

# 宇宙線分野の将来計画

CRC実行委員長 西嶋恭司(東海大理)  
光赤天連シンポジウム2018

# CRC(宇宙線研究者会議)とその研究

- CRC
  - 広義の宇宙線物理学研究 (宇宙線実験、宇宙物理、宇宙素粒子物理学) に関心のある研究者の自主的な組織：  
有権者数約370名
- 研究内容
  - (最)高エネルギー宇宙線の起源，加速機構及び伝搬の物理の理解
  - 極限宇宙や高エネルギー天体現象の包括的な理解
  - 基礎物理に関わる知見の発展
  - 一般相対性理論の実験的検証，重力波源の正体の解明
  - 極低バックグラウンドを必要とする多様な研究
- 日本学術会議物理学委員会
  - 天文学・宇宙物理学分科会，素粒子物理学・原子核物理学分科会

# 宇宙物理学

飛翔体

地上

パルサー ブラックホール

星形成銀河 粒子加速 超新星残骸

活動銀河核 高エネルギー天体

太陽

ガンマ線バースト ガンマ線 宇宙線の伝搬

地球

銀河団 宇宙線の起源 高エネルギー粒子

宇宙論

# 宇宙線物理学

地球物理学

星生成史 重力波 ニュートリノ 地球の放射線

一般相対論 ダークマター 宇宙線の生成核

モノポール ニュートリノ物理 宇宙線と大気の相互作用

陽子崩壊

地下

素粒子の発見

高山

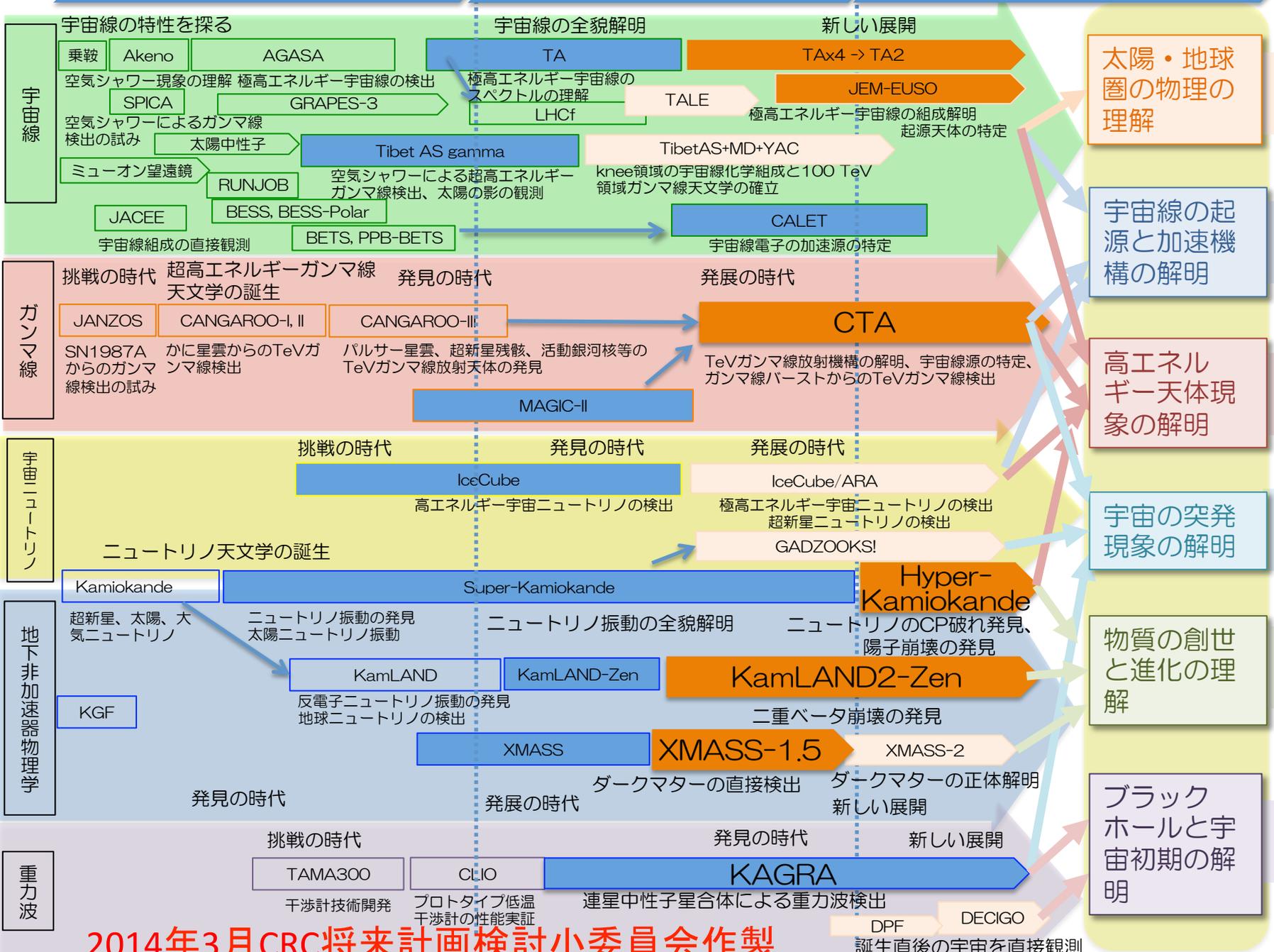
# 素粒子物理学

2010年以前

2010年代

2020年代以降

宇宙の誕生、構造及び進化の解明



- 太陽・地球圏の物理の理解
- 宇宙線の起源と加速機構の解明
- 高エネルギー天体現象の解明
- 宇宙の突発現象の解明
- 物質の創世と進化の理解
- ブラックホールと宇宙初期の解明

# 宇宙線分野の将来計画

- IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台 (吉田滋・千葉大)
- 大型低音重力波望遠鏡KAGRA計画 (大橋正健・東大ICRR)
- 大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験 (塩澤真人・東大ICRR)
- 「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究の新展開 (中畑雅行・東大ICRR)
- CTA 国際宇宙ガンマ線天文台 (手嶋政廣・東大ICRR)
- 極低放射能環境でのニュートリノ研究 (井上邦雄・東北大RCNS)
- ALPACA (瀧田正人・東大ICRR)
- 飛翔体による超高エネルギー宇宙線観測 (POEMMA と準備実験EUSO-SPB2) (戎崎俊一・理研)
- LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 (羽澄昌史・KEK)
- 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO (安東正樹・東大)
- LISA (中型計画) (和泉究・ISAS/JAXA)
- ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM (米徳大輔・金沢大)

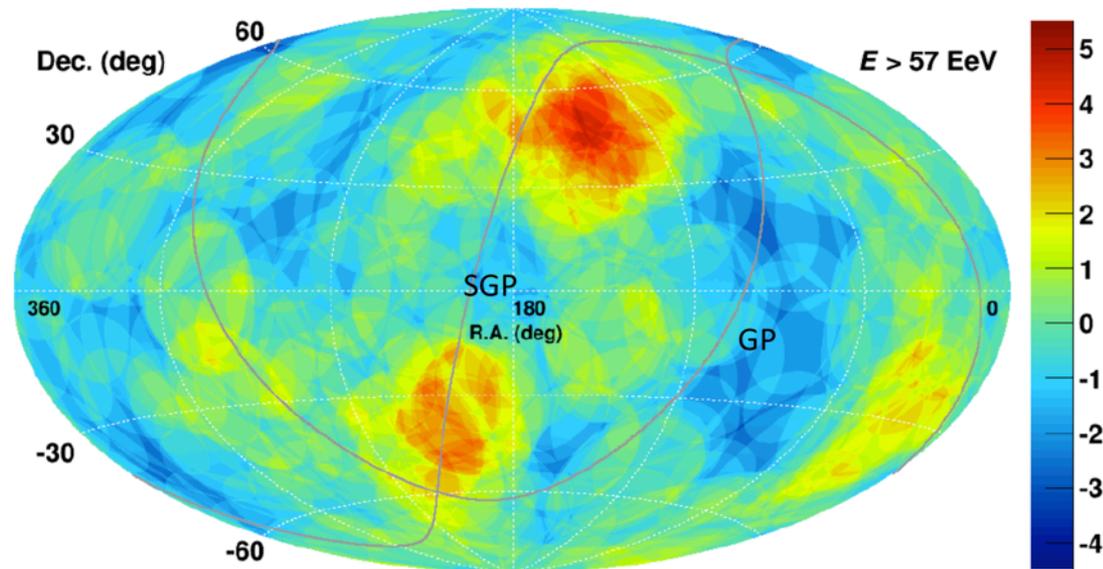
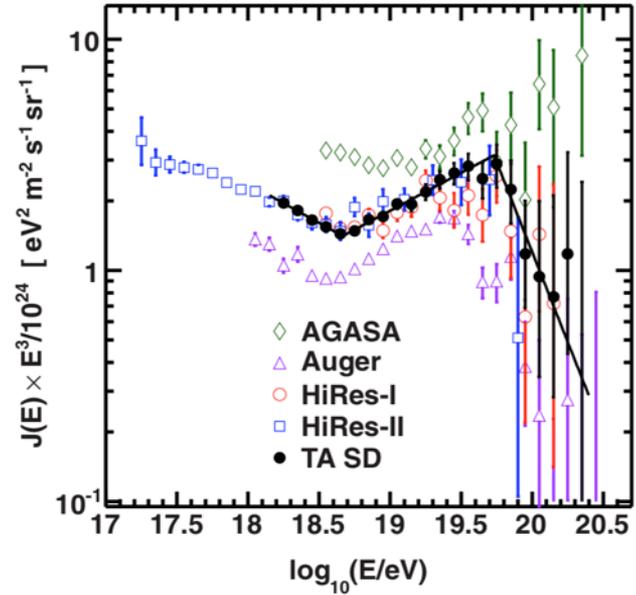
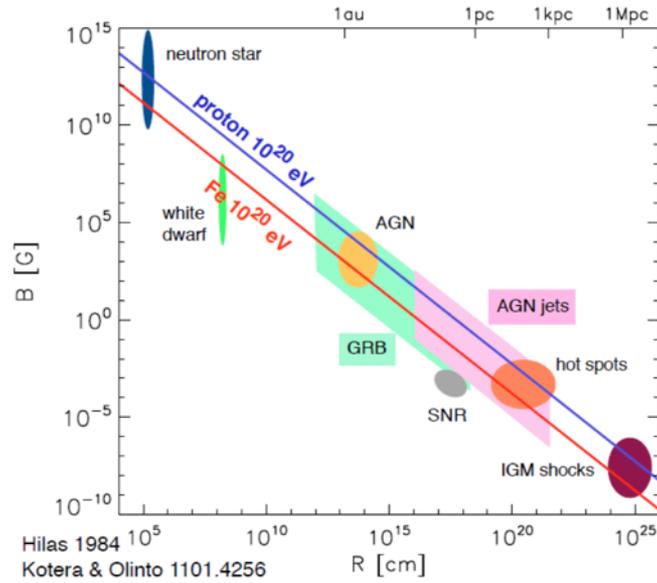
# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 最高エネルギー宇宙線

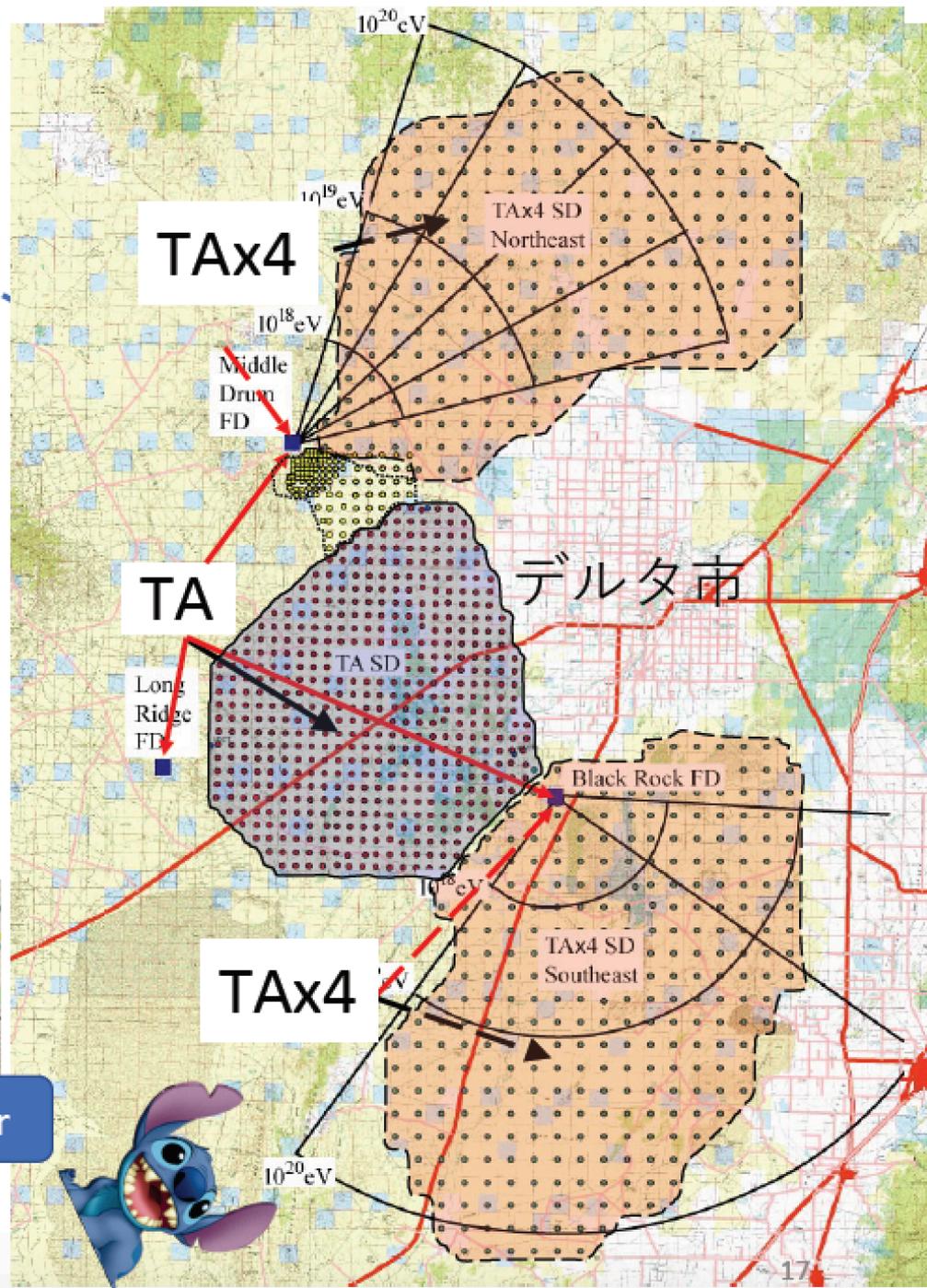


from Sako-san's slide

# TAx4 extension

## TAx4:

- 4 times larger coverage
- 2.08km SD interval
- **Deploy in the end of FY2018**
- New FDs recorded first CR event
- **Only UHECR project expected significant statistical improvement in next few years**



# 飛翔体による超高エネルギー宇宙線観測 (POEMMA と準備実験 EUSO-SPB2)

理化学研究所 滝澤慶之

POEMMA ミッションは、EUSO-SPB2ミッションで採用する口径 1mのSchmidt 望遠鏡をベースにした口径 4m の観測衛星2機によるステレオ観測ミッションで、夜の地球大気を監視し、宇宙線・ニュートリノを観測する。

## EUSO-SPB2 (EUSO-Super Pressure Balloon 2号機)

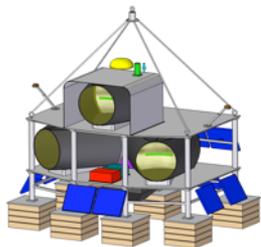
高度40kmから、水平線方向の夜の大気の宇宙線が作る空気シャワーの大気蛍光、ニュートリノからのチェレンコフ光の観測をする。

総予算 50億円

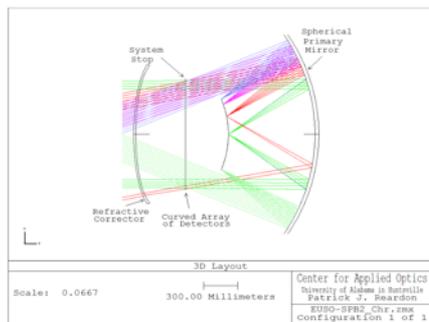
2017年10月-2018年10月 詳細設計フェーズ

2018年10月-2021年 3月 製造フェーズ

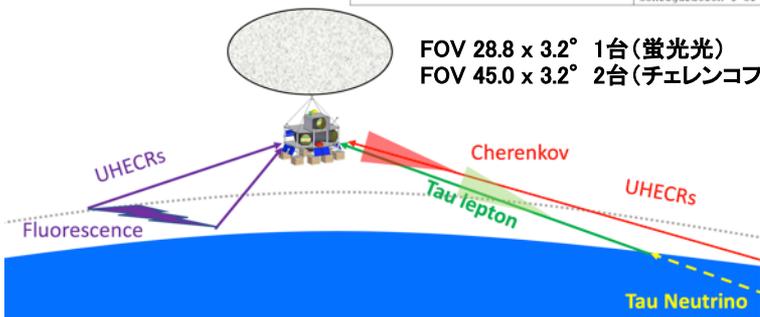
2021年 4月 観測(最長 3ヶ月)



[arXiv:1703.04513](https://arxiv.org/abs/1703.04513)



FOV 28.8 x 3.2° 1台(蛍光光)  
FOV 45.0 x 3.2° 2台(チェレンコフ光)

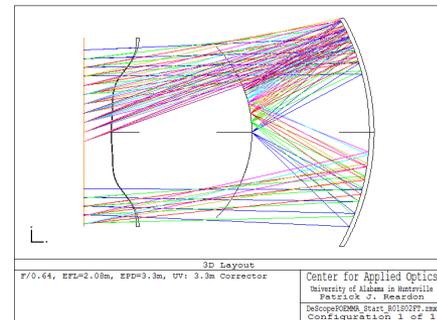
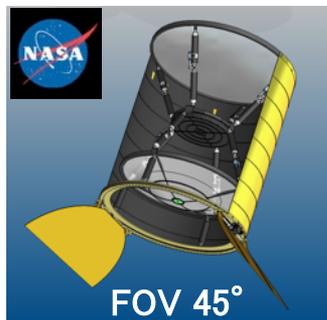


## POEMMA

(Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics)

2017 年 NASA probe studies for 2020 decadal surveyに選定  
概念設計を行なっている。(below 1B\$ カテゴリ、2018年  
12月に最終レポートをNASAに提出する。)

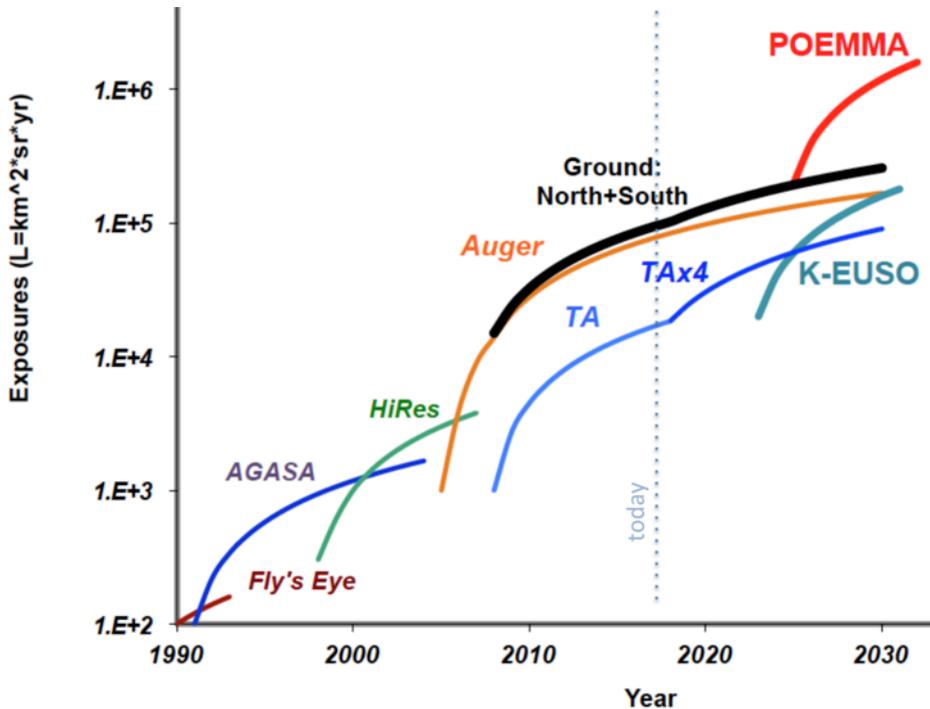
2023 年 SRR、2024 年 PDR、2025 年 CDR、2027 年 Launch



# POEMMAの観測性能と目的

## 超高エネルギー宇宙線

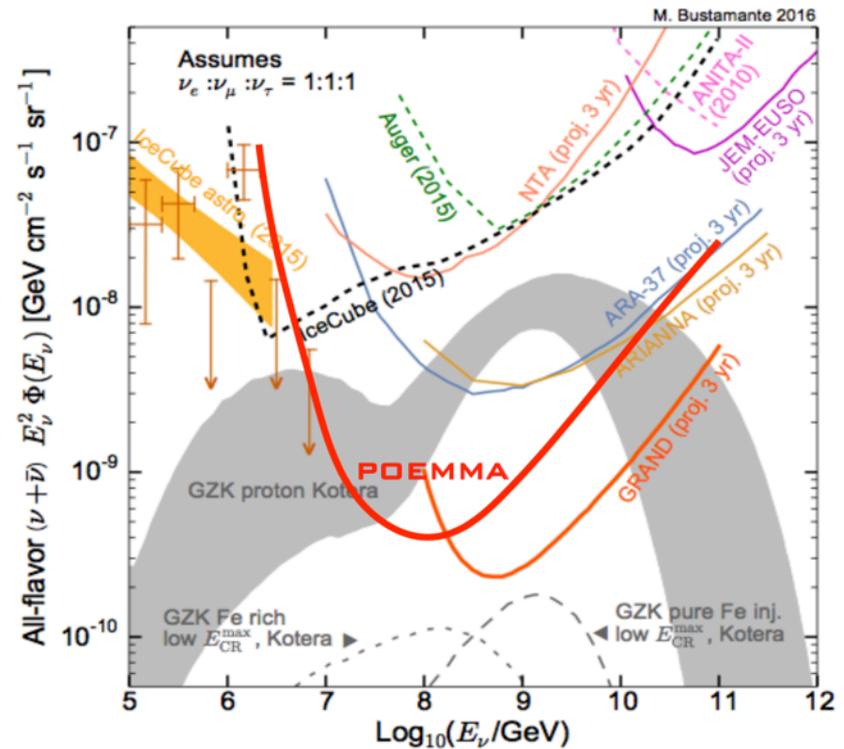
露出量



高露出での超高エネルギー宇宙線の観測

- ・起源の同定とその分布
- ・宇宙線の組成
- ・宇宙空間の磁場強度分布

## ニュートリノ

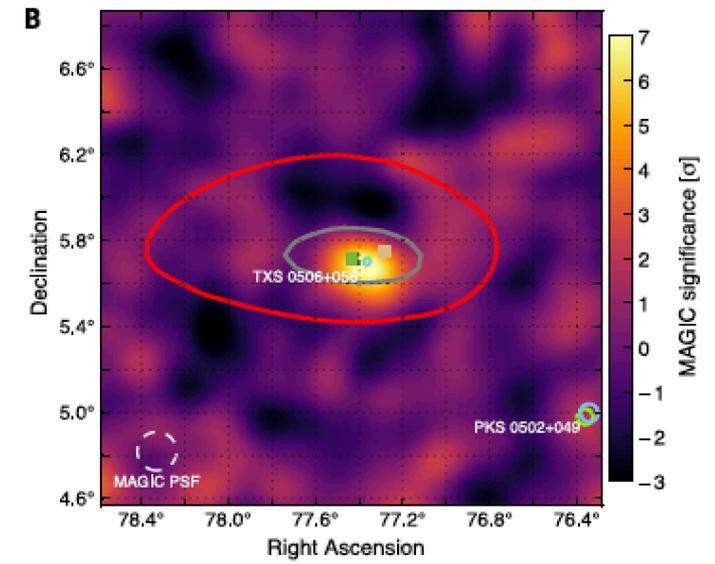
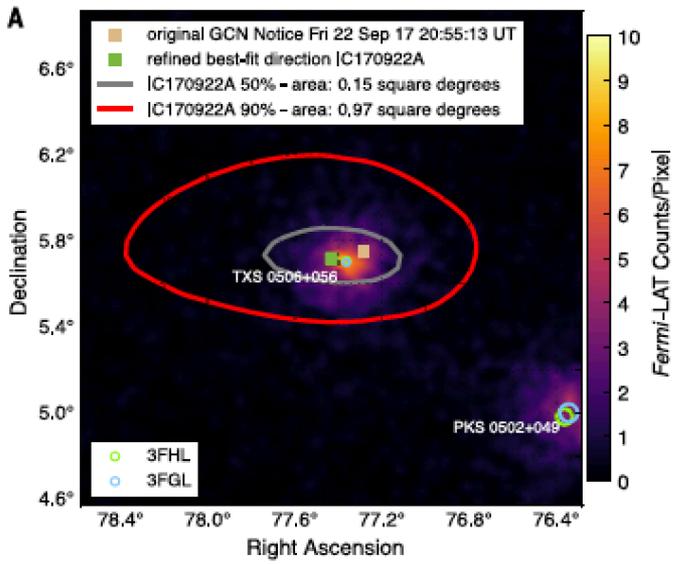
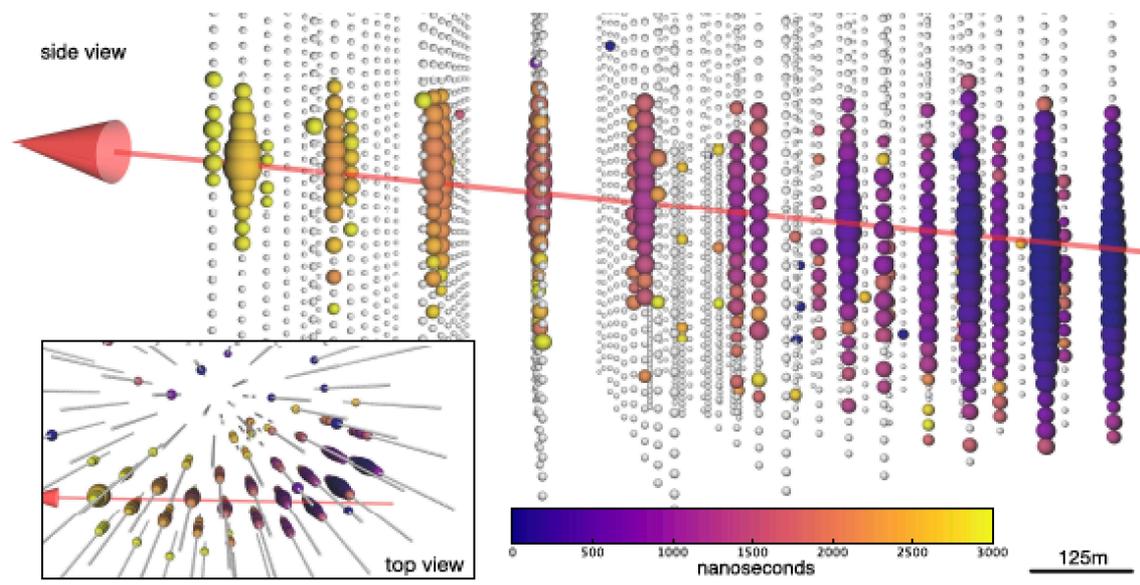


ニュートリノ フラックスの測定

# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 高エネルギーニュートリノ源の同定



Science 361,  
 eaat 1378  
 (2018)



# IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台

千葉大学大学院理学研究院  
吉田滋



# 学術的意義

## ニュートリノ天文学

宇宙を探索する新しい窓

エネルギー帯

MeV

GeV

TeV

PeV

EeV

太陽・超新星

ニュートリノは星内部も突き抜ける

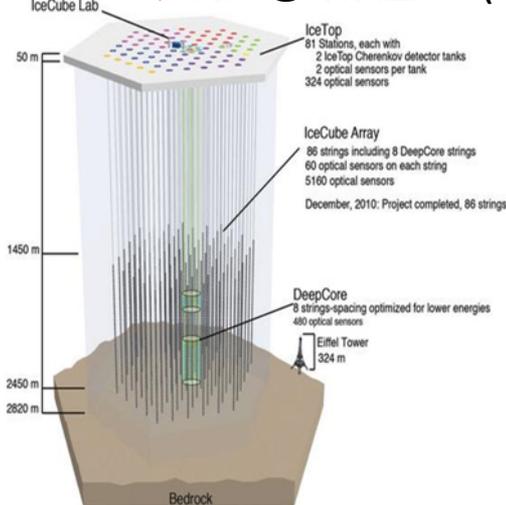
ニュートリノは遠方宇宙からも無傷で飛んできた

高エネルギー放射天体

ブラックホール、巨大銀河...

超高エネルギー宇宙線由来

## IceCube 実験 @ 南極点 (2010-)



電波、可視光、X線、 $\gamma$ 線、(重力波)、宇宙線

天体の同定  
放射機構の解明  
太古の宇宙における放射の歴史

可視光の最大 $10^{20}$ 倍ものエネルギーにどうやって加速?

マルチメッセンジャー天文学の誕生

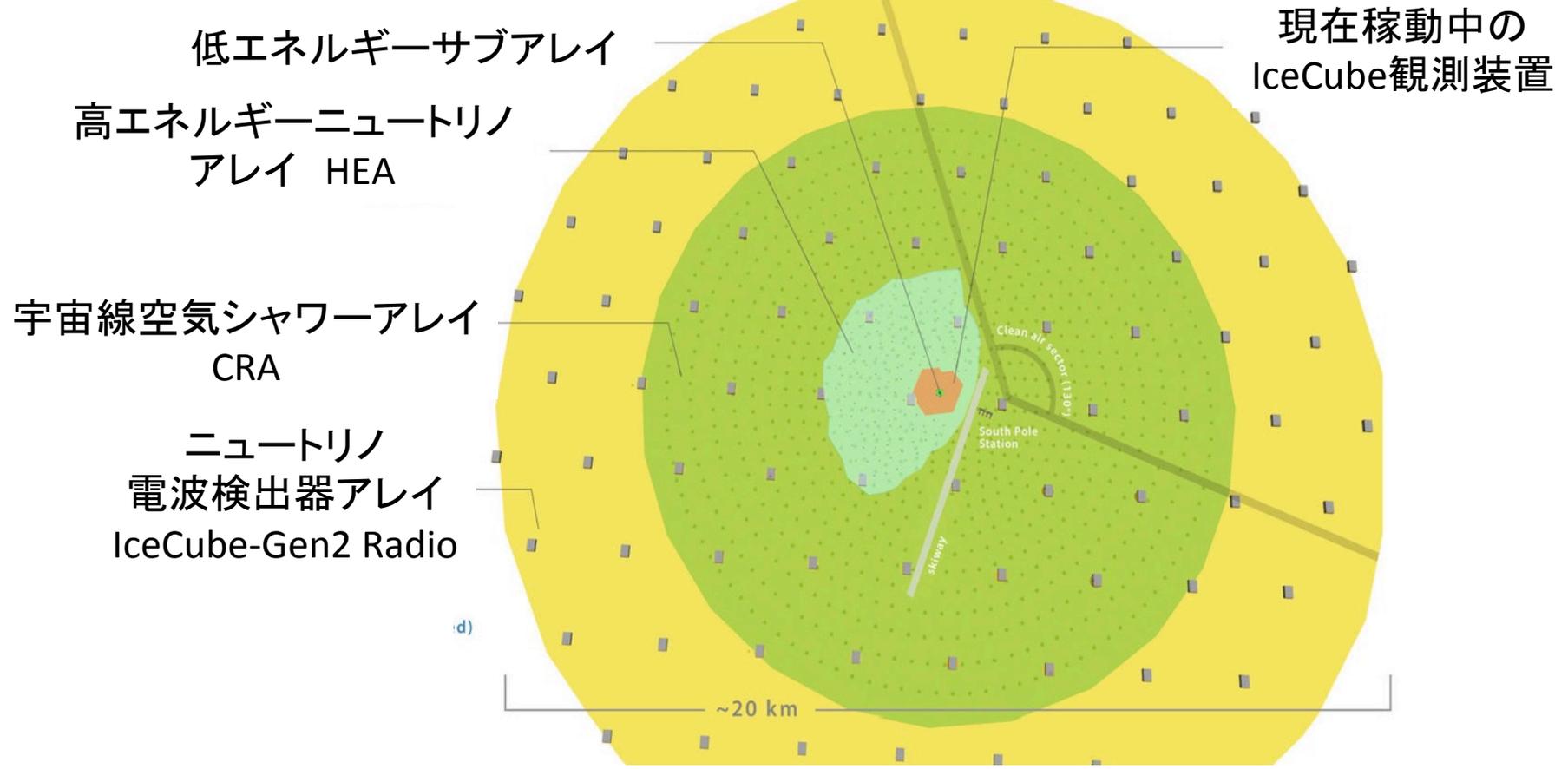


# IceCube-Gen2 全体の概観



上から見た観測装置の構成

IceCube-Gen2 Facility



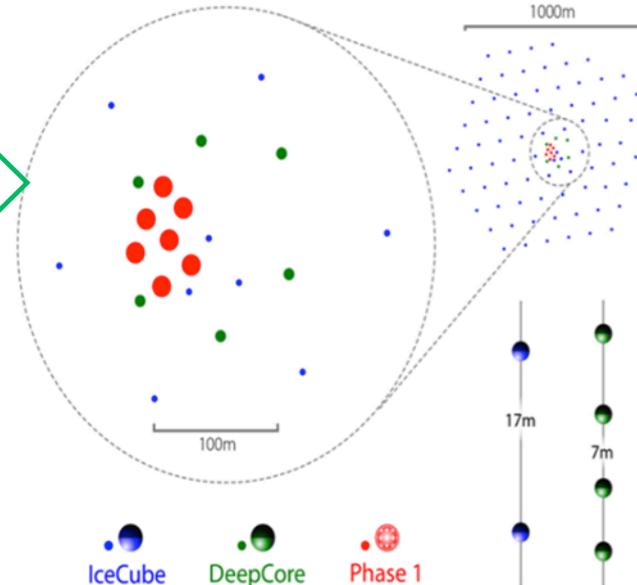
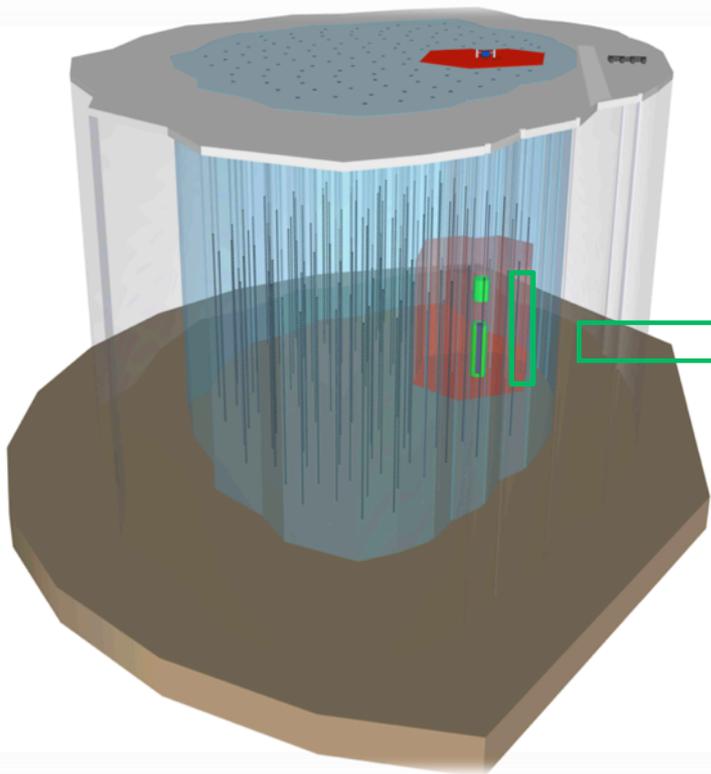


# IceCube Gen2 in-ice detectors

IceCube-Gen2 main phase

IceCube-Gen2 phase1

総予算30億円で先行して建設。今年度から開始。  
2021年埋設



高感度検出器を密に並べ  
光の氷河内での散乱長と  
角度を正確に理解する

日本グループで開発中の  
高感度検出器 **D-Egg**



2021年予算承認をめざす  
(マスタープラン 2017時とほぼかわらず)

日本は3列分を担  
(科研費で推進中)

# 年次計画

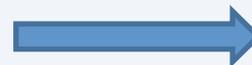
フェーズ1(ほぼ確定)

平成30年度    平成31年度    平成32年度    平成33年度    平成34年度

D-Egg 検出器  
製作・組上げ



南極点・アメリカへの輸送



検出器埋設



本体計画

検出器最適化



NSF MREFC での審査



検出器製作開始



# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

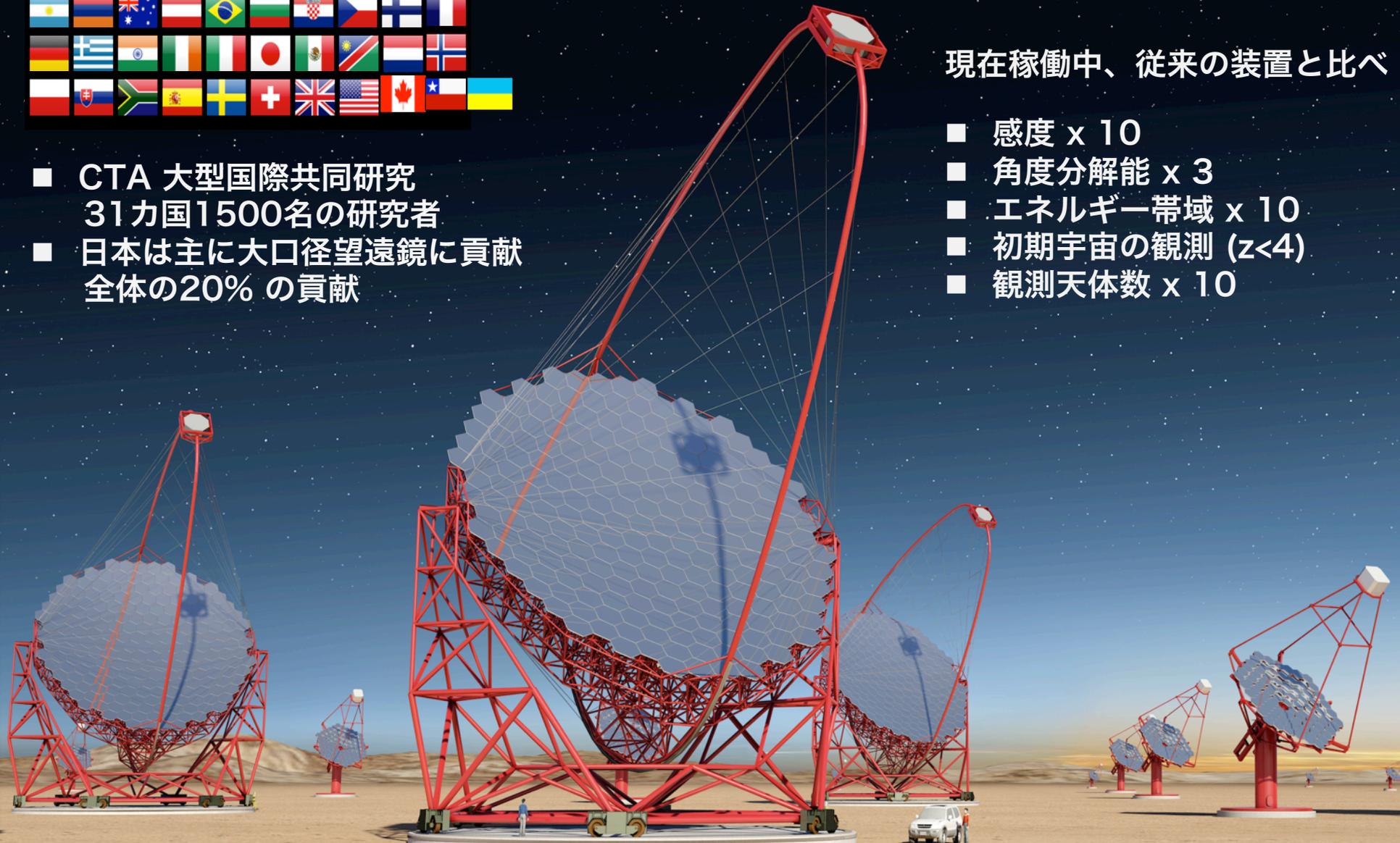
# CTA国際宇宙ガンマ線天文台



- CTA 大型国際共同研究  
31カ国1500名の研究者
- 日本は主に大口径望遠鏡に貢献  
全体の20%の貢献

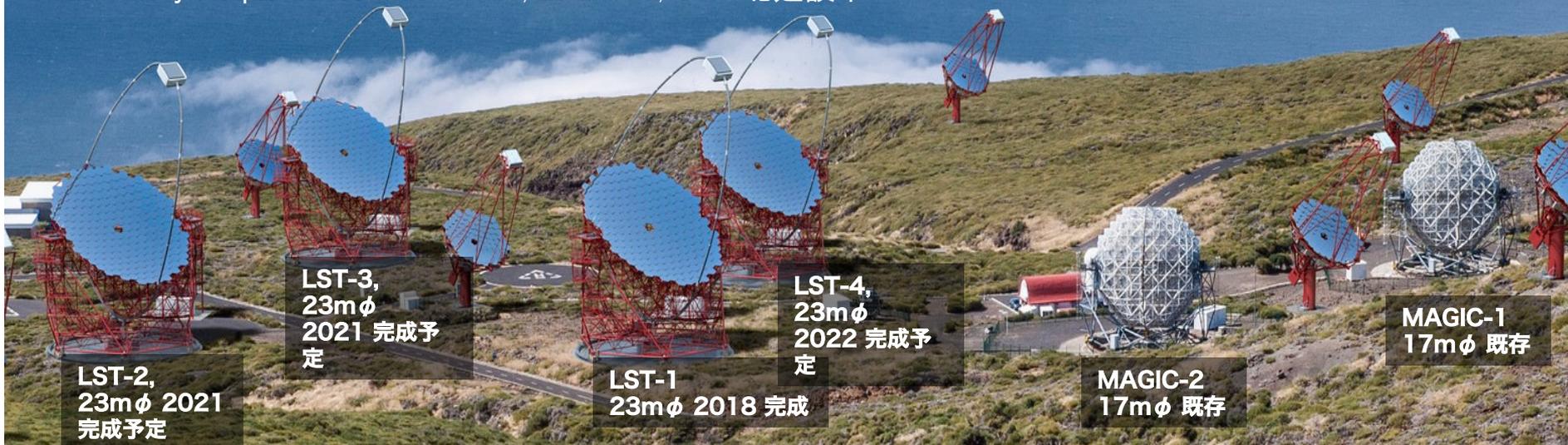
現在稼働中、従来の装置と比べ

- 感度 x 10
- 角度分解能 x 3
- エネルギー帯域 x 10
- 初期宇宙の観測 ( $z < 4$ )
- 観測天体数 x 10



# CTA国際宇宙ガンマ線天文台

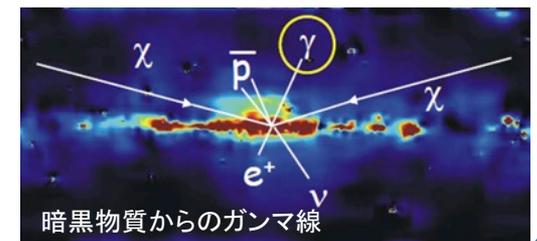
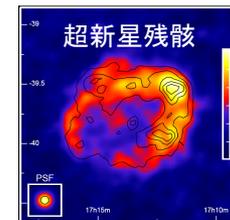
Observatory Roque de los Muchachos, La Palma, CTA 北建設中



現在、世界最高感度の高エネルギーガンマ線望遠鏡アレイをスペイン・ラパルマに建設中。  
3年で建設完了し段階的に運用を進め、CTAの初期サイエンスに貢献する。

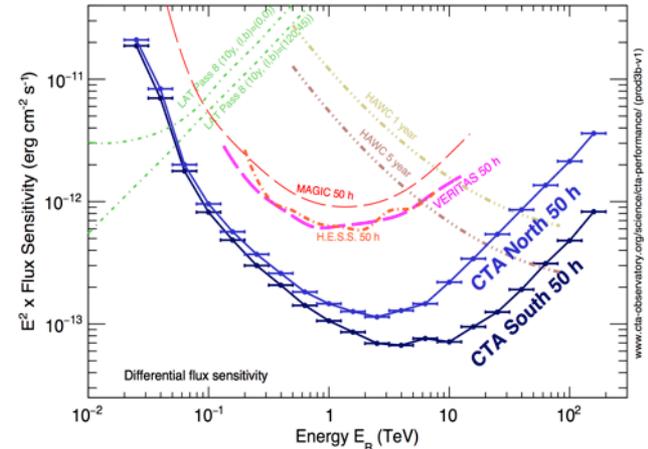
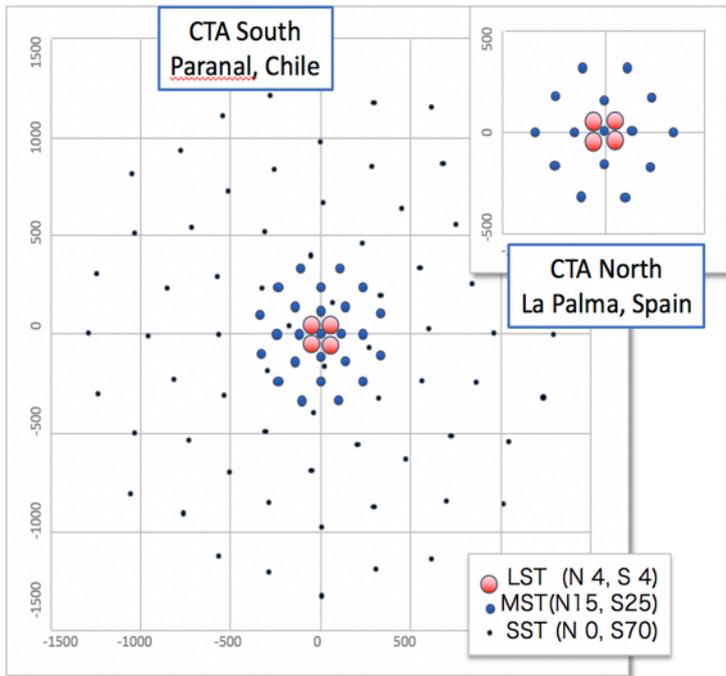
## 期待される成果

- CTA-Japan は北半球スペイン・カナリ諸島ラパルマに大規模なチェレンコフ望遠鏡アレイを設置し、北天を高エネルギーガンマ線でサーベイする。
- 超新星残骸、活動銀河核(超巨大ブラックホール)、ガンマ線バーストの高精度観測により、宇宙線の起源を明らかにする。
- 宇宙初期から現在に至る宇宙において、様々な超巨大ブラックホールを多数観測し、そのダイナミックな姿を明らかにする。また、宇宙の構造形成、超巨大ブラックホールの進化を明らかにする。
- 銀河中心、我々銀河に随伴する矮小楕円銀河に暗黒物質対消滅からのガンマ線を探索する(発見する)。宇宙を満たす暗黒物質が超対称性粒子であれば、テラ電子ボルトの高エネルギーガンマ線領域にその姿を顕す。

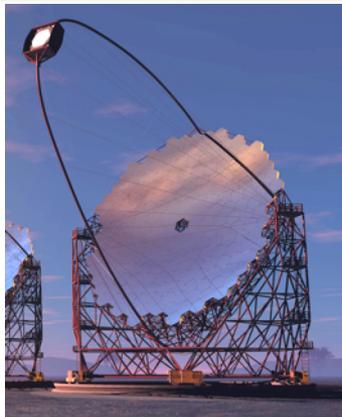


# CTA 望遠鏡設置プラン

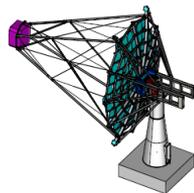
CTA-Japan は北サイト大口径望遠鏡を建設中。  
2021年より、南半球大口径望遠鏡建設を開始する必要がある。



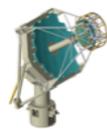
高感度: 従来の装置の10倍  
高角度分解能: 従来の装置の3倍  
広エネルギー帯域: 20GeV-300TeV



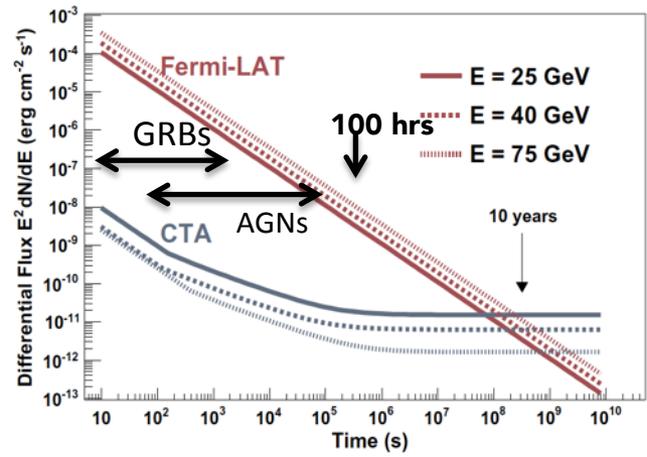
LST 23m Low-Energy



MST 12m Mid-Energy



SST 4.3m High-Energy



トランジェント天体への感度: フェルミガンマ線望遠鏡の3~4桁上

# 予算・スケジュール

- CTAは、世界31カ国から1500名の研究者からなる大型国際共同研究であり、世界で唯一のコミュニティに開かれた高エネルギーガンマ線天文台となる。
- 日本はその中で、20%の貢献を考えている。20%の観測時間を確保したい。
- CTA-Japan は、北半球、南半球に大口径望遠鏡建設を進め、CTAの All Sky Observatory 化に貢献する。
  - 2016 北半球4基の大口径望遠鏡建設を開始。
  - 2018 北半球大口径望遠鏡1号基が First Light (運用開始)。
  - 2021 北半球の4台の大口径望遠鏡建設完了。
  - 2021-2025 南半球に4基の大口径望遠鏡建設(新たな予算措置が必要、日本への期待は大きい)。
  - 2025 コミュニティーに開かれた高エネルギーガンマ線全天天文台として運用される。
- CTA全体のプロジェクトではLST8基、MST40基、SST70基であり、インフラ、人件費込みで400MEuro と試算される。以下は日本の貢献分。
  - 日本分担分総経費 **102 億円 (~ 80MEuro)**
  - 準備期間(開発研究): 4億円
  - 北建設期間(LST4基): 24億円 南建設期間(LST4基): 24億円
  - 観測運用(北15年、南10年): 50億円(年間2億円/サイト)

# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# The **ALPACA** Experiment



**A**ndes

**L**arge area

**P**article detector for

**C**osmic ray physics and

**A**stronomy

東京大学宇宙線研究所 瀧田正人

# 計画の概要

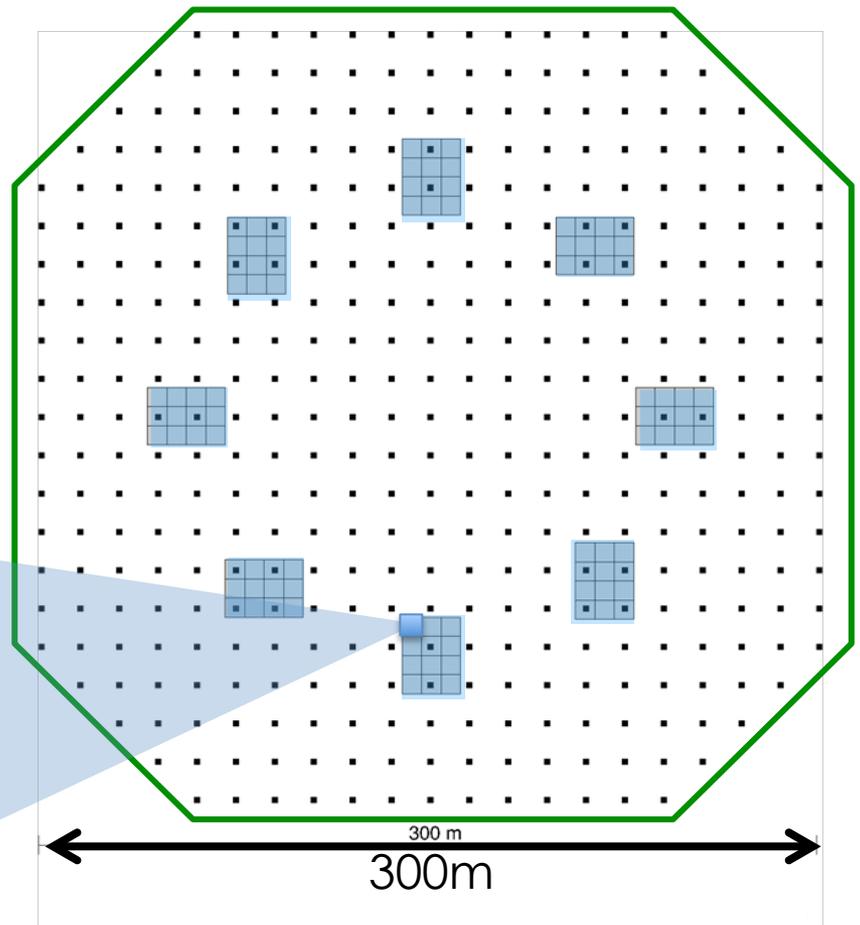
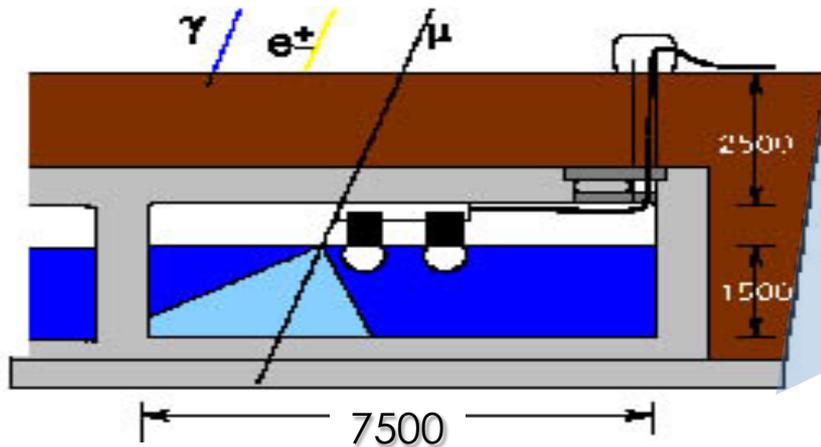
- ALPACA計画：ボリビア・チャカルタヤ山中腹 標高4,740m
  - 83,000m<sup>2</sup> 空気シャワーアレイ +  
5,400m<sup>2</sup> 水チェレンコフ型ミューオンアレイ
  - 南天における超高エネルギー宇宙線・ $\gamma$ 線広視野(2sr)連続観測
- サイエンス：
  - 南天における100TeV領域 (10TeV-1Pev)  $\gamma$ 線広視野連続観測  
(宇宙線加速器 PeVatronの発見)
  - 宇宙線中の太陽(月)の影の観測 (太陽地球間磁場の研究)
  - 雷と宇宙線
  - Kneeエネルギー領域 ( $10^{15}$ - $10^{16}$  eV) 宇宙線化学組成の研究
  - 南天における超高エネルギー宇宙線異方性の研究
- 予算：6 - 10億円 (予算化後すぐに建設可能)
- 建設期間：3年 + (観測期間10年以上)
- 参加研究者：約40名 (日本とボリビア)



# ALPACA実験装置ポンチ絵

1. 空気シャワーアレイ ~83,000m<sup>2</sup>  
= 401 x 1m<sup>2</sup> シンチ検出器

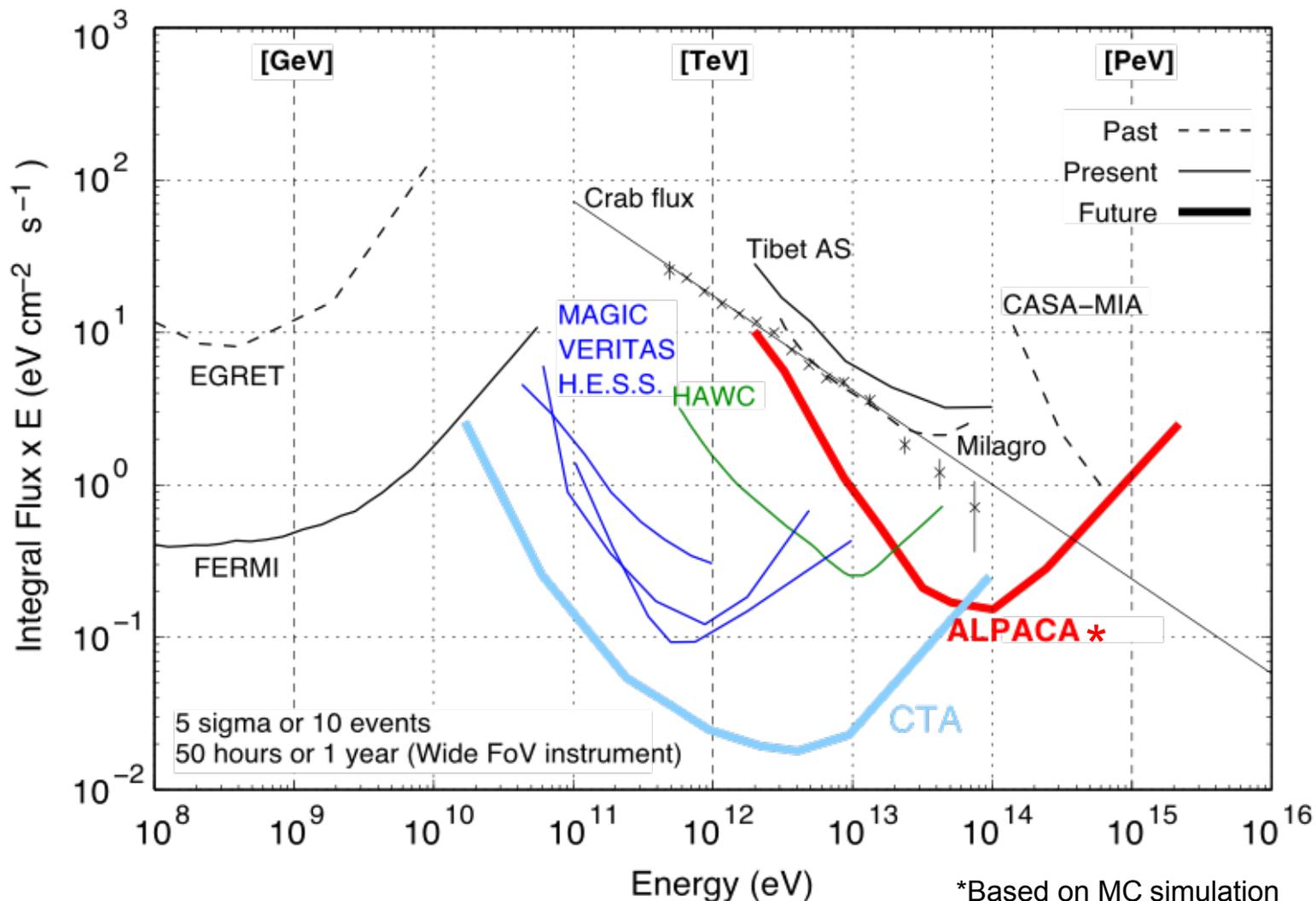
2. 水チェレンコフ型  
ミュオン検出器 ~5400m<sup>2</sup>  
地下 2.5m (~19X<sub>0</sub>)  
= 56m<sup>2</sup> with 20"φ PMT x 96セル



- ✓ ガンマ線起源の空気シャワーはミュオンが少ないことを利用  
バックグラウンド原子核宇宙線の除去率 >99.9% @100TeV.

南天の100TeV領域ガンマ線広視野探査

# ガンマ線点源天体に対する感度

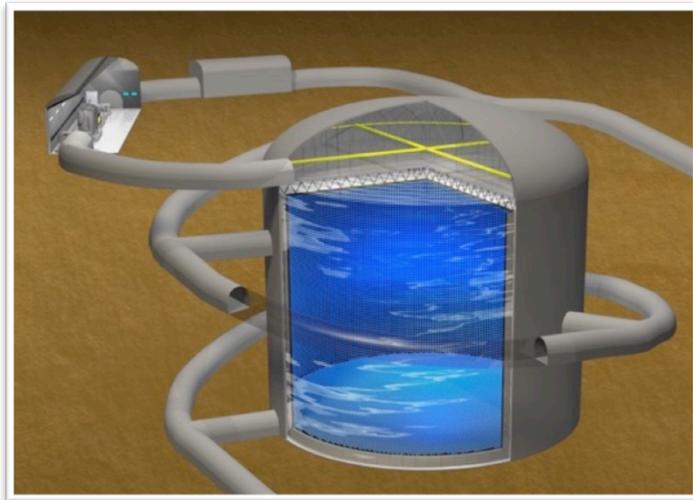


# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 概要：大型先端検出器による核子崩壊

## ・ニュートリノ振動実験



ハイパーカミオカンデ  
(東京大学が中心)



大強度陽子加速器  
J-PARC  
(高エネ研が中心)



- 日本をホスト国とする国際協力科学事業
- 既存のスーパーカミオカンデの約8倍の有効体積19万トン(総重量26万トン)の大型先端検出器(ハイパーカミオカンデ)を建設し、既存のJ-PARC大強度陽子加速器の増強と組み合わせて、ニュートリノ研究や関連研究を行い、素粒子と宇宙に対する知見を大きく広げる。
- 20年にわたる素粒子・宇宙研究の国際的な基幹装置

# プロジェクトの近況

- ロードマップ2017に掲載
- 文部科学省の31年度概算要求に、ハイパーカミオカンデの建設費は計上されず。調査費がつく見込み。
- 来年の概算要求を確実にするために、海外協力推進や建設費詳細見積もりの調査研究を続ける。

H30  
8/24  
朝日新聞

## 文科省 宇宙誕生の謎迫る カミオカンデ3代目検討

文部科学省は、次世代の「カミオカンデ」の建設に向けた検討を始める。2度のノーベル賞受賞につながる成果をあげた「カミオカンデ」と「スーパーカミオカンデ」(共に岐阜県)の後継施設で、ニュートリノなどの素粒子を検出して宇宙の謎を解明する研究で、ノーベル賞級の成果が生まれる可能性がある。

これまで、観測装置では水の量が十分で、より大型で高感度のセンサーを備えた新型装置を建設する必要性が高まっていた。ただ、建設費は約675億円にのぼる見通しで、文科省は来年度から、施設の科学的な意義など、建設の妥当性を調査する。

ニュートリノ研究では、2002年に小柴昌俊・東京大特別名誉教授(91)が、15年に梶田隆章・同宇宙線研究所長(50)が、それぞれ

高感度の光センサーを備えた約26万トンの巨大水槽。ニュートリノなどが水槽内の水とぶつかるに衝突した際に出る微弱な光をとらえる。ニュートリノと、その反対の性質を持つ反ニュートリノの違いの検証や、物質を構成する陽子が壊れる「陽子崩壊」という未知の現象の発見を目指す。

いずれも、宇宙の成り立ちの謎を解明する研究で、ノーベル賞級の成果が生まれる可能性がある。

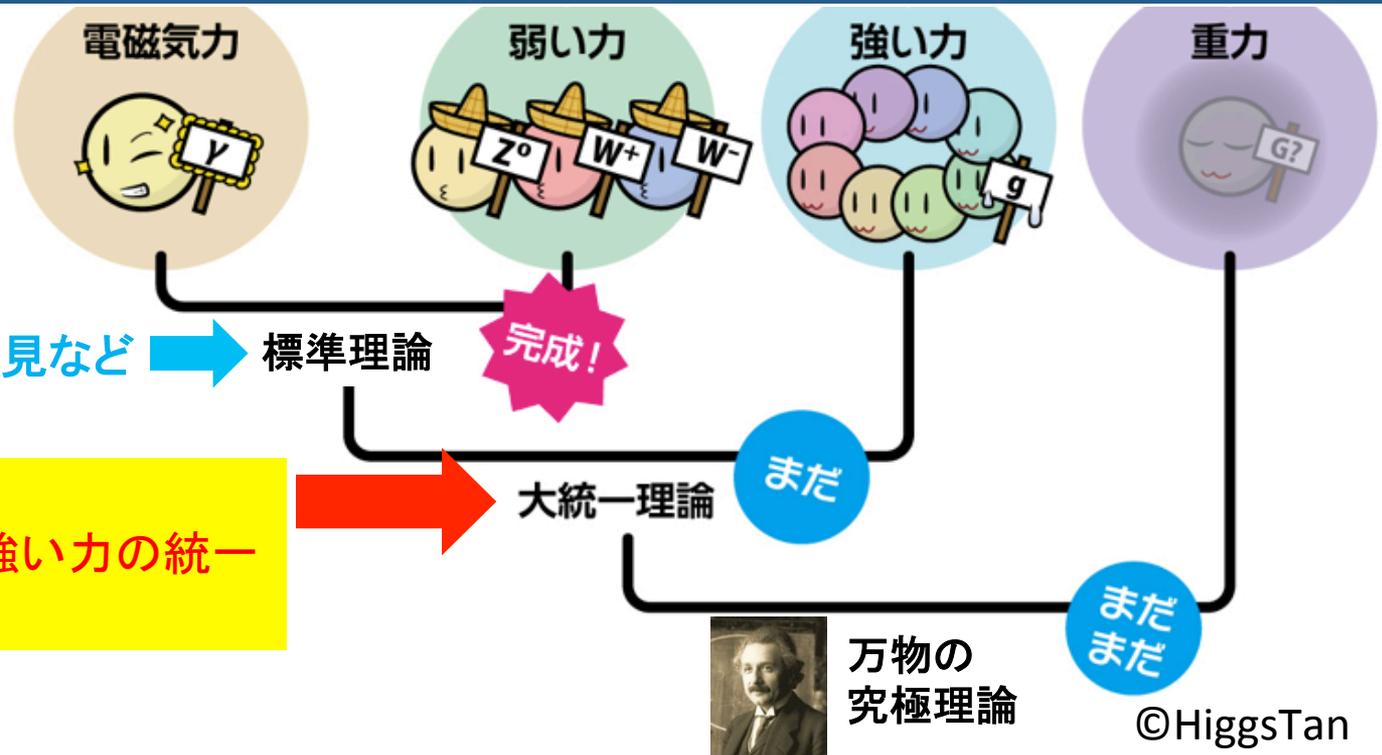
■ ニュートリノ 物質を構成する素粒子の一種で、ミュー型、電子型、タウ型の3種類ある。宇宙に大量に存在するが、電気を帯びず、ほとんどの物質を通り抜けるため「幽霊粒子」とも呼ばれる。

■ 日本の素粒子観測施設

施設名	観測内容	水槽の大きさ
カミオカンデ 1983年～	・宇宙から飛来したニュートリノの観測	3000ト
スーパーカミオカンデ 96年～	・ニュートリノに質量があることを発見	5万ト
ハイパーカミオカンデ 計画中	・ニュートリノと反ニュートリノの性質の違いを検証 ・陽子崩壊の観測	26万ト

高感度の光センサーが壁いっぱい設置されているスーパーカミオカンデ

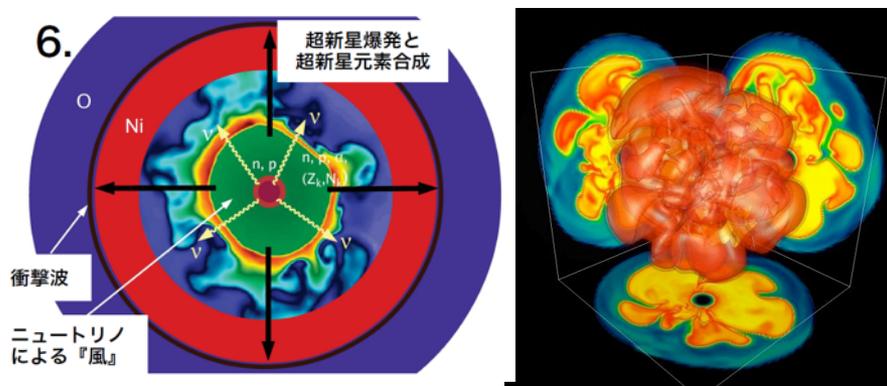
# 核子崩壊とニュートリノ研究



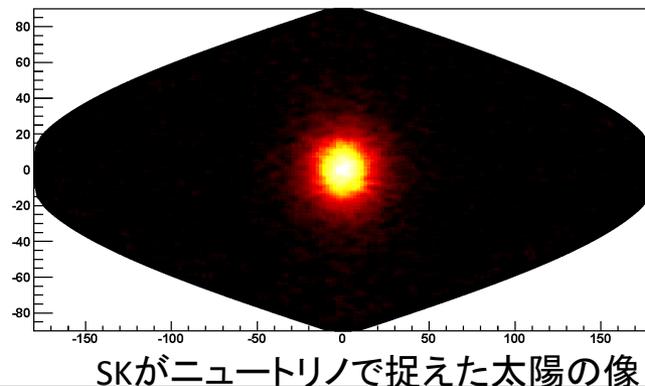
- ニュートリノの性質の研究と陽子崩壊実験は、大統一理論を証明できる「**唯一の**」実験手法とされている。究極理論に向けた挑戦。
- 非常に小さい質量を持つニュートリノの性質の全容解明と、未発見の陽子崩壊現象のさらなる高感度探索を行うための次世代実験が必要。
- ニュートリノの理解は、素粒子物理学にとって重要であるばかりでなく、宇宙の物質の起源にも深く関わっていると考えられている。

# ニュートリノによる天体物理学

## 超新星ニュートリノによる爆発機構の解明



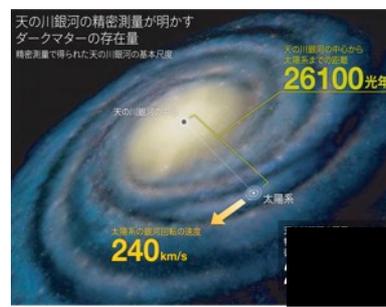
## 太陽ニュートリノの精密観測



- ✓ 超新星爆発は中性子星やブラックホールが誕生するプロセス:ただし詳細は未検証
- ✓ 時事刻々の飛来ニュートリノの観測により、その爆発メカニズムを解明する
- ✓ 中性子星やブラックホール誕生の瞬間も捉える

- ✓ 高統計観測
- ✓ ニュートリノ振動の精密研究にも寄与
- ✓ 太陽の中心温度を0.8%の精度で監視

## その他の可能性



他にも、銀河中心での暗黒物質対消滅に伴うニュートリノの探索、ガンマ線バーストに伴う高エネルギーニュートリノの探索など、豊富な物理テーマ

## 宇宙の初めからの超新星ニュートリノ

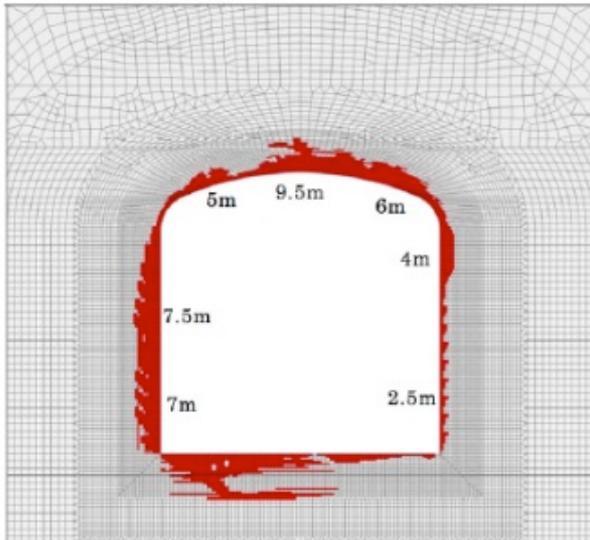


- ✓ 宇宙の元素合成の歴史を探る

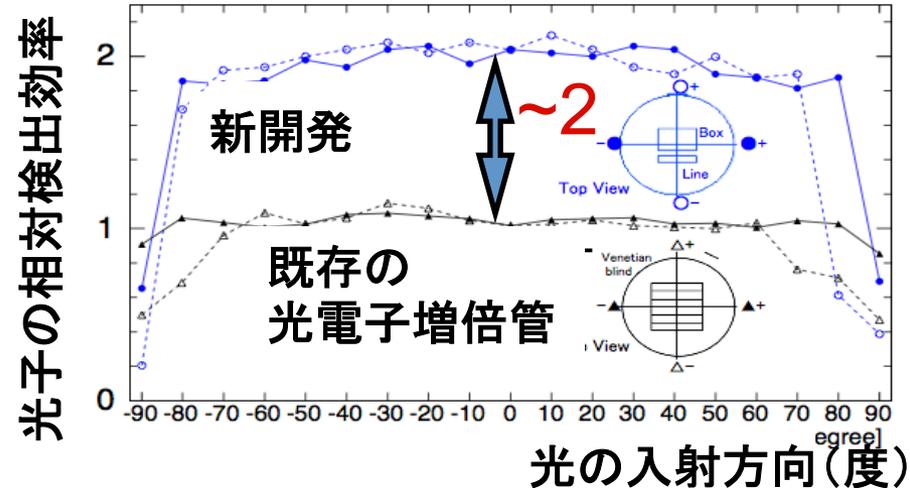
# 計画の準備状況

本計画の実現に向けて、長年に亘り、詳細な検討と、技術開発を行ってきており、すぐに建設開始できる。以下に具体的な検討・開発の2例示す：

- 地下空洞：長年に亘り現地の岩盤調査、岩盤の安定性解析を鉱山学者、鉱山会社、建設会社などのもとに進め、問題なく空洞が成立することを確かめた。
- 装置の性能を決める重要な要素である光電子増倍管の開発研究を進め、光の検出効率、時間分解能などにおいて既存の光電子増倍管の性能のほぼ2倍の高性能光電子増倍管を開発した。



空洞安定性解析の結果。赤い部分が塑性域となり、支保での補強が必要である。



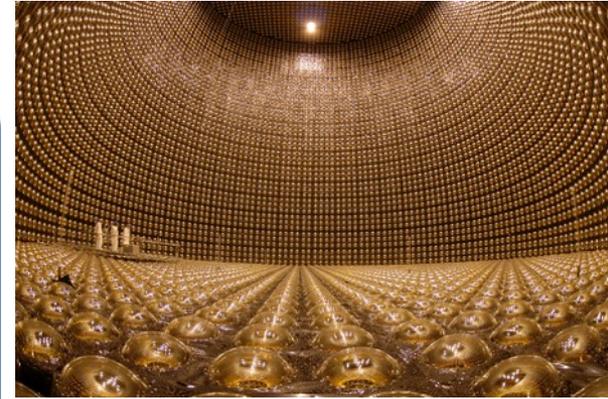
# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究の新展開

## これまでの成果

- 大気ニュートリノ振動の発見(1998)
- 太陽ニュートリノ振動の発見(2001)
- 人工ニュートリノによるニュートリノ振動の確認(K2K実験、2004)
- ミューニュートリノビームから電子ニュートリノ出現の発見(T2K実験、2013)
- 大気ニュートリノによる質量階層性の解析：91.9 ~ 94.5%信頼度で順階層性を示唆(2017)

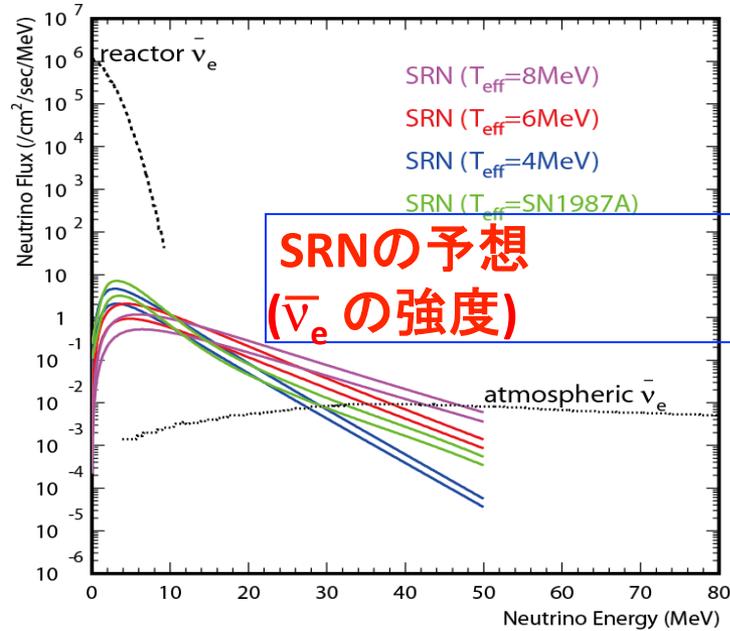


50,000トンの水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置。  
11,129本の口径50cm光電子増倍管を内水槽に、  
1,885本の口径20cm光電子増倍管を外水槽に使用。

## 将来計画

- SKタンクにガドリニウム(Gd)を溶解し、中性子の遅延同時計測を行う(SK-Gd)。
  - バックグラウンドを除去し、真の反電子ニュートリノ事象を選択することにより、超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指す。(物理の詳細は次ページ)
  - 2019年かそれ以降にGdを0.01%濃度で溶解する予定。50%の中性子捕獲効率に相当。
  - その後、Gd濃度を0.1%にあげていく予定。90%の中性子捕獲効率に相当。
- 大気ニュートリノ、太陽ニュートリノの高統計精密観測を継続。

# SK-Gdが目指す物理



## 超新星背景ニュートリノ (SRN)

- 10-30MeVに観測のenergy window.
- 期待される頻度：1.3 -6.7 事象/年/22.5kt (10-30MeV)
- 宇宙の初期から積算した超新星爆発頻度が分かる。
- 平均的なニュートリノエネルギーが分かる。

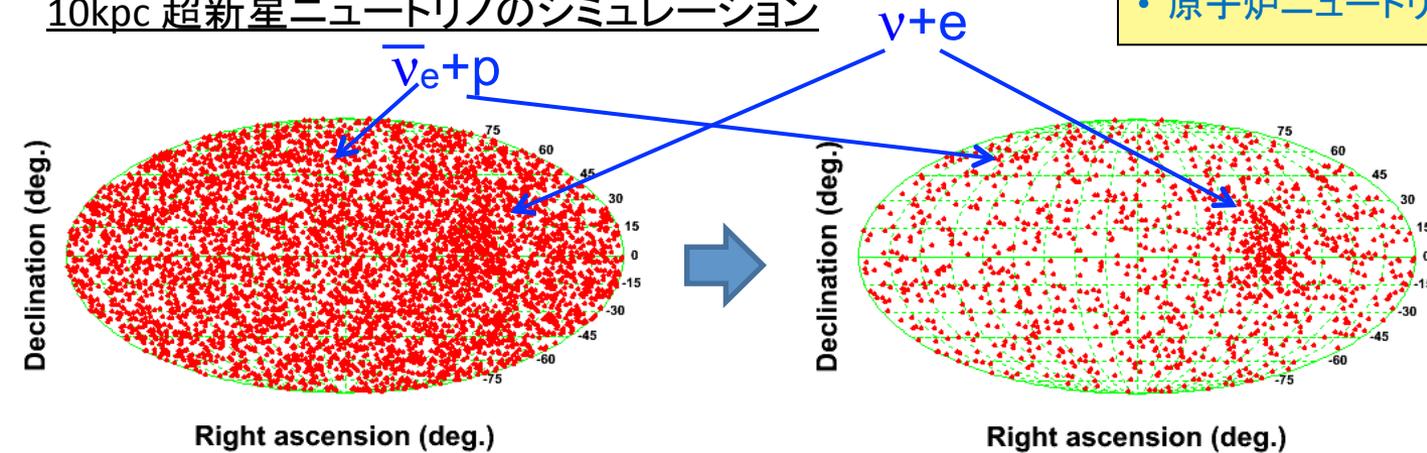
## 銀河系での超新星爆発に対して方向決定精度を向上

10kpcでの超新星爆発に対して4~5° → 3°(90%CL)

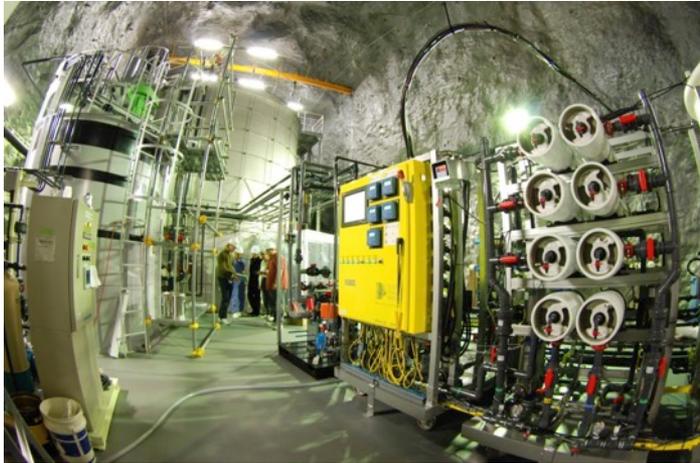
## その他

- 近傍超新星に対して前兆ニュートリノの観測。
- 陽子崩壊事象(中性子を伴わない)と大気ニュートリノ事象(中性子を伴う)の識別。
- ニュートリノ/反ニュートリノの識別。
- 原子炉ニュートリノによる $\theta_{12}$ 、 $\Delta m_{21}^2$ の測定。

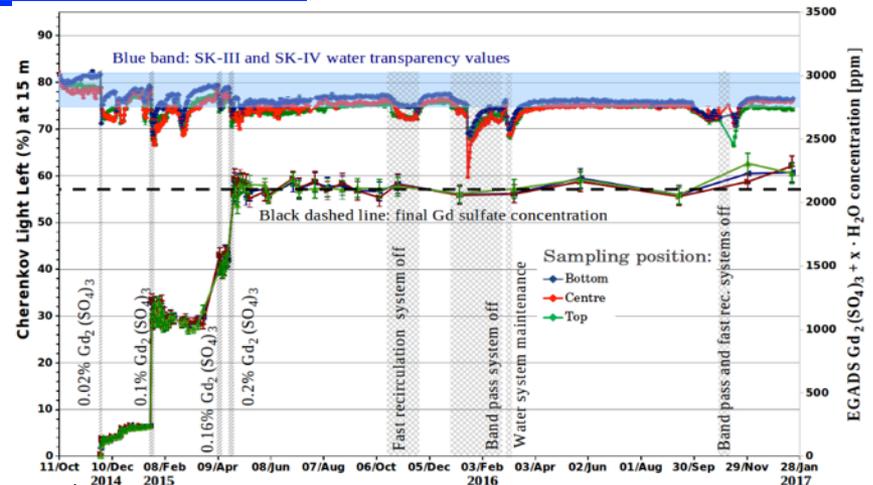
## 10kpc 超新星ニュートリノのシミュレーション



# SK-Gdの準備状況



- 200トンの試験用タンクで実証試験を行い、SKサイズの検出器で観測される光量は約92%（つまり、光のロスが8%程度）であることを示した。



- Gdの溶解装置、Gd溶解水の前処理装置、循環装置は既に建設済。



- 2018年にはタンクを開け、止水補強工事が進行中。

- U/Thの放射性バックグラウンドを低減し、太陽ニュートリノ観測の条件を満たした $Gd_2(SO_4)_3$ を開発。

# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen

# 極低放射能環境でのニュートリノ研究

## 2つの主要な研究課題

### 1. ニュートリノのマヨラナ性検証による宇宙・素粒子の大問題への挑戦

ニュートリノ質量の発見により、ニュートリノがディラック粒子であるかマヨラナ粒子であるかの検証が重要となっている。マヨラナ粒子の場合は、シーソー模型やレプトジェネシス理論により、「**ニュートリノが軽い謎**」「**宇宙物質優勢の謎**」解明の糸口となる。

マヨラナ性の現在現実的な検証方法は「**ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索**」のみであり、その研究でカムランド禅が世界を大きくリードしている。

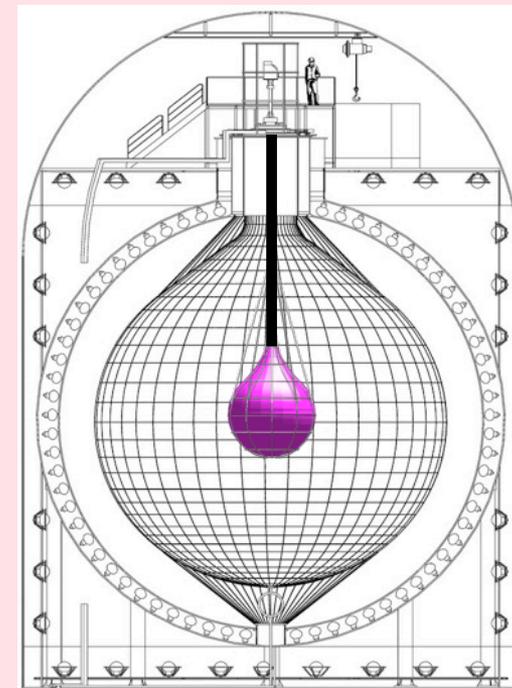
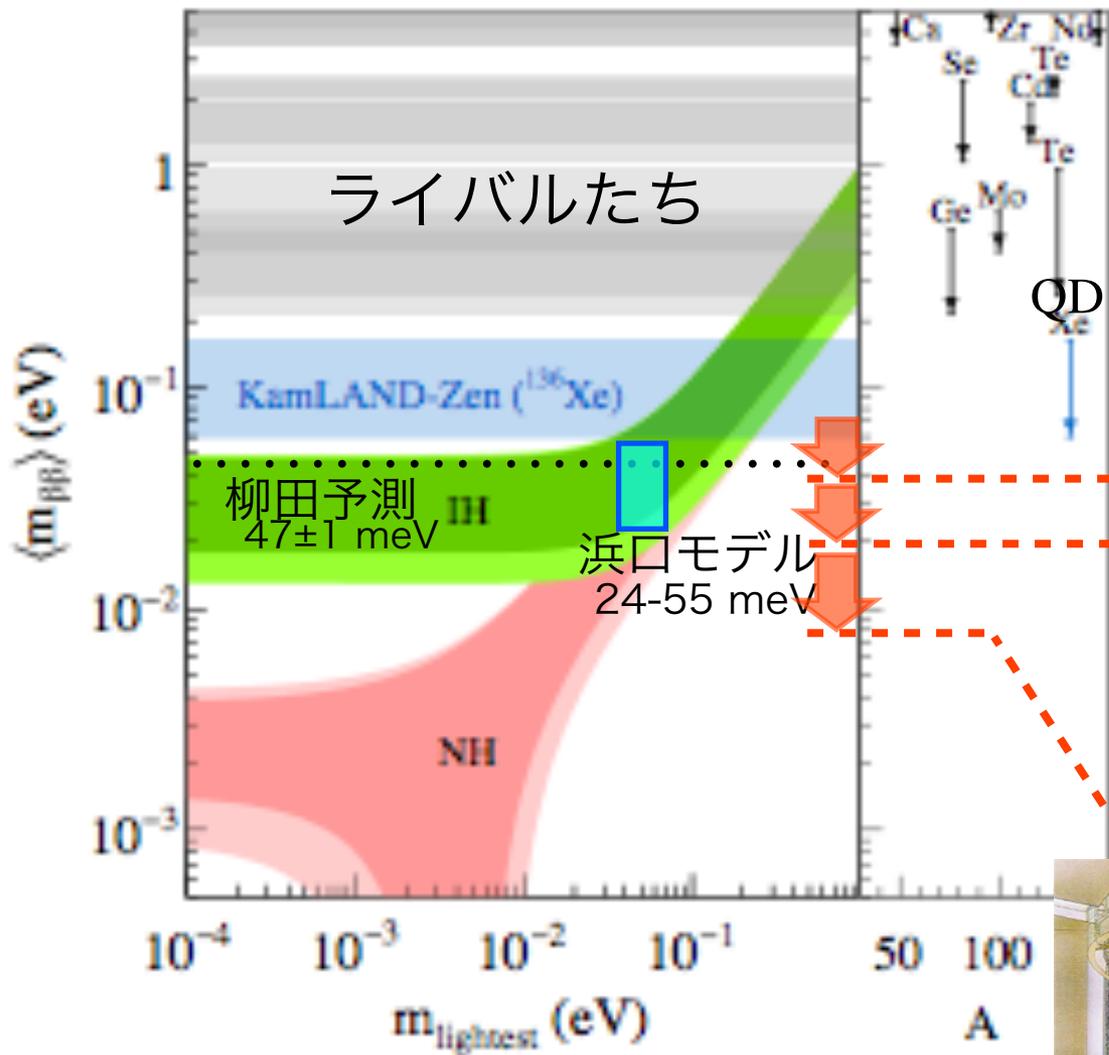
発見を目指しつつ逆階層構造をカバーし、複数の理論モデル検証・質量階層構造の究明を行う。

### 2. 地球ニュートリノ観測によるニュートリノ地球科学の展開

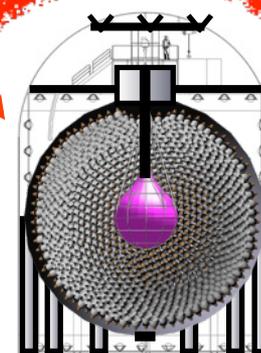
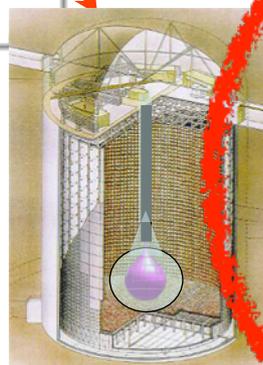
ニュートリノ地球科学を創出したカムランドは、国内の原子炉停止以降良質のデータを蓄積しており、世界をリードする観測装置として地球のダイナミクスや始原隕石などの重要な知見をもたらしつつある。

継続的な観測とカムランドの高性能化によって、地球の形成・ダイナミクスの理解を深める**ニュートリノ地球科学**が展開する。

# 世界をリードするカムランド禅



極低放射能フィルム  
キセノン増量 (H30から750kg)



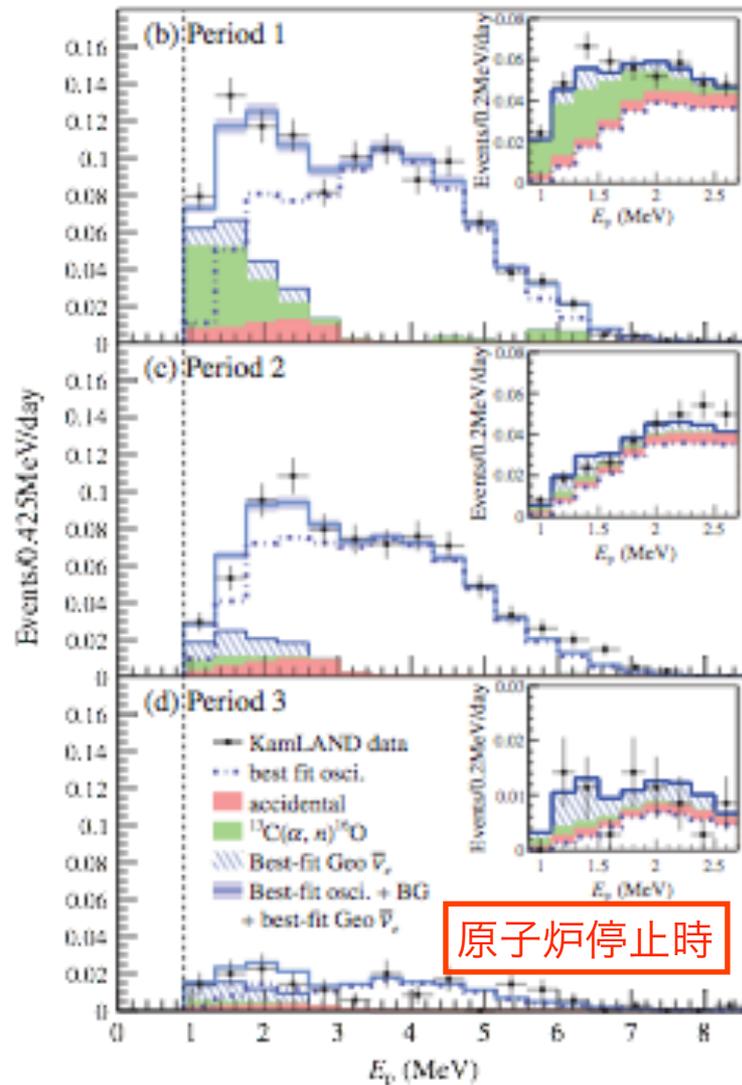
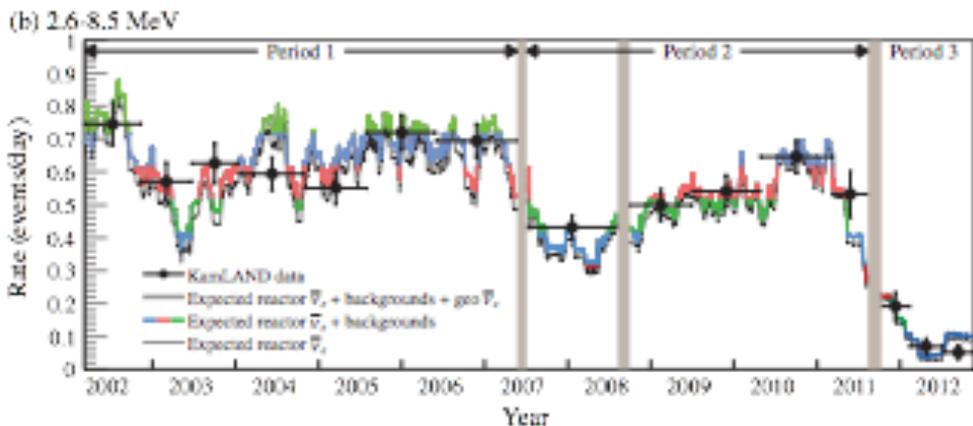
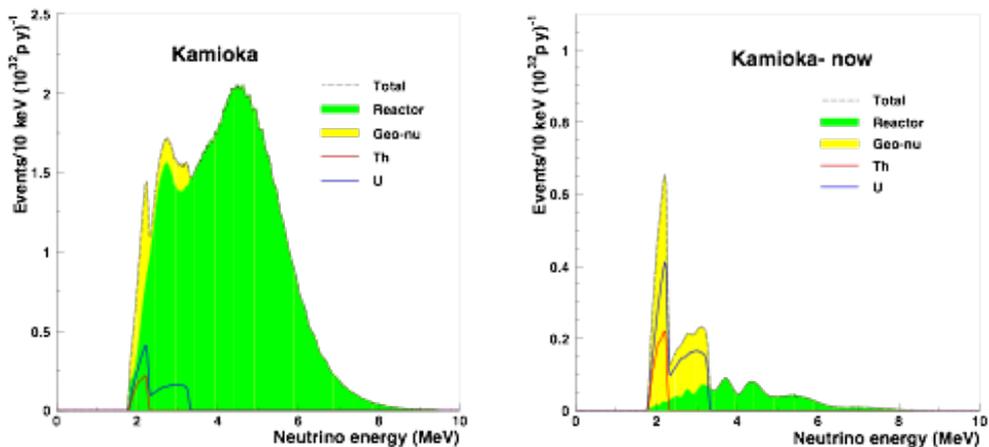
BG識別能大幅向上  
高分解能  
発光フィルム  
高感度撮像

いつ発見しても不思議でない。  
発見に最も近いのはカムランド禅

# 地球ニュートリノの観測状況

大震災後の原子炉停止で地球ニュートリノのS/Nが大幅に向上

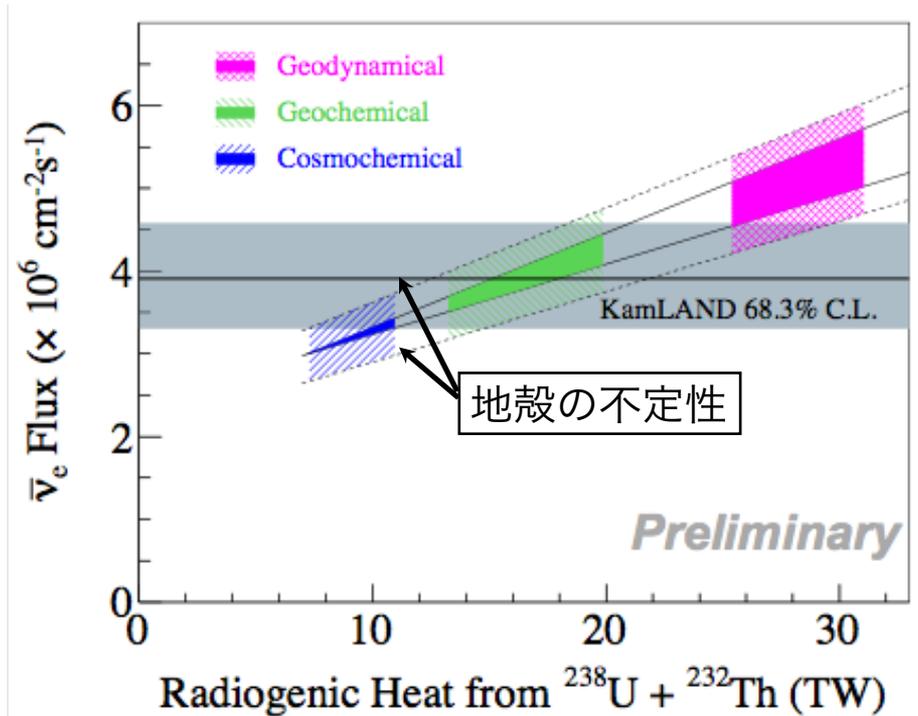
KamLAND collaboration, "Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND", Phys. Rev. D88, 033001 (2013)



原子炉停止時

原子炉運転との完璧な相関で 原子炉ニュートリノ領域でBGが正しく理解できていることを確認

# 良質の地球ニュートリノデータを蓄積中



事象数  $164^{+28}_{-25}$

観測精度がモデル精度を凌駕

significance  $7.92\sigma$

Th/U  $4.1^{+5.5}_{-3.3}$

世界初のグローバルなウラン・トリウム比測定  
BSEモデル予想 (3.58-4.2) と合致

Geodynamical マントルの粘度と熱流量

Geochemical 組成比 (炭素質コンドライト)

Cosmochemical 同位体比 (エンスタタイトコンドライト)

ト)

地球物理学者の主張

マントル一層対流 (一様)

地球化学者の主張

マントル多層対流

地球内部のダイナミクスや地球始原隕石に対する知見を得始めている。

# スケジュール

2019 カムランド禅800(現行)

2020

2021

2022

2023

2024

2025

2026

2027

2028

環境整備・周辺設備導入

濃縮キセノン調達(200kg)  
高性能電子回路導入  
クリーンルーム整備  
純空気製造装置導入  
純化装置高度化  
集光ミラー製作  
バルーン製作

カムランド高性能化工事

HQE-PMT調達  
廃液  
導入部拡張工事  
PMT交換・集光ミラー設置  
バルーン導入  
高光収率液体シンチレータ製造  
注液

観測停止期間

カムランド2観測

ミニバルーン導入  
キセノン導入

カムランド2禅観測

ニュートリノ地球  
科学の推進

ニュートリノのマ  
ヨラナ性検証

# 宇宙線分野の将来計画

- 最高エネルギー宇宙線実験
  - EUSO-SPB2 + POEMMA
- 高エネルギーニュートリノ天文台
  - IceCube-Gen2
- ガンマ線天文台
  - CTA
  - ALPACA
- 地下非加速器実験
  - Hyper Kamiokande
  - SK-Gd
  - KamLAND2-Zen