

Hyper-Kamiokande用 フロントエンドエレクトロニクスの設計 (水チェレンコフ型検出器のお話)

早戸 良成

(Kamioka obs., ICRR, Univ. of Tokyo)

Super-Kamiokande / Hyper-Kamiokandeで目指す物理

ニュートリノの持つ性質の研究

- 加速器ニュートリノ
- 大気ニュートリノ
- 太陽ニュートリノ

GUT (大統一理論)

陽子崩壊

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

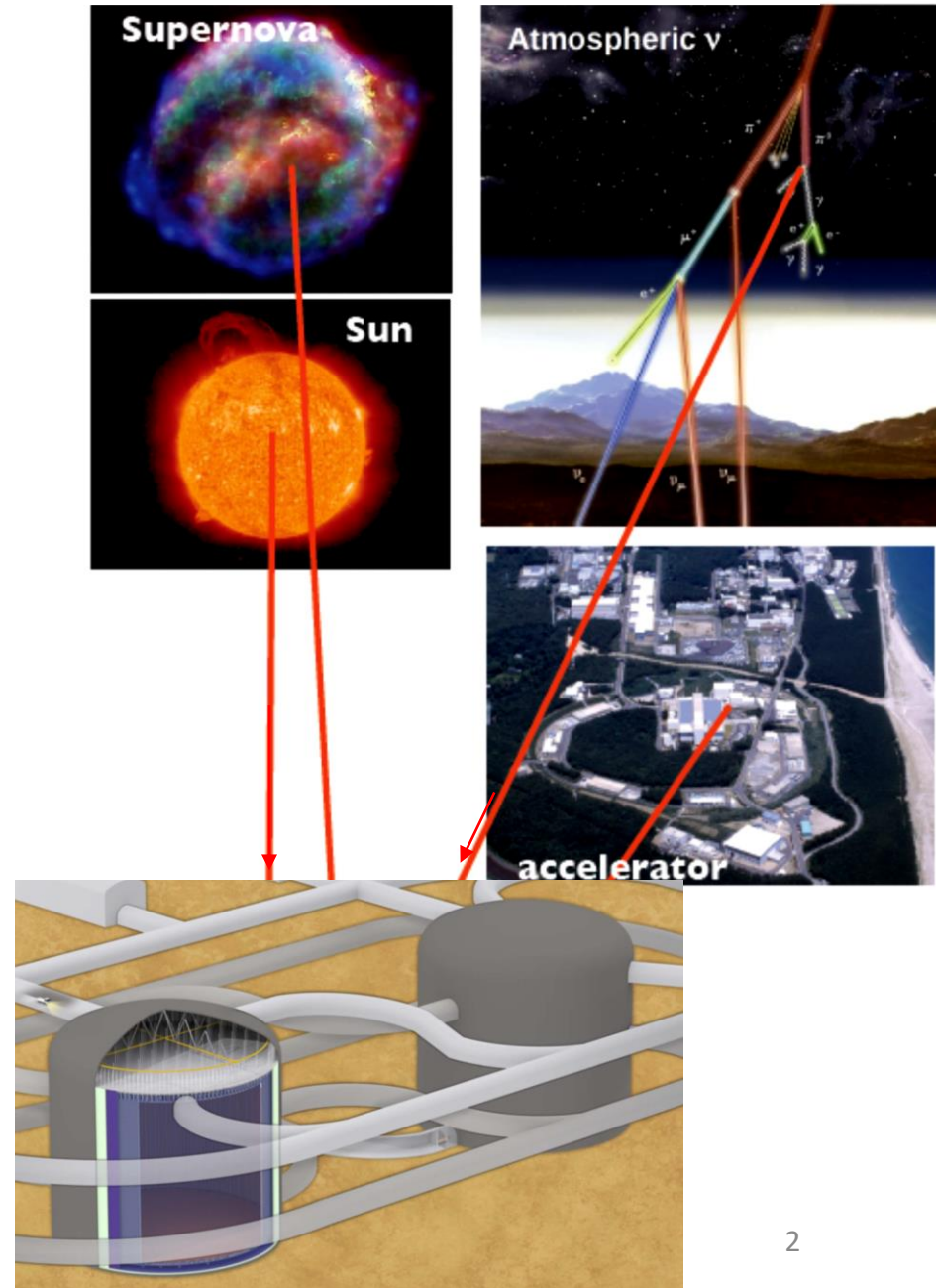
$$p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}$$

新物理

- WIMP 探索
- $n-\bar{n}$ 振動
- dinucleon decay など....

ニュートリノ天文学

- 超新星爆発ニュートリノ
- Supernova relic neutrino

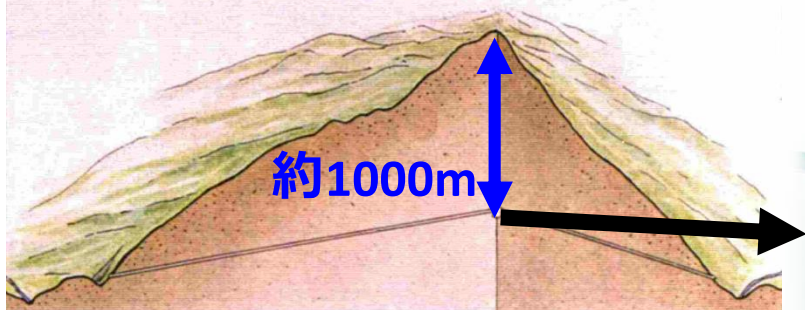


スーパーカミオカンデ (1996-)

50000トン水チェレンコフ型検出器

岐阜県神岡町神岡鉱山

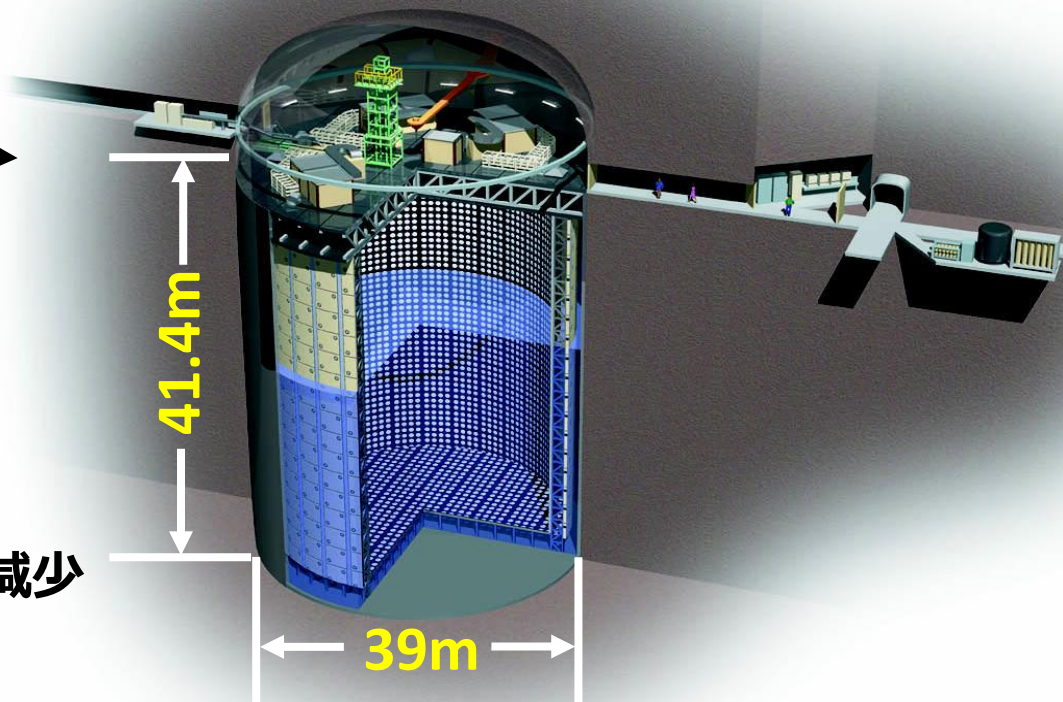
有効体積 22500t



宇宙からはいつも宇宙線が
降り注いでいる
希少な現象を捉えるには邪魔
地下に作ることで、宇宙線を遮蔽
神岡の場合、 10^{-5} 程度に減少

50000トンの水タンクを建設

- 地盤が良い
大きなタンクを設置可能
- 良質の地下水が豊富



約11000本の50cm光電子増倍管
チェレンコフ光を効率よく収集
(内表面の40%を光電面で覆う)

Super-Kamiokande の歴史

1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010



SK-I



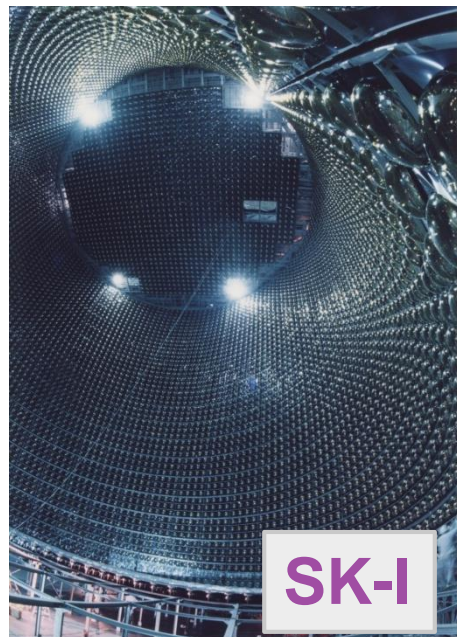
SK-II



SK-III



SK-IV



SK-I

**11146 ID PMTs
(40% coverage)**



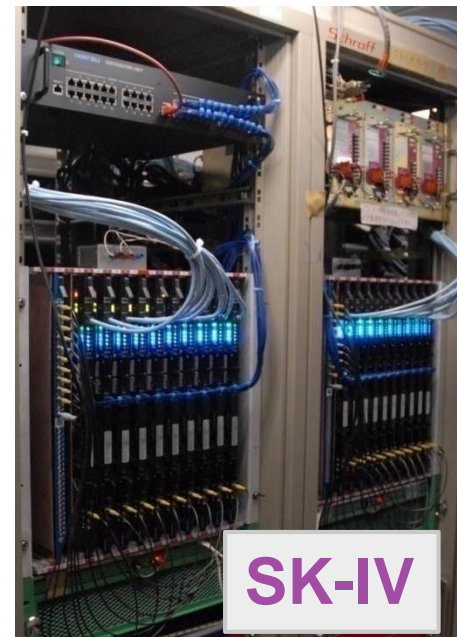
SK-II

**5182 ID PMTs
(19% coverage)**



SK-III

**11129 ID PMTs
(40% coverage)**



SK-IV

**Electronics
Upgrade**

~ 今も稼働中 ~

水チェレンコフ型検出器における素粒子観測

事象再構成の手法 チェレンコフ光の量と到達時間を利用

チェレンコフ光量

\propto 粒子運動量

事象発生位置

~ 荷電粒子が走り出した点

→ 光子のPMTへの到達時間
リングパターン（広がり）

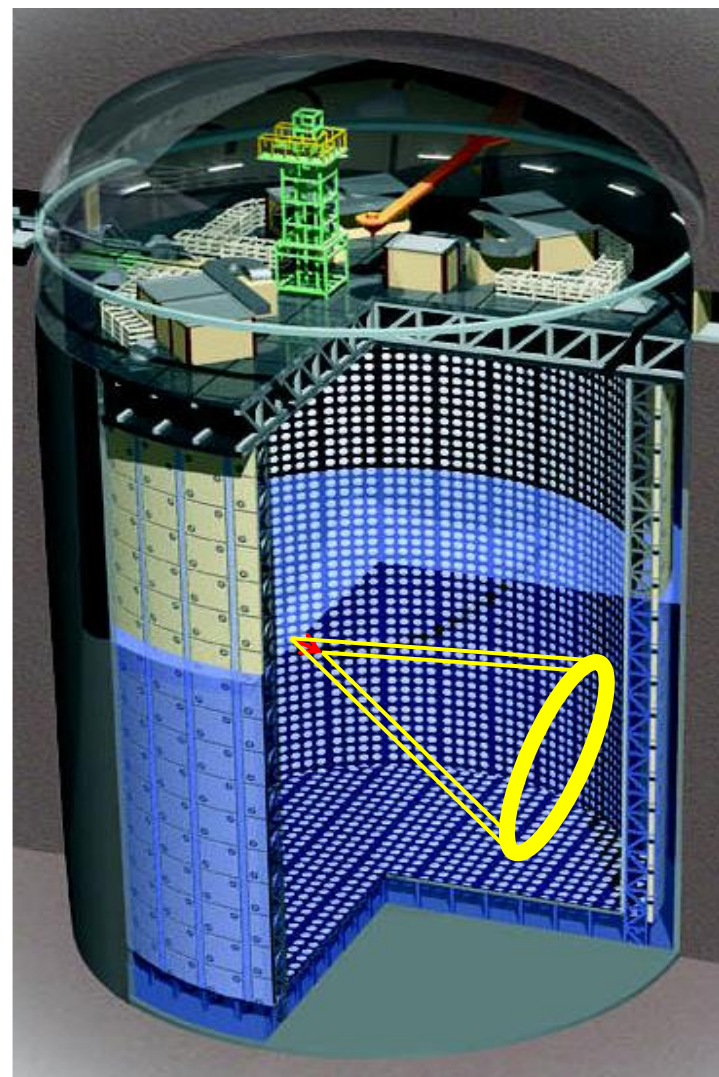
荷電粒子数（+ γ ）

→ チェレンコフリング数

荷電粒子種別

→ チェレンコフリング形状

$\mu \cdot \pi \cdot p$	シャープなリング
$e \cdot \gamma$	ぼやけたリング



水チェレンコフ型検出器における素粒子観測 ～ 大気ニュートリノ事象～

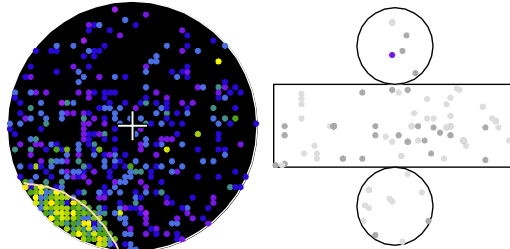
1日8事象程度観測される@SK

チェレンコフ光の分布がミュー粒子と、電子で違う

ミュー粒子

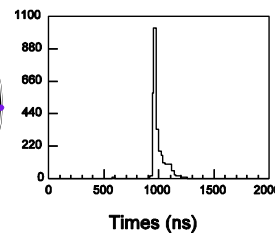
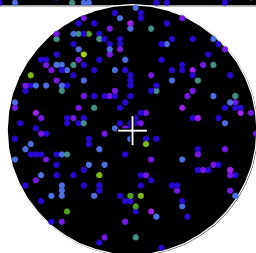
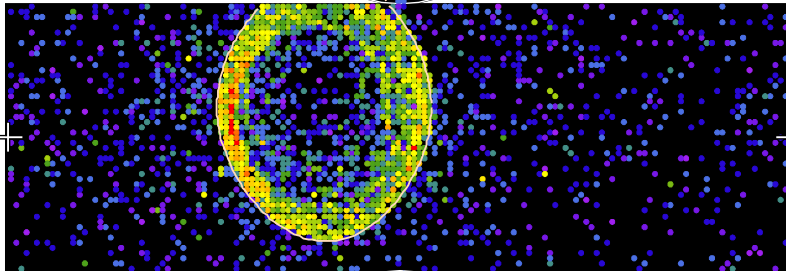
Super-Kamiokande

Run 3962 Sub 125 Ev 965982
97-05-01:15:32:29
Inner: 2887 hits, 9607 pE
Outer: 1 hits, 0 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 1690.0 cm
FC mu-like, p = 1323.6 MeV/c



Charge (pe)

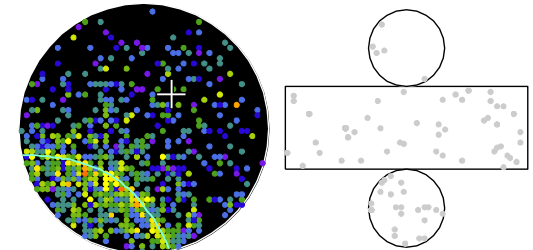
- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2- 8.0
- 4.7- 6.2
- 3.3- 4.7
- 2.2- 3.3
- 1.3- 2.2
- 0.7- 1.3
- 0.2- 0.7
- < 0.2



電子

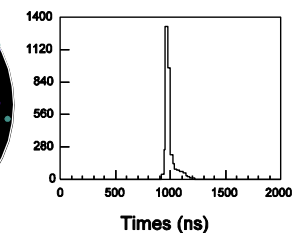
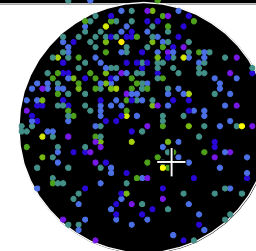
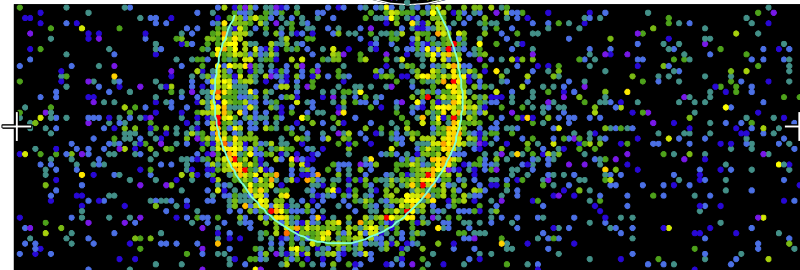
Super-Kamiokande

Run 5704 Event 3551590
98-03-17:07:14:39
Inner: 3397 hits, 7527 pE
Outer: 0 hits, 0 pE (in-time)
Trigger ID: 0x07
D wall: 1089.6 cm
FC e-like, p = 923.2 MeV/c



Charge (pe)

- >15.0
- 13.1-15.0
- 11.4-13.1
- 9.8-11.4
- 8.2- 9.8
- 6.9- 8.2
- 5.6- 6.9
- 4.5- 5.6
- 3.5- 4.5
- 2.6- 3.5
- 1.9- 2.6
- 1.2- 1.9
- 0.8- 1.2
- 0.4- 0.8
- 0.1- 0.4
- < 0.1



水チェレンコフ型検出器における素粒子観測 ～太陽ニュートリノ候補事象～

Run 062012 Event 21229635
2008.10.30 22:27:00

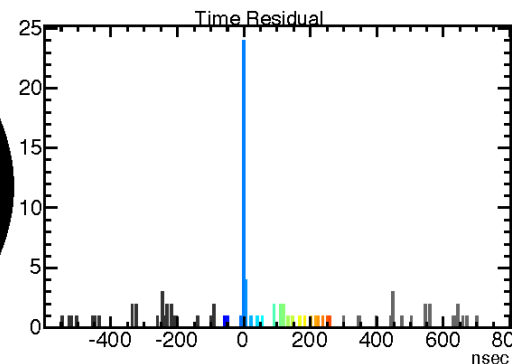
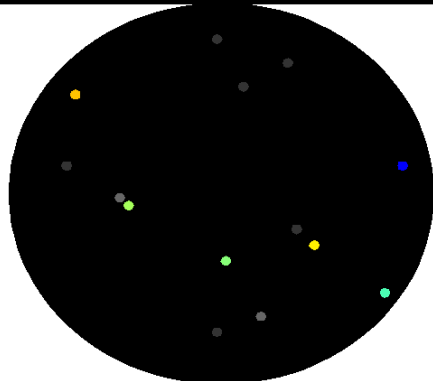
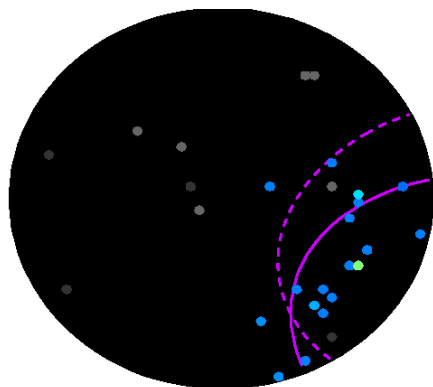
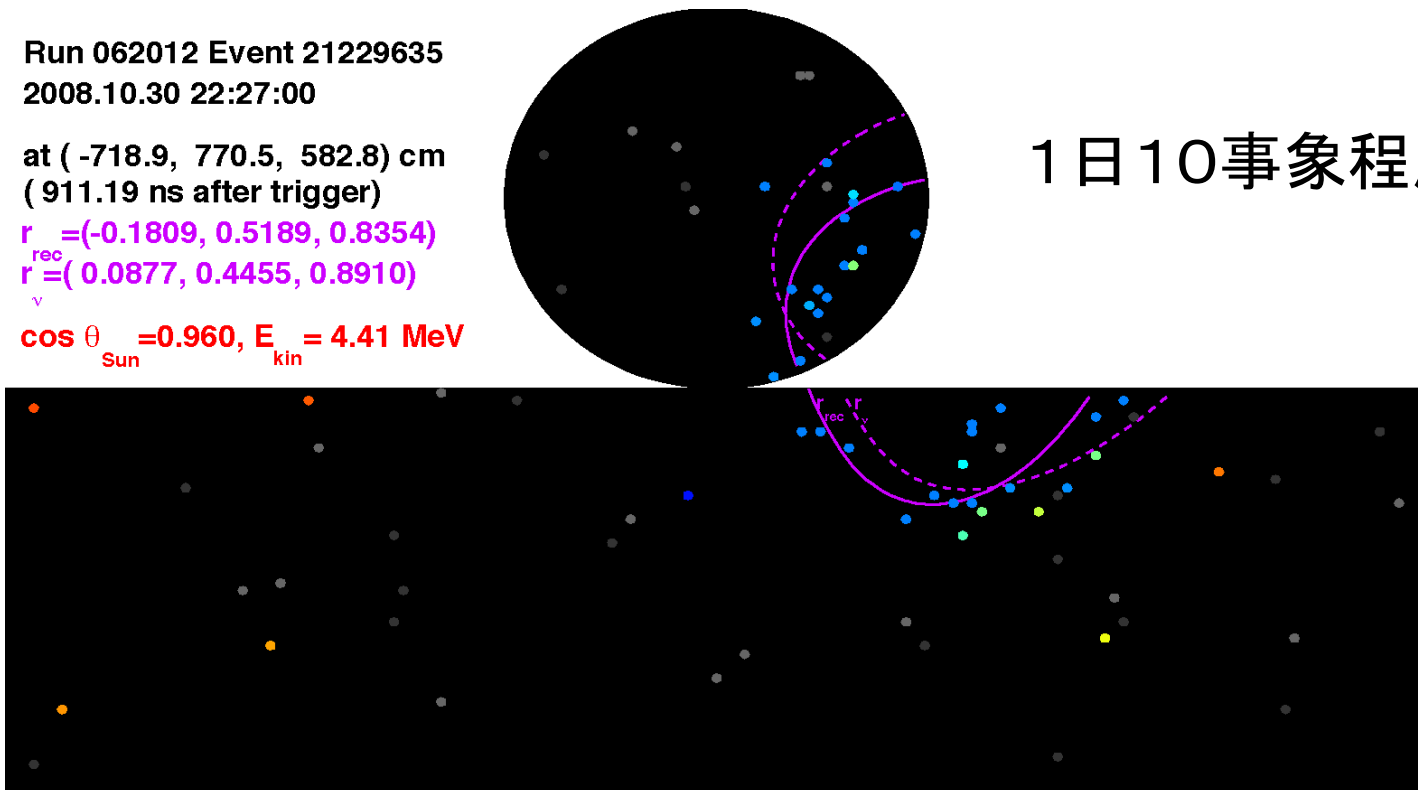
at (-718.9, 770.5, 582.8) cm
(911.19 ns after trigger)

$\mathbf{r} = (-0.1809, 0.5189, 0.8354)$

$\mathbf{r}^{\text{rec}} = (0.0877, 0.4455, 0.8910)$

$\cos \theta_{\text{Sun}} = 0.960, E_{\text{kin}} = 4.41 \text{ MeV}$

1日10事象程度@SK



Super-Kamiokande / Hyper-Kamiokande における物理

観測したい反応、粒子と事象数@SK

太陽ニュートリノ	数MeV ~ 約20MeV	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	~ 10 事象/日
超新星ニュートリノ	数MeV ~ 数十MeV	$\nu + e \rightarrow \nu + e$ $\nu + N \rightarrow e^\pm + N'$	超新星爆発時(@10kpc) ~4000事象/1秒 数万事象/total
大気ニュートリノ	約100MeV ~ 数TeV	$\nu + N \rightarrow l^\pm + N' (+ \text{hadrons})$	~ 8 事象/日
加速器ニュートリノ	約100MeV ~ 数GeV	$\nu + N \rightarrow l^\pm + N' (+ \text{hadrons})$	T2K 5~10事象/日
核子崩壊探索		$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ $\quad \quad \quad \searrow \gamma + \gamma$ $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ or $\begin{cases} \rightarrow \pi^0 + \pi^+ \\ \rightarrow \nu + \mu^+ \end{cases}$	

Hyper-Kamiokande project

検出器に要求される性能 / 仕様

SKで不足しているもの ~ 観測事象数 = 検出器の有効体積

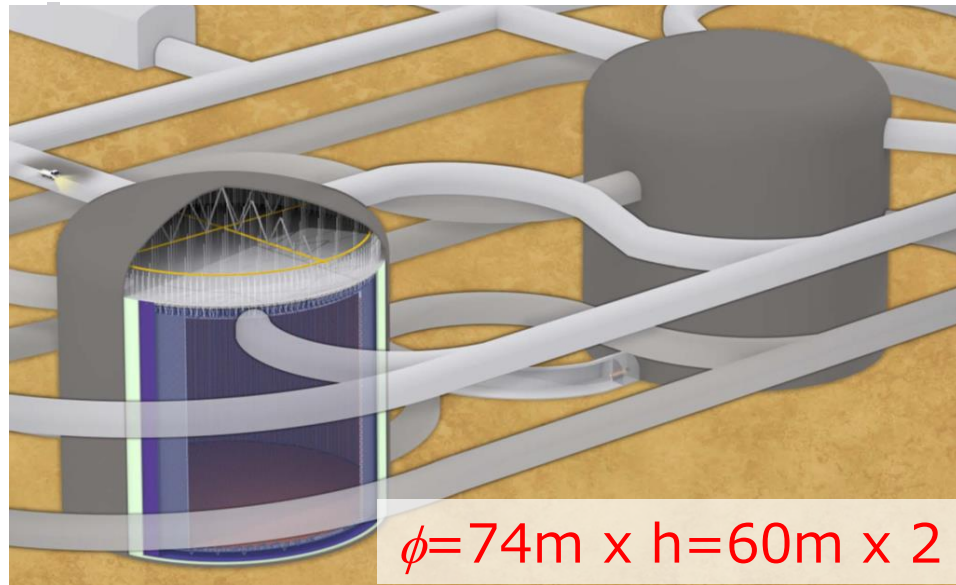
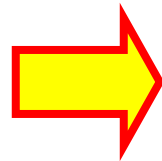
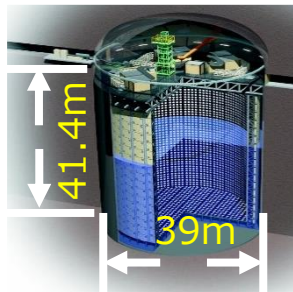
より大きな検出器を用い、

まだわからないニュートリノと宇宙の謎を探る

SKでの経験を最大限に活用

- 検出器の最適化
- 現実的な物理感度の事前評価

SK : Fiducial 22.5 kton HK : Fiducial 380 kton ~ **17 x SK**



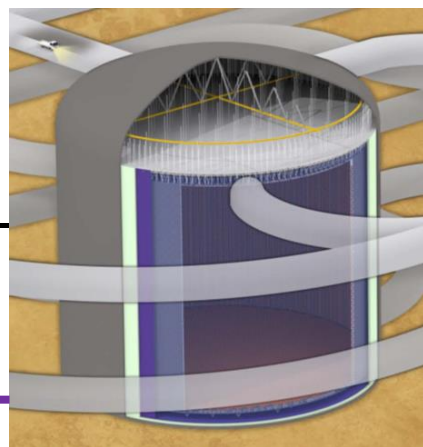
Hyper-Kamiokande ~ 巨大水チェレンコフ型検出器

検出器 ~ 有効体積 93.5 kton / tank x 2

内水槽用 ~ 40,000 本 / tank

外水槽用 ~ 6,700 本 / tank の光センサー

より高効率・高反応速度のセンサー



Baseline (reference)

20" Super-K PMT



Venetian blind dynode

Candidates (R&D phase)

20" Box&line PMT



Box&line dynode

20" HPD



Avalanche diode (AD)

量子効率

22%

30%

30%

収集効率

80%

93%

95%

時間分解能
(FWHM)

5.5 nsec

2.7 nsec

1~2 nsec

Hyper-Kamiokande ~ 巨大水チェレンコフ型検出器

検出器 ~ 有効体積 93.5 kton / tank x 2

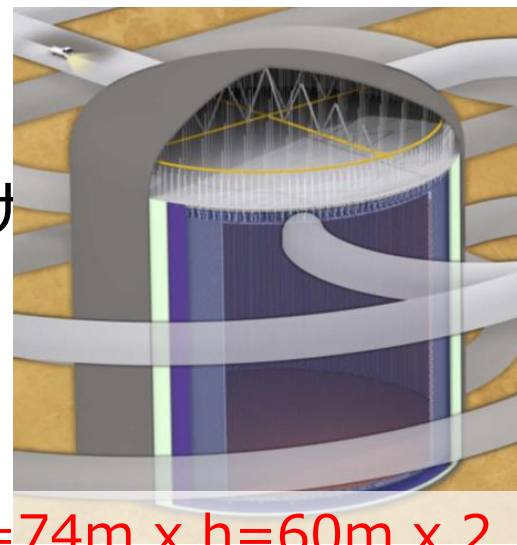
内水槽用 ~ 40,000 本 / tank

外水槽用 ~ 6,700 本 / tank の光センサー

測定するもの

光センサーの出力電荷量

光子の到達時間 (相対時間)



$\phi=74\text{m} \times h=60\text{m} \times 2$

必要なもの

Self gating signal digitizer (ADC + TDC)

タイミング同期システム

(TDC同期クロック + カウンター)

GPS



安定な電源 (光センサー用、エレクトロニクス用)

スローモニター

(各種電源電圧、電流、温度、湿度? など)

水チェレンコフ型検出器におけるデータ収集

光センサーは入射光量に比例した電荷を出力します。
(1 光子から検出が可能)

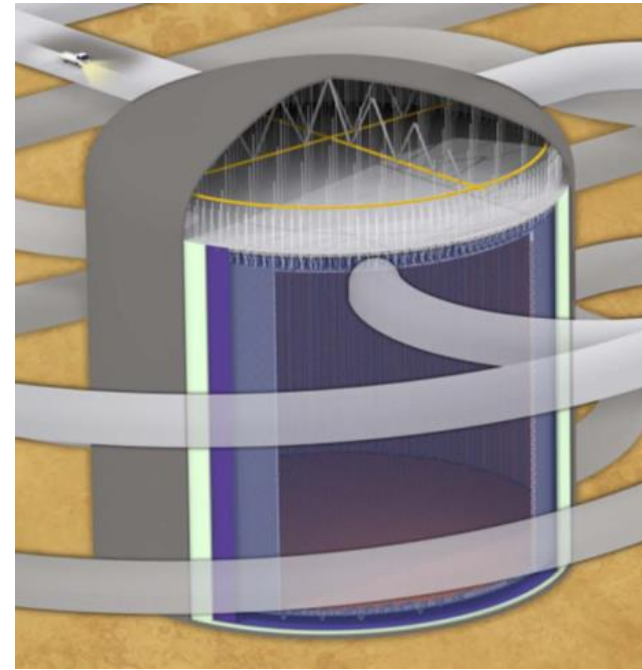
Dark noise は 現状で 4kHz (センサー依存だが、10kHz以下)

信号であるチェレンコフ光は、短時間の発光
～ ほぼ同時 (数百ns以内) に複数の
光電子増倍管で光が検出される。

➡ ほぼ同時に一定以上の数のPMTで
信号が検出されたとき、データを取得

PMT同時本数による閾値
～低いほうが低いエネルギーのニュートリノまで
観測が可能

しかし、低くすると、水中や周辺岩盤に含まれる
放射性元素による事象が多くなりすぎる。



水チェレンコフ型検出器におけるデータ収集

事象発生のタイミングは不定期

セルフトリガー

トリガーは、基本的に全部のPMT信号がないと生成できない

一定時間内 (SKでは200ns) のヒット数を用いる

エネルギーレスショルド ($\varepsilon=50\%$) $\sim 3.5\text{MeV}$ for 太陽ニュートリノ観測

約20本のPMTが同時にHIT (SK with 40% PMT coverage)

トリガーレート $\sim 12\text{ kHz}$ @SK-IV

観測したい事象は、すべてあわせても 数十事象/日

壁面の岩盤中ならびに水中に残っている

放射性元素の崩壊で発生する

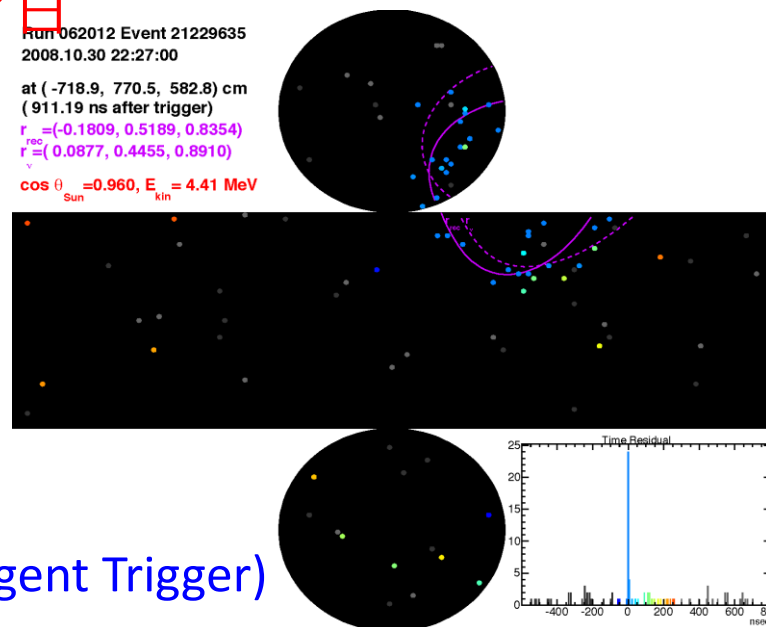
γ 線による事象が大半を占める。

ほかに高エネルギーの背景事象として、

宇宙線 μ 粒子による事象が10Hz弱。

→ 低エネルギー事象については、反応位置を再構成し、壁際的事象を除去
タンク内での反応のみを蓄積する (Intelligent Trigger)

Run 062012 Event 21229635
2008.10.30 22:27:00
at (-718.9, 770.5, 582.8) cm
(911.19 ns after trigger)
 $r_{rec} = (-0.1809, 0.5189, 0.8354)$
 $r_{rec} = (0.0877, 0.4455, 0.8910)$
 $\cos \theta_{Sun} = 0.960, E_{kin} = 4.41\text{ MeV}$



Hyper-Kamiokande electronics / DAQ system ~ Trigger

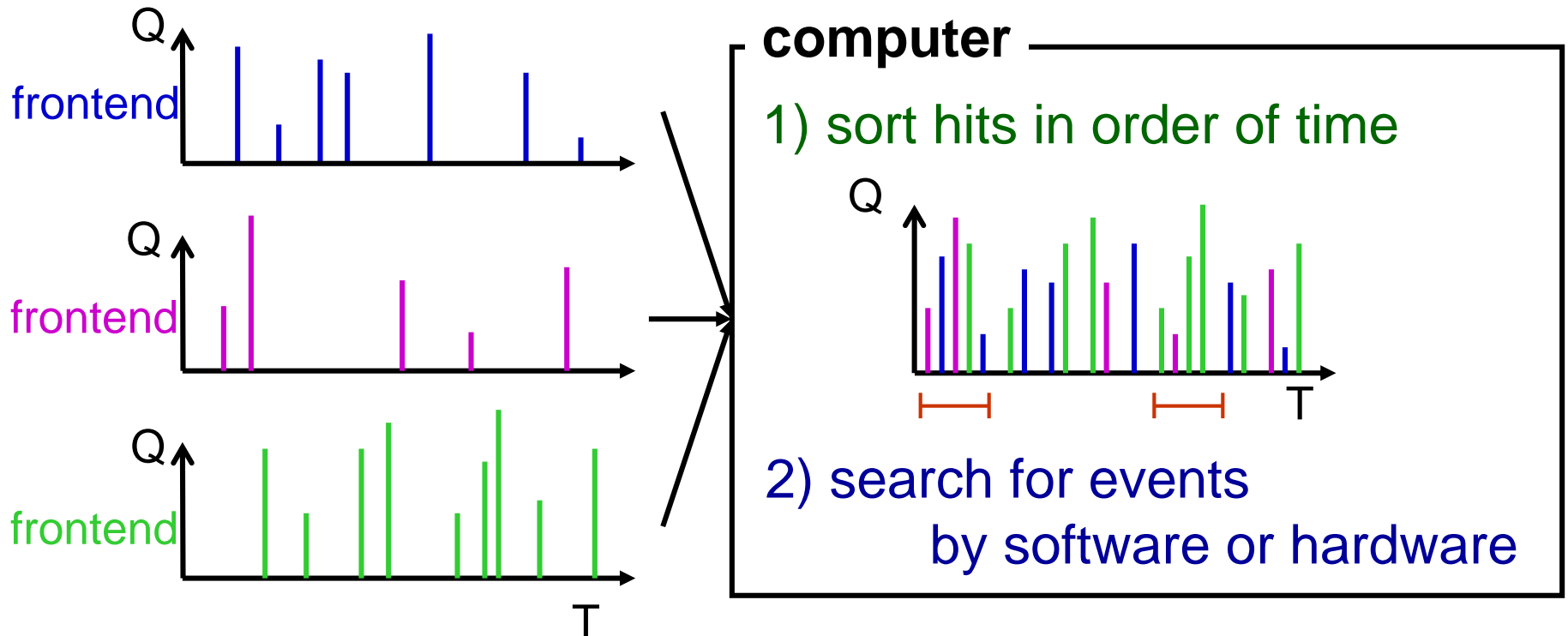
データ収集のエネルギー閾値を大幅に下げる

加速器ビーム実験では、事象をバイアスなく残したい

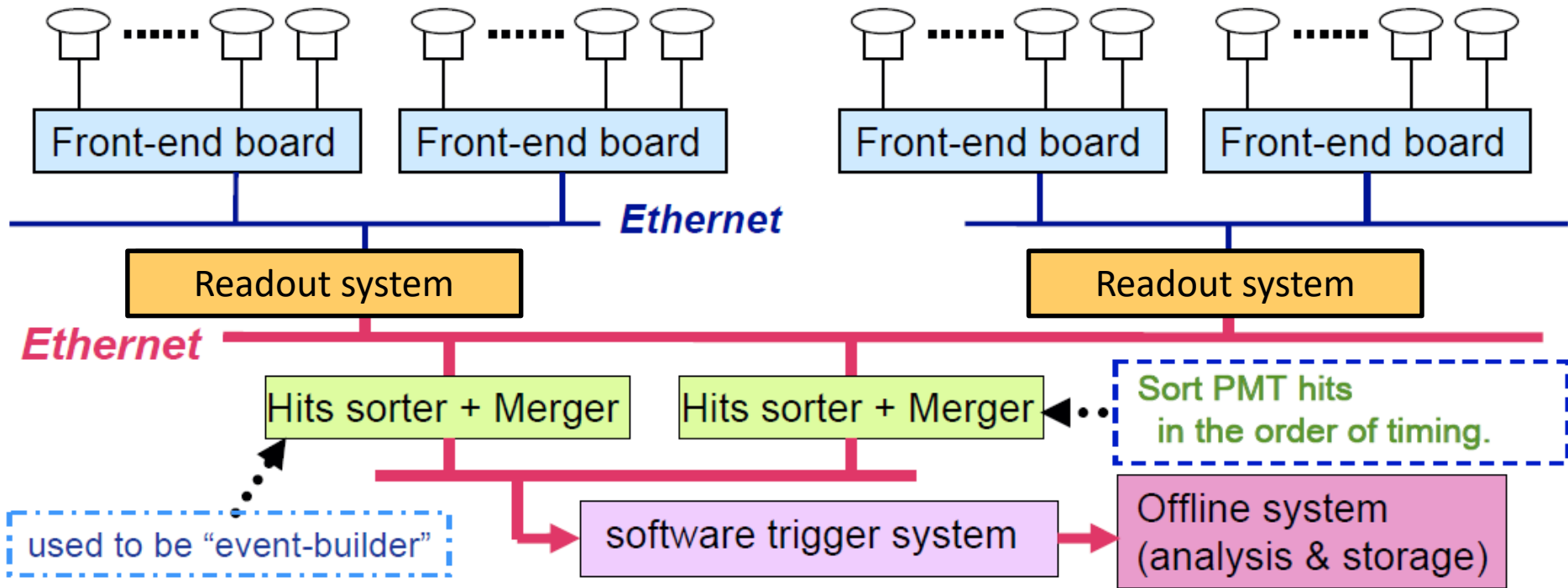
事象種類によってはイベントゲート幅を広くしたい (40us、1ms等)

加速器ビーム実験 (T2K) ではビーム到着前後1ms

最初から全部のPMT hit を記録してしまい、ソフトウェアで事象探索

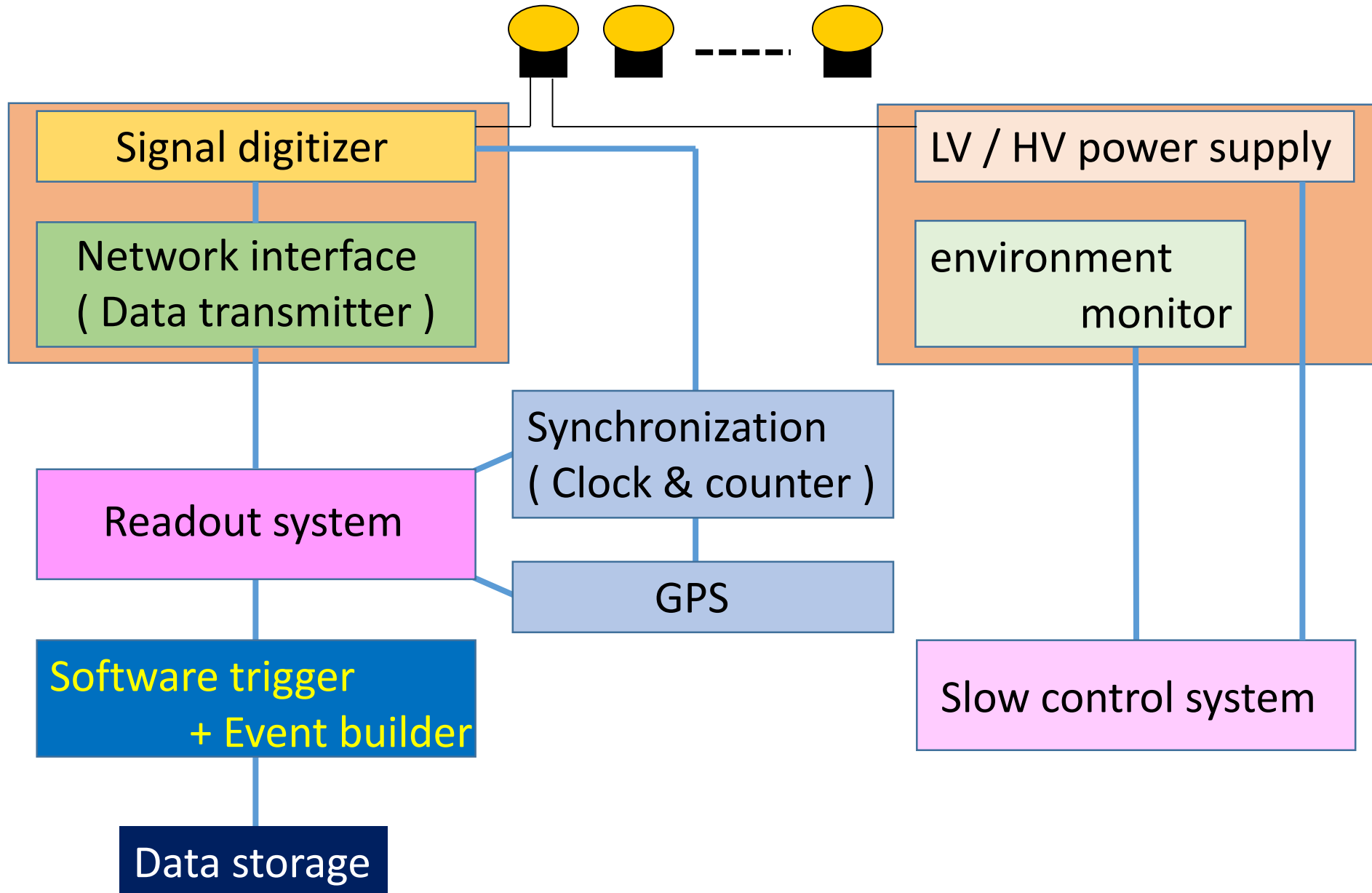


Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system

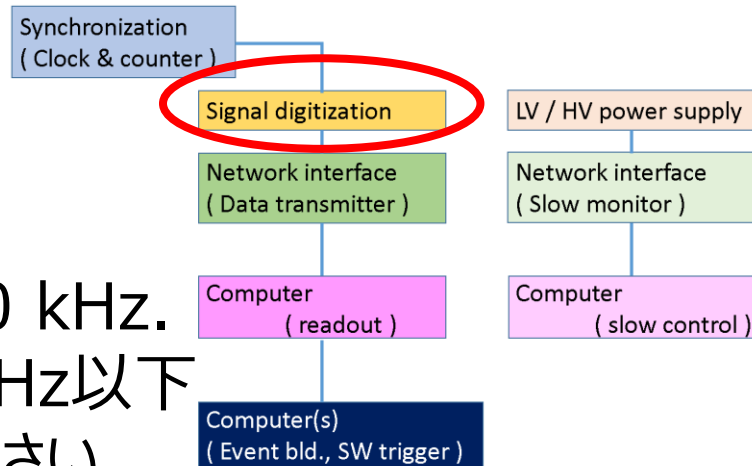


- 1) 一定量以上の電荷 ($\sim 1/4$ p.e.) が光センサーから出力されたとき、これをデジタル化。
- 2) デジタル化された信号 (電荷情報、時間情報) をすべて計算機に転送。
- 3) デジタル化された情報を用いてイベントを探索 (ソフトウェアトリガー) イベントとして残すべきデータのみを記録。

Major components of the HK electronics / DAQ system



Signal digitization ~ requirements ~

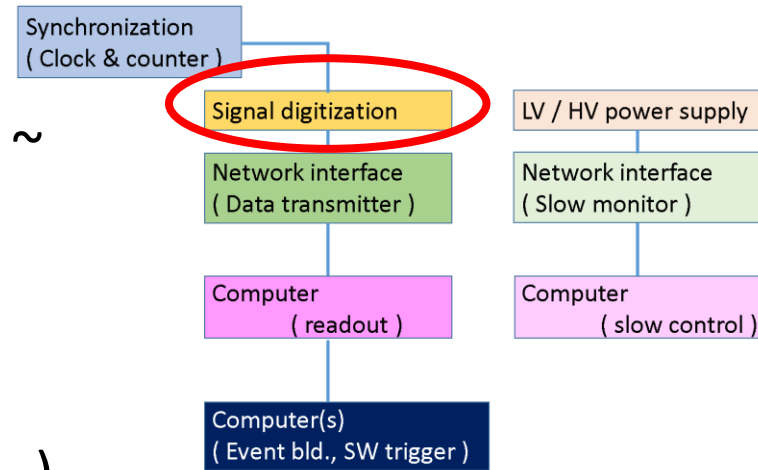


- 信号の大半は dark noise 由来
Expected dark rate is 5 ~ 10 kHz.
Cherenkov Photon は $O(100)$ Hz 以下
- 低エネルギー事象の Occupancy は小さい
典型的な太陽ニュートリノや放射性元素
によるイベント (数 MeV ~ 15 MeV) の
occupancy は $O(<1\%)$
- 高エネルギー事象 (宇宙線 μ) のレートは低い ($\ll 100$ Hz)
ただし、検出器位置 (土被りの厚さ) による。
- 光の位置分布は一般的にかなり広い (局所化しない)
- ひとつの光センサーが短時間に連続して信号を受けることは稀
チャンネルのデッドタイムは $O(1\text{ms})$ 程度まで許容
- すべての TDC は同期されている必要がある。
Quantize の影響が見えるのは好ましくない

Signal digitization ~ requirements ~

~ Some parameters ~ from SK electronics ~

- Self triggering for each channel
- High Sensitivity for single p.e.
 - Discriminator threshold
~ $\frac{1}{4}$ p.e. *) (well below 1 p.e.)
- Processing speed/hit (channel dead-time)
~ 1 μ sec / hit
- Charge dynamic range
0.1 ~ 1250 p.e. (0.2 ~ 2500 pC)
- Charge resolution
~ 0.05p.e. (< 25 p.e.) in RMS
- Timing LSB
~ 0.52 ns
- Timing resolution
0.3ns (@1 p.e.) in RMS
0.2ns (> 5 p.e.) in RMS



*) QBEE : $\frac{1}{4}$ p.e. ~ 3 mV

Signal digitization ~ Possible design ~

QTC + TDC

SK実験では、グループで開発した

QTC (CLC101)を用いている

QTC : Charge to Time converter

電荷を時間幅として出力

CLC101 は 3 channels, 3 ranges / ch.

セルフトリガー

電荷レンジを3つもつ

~広ダイナミックレンジ

電荷積分ゲートよりも出力時間幅のほうが長い

Channel deadtime は 900ns 程度

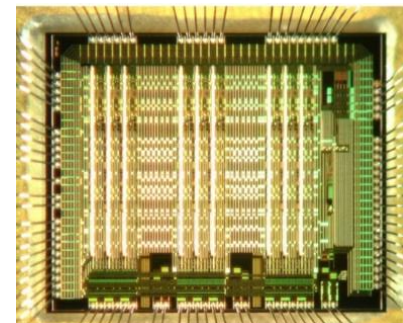
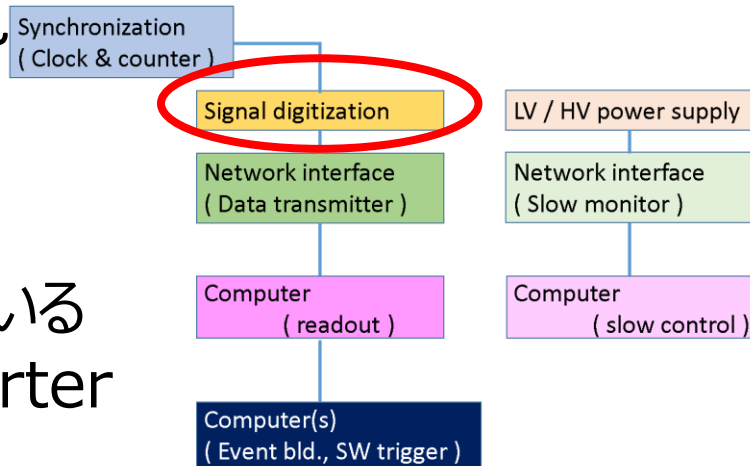
Process rule

CMOS 0.35 mm

(まだ製造可能なFabは稼働中)

Est. price @ ~ ¥ **6,000 / chip**

~新ASICの開発可能性も検討中~。



Signal digitization ~ Possible design ~

QTC + TDC

TDCについては、AMT3が製造中止
要求性能はそれほど高くない

Timing LSB ~ 0.5 ns

Timing resolution ~ 0.2 ns

FPGAによるTDCの性能が上がっている

~これを採用することを検討中

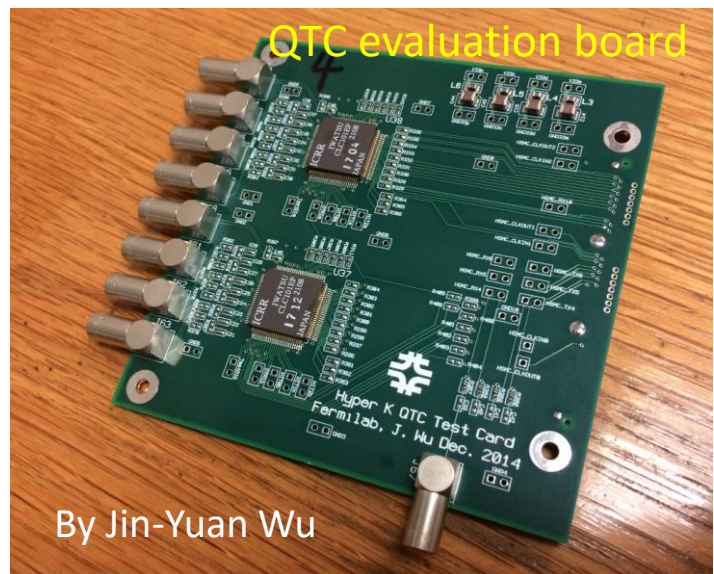
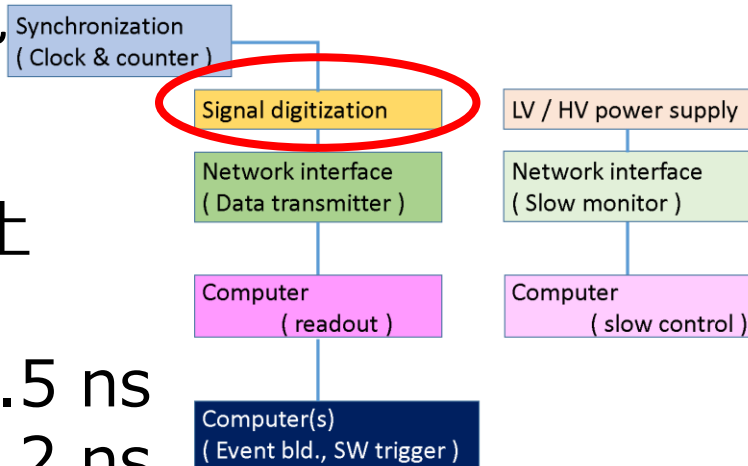
Candidate

*“Wave Union” TDC by Jin-Yuan Wu,
Fermilab*

32 ch. TDC on Altera Cyclone III
(\sim \$2 / channel)

Now evaluating at FNAL
with QTC test board.

https://cdcv.s.fnal.gov/redmine/projects/lariat-online/wiki/Jinyuan's_TDC_Documentation



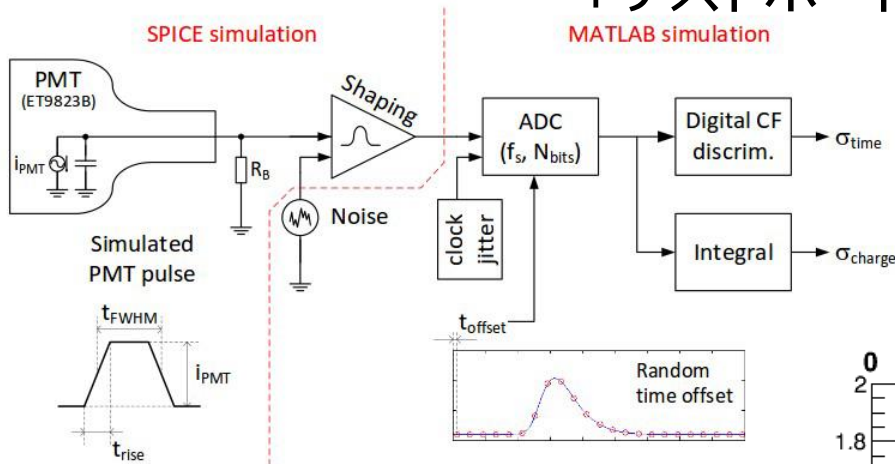
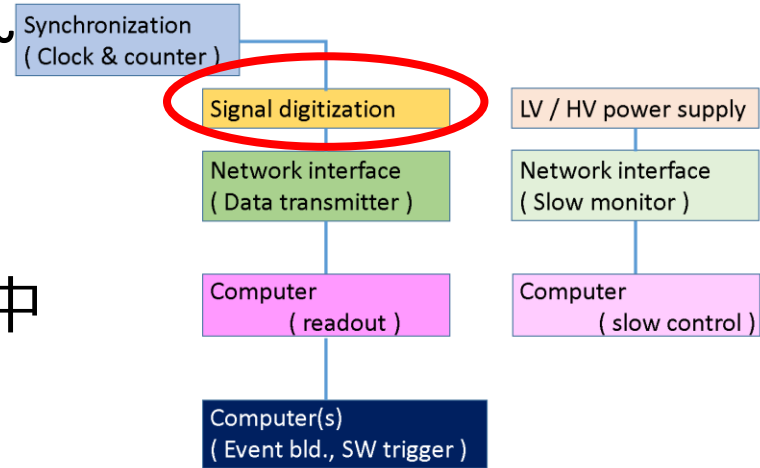
By Jin-Yuan Wu

Signal digitization ~ Possible design ~

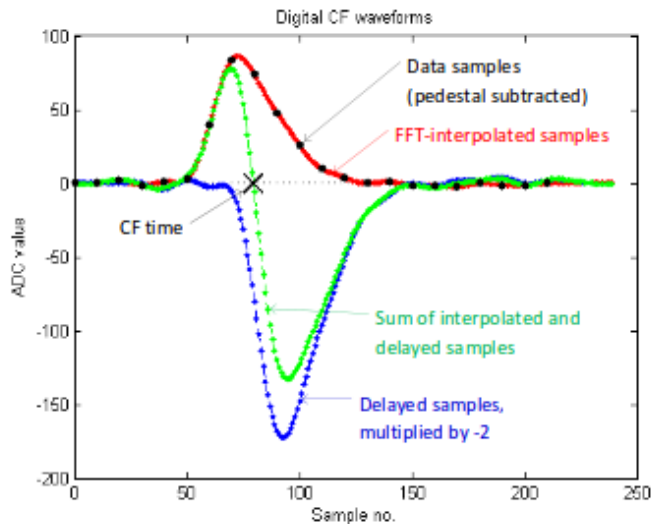
Shaper + FADC (+ FPGA)

Simulation study

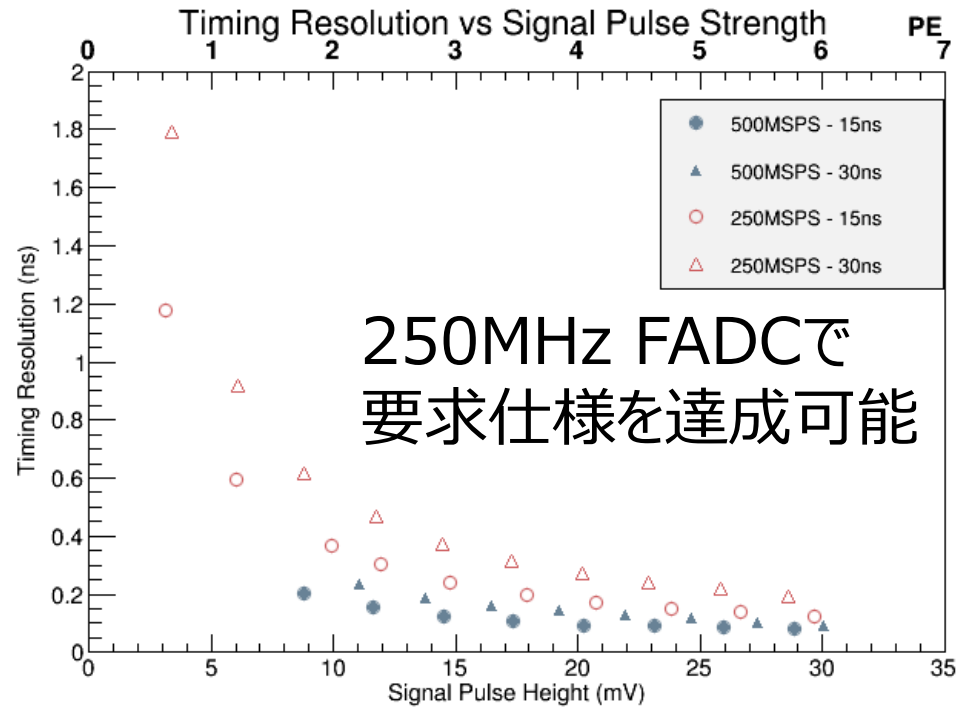
+テストボード開発中



Digital Constant-Fraction



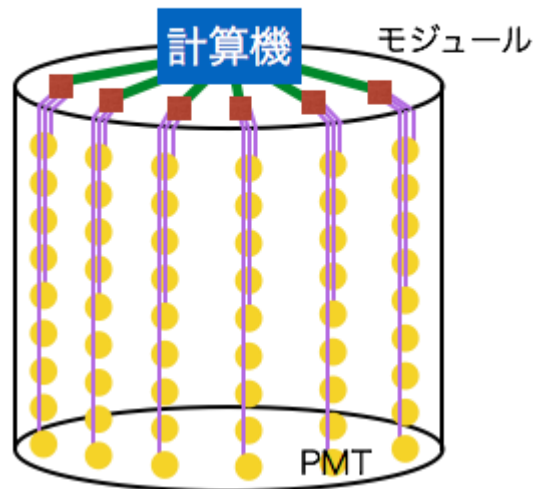
T resolution vs charge



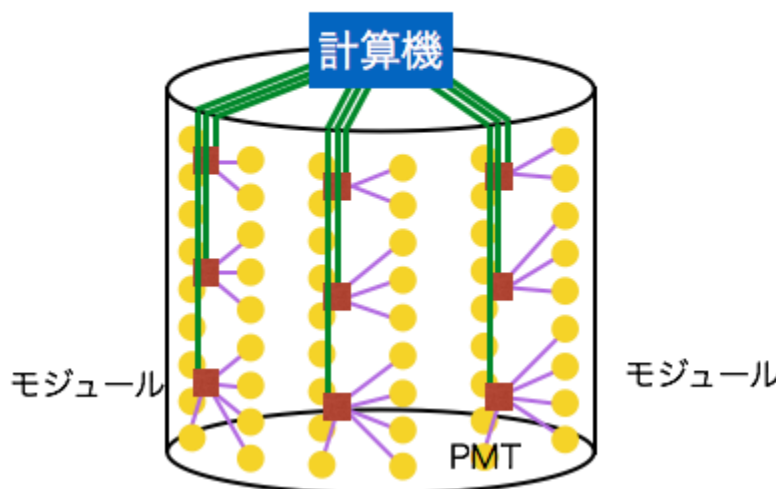
Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system

フロントエンドエレクトロニクスの配置

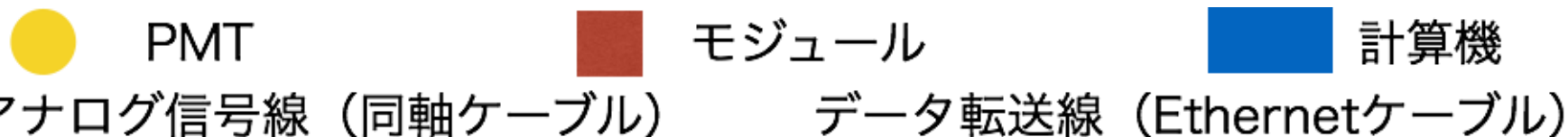
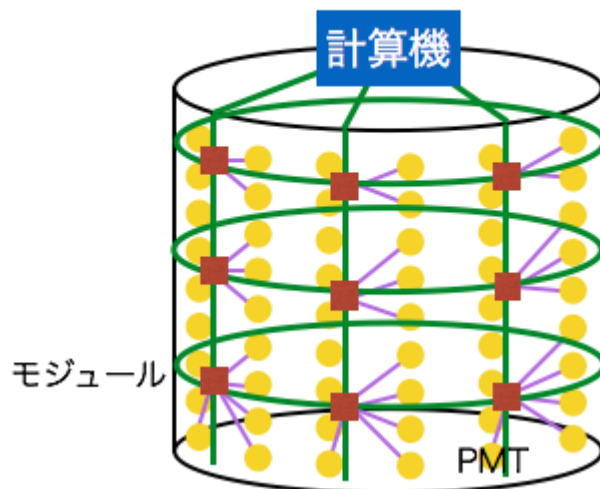
1. SKモデル



2. 水中直結モデル



3. メッシュモデル

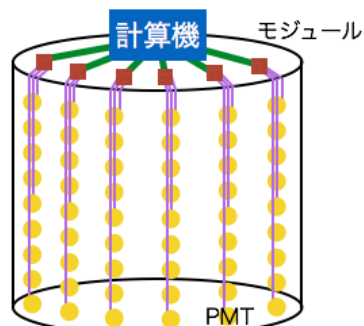


検出器が大きいため、タンク底部からケーブルをひくと~150mとなる。
アナログ信号を引くと、信号の劣化が発生
Ethernetケーブル (メタル) は、100mの上限を超過
ケーブル重量も構造体の設計に影響

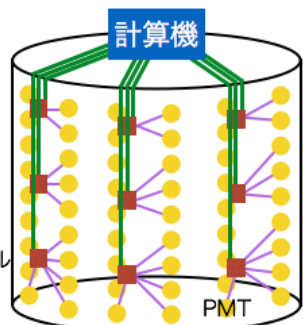
Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system

フロントエンドエレクトロニクスの配置

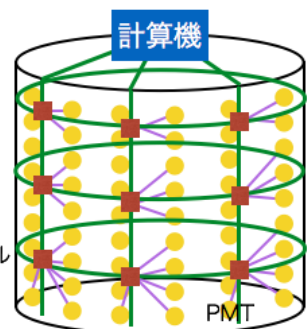
1. SKモデル



2. 水中直結モデル



3. メッシュモデル



SKモデル

PMT40,000本 x 長さ150m ⇒ 980ton

水中直結モデル (光Fiber + 長さ40m ~ 150m)

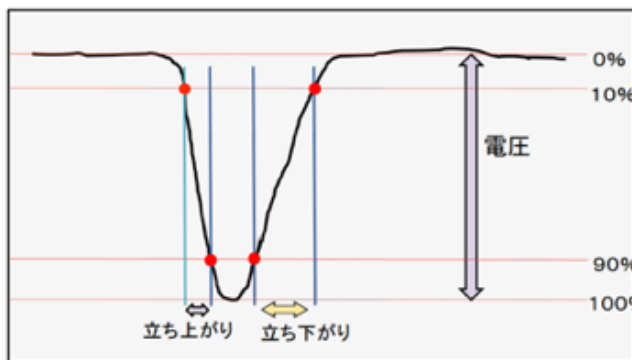
Module1,728個 x 長さ様々 ⇒ 230ton

メッシュモデル (UTP + **メッシュ状**(各4m))

Cable3,456本 x 長さ4m ⇒ 200ton

PMT24ch~モジュール間・モジュール~計算機間ケーブル(150g/m)
モジュールの重さ(50kg)の総和

同軸ケーブル(RG58C/U, BNC)中のアナログ信号減衰



	0m	20m	100m
波高	-500.8mV	-427.1mV 85%	-242.3mV 46%
立ち上がり 時間	7.31ns	7.92ns 109%	11.57ns 158%
たち下がり 時間	19.1ns	24.1ns 126%	71.5ns 375%

Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system

データ転送は、イーサネット+メッシュという（特殊な）形態を想定

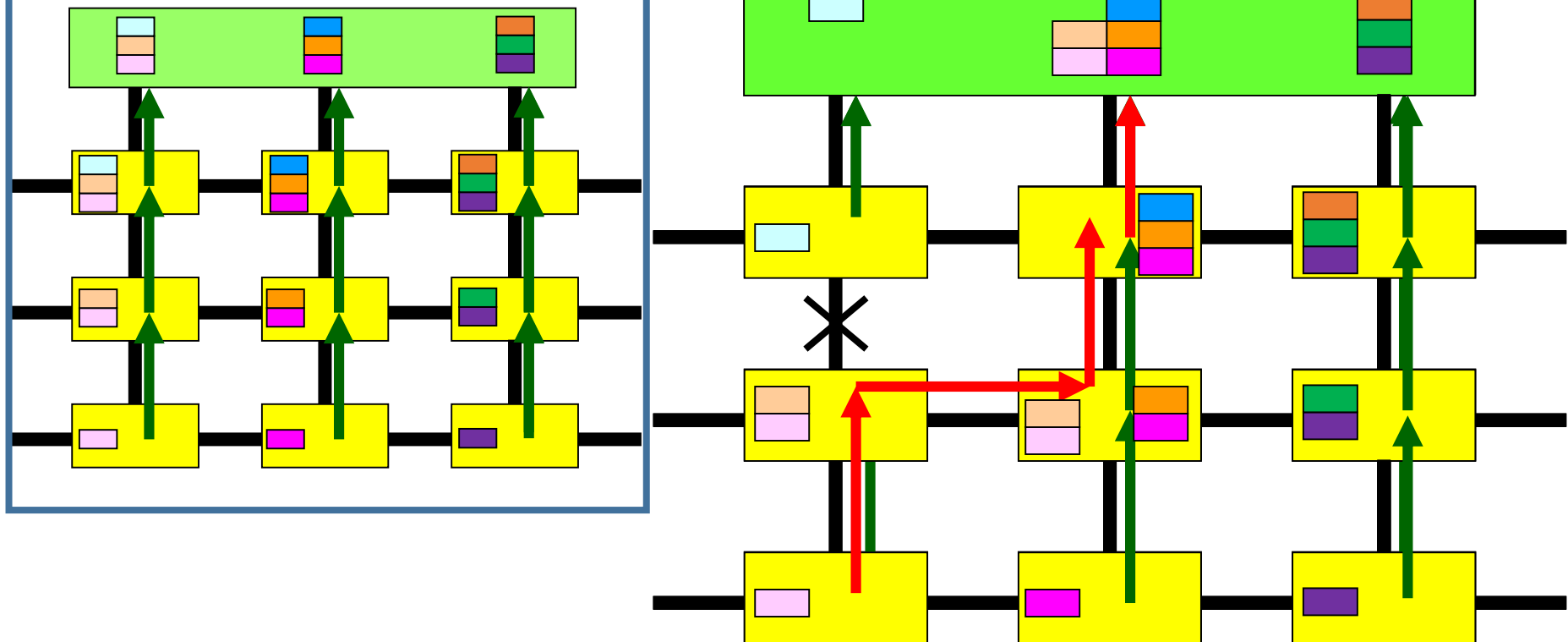
～ 耐障害性を持たせるため ～

ただし、通常のトポロジーではないので、

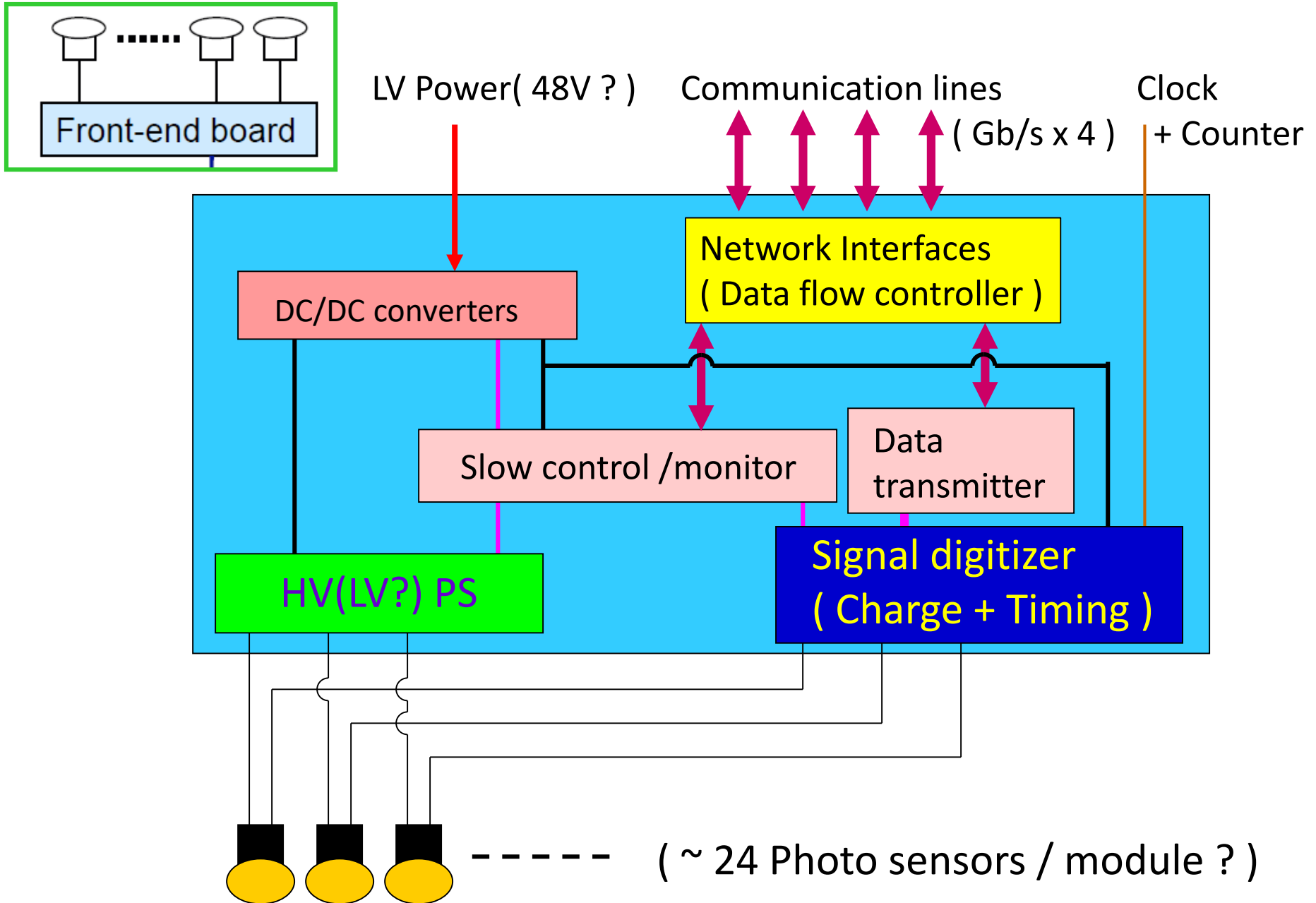
ルーティングについて、独自のものを設計

Possible module connections

Readout computer (module)



Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system



Schematic diagram of the HK electronics / DAQ system

HKのフロントエンドエレクトロニクスでは、

処理にCPUがほしいところが複数ある。

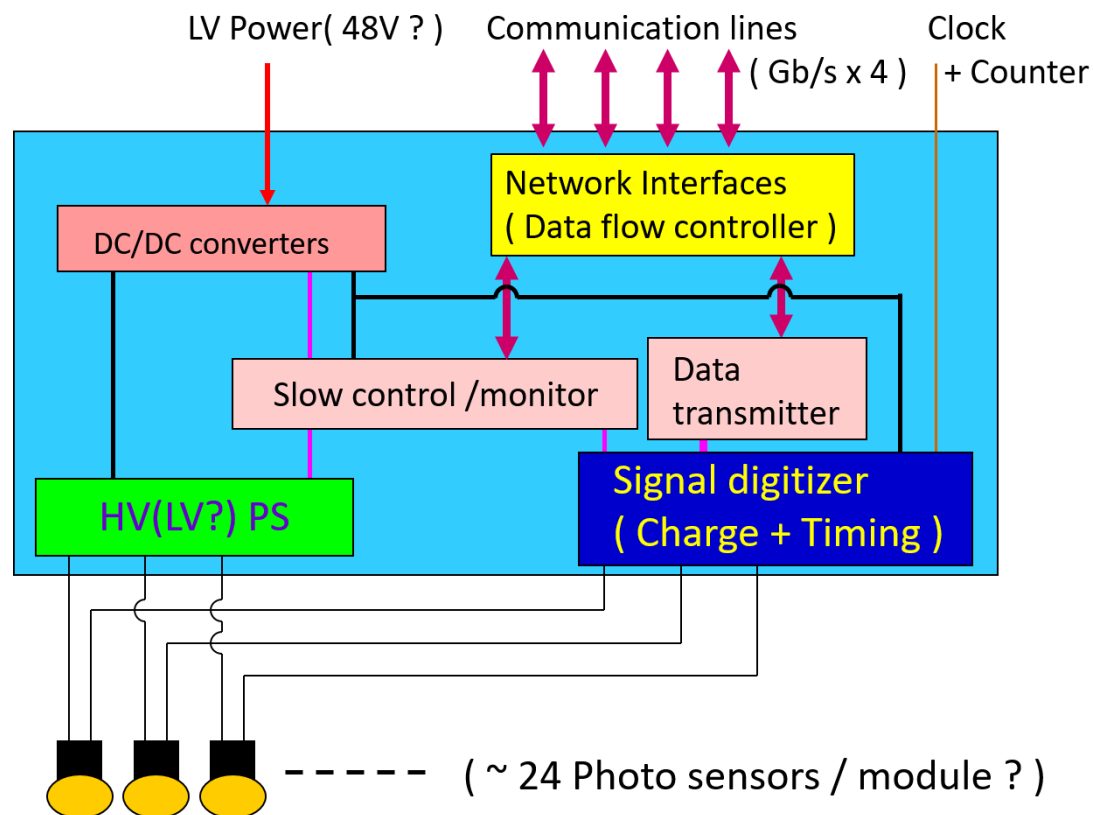
- 1) 動的ルーティング(耐障害性)
- 2) PMT用電圧制御、環境等のシステムモニター
- 3) データの時間順ソート+整合性チェック(FPGAでも可能だが。。)

水中にボードを入れると
20年程度修理不可
～長寿命パーツの利用～

OS利用時の課題

eMMCにせよSDにせよ、
書き込みをしてしまうと
寿命が気になる。

(linux系を使うなら
対策が必要)



Summary

Hyper-Kamiokande用データ収集システムの設計、開発を進めている。

基本設計はSKの経験を利用して行っているが、技術進歩、センサー性能向上、機材の設置場所の制限などを考慮し設計を進めている。

同期タイミング信号や同期用カウンターの配布技術は、White Rabbitの利用、もしくは、直接の配布(10~50MHz)を検討している。

2018年にはでDigitizerの技術評価などを完了、実機のデザインを開始する予定。

電源を外部から供給するシステムについても調査中。

(おまけ)

ARMでlinuxを使うとき、SD cardやeMMCなどを単純に使うと寿命が気になる。通常の設定でそのまま使うと、/varや/tmpなどで書き換えが発生するので、交換が容易な環境ならよいが、そうでない場合はtmpfsを使うなどの対策が必要。この時、使えるメモリが減る、電源を切るとログが消える等の課題もあるので、よく考える必要がある。

(もちろんNFS、随時ログをコピーなどという手もあるけれど。。)

現状、ARM上のlinuxは、SD card等にアクセスを行った場合、マルチコアでもすべてのユーザープロセスが止まることがあるようにみえる。

リアルタイム性を要請するとちょっとキツイ可能性がある。

(kernelのversionに依存するかも)

防水コネクタの開発

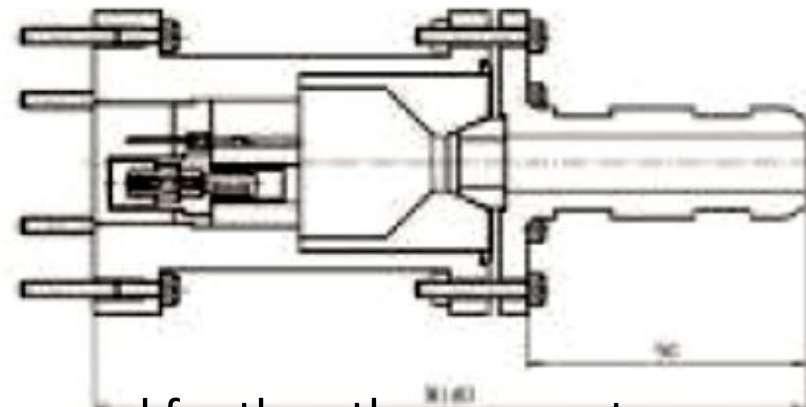
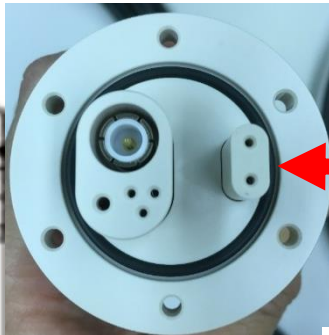
R&D of the HV(8kV) + LV (signal + control) water tight connector.



(diameter is ~ 50 mm)

HV (8KV) lines

Control lines
and HPD signal (COAX)



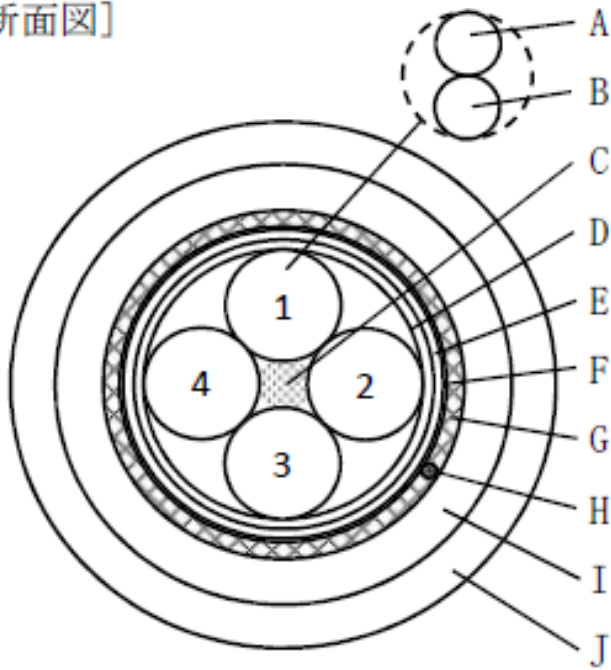
Design of the outer shell is universal and can be used for the other connectors, Ethernet (RJ45), optical fibers and power supplies.

Pressure tolerant Ethernet cable

Usual Ethernet cable can not be used in the water because the compressed cable can not transmit the differential signals properly.

Drawing of the pressure-tolerant Ethernet cable was prepared by a company.

[断面図]



cable weight : ~ 90g / m

We have asked to produce this cable (~ 200m) and perform pressure tolerance test using a small pressure vessel from April.