







IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台

吉田 滋千葉大理ハドロン宇宙国際研究センター

学術的意義



Bedrock



ニュートリノ天文学は花開いた





背景放射ニュートリノから言えること

例えば…

Murase & Waxman PRD (2016)

IceCube Collaboration PRL (2016)



The PeV Neutrino Universe







The highest energy deposit to date an upward-going track Deposited energies 2.6±0.3 PeV Median neutrino energy 8.7 PeV Observed number of photoelectrons 130,000pe

6.0±0.3 PeV cascade events Well compatible with Glashow resonance! Systematic studies ongoing



IceCube-170922A event

- 2017/9/22 20:54:30.43 UTC \bullet
- 5th and the most cosmic neutrino signal like EHE alert •
- automated alert was distributed to observers just 43 seconds later •

Science Fermi Telescope FGST

Science 361, eaat1378 (2018)





IceCube-170922A による天体同定









$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$ disappearance probes oscillation parameters

Phys. Rev. Lett. 120, 071801 (2018)







Neutrino Energy [GeV]

u_{μ} disappearance probes high energy (TeV scale) neutrino cross-section

Nature **551** 596 (2017)



11



IceCube-Gen2 全体の概観



IceCube-Gen2 の構成







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。2021/22年埋設



日本は3列分を担当 (科研費で推進中)

17m

Phase 1

DeepCore

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)

Phase 1 (IceCube upgrade) で何を目指すか マルチメッセンジャー観測として機能する宇宙ニュートリノの事象数を<mark>倍増</mark>させる



氷河の理解が生命線



マルチメッセンジャー観測として機能する宇宙ニュートリノの事象数を<mark>倍増</mark>させる

IceCube-Gen2 phase1 dense-array



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 本研究グループで開発中の 高感度検出器 **D-Egg**



日本は3列分を担当

カスケード型事象の角度分解能





ICECUBE GEN2





IceCube-Gen2 用検出器



そもそもの始まり 2013年10月@ドイツ・ミュンヘン



2015 最初のプロトタイプ 2016 最初の高圧試験 バージョン2プロト

2017 量産型プロトタイプ

2018.9.3 **米NSF の PDR を突破 Upgrade用検出器として** トップバッターで認定

ゼロから実質3年間で量産を見据えるレベルに到達





IceCube-Gen2 用検出器



上下に小型(10インチ→8インチ)の光電子増倍管を配置 – 従来の検出器に比して倍以上の検出効率

ほぼ純日本製









フォトマルベース回路

- 1. Divider circuit
- 2. HV generator
- 3. DC coupling transformer
- 4. HV board

-40C での性能を厳しく評価 次の最終プロトタイプでは表面実装に移行する

> The circuit is on a custom maid thin socket ⇒ easy to attach and dis attach









紫外光の透過度をあげ、かつダークレートを下げる



$$^{40}_{19}{
m K}
ightarrow ^{40}_{20}{
m Ca} + {
m e}^- + ar{
u_{
m e}}$$

$$^{40}_{19}\mathrm{K} + \mathrm{e^-}
ightarrow ^{40}_{18}\mathrm{Ar}^* +
u_\mathrm{e}
ightarrow ^{40}_{18}\mathrm{Ar} + \gamma +
u_\mathrm{e}$$

BG1 # 3106430 RUN # 3106431) 測定日 2017/06/02 測定日 2017/06/05	測定時刻 15:25 測定時刻 09:48	Live Time Live Time
核 種	放射能濃度	検出下限値	放射的
Ce-144	-0.03049 ± 0.05107	Вq/кg 0.1576	-0.1001
Cr- 51 Co- 60	-0.02288 ± 0.06093 $-3.235E-3 \pm 6.660E-3$	0. 02214	-0.07517
Co- 60 K - 40	$-3.673E-3 \pm 6.343E-3$ 0.7409 \pm 0.09329	0. 02148 0. 2431	-0. 01206 2. 433
La-140	4.748E-3 ± 8.130E-3	0. 02635	0. 01559

Cherenkov Photon detection area

 Cherenkov-light weighted effective areas of DEgg is well compatible with twice the IceCube DOM area









磁気シールドとuniformity







超高水圧試験による強度試験





米国側の予算 NSF(全米科学財団)は積極的予算戦略に打って出た





In 2016, NSF unveiled a set of "Big Ideas" -- 10 bold, long-term research and process ideas that identify areas for future investment at the frontiers of science and engineering. With its broad portfolio of investments, NSF is uniquely suited to advance this set of cutting-edge research agendas and processes that will require collaborations with industry, private foundations, other agencies, science academies and societies, and universities and the education sector. The Big Ideas represent unique opportunities to position our Nation at the cutting edge -- indeed to define that cutting edge -- of global science and engineering leadership and to invest in basic research and processes that advance the United States' prosperity, security, health and well-being.









Windows on the Universe: The Era of Multi-Messenger Astrophysics

Using powerful new syntheses of observational approaches to provide unique insights into the nature and behavior of matter and energy and help to answer some of the most profound questions before humankind.

For years, we have been making observations across the known electromagnetic spectrum – from radio waves to gamma rays – and many great discoveries have been made as a result. Now, for the first time, we are able to observe the world around us in fundamentally different ways than we previously thought possible. Using a powerful and synthetic collection of approaches, we have expanded the known spectrum of understanding and observing reality.

\$30M (約 30 億円)をこの分野に割り当て

IceCube 観測所はこのカテゴリーに入って アップグレードされる IceCube Observatory



米国側の予算 NSF "10 Big Ideas" 中規模の研究インフラの充実





Mid-scale Research Infrastructure

Developing an agile process for funding experimental research capabilities in the mid-scale range. The National Science Foundation's science and engineering activities rely increasingly on infrastructure that is diverse in space, cost and implementation time -- everything from major observatories to nationwide sensor networks to smaller experiments. There are many important potential experiments and facilities that fall between these; this gap results in missed opportunities that leave essential science undone. The long-term consequences of that neglect will be profound for science as well as for our nation's economy, security and competitiveness. We need a new approach to research infrastructure, one more dynamic and flexible in response to this new reality.

\$60M(約60億円)を割り当て

IceCube 観測所はこのカテゴリーに入って アップグレードされる



日本側のD-Egg製作日程:NSFに提出

			periods	s																		_																
			201809	201	8 Qtr4	4 :	2019 (Qtr1	201	9 Qtr	2 3	2019	Qtr3	20	019 Qt	r4	2020	0 Qtr1	2	020 0)tr2	202	0 Qtr	3	2020	Qtr4	202	21 Qtri	1 2	021 Q	tr2	2021	Qtr3	20	21 Qtr4	2	022 Q)tr1
item	start	cont		201	.8		201	9				201	19				20	20				20)20				2	021				20	21				2022	2
		ļ				_													_																	_		
			9	10	11 1	2 1	1 2	3	4	5	67	8	3 9	10	11	12	1 2	23	4	5	6	7	8	91	0 11	12	1	2 3	3 4	5	6	78	39	10	11 1	2 1	2	12
DEgg Production		_	1	Z	3	4 :	5 6	7	8	y	10 1	1 1	2 13	14	15	16	1/	18 19	20	21	22	23	24	25 7	26 21	28	29	30 :	31 32	35	34	35 3	96 37	38	39 4	0 41	42	43
FY1 Degg (20) except MB	5	2																																				
FY1 Degg reopen/add MB (20)	14	1																																				
FY2 Degg (130) 2DEggs/day	14	4																																				
FY3 Degg (150) 2DEggs/day	23	4																																				
FY4 DEgg (spare)	33	1																																				
DEgg Verification																																						
FY1 Degg (20) with preliminary MB	7	2																	_																			
FY1+2 Degg (150) 30Eggs/month	15	5																																				
FY3 Degg (150) 30Eggs/month	24	5																																				
FY4 DEgg (spare)	34	1																																				
Extra testing																																						
FY1 Degg (20) with preliminary MB	10	2																																				
FY1+2 Degg (150)	20	з																																				
FY3 Degg (150)	29	з																																				
FY4 DEgg (spare)	35	1																																				
Ship to Pole																																						
Packing	36	1																																				
on surface	37	2																																				





NSF MREFC

(Major Research Equipment and Facilities Construction Funding)

IceCube 実験もこのチャンネルで予算化された (~\$280M)

今採択されているもの

2018年予算額

DKIST (Daniel K Inoue Solar Telescope)\$20Mハワイに設置 太陽望遠鏡 可視光から近赤外\$55.8MLSST (Large Synoptic Survey Telescope)\$55.8Mチリに設置 広視野(9.6度)望遠鏡 ダークエネルギー 惑星\$55.8M

RCRV (Regional Class Research Vessels) \$106M 海洋科学調査船

まとめ

CHIBA UNIVERSITY



- IceCube によるニュートリノ天文学は開花しました。
- IceCube-Gen2の第一フェーズとして Upgrade 予算が日米独 で認められました。
- 日本の検出器開発はほぼ終了し、量産と南極での埋設にむけた 詰めを行っています。
- 第一フェーズからスムーズに Gen2 本体の建設へと発展させたい。 (米NSFは、ポジティブなサインを送っている)
- 本体予算は科研費では賄えないので、概算要求で25億円程度を 獲得することを目指しています。