

宇宙史国際研究拠点の活動について

数理物質融合科学センター運営協議会

2014年12月17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

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：数理

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

融合研究

室長：セ

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K

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
8/1着任

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、Busch
12/16着任

連携教員：
三明、金谷、
藏増、谷口

逆問

構成
磯
千

連携

青
田
竹
宮
石
照
中

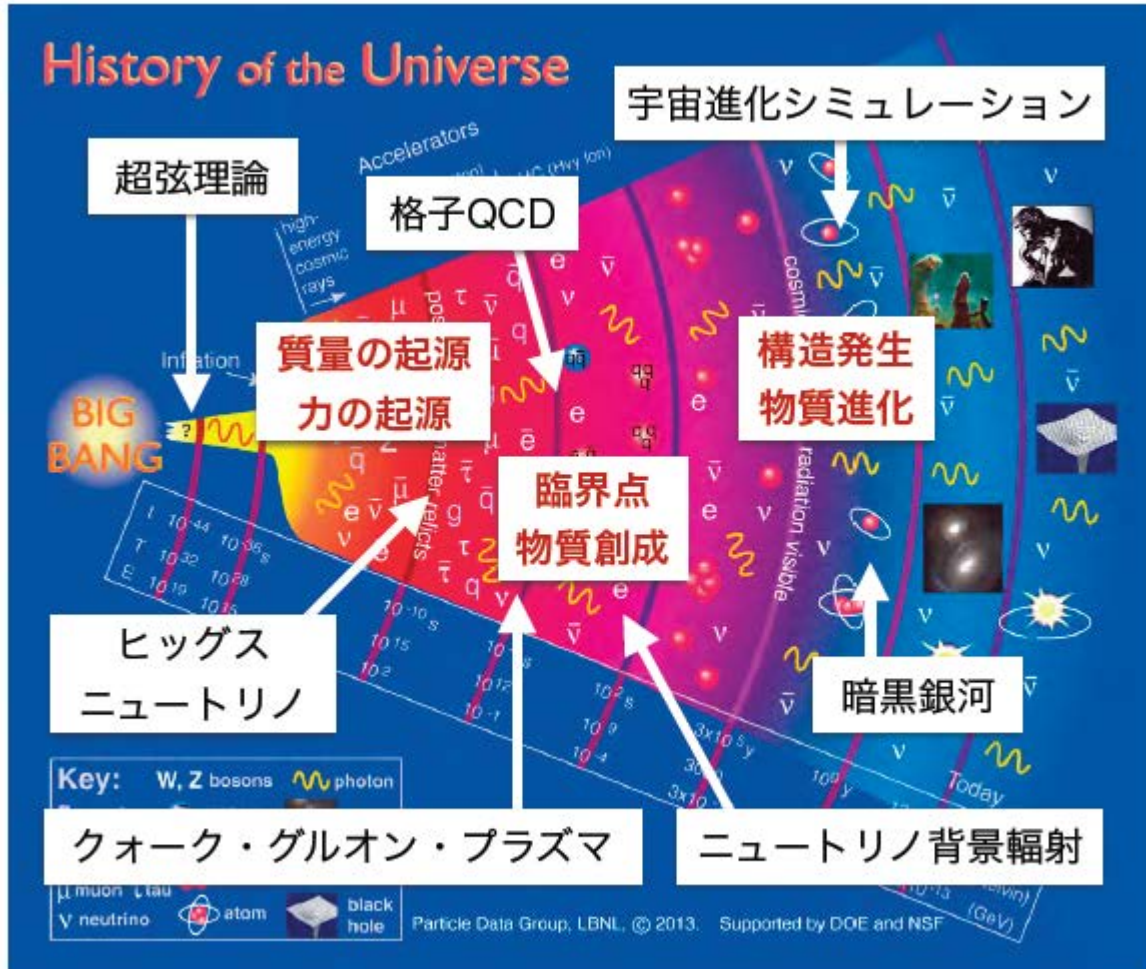
3つの部門：

- ・ 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

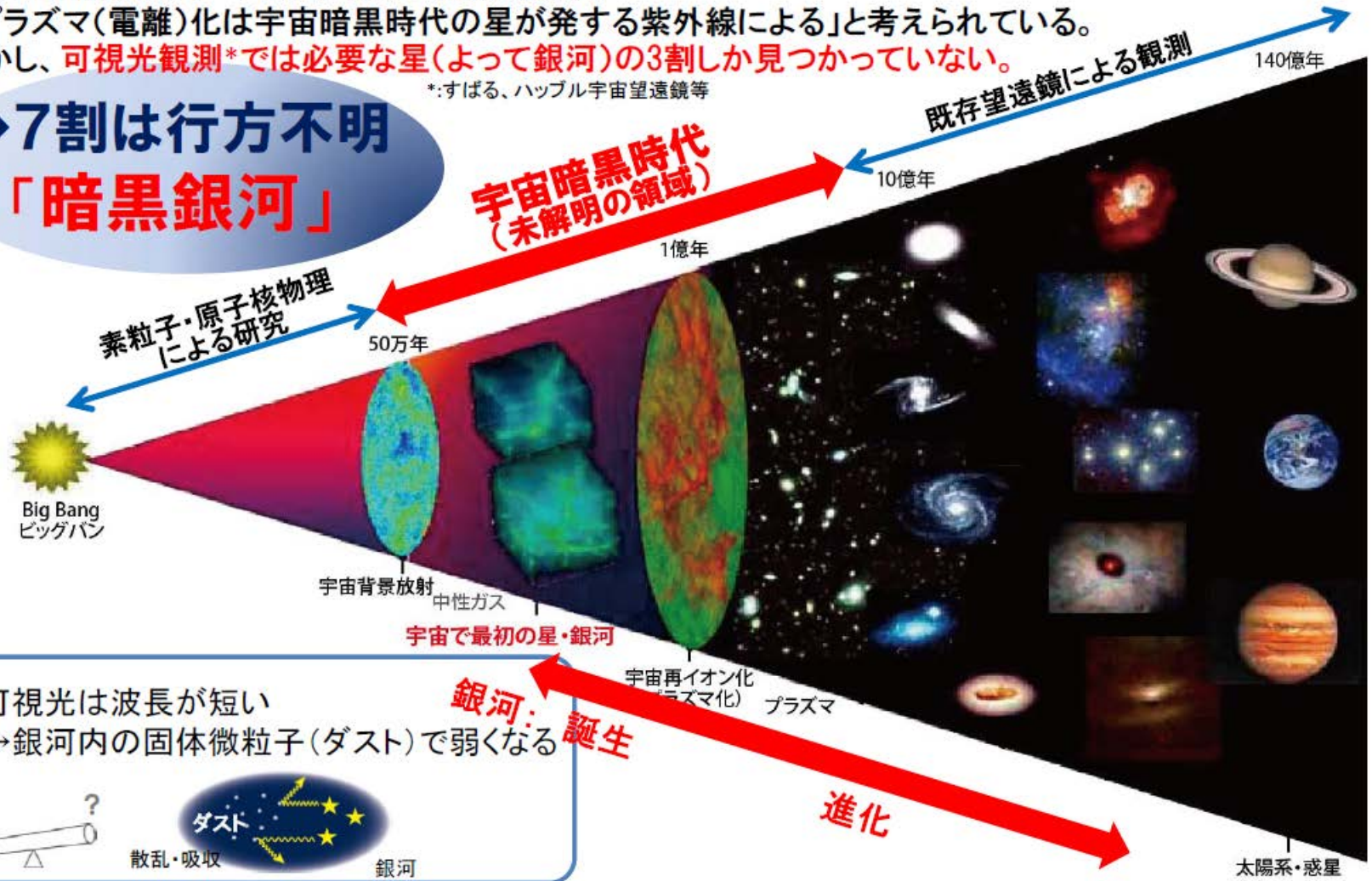
宇宙空間はほぼすべてがプラズマ(電離ガス)。

「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。

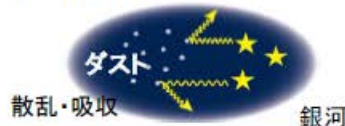
*:すばる、ハッブル宇宙望遠鏡等

→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



南天全体の暗黒銀河のサーベイ観測

南天全体

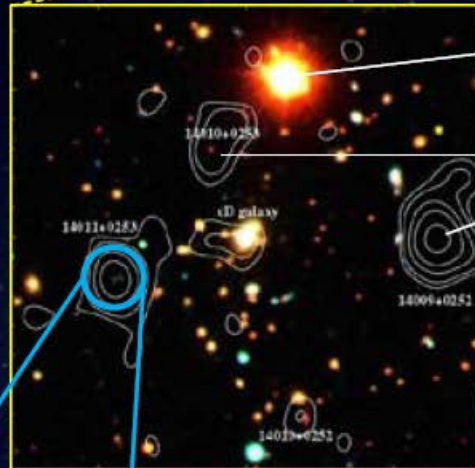
発見!

南極テラヘルツ望遠鏡

①南天全体から暗黒銀河を
発見

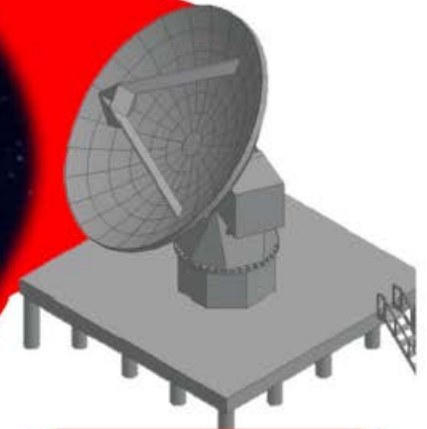
拡大

光学写真

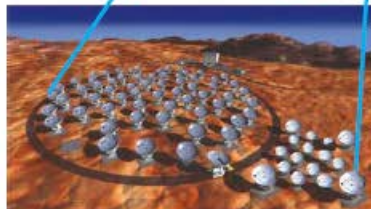


近くの銀河(光学写真)

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)

渦巻銀河のガスの運動速度ベクトルの決定

宇宙の観測では、天体の速度はドップラー効果で求めるため、視線方向の速度しか測定できない。



銀河の中では、星やガスは銀河の中心のまわりを回転している。しかし、回転の速度(向きと大きさ)や軌道はこれまで求めることができなかった。

我々(Miyamoto, etc 2014 PASJ 66,36)は、渦巻銀河(M51)において渦状腕の性質を利用した特殊な方法を考案し、**ガスの速度ベクトルを決定**することに成功した(図3)。



これらの速度ベクトルを回転方向に連結することによって、**ガスの軌道も決定**することができた(図4)。その結果、星の密度が高い渦状腕の重力ポテンシャルによってガスが渦状腕を通過するとき軌道が大きく曲げられるという理論仮説を証明した。



これによって、ガスから星が生まれる**星形成過程に大きな影響**を与えることも明らかにした。

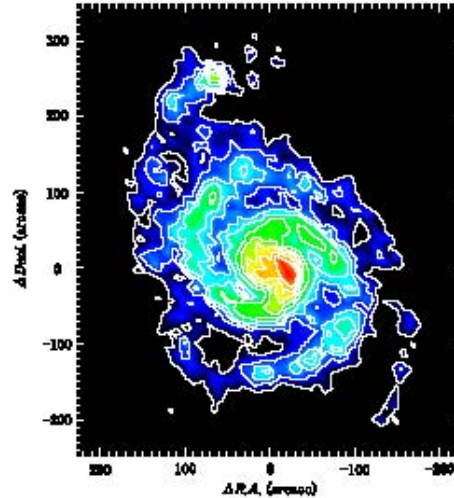


図1. 渦巻銀河M51のガスの分布

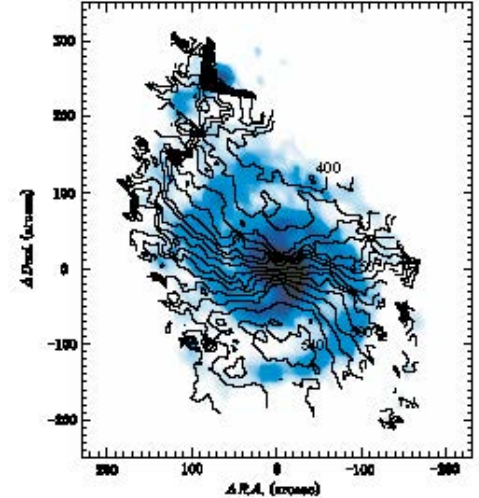


図2. 測定されたガスの視線方向の速度の分布

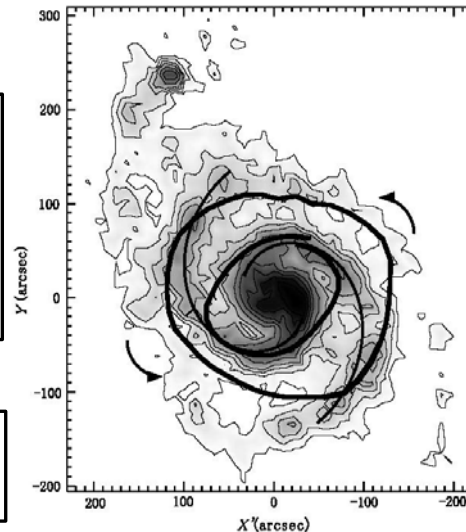


図4. 決定されたガスの回転軌道

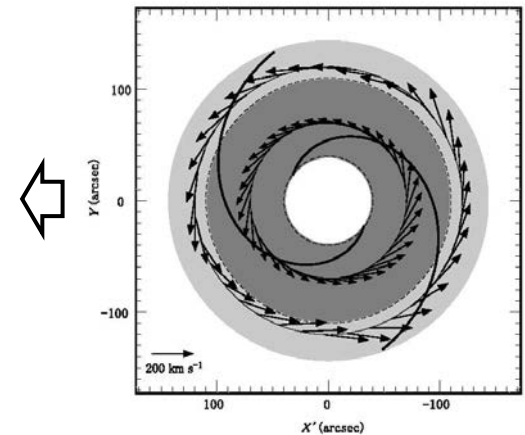


図3. 決定されたガスの速度ベクトル(矢印)。

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

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**



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
このだけ
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

の発表会場には、約にヒッグス粒子の存在し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)

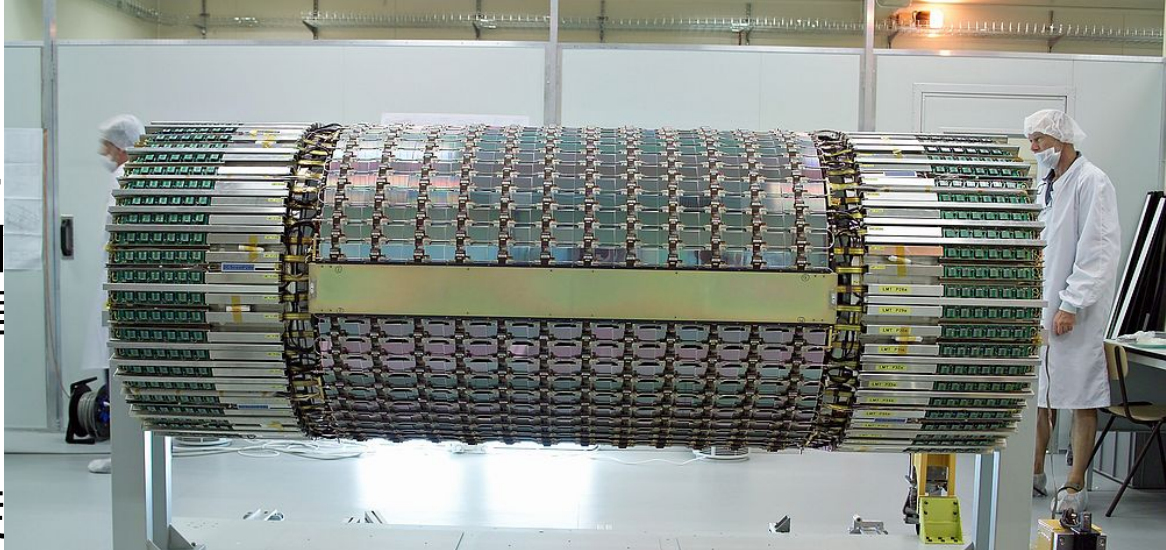
Nのロルフ・ホイヤーヒッグス粒子とみられ発見について、「歴史か、これからの様々なめの始まりに過ぎなつ見解を発表した。Nの発表会場には、約にヒッグス粒子の存在した英エディンバラ大の・ヒッグス名誉教授かれ、拍手で祝福され(田中誠士)

発見

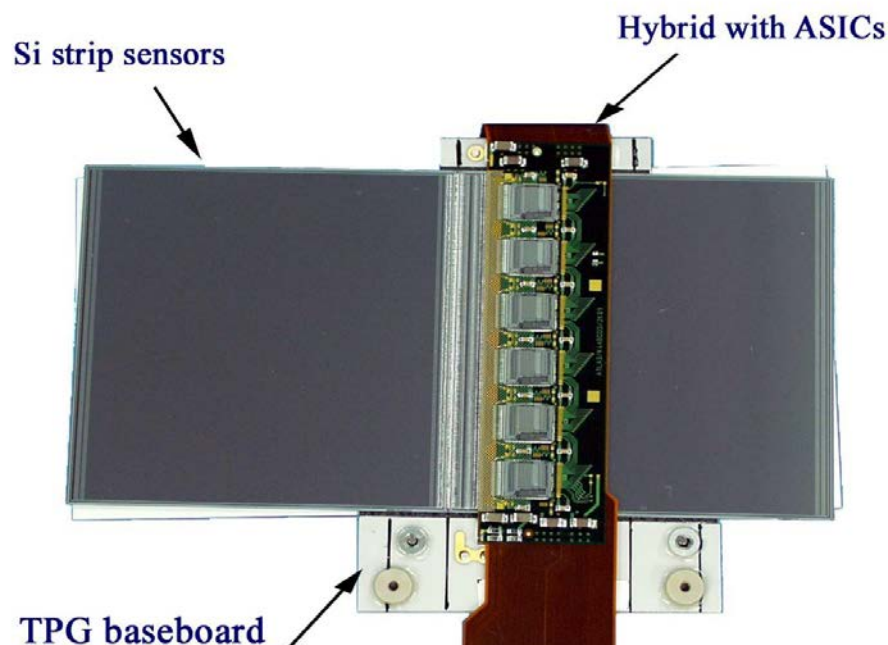
成果では、CMS、A共に、実験によって未子が生まれた確率を99%とはじきだした。であれば物理的に「発定できる。だが、新粒子であることを見るには、なおデータを重ねて発見を確定する

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

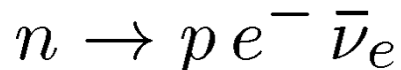
→ 新型シリコン飛跡検出器

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、
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？

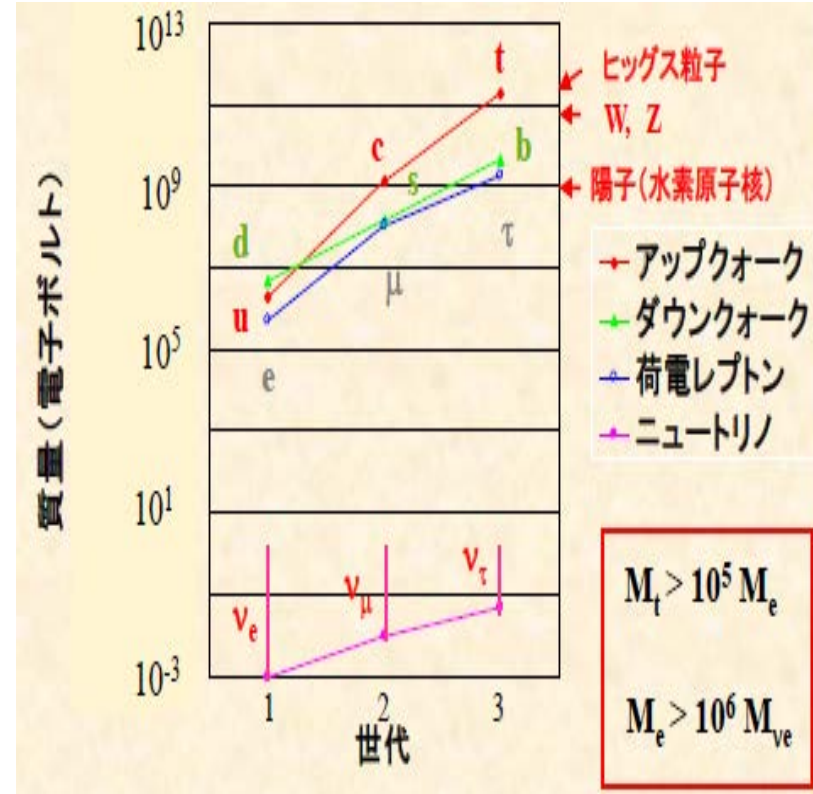
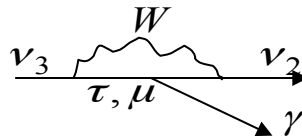
ニュートリノ質量の理解が先決

- 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).

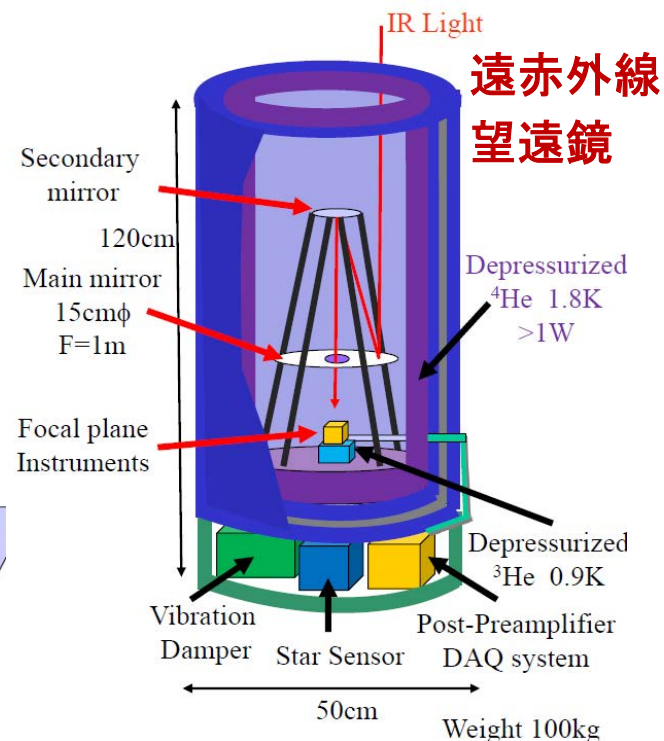
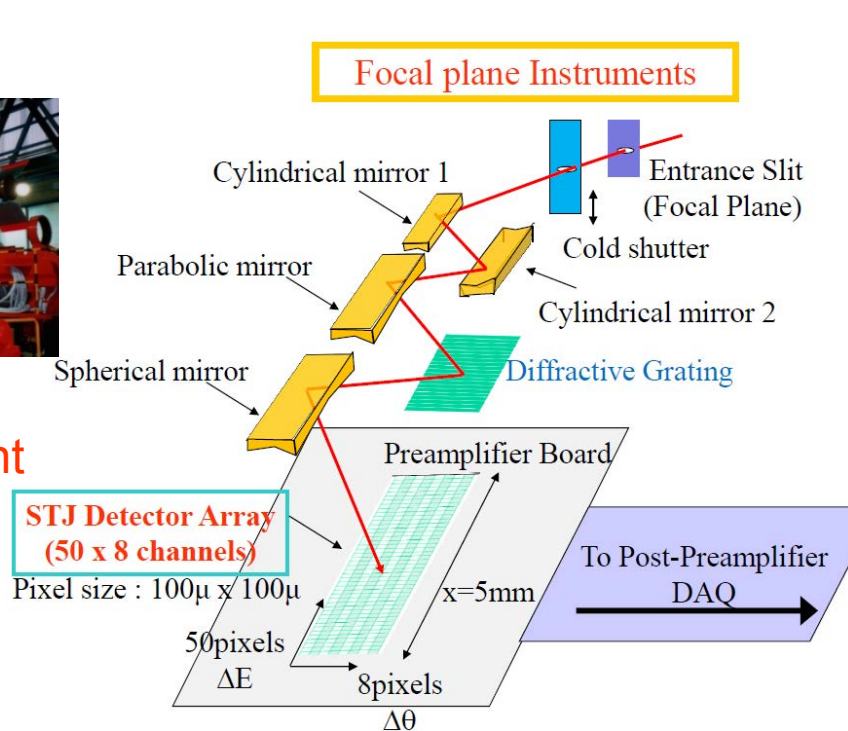
»超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を開発

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

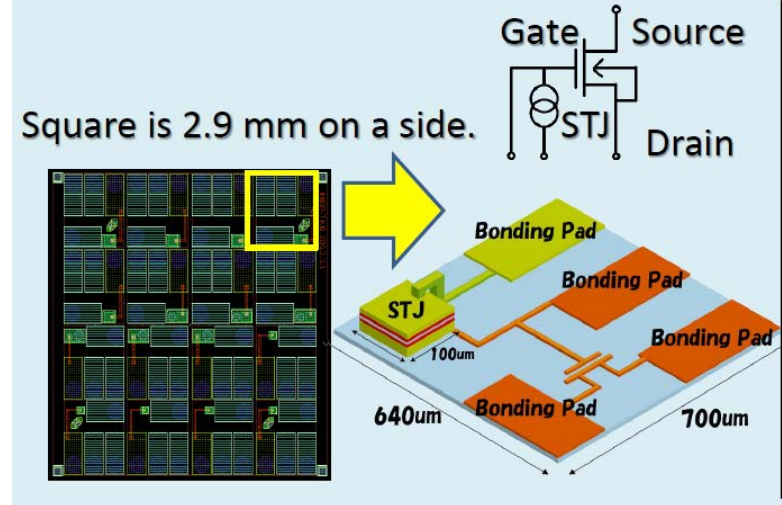
> Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験 (S. H. Kim et al. JPSJ 81,024101 (2012))

- $\Delta = 20 \mu eV$: 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。

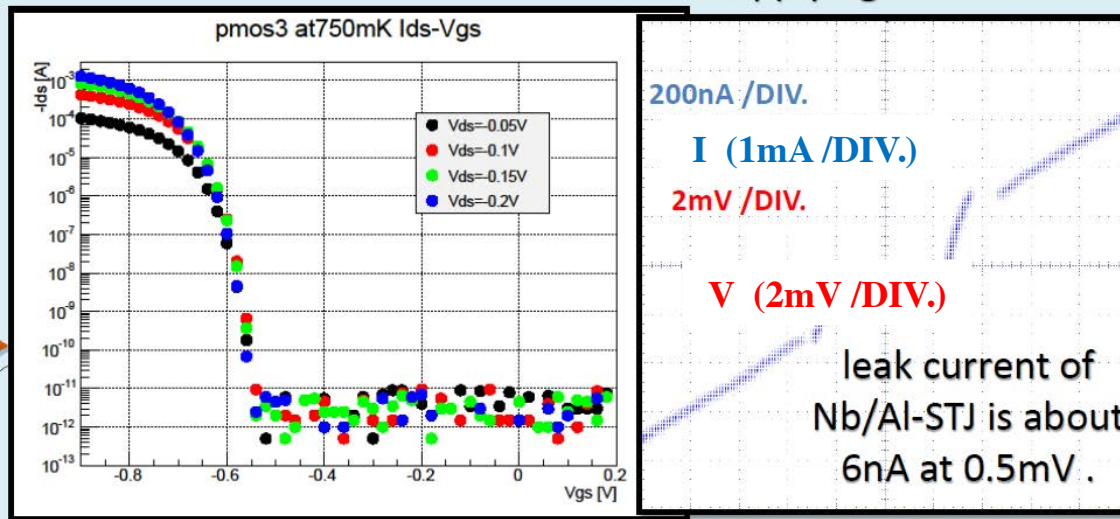
新型超伝導検出器SOI-STJの開発

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に一体型で作成した。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.

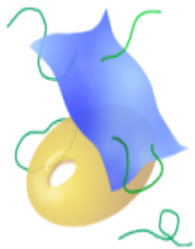


産学連携： 筑波大・KEKグループが設計したSOI前置増幅器基板をLAPISセミコンダクター社が製作、産総研が基板上にSTJをプロセスする。試作機の試験を筑波大で行っている。

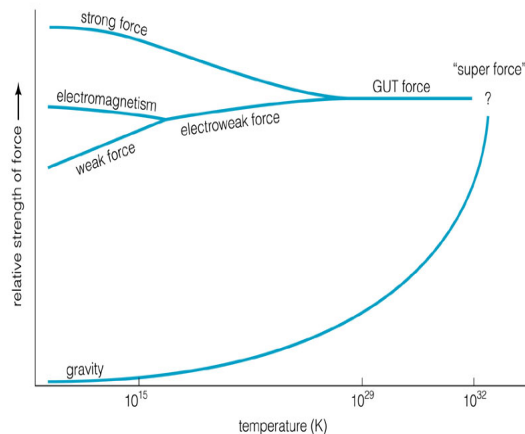
現在、ノイズを低減する改善を順調に進めており、今後2年間で開発を終了して実際の測定装置の製作に着手する。製作開始の2年後の2018年に完成した測定装置をロケットに搭載して、ロケット実験を実施。

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

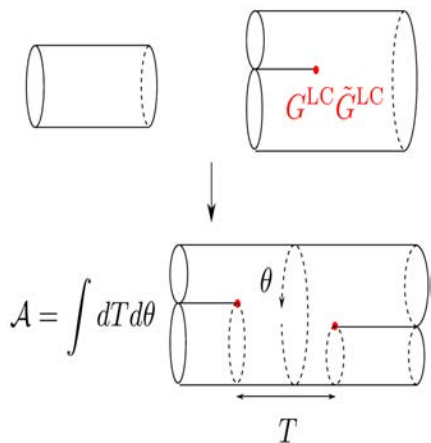


- 重力の量子論
くりこみ理論が通用しない
- 4つの力の統一
ヒ格斯粒子の質量を説明する

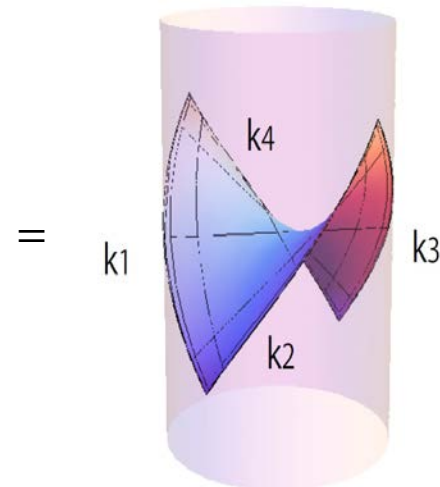
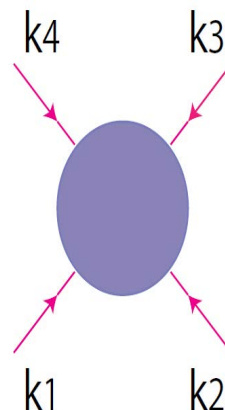


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

○弦の場の理論

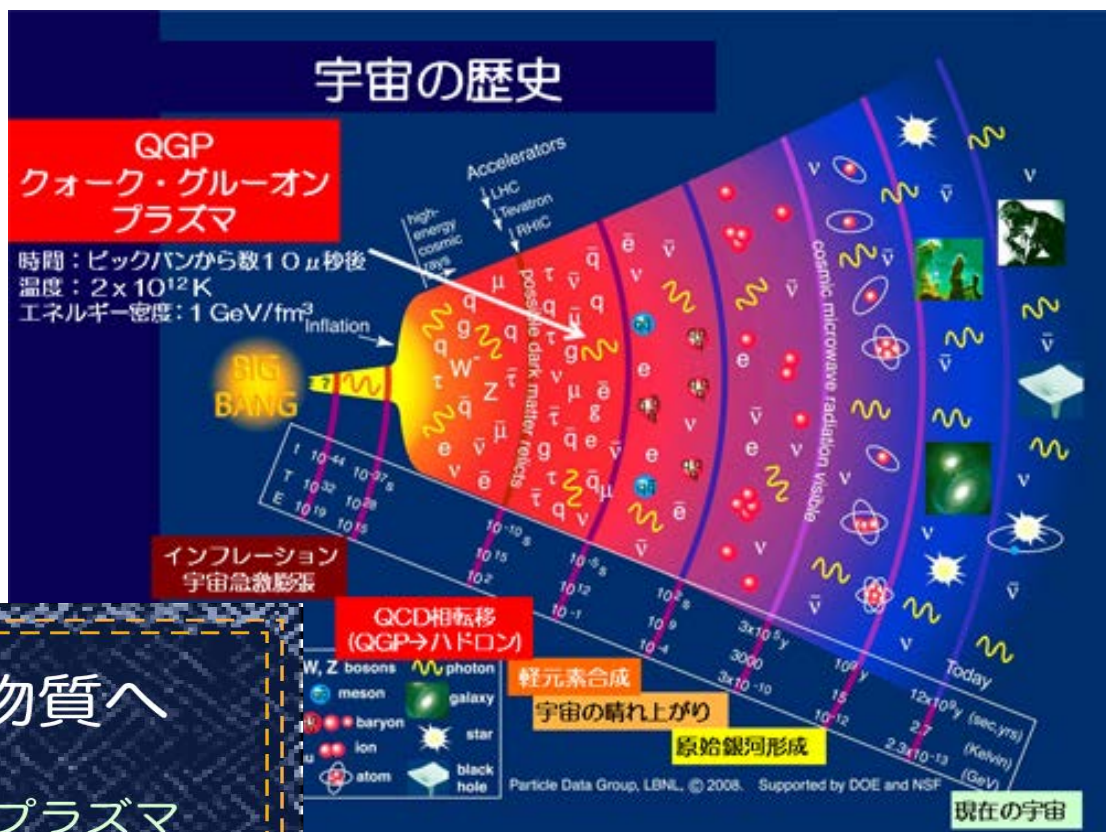


○AdS/CFT対応を用いた強結合ゲージ理論の研究

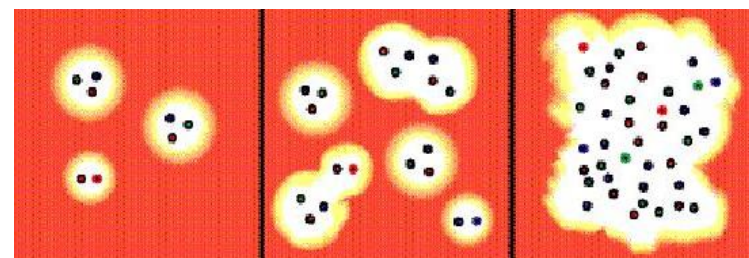
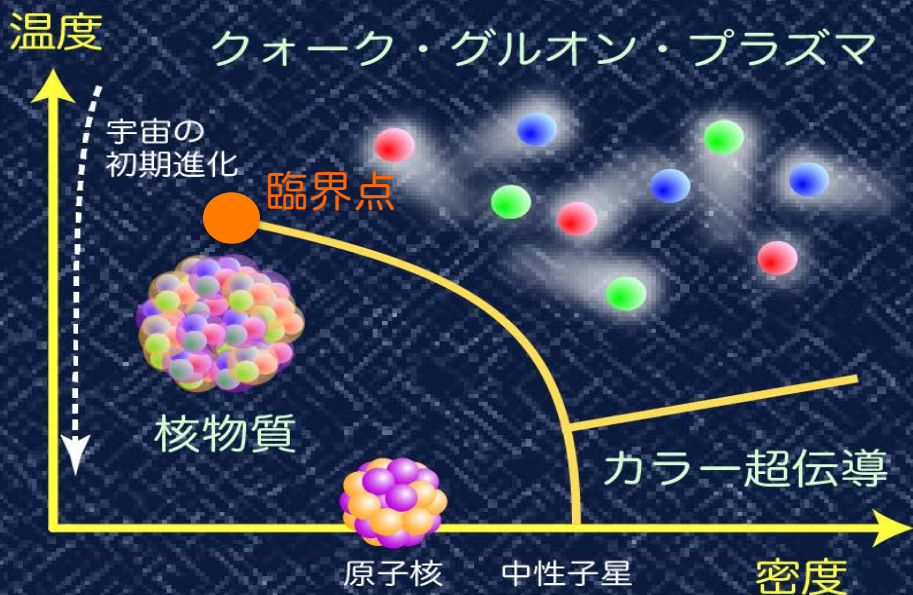


クォーク・核物質部門

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

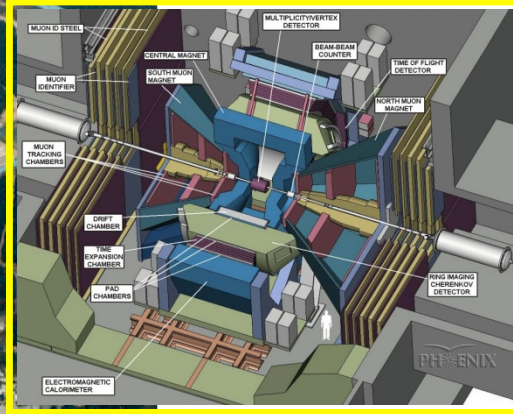
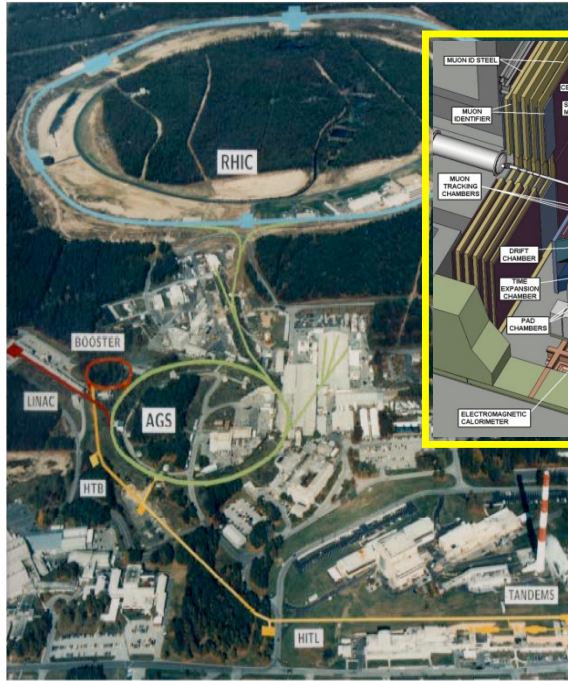


核物質からクォーク物質へ

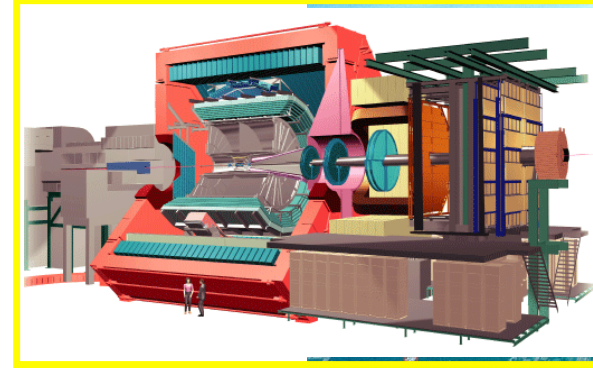


ハドロン相からクォーク相への相転移

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

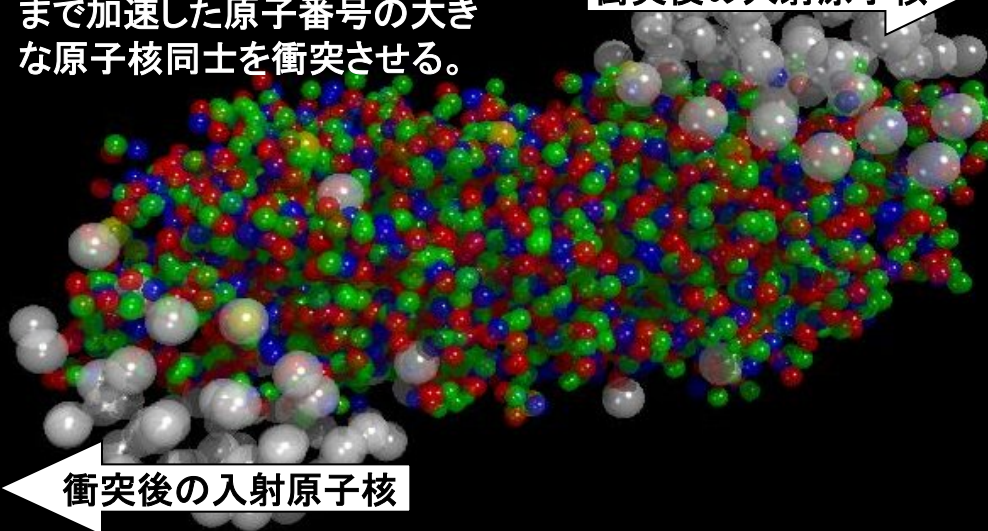


筑波大学、計算科学研究センターの計算機システム：「HA-PACS」「COMA」等



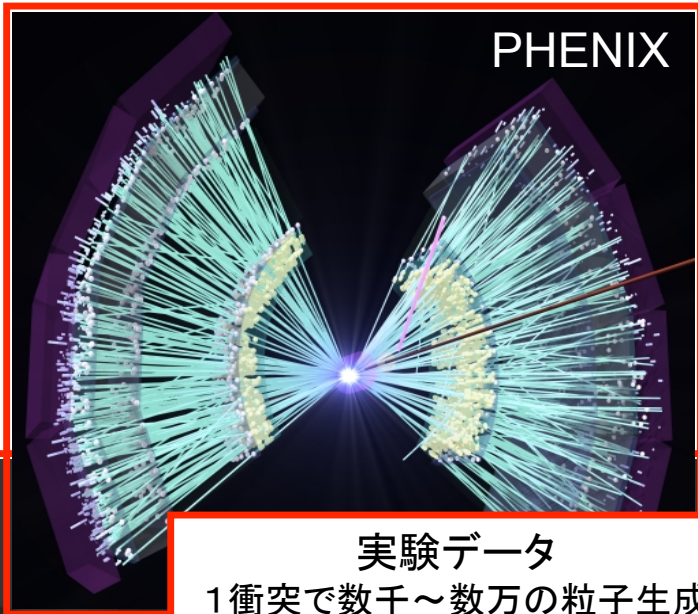
巨大加速器を用いて光速近くまで加速した原子番号の大きな原子核同士を衝突させる。

衝突後の入射原子核

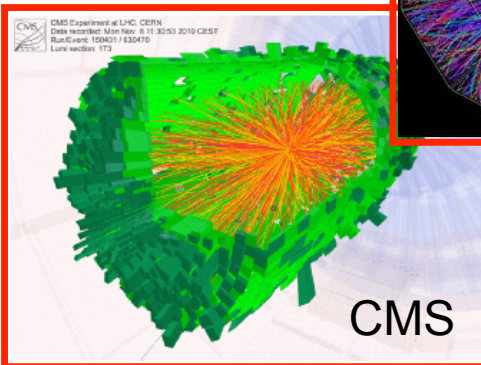
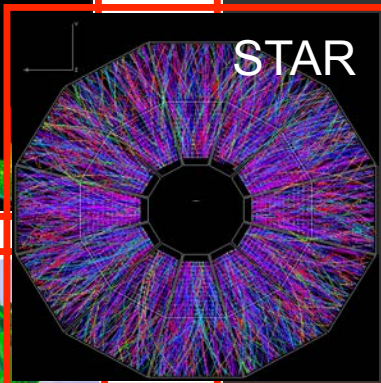
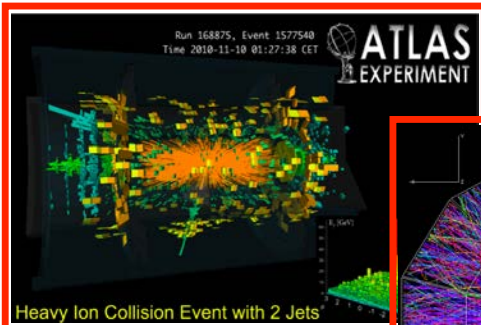


衝突後の入射原子核

PHENIX



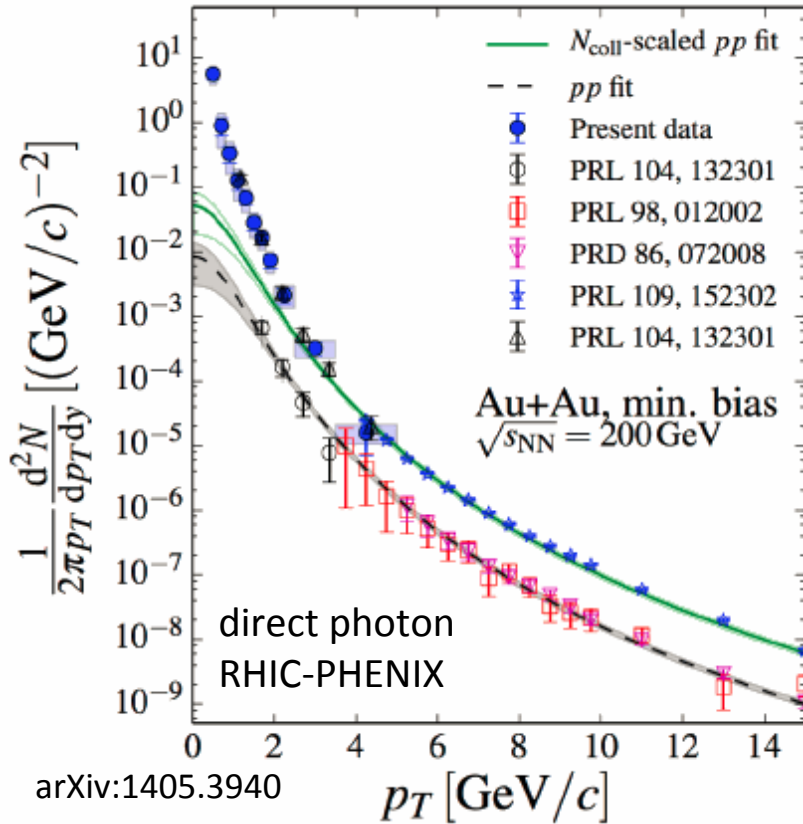
実験データ
1衝突で数千～数万の粒子生成



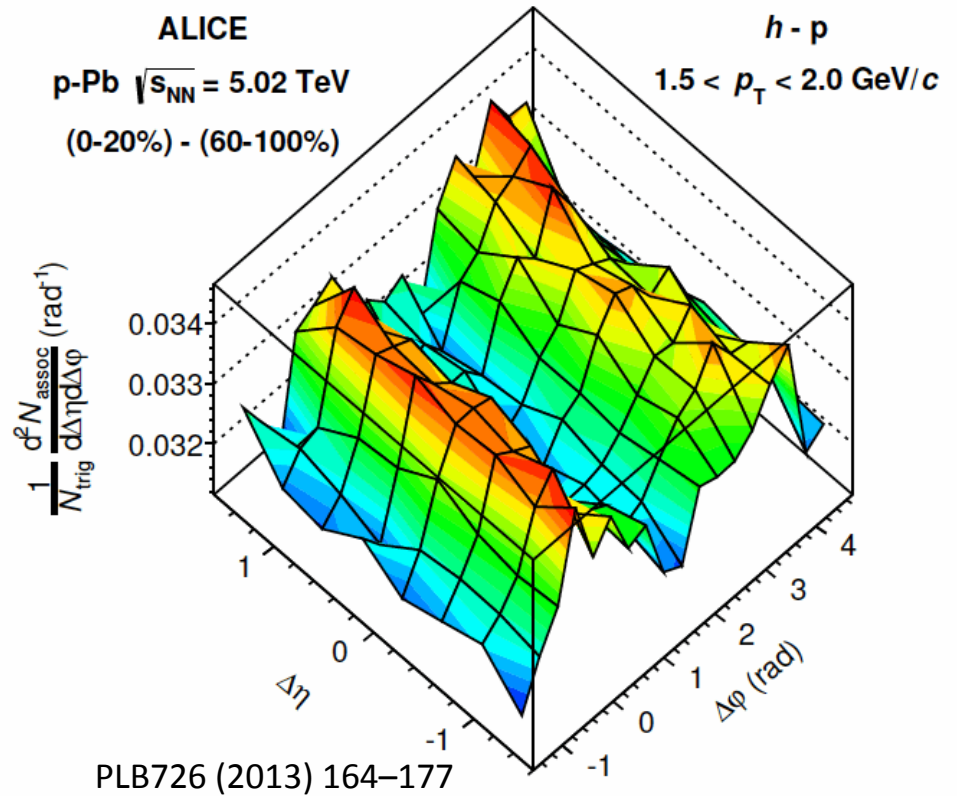
Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV
2010-11-08 11:30:46
Fill : 1482
Run : 137124
Event : 0x00000000D3BBE693

クォーク・グルーオン・プラズマ研究の最新成果

直接光子測定によるQGP温度観測



小さい系 (p+Pb) における楕円的膨張



クォーク・グルーオン・プラズマ理論研究の最新成果

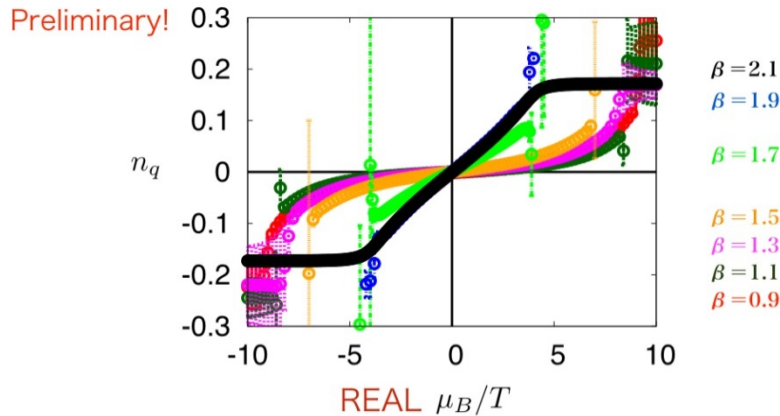
有限密度格子QCD(カノニカル法)

実化学ポテンシャルの領域におけるカイラル凝縮、圧力、クォーク数密度等の振る舞いを求めた。

Hadronic observables

Quark number density in grand canonical ensemble

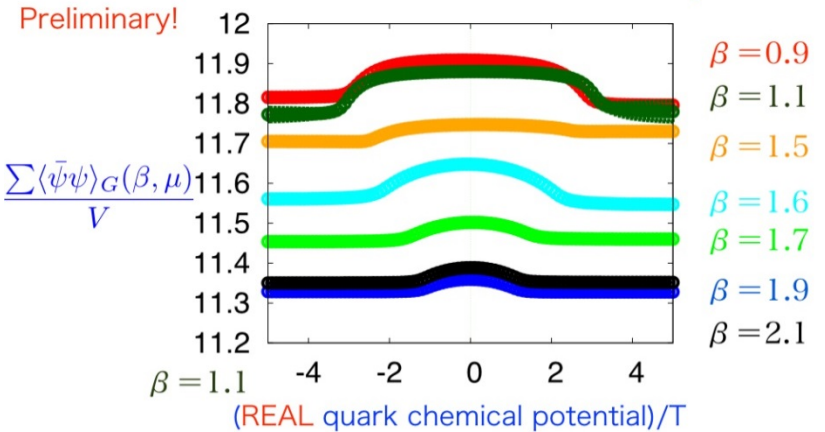
クォーク数密度



Hadronic observables

Chiral condensate in grand canonical ensemble

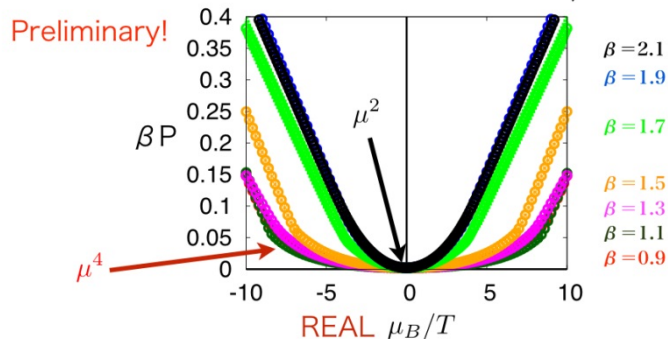
No renormalization! No subtraction! Sorry...カイラル凝縮



Use of $Z_c(n)$ 圧力

We have the analytic form of $Z(\mu) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_n \xi^n$

2. Pressure in grand canonical ensemble $\beta P = \frac{\log Z(\mu)}{V}$



カイラル凝縮からは、化学ポテンシャルが大きくなると凝縮が急激に小さくなる様子を読み取ることができ、有限密度におけるカイラル対称性の回復を示しているものと思われる。

また、温度が低くなるに従って(β のより小さいグラフ)相変化の起こる化学ポテンシャルの値が大きくなる傾向が見られ、現在期待されている振る舞いが見られている。

採用した手法の限界からクォーク質量は重い領域に制限されているが、有限密度格子QCDに対するアプローチとしては非常に面白く有望であると思われる。(谷口裕介)

拠点の計画と体制

- 検出器開発室・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

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。**

また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。

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

宇宙史ワークショップ

2014/9/29 国際会議TGSW2014 宇宙進化・物質起源セッション

国際会議 Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014)

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

日時: 9月29日13時～18時:

場所: 大学会館特別会議室

参加者: 80名 (約20名の外国人研究者(招待講演者5名)を含む)

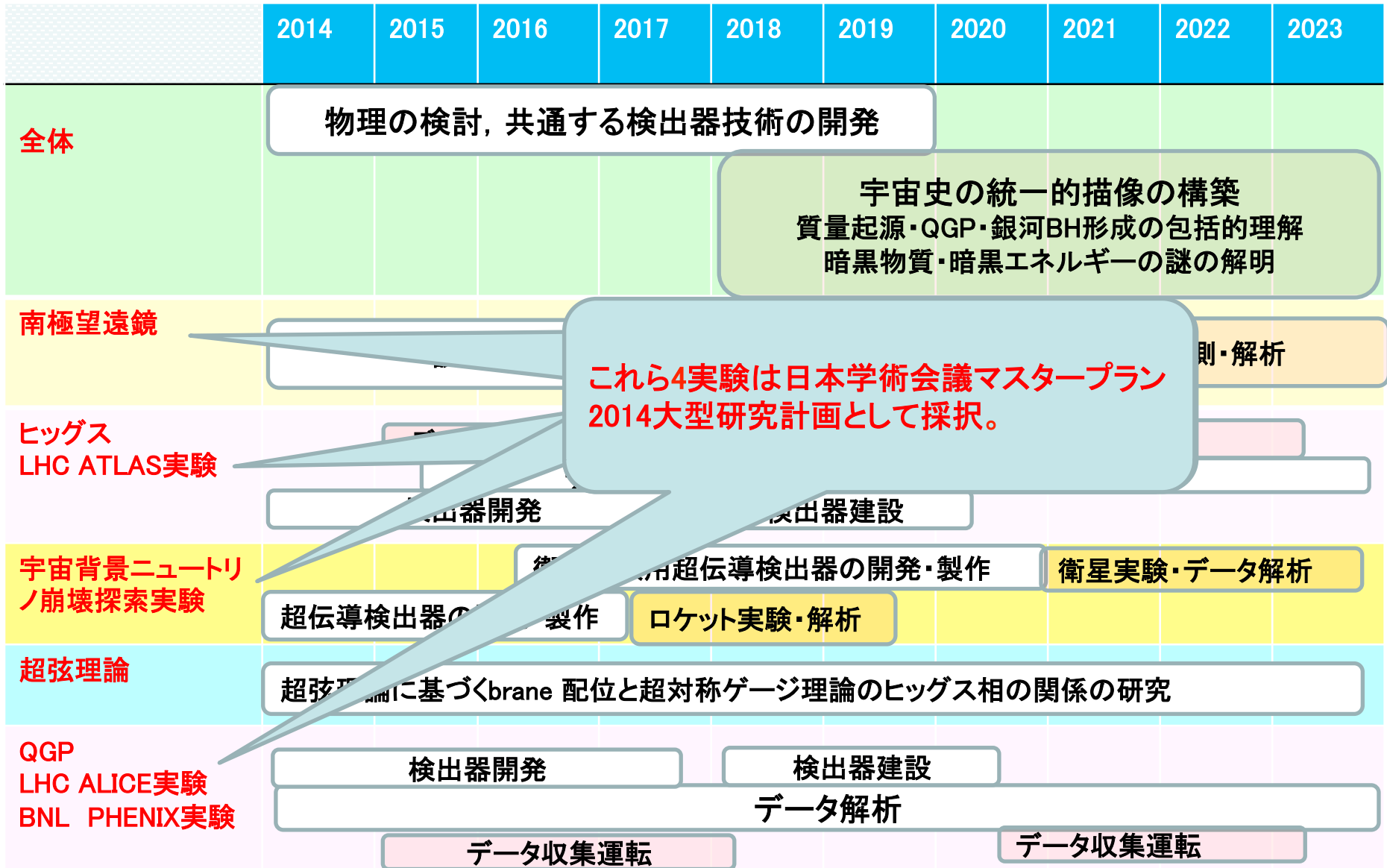
このセッションは、筑波大学数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点が目指す、素粒子・原子核・宇宙物理学の融合による宇宙史の統一的理解を飛躍的に推進させるために、多数の海外研究者を含めて宇宙史研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催されました。

宇宙史コンソーシアムのCERN研究所代表者とソウル大学代表者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/~skim/RCHOU/hou.html>

宇宙史国際研究拠点(朝永センター)研究年次計画



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

基盤(S)「高温・高密度の核物質中におけるクォーク関連の研究」（代表 江角） H27～ 1.4億円

基盤(S)「稀少RIの質量測定によるRプロセス解明」（代表 小沢） H27～ 1.5億円

特別推進「sPHENIX 実験:ジェット測定によるQGPの研究」（代表 秋葉、理研） H27～ 5億円

新学術領域(計画研究)「高エネルギー原子核衝突で探るハドロン基礎構造」（代表 志垣、広大）
H27～ 4.5億円

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

基盤(A)「可搬型30cmサブミリ波望遠鏡で解明する分子雲の進化」瀬田益道 H27-30 4999万円

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

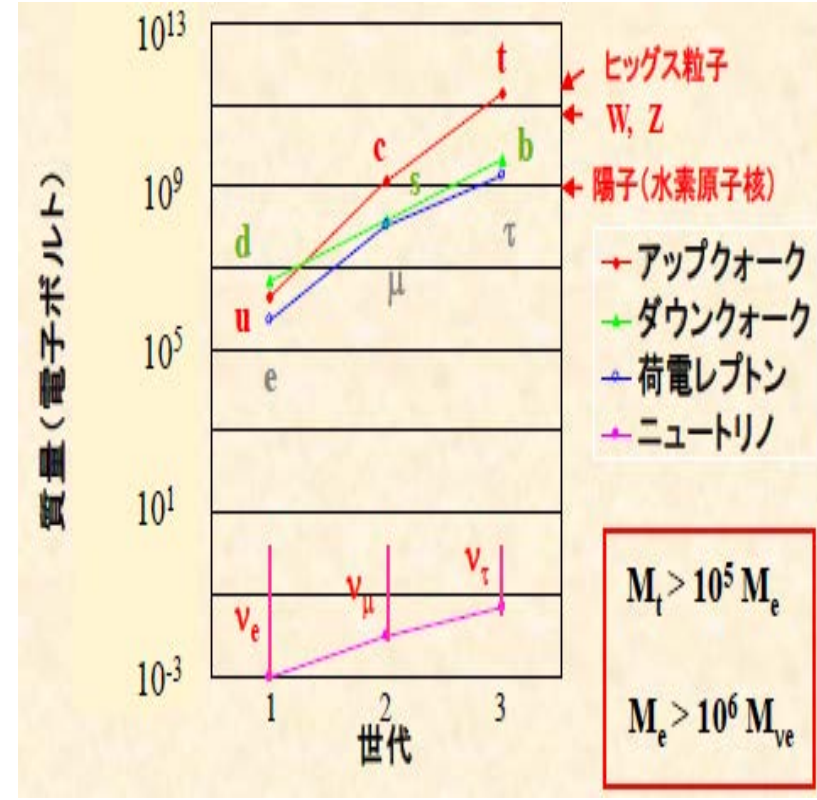
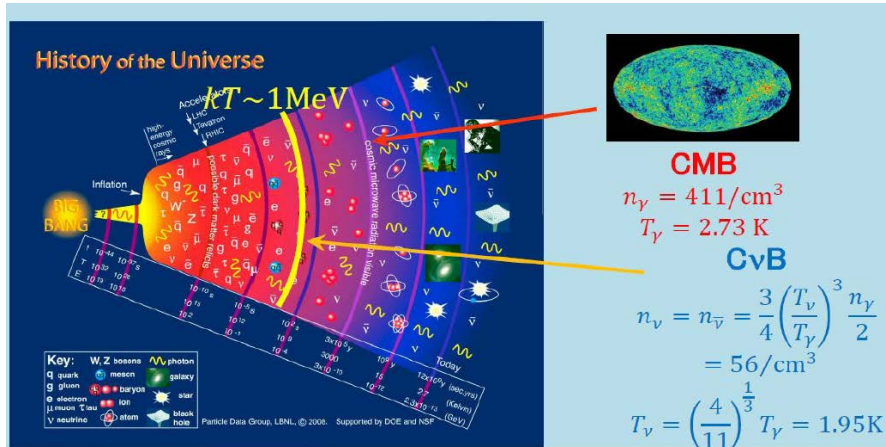
新学術領域「中性子星」公募研究（代表 江角） H25～H26 200万円

概算要求：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索による宇宙物質起源の解明

平成28年度 特別経費に係る事業費要求(新規事業)

—国際的に卓越した教育研究拠点機能の充実—

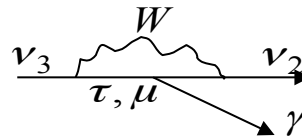
本事業：宇宙背景ニュートリノ崩壊を観測し、質量を決定



- 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

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

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



宇宙背景ニュートリノは
 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

概算要求：南極望遠鏡による暗黒銀河の解明

平成28年度 特別経費に係る事業費要求(新規事業)

—国際的に卓越した教育研究拠点機能の充実—

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)

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細な内部構造を調べる

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

- 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