

IceCube-Gen2 計画 ニュートリノ天文学・物理学の フロンティア

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター
ICEHAP – International Center for Hadron Astrophysics
吉田滋

[IceCube-Gen2 White Paper - J.Phys.G, 48 06051 \(2021\)](#)

IceCube-Gen2 宇宙ニュートリノ観測所



IceCube 実験

TeV から PeV エネルギー域で宇宙ニュートリノ放射発見

IceCube-Gen2 実験

信号発見の段階から、新天体発見、放射機構・起源の物理、素粒子物理へ

ニュートリノ検出検出容積の大規模化がすべてのカギ

宇宙ニュートリノはレア

現状年間 全天から~30事象程度の宇宙ニュートリノ数を~**10倍**へ

角度分解能改善

容積が大きくなれば、信号の質が上がりほぼ自動的に角度分解能は上がる

観測エネルギー帯域の拡大

PeV以上のエネルギーをもつニュートリノ頻度はさらに下がるため
検出容量を上げなければ検出できない

IceCube-Gen2プロジェクトの概要



IceCube に比して7倍の容量を10,000台の検出器埋設で作り上げる

学術的意義

高エネルギーニュートリノ観測により
ニュートリノ天文学
宇宙線物理学
素粒子物理学
の**未開のフロンティア**を開拓

IceCube-Gen2 深氷河アレイ

IceCube 実験に比して

ニュートリノ天体検出感度 **7倍**
バースト天体検出数 100TeVで **9倍**
1PeVで **13倍**
角度分解能 **4倍(0.8→0.2度)**

現在稼働中のIceCube (Gen1)

634m

2023年建設予定のIceCubeアップグレード
(IceCube-Gen2 Phase 1)
検出器製作中

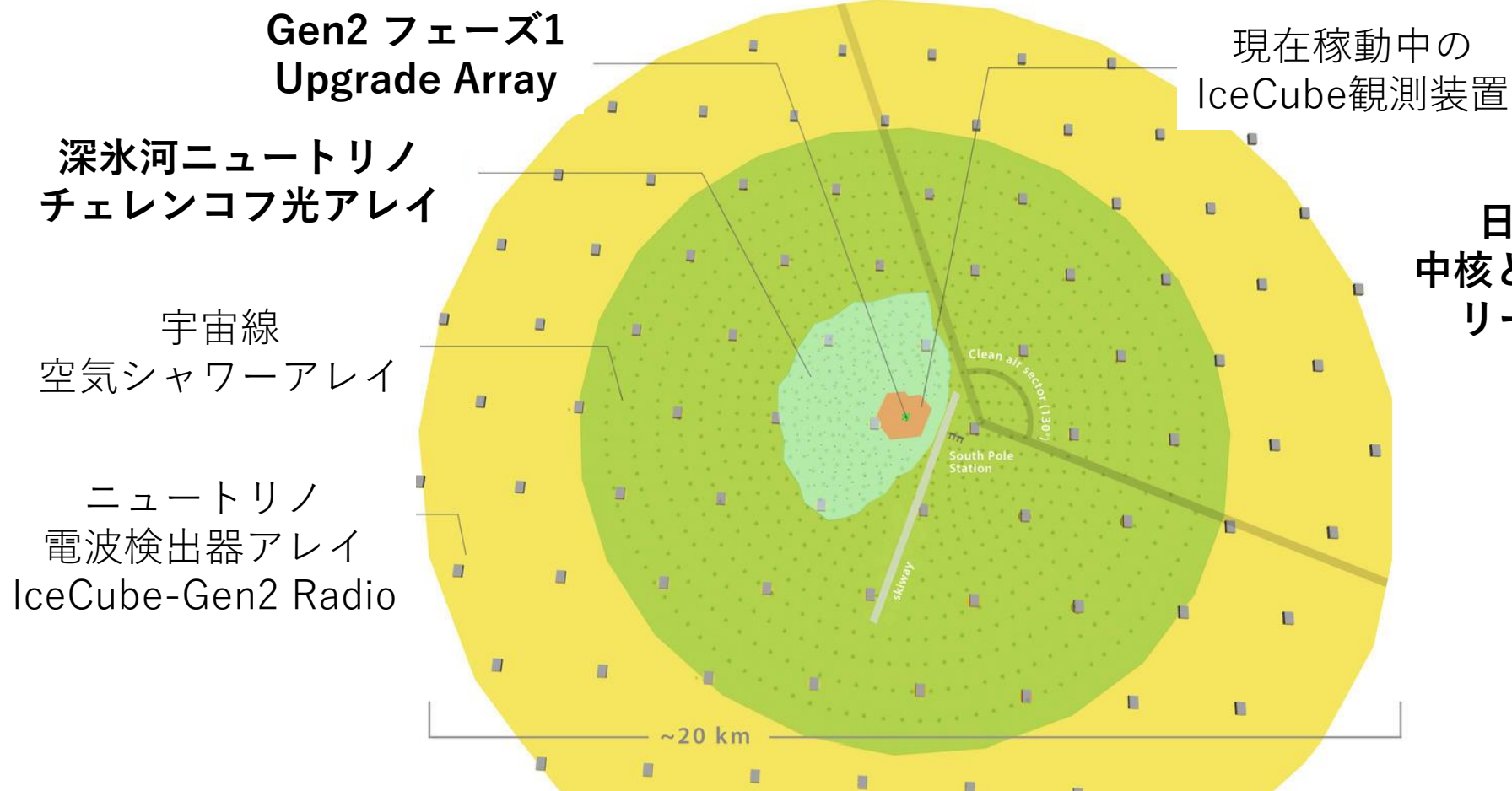
プロジェクトの概要

上から見た観測装置の構成

深氷河埋設光検出器を中核とした複合アレイ



IceCube-Gen2 Facility



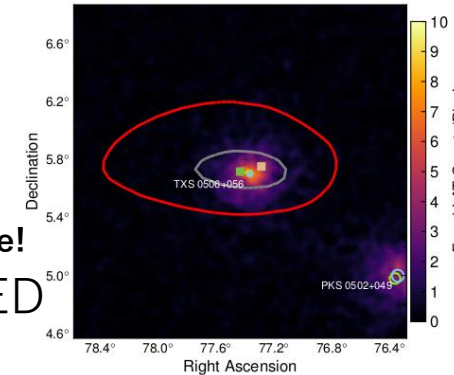
日本グループは
中核となる光検出器で
リーダーグループ
(後述のスライド)

IceCube-Gen2 が実現する科学

テーマ1. ニュートリノ天文学

TeV – PeV 宇宙をニュートリノで探査する

- 光では観測できない高密度・高放射環境における物理現象
ブレーザー、AGN コロナ、出来損ないバースト天体、TDE、SBG, and more!
- マルチメッセンジャー観測による天体同定、多波長+ ν +GW SED

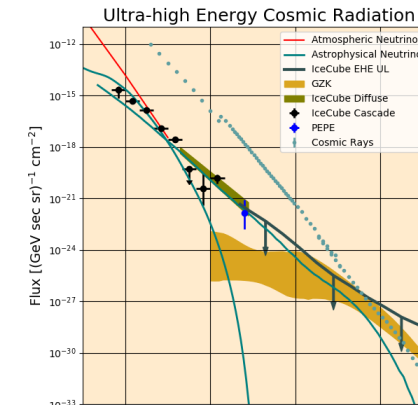


ブレーザー-TXS0506+0056
の300TeV ν + γ 線同時観測

テーマ2. 宇宙線の起源

ニュートリノは宇宙線放射に必ず付随するプローブ

- 磁場・EBLに妨げられない高透過メッセンジャー
- 宇宙線起源天体を明快に同定
- 最高エネルギー宇宙線放射機構

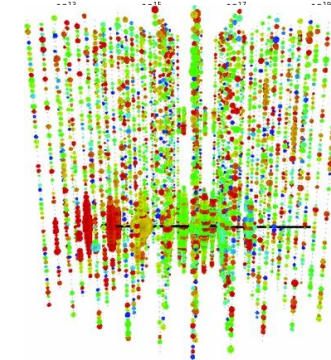


TeV-EeV帯の
宇宙背景放射スペクトル
(宇宙線・ニュートリノ)
と理論予想曲線

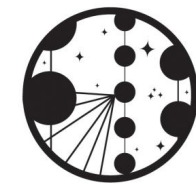
テーマ3. 素粒子物理学

加速器で実現できない超高エネルギー領域の実験場

- ニュートリノフレーバーを介した物理探索
- モノポール・Q-ball など標準模型を超える物理現象の探索
- ニュートリノ・核子相互作用を介した新物理探索



非相対論的モノポール信号の
シミュレーション

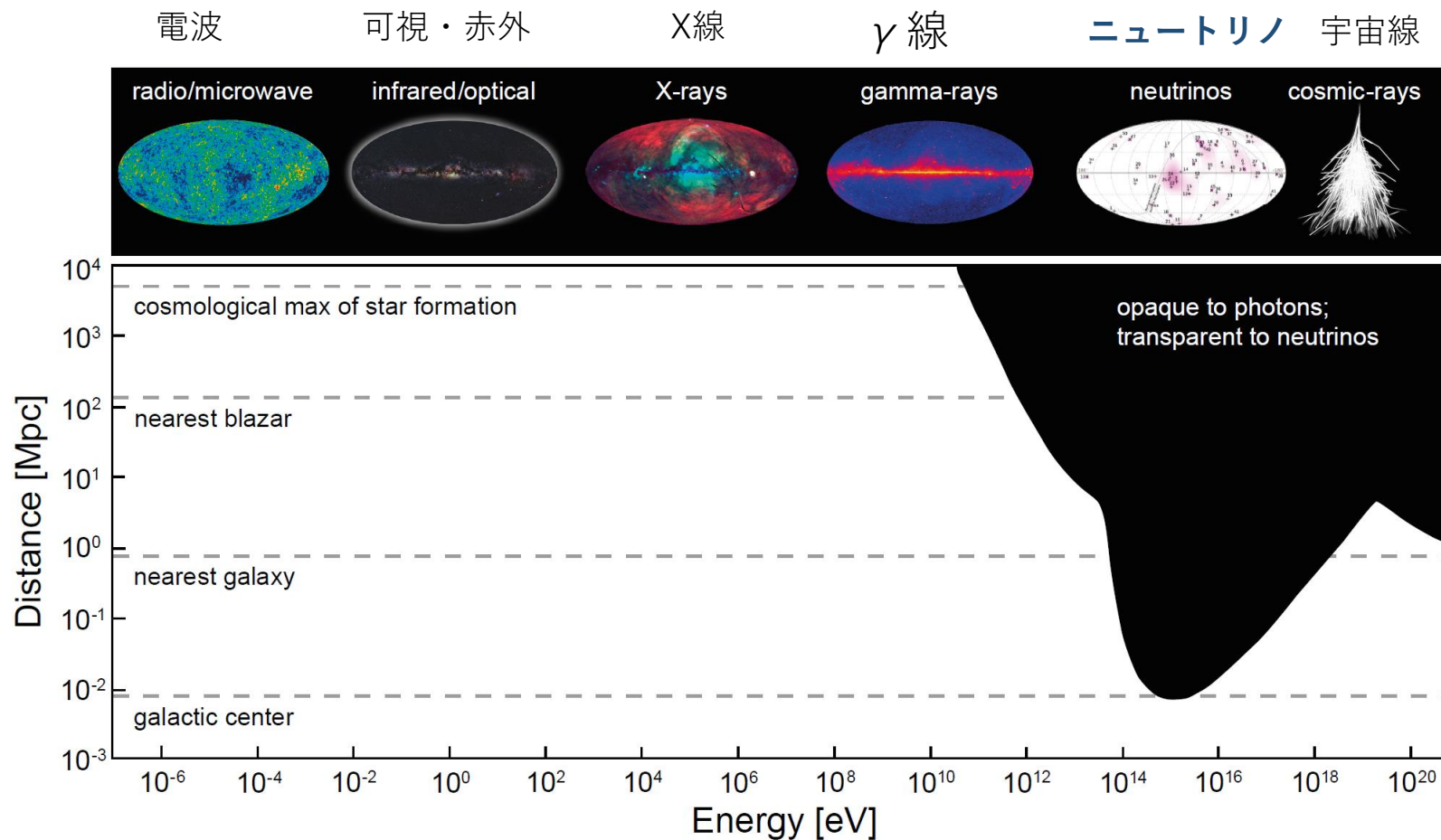


ニュートリノはなぜ最重要なのか？

TeV (10^{12} 電子ボルト)以上のエネルギー帯域で宇宙全体を探查できる唯一のメッセンジャー

ICECUBE GEN2

光子・宇宙線ハドロンは、CMB、EBL(宇宙背景光-- 可視・赤外)と衝突するため届かない



マルチメッセンジャー観測

ニュートリノをトリガーに使う



高エネルギーニュートリノ天体
初同定(Science 2018)を導いた
ストラテジー

ブラックホール起源の超高エネルギーニュートリノ

オリオン座 巨大ブラックホール

ジェット

エネルギーの高いニュートリノやガンマ線が発生している

ガンマ線

ニュートリノ

可視光 広島大学などの望遠鏡

ガンマ線 フェルミ宇宙望遠鏡

マジック望遠鏡

南極

アイスキューブ

地球

ニュートリノ由来の粒子の発光を検出

これまでニュートリノの放出が観測されている天体

超新星	太陽	地球
星の大爆発	核融合反応	放射性元素の崩壊

グラフィックス 内海 悠

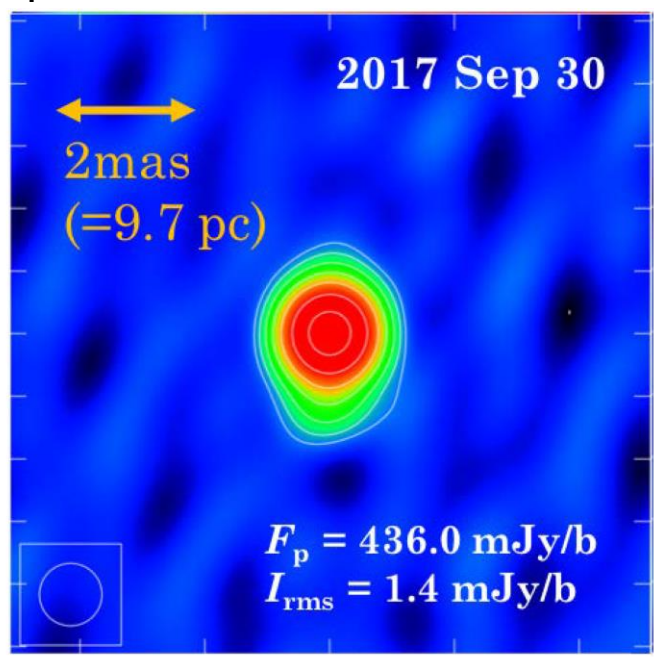
超高エネルギー宇宙放射の直接の産物であるニュートリノ

↓

角度分解能・精密観測に優れたγ線・可視光・電波で追尾観測

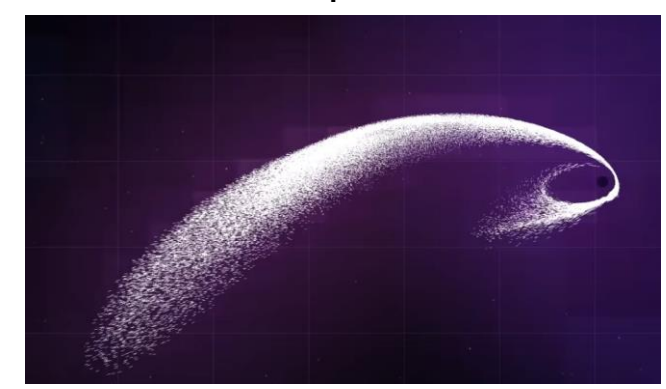
電波による morphology 研究も可能になる

VERA Japan による22GHz 帯観測 ニュートリノ検出の3日後



新たな天体现象の発見

Tidal Disruption Event (TDE)



TDEイメージ (courtesy NASA)




ZTF (Caltech)
IceCube-191001A
との関連を報告


マルチメッセンジャー観測網の構築



Fermi-LAT



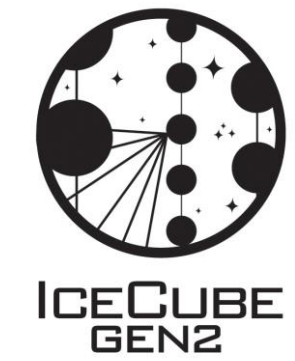
MAGIC



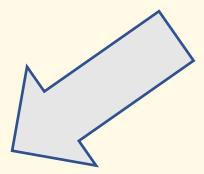
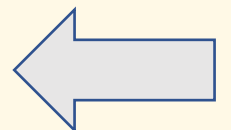
▼ 天体ブレーザー
TXS0506+056 同定
に貢献した観測施設



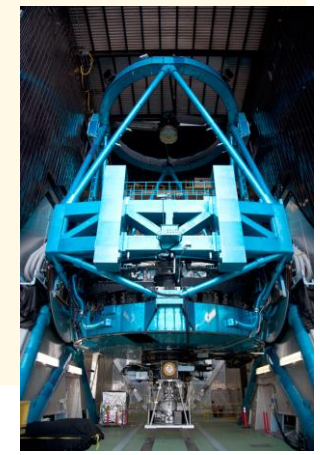
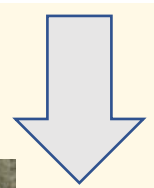
ICECUBE



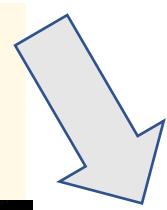
ICECUBE GEN2



かなた



すばる



LIGO

IceCube-Gen2時代の
ネットワーク発展



すばるPFS



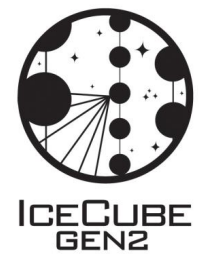
CTA



KAGRA



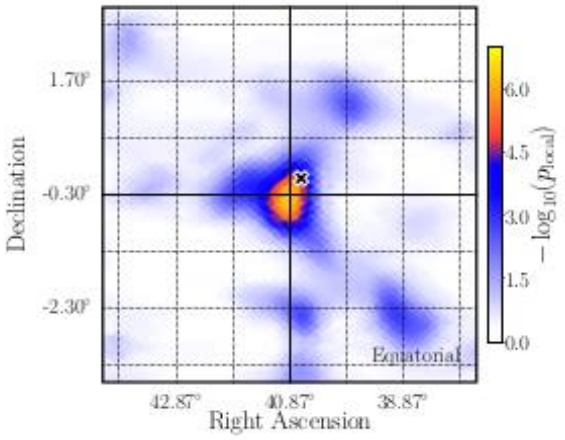
ニュートリノ放射天体 ニュートリノデータ単独で同定開始



セイファート銀河NGC1068

可視光

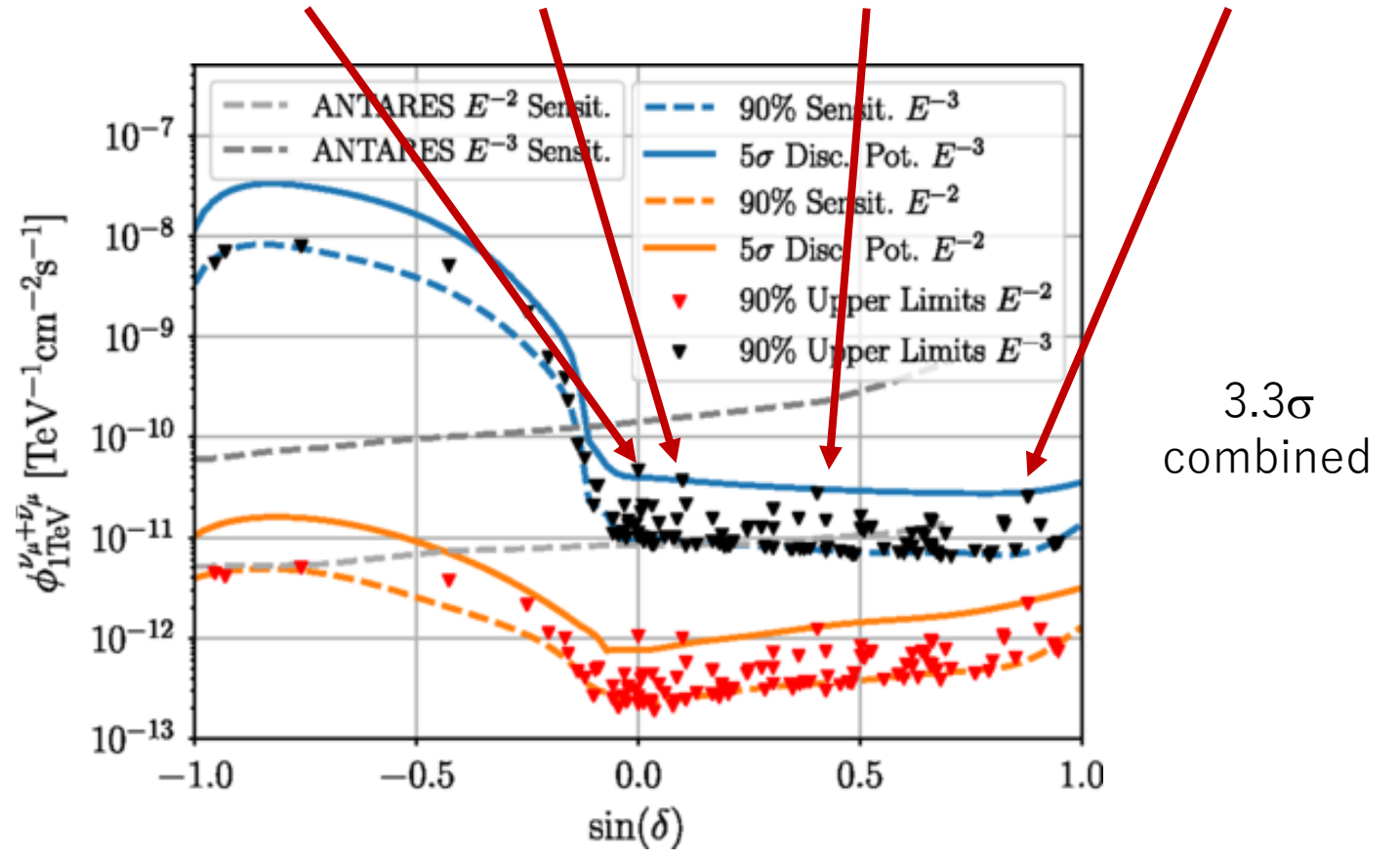
TeVエネルギーニュートリノ



3 σ (post-trial)

IceCube Collaboration
[PRL 124 051103 \(2020\)](#)

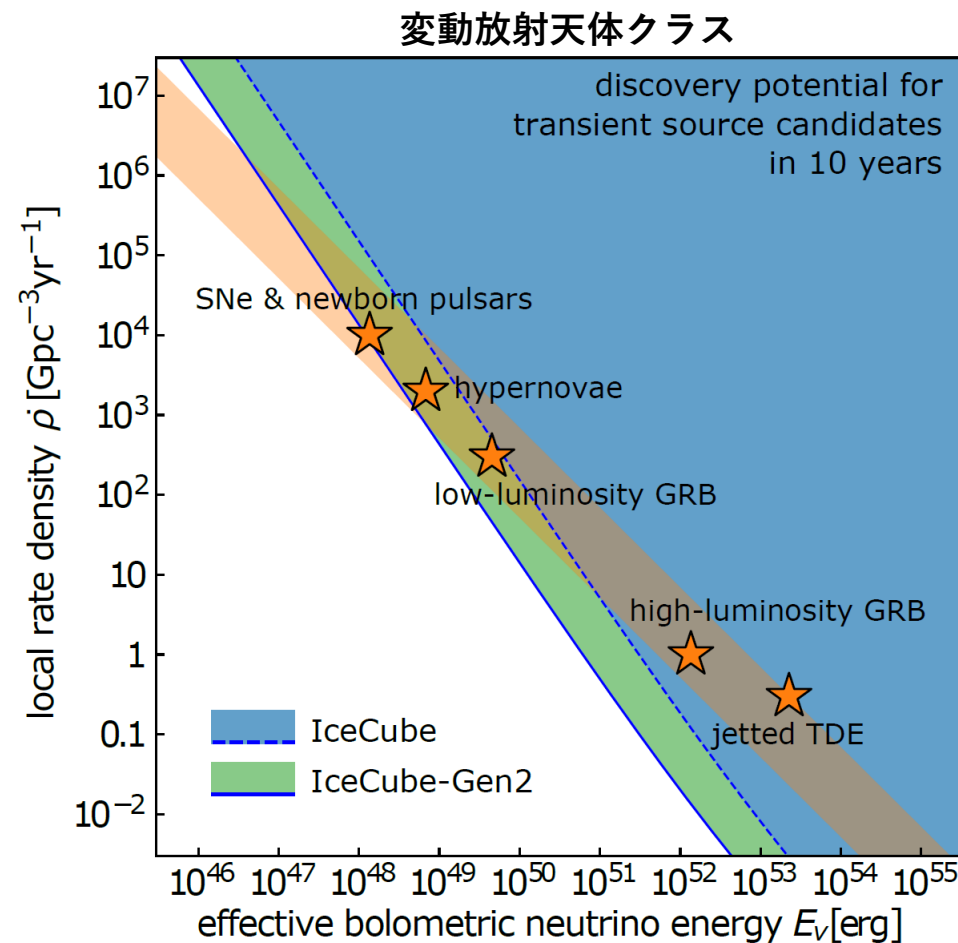
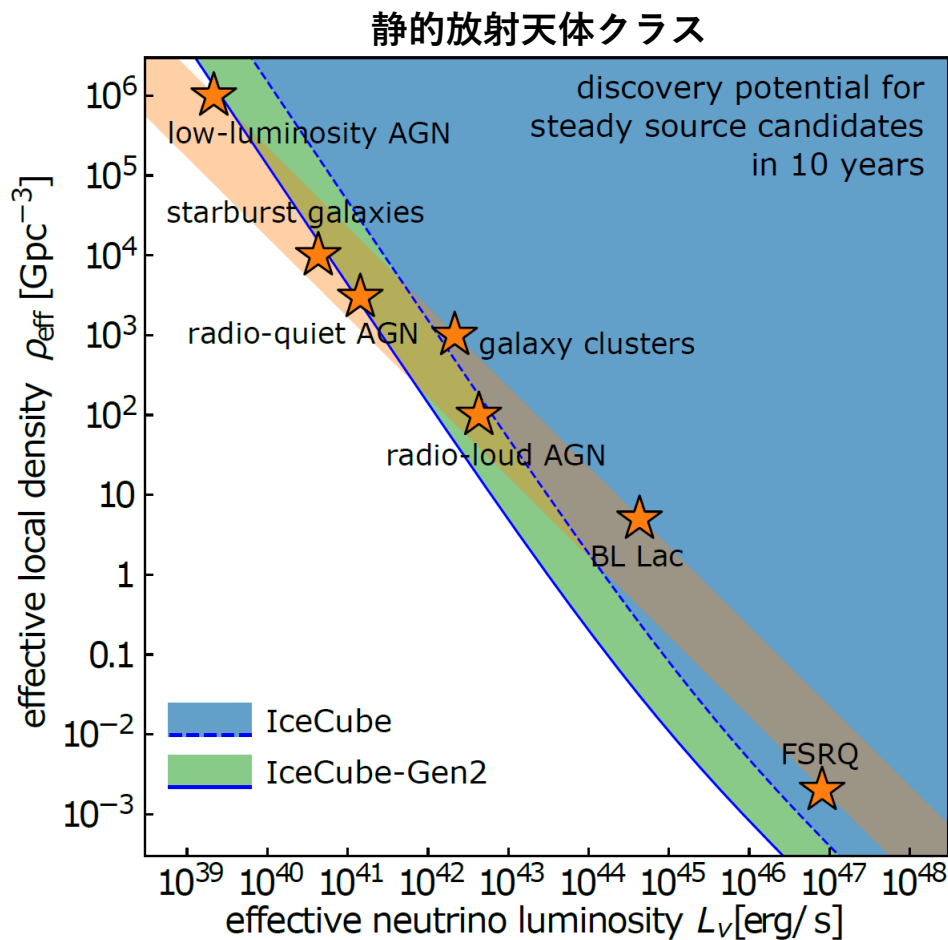
Star Burst AGN	Blazar AGN	BL Lac Blazar AGN	BL Lac Blazar AGN
NGC 1068	TXS 0506+056	PKS 1424+240	GB6 J1542+6129



IceCube 実験による観測データに基づく IceCube-Gen2 の感度

レーザー以外の新たな天体種の同定は確実

全く未知の天体検出も視野に

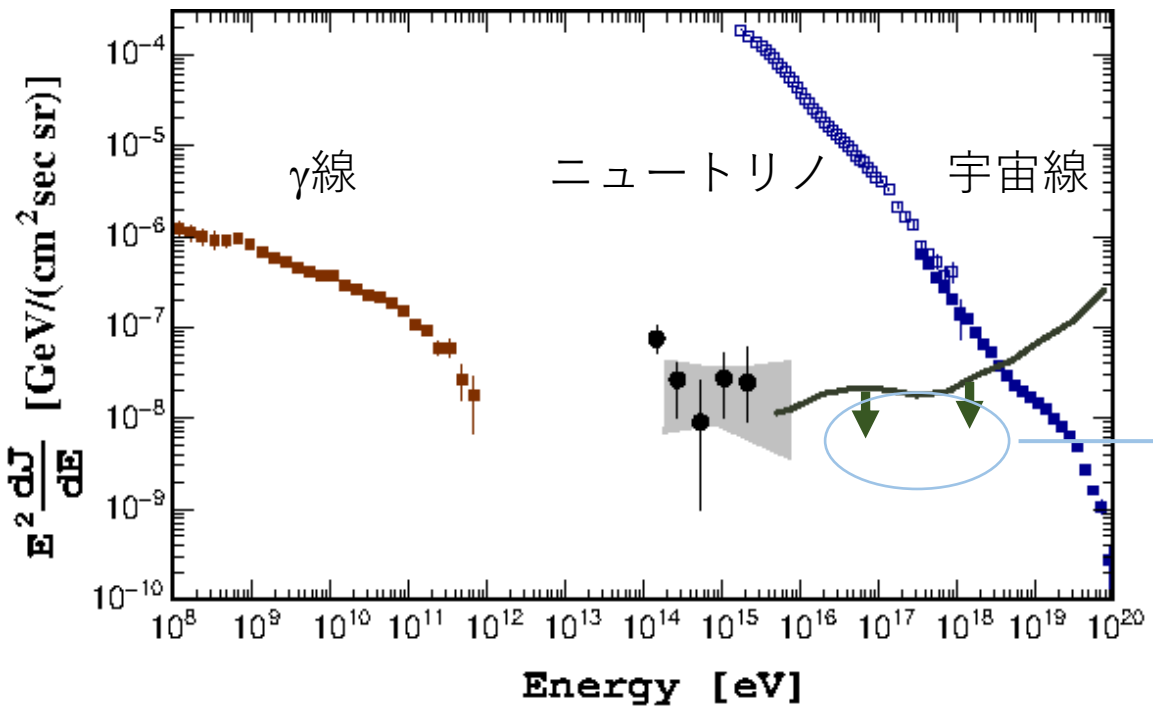


ニュートリノ背景放射流量の測定



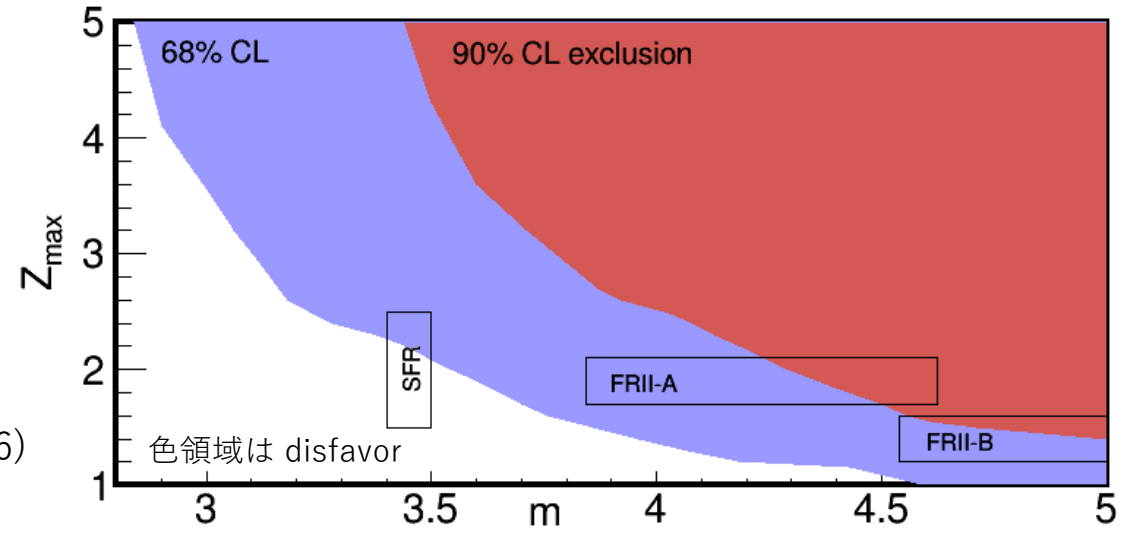
宇宙線天体同定(テーマ1) だけではない、ニュートリノがもたらす知見

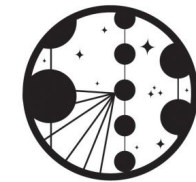
高エネルギー背景放射エネルギー流量



IceCube Collaboration
Phys.Rev.Lett.**117** 241101(2016)

- ニュートリノのエネルギー流量は超高エネルギー宇宙線と同程度である。
なぜ? 一つの可能性を示唆(次々スライド)
- 10PeV 以上のエネルギーをもつニュートリノは未検出
10PeV – EeV 領域のニュートリノ流量は超高エネルギー宇宙線 銀河系外 天体の energetics、化学組成の決め手
流量上限値だけですでに宇宙進化度の情報が得られている



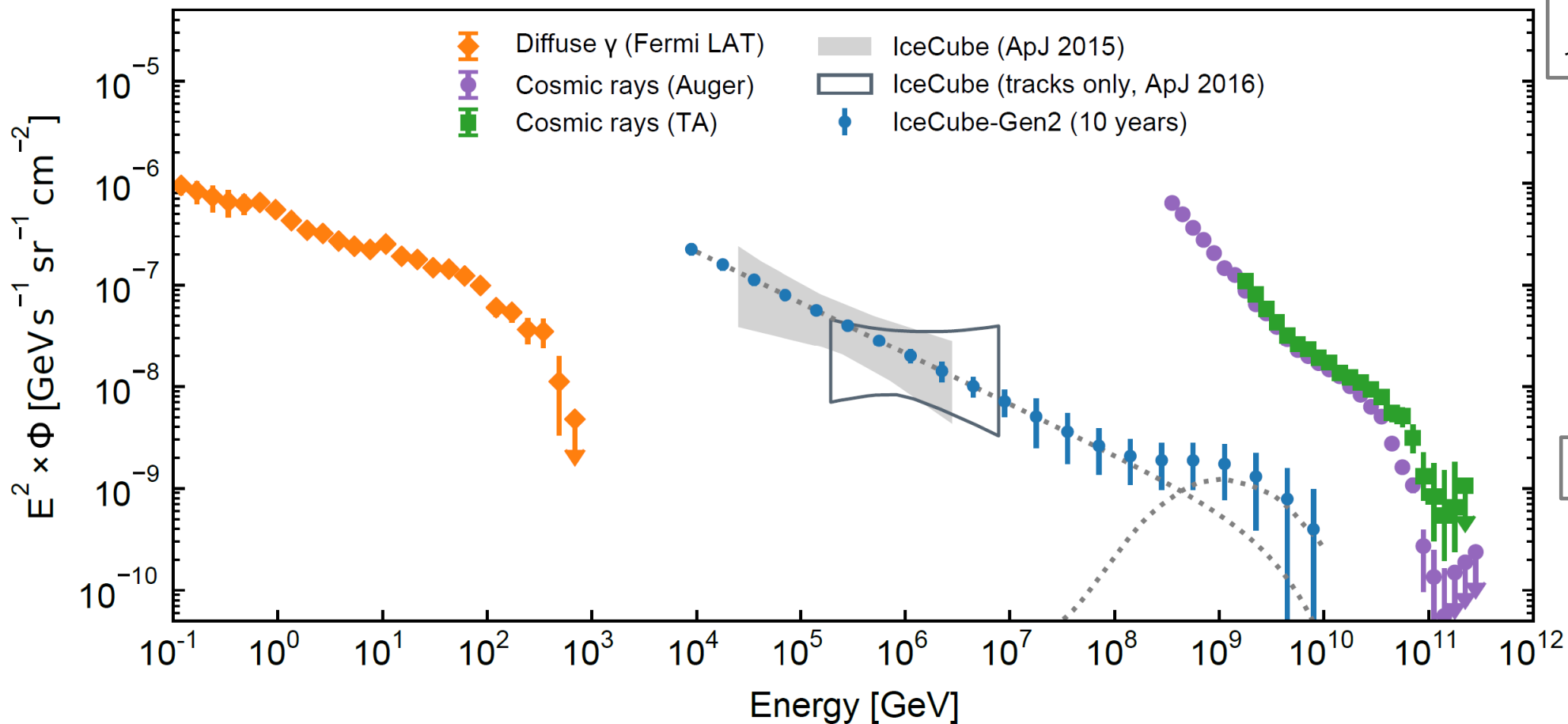


ニュートリノ背景放射流量

IceCube-Gen2 は 現在未検出の10PeV – EeV 領域のニュートリノ流量測定に十分な感度

ICECUBE GEN2

ひとつのシナリオ



背景放射ν流量は以下の物理量のプローブ

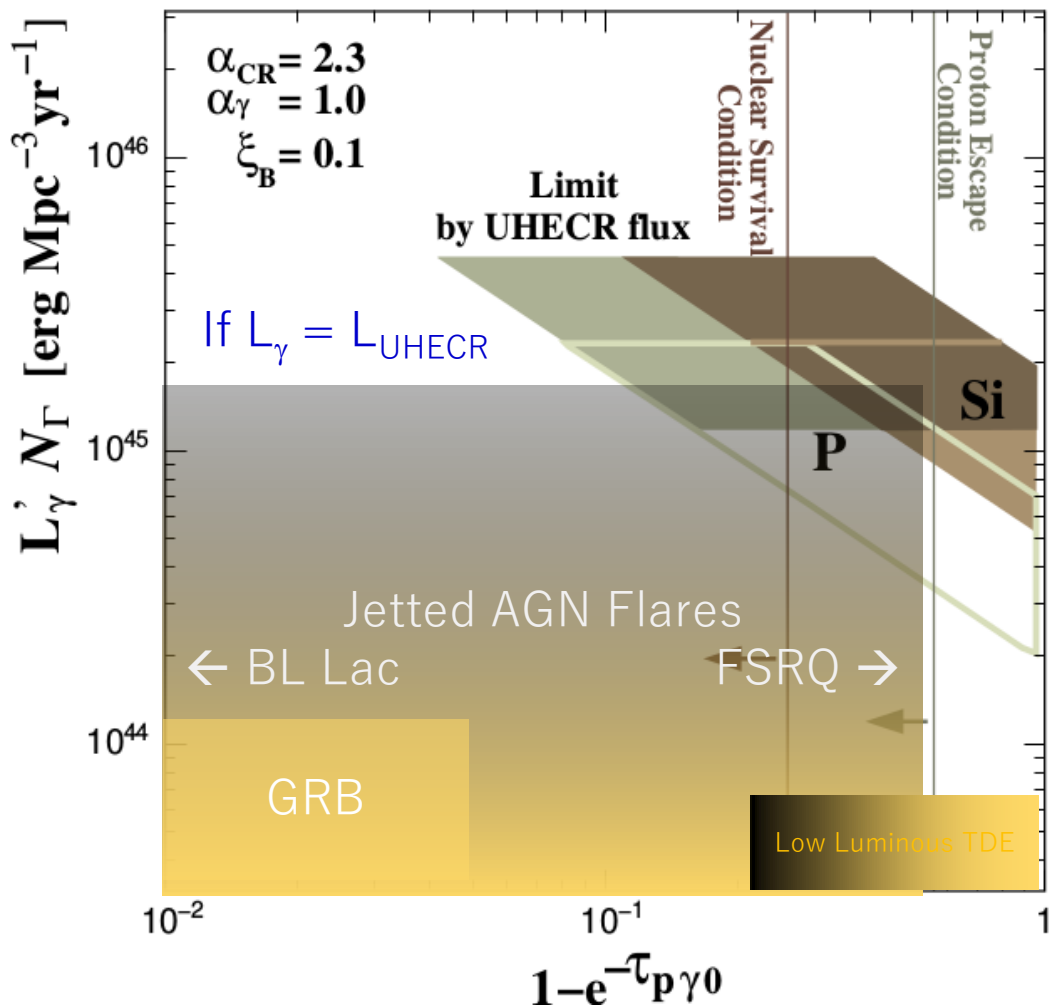
- 超高エネルギー宇宙線の luminosity
- 宇宙線天体の進化
- 宇宙線天体の光学的厚み
- 宇宙線化学組成

背景放射ν異方性は

- 大規模構造との相関
- 宇宙線天体数密度

超高エネルギー宇宙大統一

高エネルギーニュートリノ流量は超高エネルギー宇宙線と同程度だった
 両者は同じ由来なのでは? Waxman-Bahcall 限界の再訪



導かれる一般的な条件

- 陽子 + 光子衝突の光学的厚み $0.1 < \tau_{p\gamma} < 0.6$
- 起源天体の輝度 $\sim 10^{45} \text{ erg/Mpc}^3 \text{ yr}$
- $\xi_B \ll 1 \rightarrow$ 磁場は電磁放射に比して有意に弱い必要
 例えばFSRQは $\xi_B > 0.1 \rightarrow$ この条件と矛盾
- $L_\gamma < L_{\text{宇宙線}} \rightarrow$ 電磁波より宇宙線放射が優勢である必要
 許されるパラメータスペースは限定的

\rightarrow IceCube-Gen2 で必ずテストできる!

Yoshida & Murase
[PRD 102 083023 \(2020\)](#)

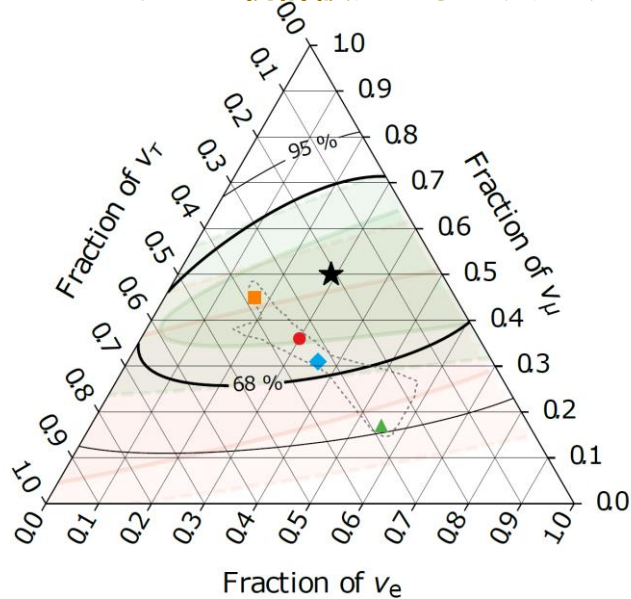
フレーバー比測定による新物理

TeV ニュートリノビーム窓によるBSM探索



現在

放射時のフレーバー比からニュートリノ振動を考慮した予想比(各色点)のほとんどが現在のデータのベストフィット内に入っている
フィットの統計誤差がまだ大きすぎる



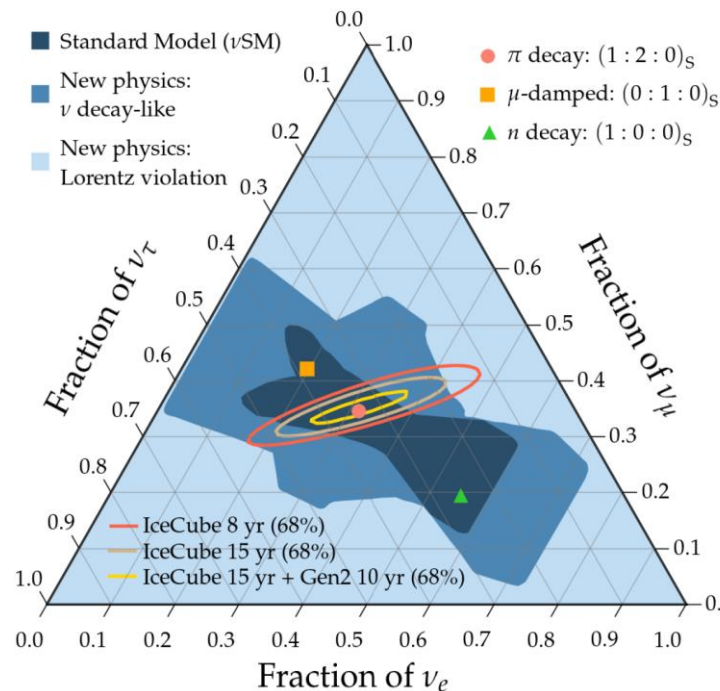
— High-energy starting tracks	$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$ at source \rightarrow on Earth:
★ Best-fit: 0.29 : 0.50 : 0.21	■ 0:1:0 \rightarrow 0.17 : 0.45 : 0.37
■ Global fit (IceCube, APJ 2015)	● 1:2:0 \rightarrow 0.30 : 0.36 : 0.34
■ Inelasticity (IceCube, PRD 2019)	▲ 1:0:0 \rightarrow 0.55 : 0.17 : 0.28
⋯⋯⋯ 3ν -mixing 3σ allowed region	◆ 1:1:0 \rightarrow 0.36 : 0.31 : 0.33

IceCube-Gen2

フレーバー比測定精度が大幅に改善することで

- 放射時のフレーバー比に制限 \rightarrow 天体物理学
- ニュートリノ振動標準理論の予測(濃い青)からのずれを測定

$\rightarrow \nu$ decay, ローレンツ不変の破れなどの新物理



濃い青の領域に入らなければ新物理の兆候

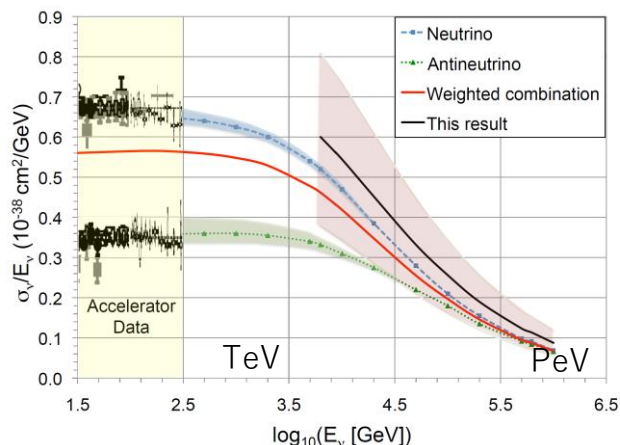


ニュートリノ相互作用測定

PeV-EeV領域における新物理の窓

PeV 領域

地球に対する透過力を使って衝突断面積を測定
IceCube Collaboration, Nature (2017)



IceCube

TeV 領域のデータから
高統計解析により断面積を測定

TeV では新物理の影響は限定的

IceCube-Gen2

PeV領域で同等の解析が可能

PeV では新物理プローブ能力は増大

グラシヨウ共鳴検出(6PeV) → 反電子ニュートリノ同定

IceCube Collaboration, Nature (2021)

Article

Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03256-1>

Received: 28 July 2020

Accepted: 18 January 2021

Published online: 10 March 2021

Check for updates

The IceCube Collaboration*

The Glashow resonance describes the resonant formation of a W^- boson during the interaction of a high-energy electron antineutrino with an electron¹, peaking at an antineutrino energy of 6.3 petaelectronvolts (PeV) in the rest frame of the electron. Whereas this energy scale is out of reach for currently operating and future planned particle accelerators, natural astrophysical phenomena are expected to produce

IceCube

素粒子標準模型が予言する
相互作用で未検出だったもの
の最後のピースに王手

IceCube-Gen2

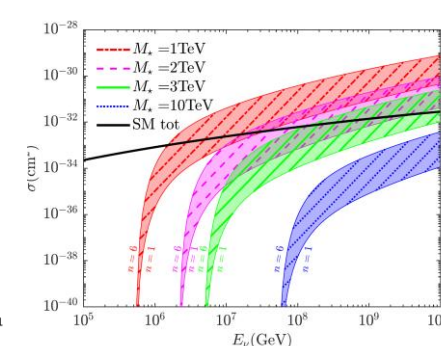
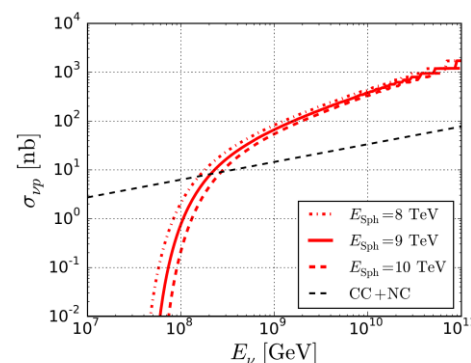
Glashow共鳴 由来信号を O(10)事象検出

PeV反電子ニュートリノの量を測定

ニュートリノ物理と天文学の両方に新しい測定軸

100 PeV 領域

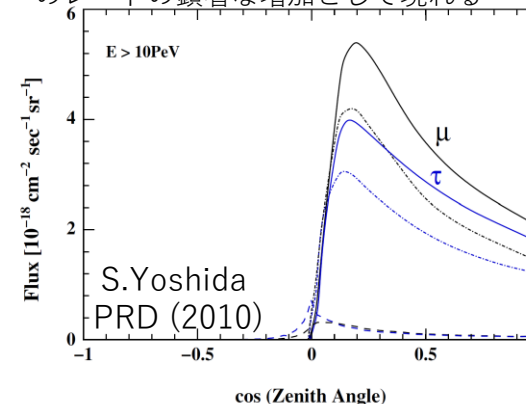
ニュートリノ -- 核子衝突断面積を
オーダーで変える新物理が目白押し



“Sphalerons” J.Ellis+1603.06573

“microscopic black hole”
K.J.Mack+ JHEP (2020)

この効果は超高エネルギー μ と τ 粒子
のレートの顕著な増加として現れる



IceCube

検出容量が小さすぎ、
 ν fluxを仮定が必要
前提条件付きの間接測定

IceCube-Gen2

100 PeV ν が検出できる

→直接測定!

深氷河埋設チェレンコフ光アレイ概観

7ストリング密埋設
氷河中の光散乱を高精度測定
系統誤差削減
角度分解能向上

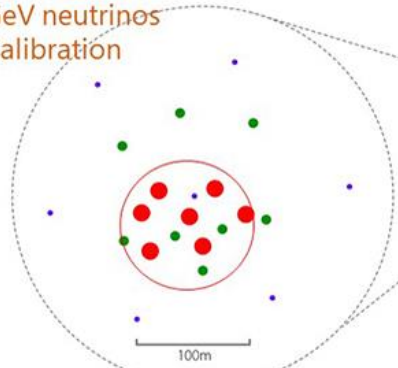
技術・経験の蓄積

大規模化
検出器間隔拡大に対応した
検出器の高度化

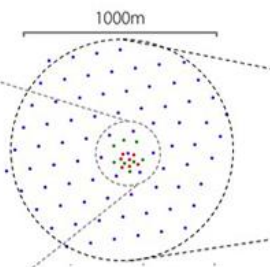
IceCube-Gen2 (planned 2026-)
Optimized for
• Cosmic neutrino point sources

現在運営中
IceCube (2005-)
Optimized for
• Diffuse high energy cosmic neutrinos

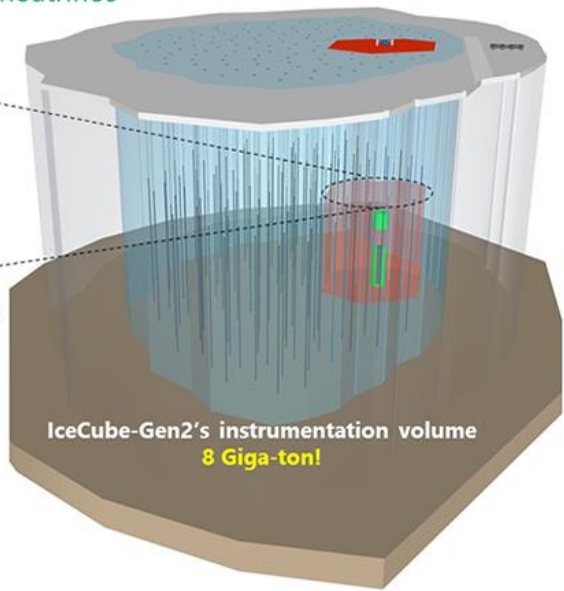
IceCube Upgrade
(planned 2023-)
Optimized for
• GeV neutrinos
• Calibration



inner fiducial volume 2.2Mega-ton
IceCube DeepCore Upgrade



IceCube's instrumentation volume 1 Giga-ton
Instrumented Depth
1450m 2100m 2150m
2450m 2450m 2425m



IceCube-Gen2's instrumentation volume 8 Giga-ton!

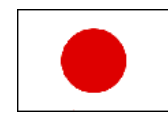
2018年 IceCube アップグレード

IceCube-Gen2 のフェーズ1として予算承認

- 切削ドリル装置の再組立・強化
- Gen2 を見据えた新型光検出器モジュールの開発

Gen1 では
切削費用が
全予算の4割
縦穴間隔が
120m → 240 m

40cm 口径の穴に入り
かつ
光子検出面積3倍以上



D-Egg
卵型採用で小型化 UV透過ガラス
8" PMT 2 台格納で検出面積稼ぐ

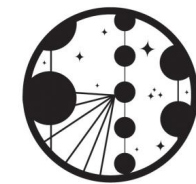


mDOM
小型化には目を瞑り
3" PMTを多数格納

2022年 IceCube-Gen2 本体計画 NSF に PDR 提出

D-Egg をベースに、より改善を施した
検出器モジュール1種を埋設

深氷河埋設光検出器モジュール D-Egg



ICECUBE
GEN2



- 現在製作3年目
- 320台製作予定
- 205台製作済み
- 較正測定進行中



専用クリーンルームで組立に勤む石原さん



大型冷凍庫内氷点下40度で試験中のD-Egg

現行IceCube検出器モジュールに比して

- 断面積 70%に**小型化**
- 光子検出面積 **3倍**
- 波長330nm以下での検出効率**4倍**

すでにIceCube-gen2 の仕様を満たしている
確実に動作する検出器



Gen2用深氷河埋設光検出器モジュール

卵型の耐圧モジュール **LOM**

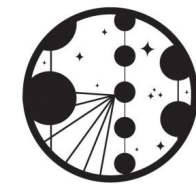
必要条件

- 40 cm口径の切削縦穴に収納
これ以下の小さな穴は再凍結時間が短く深さ~3km も切削できない
- 現行モジュールに比して少なくとも3倍以上の検出面積
threshold energy を10 TeV 以下に下げたいか否かに依存。
コストとサイエンスのバランス 詳細なシミュレーション研究継続中



4' PMT を 18台内部に格納

D-Egg と同程度の断面積サイズで、
現行IceCube比4倍の検出面積を稼げるデザイン



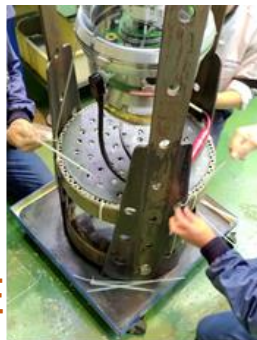
ICECUBE
GEN2

深氷河埋設光検出器モジュール

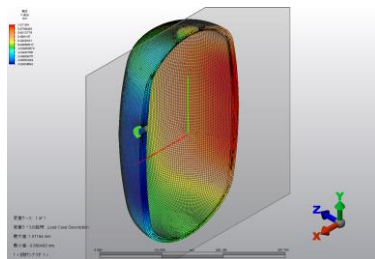
Gen2 用新型検出器 LOM 日本主導の開発

D-Egg で培った
豊富な経験

卵型検出器デザインの
開発と製作
小型化への現実解
日本のアイデアと実証

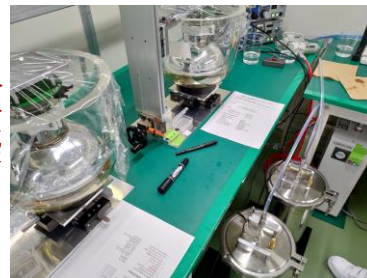


耐水圧試験



座屈変形シミュレーション

製作・試験
ライン構築



クリーンルーム内
製作ライン



加重試験



低温環境化動作試験

ガラスメーカー、化学メーカーなど日本企業との協力体制は盤石

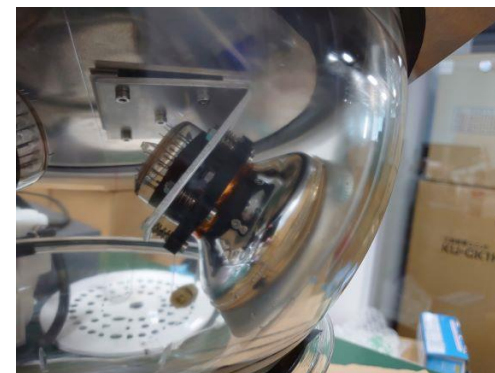
+

4' PMT を多数
収納する手法開発

R&D急ピッチで
進行中



光学ゲルで作られた
パッドの試験製作



PMTーガラス面を
光学パッドで接着
(集光機能も兼ねる)

深氷河埋設光検出器モジュール

卵型の耐圧モジュール

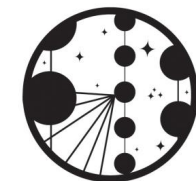


- 40 cm口径の切削縦穴に収納
これ以下の小さな穴は再凍結時間が短く深さ~3km も切削できない
- 現行モジュールに比して少なくとも3倍以上の検出面積
threshold energy を10 TeV 以下に下げたいか否かに依存。
コストとサイエンスのバランス 詳細なシミュレーション研究継続中

LOM	4インチのPMTを16もしくは18本 卵型容器内に詰め込む
Pros	光子検出面積を3.5~4倍にできる
Cons	組立工程複雑化→コスト低減・大量生産化への壁 電力消費量増大 (5ワット以下程度に抑えたい)
D-Egg 2.0	高電圧電源モジュールとデジタイザー部を変更 → 低コスト化とダイナミックレンジ改善
Pros	確実に実現できる。短期間で製作ライン構築可能
Cons	現行比3.5倍以上の光子検出面積は稼げない

両者の可能性を残しながら2年以内に結論

12か国国際共同プロジェクトでの日本の寄与

ICECUBE
GEN2

IceCube実験での実績十分

IceCube-Gen2 では中心プレーヤーに

日本グループのマイルストーン

- 2005 IceCube の建設が始まり、1月には検出器DOMが60個埋設されIceCubeの部分稼働が始まる。
日本はPMT と超高エネルギー解析(EHE 解析)で責任
- 2010 IceCube による超高エネルギー宇宙ニュートリノ観測結果を初めて論文として公表。
千葉大学チームによる科学成果の出発点。
- 2012 2012年5月に史上初の宇宙ニュートリノ2事象「アニー」と「パート」の同定に千葉大学チームが成功。
翌月京都で開催された学会「ニュートリノ2012」にてその成果を発表した。
- 2016 2016年4月ニュートリノ事象候補を即時解析し世界の天文観測施設にアラートを送信する
システムの運用が開始。7月31日に初のEHE イベントアラートが発信。
- 2018 IC170922A ニュートリノ事象により強い γ (ガンマ)線とニュートリノを放射している
プレーヤー天体の同定に史上初めて成功。その成果をサイエンス誌にて2つ論文により発表。
- 2019 2019年6月にIceCube アップグレード計画が発表され、千葉大学が開発したD-Egg 検出器が採用される。
日米欧3極の中で最初にNSFから正式承認された
- 2020 6PeVニュートリノ信号がグラシヨウ共鳴由来であることを示す
6PeV 信号自体も日本グループの解析で2017年に同定

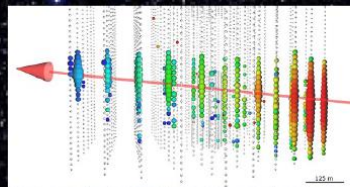
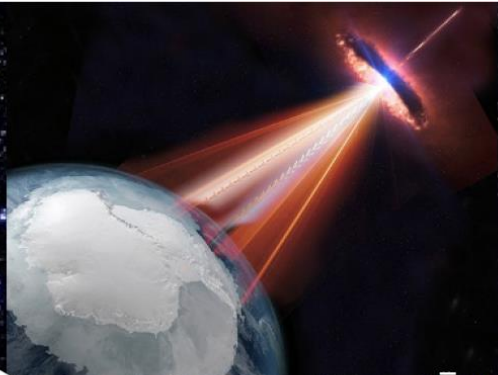
関連する日本がleading した論文

PMT 技術論文 [NIM \(2010\)](#)最初のEHE解析 [PRD \(2010\)](#)IceCube EeV領域で
他実験を凌駕する上限値 [PRD \(2011\)](#)PeVニュートリノ発見論文 [PRL \(2013\)](#)
詳細報告 [PRD \(2013\)](#) ν アラート技術論文 [APP \(2016\)](#)EeV ν 上限値更新
とUHECR 起源への示唆 [PRL \(2016\)](#)IC170922Aによる
 ν 天体同定 [Science \(2018\)](#)EHE ν 上限値
と6PeV ν 検出 [PRD \(2018\)](#)グラシヨウ共鳴による
反電子ニュートリノ同定 [Nature \(2021\)](#)

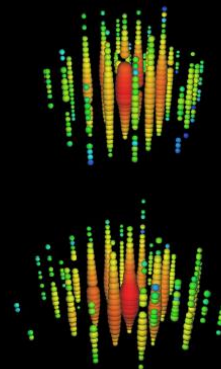
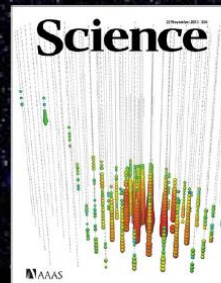
日本の先導性

2023

千葉大学グループが開発・製造した新型光検出器D-Eggは2023に予定されているIceCubeアップグレード建設に採用され、300個が氷河に埋設される。



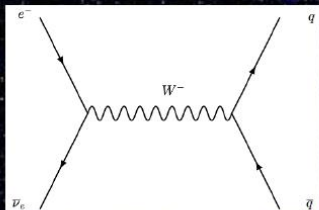
ニュートリノ放射源天体が、IceCubeが検出したニュートリノ事象IC170922Aの情報を元に初特定される。この成果はサイエンス誌の10大成果の1つに選ばれた。



南極点にそびえたつIceCube観測施設ICL。氷河の下の検出器からデータを収集する。

2021

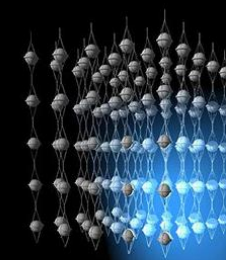
検出した宇宙ニュートリノ「Hydrangea」により1960年に予測された素粒子の標準理論「Glashow共鳴」の実証に初めて成功した。



2017



超高エネルギー宇宙ニュートリノ2事象の観測に史上初成功。



2013

世界最大ニュートリノ観測施設IceCube完成。氷河に埋設された5160個の検出器による観測が開始される。



IceCube完成後10年の日本グループの歩み

2011

12か国国際共同プロジェクトでの日本の寄与

IceCube実験での実績十分

IceCube-Gen2 では中心プレーヤーに



IceCube-Gen2 組織図

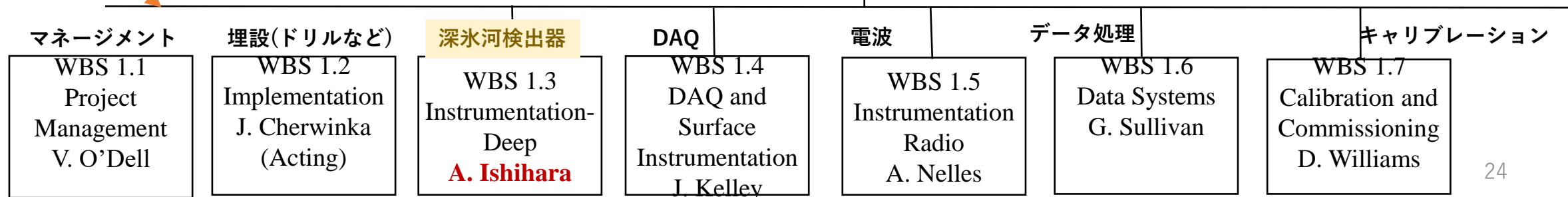
プロジェクト全体を管理する
プロジェクトオフィスの下に
各領域がWBSとして
定義され、責任者が任命された

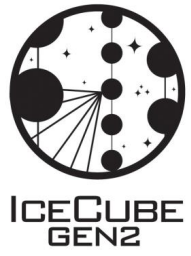
NSF とのインターフェース

IceCube Gen2 Phase 2 Project office

Principal Investigator: A. Karle
Project Director: V. O'Dell
Project Scientist: M. Ackerman
Technical Coordinator: M. DuVernois
Project Engineer: J. Cherwinka
Project Controls and Finance: C. Vakhnina
Safety, QA/QC: M. Zernick
Logistics and Production: TBD

WBS L2





IceCube-Gen2 組織

深氷河検出器領域は中核中の中核

望遠鏡でいえば主焦点カメラ + 主鏡に相当

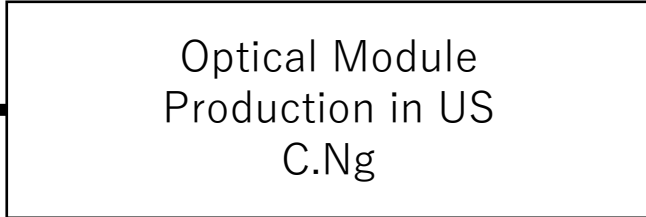
WBS L2
(統括)



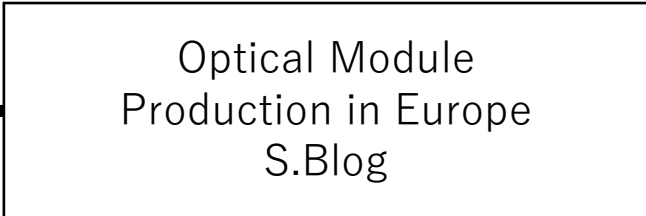
WBS L3
(現場責任者)



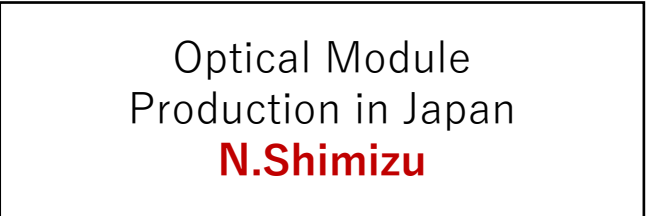
光検出器モジュール
エンジニアリング



光検出器モジュール
米国での製造

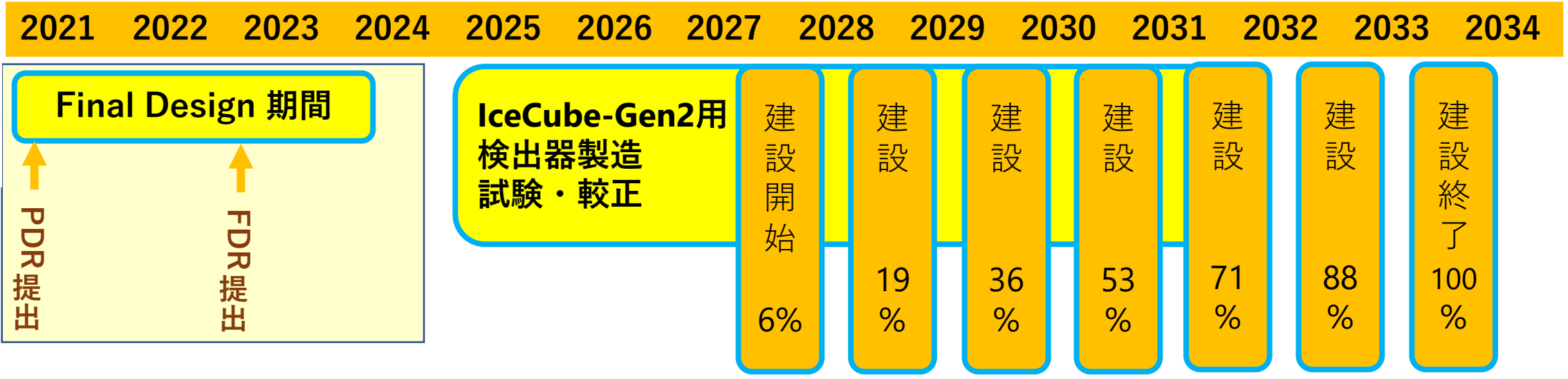


光検出器モジュール
ヨーロッパでの製造

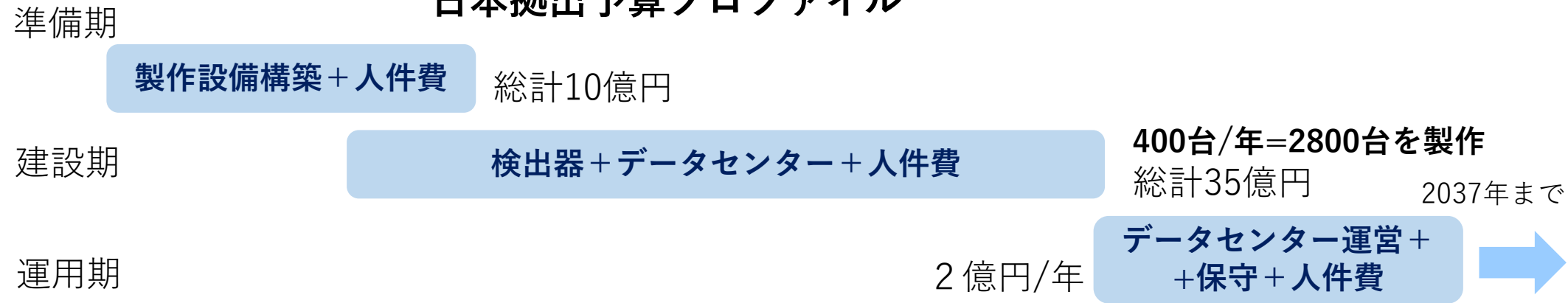


光検出器モジュール
日本での製造

年次計画と予算計画



日本拠出予算プロフィール



ハドロン宇宙国際研究センター (IceHap)



千葉大学の全学研究センターとして発展的改組 IceCube-Gen2 の推進中核機関として責任

新型検出器開発ラボ



既存の設備でほぼカバー

検出器大規模試験設備

既存のものは15台収納

概算要求により増強

大型超低温冷凍庫内で
~50台を同時に試験

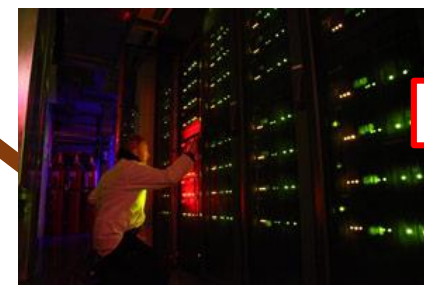


シミュレーション計算装置

既存CPU 196 コア
GPU 24コア

概算要求により増強

増大するデータ量
に対処



検出器組立設備(クリーンルーム)

現在横浜に専用拠点
~4台/日の生産

概算要求により増強

学内など
数か所

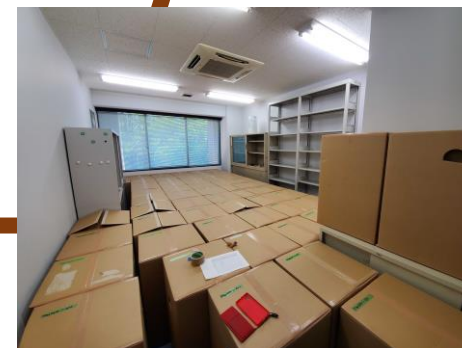


出荷前の検出器貯蔵スペース

南極出荷前に数百台の検出器を安全に保管する必要

学内措置

輸送・輸出計画・管理



ハドロン宇宙国際研究センター (IceHap)



マルチメッセンジャー観測共同利用研究を促進し、日本のコミュニティへのサービスをミッション

追尾観測を行う共同研究者へのデータ情報提供

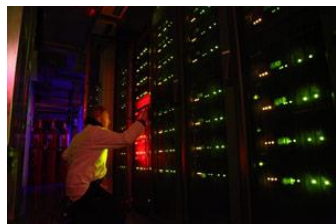
IceCube 南極ニュートリノ天文台



IceCube ラボ@南極点

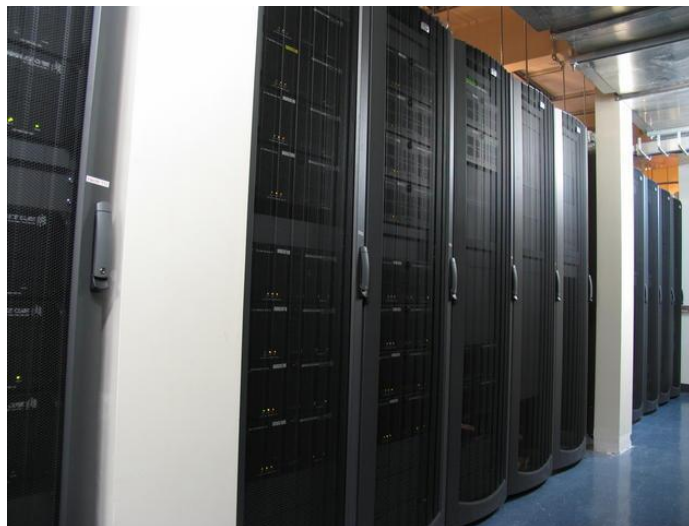


アメリカWIPAC
データセンター



高速データ転送
(SINET6 ハブ)

データ・計算サーバー

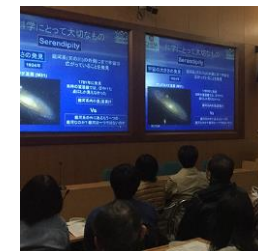


観測データアラート用
速報解析

コンサルティング



観測データを解析する共同研究者への
チュートリアル・データ提供



観測データフィルタリング

データはコミュニティに公開

観測データ公開のための
タスク

計算機システムメンテナンス

大規模シミュレーションデータ生成

観測データ解析

チュートリアル作成・アップデート



IceCube-Gen2



多様な研究分野と連携

- ν
- ・ 超高エネルギー宇宙を直接探査できる唯一のプロープ
 - ・ 物理の統一的描像に本質的役割をもつ素粒子

ニュートリノは分野間の壁も貫通します

電波天文学 可視・近赤外天文学 X線・ γ 線天文学 重力波天文学 宇宙線物理学 素粒子物理学
ハドロン宇宙国際研究センターは連携のハブとして機能させます

国際協力

日本・アメリカ・ヨーロッパ間のイコールパートナーシップ 開かれた運営

- ・ 機会均等な環境を常に目指す
- ・ 若手の優遇
- ・ 多様性に敬意
- ・ 新規参加者へのサポート

日本の役割

最重要デバイスである深氷河埋設チェレンコフ光検出器領域で**司令塔・調整機能**を担う

2800台(プロジェクト全体では10,000台)の国内製作を担当

10PeV以上の超高エネルギー帯のシミュレーション研究も進行中

日本のコミュニティからの新規参加の余地は大きい

日本グループは広く敬意をもたれているので、すぐに重要な仕事ができます

- ・ すでに足場があるチェレンコフ光検出器開発・製作に参画してもよし
- ・ 電波検出器、地表空気シャワーアレイで新たな地歩を築いてもよし
- ・ 私のところは予算も人もいないんです→ データ収集系の開発やシミュレーションなどのソフトウェア開発需要も目白押し