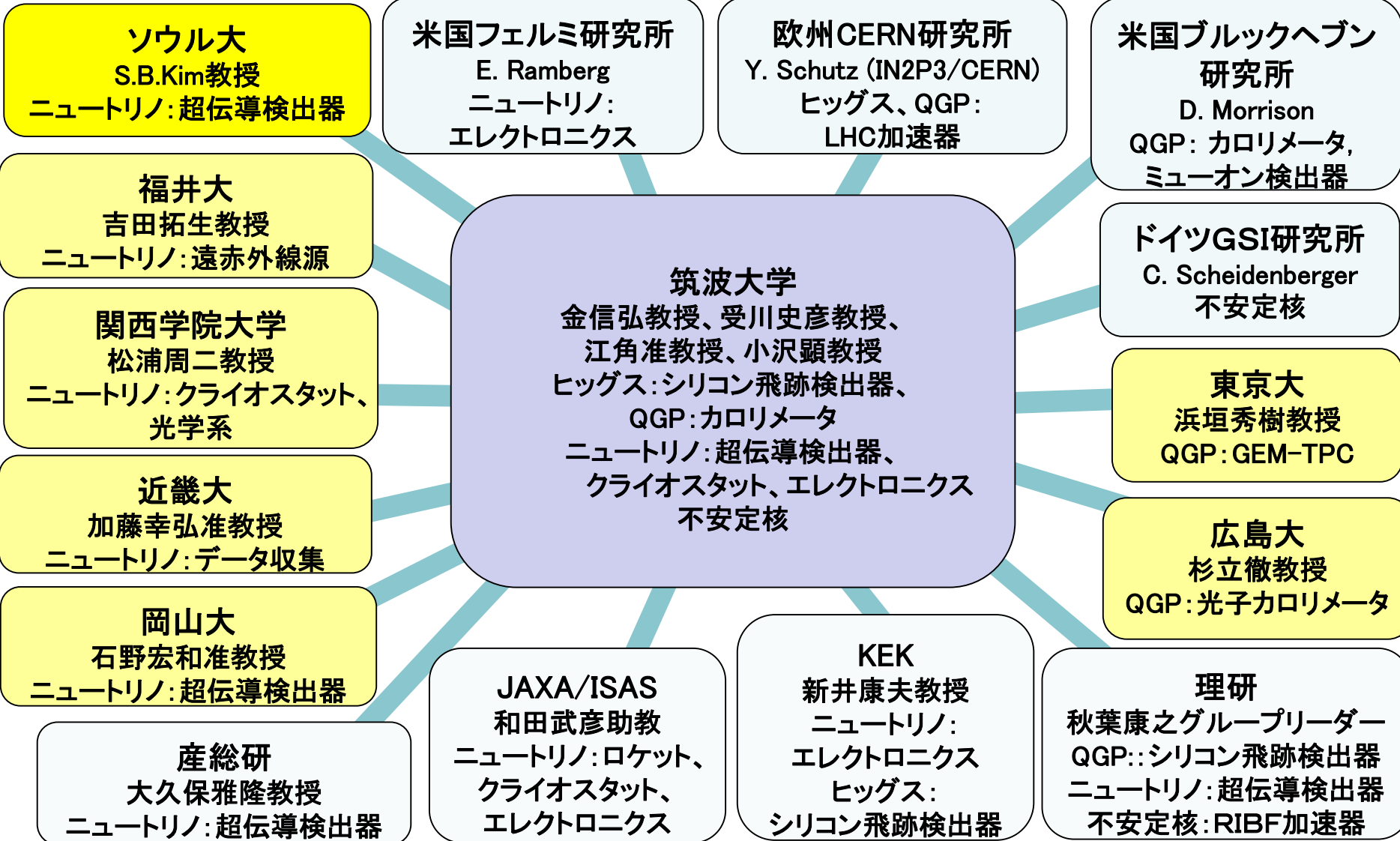
TIA-ACCELERATE
光量子産業応用イニシアチブ

KEK 測定器開発室
産総研 CRAVITY施設

宇宙史研究のための実験・観測に用いる計測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。南極望遠鏡や素粒子原子核実験・理論の大規模データ解析と逆問題推進室の連携も同様に推進する。

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。→ 宇宙史国際研究セクター



宇宙史ワークショップ

2015/9/30 国際会議TGSW2015 宇宙進化・物質起源セッション

国際会議 Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015)

宇宙進化・物質起源(Universe Evolution and Matter Origin)セッション

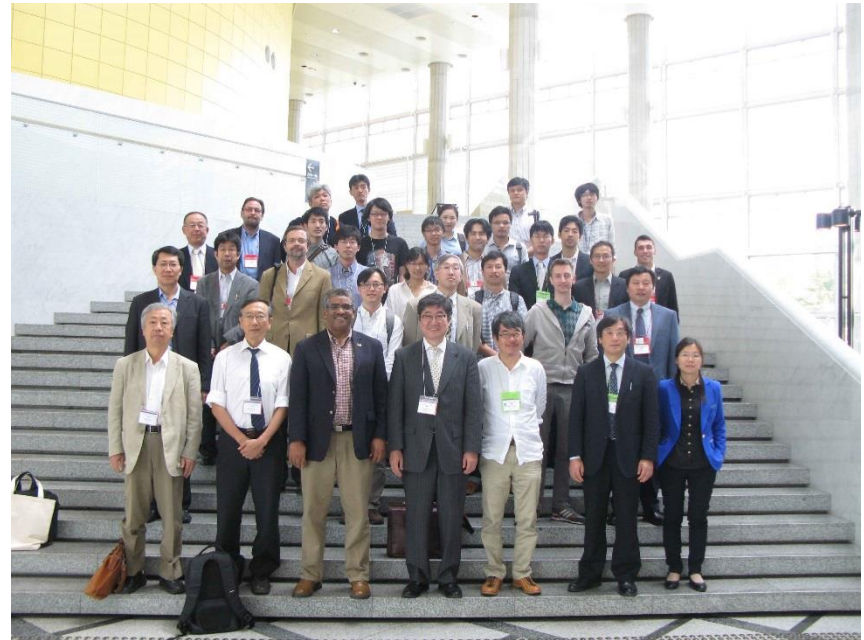
日時: 9月30日 9時~17時30分:

場所: つくば国際会議場3階会議室300

参加者: 53名 (約10名の外国人研究者(招待講演者5名)を含む)

このセッションは、筑波大学数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点が目指す、素粒子・原子核・宇宙物理学の融合による宇宙史の統一的理解を飛躍的に推進させるために、多数の海外研究者を含めて宇宙史研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催されました。

宇宙史コンソーシアムのソウル大学代表者等5名が招待講演者として参加。



プログラム等の詳細は宇宙史国際研究拠点ページをご覧ください。

<http://hep.px.tsukuba.ac.jp/CiRfSE/RCHOU/TGSW/2015/>

宇宙史国際研究拠点(朝永センター)研究年次計画

	初年度 2016	2年目 2017	3年目 2018	4年目 2019	5年目 2020	6年目 2021	
宇宙背景ニュートリノ	超伝導検出器開発・制作		ロケット実験	データ解析			
			超伝導検出器開発・制作			衛星実験・データ解析	
南極天文台	電波カメラ開発		10m望遠鏡 制作・評価		輸送・建設	観測	
			超大規模電波カメラ開発		30m望遠鏡 設計・試作		
クォーク・核物質	PHENIX実験@BNL		データ解析				
	ALICE実験@CERN						
							実験@CERN
ヒッグス粒子	13 TeV ATLAS実験@CERN						
							実験@CERN
不安定原子核	N ≈ 50 RIBF実験@RIKEN						
			稀少RIリング アップグレード		N ≈ 126 RIBF実験@RIKEN		
宇宙・物質シミュレーション	宇宙モデルによるシミュレーション => 実験・観測との直接比較 => 宇宙論パラメータの精密決定						
				=> 暗黒物質、暗黒エネルギーの詳細説明 => 宇宙構造形成、銀河形成理論の確立			
	元素創生モデルによるシミュレーション => RIBF実験との直接比較						
				=> 南極天文台観測との直接比較			
		宇宙史研究会	宇宙史国際WS		宇宙史研究会	宇宙史国際シンポ	

これら5実験は日本学術会議マスタープラン2014大型研究計画として採択。

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

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) H28～ 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～ 2500万円

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

日独共同研究「アリス実験における遷移放射検出器を用いた粒子識別とジェット物理」

(代表:江角)平成28年度～平成30年度

基盤(S)「ALICE実験-前方光子測定による高グルーオン密度物質と高温クォーク物質の解明」

(代表 中條)H28～

頭脳循環「ALICE実験遂行」(東大CNS、 広島大、筑波大、代表:中條) 平成28年度～

基盤(A)「RHIC加速器のビームエネルギー走査によるクォーク物質相図の臨界点探索」

(代表:江角)平成28年度～平成32年度

基盤(A)「Parton fragmentation and jet structure in the QGP」

(代表:Busch)平成28年度～平成30年度

宇宙観測

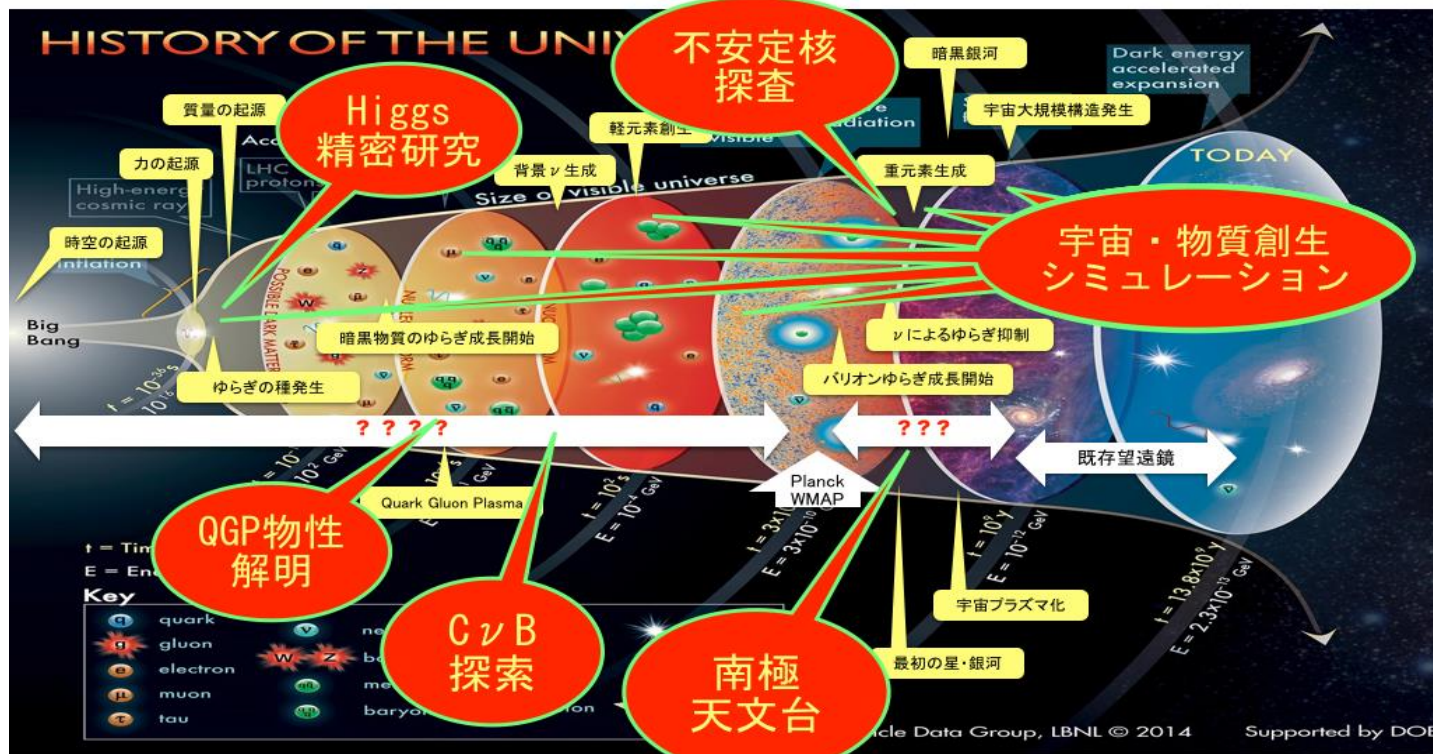
南極望遠鏡

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

概算要求：宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成

平成28年度 教育研究活動(プロジェクト等)に係る事業費要求(新規事業)

宇宙史の暗黒部分とその解明に向けて



- ☑ 生命につながる元素の起源？
- ☑ 宇宙の構造の起源？ 力・物質・時空の起源？
- ☑ 実験的に未解明の領域(暗黒)が多く残されている。
- 🔗 最先端の宇宙観測、素粒子・原子核実験プロジェクトを有機的に融合
- 🔗 現象とメカニズムの同時解明
- 🔗 物質と生命の起源に迫る新領域の国際的研究ネットワークを形成

宇宙史の暗黒部分の解明に向けて、筑波大学が主導する5つの大型実験プロジェクトとシミュレーション研究を融合。

年次計画

