

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

第6回 東京大学 宇宙線研究所 (2022.7.8)

- 12:05-12:10(5分) : 宇宙線研究所の概要 (中畑雅行)
- 12:10-12:17(7分) : 「チベット高原における最高エネルギーガンマ線天文学の開拓」
(川田 和正)
- 12:18-12:25(7分) : 「次世代ニュートリノ検出器ハイパーカミオカンデ」(片岡 洋介)
- 12:25-12:45(20分) : 質疑応答



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



宇宙線研究所の概要

宇宙線研究所長
中畑 雅行

宇宙線研究所でおこなっている研究

ガンマ線



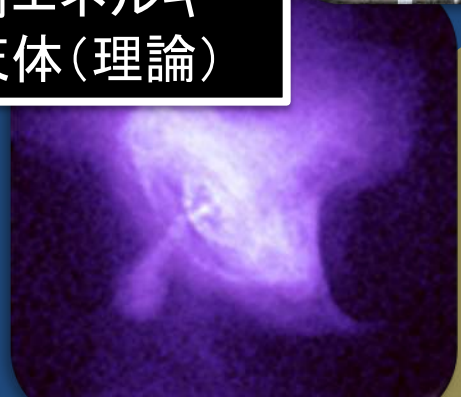
最高エネルギー宇宙線



銀河宇宙線・ガンマ線



高エネルギー天体(理論)



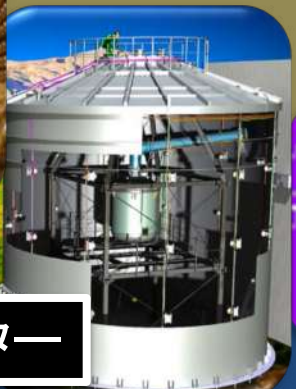
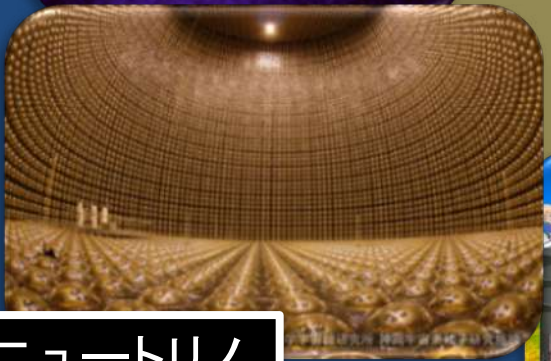
宇宙線・ガンマ線・ニュートリノ・重力波・
ダークマター等の観測から；

- ✓ 宇宙で起こる高エネルギー現象の研究。
- ✓ 宇宙を支配する基本法則の研究。
- ✓ 加速器ではできないような素粒子の研究。



重力波

ニュートリノ



ダークマター

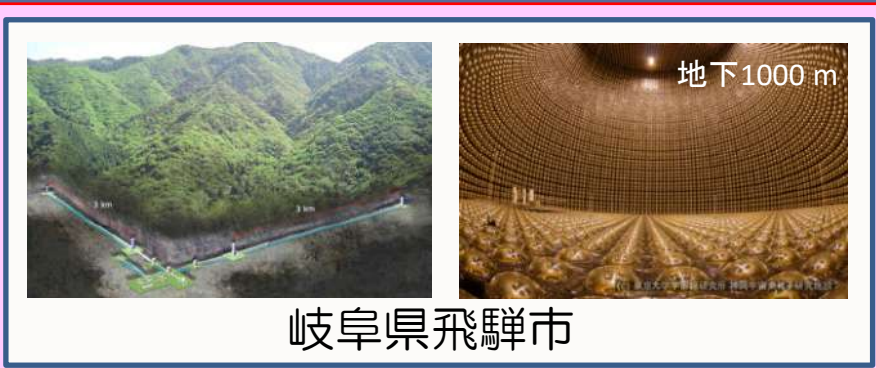


素粒子論、宇宙論



観測的宇宙論

宇宙線研究所の観測・研究拠点



宇宙線をより良く観測するために高地に観測装置を設置したり、宇宙線や地表のノイズを避けるため地下に装置を建設したりしている。



宇宙線研究所の歴史（主要な出来事のみ）

- 1950 朝日学術奨励金によって乗鞍岳に朝日の小屋が建つ。
- 1953 東京大学宇宙線観測所となる。この観測所は我が国初の全国共同利用研究機関。
- 1956 東京大学原子核研究所宇宙線部が発足（空気シャワー部とエマルション部）。
- 1976 国立学校設置法改正により東京大学宇宙線研究所となる。
- 1977 明野観測所が附属施設となる。
- 1983 神岡地下観測所が設立される。 カミオカンデが始まる。
- 1988 将来計画検討小員会が「スーパーカミオカンデを最優先課題として推進する」という提言を出した。
- 1991 スーパーカミオカンデの建設開始。
- 1995 神岡宇宙素粒子研究施設が新設される。
- 1996 スーパーカミオカンデ実験開始。
- 2000 柏キャンパスに移転。（それまでは田無に本拠地があった。）
- 2010 大型低温重力波望遠鏡（後に「KAGRA」と命名）が文部科学省の最先端研究基盤事業の一つに選定され、建設が始まる。
- 2018 チェレンコフ・テレスコープアレイ（CTA）大口径望遠鏡1号機がスペイン領カナリア諸島ラパルマに完成する。

宇宙線研究所と共同利用研究



スーパーカミオカンデ

国内15機関, 海外34機関,
約230名の研究者



ハイパーカミオカンデ

国内20機関, 海外79機関,
約500名の研究者



Tibet AS γ

国内16機関, 海外17機関,
約110名の研究者

宇宙線研究所

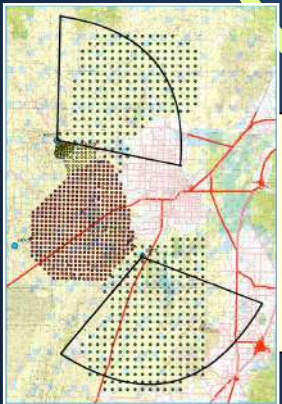


教授: 14名
准教授: 18名
助教: 31名
技術職員: 8名



KAGRA

国内36機関, 海外41機関,
約370名の研究者



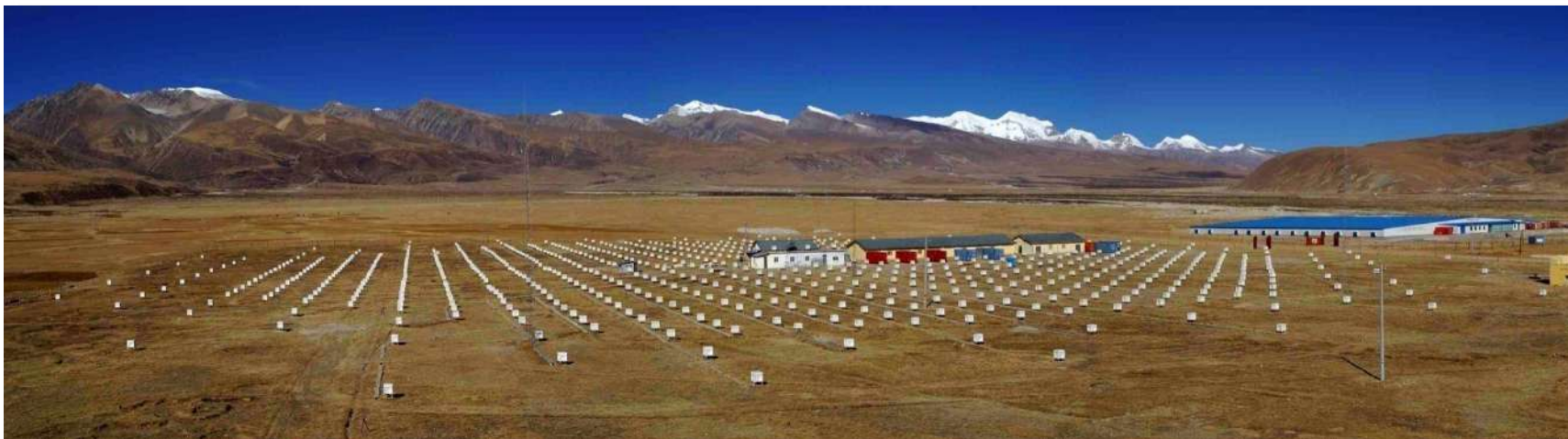
TA

国内21機関, 海外11機関,
約140名の研究者



CTA

国内22機関, 海外150機関,
約1500名の研究者



チベット高原における 最高エネルギーガンマ線天文学の開拓

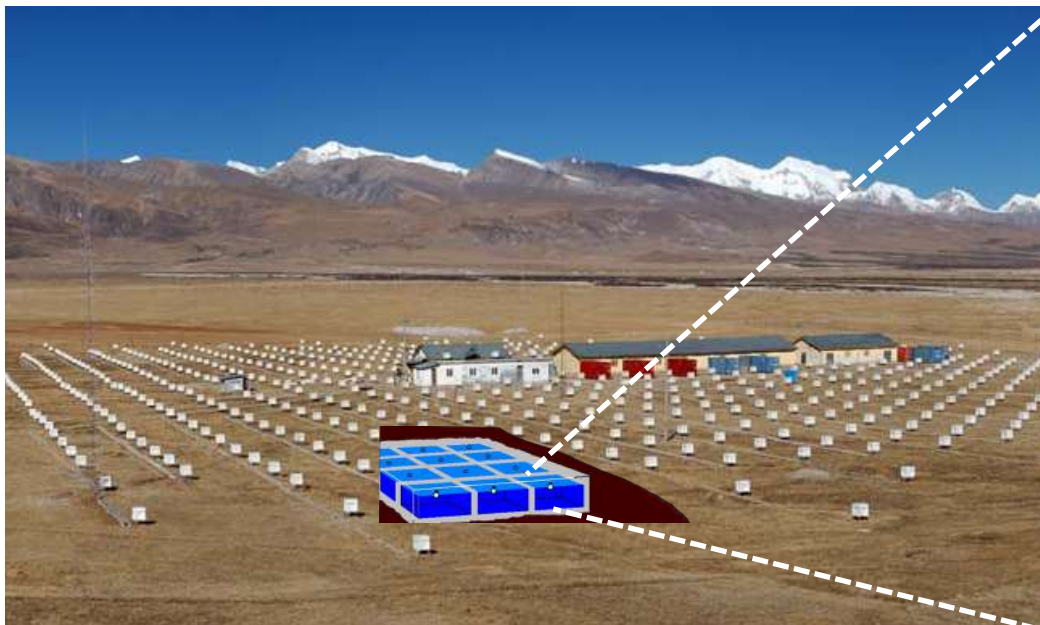
川田 和正 (東京大学宇宙線研究所)
For the Tibet AS γ Collaboration



チベット空気シャワー実験

中国 チベット自治区 羊八井 標高4300m

本研究の鍵となる技術



地表空気シャワー観測装置 65,000m²
多数のシンチレーション検出器



地下水チェレンコフ型ミュオン
観測装置(注水前) 3,400m²

30年間の実績あり！

古くからある技術、劣化することが
ほとんどなく安定して動作する
広い視野で、昼夜問わず観測可能

スーパーカミオカンデの技術を利用
することで安価で大面積のミュオン
観測装置を達成。ミュオンが水
中で放射するチェレンコフ光を利用



空気シャワーの観測原理

ガンマ線／宇宙線

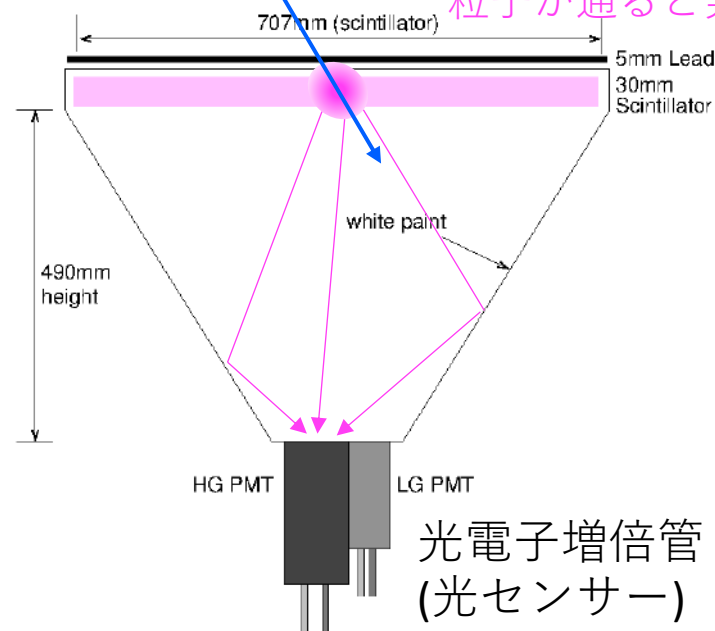
大気(窒素など)と衝突

多数の二次的な粒子
が発生= **空気シャワー**

地上の粒子検出器
で二次粒子を観測

Air Shower Array

シンチレーター
粒子が通ると発光



方向とエネルギーを測定

- 角度分解能 0.2度 @0.1PeV
- エネルギー分解能 20%@0.1PeV

ガンマ線と宇宙線の区別はできない！

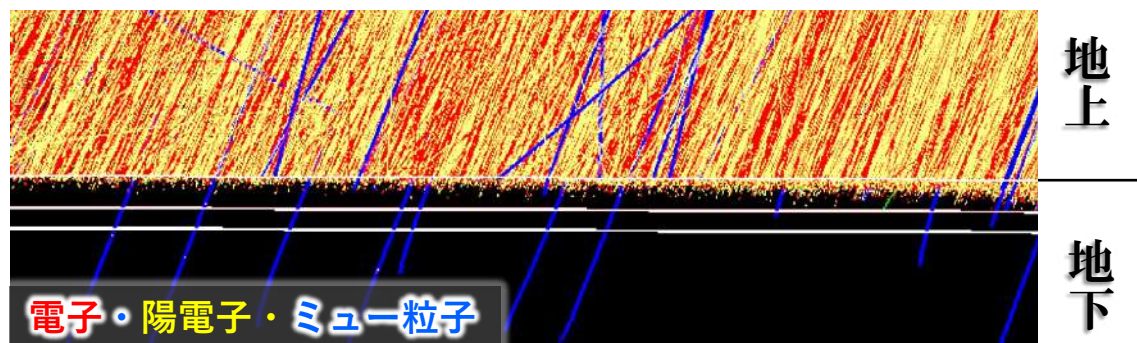


ガンマ線の見分け方

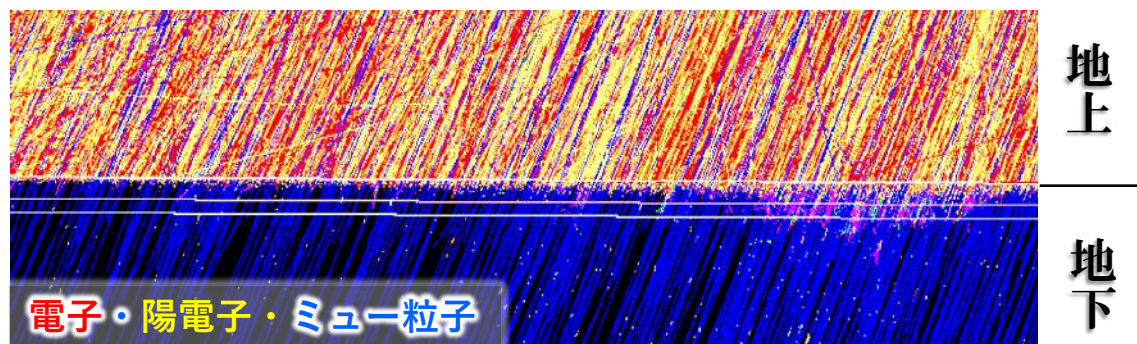
ガンマ線→少ない **ミュー粒子**

高い透過力→地下に侵入

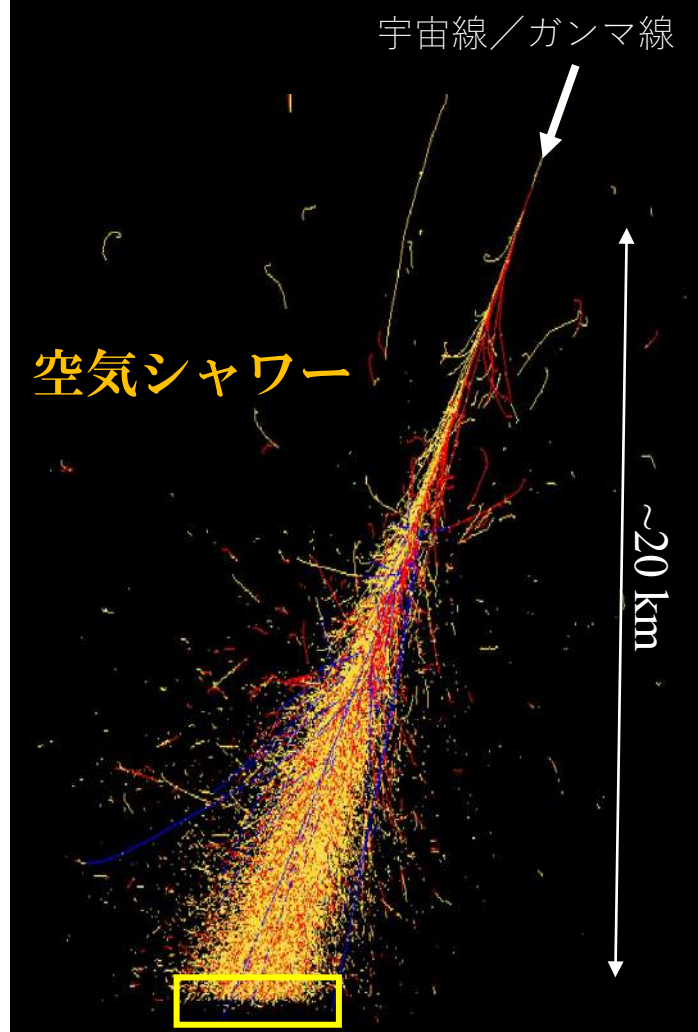
0.2PeVガンマ線起源の場合



0.2PeV宇宙線(雑音)起源の場合



→ 地下ミュー粒子観測装置

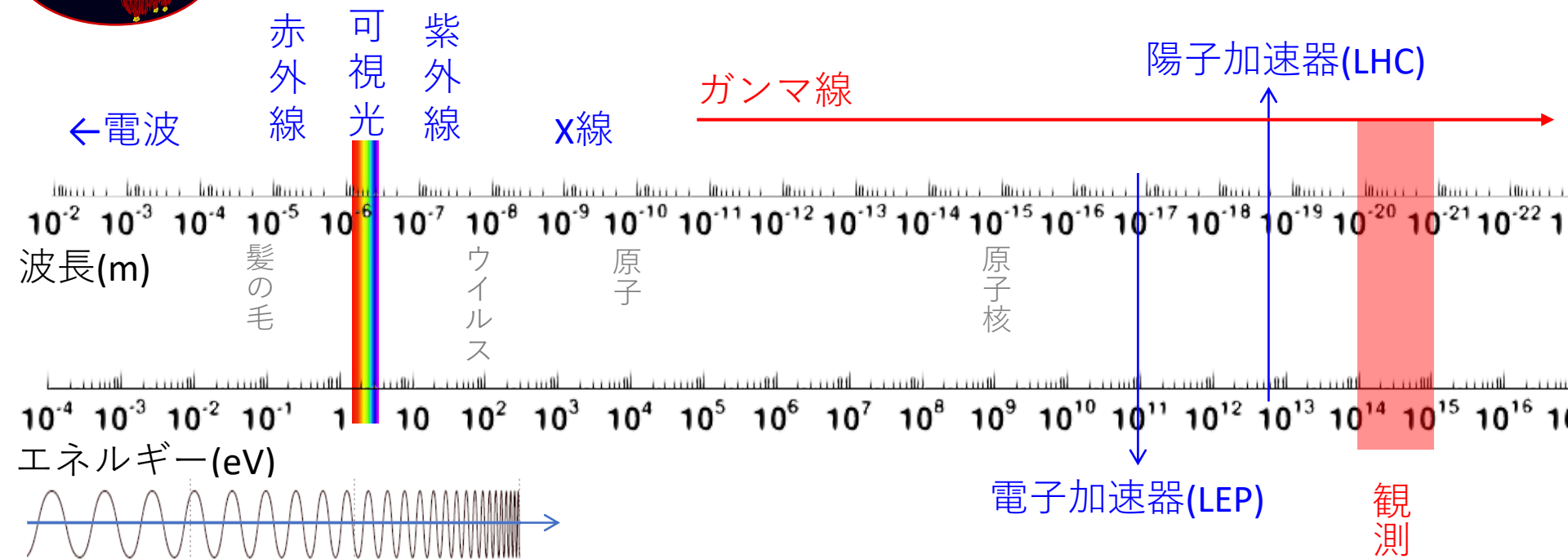


シミュレーション
(Cosmos)

地面付近を拡大



未観測のガンマ線エネルギー



電磁波のエネルギーは波長で表す

電子ボルト(eV)：1Vの電位差で電子1つが得るエネルギー
素粒子のエネルギーの単位として良く用いられる

$10^{15} \text{ eV} = 1 \text{ ペタ 電子ボルト (PeV)}$

→ 可視光線の1000兆倍のエネルギー

観測対象のエネルギー



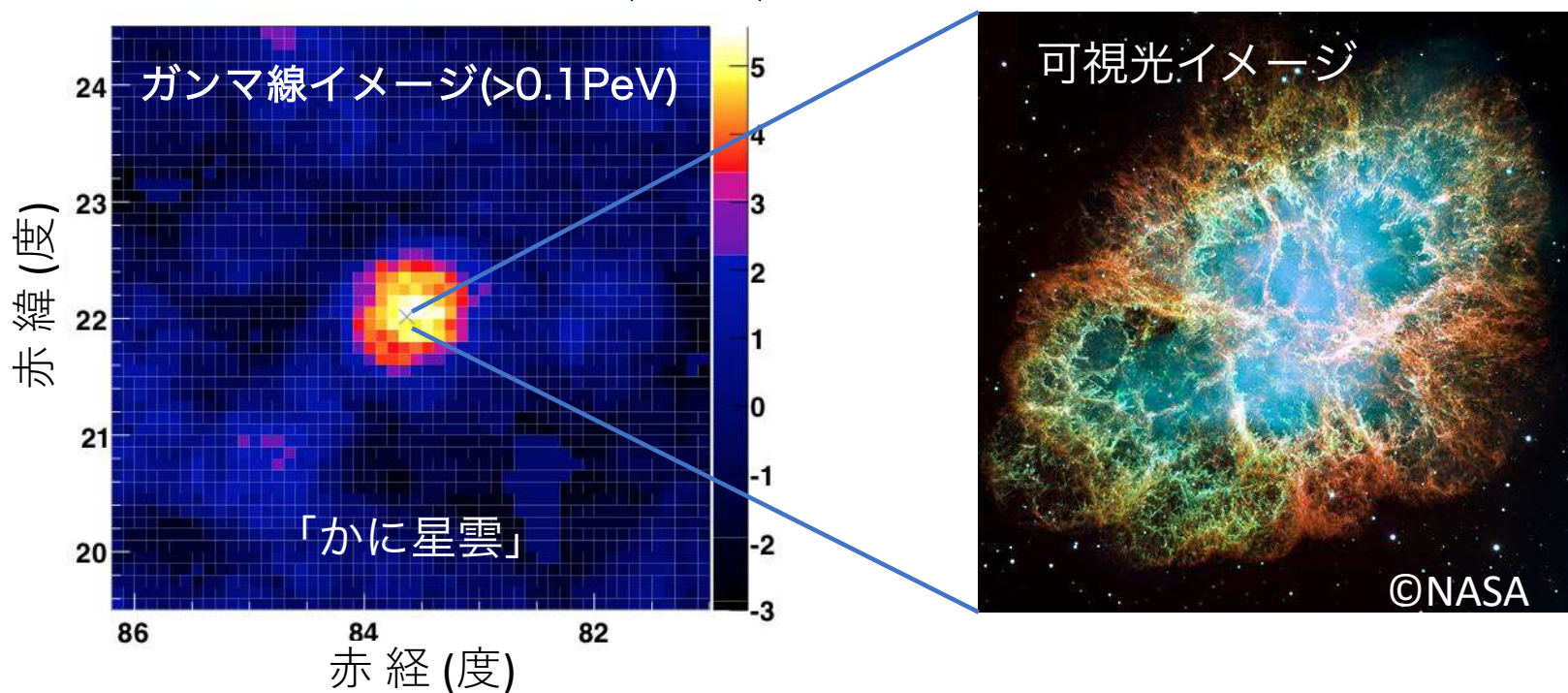
成果1：史上最高エネルギーのガンマ線検出

Physical Review Letters (2019年7月発表)

最大エネルギー 0.45 PeV

→ 当時として他の天体も含めて史上最高エネルギー

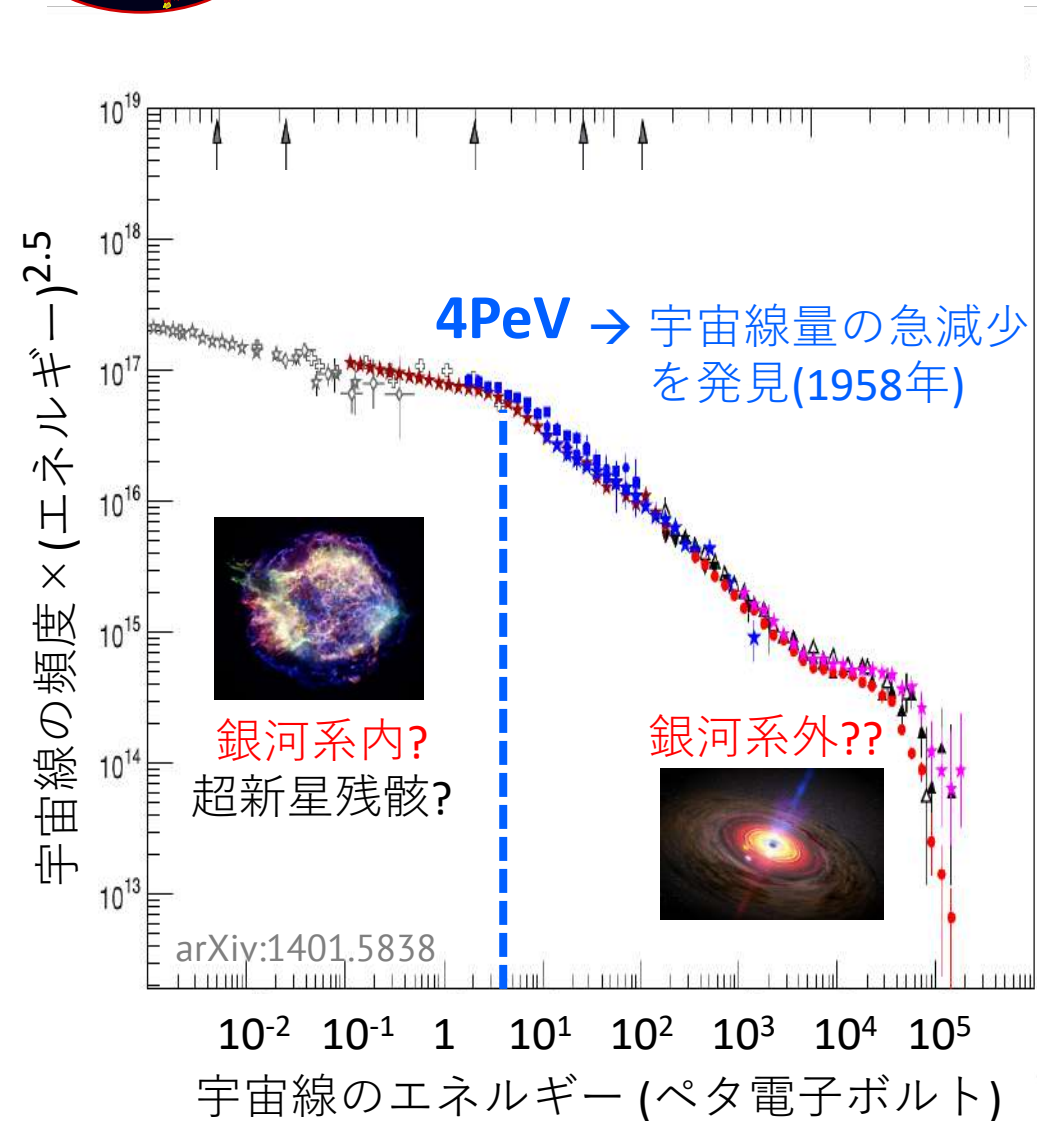
→ 可視光エネルギー(数eV)の100兆倍



新しいエネルギー領域の天文学の開拓



宇宙線物理の未解決問題



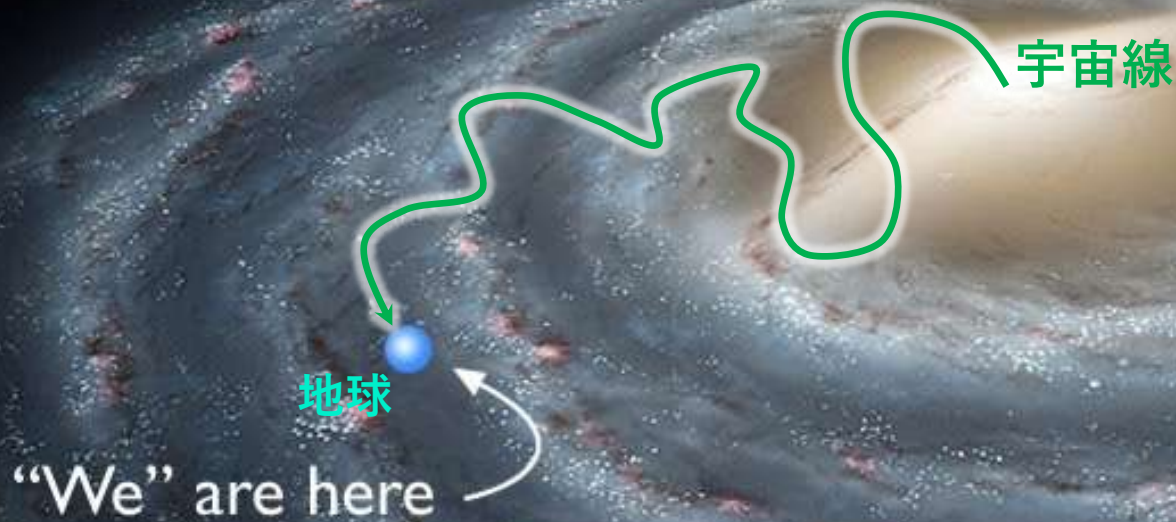
- ❖ 広いエネルギー範囲
- ❖ 主成分は陽子
- ❖ 1桁エネルギーが上がると頻度は1/100

未解決問題：

我々の住む 銀河系内に
宇宙粒子加速器「**ペバトロン***」
は本当に存在するか？

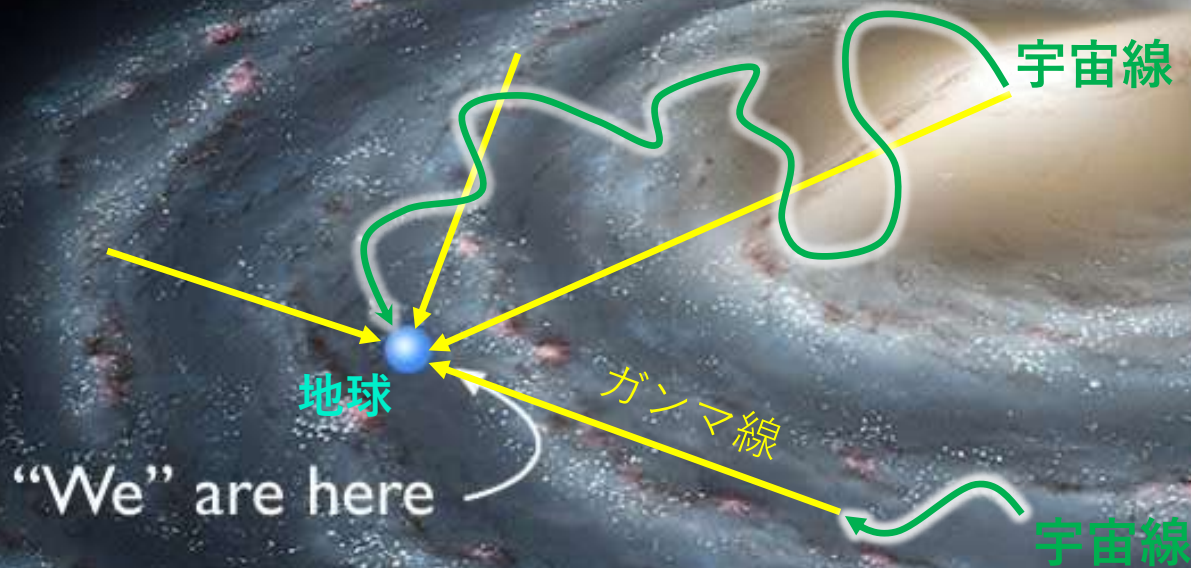
* 宇宙線をペタ電子ボルトへ加速！

宇宙線(陽子)はプラスの電気を帯びているので、
磁場によって曲がり、どこから来たか分からない



なぜガンマ線？

宇宙線(陽子)はプラスの電気を帯びているので、
磁場によって曲がり、どこから来たか分からない



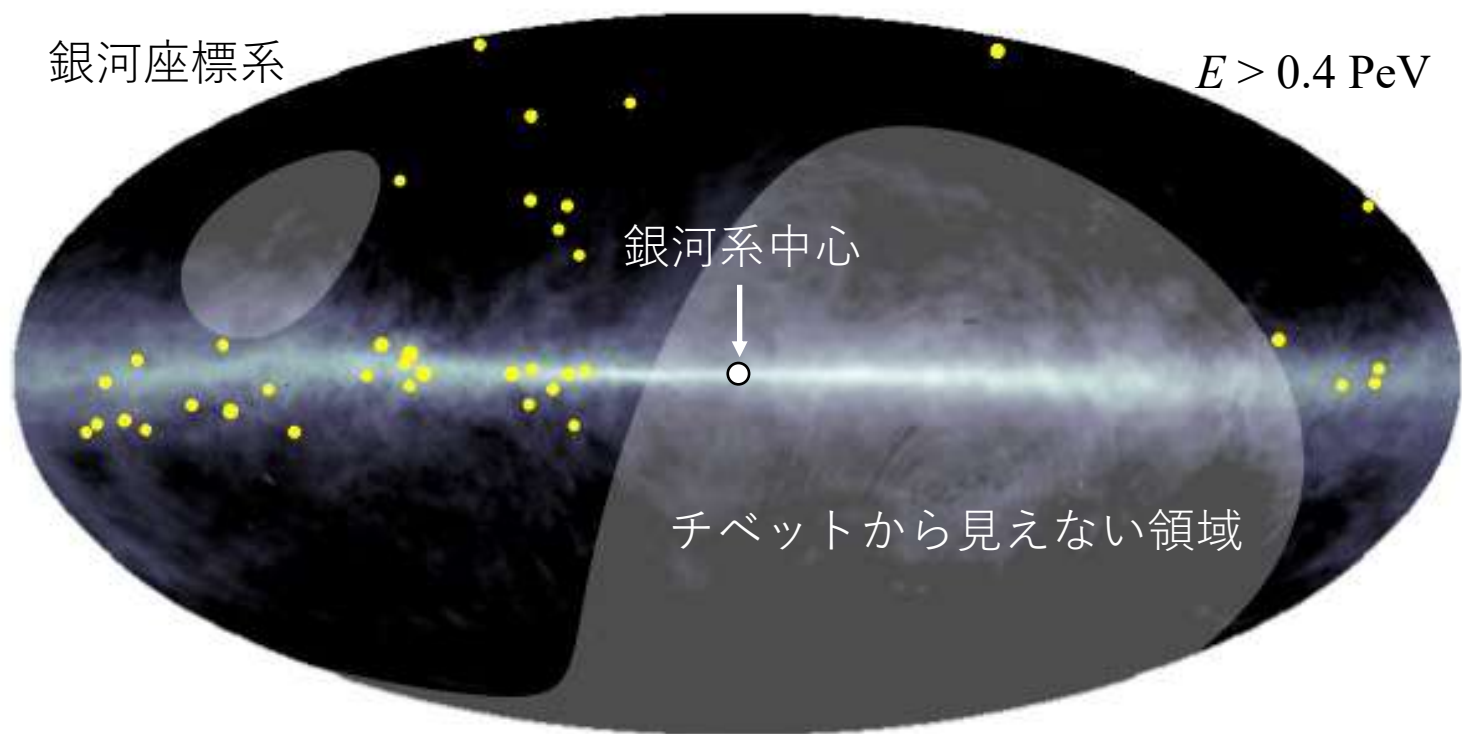
宇宙線と星間物質が衝突しガンマ線を放射
ガンマ線は真っ直ぐやって来るので
来た方向がわかる！

なぜガンマ線？



成果2：我々の住む天の川銀河からの 史上最高エネルギーガンマ線放射

Physical Review Letters (2021年5月発表)



- ✓ 銀河系ディスクから最高エネルギー～1PeVガンマ線を検出
- ✓ 銀河系ディスクにある星間物質と加速された>PeV宇宙線の衝突
- 銀河系ディスクに宇宙線プールを形成しているという定説を検証
- 我々の銀河系内に「ペバトロン」が存在する決定的証拠

次世代ニュートリノ検出器 ハイパーカミオカンデ

片岡洋介
(宇宙線研究所)

ハイパーカミオカンデ計画

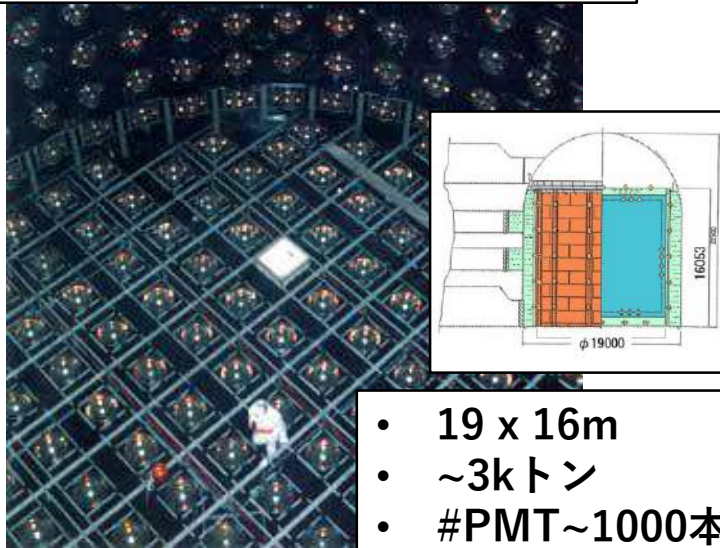


- 神岡鉱山地下、巨大な水チェレンコフ検出器を用いてニュートリノを観測してきた。
- ニュートリノの透過力、特異な性質を利用して宇宙観測・素粒子物理学の発展に寄与。
- 現在、2027年の観測開始を目指して次世代ニュートリノ検出器ハイパーカミオカンデを建設中。
- 世界20ヶ国、約500人が参加する国際共同実験。

カミオカンデ (1983-1996)



超新星爆発1987Aを観測し
ニュートリノ天文学の幕開け

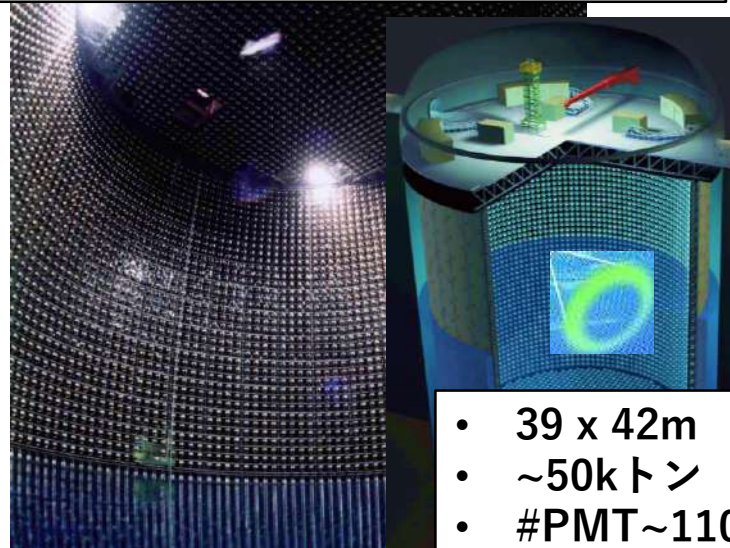


- 19 x 16m
- ~3kトン
- #PMT~1000本

スーパーカミオカンデ (1996-継続中)



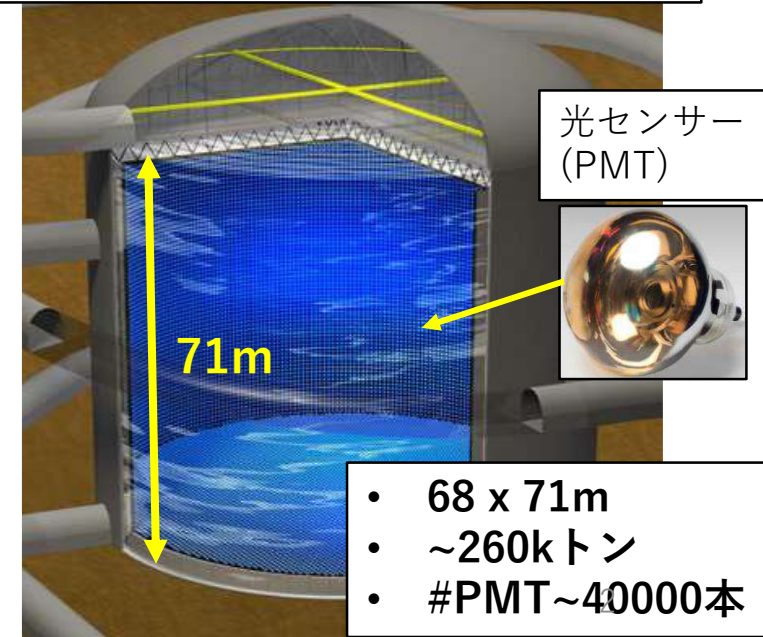
ニュートリノ振動を発見し
素粒子物理学発展の大きな一歩に



- 39 x 42m
- ~50kトン
- #PMT~11000本

ハイパーカミオカンデ (2027観測開始予定)

史上最大地下ニュートリノ実験



- 68 x 71m
- ~260kトン
- #PMT~40000本

ハイパーカミオカンデの建設

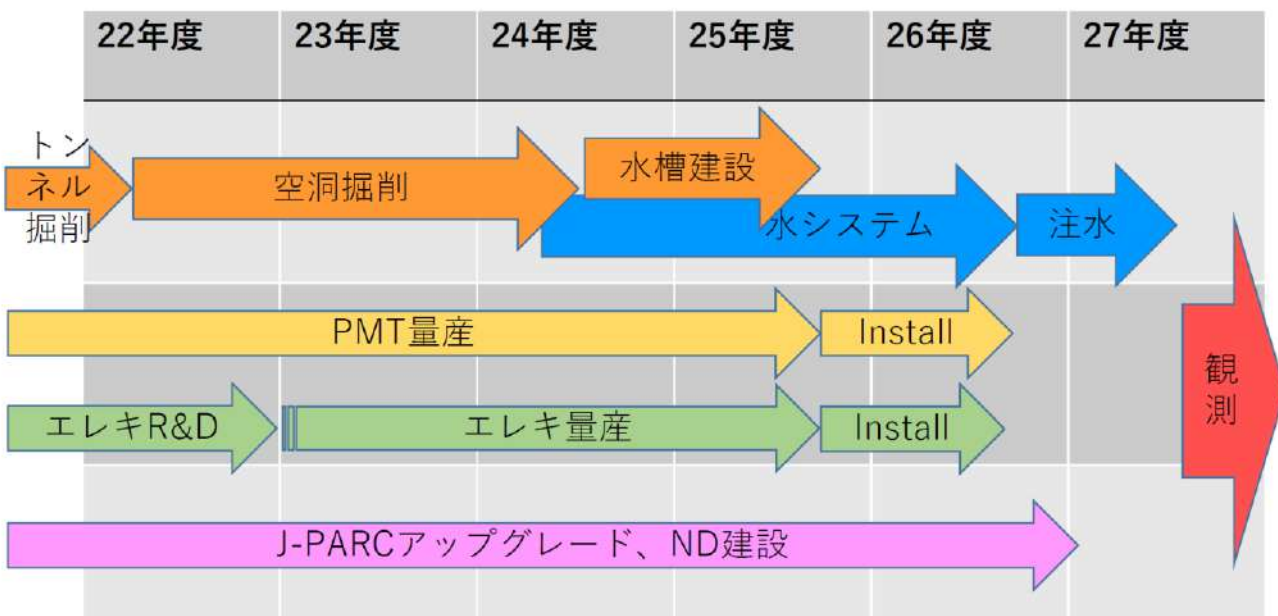
HK空洞中心到達!
2022/6/23

2020年度建設開始、

- **26万トン地下水槽** .. アクセス坑道完成(~2km)、空洞掘削・水槽建設へ。
- **HK用20インチ光センサー(光電子増倍管)** .. 性能の2倍化に成功、量産中。
- **高性能HKエレクトロニクス** .. 現在開発の大詰め、量産へ。

→26年度中に建設完了、注水を開始し、
27年度から観測開始を目指す

建設スケジュール



~2km

アクセス坑道



1号アプローチ坑道

2号アプローチ坑道

3号アプローチ坑道

4号アプローチ坑道

地下空洞(円筒部)



新型20インチ光電子増倍管(PMT) 性能2倍(SK比)!



50cm



量産検査
20%完了

HKエレクトロニクスの開発

HKの厳しい要求性能を満たすため専用のエレクトロニクス・DAQシステムを開発中

- 水中フロントエンドエレクトロニクス

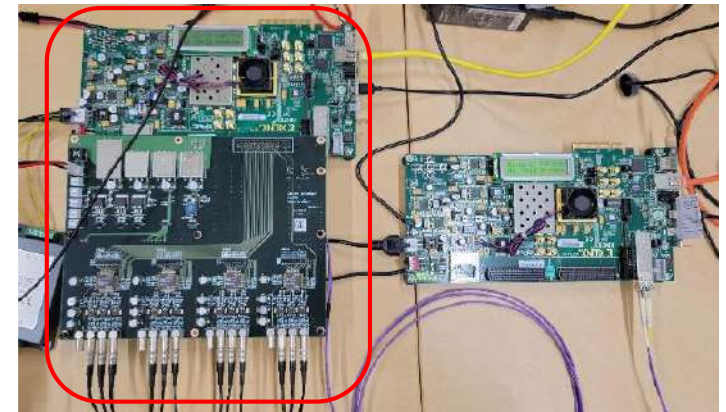
- ✓ 2万本の光電子増倍管の信号を電荷・時間情報に変換する。

- ✓ 分解能・耐久性など全ての要求性能をパス！

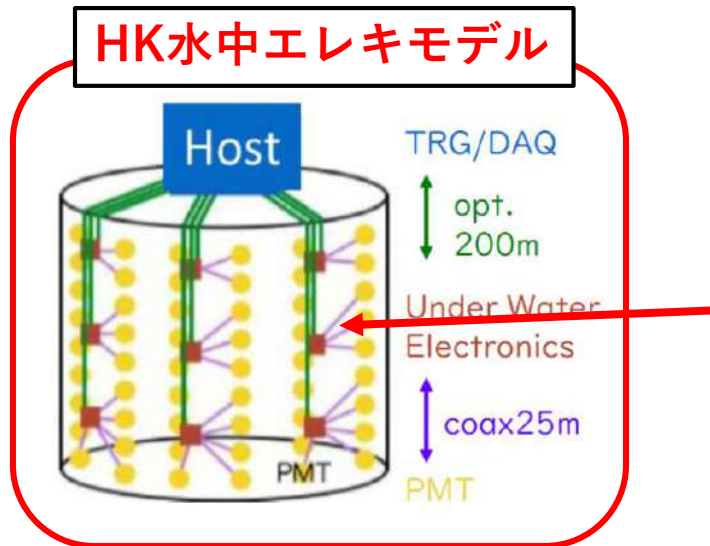
- 防水耐水圧装置（ケース・ケーブル）

- DAQシステム .. $<100\text{ps}$ で同期し、超新星バーストを記録。

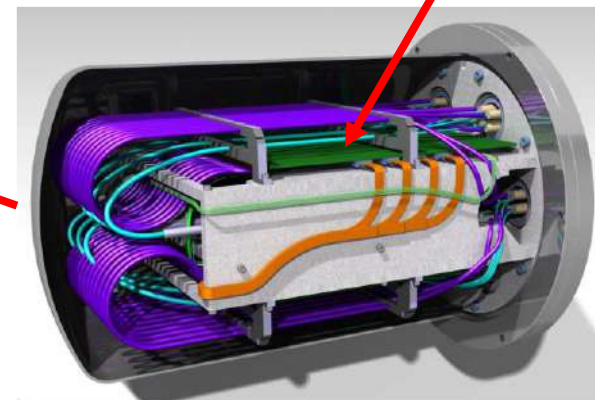
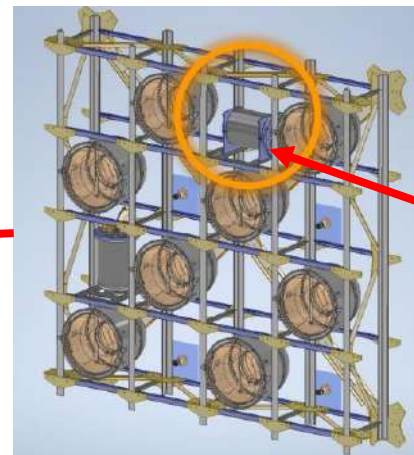
テスト中のHKエレキプロトタイプ



HK水中エレキモデル



水中PMT支持構造



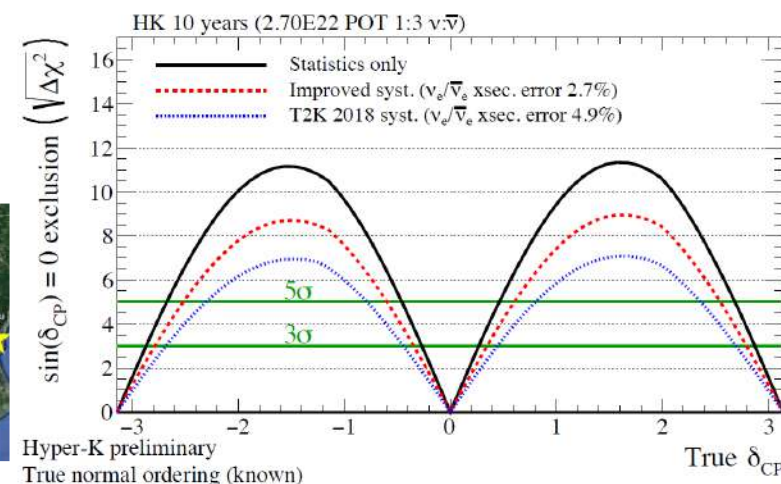
1MPa
防水耐圧ケース設計

ハイパーカミオカンデの物理

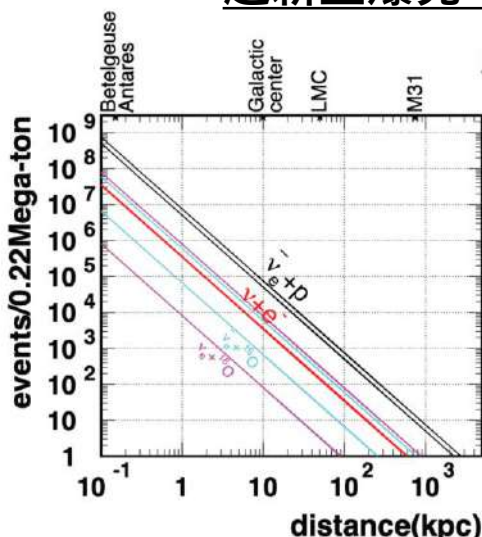
観測開始後、高統計を活かし様々な物理領域でブレークスルーが期待される。

- **CP対称性の破れの発見** .. 宇宙の物質・反物質非対称を理解するカギ。
- **陽子崩壊の発見** .. 標準理論を超える力の統一理論の検証。 加速器ニュートリノ
- **超新星爆発の観測** .. 1987A以来の観測。

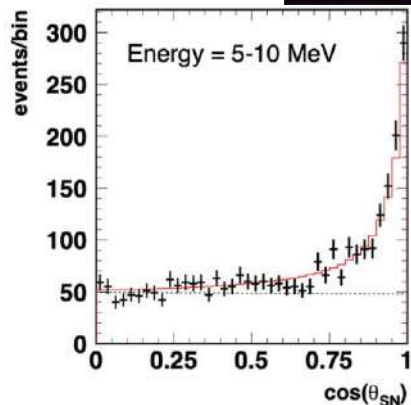
CP対称性の破れの発見感度



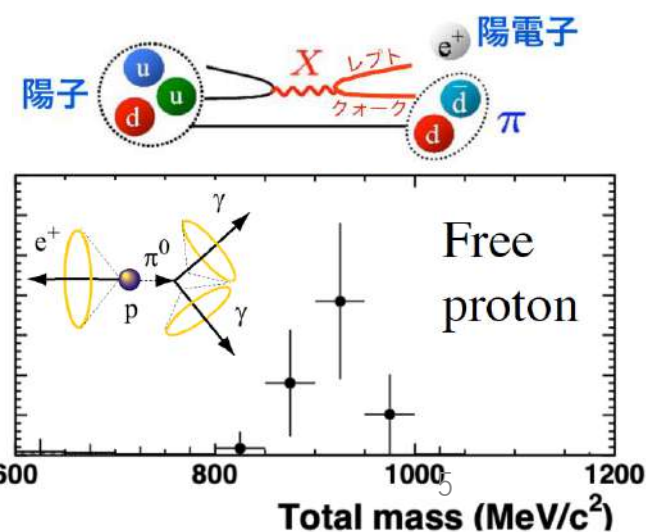
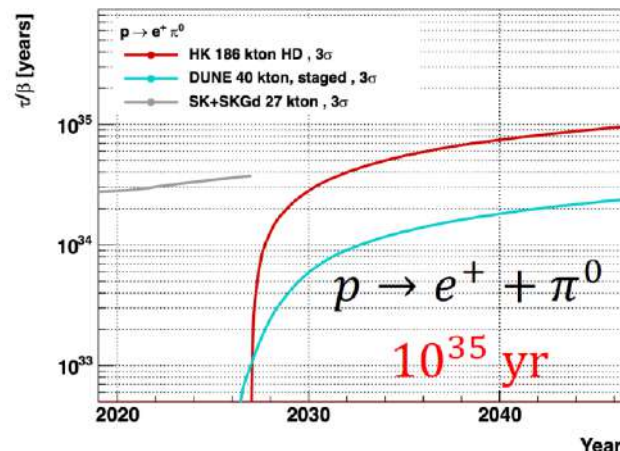
超新星爆発の観測感度



Supernova Burst



陽子崩壊の発見感度



スーパーカミオカンデ

大気ニュートリノ

観測継続中、様々な領域で世界最先端を走る。

• 大気ニュートリノ観測

- ✓ ニュートリノ振動の発見以降、データ収集を継続し測定の高精度化を進めている。

• DAQシステムの維持管理

- ✓ 超新星爆発は数十年に一度のイベント（1987A以降観測せず）、データ収集を常時(~100%)稼働させ続けることが必要。
- ✓ DAQシステムの維持管理

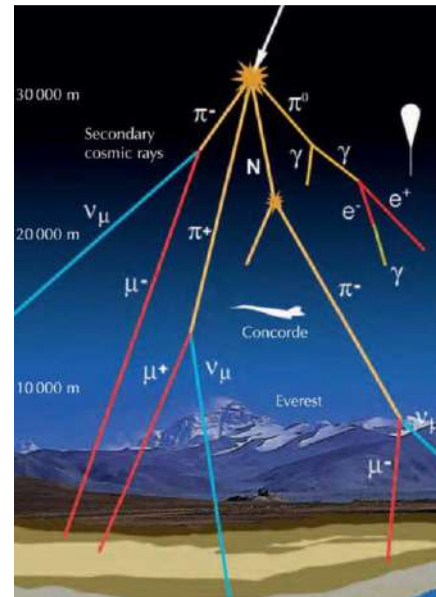
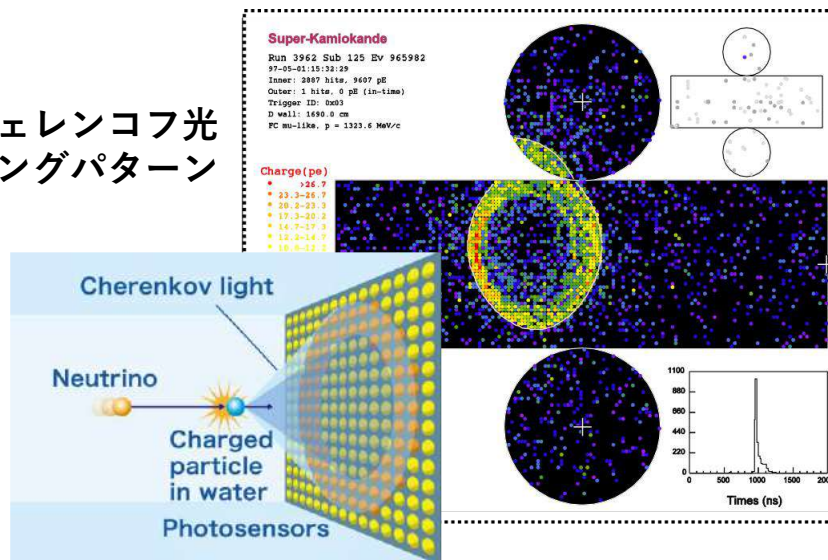
99%以上の稼働時間を維持！

SKエレクトロニクス

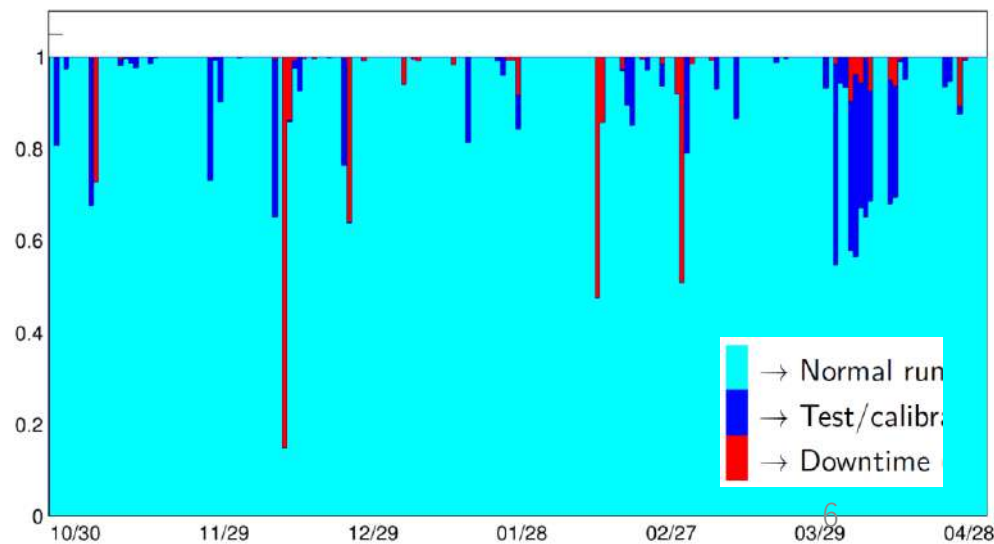


500台の専用電子基板で
約1万本の光電子増倍管信号を処理

チェレンコフ光
リングパターン



DAQ稼働時間 (2021/10/25~2022/5/2)



まとめ

- 2027年観測開始を目指し、ハイパーカミオカンデの建設を進めている。
 - ✓順調に坑道空洞掘削・PMT量産。
 - ✓エレクトロニクスも要求性能を満たす設計が完成し、量産へ。
- スーパーカミオカンデの観測を継続。
 - ✓ニュートリノ振動解析の高精度化や超新星爆発の観測など様々な領域で進展。