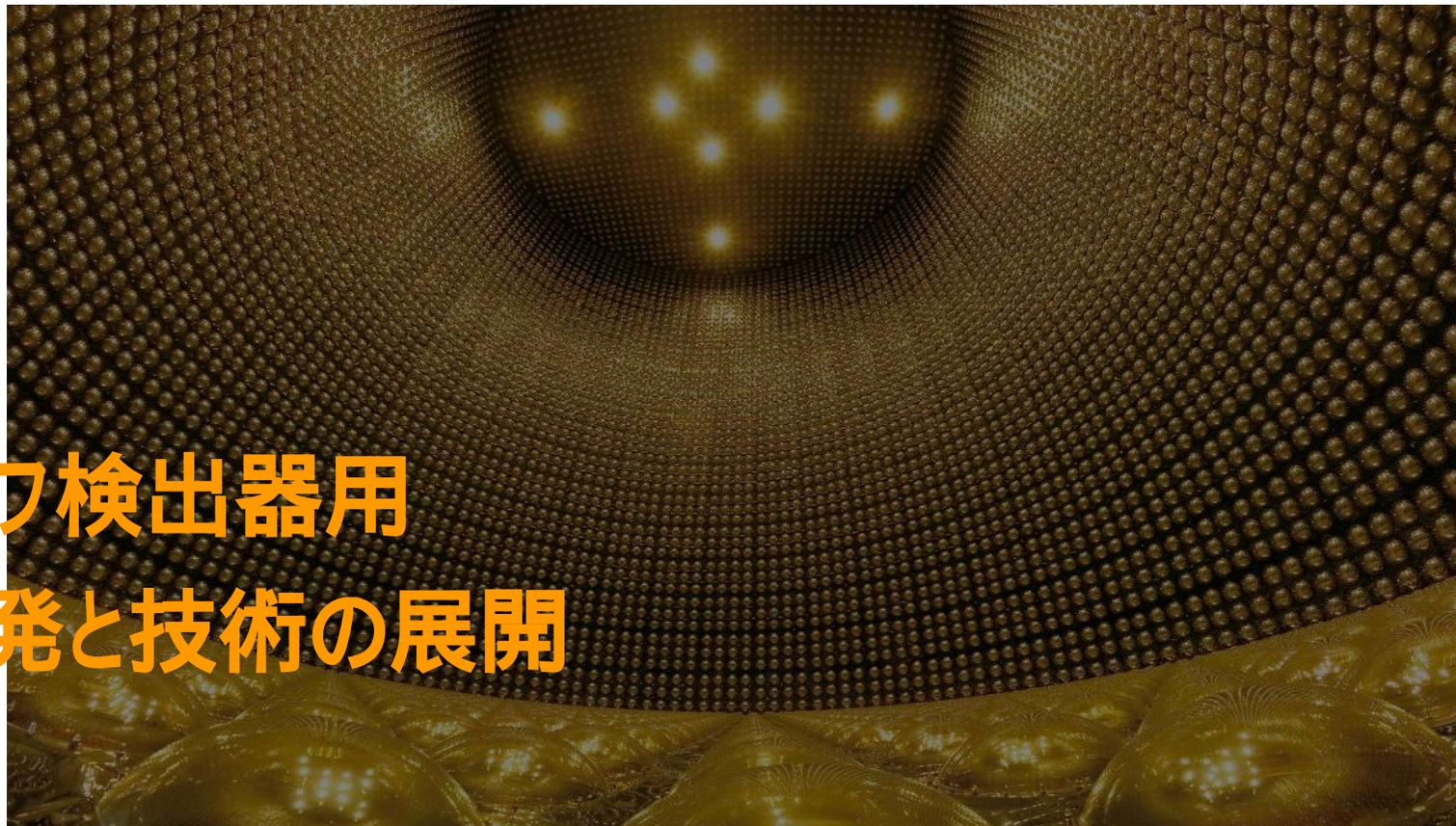


第12回超新星ニュートリノ研究会

# 大型水チェレンコフ検出器用 光検出器の開発と技術の展開



浜松ホトニクス株式会社

電子管事業部

大村 孝幸

2026.03.10



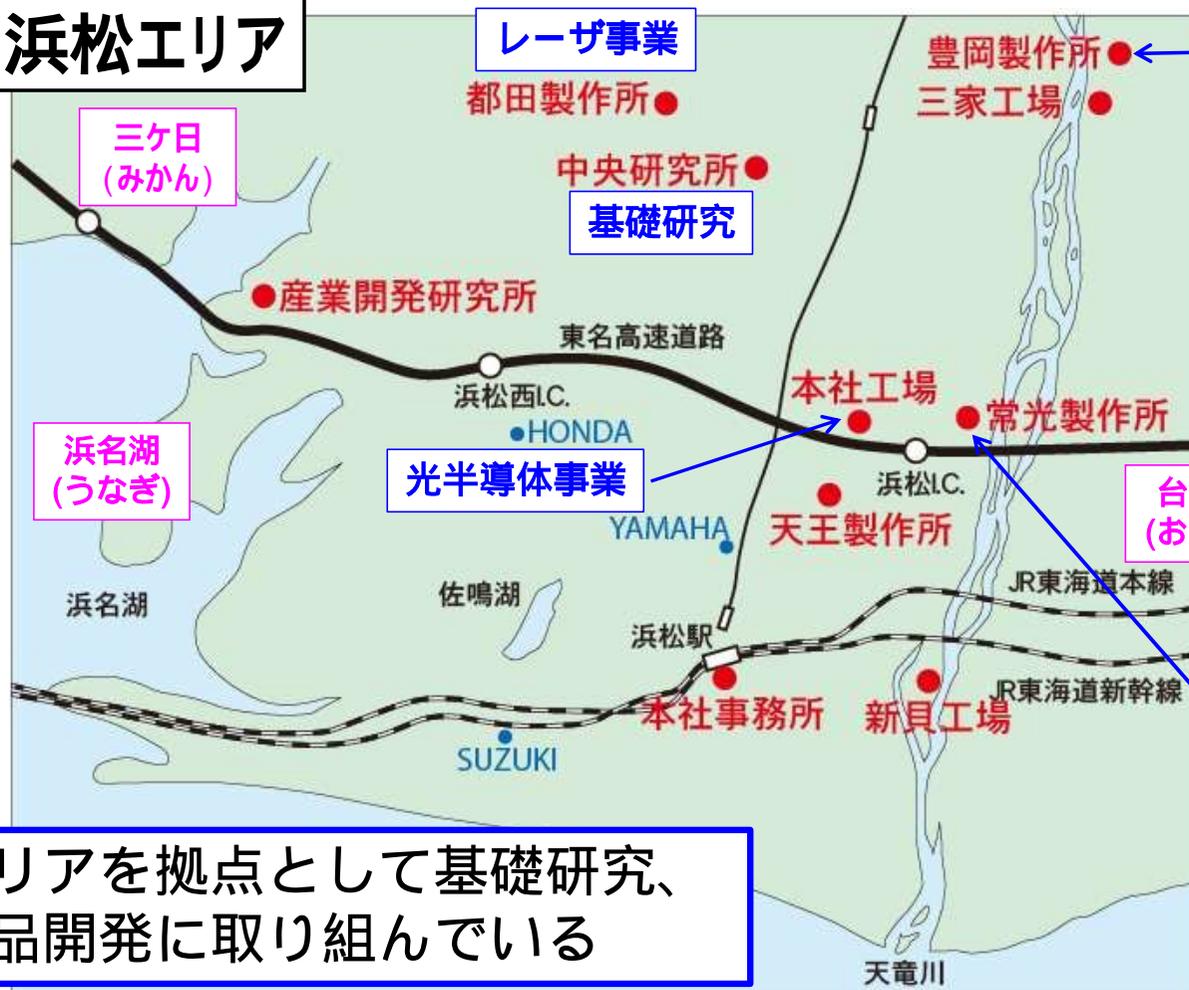
## 本日の発表内容

---

- **浜松ホトニクスとは？**
- **光電子増倍管（Photomultiplier Tube : PMT）とは？**  
動作原理、PMTの応用例
- **色々な宇宙線研究 ~ こんなところにもPMT ~**
- **大口径PMTについて** カミオカンデ、Super-K、Hyper-K
- **大口径PMTについて** HK用光電子増倍管のR&Dについて少しだけ
- **技術の展開：THz検出器の紹介**

# 浜松ホトニクスとは？ 所在地

## 浜松エリア



## 電子管事業部

### 光電子増倍管



- 世界シェア：約90%  
1959年より  
PMTの製造スタート

## 画像計測機器事業

浜松エリアを拠点として基礎研究、  
応用製品開発に取り組んでいる

## 本日の発表内容

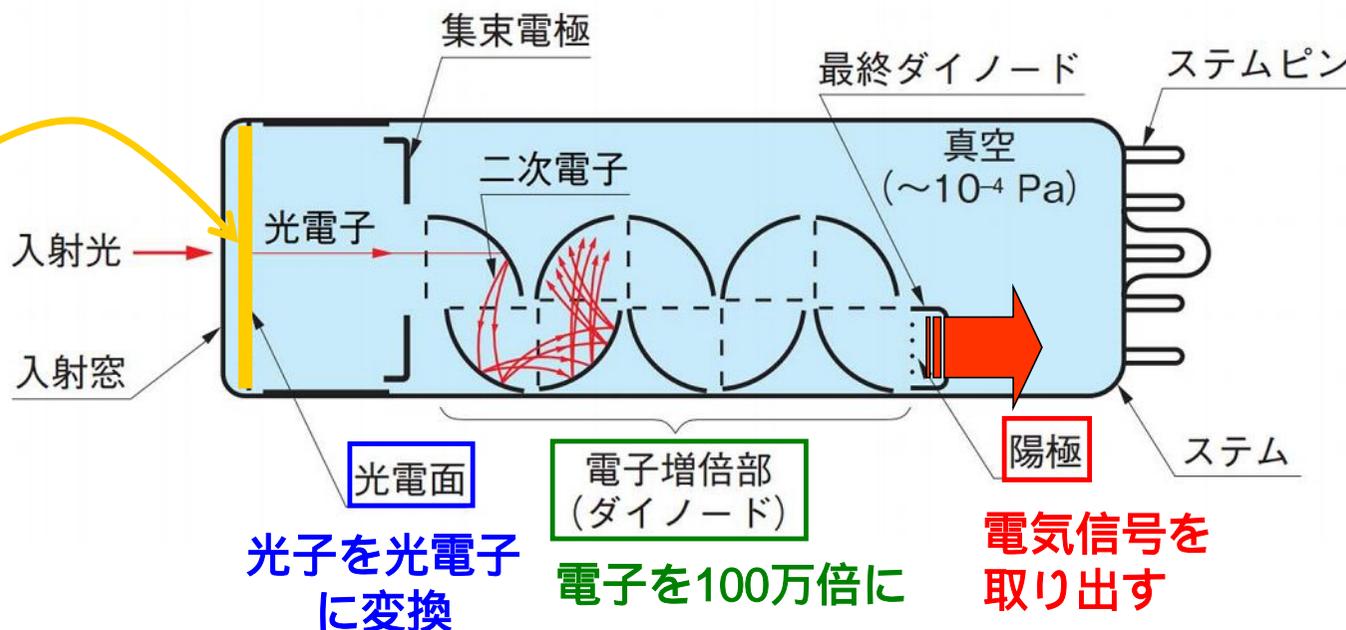
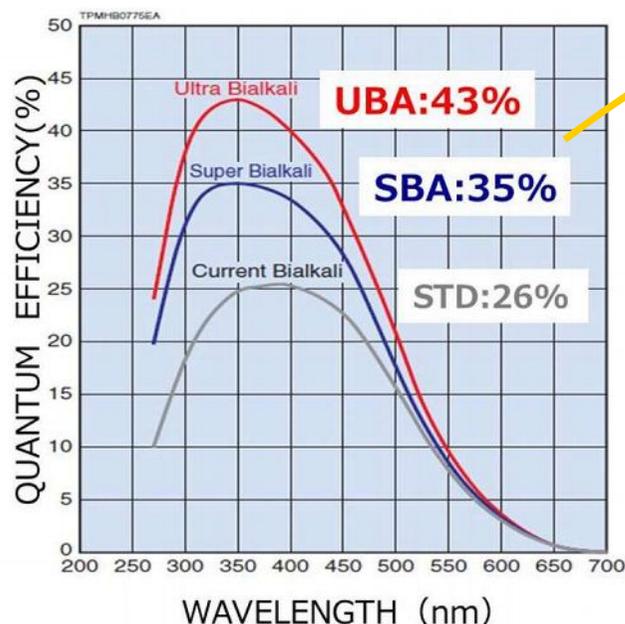
---

- 浜松ホトニクスとは？
- 光電子増倍管（Photomultiplier Tube : PMT）とは？  
動作原理、PMTの応用例
- 色々な宇宙線研究 ~ こんなところにもPMT ~
- 大口径PMTについて カミオカンデ、Super-K、Hyper-K
- 大口径PMTについて HK用光電子増倍管のR&Dについて少しだけ
- 技術の展開：THz検出器の紹介

# 光電子増倍管 (Photomultiplier Tube : PMT) とは？

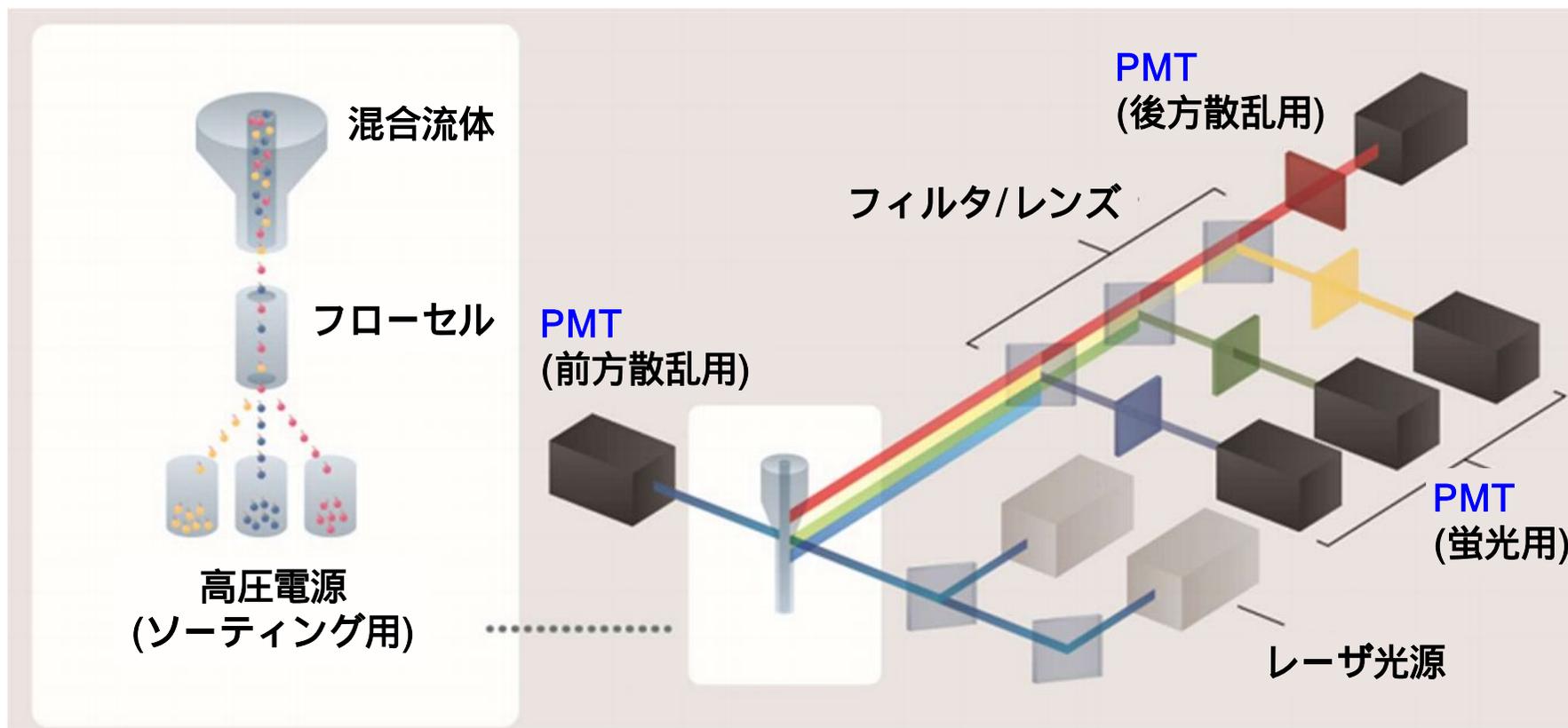
光電面で光子を光電子に変換し、それらを真空中で増倍させて陽極から電気信号として取り出す高感度な真空管の光センサー

光子から光電子への変換効率



## PMTの用途例：細胞分析装置（フローサイトメーター：FCM）

混合流体の中にある細胞の大きさや数量などを計測しながら、  
細胞の種類や特徴を分析する装置



ひとつひとつの細胞が反射光と蛍光を発するのでそれを調べる

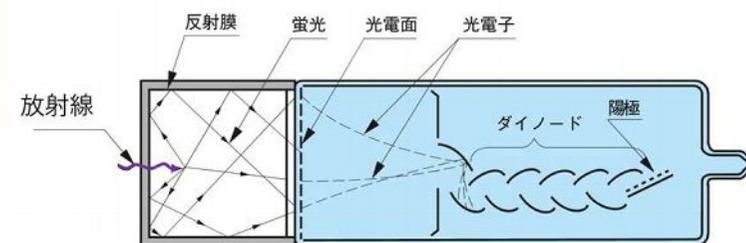
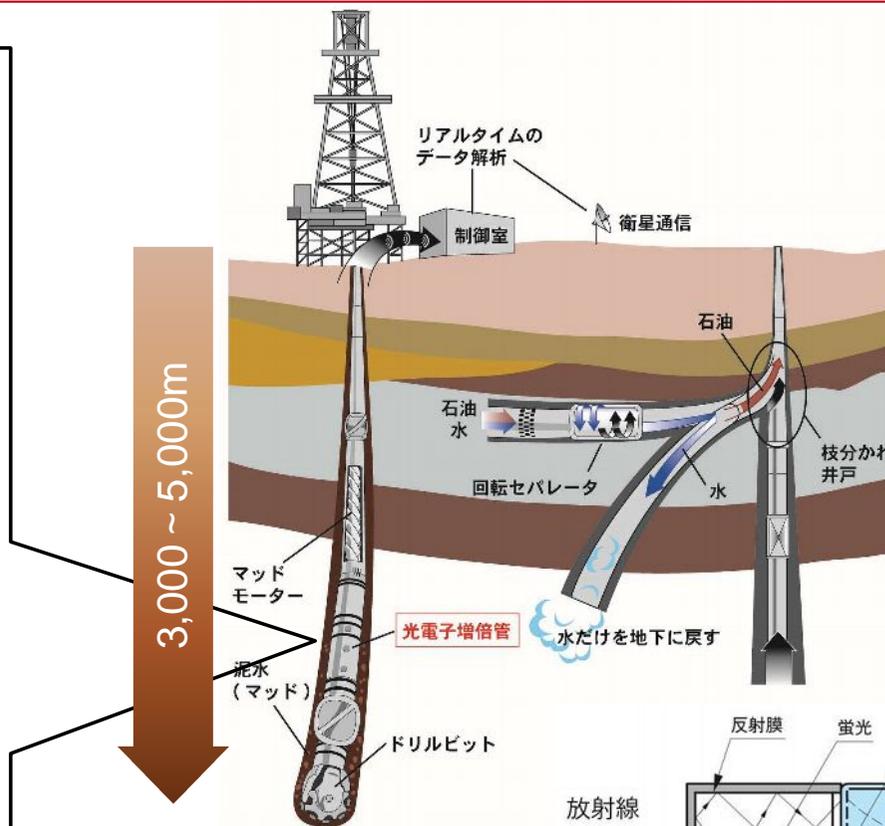
# PMTの用途例：油田探査

掘削しながら探す



**PMTへの要求**

- ~ 200
- 衝撃: 1000G
- 振動: 30G



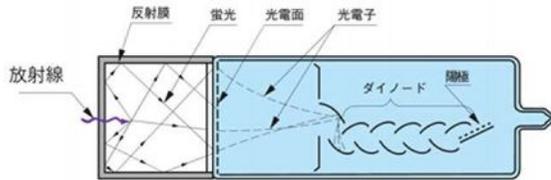
シンチレータ

PMT

ドリル部に放射線検出器(シンチレータ+PMT)を取付け、掘削しながら地層からの自然放射線をリアルタイム測定

# PMTの用途例：PET(核医学装置)

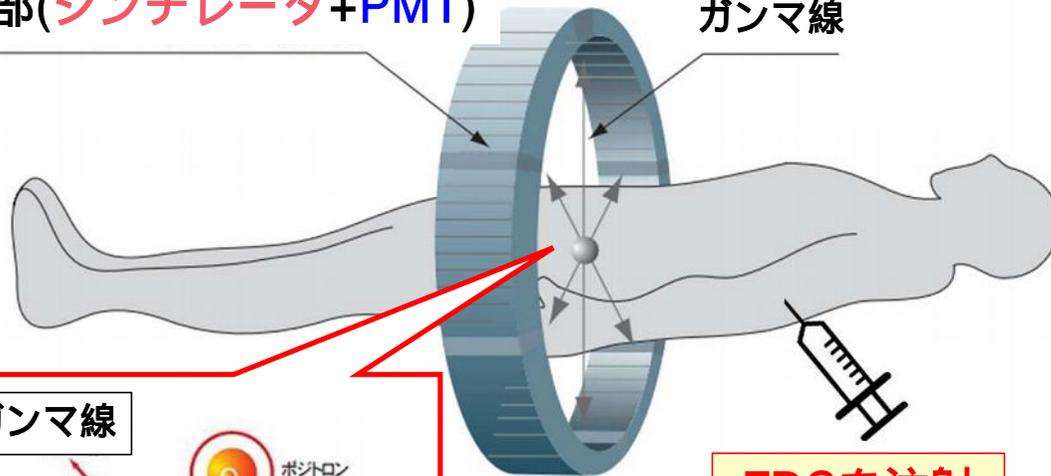
特定の臓器に集まる放射性トレーサーを使って病気を診断する装置



体の中にガンがあるかどうかを見る

検出部(シンチレータ+PMT)

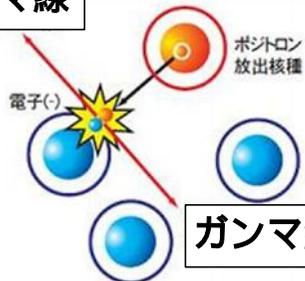
ガンマ線



FDGを注射

がん細胞に集積しやすい  
放射性トレーサー

ガンマ線



ガンマ線

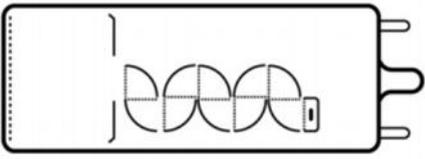
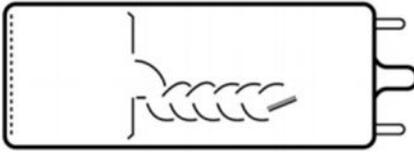
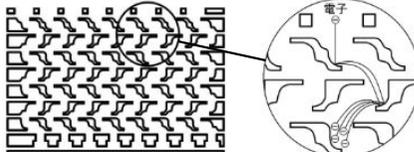
対向ガンマ線が出る



# PMTの電子増倍部の種類



用途で電子増倍部構造が異なる

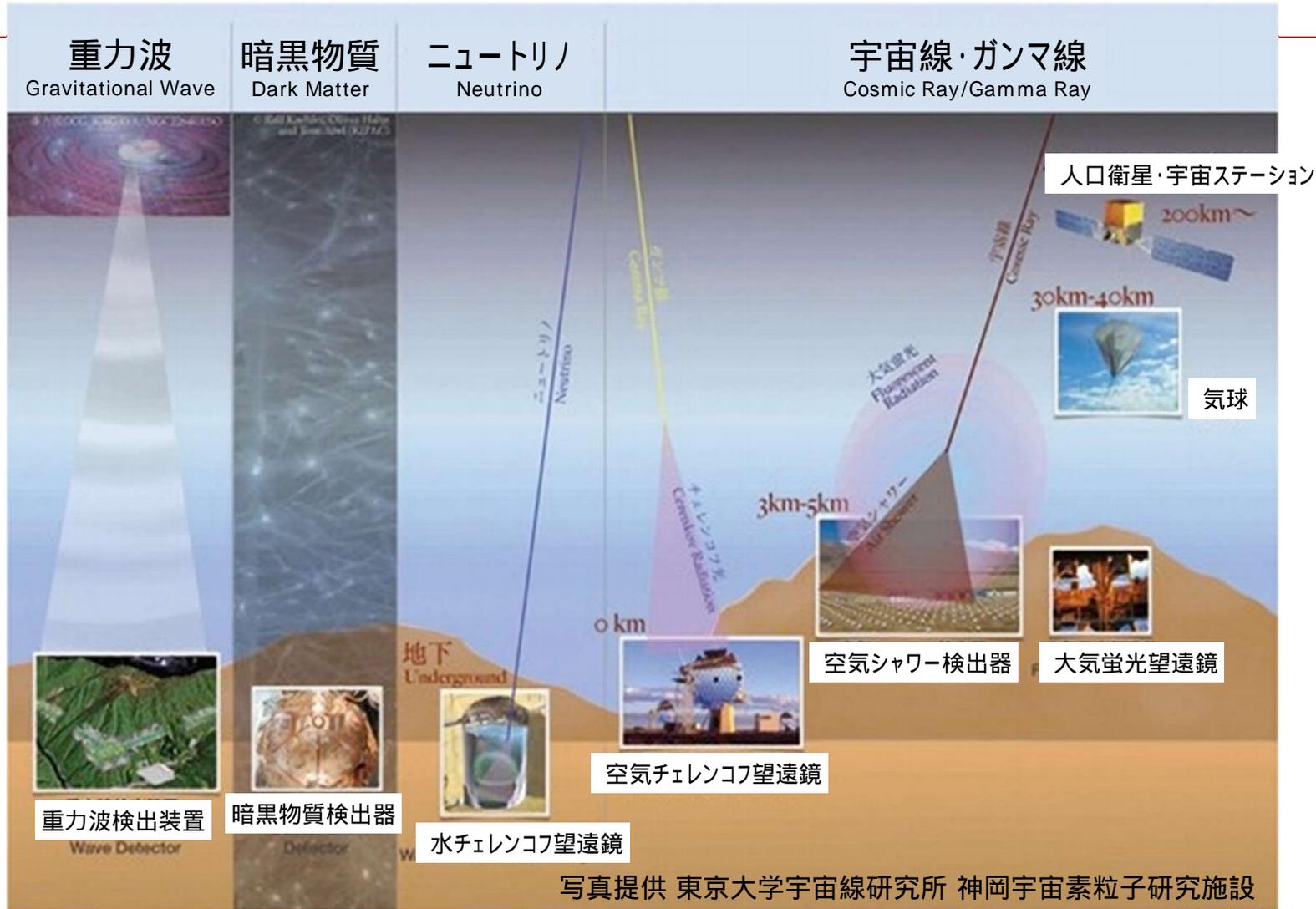
電子増倍構造（一例）	特長	用途
サーキュラ ケージ 	コンパクト 耐振性	分光分析(FCM) 油田探査
ボックス アンド グリッド 	高検出効率	放射線計測 医用
ライン フォーカス 	高速応答	医用(PET) HEP実験 素粒子物理実験
ベネシアン ブラインド 	大口径	HEP実験 素粒子物理実験
メタル チャンネル 	コンパクト	分光分析 医用 HEP実験

## 本日の発表内容

---

- 浜松ホトニクスとは？
- 光電子増倍管（Photomultiplier Tube : PMT）とは？  
動作原理、PMTの応用例
- **色々な宇宙線研究 ~ こんなところにもPMT ~**
- 大口径PMTについて      カミオカンデ、Super-K、Hyper-K
- 大口径PMTについて      HK用光電子増倍管のR&Dについて少しだけ
- 技術の展開：THz検出器の紹介

# 色々な宇宙線研究



# 色々な宇宙線研究：空気チェレンコフ望遠鏡

## Cherenkov Telescope Array (CTA)

天体の同定や宇宙論の研究



CTA大口径望遠鏡(LST)



約260本のモジュール  
焦点面カメラ



7本のPMT/モジュール

宇宙から地球に到来したガンマ線が大気と相互作用して発生するチェレンコフ光を捉える

スペイン領カナリア諸島ラパルマ島  
(チリ アタカマ砂漠パラナルにも設置予定)

重力波検出装置 (Wave Detector)

暗黒物質検出器 (Dark Matter Detector)

水チェレンコフ望遠鏡 (Water Cherenkov Telescope)

空気チェレンコフ望遠鏡 (Air Cherenkov Telescope)

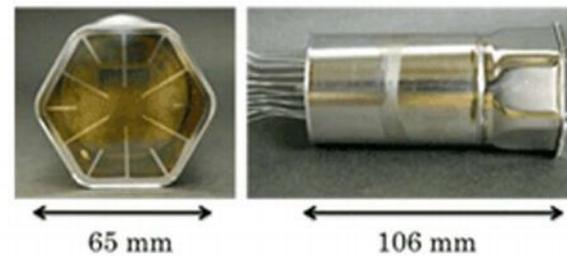
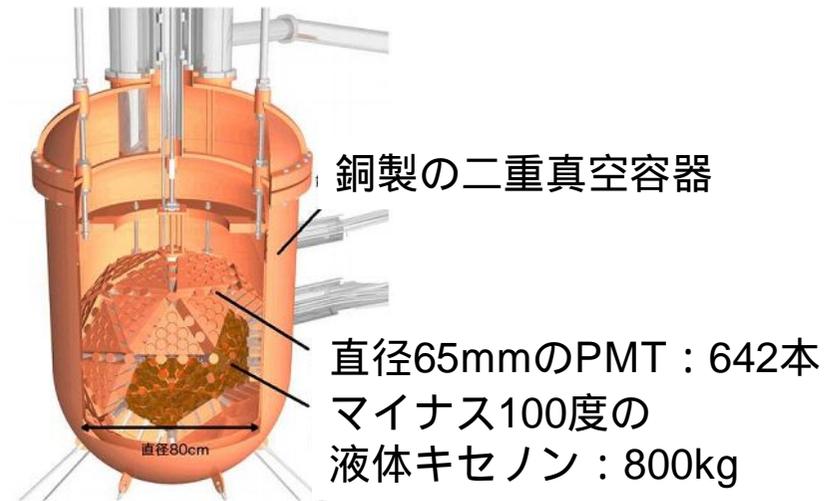
大気蛍光望遠鏡 (Atmospheric Fluorescence Telescope)

写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

# 色々な宇宙線研究：暗黒物質検出器

重力波 Gravitational Wave	暗黒物質 Dark Matter	ニュートリノ Neutrino
		
		
重力波検出装置 Wave Detector	暗黒物質検出器 Detector	水チェレンコフ望遠鏡 Water Cherenkov Telescope

## XMASS実験 現在はXENON nTが進行中 宇宙を構成する未知の物質の研究



暗黒物質が液体キセノンに衝突して  
放出した光を光電子増倍管で検出

写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

# 色々な宇宙線研究：水チェレンコフ望遠鏡

1983-1996  
カミオカンデ



超新星爆発  
および太陽  
からのニュート  
リノ検出

地下実験：神岡

ニュートリノ  
Neutrino

宇宙線・ガンマ線  
Cosmic Ray/Gamma Ray

1996-現在  
スーパーカミオカンデ

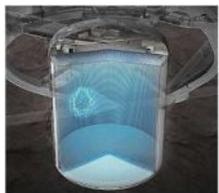


ニュートリノ  
振動の発見

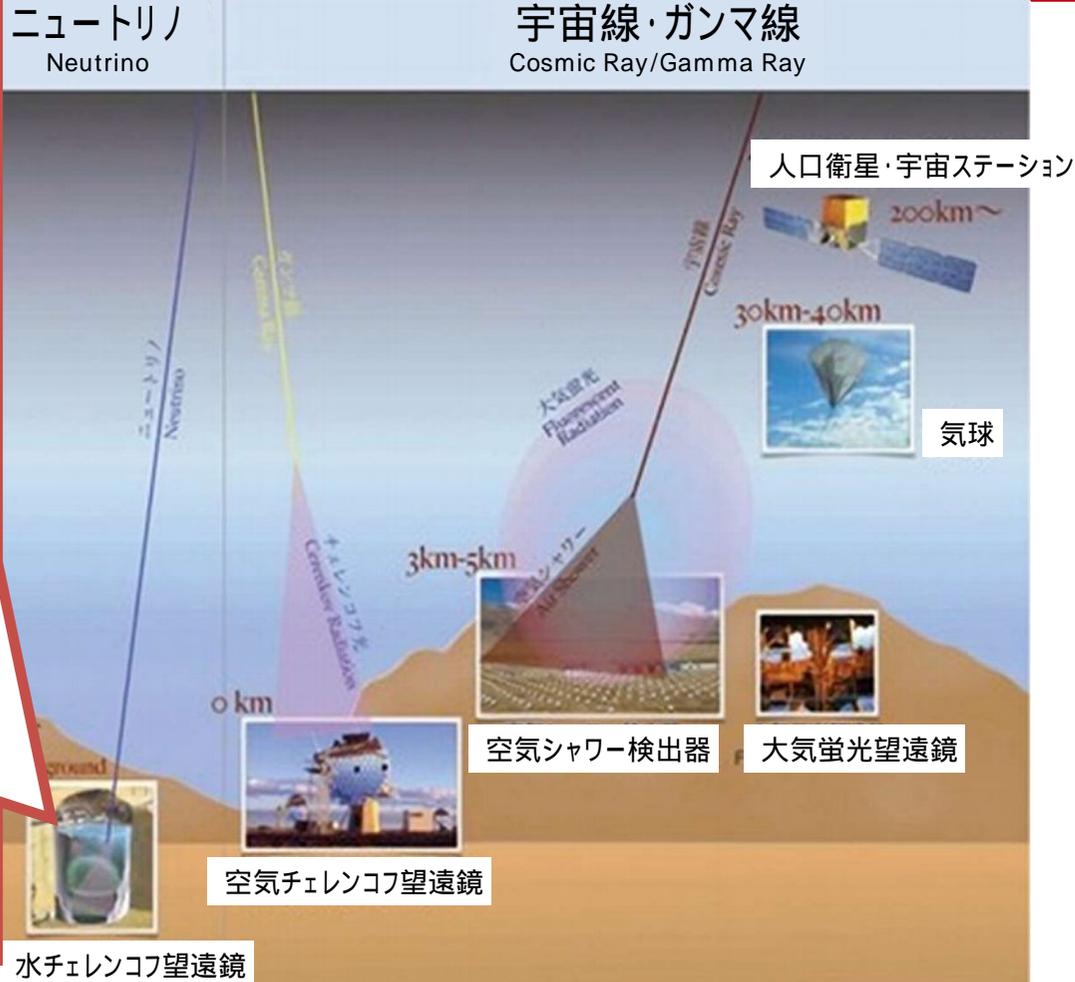


20インチ

2028-予定  
ハイパーカミオカンデ



・ CP対称性の破れ  
・ 陽子崩壊の探索



写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

## 本日の発表内容

---

- 浜松ホトニクスとは？
- 光電子増倍管（Photomultiplier Tube : PMT）とは？  
動作原理、PMTの応用例
- 色々な宇宙線研究 ~ こんなところにもPMT ~
- **大口径PMTについて**      カミオカンデ、Super-K、Hyper-K
- 大口径PMTについて      HK用光電子増倍管のR&Dについて少しだけ
- 技術の展開：THz検出器の紹介

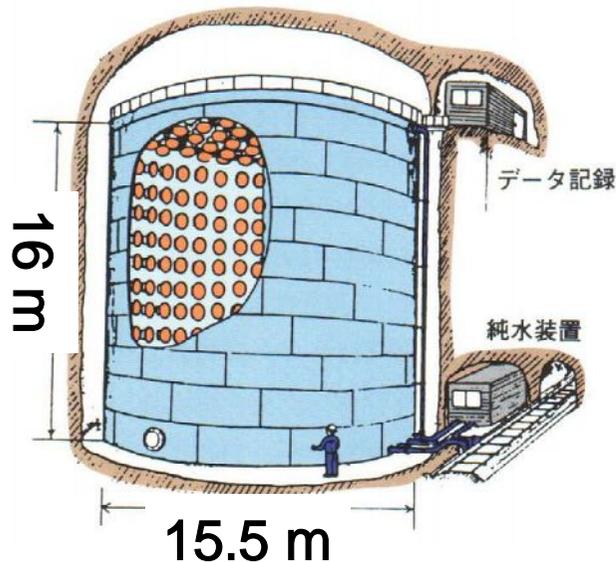
## カミオカンデ

### 目的

陽子崩壊の実証： $10^{32}$ 年の寿命

### 装置

#### カミオカンデ



- 3,000 トンの純水
- 1,000 本の光センサ(PMT)

### 大きな受光面

- 少ない本数で光をたくさん集めたい
- アメリカで計画中の陽子崩壊観測実験 (5インチPMTを使用)より早く成果を!

### 検出能力が高い

- 1光子まで捕らえたい
- 10億分の3秒の時間差を検出したい
- 100万倍に増幅したい

### 強度の高い構造

- 水深20m(3,000 トンの水タンク)でも壊れないガラス製真空容器 (10<sup>32</sup>個の陽子があるから、1回/年は陽子崩壊が起きるかも)
- 防水構造



(晝馬 当時社長)

できるかどうか分らんが  
とにかくやってみよう!!

# 世界最大のPMTの開発

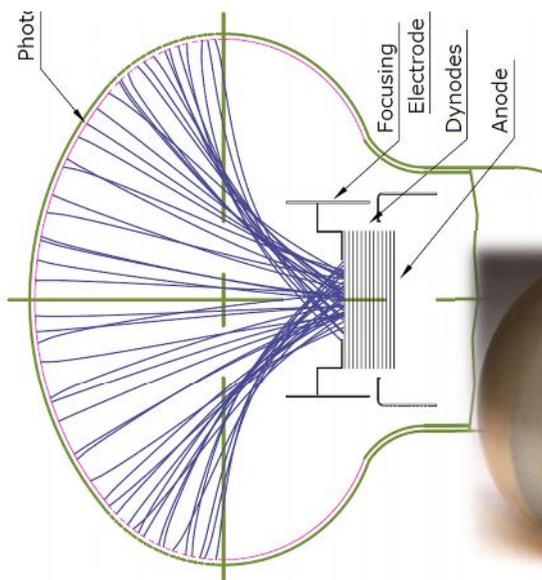
## サイズ

ガラスの精度などを検討し  
20インチ径



イメージは浮き玉(ブイ)

## 完成した20インチPMT (R1449)



開発に13ヶ月  
量産に16ヶ月  
1,050本 完納



## 形状

- 光電面のどこに入射しても同じ応答時間
- 光電子の収束効率が良い
- 水圧にも耐える



イメージは  
ラグビーボール

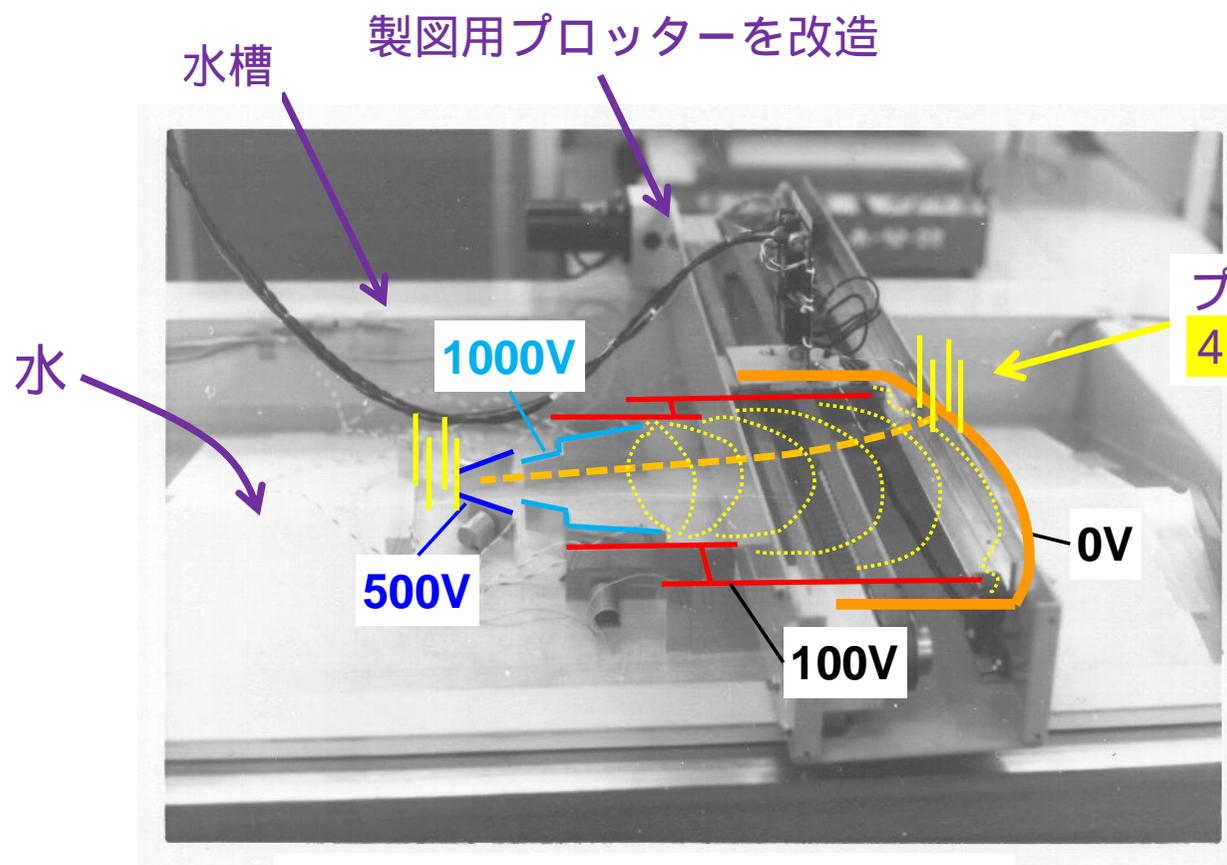
カミオカンデ用20インチ光電子増倍管の開発初期は・・・

---

20インチ光電子増倍管の電子軌道設計 開発初期は・・・

水槽で

## 水槽での電子軌道追跡（イメージです）



板金加工で、光電面と電極を作製  
各々に電圧をかける

針が電界を読み取って動いた  
軌跡（電子軌道）を記録

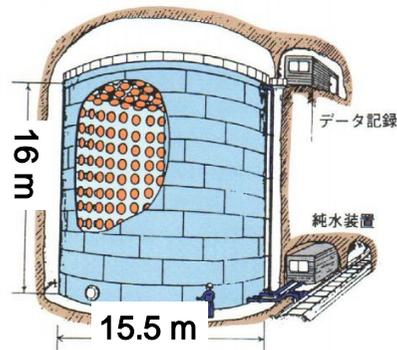
水面が波打つ=正確な軌跡が得られない  
誰もいない夜中に軌道解析することも  
会話厳禁・呼吸にも注意

# スーパーカミオカンデ

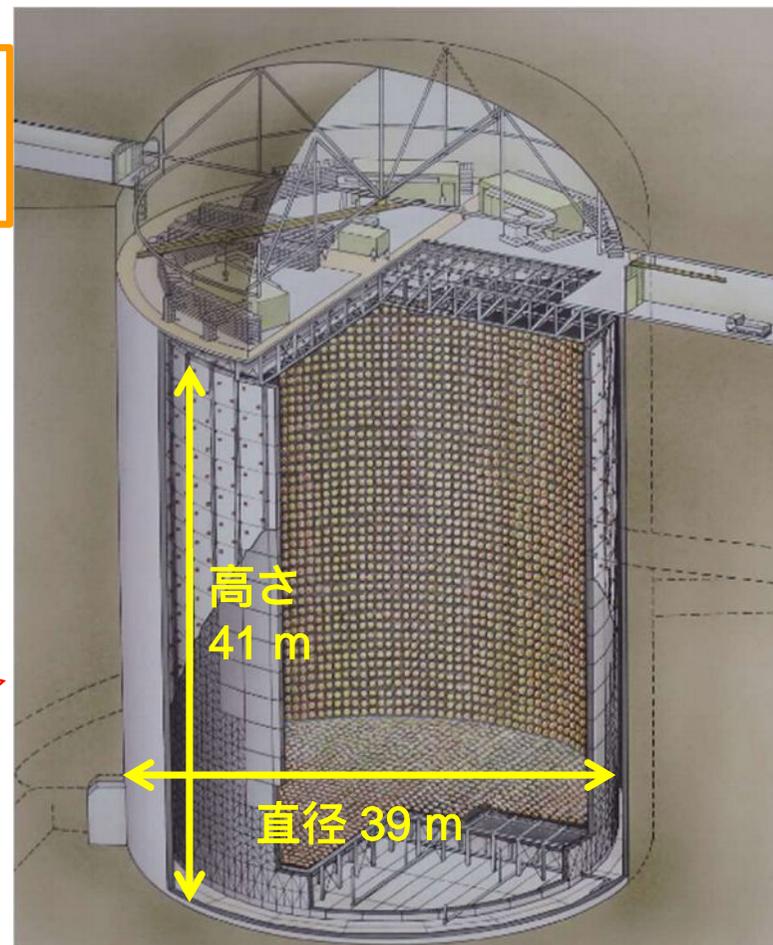
- 3,000トン      50,000トン (約20倍)
- ・タンク壁面のPMTに到達する光子は著しく減少
  - ・位置分解能の維持が難しくなる

- PMTへの特性改善要求
- ・1光子でも確実に検知できること
  - ・3ナノ秒以下の時間特性

## カミオカンデ

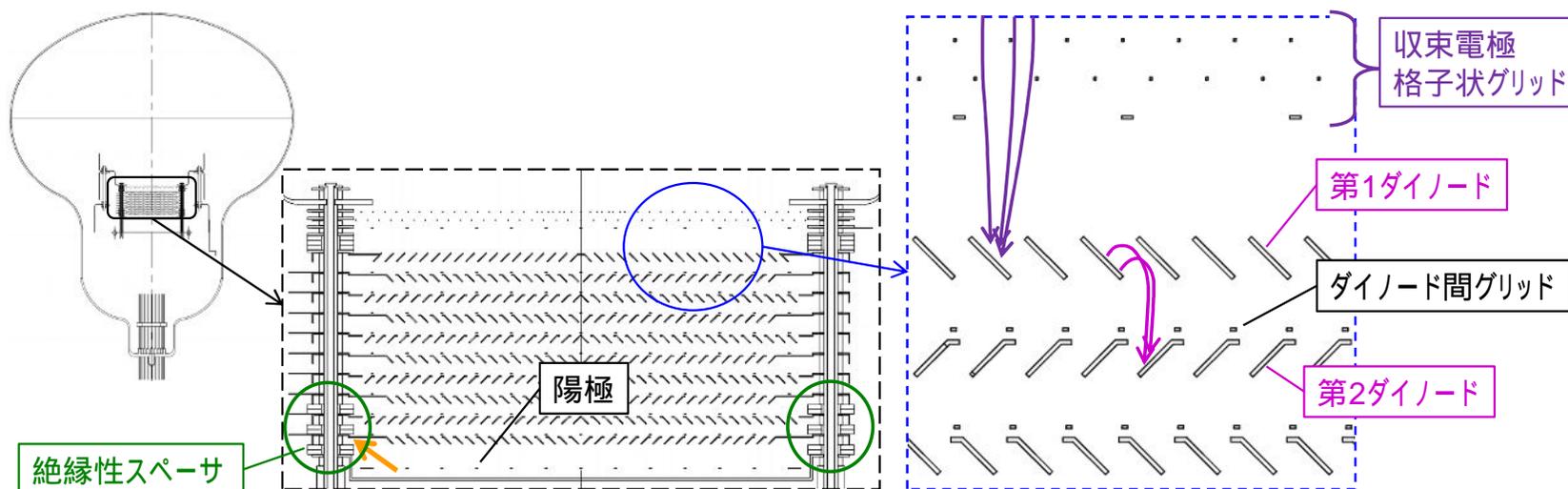


純水の量  
3,000 ton  
20吋PMT本数  
1,000 pcs  
実験スタート  
1983年～



純水の量  
50,000 ton  
20吋PMT本数  
11,200 pcs  
実験スタート  
1996年～

## R3600に導入した技術（特許構造）



## 収束電極（格子状グリッド）

- a) 光電子の第1ダイノードへの入射分布と入射効率が改善
- b) 第1ダイノード 第2ダイノードで、二次電子走行時間のばらつき解消

## 第1ダイノードと第2ダイノードの最適位置化

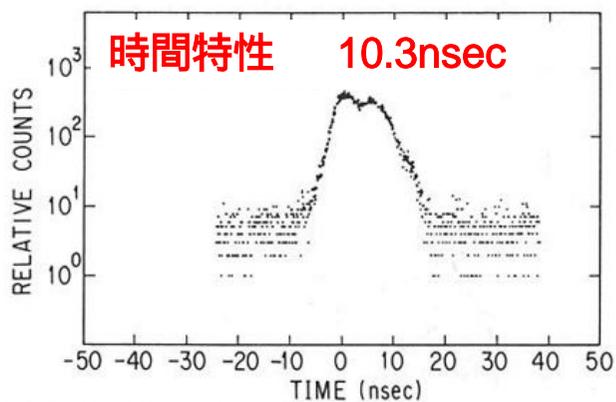
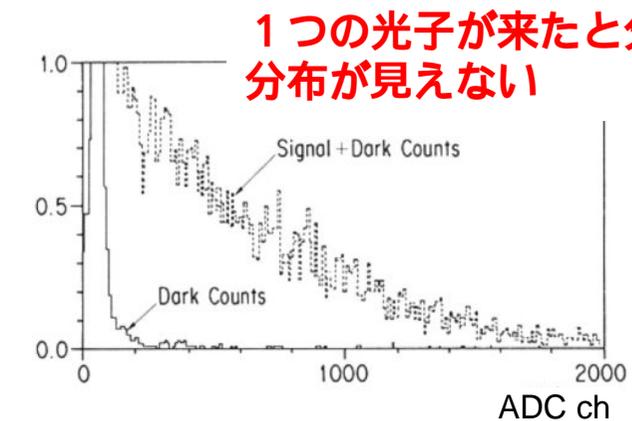
第1ダイノード 第2ダイノード で電子軌道を制御

## フレーム形状をした絶縁性のスペーサを使用

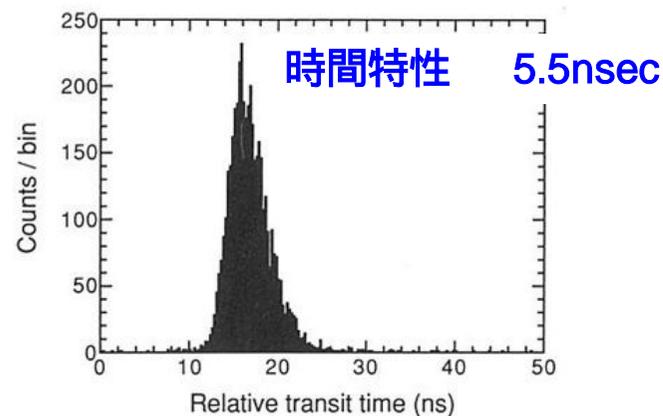
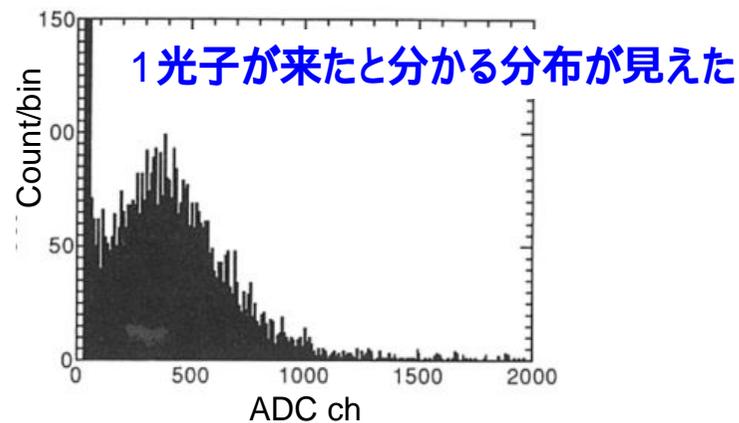
陽極付近で発生した微小な光・イオンが光電面へ戻らないようにする

# 特性比較

R1449 : カミオカンデ



R3600 : スーパーカミオカンデ



Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A329 (1993) 299-313

© Hamamatsu Photonics K.K. and its affiliates. All Rights Reserved.

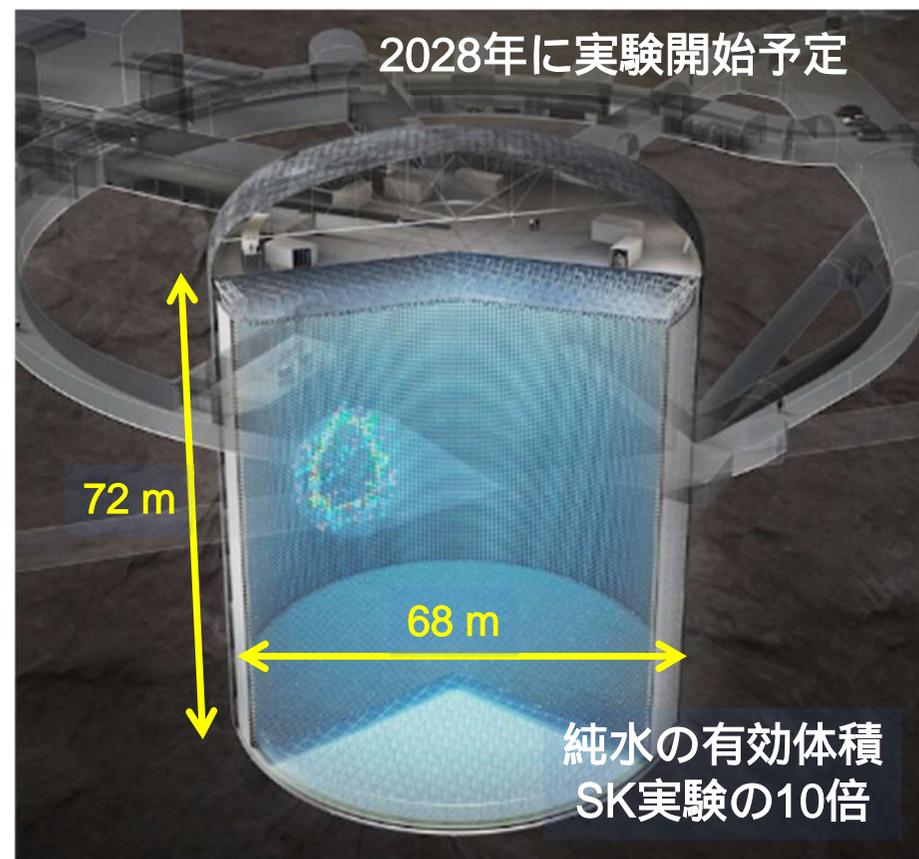
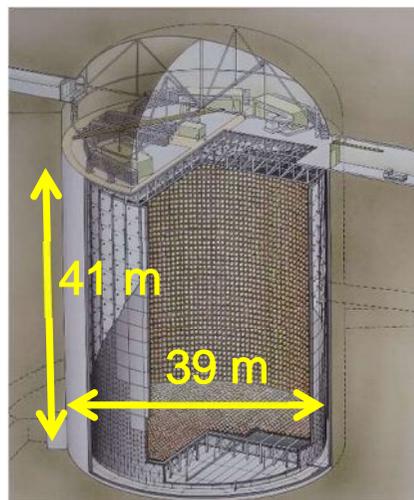
# ハイパーカミオカンデ(HK)

《 目的 》  
ニュートリノのCP対称性の破れ  
ニュートリノ振動、陽子崩壊など

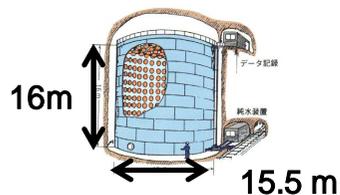
## ハイパーカミオカンデ実験 20インチPMT:40,000本相当

2028年に実験開始予定

スーパーカミオカンデ  
20インチPMT: 11,200本



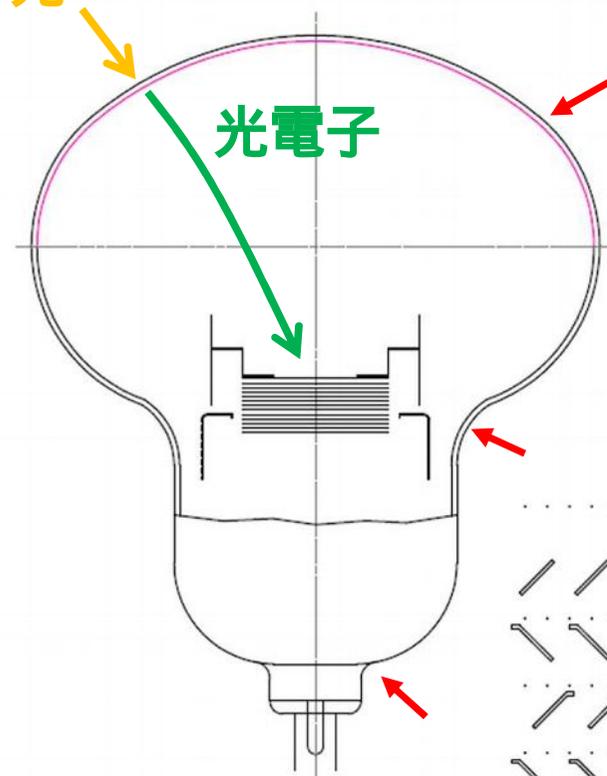
カミオカンデ  
20インチPMT: 3,000本



写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

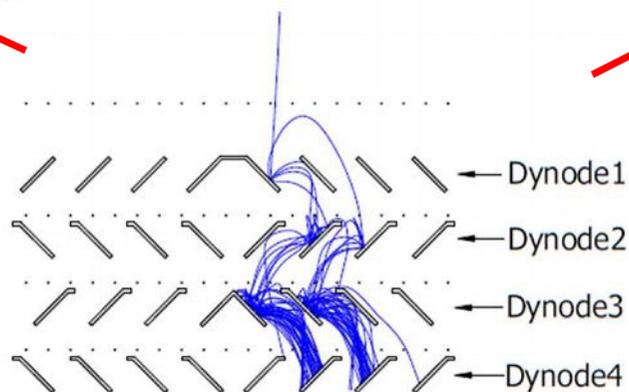
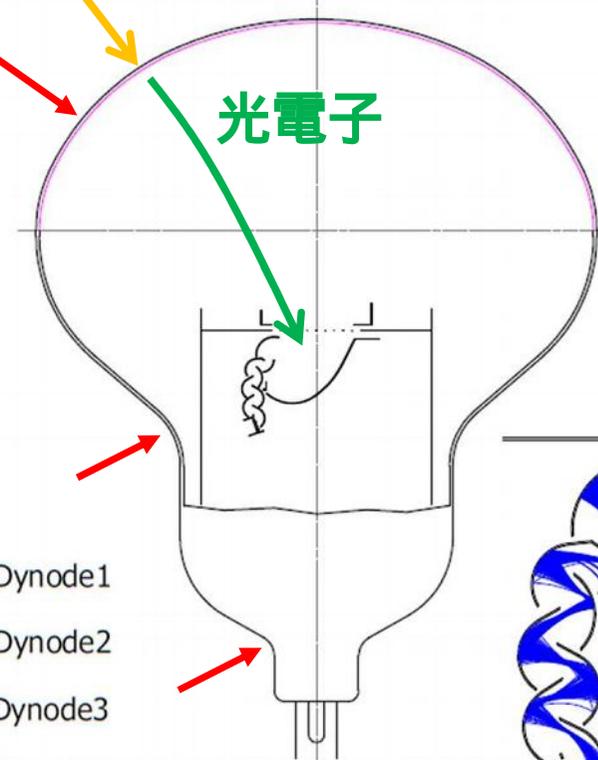
# R3600とR12860の構造比較

光 R3600 (SK用)

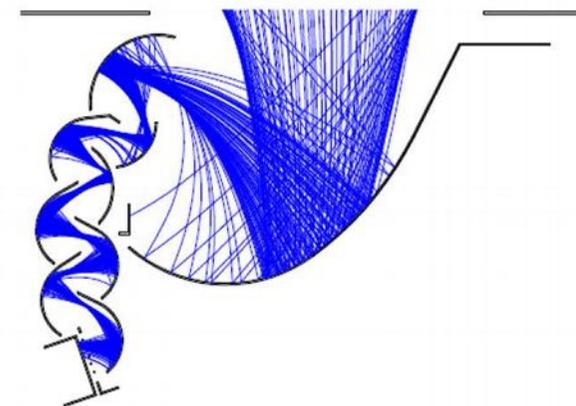


微妙に異なる

光 R12860 (HK用)

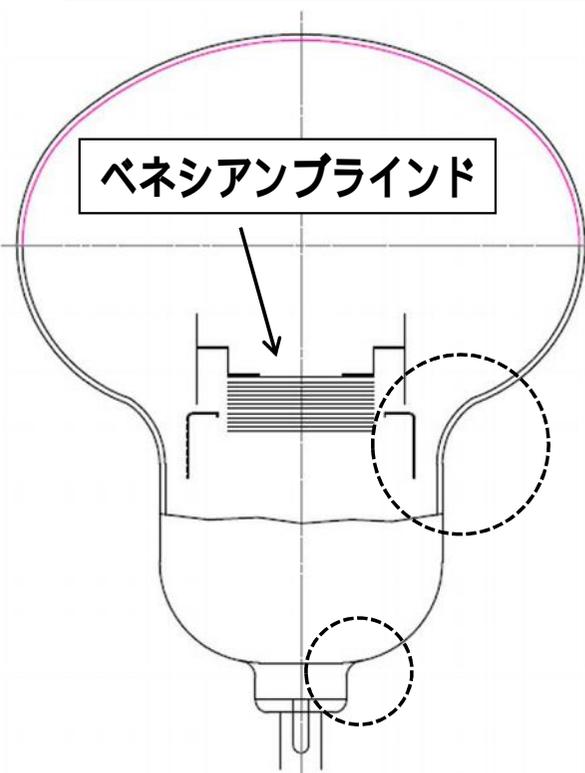


<ベネシアンブラインド型>



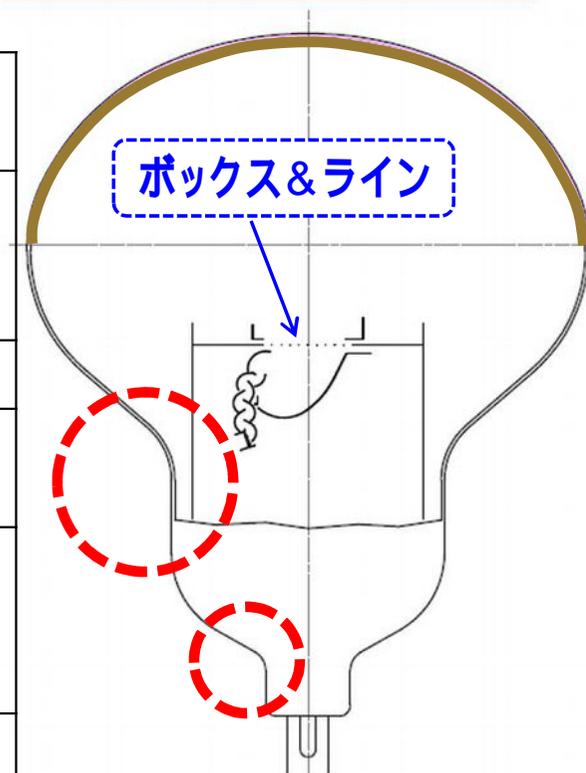
<ボックスライン型>

# HK実験用20インチPMTの開発



R3600 (SK用)

項目	R3600 SK用	R12860 HK用	備考
ダイノード	ベネシアン ブラインド	ボックス & ライン	
光子 光電子	22%	32%	1.45倍
1光電子を 判別できる確率	68%	95%	1.4倍
1光子を判別 できる確率 ( X )	15%	30%	2倍
時間特性	5.5nsec	2.4nsec	2.3倍
耐水深	60m相当	120m相当	2倍



R12860 (HK用)

シミュレーション技術(電子軌道、応力解析)とプレス加工機の向上で新構造の開発が可能に!

# ノーベル物理学賞の受賞

2002年: 小柴教授

《ニュートリノ天文学の幕開け》



R1449

2015年: 梶田教授

《ニュートリノに質量あり》



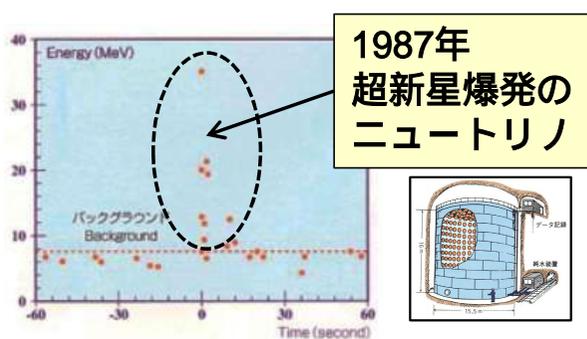
R3600

20??年: ? 教授

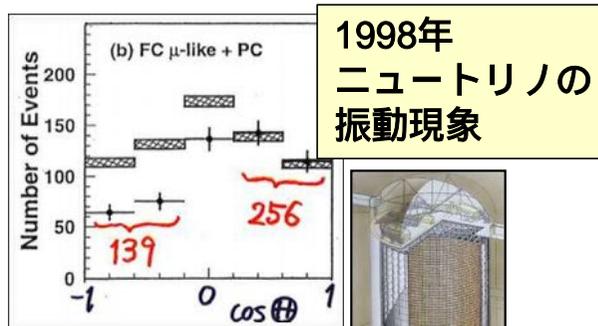
《宇宙の起源の解明》



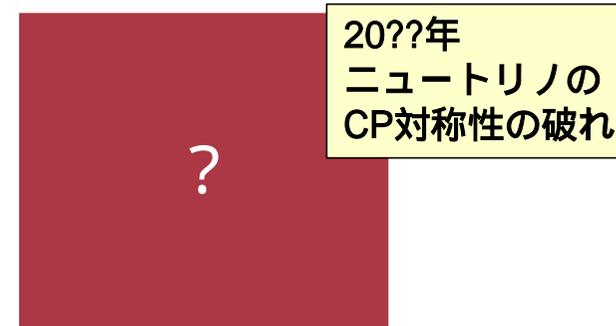
R12860



カミオカンデ



スーパーカミオカンデ



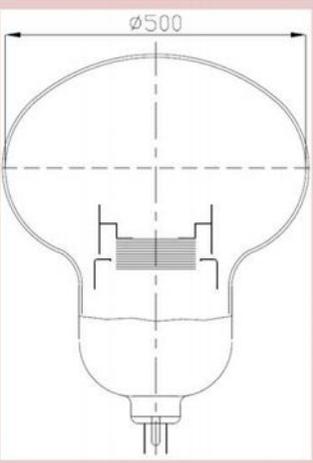
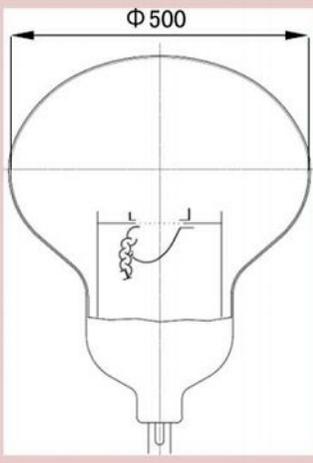
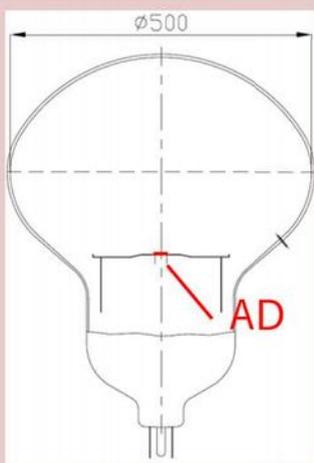
ハイパーカミオカンデ

## 本日の発表内容

---

- 浜松ホトニクスとは？
- 光電子増倍管（Photomultiplier Tube : PMT）とは？  
動作原理、PMTの応用例
- 色々な宇宙線研究 ~ こんなところにもPMT ~
- 大口径PMTについて カミオカンデ、Super-K、Hyper-K
- **大口径PMTについて** HK用光電子増倍管のR&Dについて少しだけ
- 技術の展開：THz検出器の紹介

# HK用光電子増倍管のR&D 少しだけ20インチHPDに関して

	R3600	20インチBox&Line	20インチHPD
構造			
動作電圧	2kV	2kV	8kV
CE	△	○	○
T.T.S	△	○	○
PHD	△	○	◎



8インチHPD

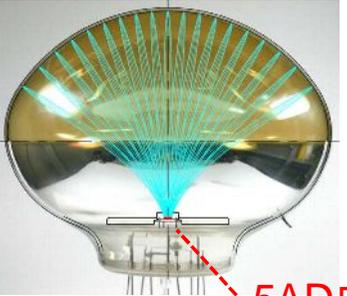
JSTプログラム：2009-2011  
「半導体素子増幅による光検出器の実用化開発」  
JST、浜松ホトニクス、東大

当時の  
予想

- 2011年12月7日：神岡での第1回ミーティング  
HPKから総合判断（総額、壁面有効面積率、実績など）でBox&Lineがベストと提案  
東大側からBox&Lineタイプと並行して、新しいセンサのR&Dをすべきとの提案
- R&Dとして、20 inch Box-Line PMT および **20 inch HPDの開発**を進めることになった  
（ 20吋HPDの開発期間は4年間：2012年10月～2016年9月 ）

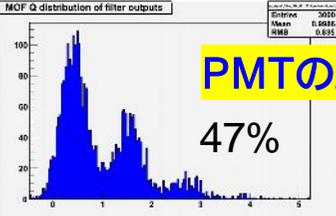
# HK用光電子増倍管のR&D 少しだけ20インチHPDに関して

8インチHPD



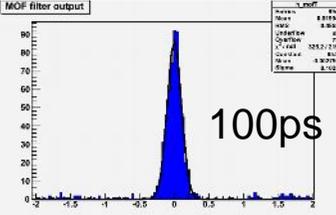
5AD内蔵

エネルギー分解能

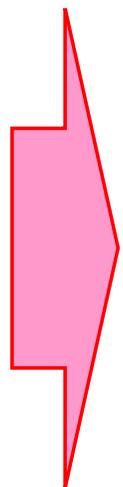


PMTの2倍  
47%

応答特性

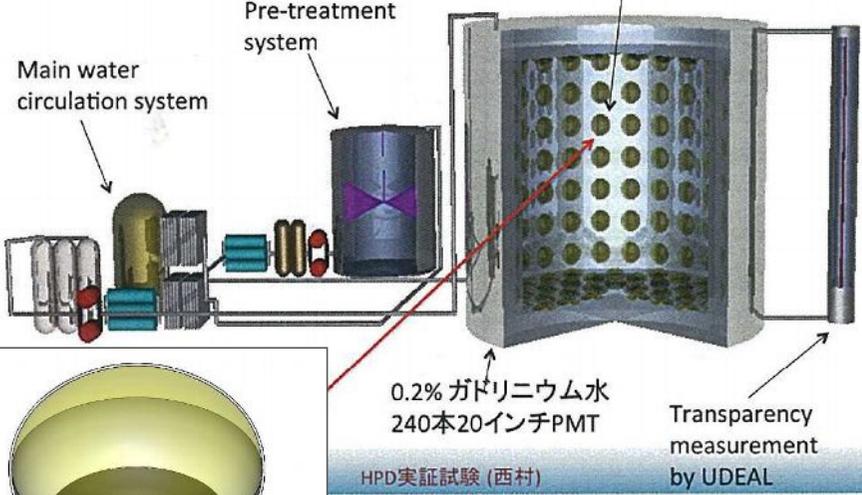


PMTの10倍  
100ps



## EGADS

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems  
ガドリニウムを入れた200トンのテストタンクによる実証実験



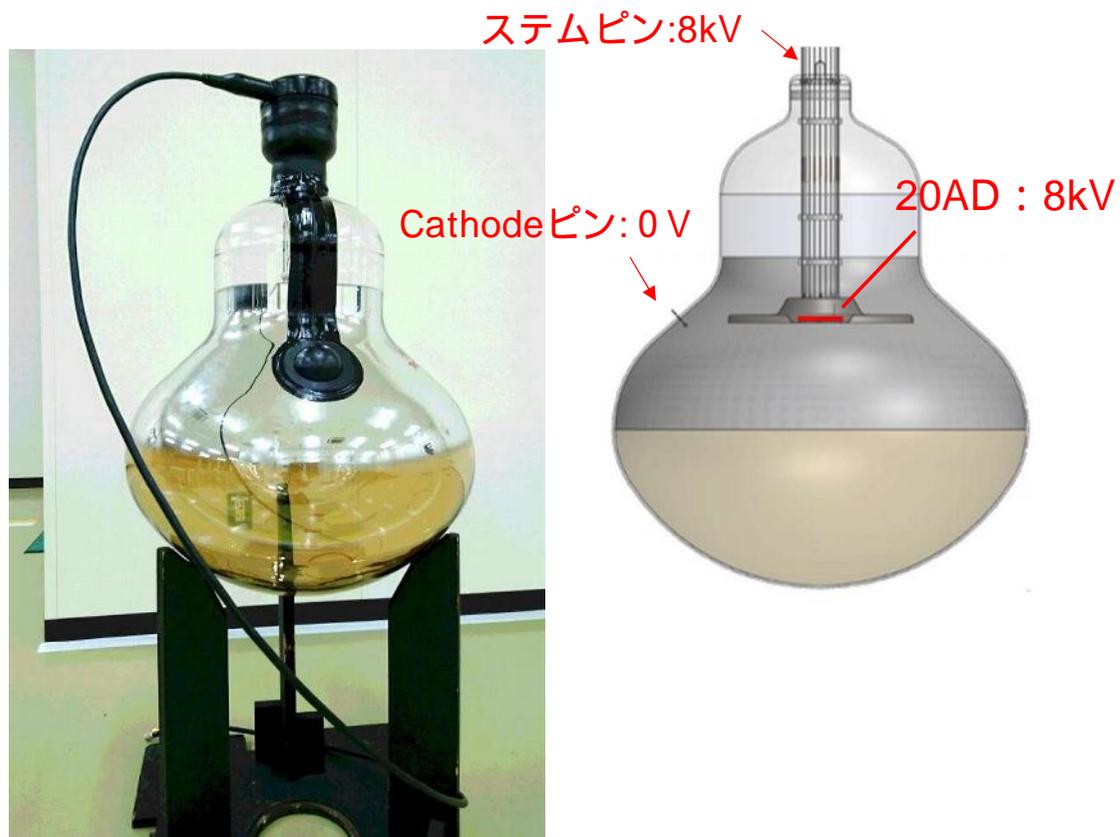
Main water circulation system  
Pre-treatment system  
PMTs  
0.2% ガドリニウム水  
240本20インチPMT  
Transparency measurement by UDEAL

HPD実証試験 (西村)



資料提供：東京大学宇宙線研究所

## HK用光電子増倍管のR&amp;D 少しだけ20インチHPDに関して



- 下記課題が未解決
  - バルブへのCathode電位ピン埋込は量産不向き
  - 発光問題：CathodeピンとSTEMピンの電位差8kV
  - 20ADの作製が困難
  - コスト：どう見積もってもBox&Lineより高い
- 特性面も・・・
  - 量子効率
    - 収集効率：磁場の影響も
    - 時間特性

## 本日の発表内容

- 浜松ホトニクスとは？
- 光電子増倍管（Photomultiplier Tube）の動作原理、PMTの応用例
- 色々な宇宙線研究 ～ こん
- 大口径PMTについて カ
- 大口径PMTについて HI



- **技術の展開：THz検出器の紹介**

2025年春より受注開始

## テラヘルツ波とは？



### <THz波の特長～光と電波の中間領域～>

- 非金属（布、紙、木材、プラスチック、陶磁器）を透過
- 人体への影響が少ない
- 水に敏感
- 化学物質に特徴的な吸収スペクトルを持つ

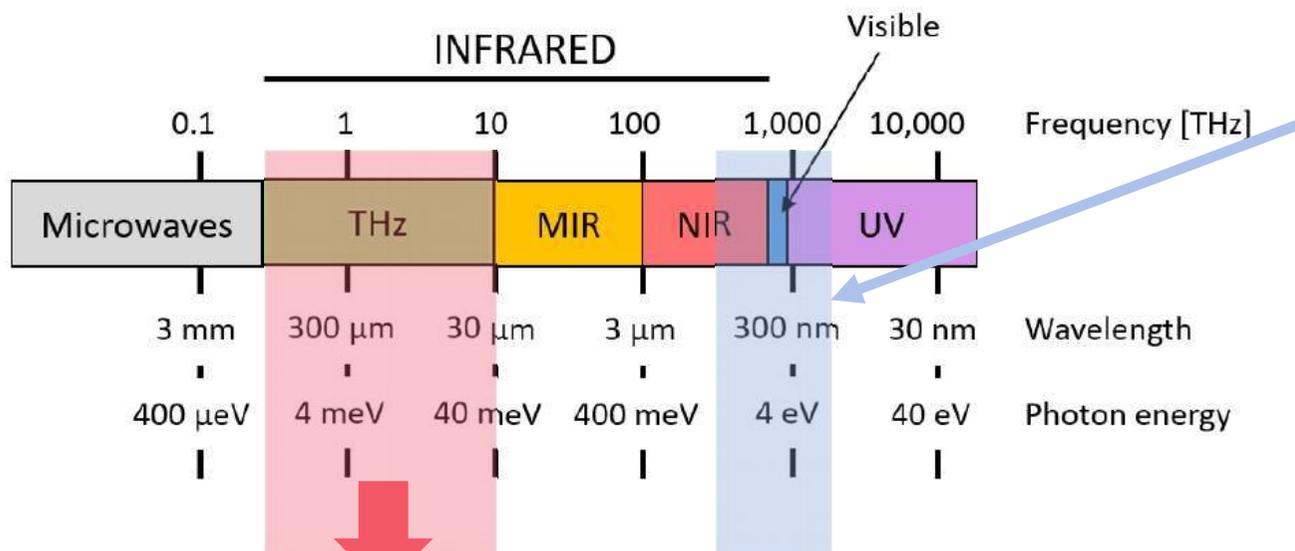
セキュリティ検査

麻薬・爆薬検査

医薬品検査

薄膜検査

# 開発のモチベーション



PMTが取り組んできた領域  
(VUV ~ NIR域)



## テラヘルツ領域

光電効果を利用した従来のPMTでは  
エネルギーが低いTHz波の検出は困難

## ターゲットアプリケーション

- ◆ 生体に無害な非破壊検査
- ◆ 化学物質の同定
- ◆ 半導体検査への応用

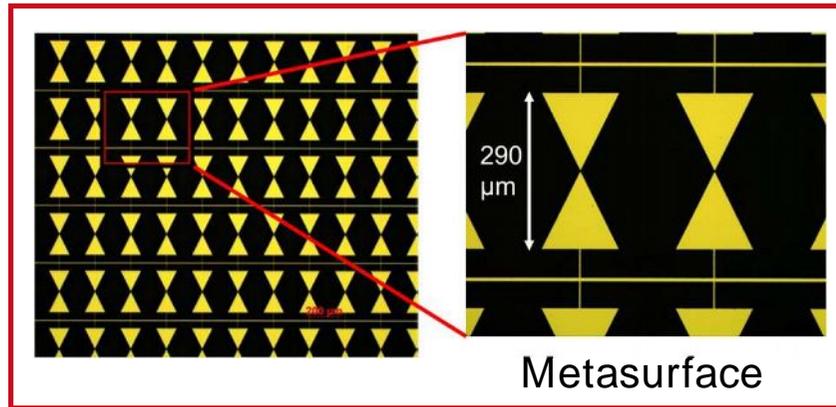
新しいアプリケーション創出を目指しTHz-PMTとTHz-I.I.を開発

# THz Photomultiplier Tube (THz PMT)の開発

Principle of Electron Conversion Using Metasurfaces

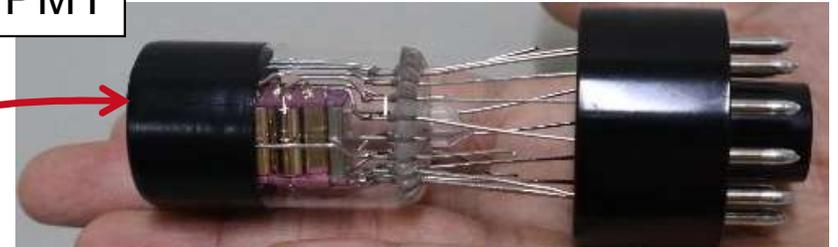
## テラヘルツ波を電子変換するメタサーフェスを開発

デンマーク工科大学と共同研究

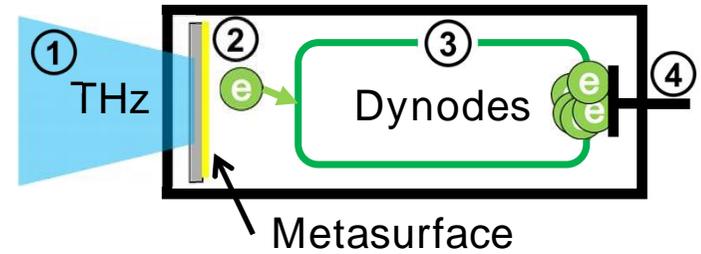


THz PMT

S. Lange et al., Laser Photonics Rev. 18, 2300417 (2024).

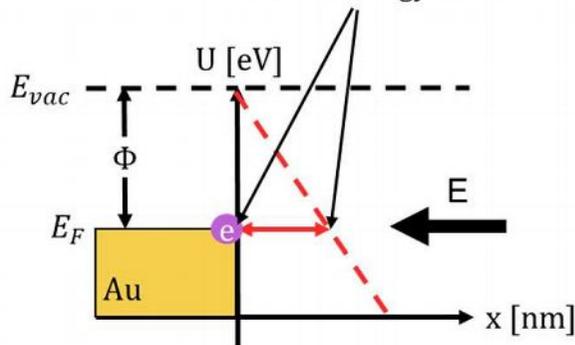


THz    Electron    Multiplication    Output

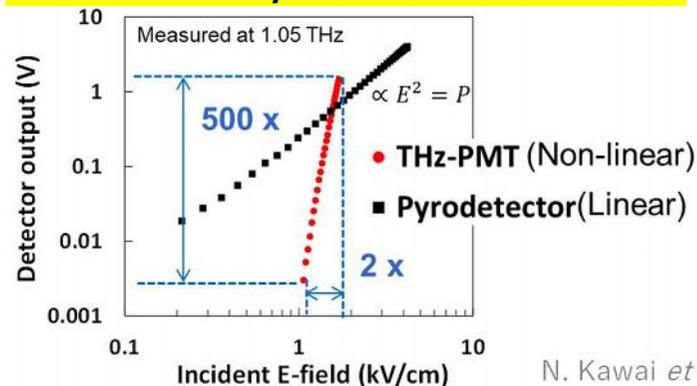


### Field Electron Emission

Same energy level



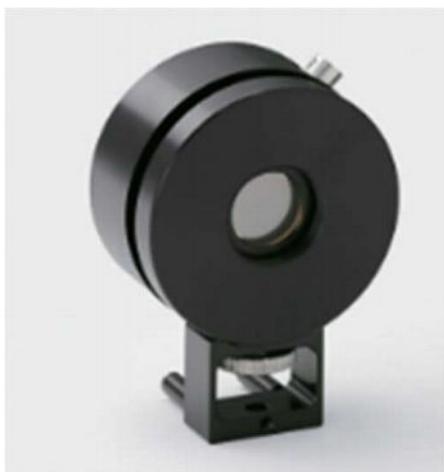
### Nonlinear Response Characteristics



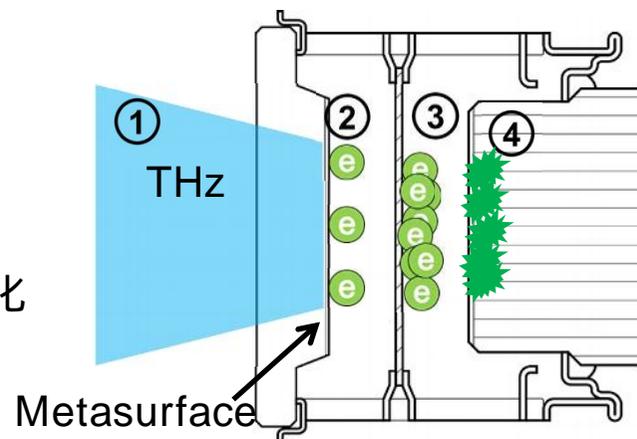
- field emission の原理で電子放出  
テラヘルツ電界強度を直接計測
- 微小なTHz波電界強度の変化を高感度検出
- アンテナデザインで中赤外-THz領域内の狙った波長に感度を持つ

N. Kawai et al., IRMMW-THz, Tu-PM1-1-1 Laser Sources & Detectors III (2023)

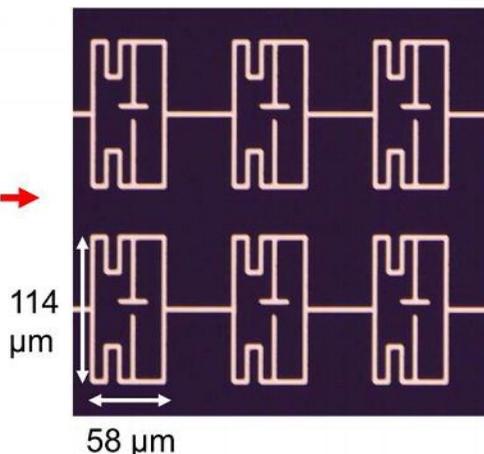
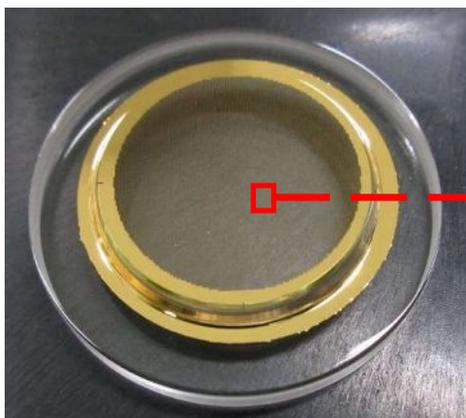
# THz-Image Intensifier ( THz I.I. ) の開発



手のひらサイズ  
バッテリー駆動  
手元でテラヘルツ波を可視化



THz    Electron    Multiplication    Phosphor



メタサーフェス光電面

- I.I.の面板裏面にメタサーフェスを直接描画
- メタサーフェスエリア： 18 mm
- メタサーフェス感度範囲：0.1 ~ 1.5THz

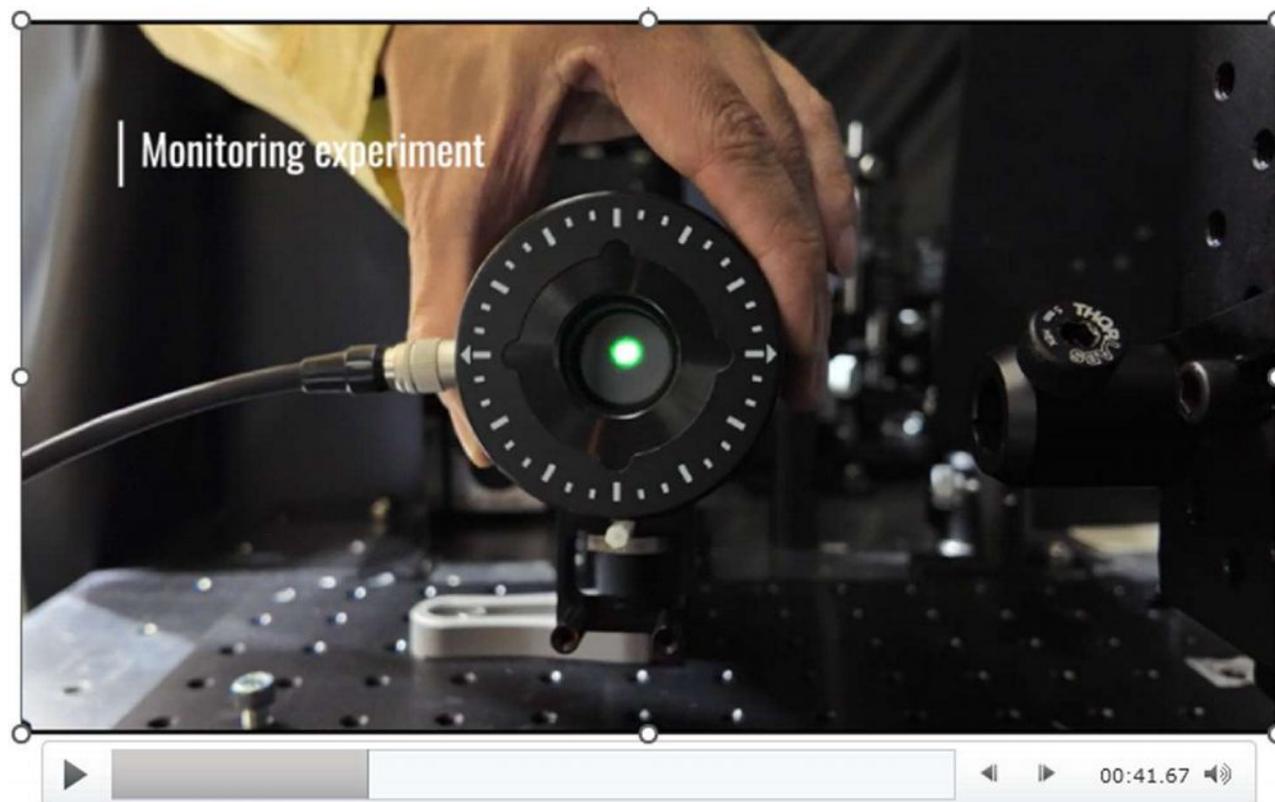
テラヘルツ波をリアルタイムイメージング

## THz I.I. 使用例

## THzビームの形状・集光点をリアルタイムでモニタリング可能



- コンパクトな筐体
- 0.5 THz 設計のアンテナ
- 1000 fpsの高速撮像



## まとめ

---

「カミオカンデ」「スーパーカミオカンデ」「ハイパーカミオカンデ」といった偉大な研究に参画できたことを感謝し、光技術に関して継続的開発を進め、学術研究だけでなく、産業用途への適用など社会に貢献していきたいと思えます。

以上です。

[www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)