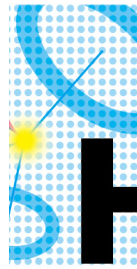




ついに本格始動した
「ハイパーカミオカンデ計画」

～物質宇宙の起源を求めて～



Hyper-Kamiokande

ICRR & Kavli IPMU
春の合同一般講演会 2021
2021.4.10

東京大学・宇宙線研究所
特任准教授 浅岡陽一

素朴な疑問

宇宙の始まり

- ビッグバン(もしくは”無”からの創成)
- 始まりの前には何があった？

宇宙の果て

- 膨張する宇宙、閉じた3次元空間？
- でもその外側は(より大きな次元から見る)？

世界が在る 不思議

- そもそも、今ここに世界が存在することが不思議
- 「明日があると信じられる」ことが信じられない

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議

物質 vs 反物質
何故物質だけが残った？



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

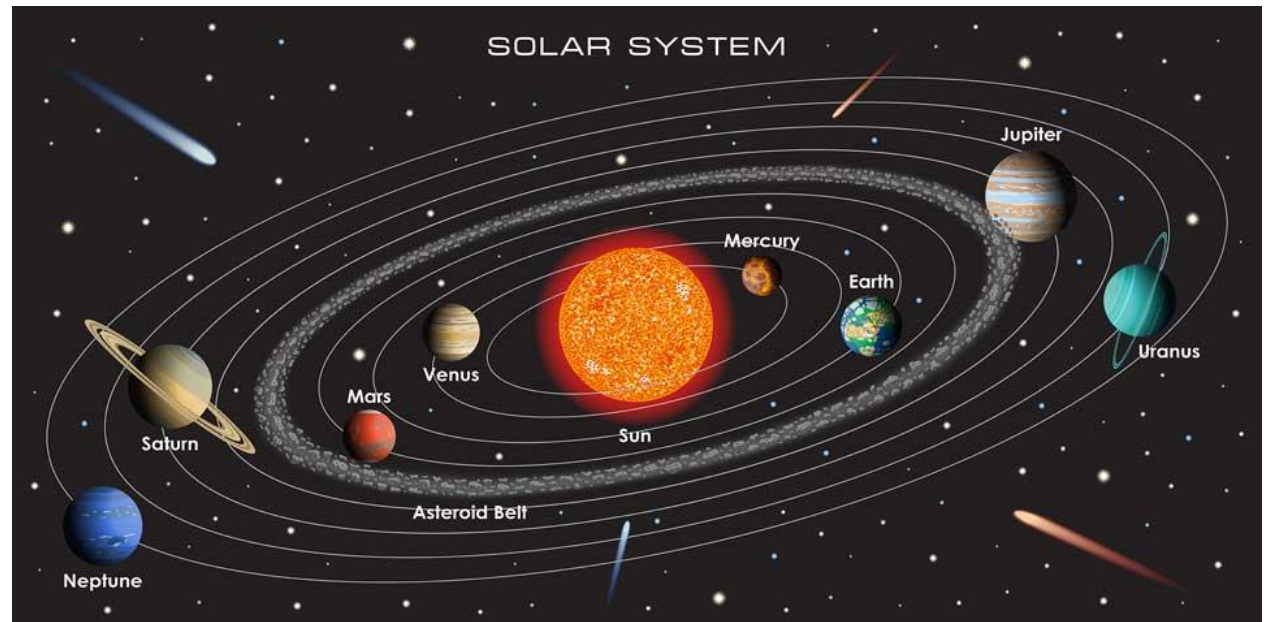
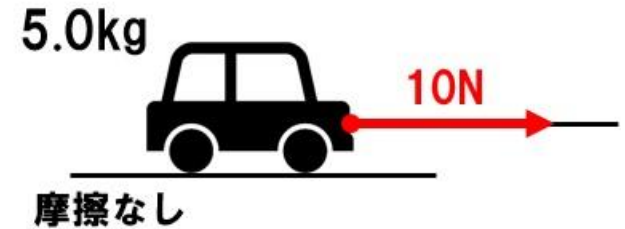
物理学の目指すところ = 神羅万象の記述

- 運動方程式

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F},$$

- 万有引力

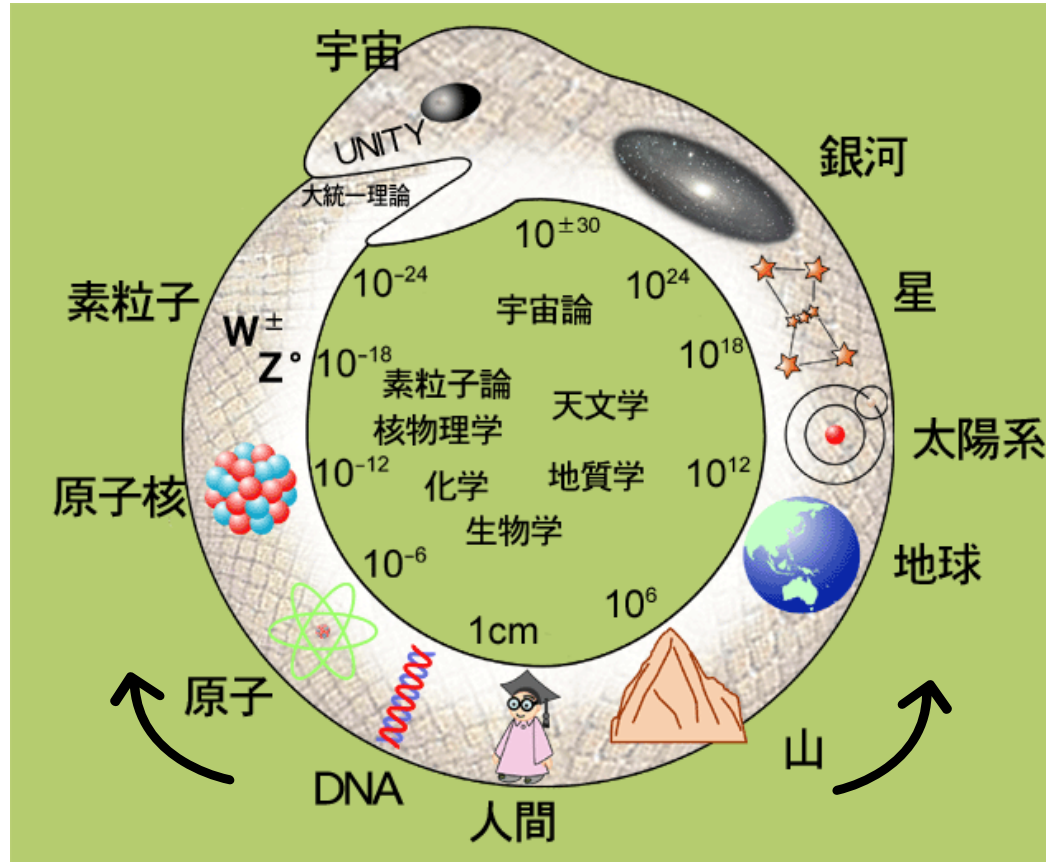
$$F = G \frac{mM}{r^2}$$



神羅万象とは？ 素粒子と宇宙

<https://www2.kek.jp/ipns/ja/special/belle2-nicolive/particles-and-universe/>

ウロボロスの蛇



物理
II
理論と実験
の両輪
予言と検証

- 物質の素は？ ⇒ より小さく ... より高いエネルギー = 「素粒子論」
- 世界の果ては？ ⇒ より遠くへ ... 時間をさかのぼる旅 = 「宇宙論」
- 宇宙の始まりにて邂逅

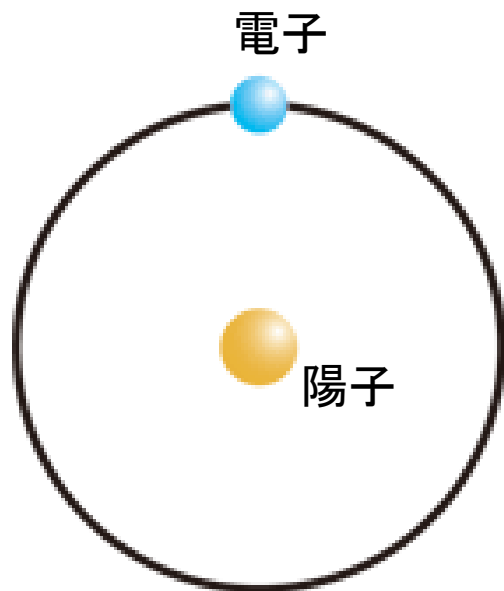
素粒子の描像 = 複雑すぎ？

- 力と物質を統一的に記述 = 万物理論を志向
- 理論的發展と加速器実験による精密検証⇒標準理論

		第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代	電荷	色荷	フレーバー (左巻き)	エネルギー (質量)
物質粒子	クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	○	○	○	○
		d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	○	○	○	○
	レプトン	e 電子	μ ミューオン	τ タウオン	○	×	○	○
		ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	×	×	○	○
その他	H ヒッグス	質量の販売 はじめました			γ 光子	g グルーオン	W/Z	G グラビトン
					ゲージ粒子 (力の粒子)			

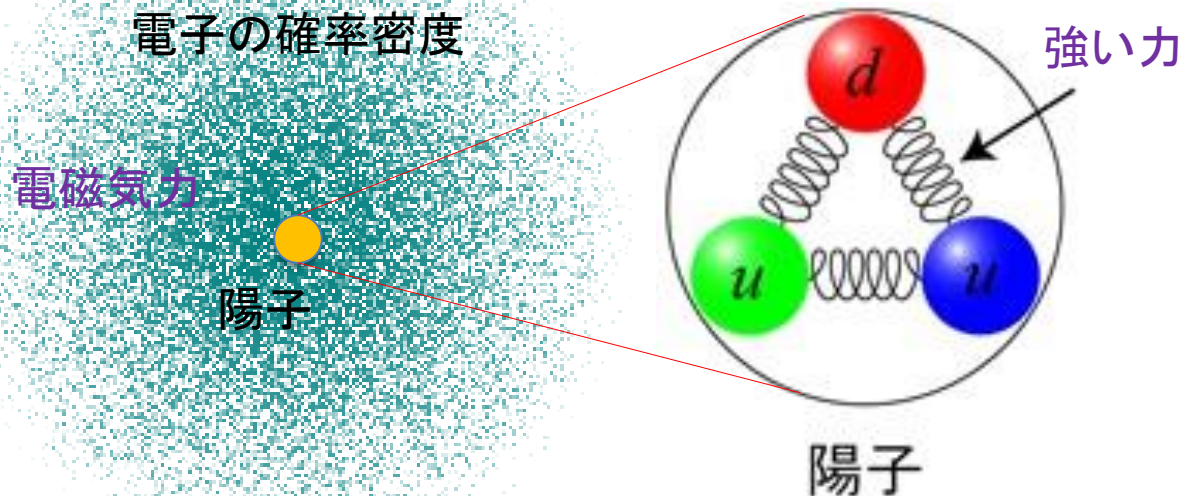
物理はなぜそんなに複雑(難解)なのか

古典的描像



何故落ちていかない？
(不安定な平衡点)
... 輻射もある

量子力学的描像



不確定性原理のおかげ

- 複雑さ、不可解さの代表といえば量子力学
- でも量子力学がなければ地球に足がめり込んでどんどん沈んでいく
- この複雑さが人類存在のために最低限必要なのでは？

人間原理

- 宇宙が人間に適しているのは、そうでなければ人間が存在できず、宇宙を観測し得ないから (Wikipedia)
 - 因果関係の逆転:
 - 例: 自分が自分として生まれたのは5億分の1の確率
⇒ その問いを発するのはこの「試行」の後。誰かは生まれた
 - 例えば地球の存在位置とか、宇宙年齢とか ⇒ 物理法則は？
- 物理探究の道しるべ
 - 対称性
 - 単純さ ... オッカムの剃刀
 - 森羅万象を統一的に記述できること
- 人間の存在を許す最もシンプルな物理法則？
 - 必要条件: 知的生命が存在可能な広がりを持った数学的体系=物理
 - そのような数学的体系が無数にあるとして、それぞれが実現する確率は同じと思った時、実際に実現する可能性が大きい(そのような場合が最もたくさん)のは、ミニマムなケース
 - マルチバース???
 - 複雑さは必須、でも人間存在に必要でない複雑さはないのでは？

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

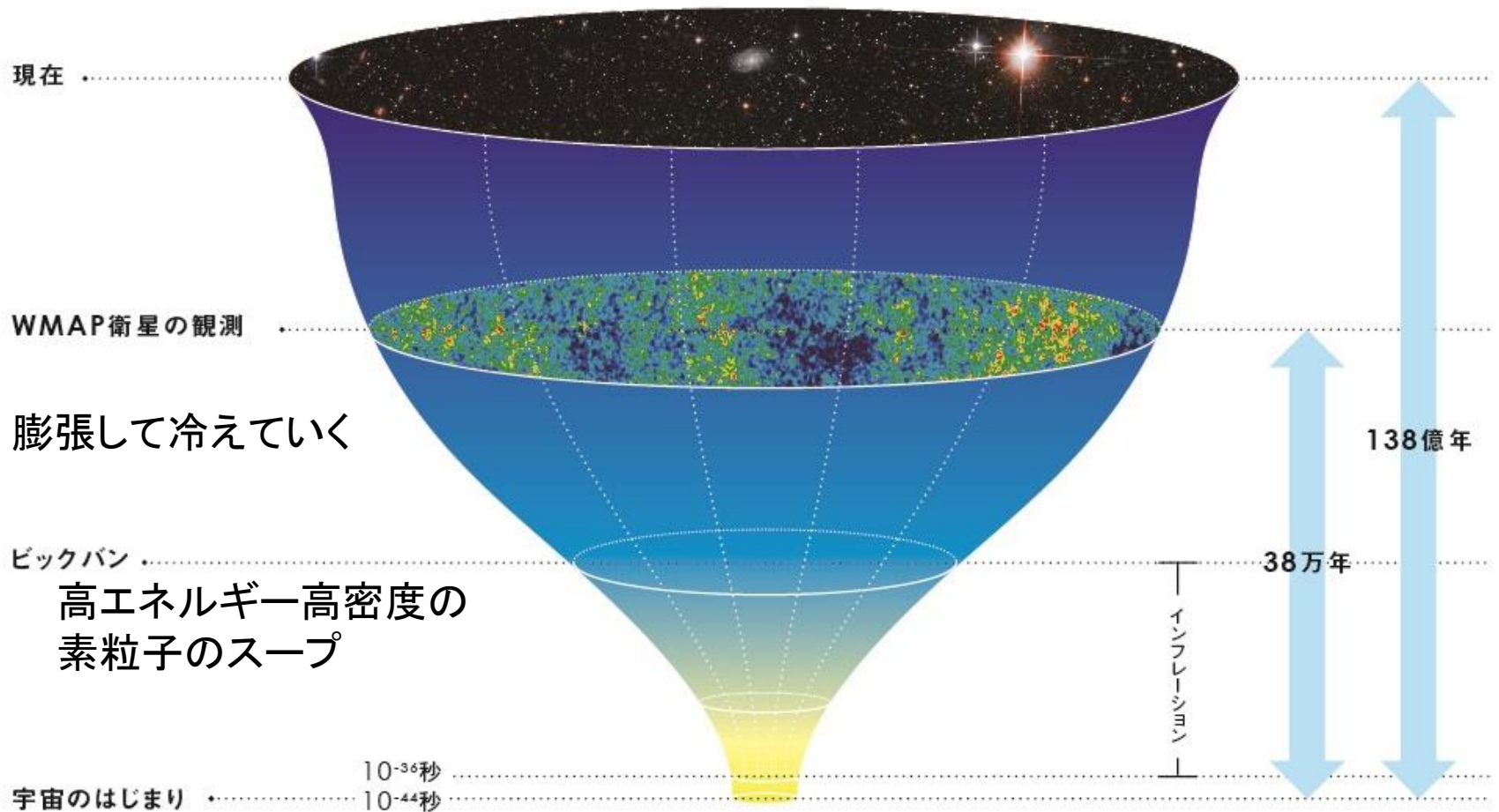
- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

宇宙の誕生と我々の存在

現在の描像:「はて」と始まった後、インフレーション。その後、ビッグバンが起こって水素、ヘリウムなどが合成される。さらに、宇宙の晴れ上がりなどを経て初代星の形成、銀河形成などを経て現在に至る。



<https://www.u-tokyo.ac.jp/content/400031452.jpg>

物質優勢宇宙の不思議：物質と反物質

ビッグバン

- 超高温・高密度のエネルギーの塊
- 物質生成 = 対生成

物質と反物質

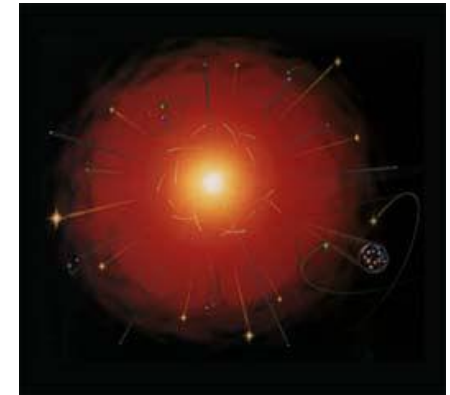
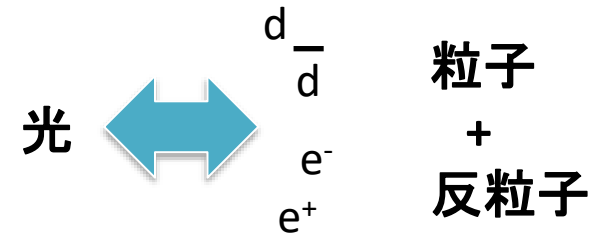
- 対生成：必ず等量生成される
 - 対消滅で等量消滅
- } **何も残らないはず**

なぜ物質だけが残ったか？

- 物理法則に組み込まれている必要性あり
- 粒子と反粒子の間で物理法則が異なっているはず
⇒ CP対称性の破れ
- クォークで観測されたCP対称性の破れは、物質優勢宇宙の理由には不十分
- ニュートリノにおけるCP対称性の破れはどうか？

⇒ **ハイパーカミオカンデ計画の主目的の一つ**

ニュートリノと反ニュートリノの違いをできるだけ直接的に測定する



物質と反物質の非対称性を生み出す物理的機構が存在するのに、その自由度が「物質優勢宇宙」の実現に活かされていないのはとても不自然では？？？

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

自己紹介

故小柴昌俊先生



- 県立奈良高等学校出身

折戸研究室

- 加速器実験
 - 電子陽電子衝突型加速器・LEP @ CERN
- 宇宙における素粒子現象の探索
 - 気球実験BESS
- 1996年から折戸研に在籍、素粒子実験を志す
 - BESS実験に参加
 - (@折戸研)SKの大成功は、距離をとって眺める感じ
- そのころ神岡では、
 - 1996年4月 SK観測開始
 - 1998年6月 ニュートリノ振動の発見



東京大学
理学部・物理学科
素粒子センター
故折戸周治先生



吉田哲也先生
浅井祥仁先生
吉村浩司先生

浅岡陽一

東京大学
宇宙線研究所
神岡施設
故戸塚洋二先生



鈴木洋一郎先生
中畑雅行先生
梶田隆章先生

塩澤真人先生

反陽子の測定 (BESS気球実験)

宇宙における素粒子現象の探究 ⇒ 宇宙線中の反粒子観測

反陽子測定

- 原始ブラックホールの蒸発 (ホーキング輻射)
- 暗黒物質の対消滅

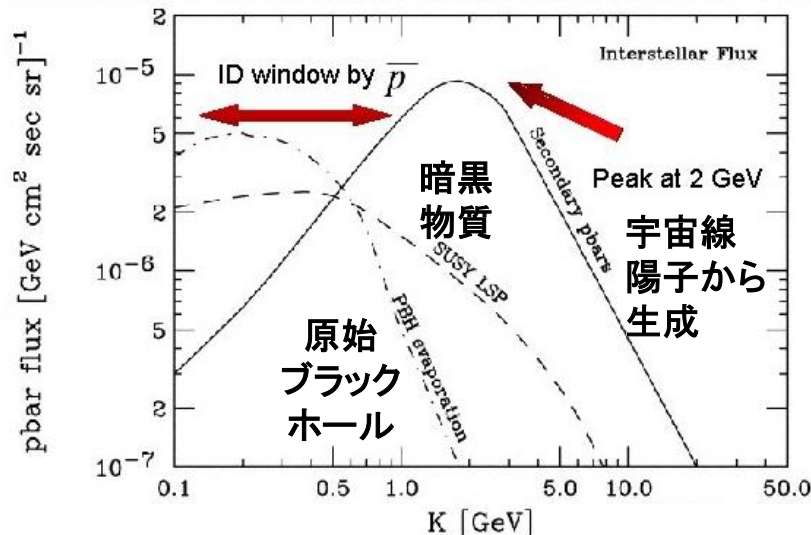
⇒ 低エネルギー領域に探索ウィンドウ

反ヘリウムの探索

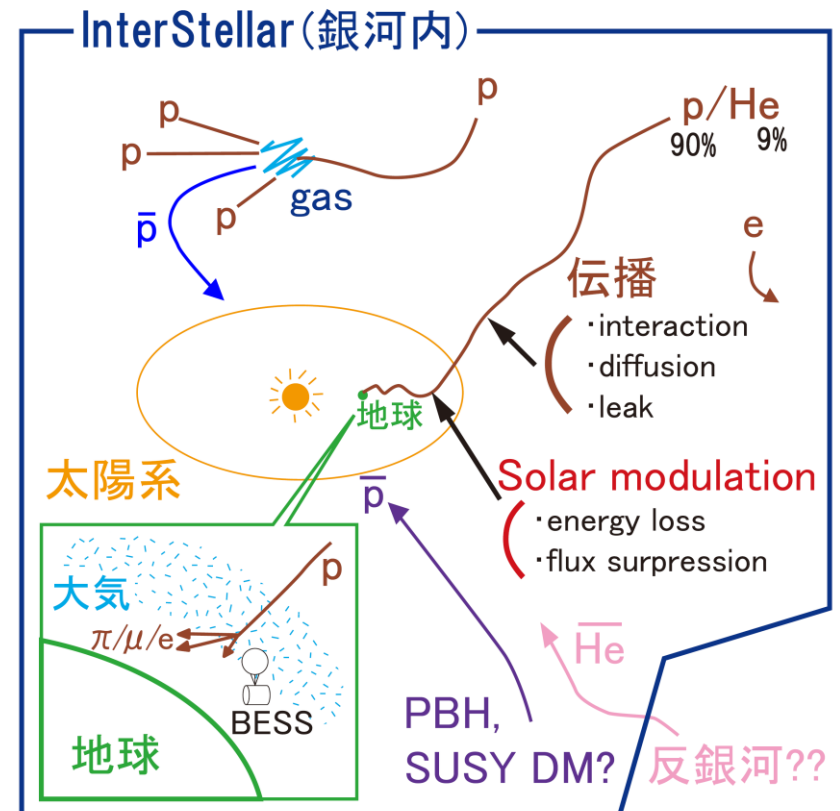
- 物質と反物質の非対称性の謎
- 反銀河??

PBH(原始ブラックホール)
宇宙初期の密度揺らぎによって
生成されたかもしれない

反陽子フラックス



運動エネルギー



大気の上で「直接」測定

「直接」測定するとはどういうことか

鉛筆の長さを測りたい

- 定規をあてて長さを測る
- 誤差要因: 見る角度、定規自体の精度



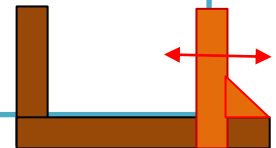
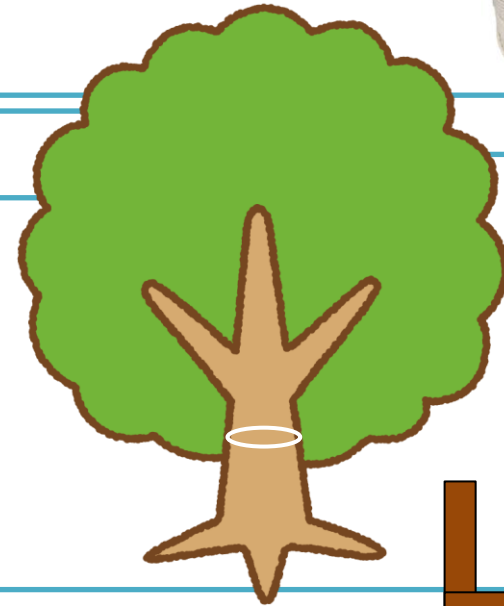
木の幹の外周を測りたい

- 紐で幹の外周を測定
- 紐の長さを測る
- 誤差要因: +紐の伸び、紐の長さ測定精度



木の幹の太さを測りたい

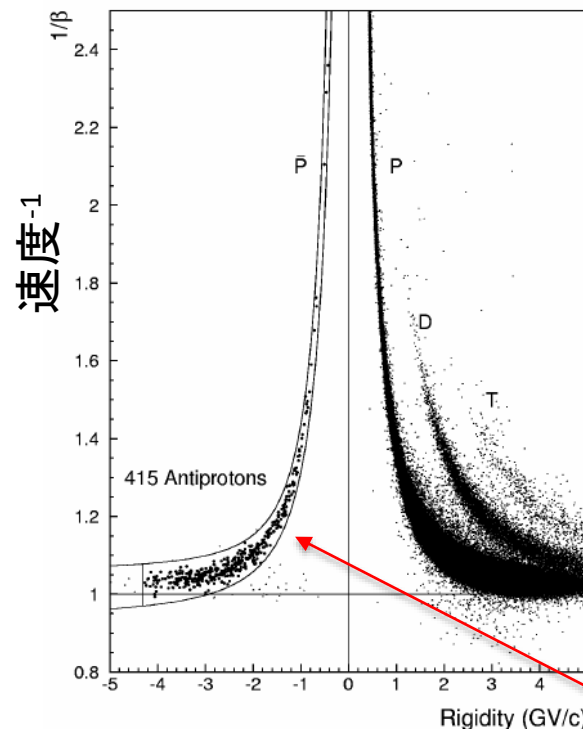
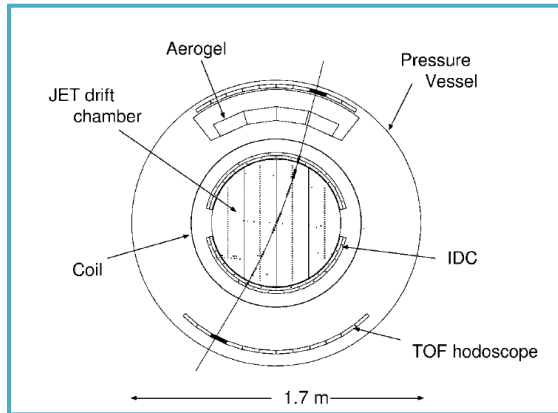
- 紐で幹の外周を測定
- 紐の長さを測る
- 円を仮定して直径を計算
- 誤差要因: +「円」という仮定の妥当性
- ツールを自作(深くて大きいノギス)
- コの字型の隙間の長さを測る
- 様々な方向から測れば、「円」からのずれもわかる



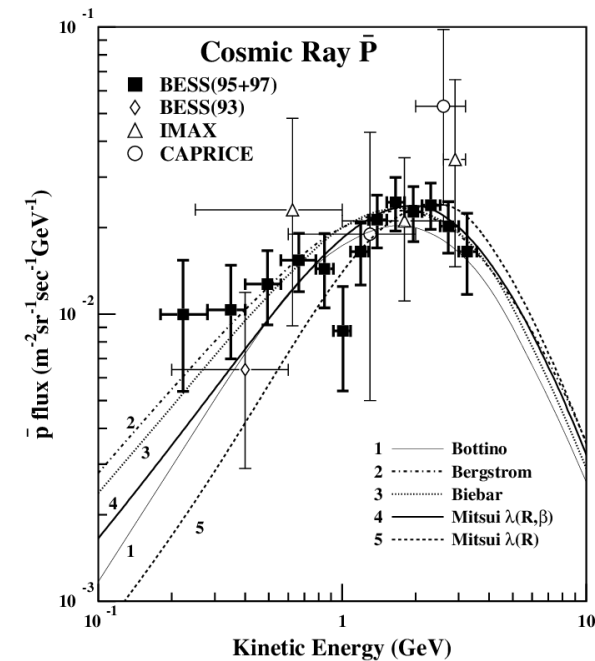
できるだけ正確に測定したい = より直接的な測定方法
⇒ 宇宙線の直接測定はこの方向で進化してきた

反陽子の測定 (BESS気球実験)

- 加速器実験の技術を応用 $\Rightarrow$ 宇宙線測定を精密実験に
 - 薄肉ソレノイドマグネット $\Rightarrow$ 大面積、高い検出効率を両立
 - 粒子の飛行時間と磁場中での曲がり具合により質量同定 $\Rightarrow$ 明確な粒子識別、バックグラウンド無しで反陽子を検出



運動量 x 電荷



反陽子存在比 $< 10^{-4}$

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

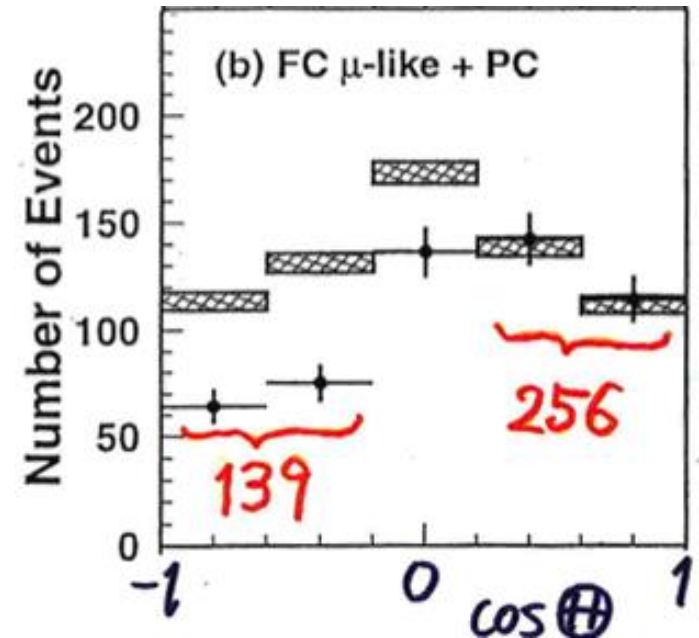
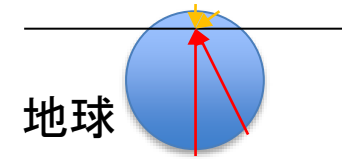
- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

1998 大気ニュートリノ振動の発見

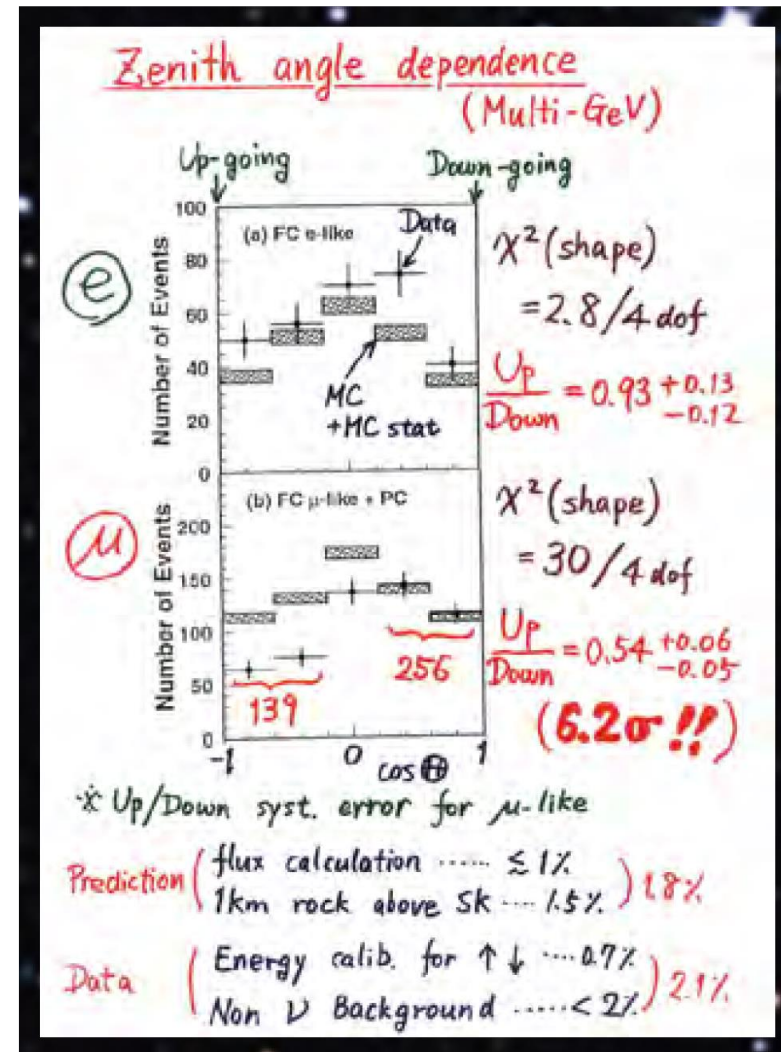
- カミオカンデ時代から兆候あり
 - それでも、スーパーカミオカンデ建設の主たる物理目的にはあげられていなかったとのこと (ref. 中村健蔵, 物理学会誌 71,214,2016)
- 元々は核子崩壊のバックグラウンド
 - クロスチェックとしてミュオンニュートリノの検出数を調べていて異常に気付いたとのこと
 - 期待値に対して検出数がすくない「消失」は検出器の性能を疑われるため慎重な対応が必要
- 天頂角分布により、基線長 (ニュートリノ伝播距離) の影響を明確に示した
 - これが決定打 (smoking gun)
 - それ以外にも検出原理実証のためのビームテストなど様々な検討あり
- 折戸研界限では、このころまだ懐疑的だったと記憶。。
 - 研究者は疑り深い傾向があるが、これはそれだけでもなさそう



1998年の高山で行われた
ニュートリノ国際会議で梶田先生
が発表されたスライドを引用

ニュートリノ振動解析と測定誤差

- 統計誤差（偶然誤差の一つ）
 - 検出した粒子の数が増えれば増えるほど誤差が小さくなっていく（誤差＝検出個数の平方根）
 - 100個検出で10%の誤差、10,000個検出で1%の誤差
 - 大きな検出器で長い期間測定することが精度を上げる鍵
- 系統誤差
 - 測定値をばらつかせるのではなく平均値をずらす形で現れる誤差
 - 様々な要因がある（前の例では定規の精度など）
- 系統誤差の影響を受けにくい解析：比の比（double ratio）
 - μ 型ニュートリノと電子型ニュートリノの比を実データとシミュレーションデータで作り、さらにその比を取る
 - データからどう物理を抽出するかが肝**



1998年の高山で行われた
ニュートリノ国際会議で梶田先生が
発表されたスライドを引用

国際宇宙ステーションでの宇宙線直接観測

～2010年代は宇宙からの宇宙線観測の時代～



AMS-02

2011年5月16日打上げ



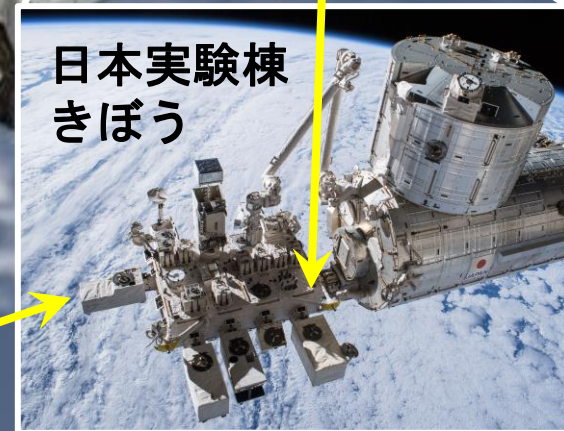
ISS-CREAM

2017年8月14日打上げ



CALET

2015年8月19日打上げ

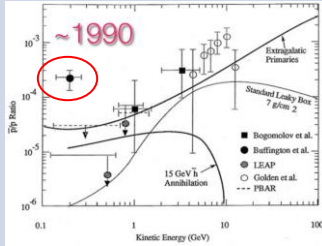
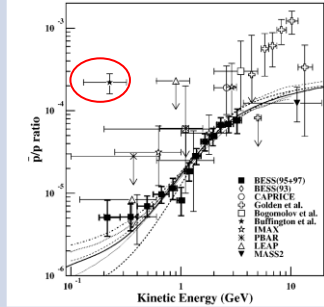
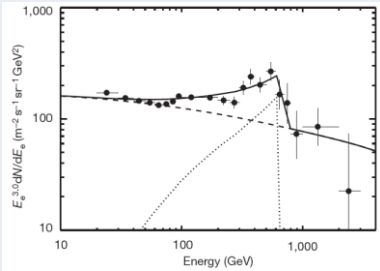
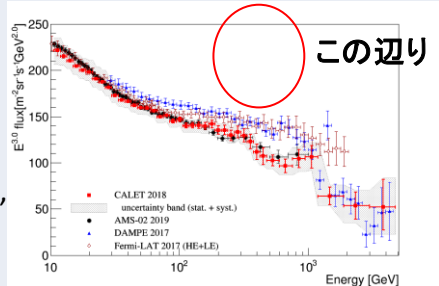
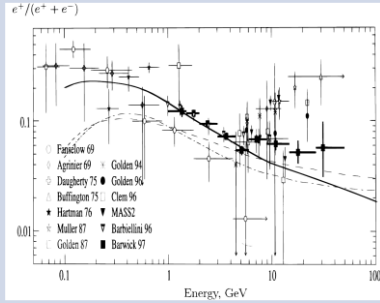
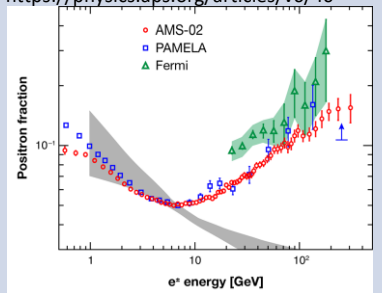


日本実験棟
きぼう

より大きな測定器を
大気の影響のないところへ
強力な粒子識別性能

(C) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

荷電粒子線による素粒子物理の探索

対象粒子	過剰を測定	追観測による検証	結論
反陽子	Buffington et al. (1981) 原始ブラックホール？ 暗黒物質？ 	BESS,... Orito et al., PRL (2000) BESS Polar-II 	低エネルギーの 大きな「過剰」を 否定
全電子 (電子+陽電子)	ATIC Chang et al., Nature (2008) 暗黒物質？ 	AMS-02, CALET, DAMPE Adriani et al., PRL (2018) 	600GeVの大きな 「過剰」否定
陽電子	HEAT,... Barwick et al., ApJ (1997) 暗黒物質？ 	PAMELA, AMS-02 https://physics.aps.org/articles/v6/40 	「過剰」有！ ただし天体や 伝播起源の 可能性が高い

測定が「直接的」になり高精度になればなるほど、素粒子物理からは離れていく？
(もちろん、宇宙線物理学としては大きく進展、銀河宇宙線の詳細な描像が得られた)

カミオカンデとニュートリノ物理の進展

- 1983 カミオカンデ実験開始
 - 太陽ニュートリノ観測のための改良
- 1987 超新星1987Aのニュートリノ観測
- 1996 スーパーカミオカンデ実験開始
- 1998 大気ニュートリノ振動発見
- 1999 K2K実験開始
- 2001 太陽ニュートリノ振動発見 (SK + SNO)
 - 2002 カムランドによる原子炉ニュートリノ振動発見, SNOによる太陽ニュートリノ振動確立
- 2002 小柴先生ノーベル物理学賞を受賞
- 2004 K2Kでニュートリノ振動を確認
- 2009 T2K実験開始
- 2011 T2Kで電子ニュートリノ出現事象発見
- 2013 T2Kで電子ニュートリノ出現事象の観測と測定
- 2015 梶田先生がノーベル物理学賞を受賞
- 2020 T2KがCP対称性の破れを示唆 [K. Abe et al., Nature 580, 339 (2020)]
- 2020 ハイパーカミオカンデ建設開始 

2012ごろ梶田先生から聞いた話
検出器の性能を最大限発揮させる。とことん追求・検証する。
後は検出器の声に耳を澄まして
虚心坦懐にデータを見る。

中山: 3世代 ν 混合により、CP対称性破れ探索の扉が開いた

横山: 測ってくださいとばかりに自然が機会を与えている。

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介

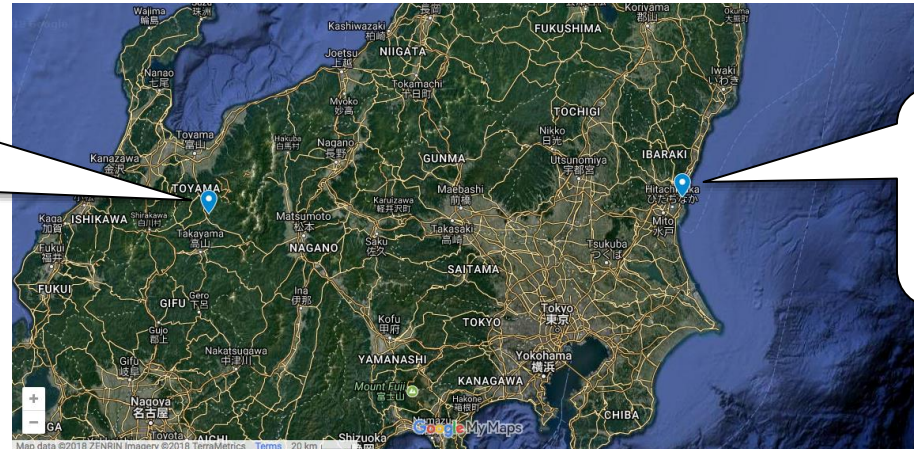


4. おわりに

ハイパーカミオカンデプロジェクト

Hyper-Kamiokande (Hyper-K, HK)

超巨大水タンク
の新規建設



J-PARC
加速器増強

超巨大水タンクの新規建設とJ-PARC加速器増強の組合せにより、
宇宙・素粒子研究における新たなブレークスルーを狙う

- HK検出器の有効体積(19万トン)はSKの8.4倍, 光センサー感度は2倍
 - J-PARC ニュートリノビームは0.5から1.3MWに増強 (2.6倍)
 - 前置検出器との組合せによる「直接的な」ニュートリノ振動測定
- ⇒ 自然ニュートリノレート x8倍、加速器ニュートリノレート x20倍

ハイパーカミオカンデプロジェクト

Hyper-Kamiokande (Hyper-K, HK)

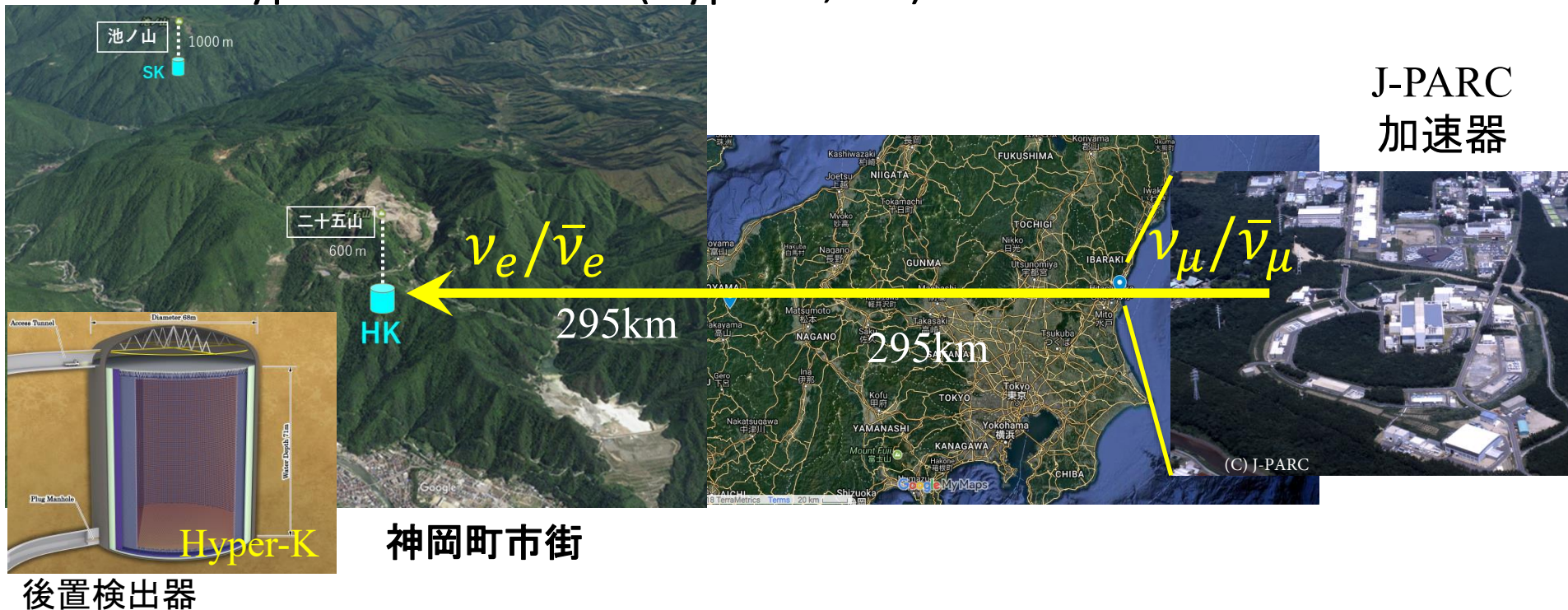


超巨大水タンクの新規建設とJ-PARC加速器増強の組合せにより、宇宙・素粒子研究における新たなブレイクスルーを狙う

- **HK検出器の有効体積(19万トン)はSKの8.4倍, 光センサー感度は2倍**
 - J-PARC ニュートリノビームは0.5から1.3MWに増強 (2.6倍)
 - 前置検出器との組合せによる「直接的な」ニュートリノ振動測定
- ⇒ 自然ニュートリノレート x8倍、加速器ニュートリノレート x20倍

ハイパーカミオカンデプロジェクト

Hyper-Kamiokande (Hyper-K, HK)

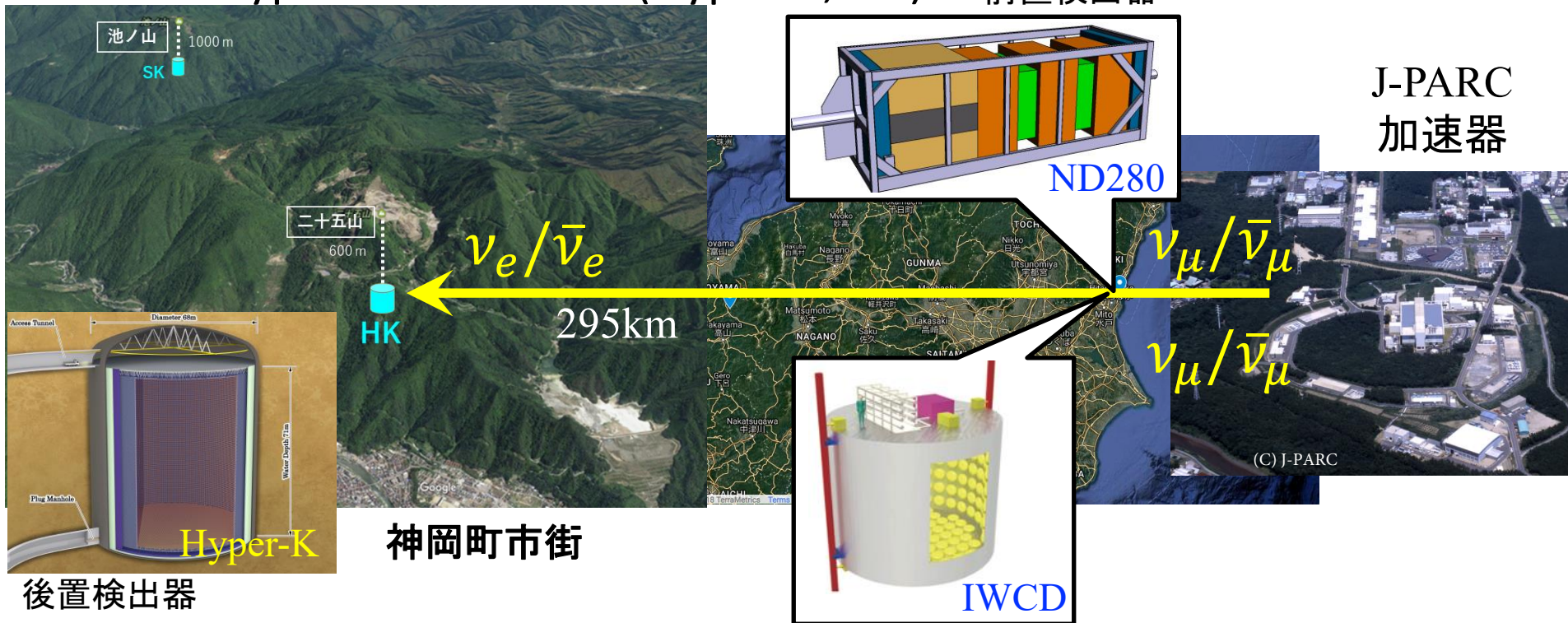


超巨大水タンクの新規建設とJ-PARC加速器増強の組合せにより、宇宙・素粒子研究における新たなブレイクスルーを狙う

- HK検出器の有効体積(19万トン)はSKの8.4倍, 光センサー感度は2倍
 - J-PARC ニュートリノビームは0.5から1.3MWに増強 (2.6倍)
 - 前置検出器との組合せによる「直接的な」ニュートリノ振動測定
- ⇒ 自然ニュートリノレート x8倍、加速器ニュートリノレート x20倍

ハイパーカミオカンデプロジェクト

Hyper-Kamiokande (Hyper-K, HK) 前置検出器



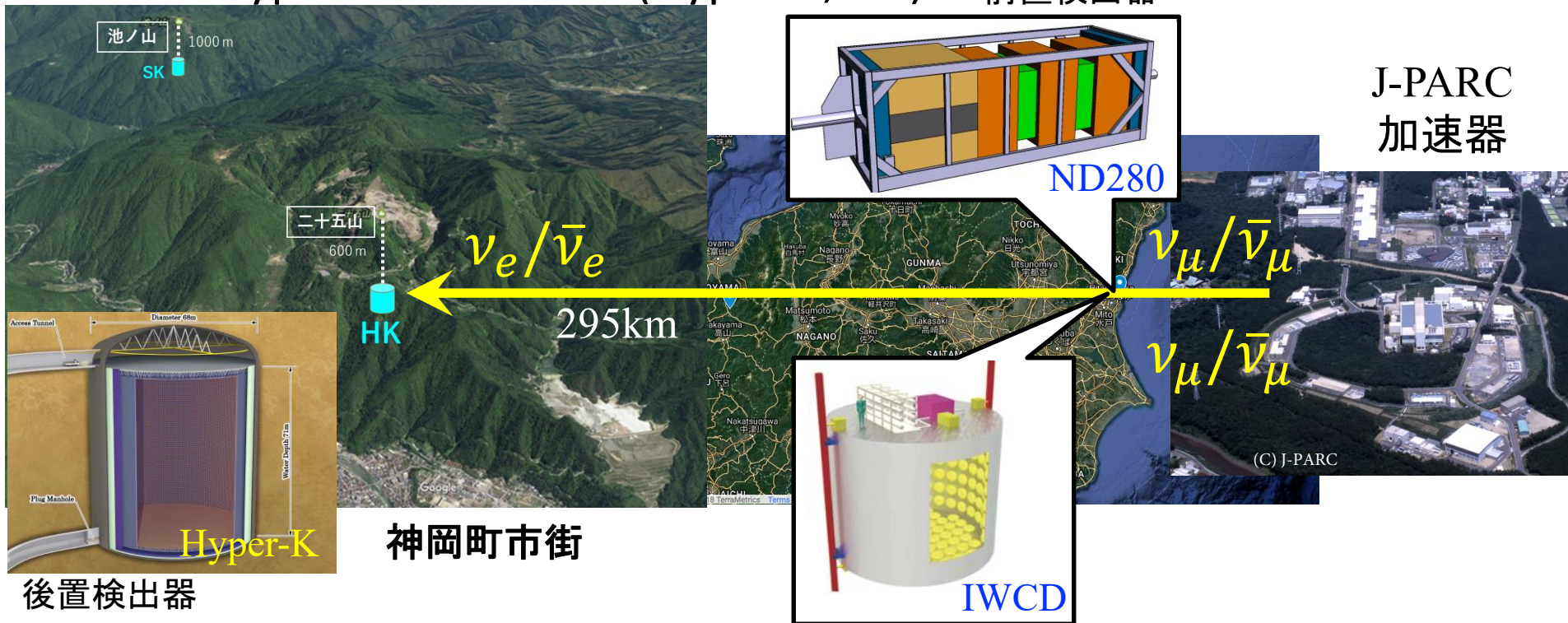
超巨大水タンクの新規建設とJ-PARC加速器増強の組合せにより、宇宙・素粒子研究における新たなブレークスルーを狙う

- HK検出器の有効体積(19万トン)はSKの8.4倍, 光センサー感度は2倍
- J-PARC ニュートリノビームは0.5から1.3MWに増強 (2.6倍)
- 前置検出器との組合せによる「直接的な」ニュートリノ振動測定

⇒ 自然ニュートリノレート x8倍、加速器ニュートリノレート x20倍

ハイパーカミオカンデプロジェクト

Hyper-Kamiokande (Hyper-K, HK) 前置検出器



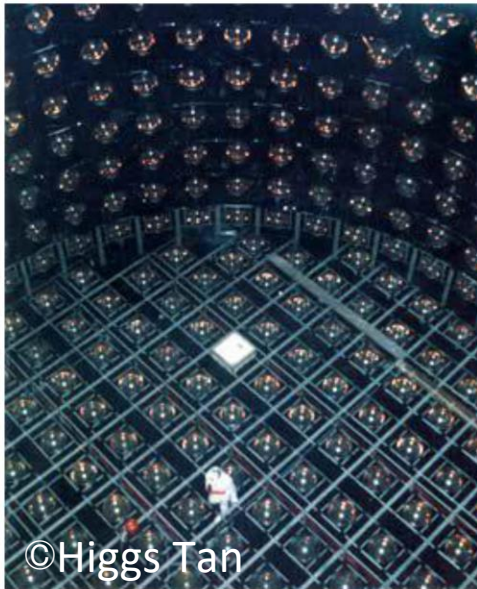
超巨大水タンクの新規建設とJ-PARC加速器増強の組合せにより、宇宙・素粒子研究における新たなブレークスルーを狙う

- HK検出器の有効体積(19万トン)はSKの8.4倍, 光センサー感度は2倍
- J-PARC ニュートリノビームは0.5から1.3MWに増強 (2.6倍)
- 前置検出器との組合せによる「直接的な」ニュートリノ振動測定

⇒ 自然ニュートリノレート x8倍、加速器ニュートリノレート x20倍

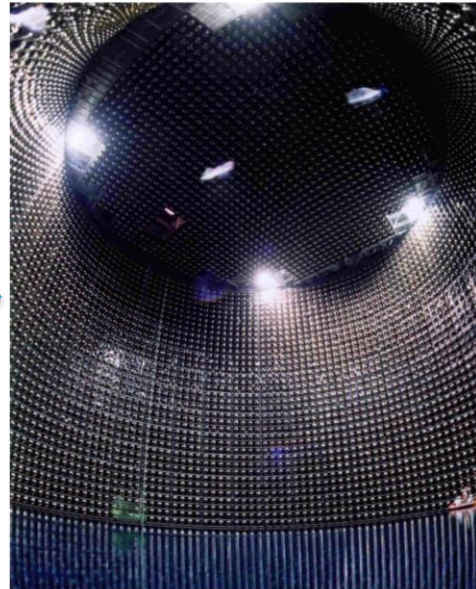
3世代にわたる改良

カミオカンデ
15.6 m
16 m
3,000 トン



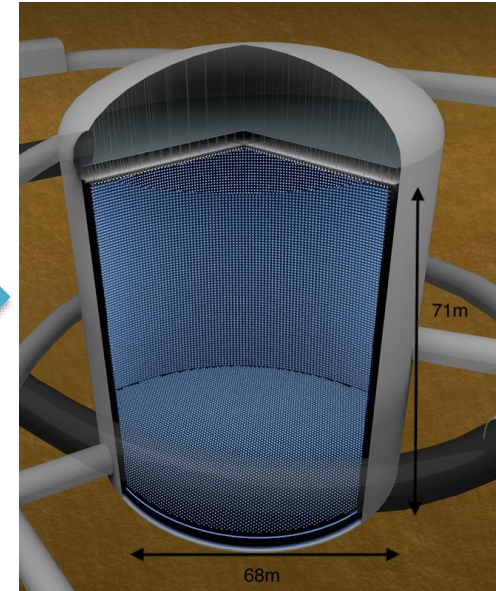
有効体積 680-1,040トン
光センサー: 948個

スーパー
カミオカンデ
41.4 m
39.3 m
50,000 トン



有効体積 22,500トン
光センサー: 11,146個

ハイパー
カミオカンデ
71 m
68 m
260,000 トン



有効体積 190,000トン
光センサー: 40,000個

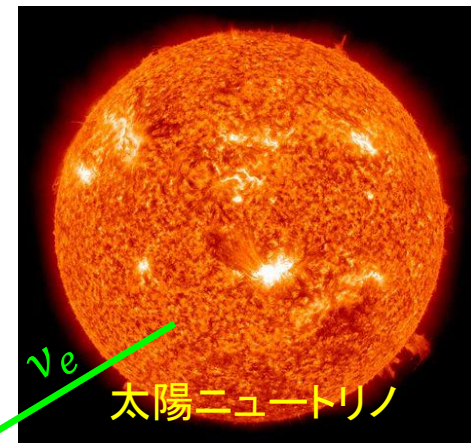
- 経験に基づく検出器の最適化
- 面積 vs 体積 ⇒ 効率的なスケールアップ

HK観測対象



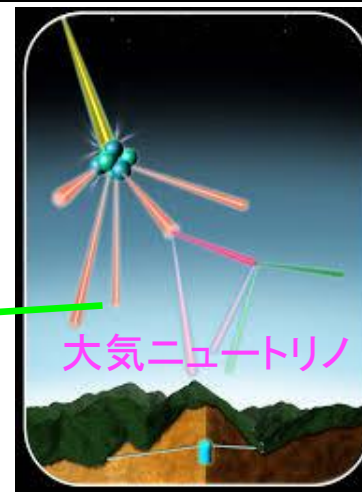
超新星ニュートリノ

$\nu_e, \bar{\nu}_e$



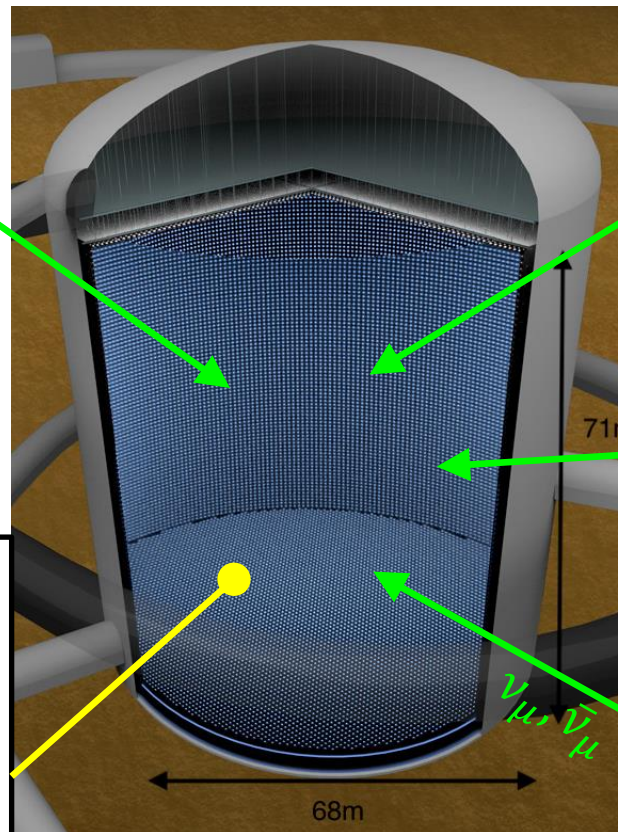
ν_e

太陽ニュートリノ



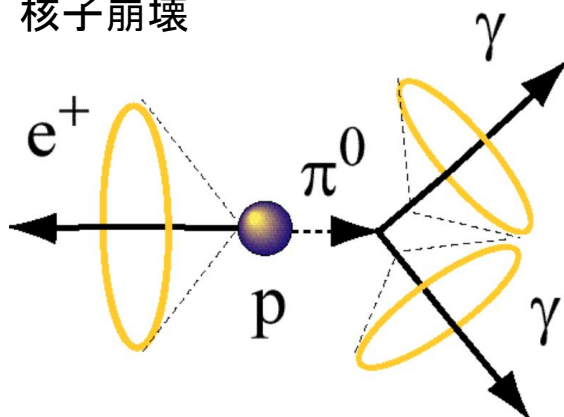
大気ニュートリノ

$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$



$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$

核子崩壊



J-PARC ニュートリノビーム

HK計画の主要科学目的

1. ニュートリノ・反ニュートリノの振動現象の精密測定
⇒ ニュートリノが物質優勢宇宙の理由なのか？

大気ニュートリノ振動の発見からの
一連の大きなうねりの結末？

2. 核子崩壊の探索
⇒ アインシュタインが夢見た、「力の統一」の直接検証

初代カミオカンデ
からの長年の夢

3. 超新星爆発の監視
⇒ 中性子星やブラックホール誕生の瞬間の目撃

SN1987Aの観測によって拓かれた
ニュートリノ天文学を飛躍的に発展

HK計画の主要科学目的

1. ニュートリノ・反ニュートリノの振動現象の精密測定
⇒ ニュートリノが物質優勢宇宙の理由なのか？

大気ニュートリノ振動の発見からの
一連の大きなうねりの結末？

2. 核子崩壊の探索
⇒ アインシュタインが夢見た、「力の統一」の直接検証

初代カミオカンデ
からの長年の夢

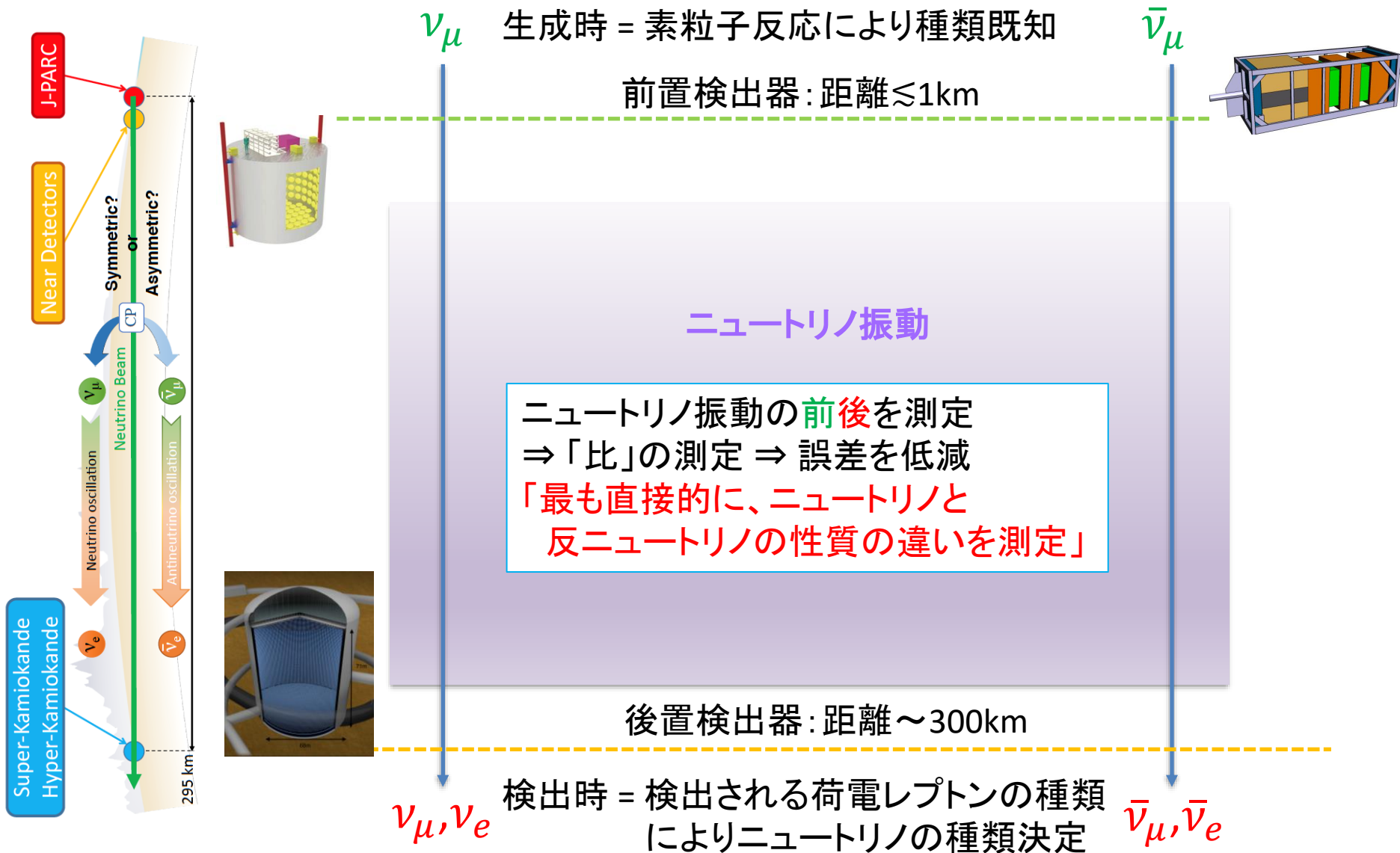
3. 超新星爆発の監視
⇒ 中性子星やブラックホール誕生の瞬間の目撃

SN1987Aの観測によって拓かれた
ニュートリノ天文学を飛躍的に発展

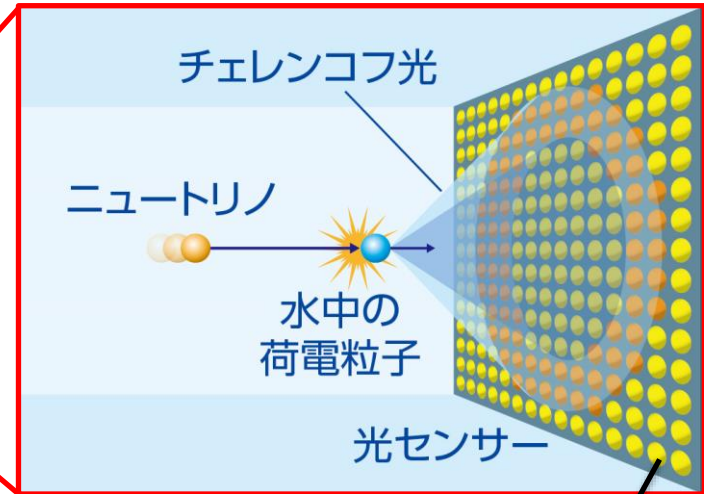
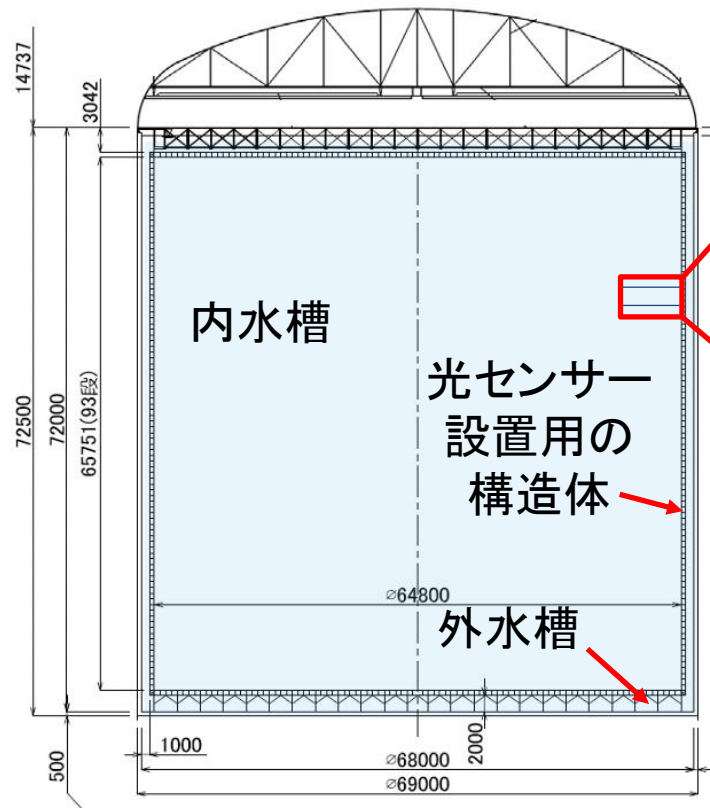


今日はここに
フォーカス

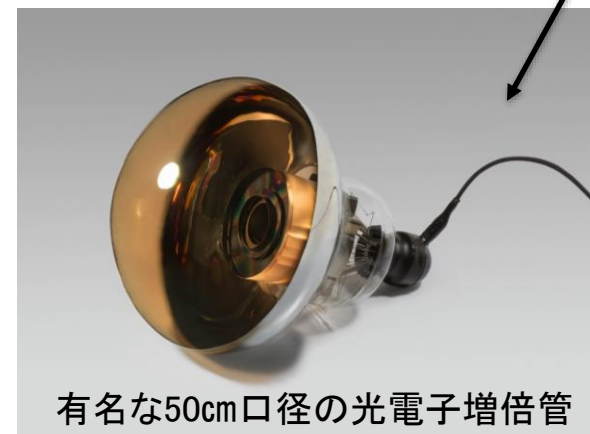
ニュートリノビーム測定概要



HK検出器とニュートリノの検出原理



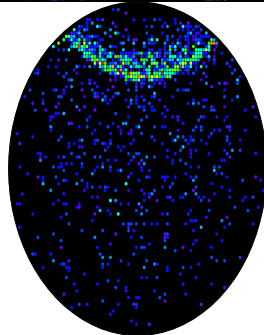
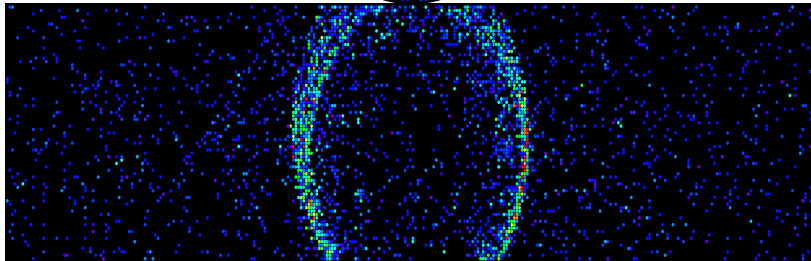
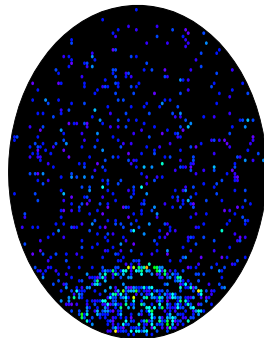
- 荷電粒子の飛跡を再構成
- 水中での荷電粒子出現がニュートリノ事象の証拠



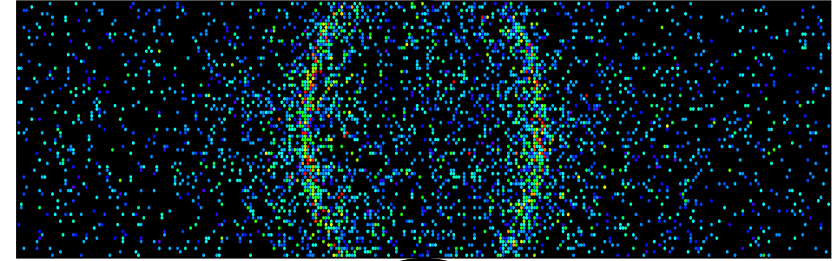
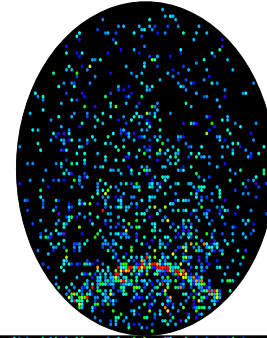
μ ニュートリノと電子ニュートリノの識別

- リングの特徴 $\Rightarrow$ 粒子識別
- $>99\%$ 以上の効率で μ/e 分離

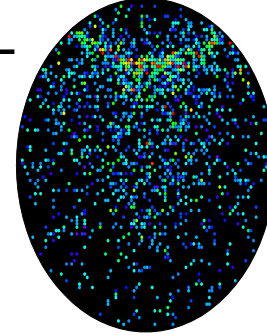
μ 粒子



電子(e)



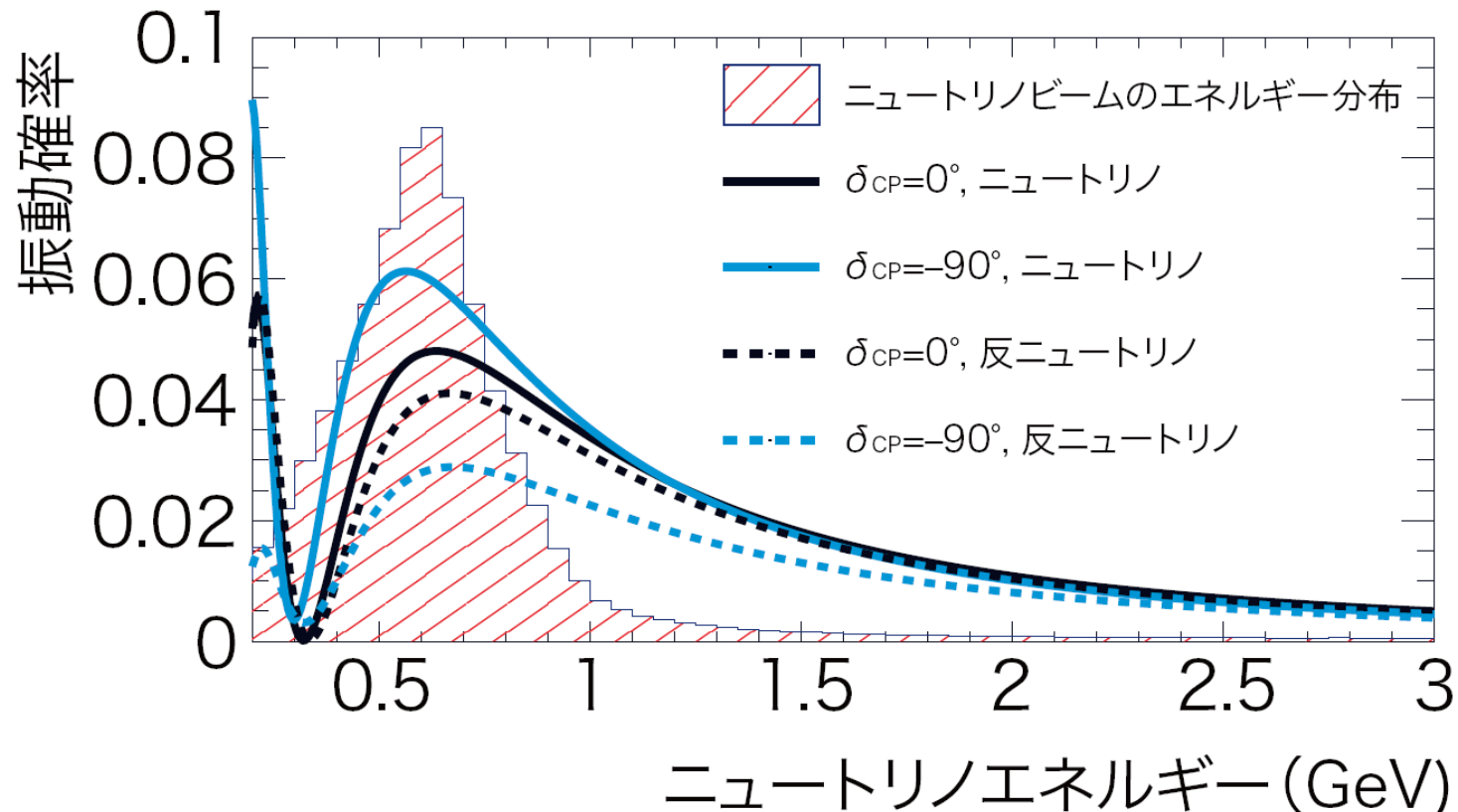
電磁シャワー



内水槽の展開図
輝点が光センサー
一個一個に対応

ニュートリノ・反ニュートリノの振動確率

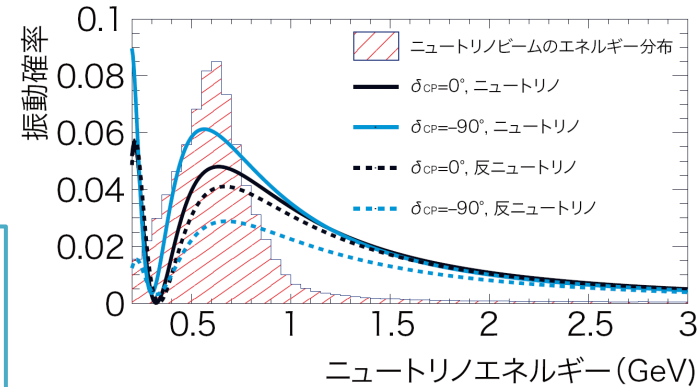
- 電子ニュートリノへの振動確率が最大のエネルギー0.6ギガ電子ボルト(GeV)のビームを使用
- SK, HK で同じ条件になるようにデザイン



ニュートリノ・反ニュートリノの振動確率

$$\frac{\nu_e(\text{後置})}{\nu_\mu(\text{前置})} \quad \frac{\bar{\nu}_e(\text{後置})}{\bar{\nu}_\mu(\text{前置})}$$

- 上記の比の、実データとシミュレーションデータの比 (double ratio) を、 ν ビーム、 $\bar{\nu}$ ビームで測定
- それぞれのエネルギー依存性や、前置検出器での様々な測定が全て整合的に理解できることを要請



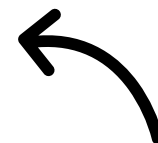
	ビーム総量 POT	各 δ_{CP} の値に対する 観測事象数の期待値		
		-90°	0°	90°
ニュートリノ	7×10^{22}	2740	2290	1850
反ニュートリノ	2×10^{23}	1620	1880	2120

$$\Delta = 450, >8\sigma$$

$$\Delta = -260, >6\sigma$$

ハイパーカミオカンデプロジェクト正式に開始

東京大学
五神真総長



高エネルギー
加速器研究機構
山内正則機構長

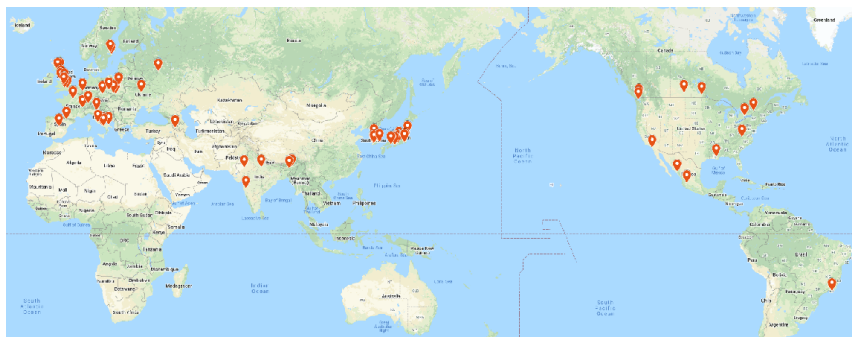
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/whatsnew/2020/05/hk.html>

- 2020年2月には、ハイパーカミオカンデ計画の初年度予算35億円を含む令和元年度補正予算が成立し、**ハイパーカミオカンデ計画が正式に開始**
- 2020年5月、東京大学と高エネ研の間で、**「ハイパーカミオカンデ計画の推進に関する覚書」を締結**



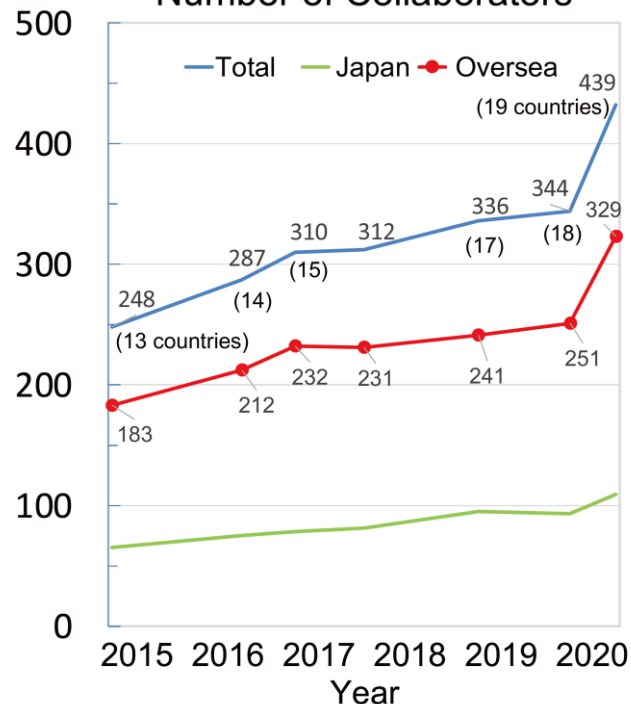
2027年の実験開始に向け、総力を挙げて建設を開始

国際コラボレーションの拡大・新組織化



19カ国，93機関，439人
(1年前：17カ国，336人)

Number of Collaborators



*jump in 2020 is due to approval

New

Co-Spokespersons

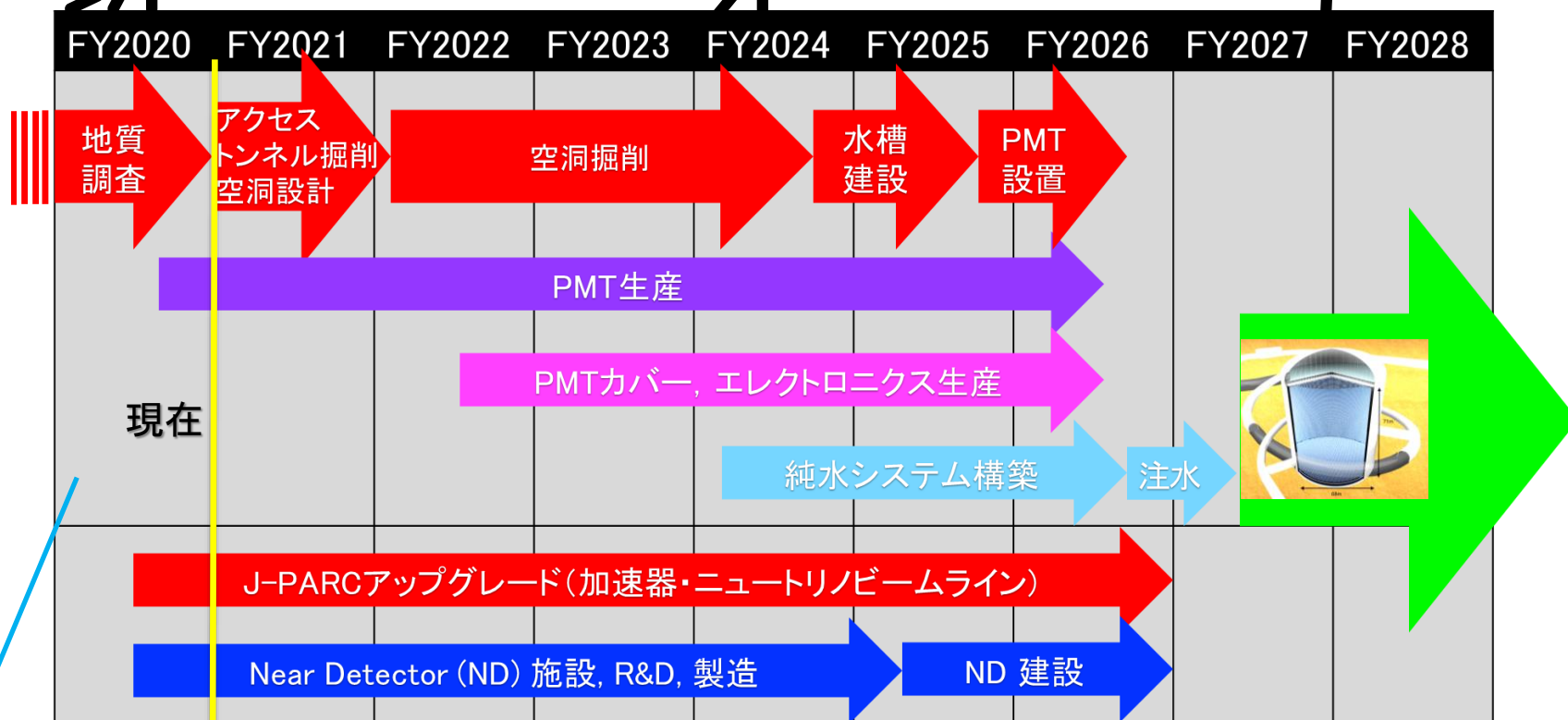
Masato SHIOZAWA and Francesca DI Lodovico



3/1-12 にオンラインで
開催された、第2回
HK共同研究者会議
の発表資料より引用

HK全体スケジュール

2020年度より建設を本格的に開始。2027年度の運用開始を目指し、協力して推進中！



競合実験：DUNE

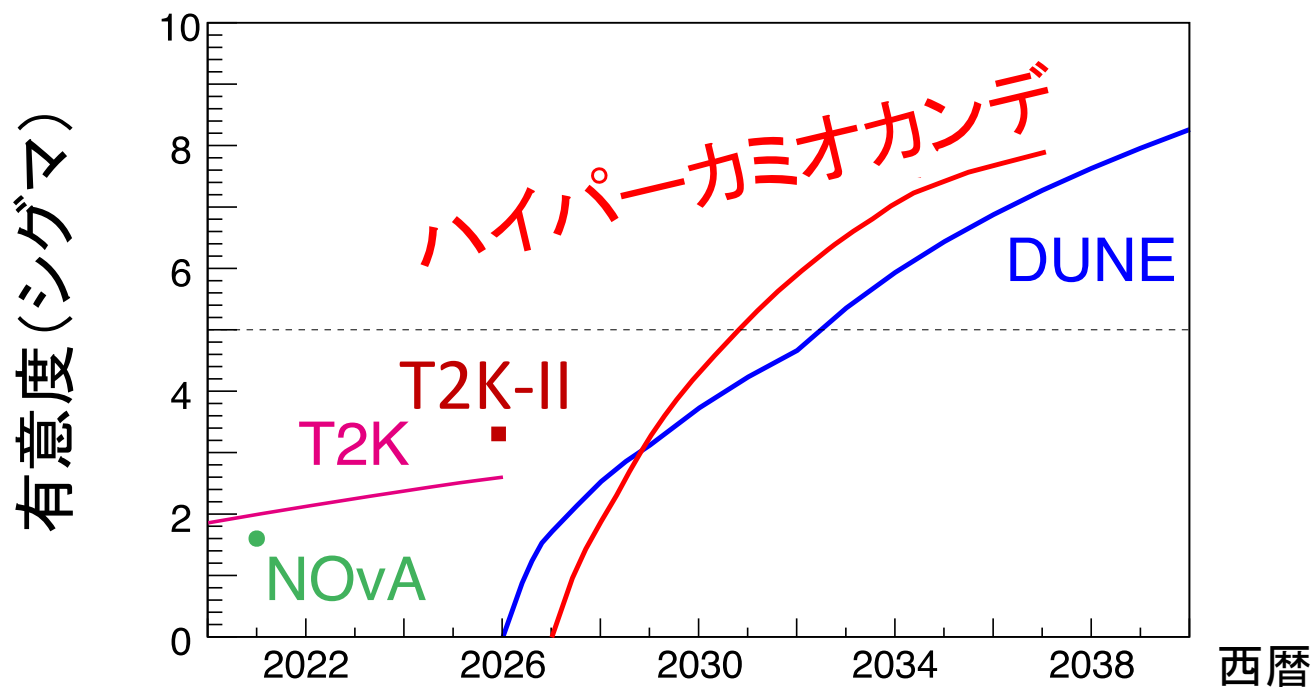
<https://nus2surf.dunescience.org/2018/02/neutrino-experiment-factsheet/>



2017年に予算化。HK計画とほぼ重なる科学目的。検出器や基線長が異なる

ニュートリノCP非保存の発見：国際競争

予定通りに建設を進め、実験を開始することがとても重要！



CP非保存に対する感度の年変化
(最も効果が大きい場合)

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

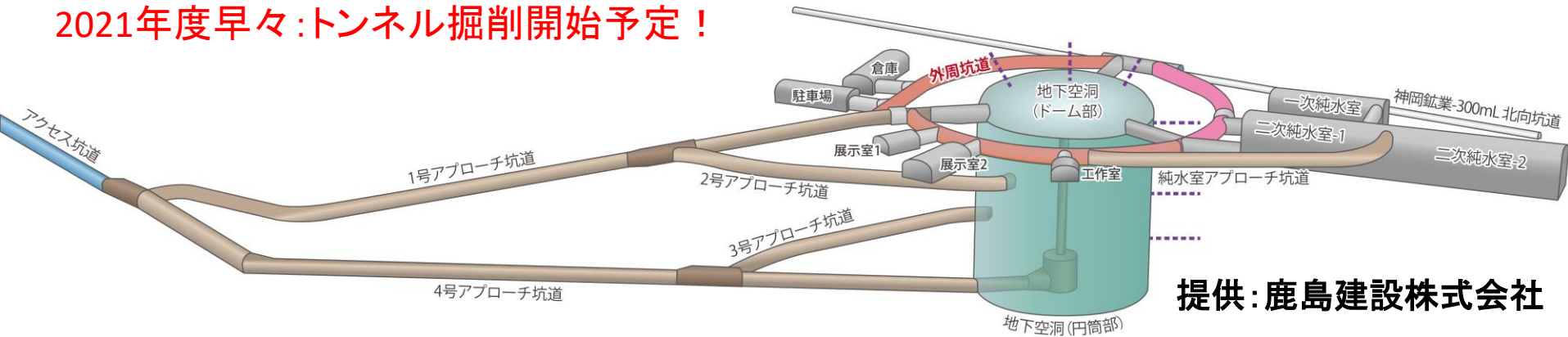
- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

HK掘削工事の概略図

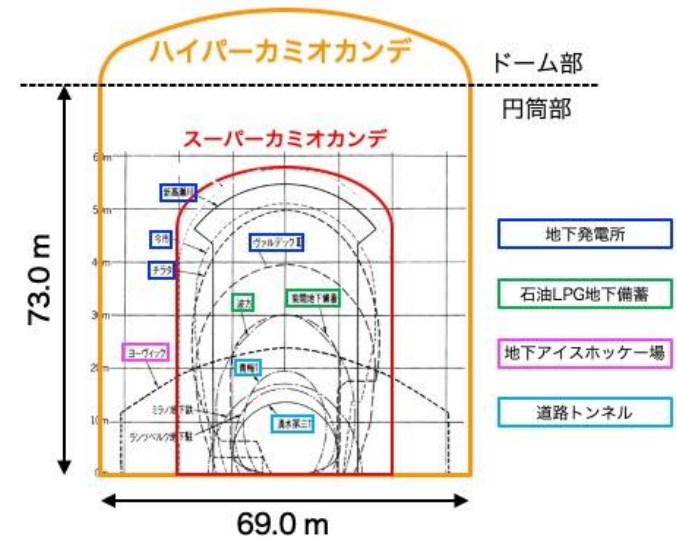
2021年度早々:トンネル掘削開始予定！



提供: 鹿島建設株式会社

史上最大規模の地下巨大空洞の掘削工事

- アクセストンネル: 約2kmの長さ
- アプローチトンネル: 空洞への取りつき用トンネル
- ドーム部: 最も難しい部分。岩盤変位を継続的に監視しつつ、塑性域を広げないように必要十分な支保を行いながら施工。
- 円筒部: ドーム部の安定性を確認しながら掘削を進める。最後は超高速でどんどん掘り進む予定。



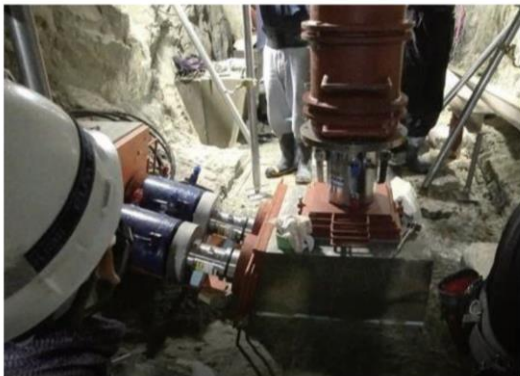
『トンネルと地下』1998年7月号 (土木工学社) に加筆

地質調査

- HKサイト = 飛騨片麻岩
 - ブラタモリでも話題に
 - 太古に造成された日本有数の堅牢な岩盤
- 長年の調査結果の蓄積(2000年代初頭から)
- 2020年度の詳細地質調査
 - サイト位置の最終化完了
 - 詳細設計に必要な岩盤物性値等の取得OK



原位置試験:ロックせん断試験 原位置試験:初期応力試験

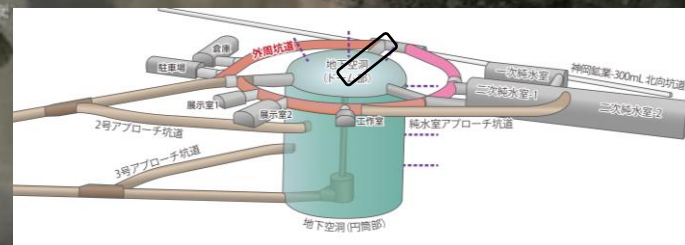


地質調査 (続き)



神岡鉱業既存坑道からの
調査坑道の掘削

3交代制で急速に掘削を進め、
HK水槽の中心に到達
地盤は固く想定通り



地質調査 (続き)



ドーム部の中心地点には、
地質調査業者による
"HK中心"のマーク

日本での開発例

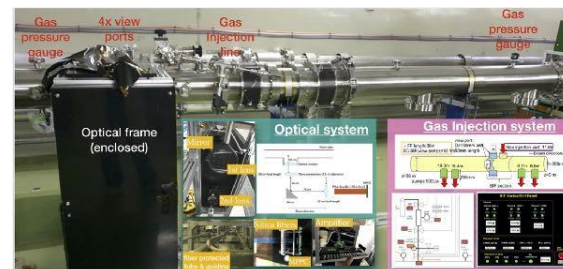
(大学のグループが多くに参加)

施設建設(空洞, 水槽等)に加え,
光検出器, 読み出し回路, DAQ, 純水システム,
較正システム, ビームライン, 前置検出器, ...
国際協力で建設を推進中

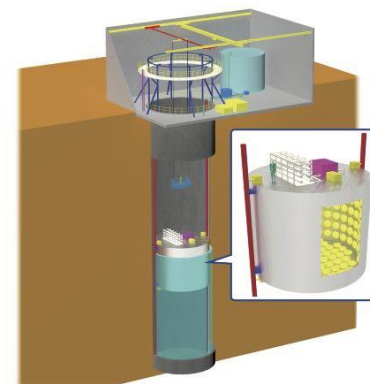
モックアップ@柏



新型ビームラインモニター

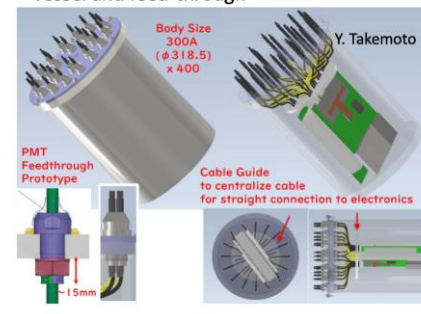


中間水チェレンコフ検出器



水中エレクトロニクス用容器

Vessel and feed-through



HK用光センサーの量産開始！



50cm口径の光電子増倍管の納入開始。
長期使用のための基本的確認と
性能測定を逐次実施。

内容

1. はじめに

- ①物理学の目指すところ
- ②物質優勢宇宙の不思議



2. 直接測定するとはどういうことか

- ①宇宙線直接観測 (自分自身の経験として)
- ②外から見たスーパーカミオカンデ



3. ハイパーカミオカンデ計画

- ①ニュートリノと反ニュートリノの性質の違い
- ②建設状況の紹介



4. おわりに

まとめ

- ハイパーカミオカンデ計画：
素粒子・宇宙研究の国際的な基幹装置を20年以上に渡って提供
 - 幅広い物理ターゲット
 - ニュートリノ振動、核子崩壊、超新星爆発, etc.
 - 超巨大水タンクはとても汎用性の高い“ハイパー”な検出器
 - 物質優勢宇宙の謎に挑む！
 - もしニュートリノにおけるCP対称性が最大限に近く破れていたら、
省エネ主義の自然が無駄にそんなことするか？
- 初年度予算を含む2019年度補正予算が成立 ⇒ 計画が正式に開始
- 2020年3月より建設工事開始、順調な進捗
- 2027年の観測開始を目指す



ついに本格始動した 「ハイパーカミオカンデ計画」

～物質宇宙の起源を求めて～

“Yesterday’s discovery is today’s calibration, and
tomorrow’s background.”

-Richard Feynman & Valentine Louis Telegdi

- 「素朴な疑問」に回答できる道筋は想定できない
- それでも、成果が積み重なっていく「科学」は人類にとって最も強力な方法論
 - 特に物理実験では「想定外」の結果が新発見に！
 - それが次の発展の礎になる
- ハイパーカミオカンデで物質宇宙の起源解明をめざす
- さらに、装置が生み出すデータを虚心坦懐に解析、“unknown” unknowns を見つけたい