

最先端の光センサー開発

大村孝幸

浜松ホトニクス株式会社

電子管事業部 電子管技術部 電子管設計第1G

2013.09.17 設計第1G 大村孝幸

光電子増倍管の進歩

U 光電管 1953年～

U 光電子増倍管 1959年～

- ・電子増幅 : 2次電子面、**半導体、ガス**
- ・形状 : TO-8サイズ、**大口径、チップサイズ**
- ・光電面種類 : 紫外、**可視**、赤外
- ・アノード : 2連～256ch
- ・特性 : 時間特性、エネルギー分解能

発表内容

- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)

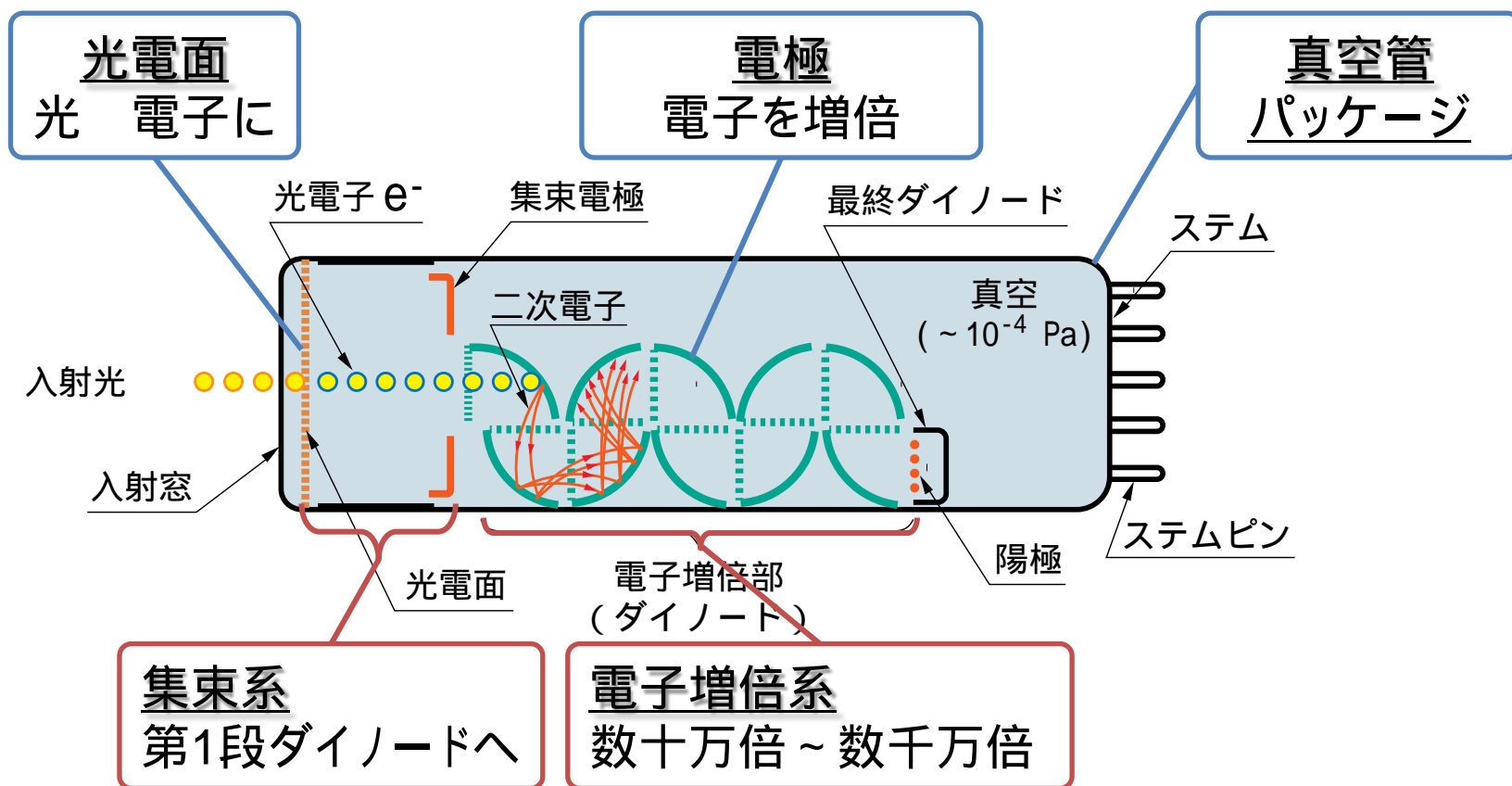
発表内容

1) 光電子増倍管(光センサー)とは 開発状況

- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)

1) 光電子増倍管(光センサー)とは？

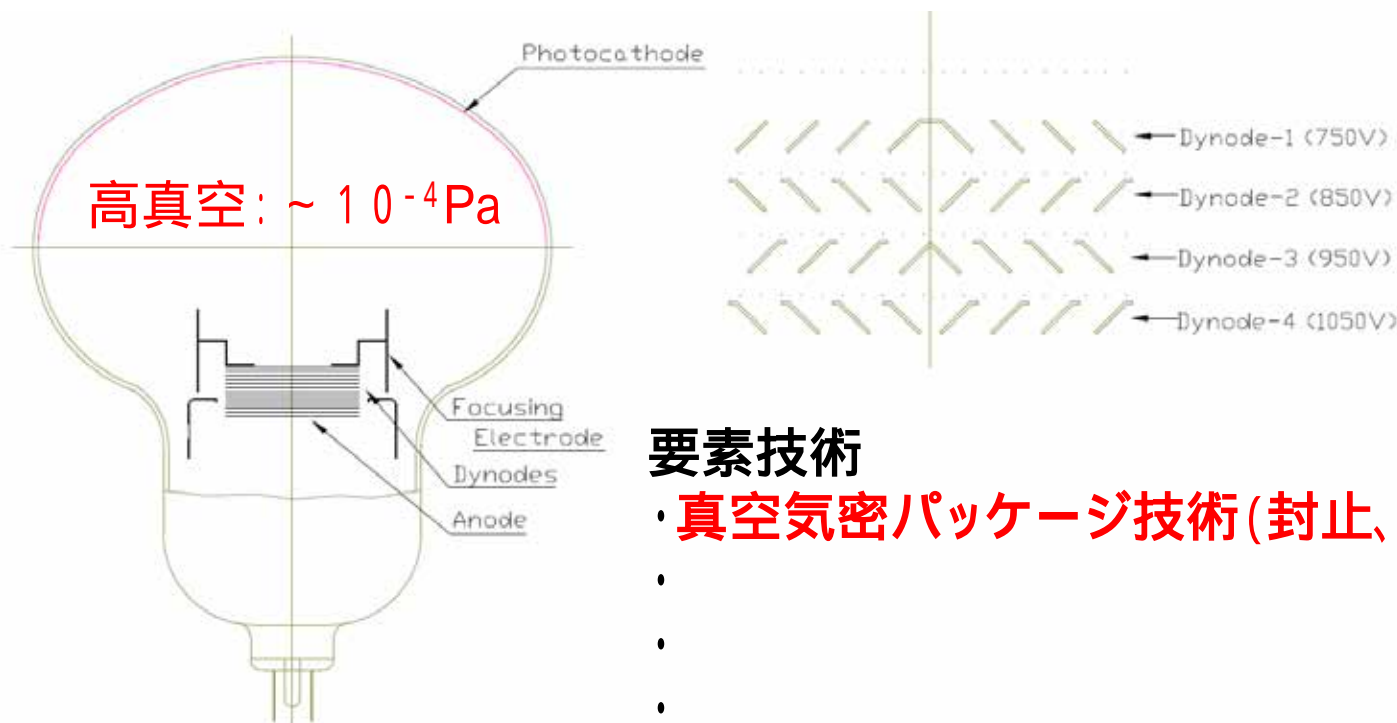
光を電子に変換(して増倍)し、信号として取出す光センサー



なぜ光電子増倍管(真空管)か？とその要素技術

光電子増倍管は、

- ・わずかな光でも光電変換(光子 → 電子)でき、
 - ・受光面(光電面)の大面積化が可能で、
 - ・電子を真空中で増倍し出力信号として取り出せる、
- 高感度光センサー



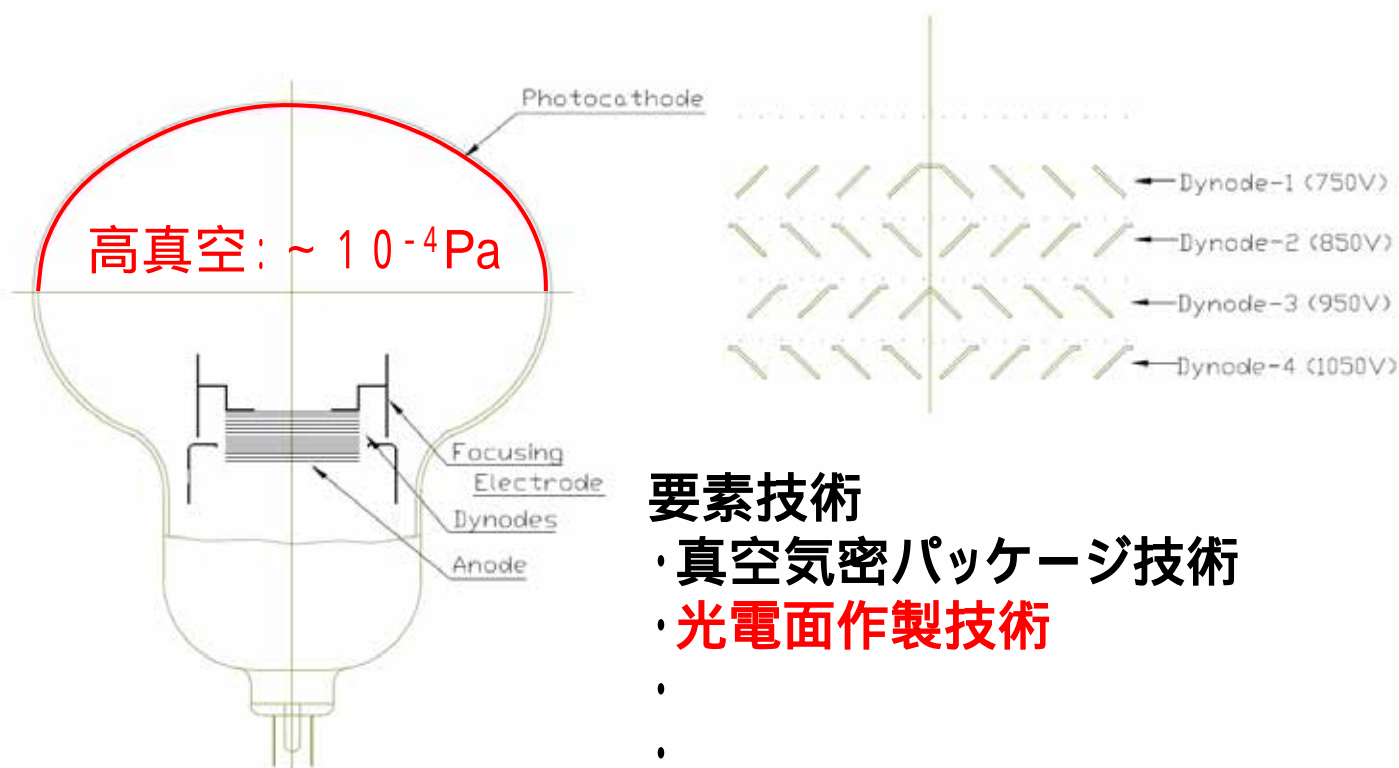
要素技術

- ・真空気密パッケージ技術(封止、材料制御)
- ・
- ・
- ・

なぜ光電子増倍管(真空管)か？とその要素技術

光電子増倍管は、高真空なので…

高安定な高感度光電面



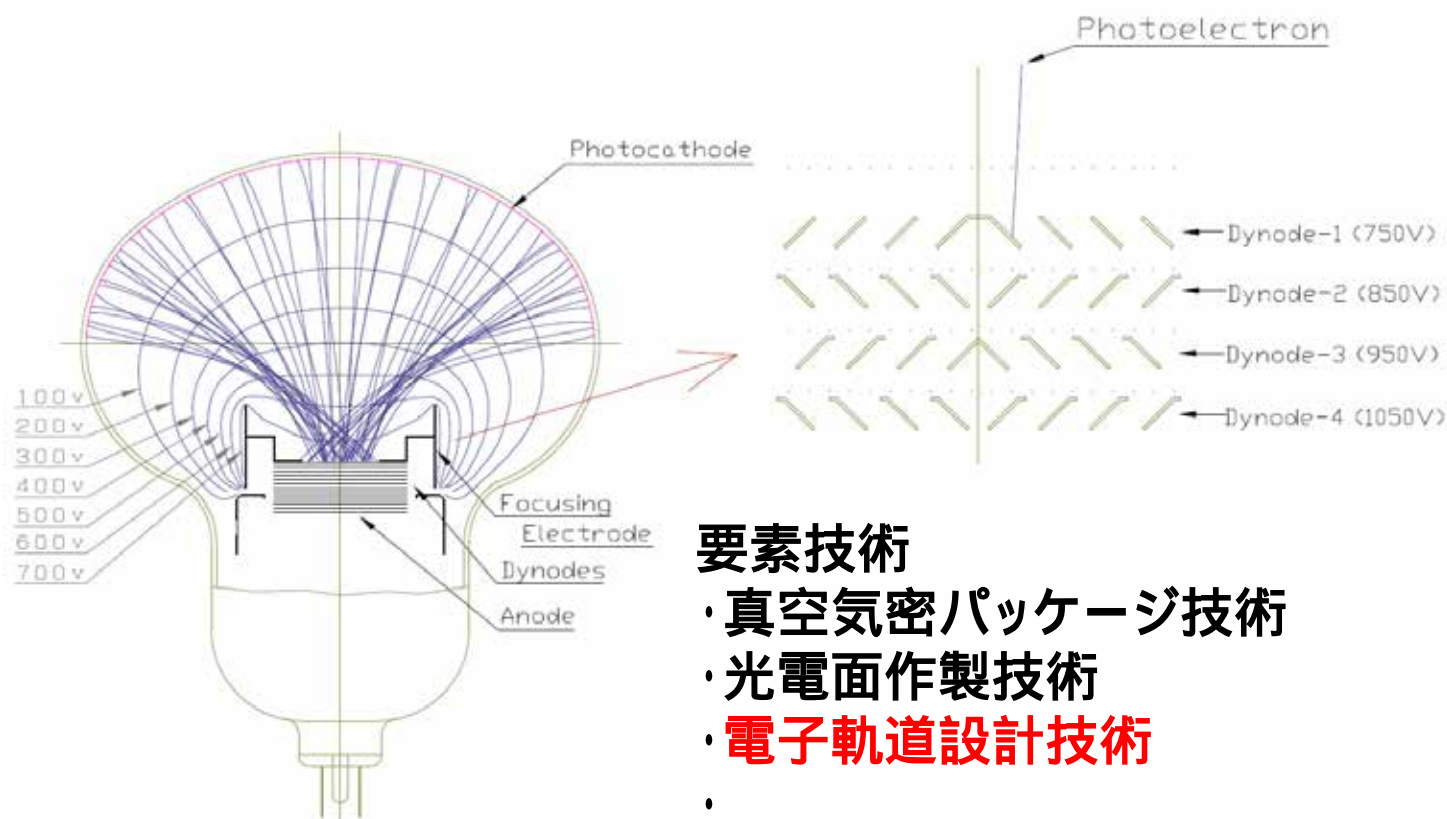
要素技術

- ・真空気密パッケージ技術
- ・**光電面作製技術**
- ・
- ・

なぜ光電子増倍管(真空管)か？とその要素技術

光電子増倍管は、高真空(高電圧印加)なので…

電子軌道をコントロールし、大面積光電面が作れる。



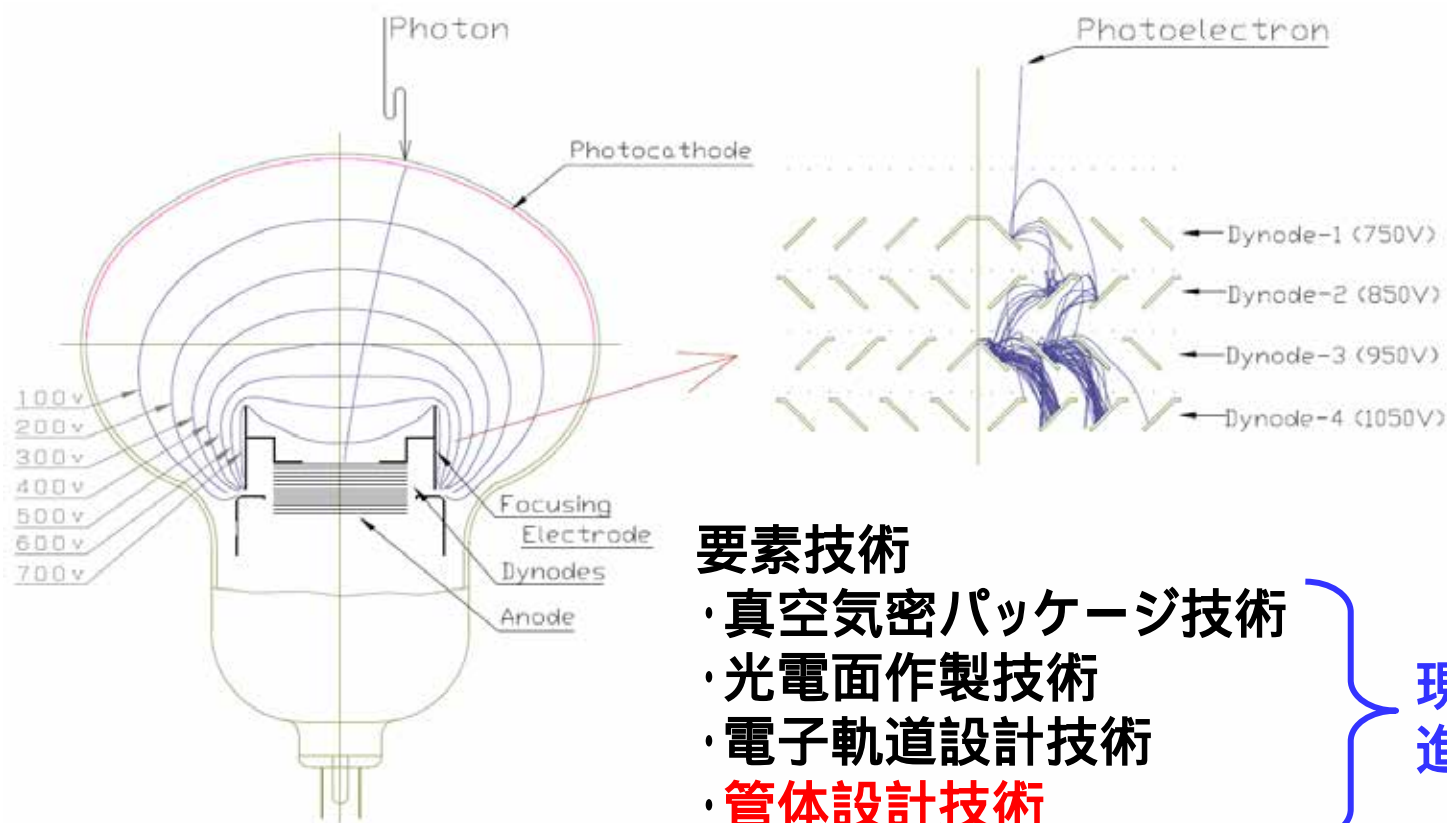
要素技術

- ・真空気密パッケージ技術
- ・光電面作製技術
- ・電子軌道設計技術

なぜ光電子増倍管(真空管)か？とその要素技術

光電子増倍管は…

電子は高真空中を走行する為、応答特性が良い。



要素技術

- ・真空気密パッケージ技術
- ・光電面作製技術
- ・電子軌道設計技術
- ・管体設計技術

現在も
進化中

用途

光子1個から検出可能な光電子増倍管は、
超高感度センサーの代表として確立

- u 医用装置： 検体検査、断層撮像装置など
- u 環境計測： 大気・水質・衛生・放射線計測など
- u 資源調査： 石油・ガス探層、各種分析装置など
- u 産業計測： 半導体検査、電子顕微鏡など
- u 学術研究： 高エネルギー実験など

発表内容

1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況

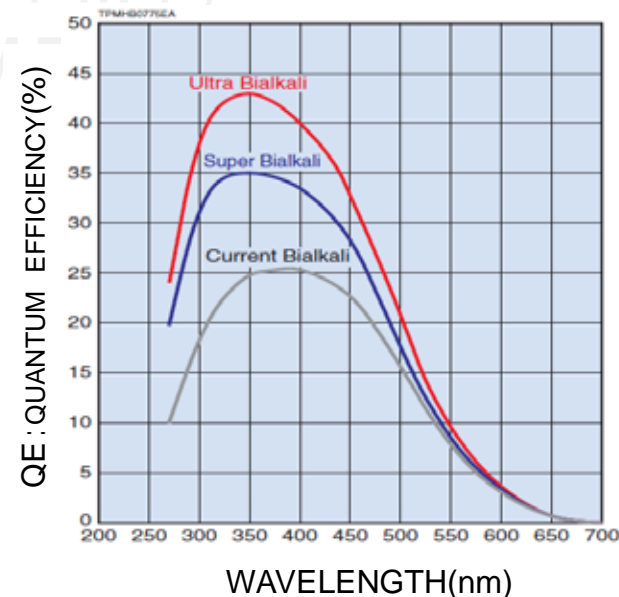
2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化

3) ハイブリッドフォトディテクター(8/20インチHPD)

4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)

5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)

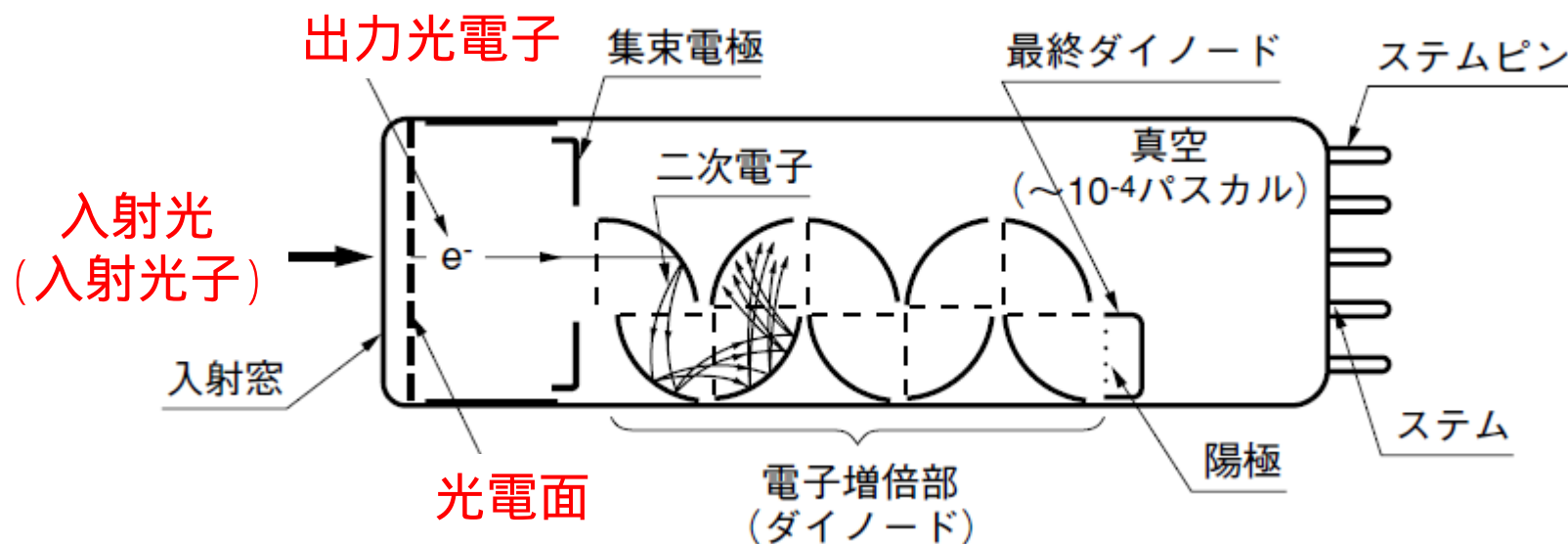
6) 光増強管(8インチ光増強管)



究極の量子効率 (QE) = 100% を目指して

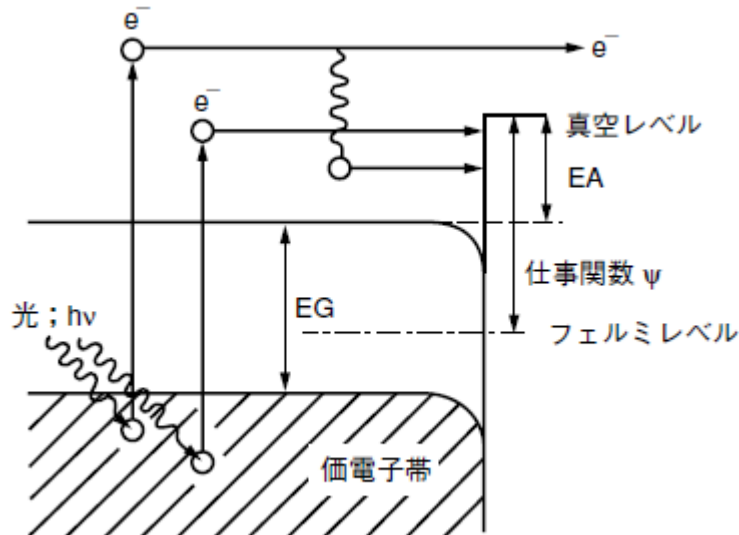
量子効率 (Quantum efficiency : QE) とは ?

出力光電子数 / 入射光子数



量子効率 (QE) を上げるには？

・光電子放出



EG : バンドギャップ

EA : 電子親和力

量子効率は以下の式で表される

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_v}{k} \times \left(\frac{1}{1 + 1/kL} \right) \times P_s$$

反射ロス 励起効率 光電面内のロス 脱出確率

R : 反射係数

k : 光子の全吸収係数

P_v: 光吸収のうち、真空レベル以上に励起される確率

L : 励起電子の平均逸脱距離

P_s: 表面に達した電子の真空中に放出される確率

ν : 光の振動数

量子効率を上げるには

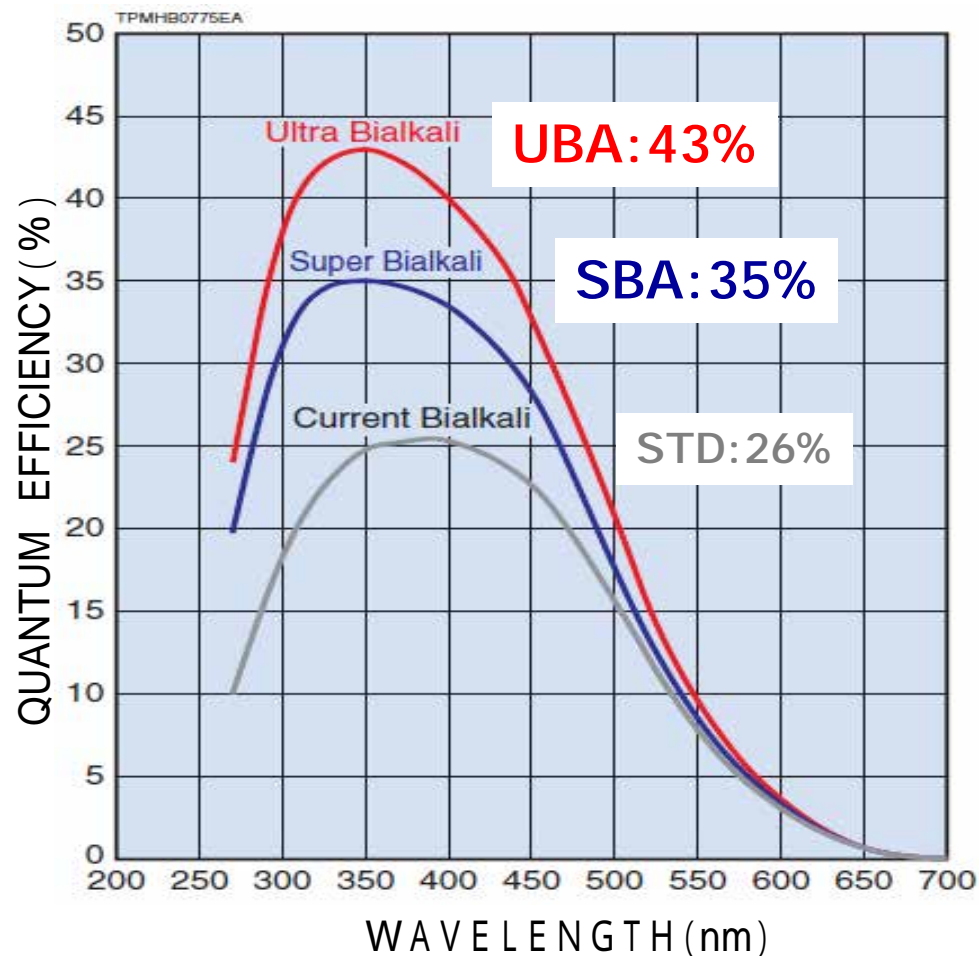
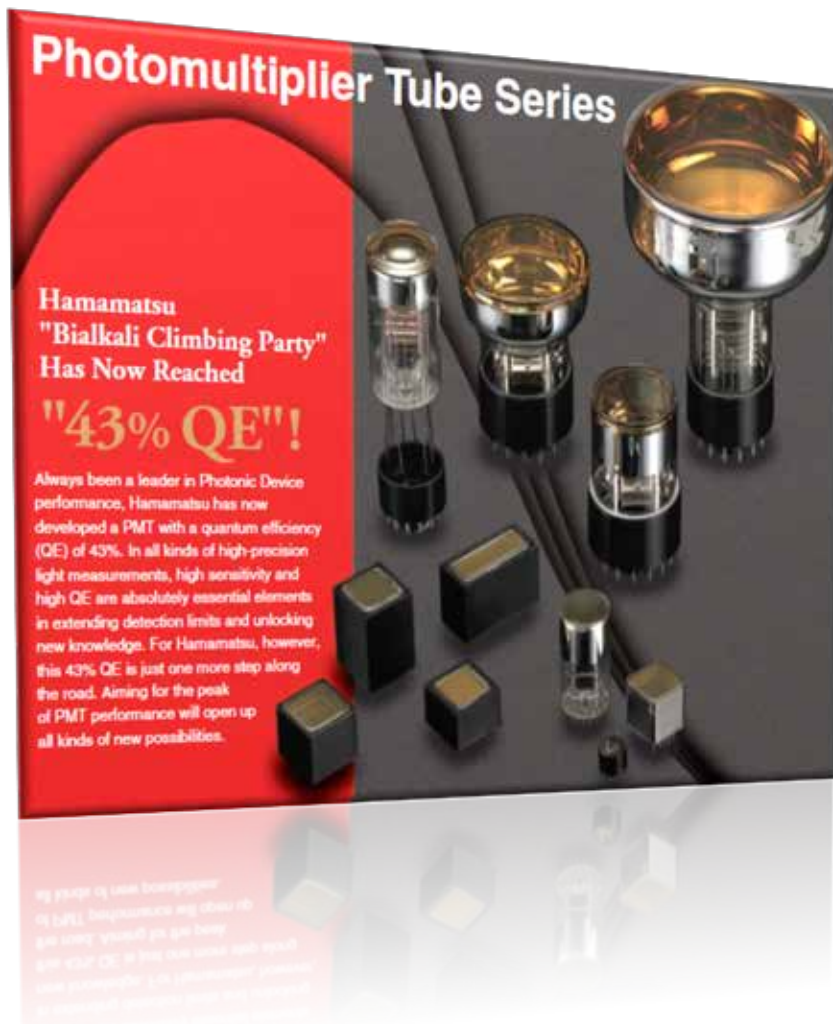
↳ 反射ロスの低減

↳ 吸収係数を上げる

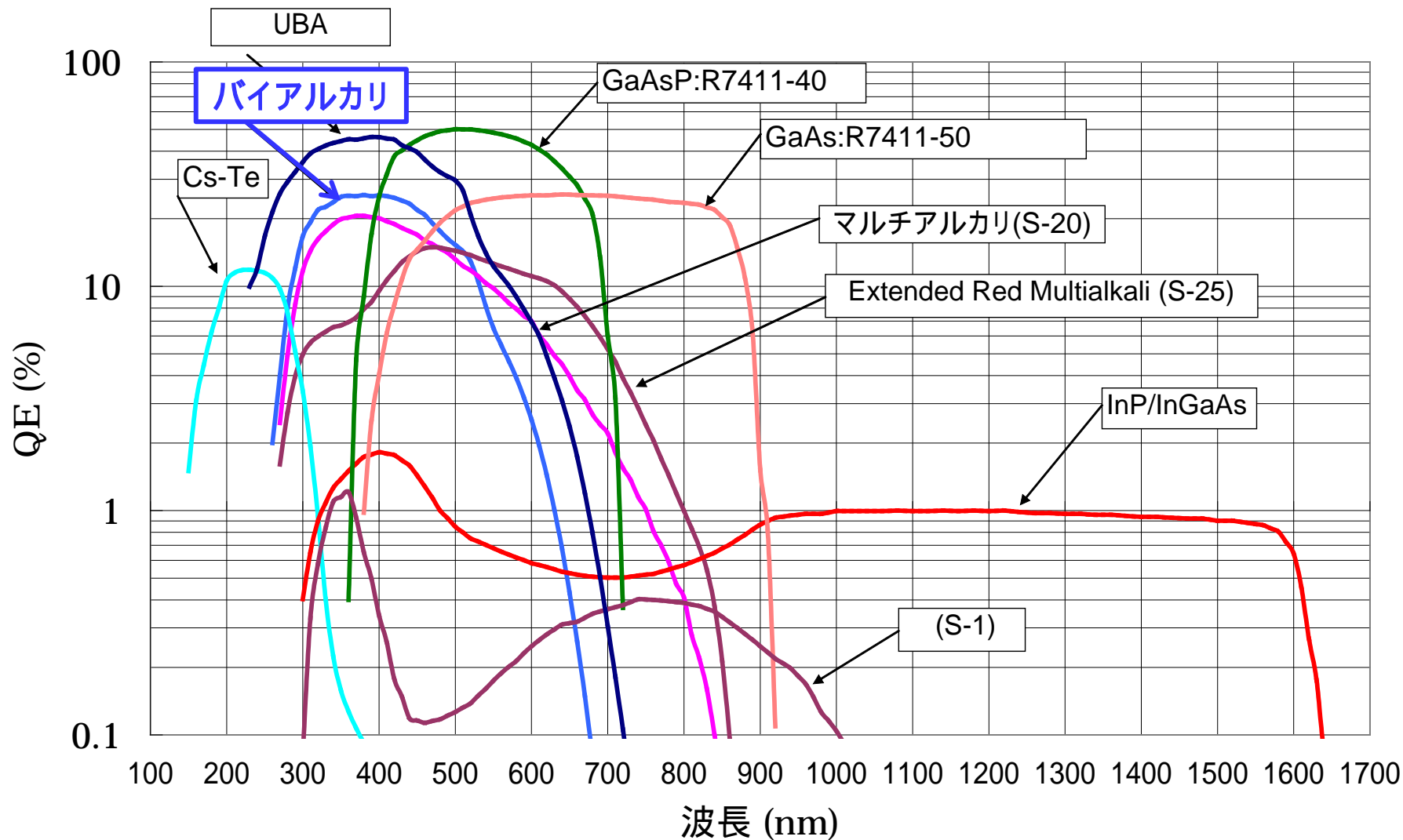
↳ 励起電子の平均逸脱距離を伸ばす

↳ 脱出確率を上げる → 電子親和力 (EA) を低くする

高感度バイアルカリ光電面のQE



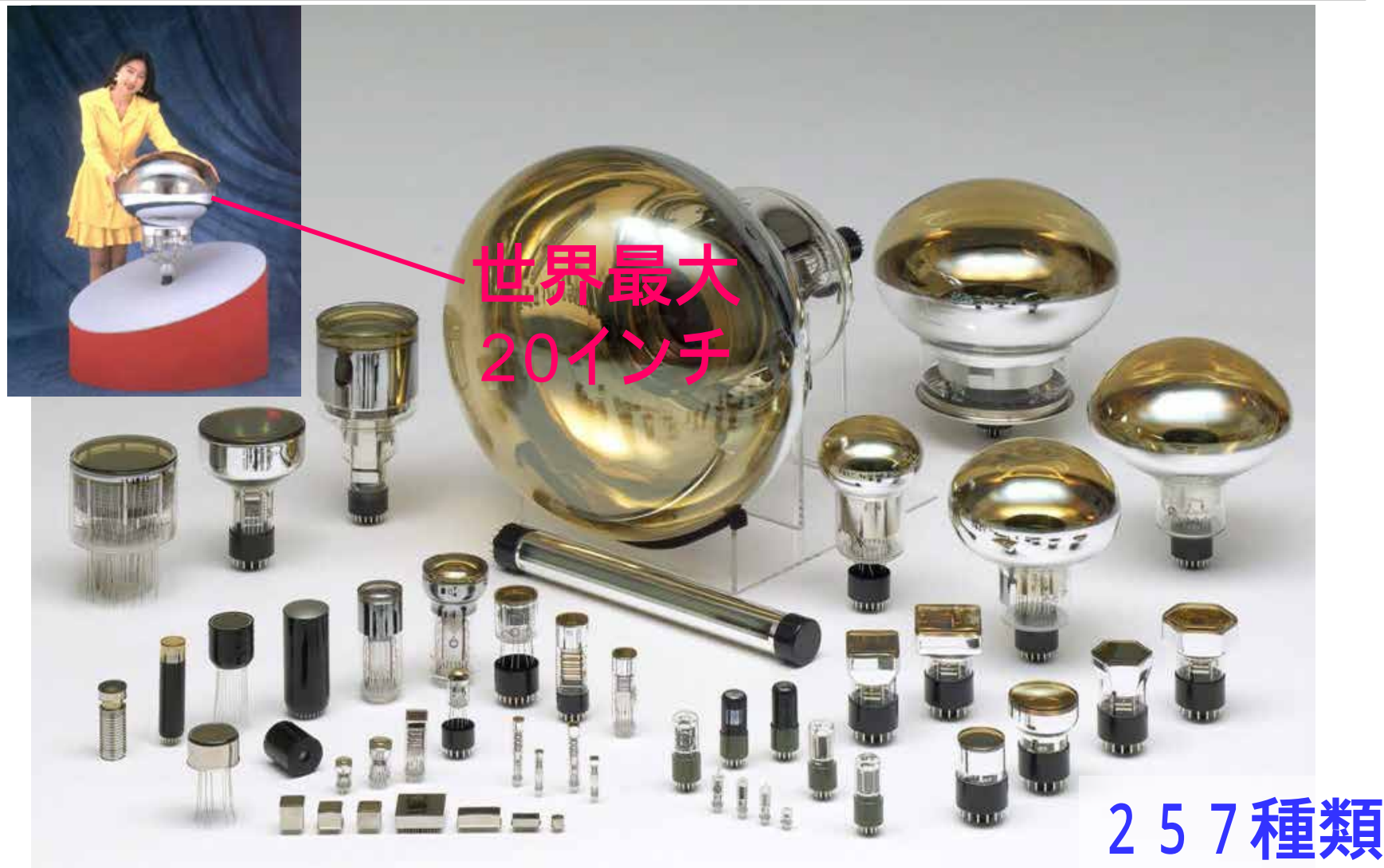
各種光電面の量子効率 (QE)



発表内容

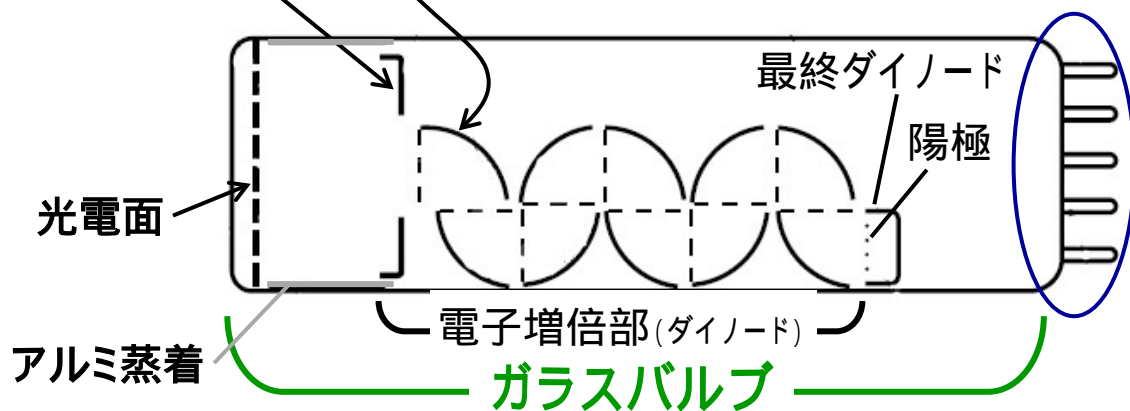
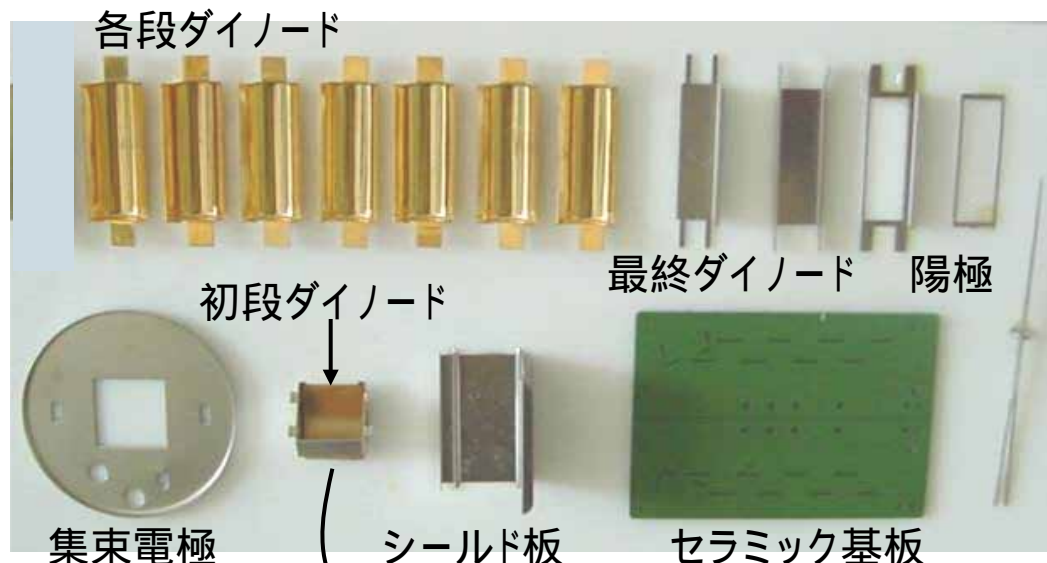
- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況・・・の前に、光電子増倍管の
品種、部品構成、作製工程の現状は・・・
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8/20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)

光電子増倍管の品種



光電子増倍管の部品構成

電子増倍部の部品展開



電子増倍部



ステム

アルミ蒸着



ガラスバルブ

部品・・・数十～数百部品！

光電子増倍管の作製工程

多くの部品と工程、熟練作業



多くの部品
多くの工程
熟練作業

…管理、処理が大変
…精度悪化、作業ミス
…量産に不向き



安く、簡単に、精度良く、
大量生産できないか？

発表内容

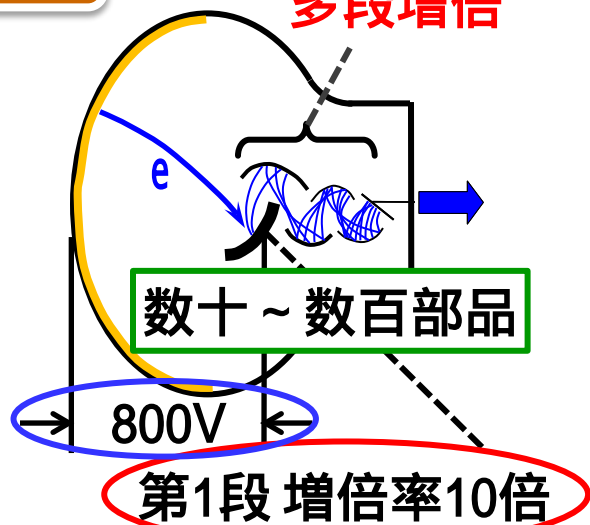
- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)



光電子増倍管(PMT)とHPD 動作原理

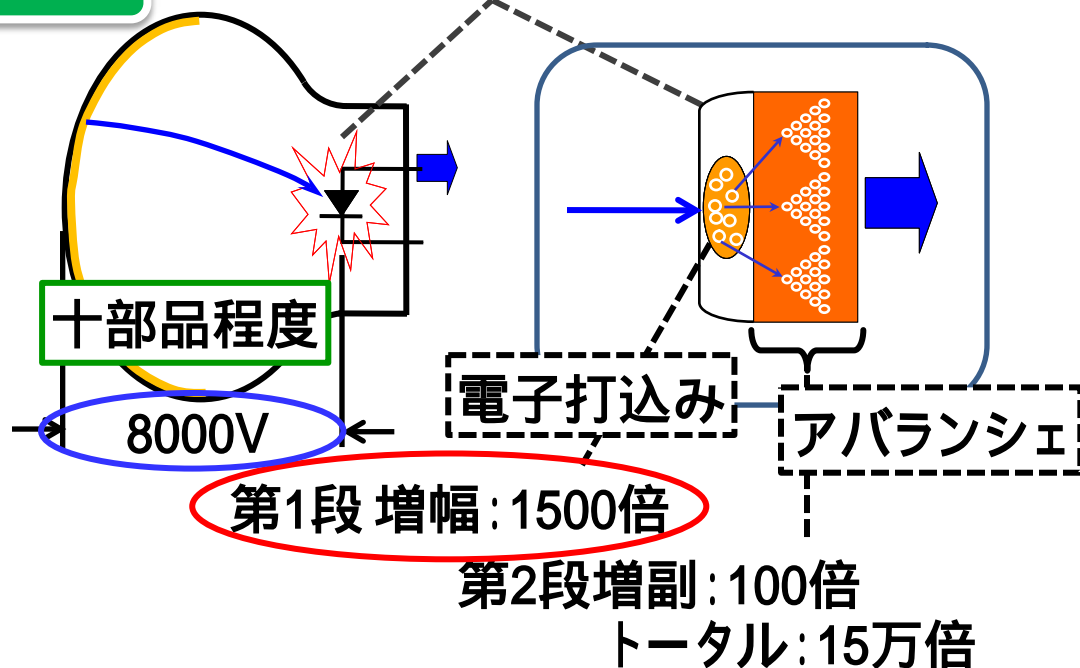
PMT

多段ダイノード
多段増倍



HPD

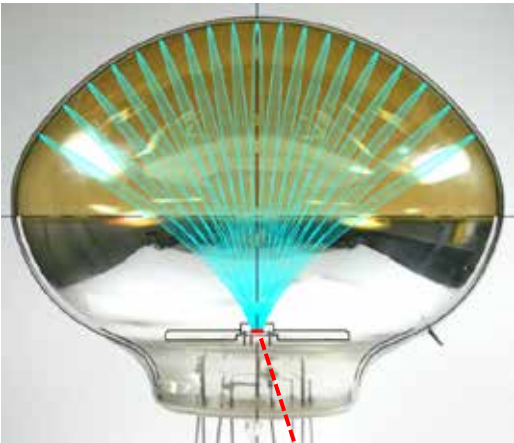
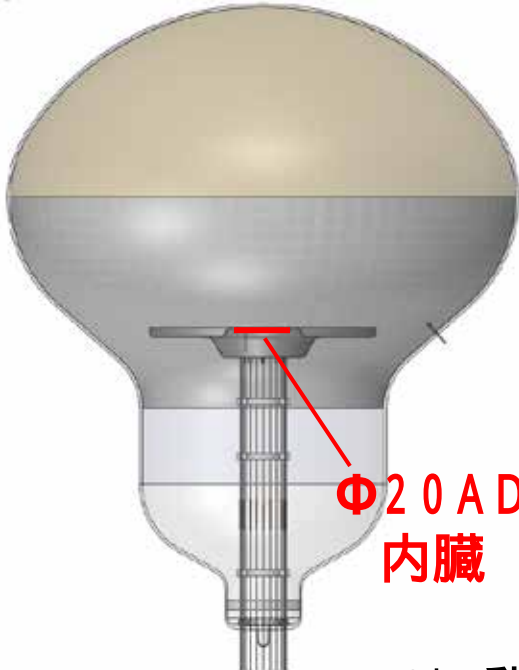
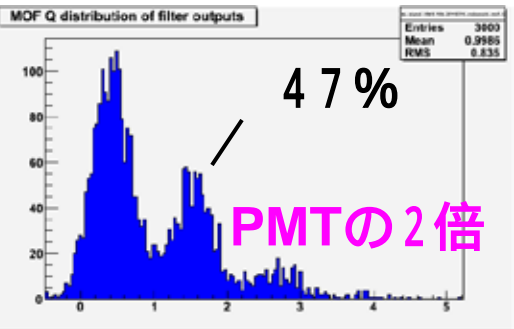
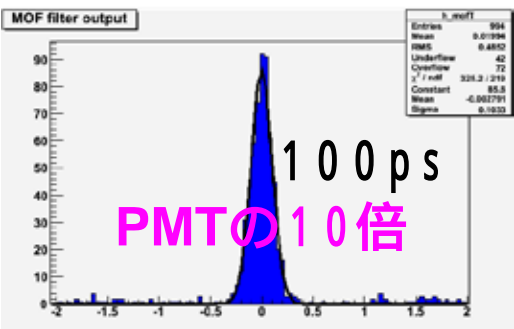
アバランシェダイオード(AD)



第1段での電子増幅率が高い
高電界動作
構造がシンプル

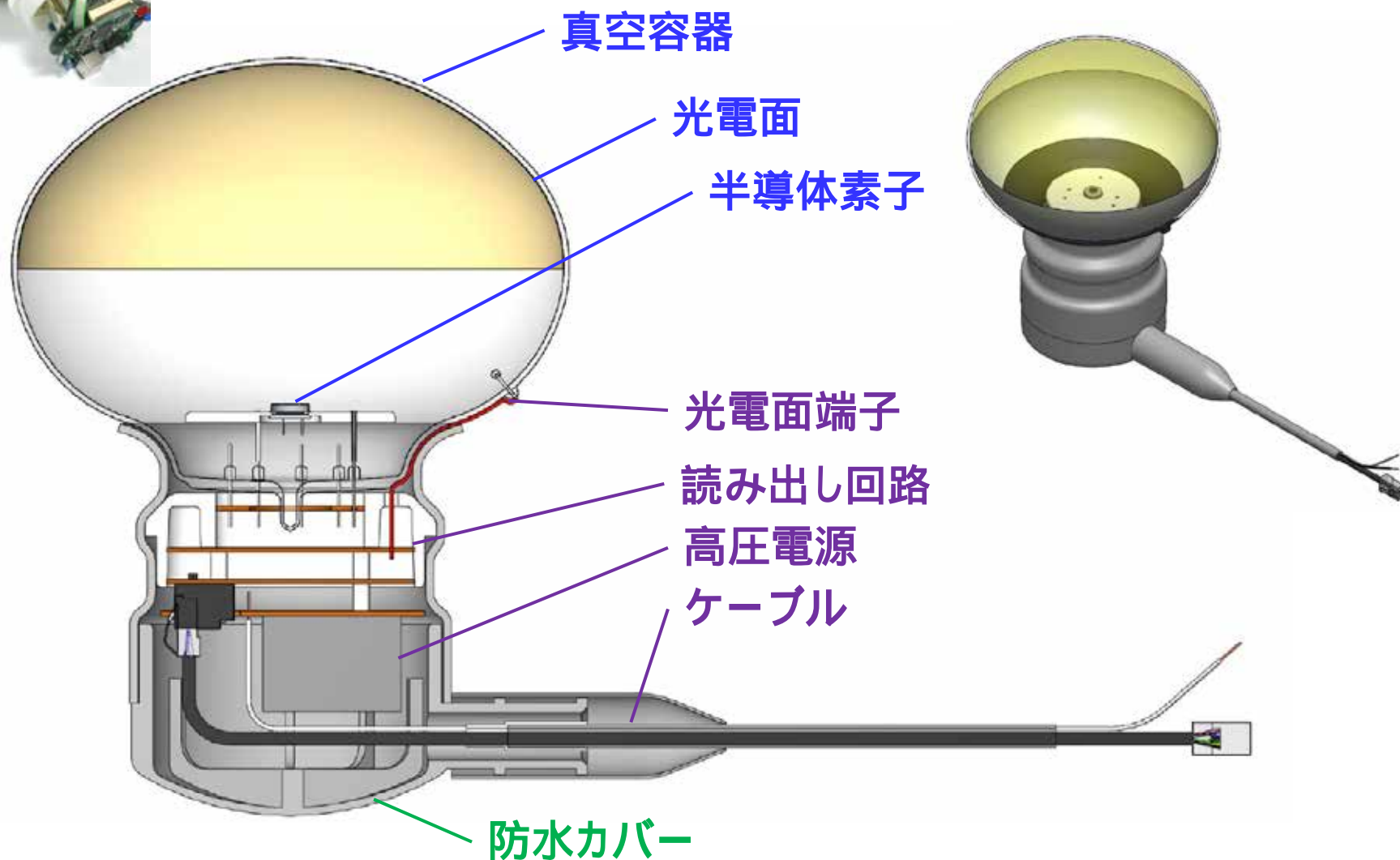
…入射信号光の波高情報が正確
…光電子走行時間のばらつきが少ない
…工数低減(組立精度UP)、
コストダウン、大量生産可能

8インチHPDの特性と、20インチHPD(開発中)

8インチHPD		20インチHPD(開発中)	
 <p>Φ5 A D 内臓</p>		 <p>Φ20 A D 内臓</p>	
<p>8 k V 動作</p>		<p>8 k V 動作</p>	
1 フォトンエネルギー分解能	1 フォトン時間分解能	1 フォトンエネルギー分解能	1 フォトン時間分解能
 <p>47 %</p> <p>PMTの2倍</p>	 <p>100 ps</p> <p>PMTの10倍</p>	<p>(47 %)</p>	<p>(950 ps)</p>

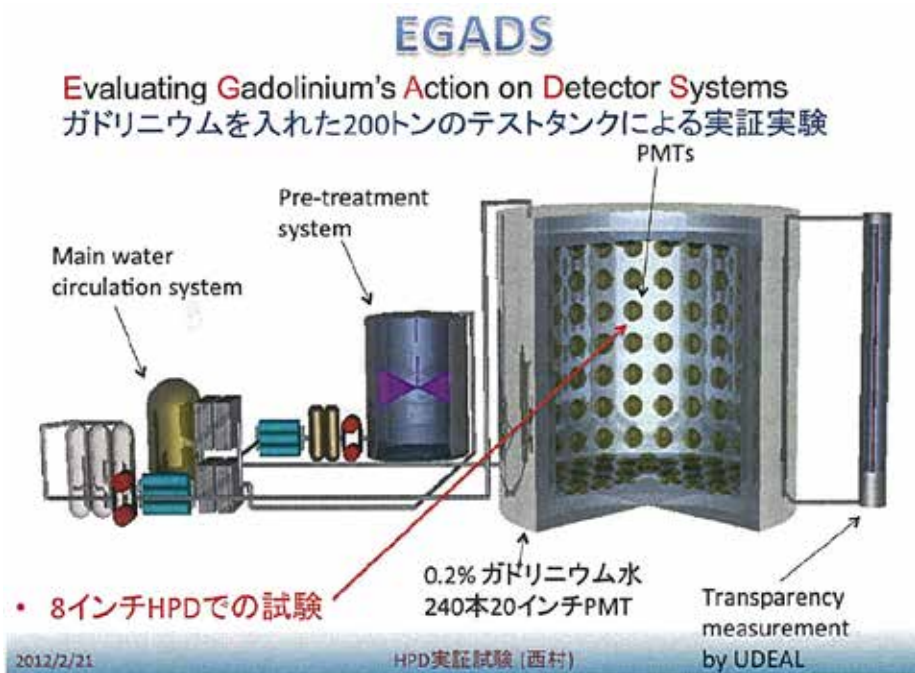
()内は、予想値

試作した8インチHPD防水モジュールの構造

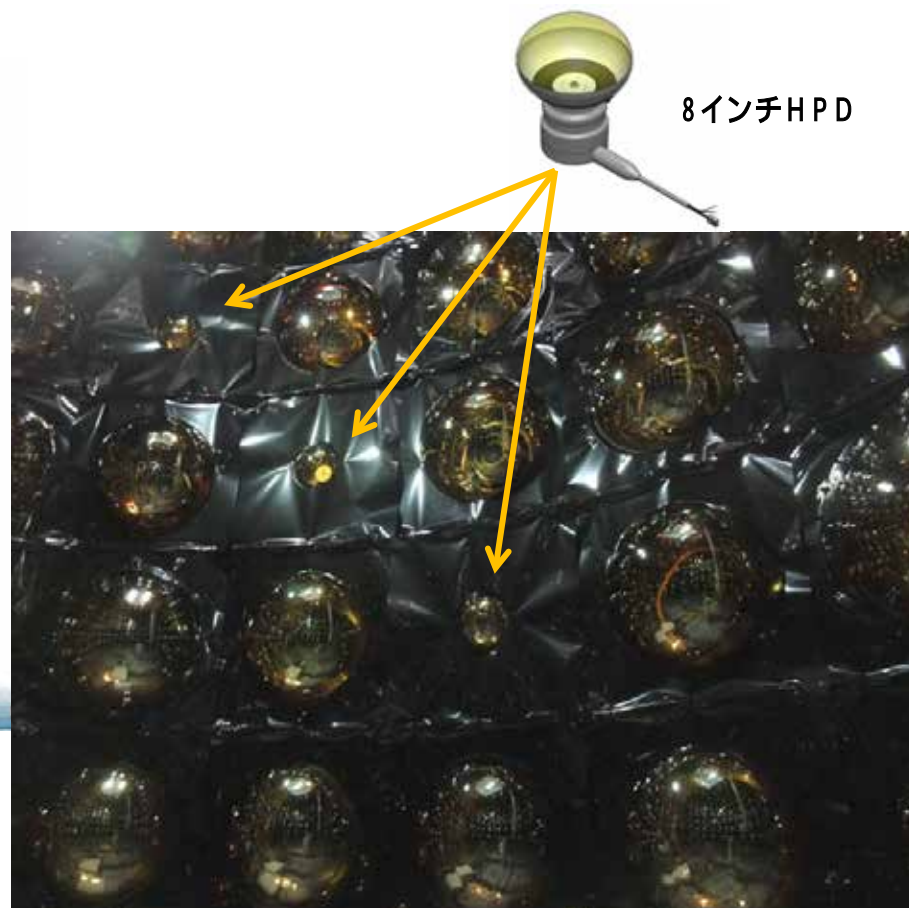


トピックス・・・8インチHPDの実証試験

2013年8月、神岡のEGADSタンクに8本の8インチHPDの取付終了。
現在、実証試験進行中。



資料提供: 東京大学宇宙線研究所

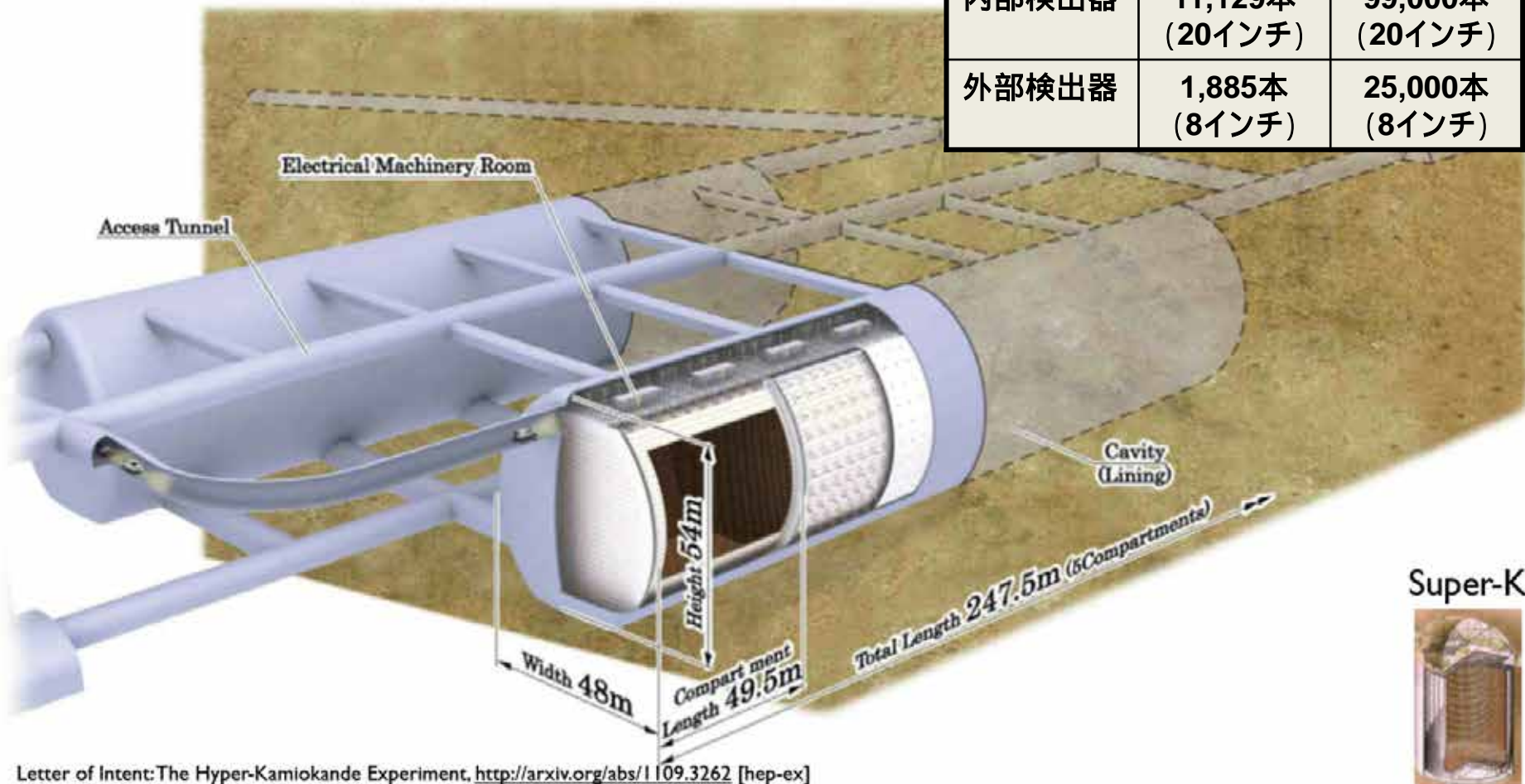


写真提供: 東京大学宇宙線研究所

ハイパーカミオカンデ採用を目指し、開発中

スーパーカミオカンデの
約25倍の有効体積！

	Super-K	Hyper-K
内部検出器	11,129本 (20インチ)	99,000本 (20インチ)
外部検出器	1,885本 (8インチ)	25,000本 (8インチ)



Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment, <http://arxiv.org/abs/1109.3262> [hep-ex]

CONFIDENTIAL

2013.09.17 設計第1 G 大村孝幸

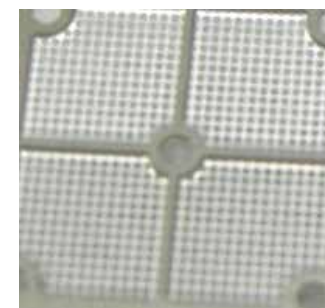
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved.

発表内容

- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) **ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)**
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管) 電子増倍部



細孔型MPGD



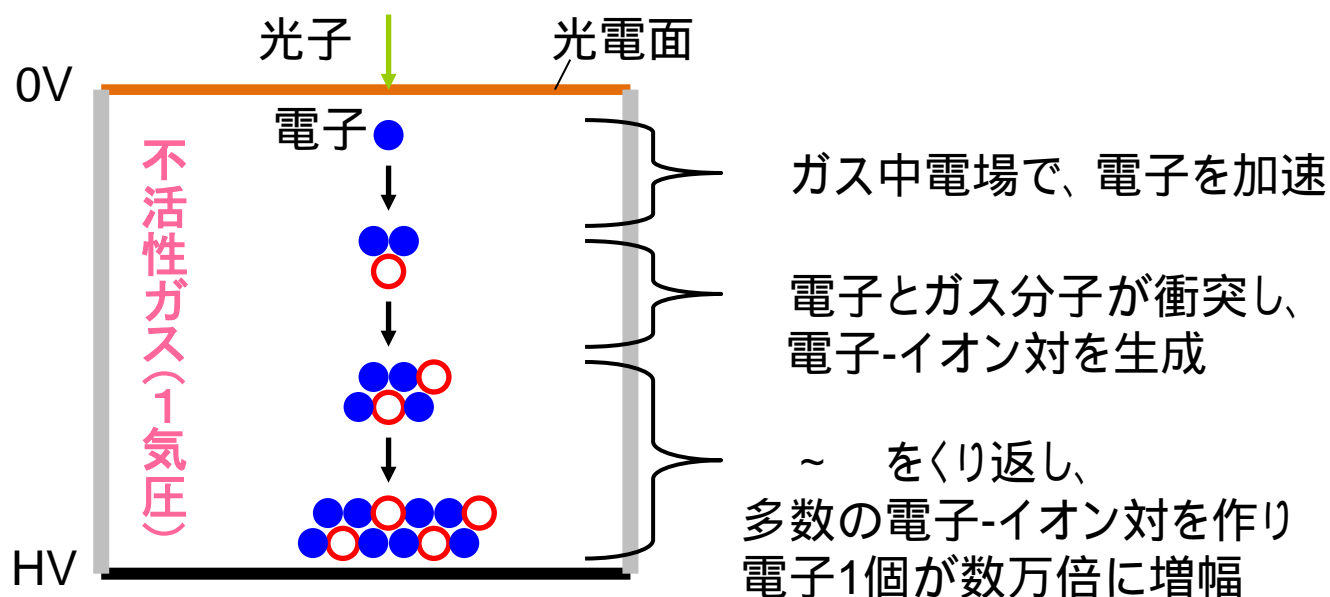
メッシュ型MPGD

MPGD・・・マイクロパターンガスディテクター

ガス増幅型光検出器 (Gas-PMT) とは？

ガス検出器・・・比例計数管、GM管(放射線検出器)

Gas-PMT・・・ガス検出器の原理を元に、微細加工技術と、電子管技術を融合



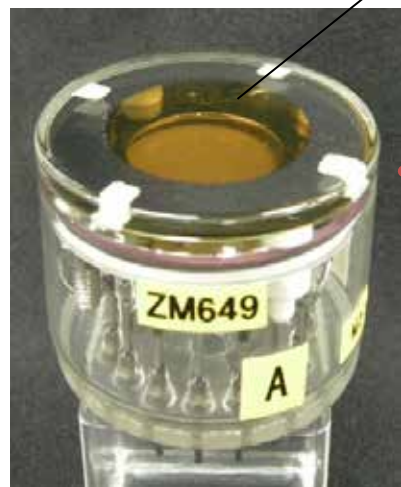
- ・広い有効面積
- ・高い感度特性・均一性
- ・高磁場動作



電子管、固体に次ぐ、
第3世代の光センサー

Gas - PMTの構造

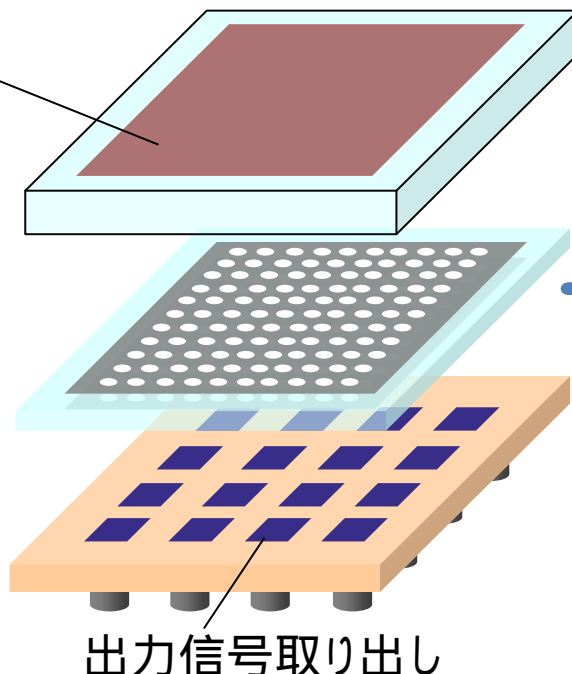
外観



内部は1気圧の
不活性ガス

構成

光電面

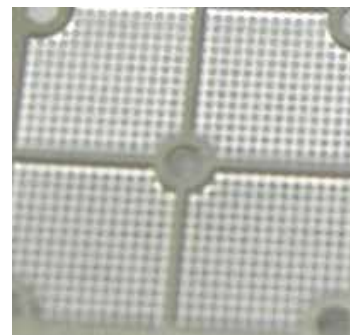


出力信号取り出し

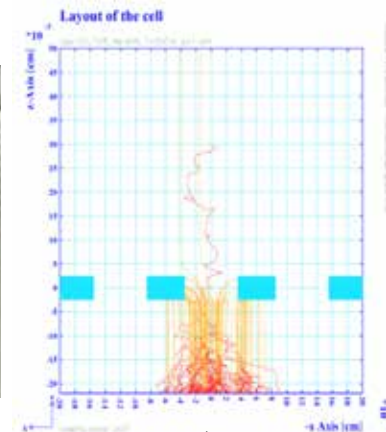
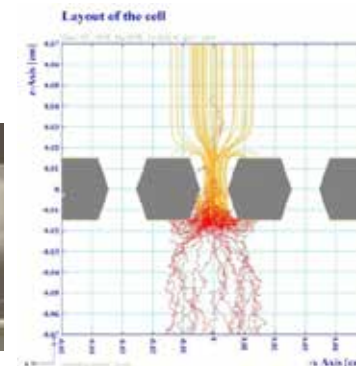
増倍部



細孔型MPGD・・・ブラストで作製



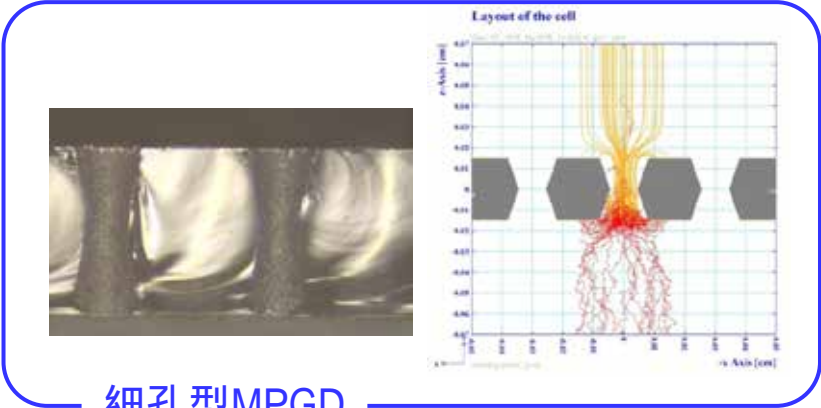
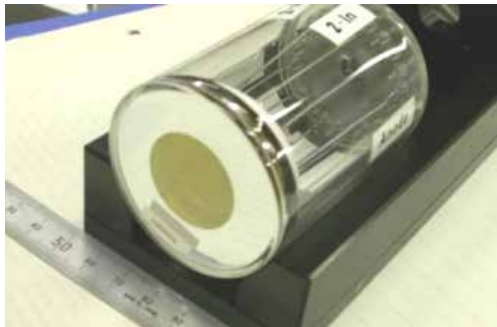
メッシュ型MPGD・・・エッチングで作製



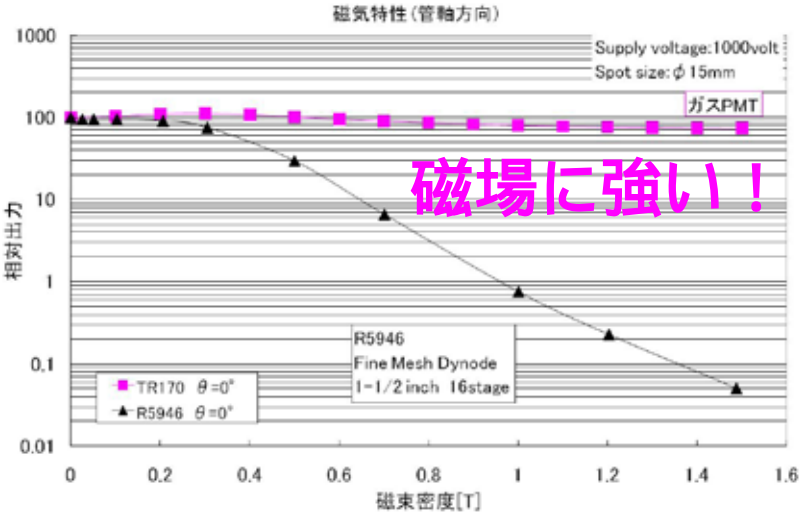
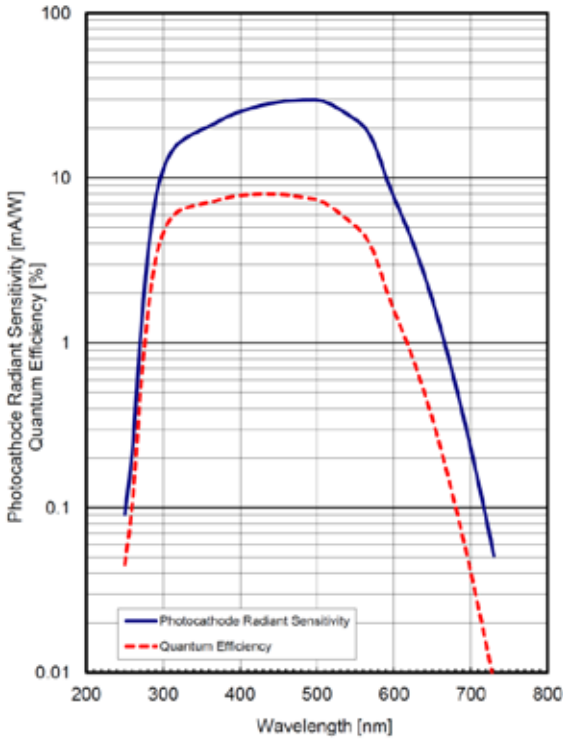
光センサー(紫外、可視)・・・Gas PMT: 素粒子・宇宙線物理学、医用/ 環境
放射線検出器(軟X線、電子線、中性子)

MPGD・・・マイクロパターンガスディテクター

Gas PMT用のMPGDを用いた評価管



細孔型MPGD



発表内容

- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(GEMPMT)
- 5) **世界最小の光電子増倍管(μ PMT)**
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)

micro
 μ PMT[®]
HAMAMATSU



光電子増倍管 長所と短所

長所

- ・高感度(高ゲイン)
- ・幅広いゲイン可変
- ・幅広い受光面積の選択
- ・高速応答
- ・高ダイナミックレンジ

短所

構造 / 製法に起因する制約

- ・小型軽量化
- ・大量生産
- ・量産コスト
- ・形状カスタマイズ

克服の為に...

テクノロジー

浜松ホトニクスを結集して誕生した、全く新しい光検出器

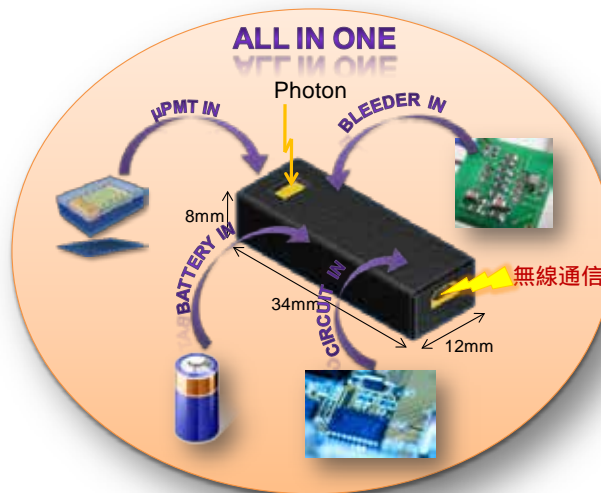
シミュレーション技術
(電子軌跡から最適形状を求める)

管体設計技術
(電極構造から製造プロセス設計)

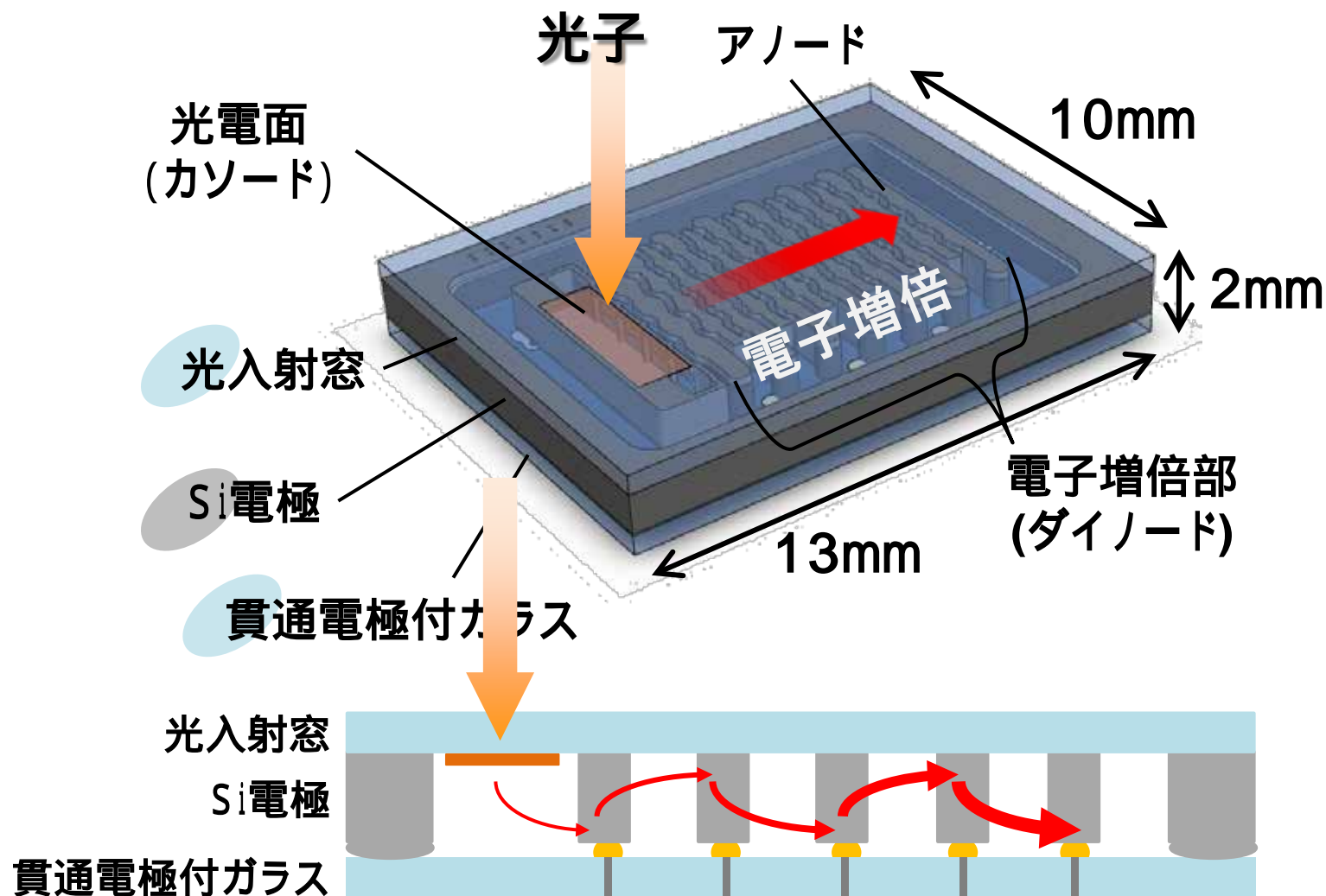
ホトマル製造技術
(真空気密パッケージと光電面作製)

半導体微細加工技術
(シリコンのドライエッチング加工)

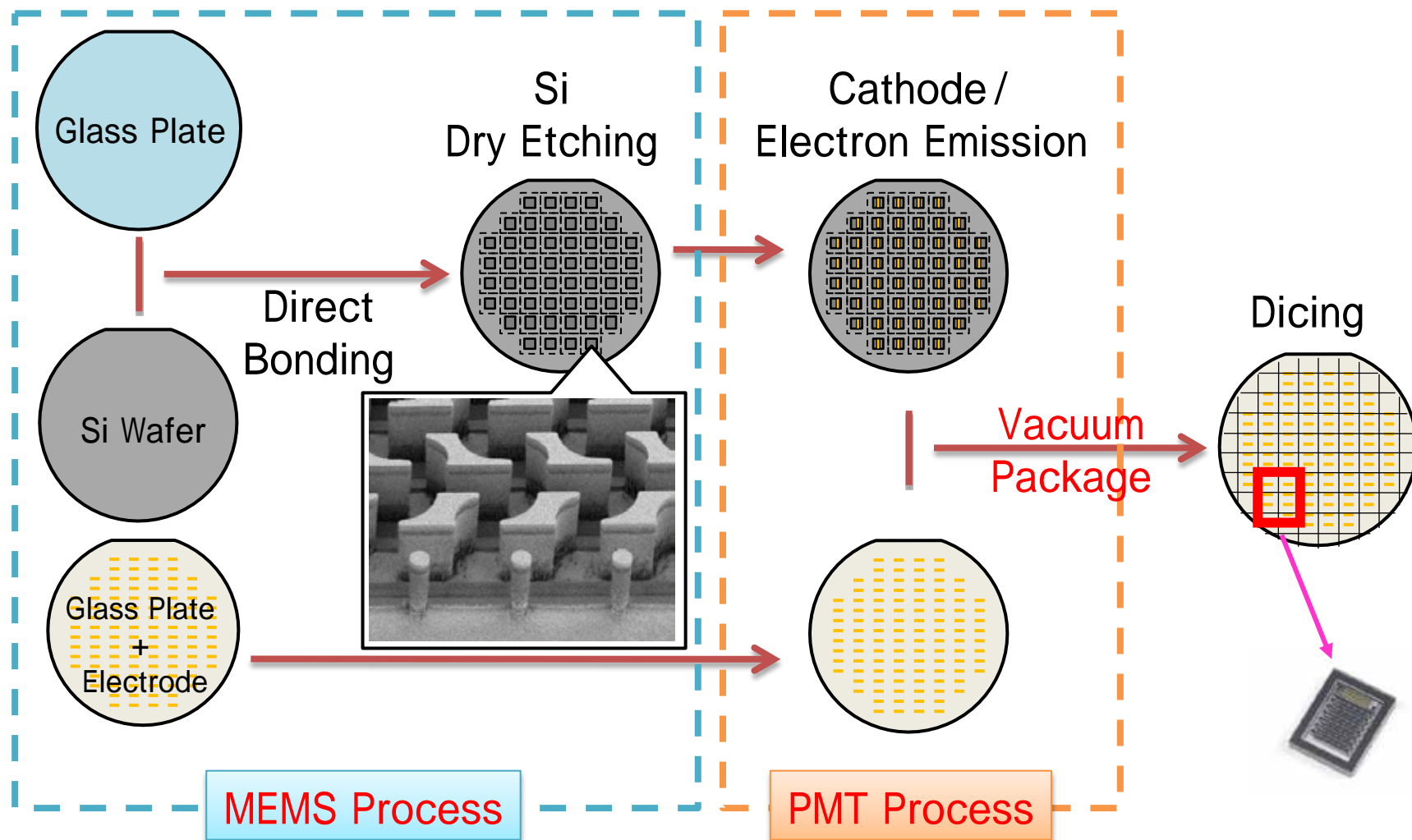
究極の小型化、量産対応を目指したホトマル



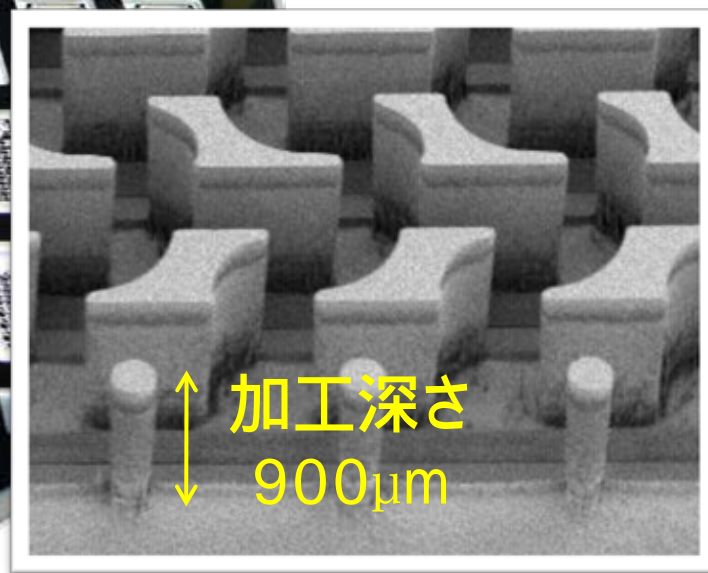
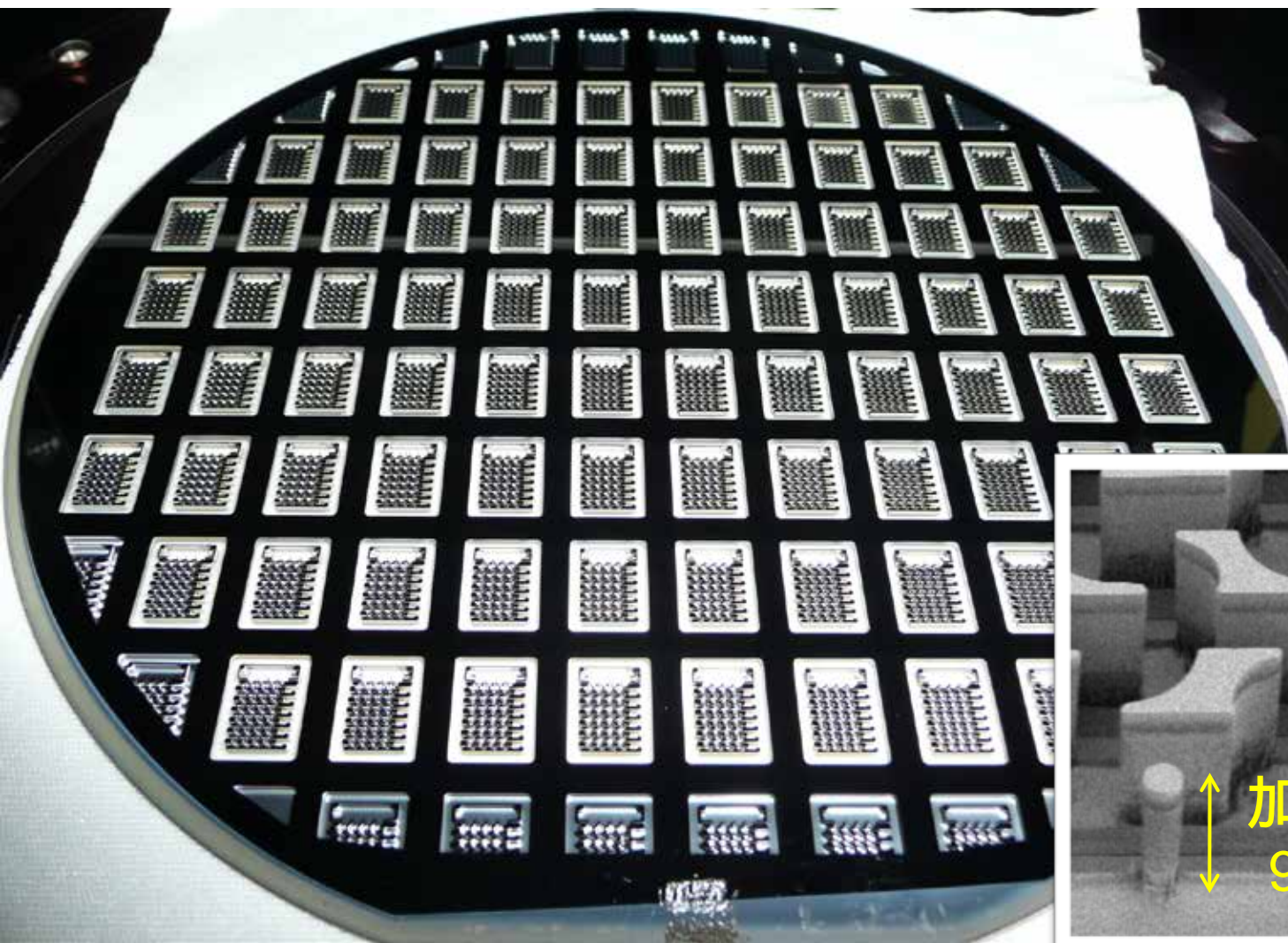
μ PMTの構造と動作原理



ウェハプロセスは・・・ 熟練作業が不要



加工したΦ6インチシリコン基板



カスタマイズ可能

マルチチャンネルタイプ
幅広光電面タイプ



コンパクトタイプ
光電面 1 mm



ベーシックタイプ
光電面 1 × 3 mm

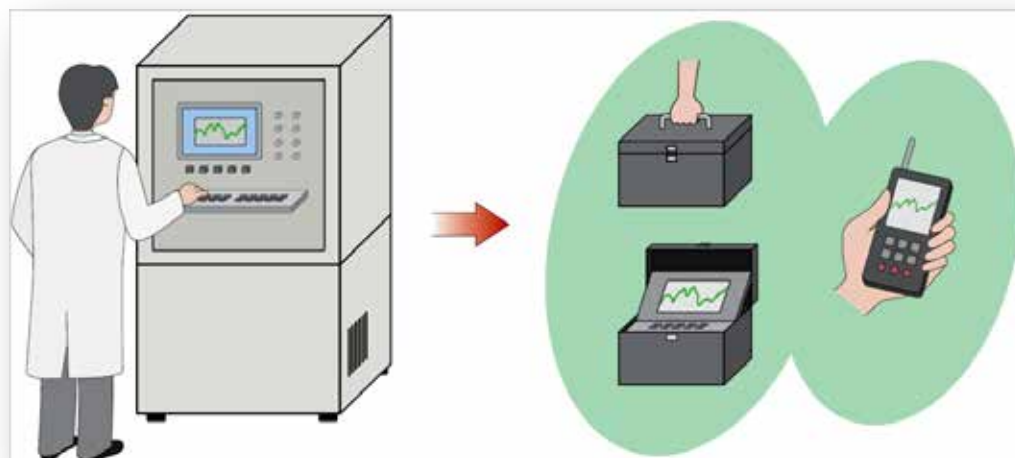


- ・用途に合わせた仕様に対応
- ・アッセンブリでの製品提供

高感度光センサー「光電子増倍管」がμサイズに・・・



大型装置並みの性能を**小型装置で実現**
 複数搭載による**処理能力向上・新機能追加を実現**
 構成部品やサンプル量など全ての小型化に
 繋がり**省資源・低コストを実現**



様々な分野に貢献！

- 健康モニター
- 検体検査装置
- 感染症/ストレスセンサー
- 衛生モニター
- セキュリティセンサー
- 大気・水質モニター
- 放射線モニター

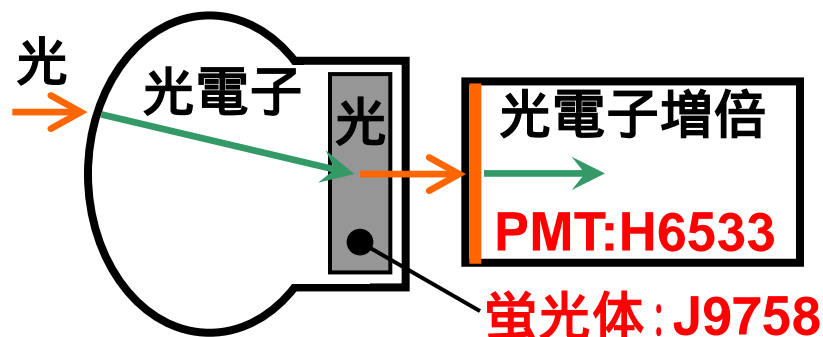
発表内容

- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(GEMPMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ)
- 6) **光増強管(8インチ光増強管)**



8インチ光増強管の試作

蛍光体とPMTを使った光検出器



名古屋大学様より開発依頼を頂き、試作開発を進めてきました。

名大大学院 理学研究科高エネルギー物理学研究室 綱田啓様から頂いた
修士論文発表会資料『シンチレーターを内蔵した新型光検出器の研究開発』から抜粋

大口径光検出器開発は、素粒子物理学実験において重要な課題の一つ！



シンチレーター内蔵型大口径光検出器の提案

- 真空管内に複雑な構造物(ダイノード)・能動素子(半導体検出器など)がない
- 光検出部が真空管外部にある二段構造



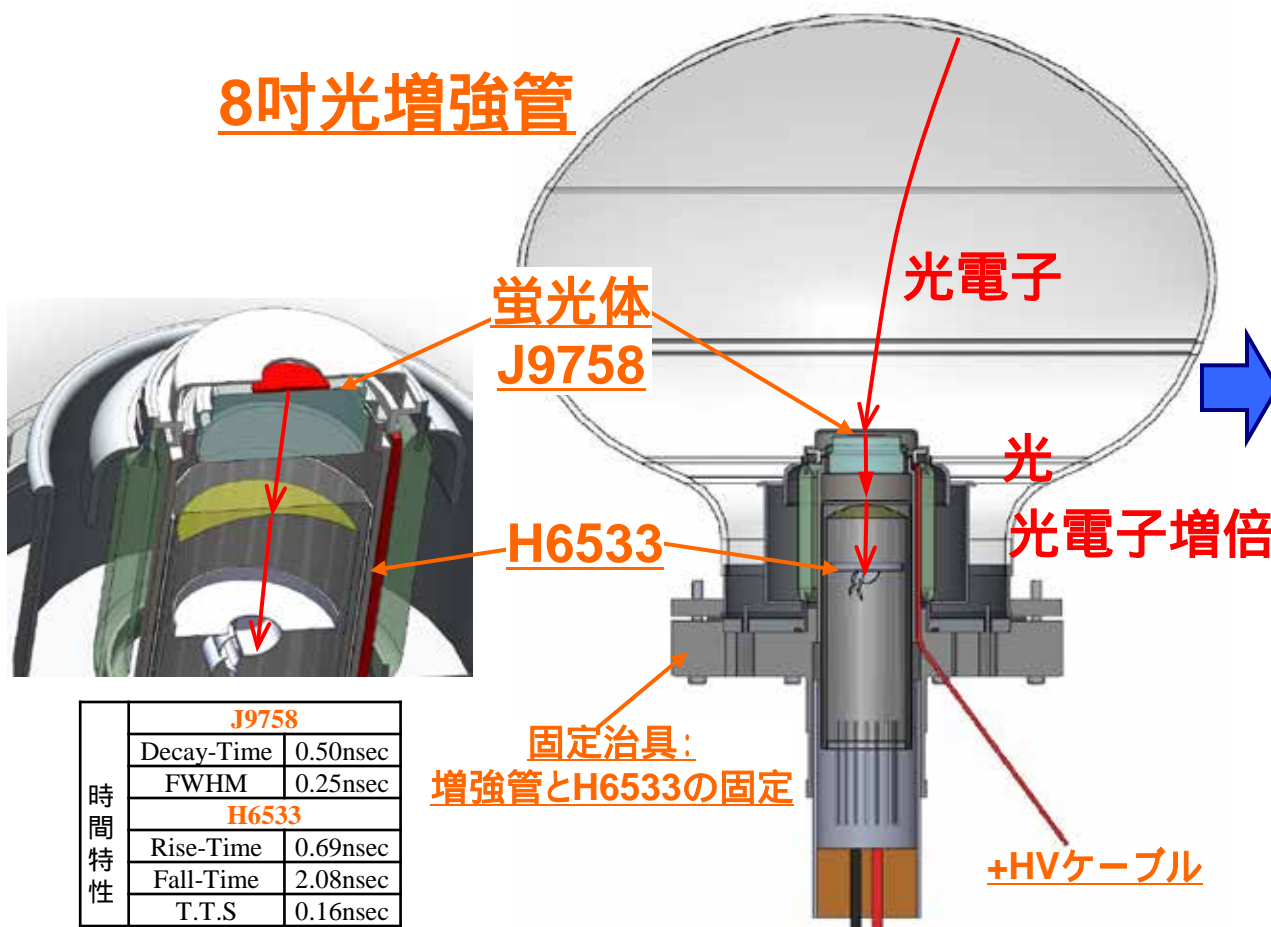
シンプルな構造により従来型PMTに対して優れた量産性

試作した8吋光増強管



8 吋光増強管の特性

8 吋光増強管

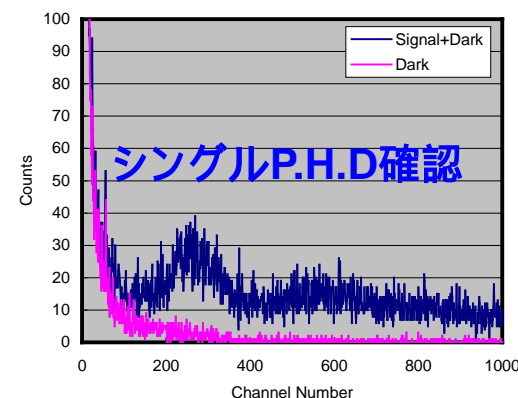


時間特性	J9758	
	Decay-Time	0.50nsec
	FWHM	0.25nsec
	H6533	
	Rise-Time	0.69nsec
	Fall-Time	2.08nsec
	T.T.S	0.16nsec

時間特性

Rise-Time	1.1nsec
Fall-Time	4.5nsec
T.T.S	1.0nsec

P.H.D



発光確率 約86%
(PMTを100%と仮定)

名古屋大学様で評価

- ・Dark対策が重要・・・蛍光体部での光モレ
- ・特性は蛍光体に依存・・・CE、時間特性

以上、究極を目指し開発しています。

- 1) 光電子増倍管(光センサー)とは
開発状況
- 2) 光を電子に変換する光電面感度の高感度化
- 3) ハイブリッドフォトディテクター(8 / 20インチHPD)
- 4) ガス増幅型光電子増倍管(Gas-PMT)
- 5) 世界最小の光電子増倍管(μ PMT)
- 6) 光増強管(8インチ光増強管)

質問等あれば、お願いします。

jp.hamamatsu.com