

# Beam-RICH Meeting

鈴木翔太

2023/1/17 (Tue.) E50 D&D の終了後

# 目次

- LHCb Technical Design Report 14 から得た情報
  - <https://cds.cern.ch/record/1624074/files/LHCB-TDR-014.pdf>
  - 詳細は Back up に
- 現在の進捗について
  - GeoGebra での光学系の設計
  - Geant4 でのシミュレーション
- To do
- 修士論文に向けて

# LHCb TDR 14

# TDR RICH部分 まとめ

- Luminosity が上げるため Upgrade を実施
  - RICH1 の Aerogel を除いた
    - リングが大きく, レートに耐えられない
    - 低運動量領域( $< 10 \text{ GeV}/c$ ) は TOF (“TORCH”) で
  - 光検出器を HPD (hybrid photon detector) → MaPMT (multianode PMT)
    - R11265 from Hamamatsu, pixel size  $3 \times 3 \text{ mm}^2$
- MaPMT のテスト
  - Gain, anode uniformity, dark counts の bias 電圧を変えた比較試験  
→ チャンネル毎に factor 2.3 までの違いがあった
    - Hamamatsu のデータシート通り
  - Dark current のレート
    - 3 Hz per pixel (threshold 300 ke<sup>-</sup>)
  - Cross-talk
    - 1つの pixel に光を当てて周りの pixel の coincidence をとる
    - 800 V → 縦横 : 最大 3%, 斜め 1%以下
    - 950 V → 縦横 : 2% 以下, 斜め 0.5% 以下

# TDR RICH部分 まとめ

- MaPMT の Aging Measurement
  - single photons の出る青色LED を当てた
    - 数か月間(3000 h)
    - 200 h くらいまで急速に gain が低下
      - 10% - 15%
    - 1500 h くらいで一定 (35%)
    - 電圧を上げる(25V) と gain loss が抑制
- ⇒ gain loss は LED 照射時間にのみ依存
- Dark counts は aging に関係ない
  - $^{232}\text{Th}$  による光電子生成レートの測定
    - Photocathode efficiency の低下は見られず

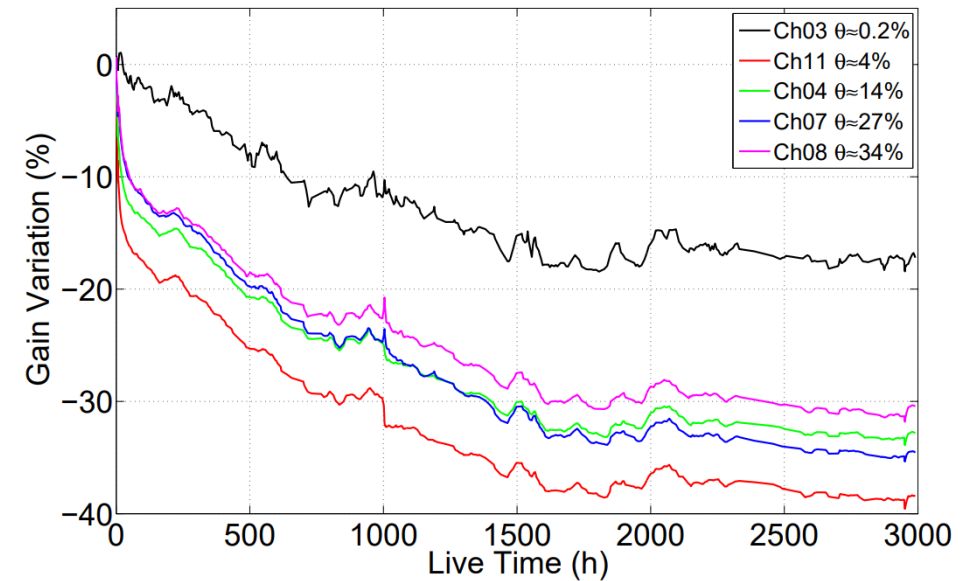


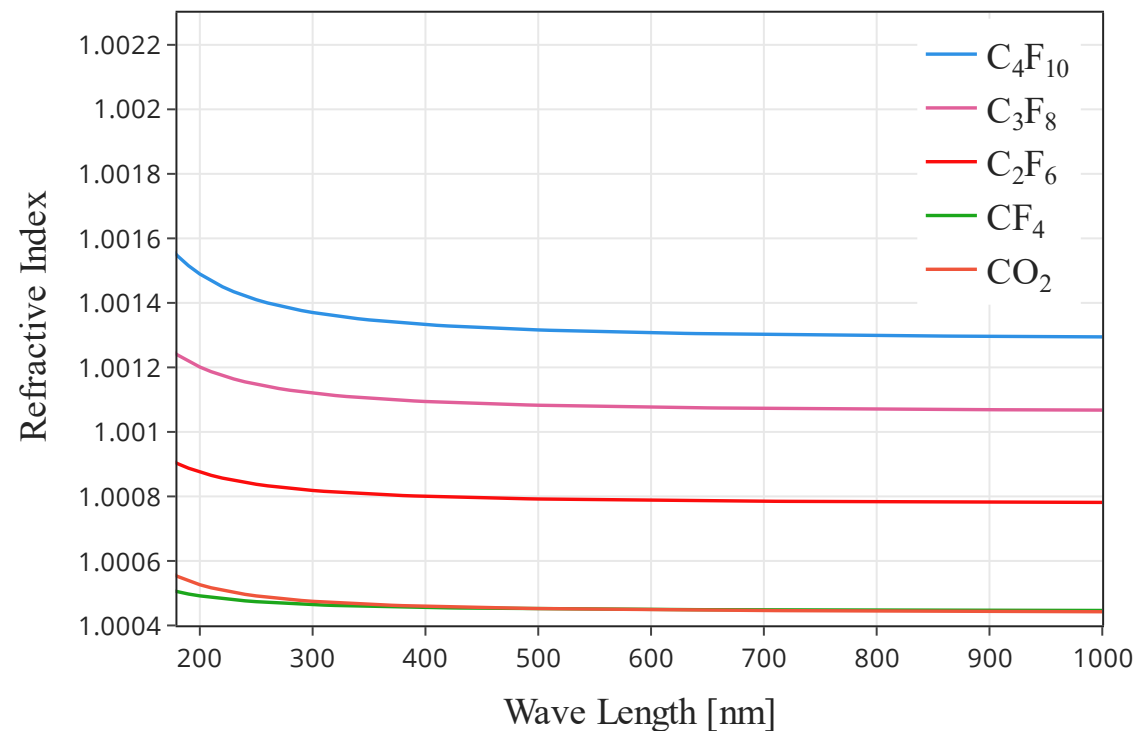
Figure 2.13: The relative gain variation at 875 V versus the LED exposure time for four of the illuminated pixels. The reference pixel operating at low current is shown in black (upper curve).  $\Theta$  indicates the corresponding level of occupancy in a specific channel.

# 現状

# 見積もり中のガス

屈折率は 450 nm での値

- $C_4F_{10}$ 
  - $n=1.001323$
- $C_3F_8$ 
  - $n=1.001087$
  - 8 kg ¥500,000
  - 純度 99.95 %
- $C_2F_6$ 
  - $n=1.000795$
- $CF_4$ 
  - $n=1.000453$
- $C_4F_8$ 
  - 10 kg ¥320,000
  - 純度 99.999 %

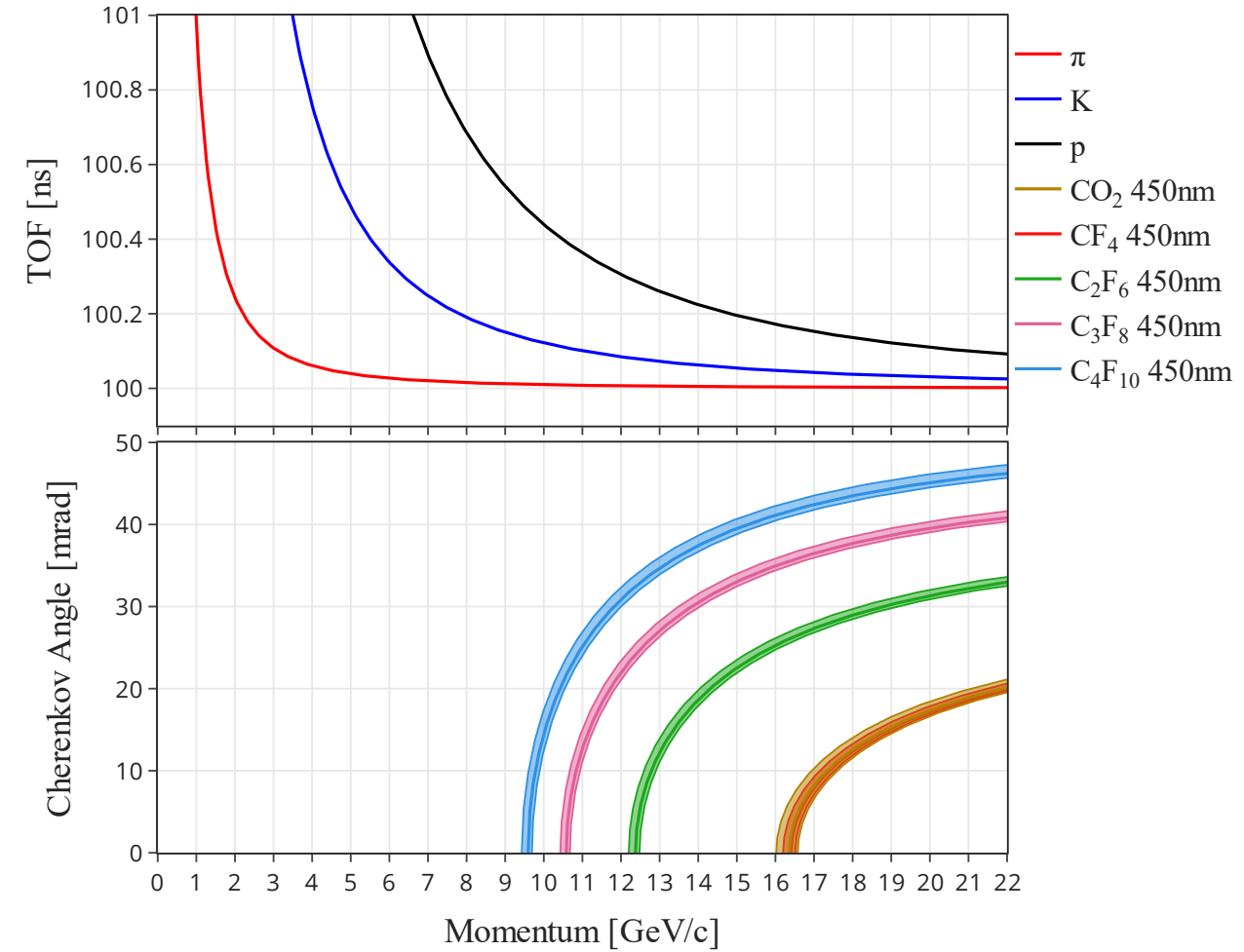


屈折率の波長依存性は <https://cds.cern.ch/record/600182/files/ep-2002-099.pdf>  
 $CO_2$  のみ <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=CO2&page=Bideau-Mehu>

# 各ガスでの Kaon の Cherenkov Angle

10 GeV/c 以上の運動量領域では TOF での PID は不可  
→ Gas を用いた Beam-RICH で PID

用いるビームの運動量によって使う気体を変えるのも  
よい





# GeoGebra での光学系の設計

➤ <https://www.geogebra.org/classic/uxupwrar>

➤ LHCb の RICH 上半分を再現してみました

➤ ただのグラフ作成ツールでしかないので, Optimize をするのは自分の手でやる必要あり

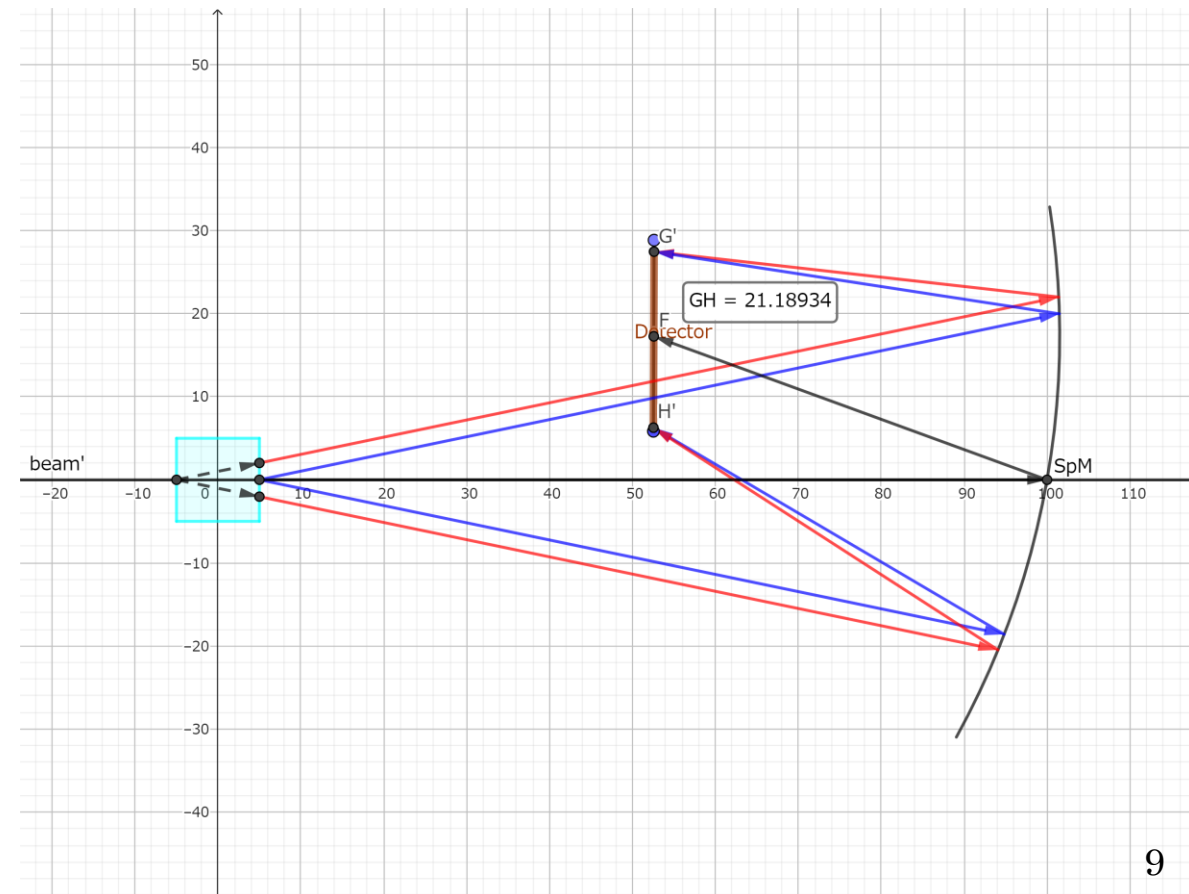
➤ 最後の詰めは Geant4

➤ 鏡の配置のアイデアだけ GeoGebra で

➤ 右図は梶川さんの修論の配置

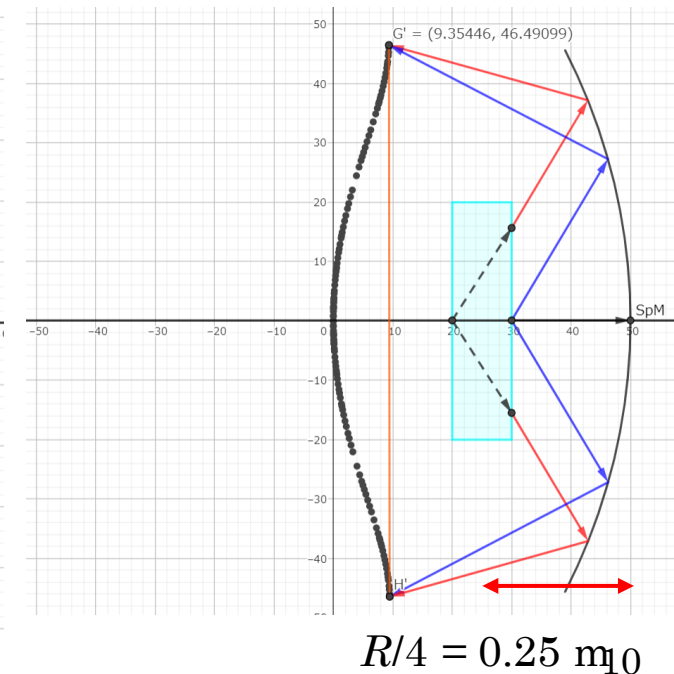
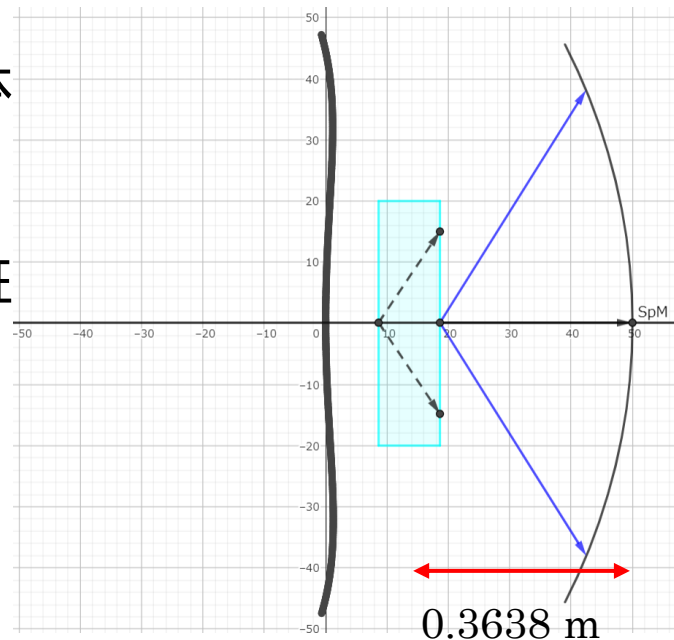
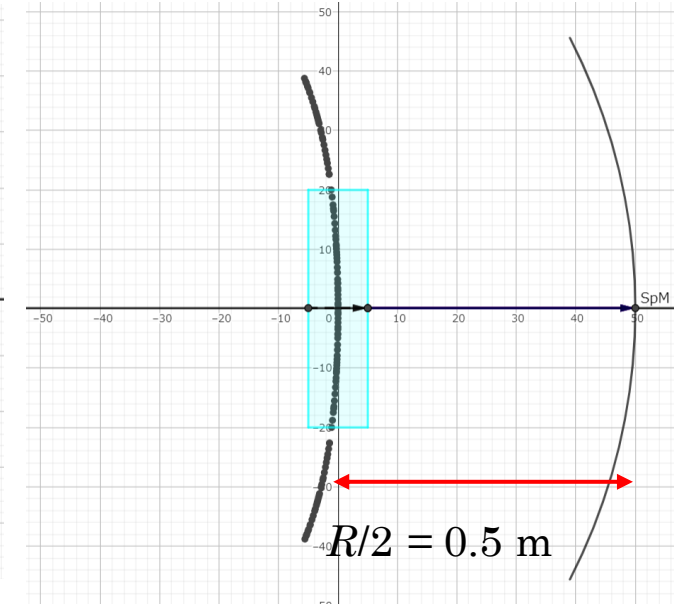
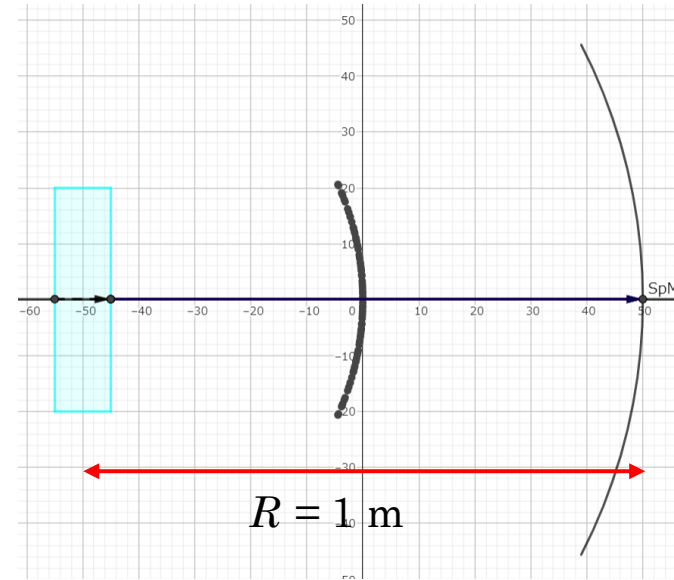
➤ <https://www.geogebra.org/classic/zrrhtymb>

➤ リング全部は取れない



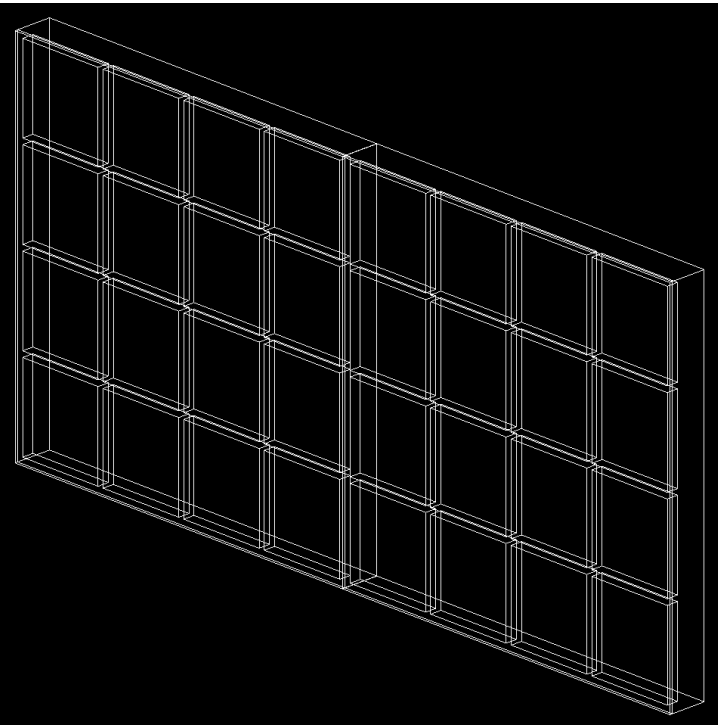
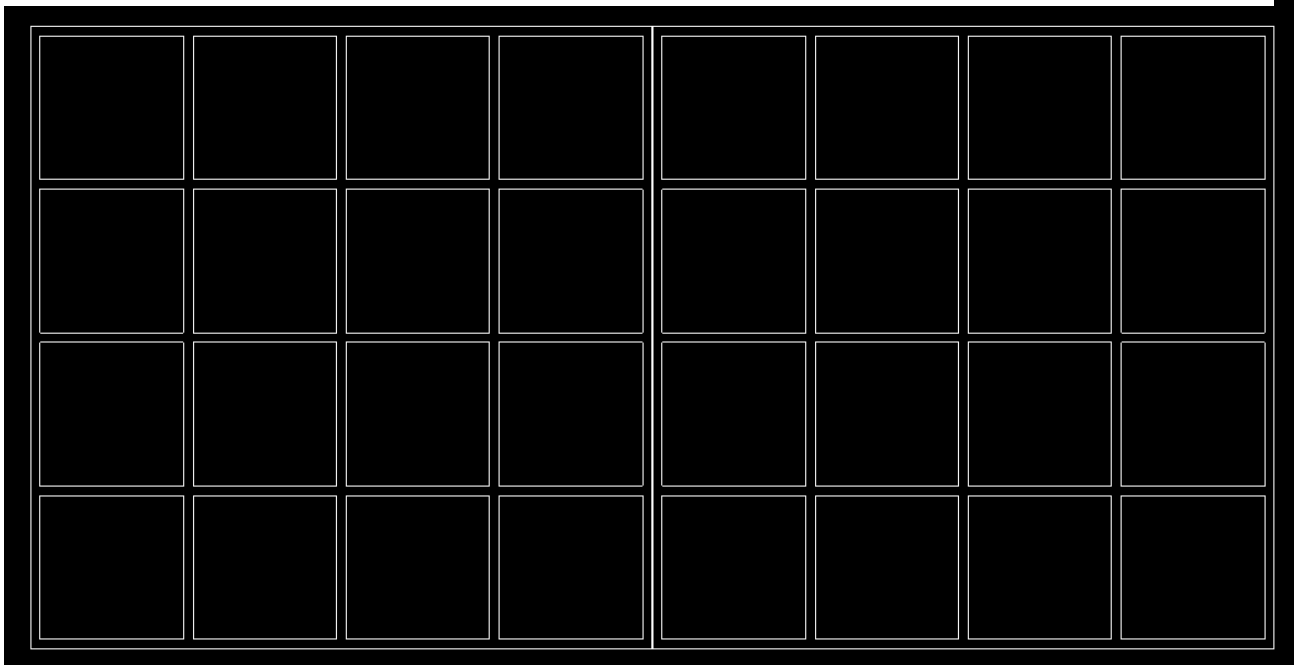
# 輻射体位置と収束位置

- 輻射体(Aerogel ビーム方向10 cm) 中心を変えていった時の収束位置
  - Cherenkov Angle を変えたときの軌跡
- 輻射体の位置によって収束位置の軌跡が違う
  - 球面でもないかも
  - 角度の小さい領域ではほぼ球面
  - 角度によらずある平面上に収束する輻射体の位置がある(はず)
  - ここに輻射体を置くのがよい?
  - 分解能にどの程度影響してくるのか要検証



# Geant4 で MPPC の再現

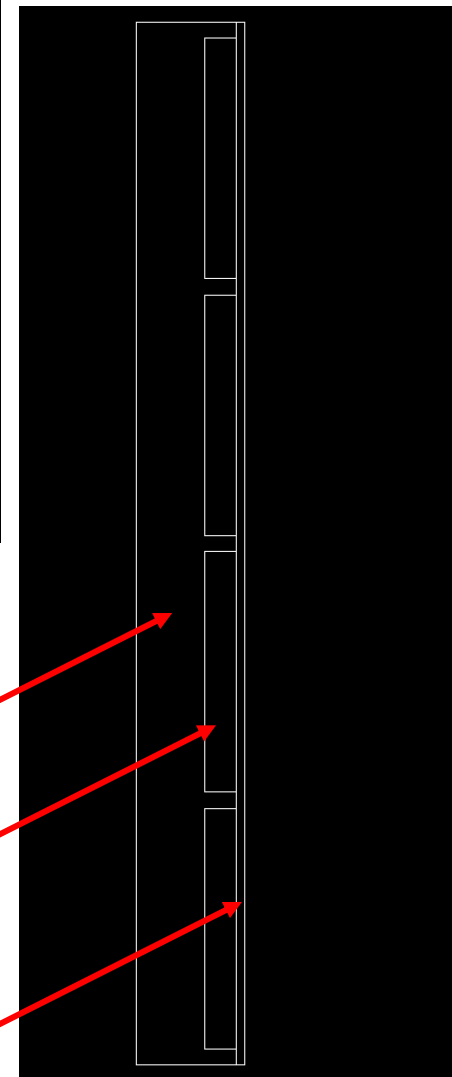
- 検出面は Si
- Window は Epoxy Resin
  - $n=1.55$
- Board は現段階では屈折率を定義せず,  
Optical Photon が止まるように



Board (今はポリエチ)

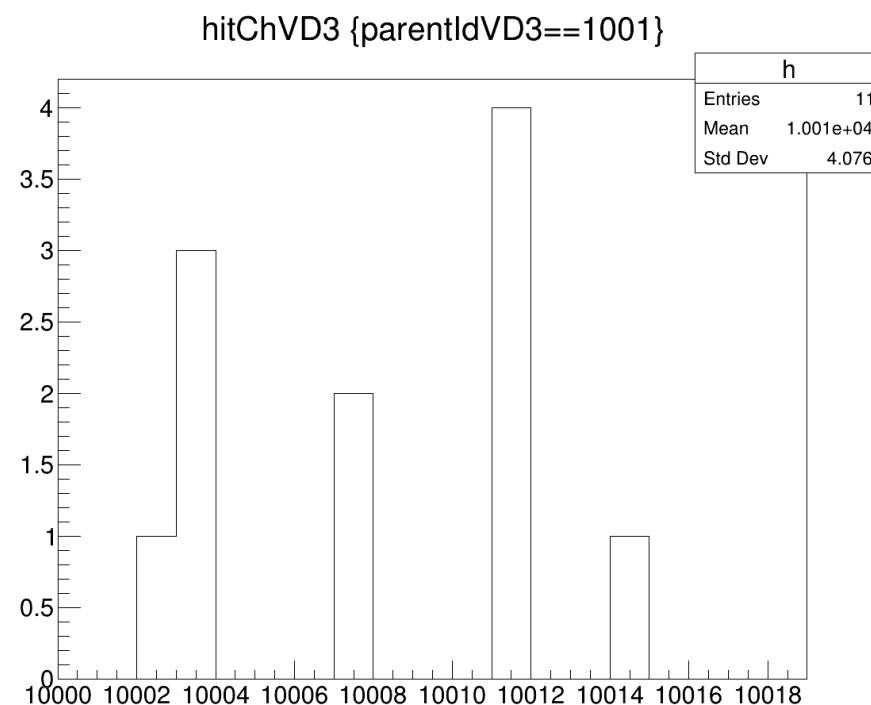
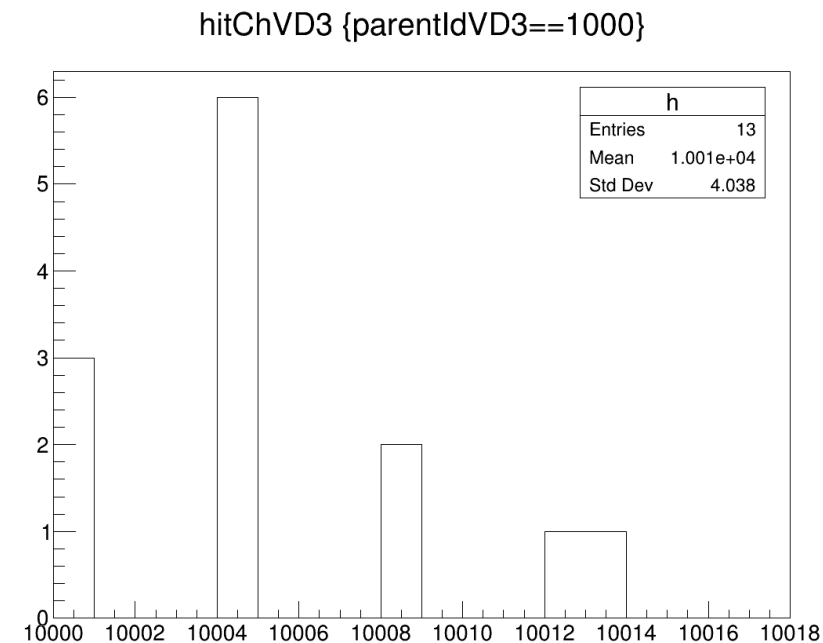
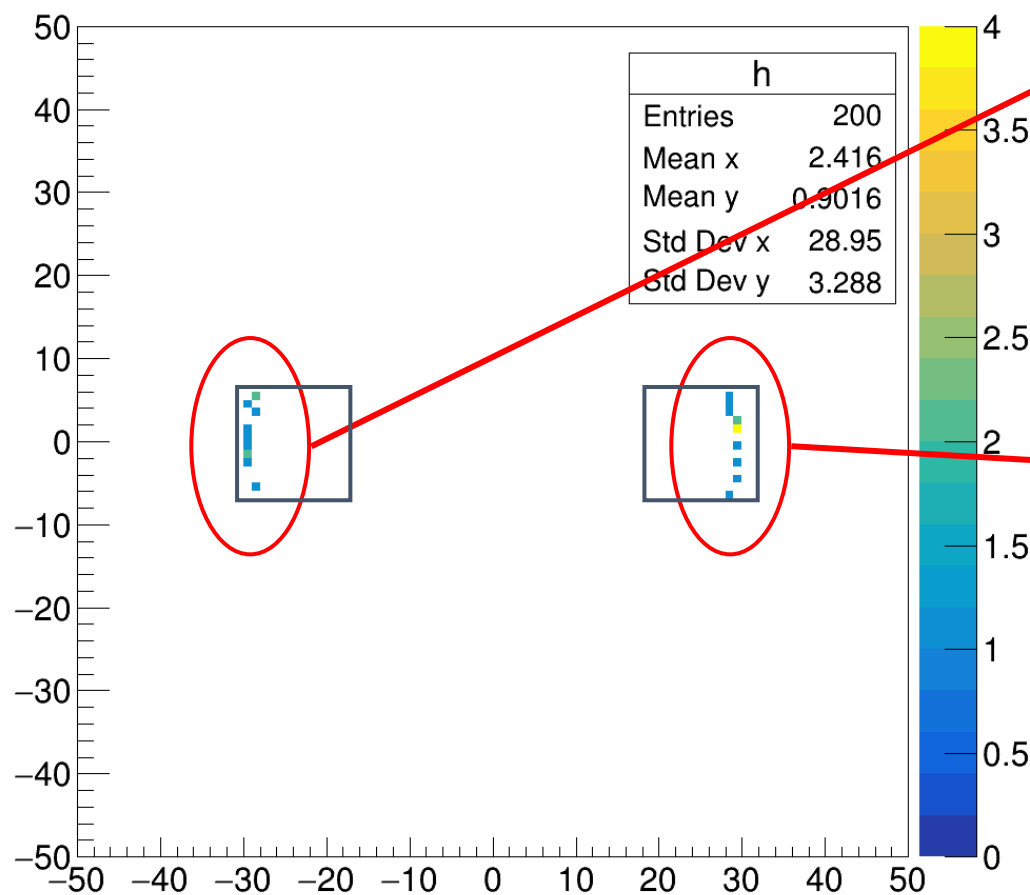
検出面 (Si)

Window (エポキシ樹脂)



# Hit Channel の取得

- 各 Channel 番号(0~15) と 親 Volume の番号を組み合わせることで hit pattern が作れる



# To do

- GeoGebra でいろいろ考えてみる
- Geant4
  - 量子効率の導入
  - リング全体の Hit Pattern をとれるように
- 検出位置から Cherenkov Angle に直す方法を考える
  - 手計算で求まる？
  - Machine learning？
- ガスを混ぜた場合に屈折率がどうなるのか調べる
  - 2 種類の Gas からのリングが見える or 平均したような屈折率のガスに見える

# 修士論文にむけて

- 修士論文でどこまでやるのかを決めたい
- ガスの筐体を設計して, 今年の後半にテスト実験するのは時間的に厳しいと考えています
  - 他にもやらないといけないことが多い
    - Geant4 の作成
    - 光学系の決定
    - 読みだし回路の設計, 制作 ← やったことない
    - 解析方法の確立 (角度の出し方や分解能の評価)
    - 鏡の固定具の作成 ← やったことない
  - etc...
- 基本は Aerogel で筐体以外の部分を作りきる？
- Gas を用いる場合, 鏡を2枚(球面鏡+平面鏡)用いる可能性が高い
  - 検出器をビームから遠ざる + ガス中に置かない(ほうがよい) ため
  - 空気を輻射体として鏡 2枚を用いるテスト実験をするのもよいかも
  - 筐体はあと(2024年度以降)で作成？

# Back up

# LHCb TDR 14



# レイアウト

## ➤ RICH1 と RICH2 の二つ

### ➤ RICH1

- 双極子磁石の上流 ( $z \sim 1$  m)
- 全体 :  $2 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  くらい
- ガス  $\text{C}_4\text{F}_{10}$  ( $n = 1.0014$ )
  - $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  くらい
- $50 \text{ GeV}/c$  までの  $\pi$ -K 分離
- Acceptance :
  - $300 \text{ mrad}(\text{horizontal}) \times 250 \text{ mrad}(\text{vertical})$

### ➤ RICH2

- 双極子磁石の下流 ( $z \sim 10$  m)
- 全体 :  $7 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  くらい
- ガス  $\text{CF}_4$  ( $n = 1.0005$ )
- $100 \text{ GeV}/c$  までの  $\pi$ -K 分離
- Acceptance :
  - $120 \text{ mrad}(\text{horizontal}) \times 100 \text{ mrad}(\text{vertical})$

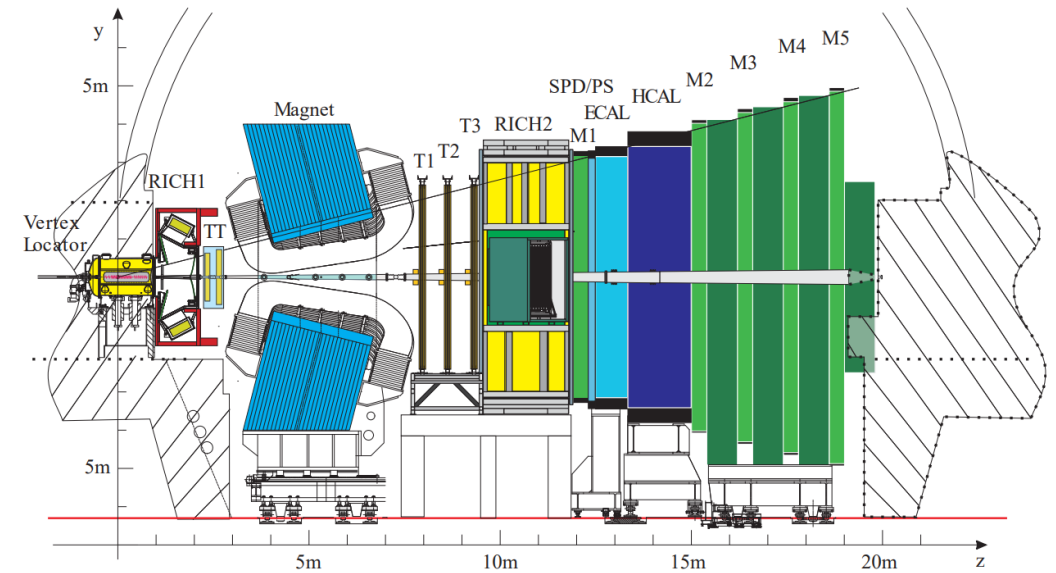
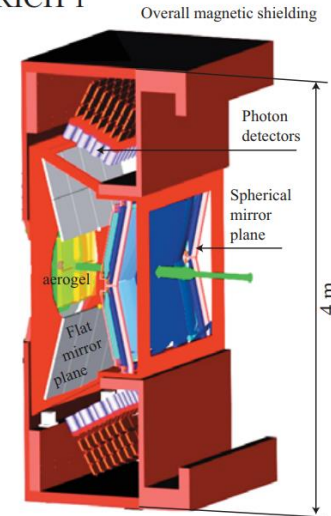


Figure 2.1: Layout of the current LHCb detector, viewed from the side, with the two RICH detectors visible upstream and downstream of the dipole magnet.

(a) RICH 1



(b) RICH 2

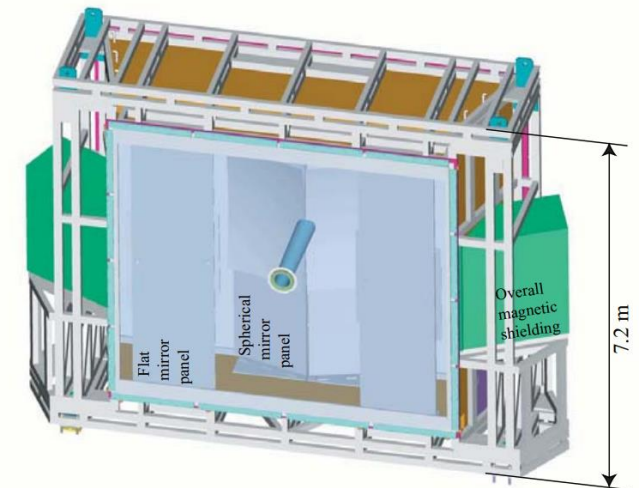


Figure 2.2: Schematic layout of the current RICH detectors: (a) RICH 1, (b) RICH 2. The overall structure of both detectors will remain unchanged in the upgrade, although the photon detectors<sup>17</sup> will be replaced for both, as will the optical system in RICH 1.

# RICH1 Upgrade

➤ Luminosity 上がるため, Upgrade を実施

1. Aerogel を除いた

➤ リングが大きく, 複数の検出器が同時になる

→ high luminosity に耐えられない

⇒ 新しいデザインが可能に

※ 低運動量領域 ( $10 \text{ GeV}/c$  まで) での PID は TOF (TORCH) で

2. 光検出器を HPD (hybrid photon detector) から MaPMT (multianode PMT) に

➤ R11265 from Hamamatsu, pixel size  $3 \times 3 \text{ mm}^2$

3. 球面鏡の曲率半径を  $2710 \text{ mm} \rightarrow 3800 \text{ mm}$  に

# MaPMT のテスト (1)

- Gain, anode uniformity, dark counts の bias 電圧を変えた比較試験
  - 標準的な bias divider を用いた
    - チャンネル毎に factor 2.3 までの違いがあった
  - Hamamatsu のデータシート通り
- Dark current のレート
  - 3 Hz per pixel (threshold 300 ke<sup>-</sup>)
- Cross-talk
  - 1つの pixel に光を当てて周りの pixel の coincidence をとる
  - 800 V → 縦横 : 最大 3%, 斜め 1%以下
  - 950 V → 縦横 : 2% 以下, 斜め 0.5% 以下

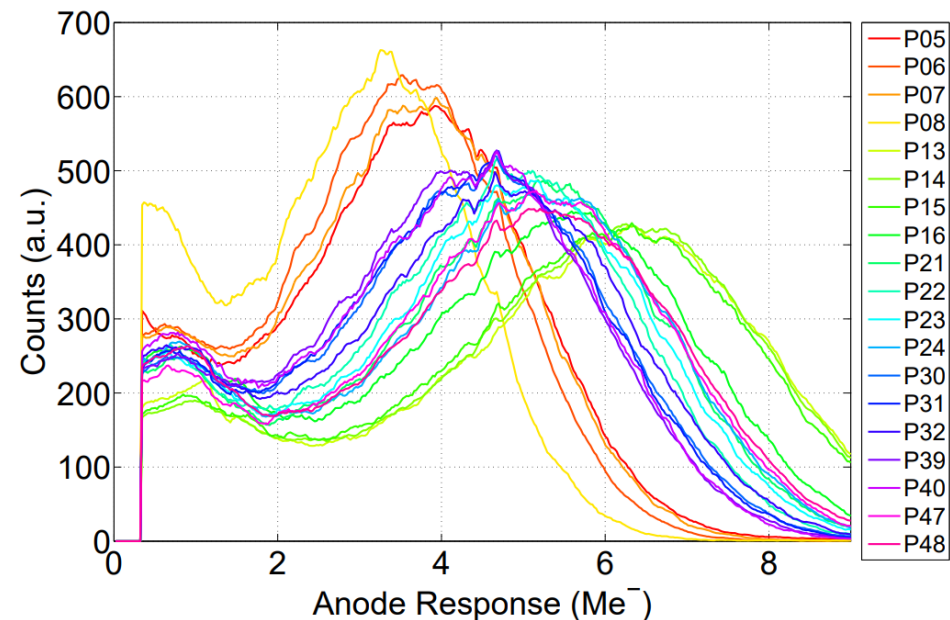


Figure 2.7: The single-photon spectra for a selection of pixels.

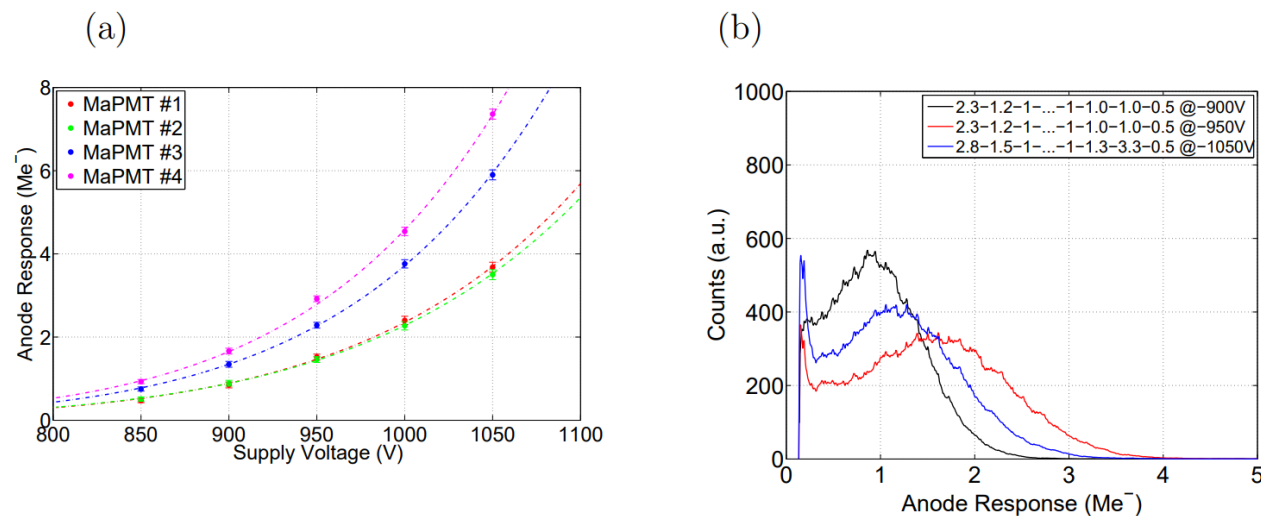


Figure 2.8: (a) The MaPMT collected charge as a function of HV for four different MaPMTs; (b) Single-photon spectra for different HV and bias divider ratios.

# MaPMT のテスト (2)

## Aging measurements

- single photons の出る青色LED を当てた
  - 数か月間(3000 h)
  - Reference pixel の電流値が  $0.5 \mu\text{A}$  になるように5分おきに LED の電圧を調整
  - 200 h くらいまで急速に gain が低下
    - 10% - 15%
    - 1500 h くらいで一定 (35%)
    - 電圧を上げる(25V) と gain loss が抑制

⇒ gain loss は LED 照射時間にのみ依存

- Dark counts は aging に関係ない
- $^{232}\text{Th}$  による光電子生成レートの測定
  - Photocathode efficiency の低下は見られず

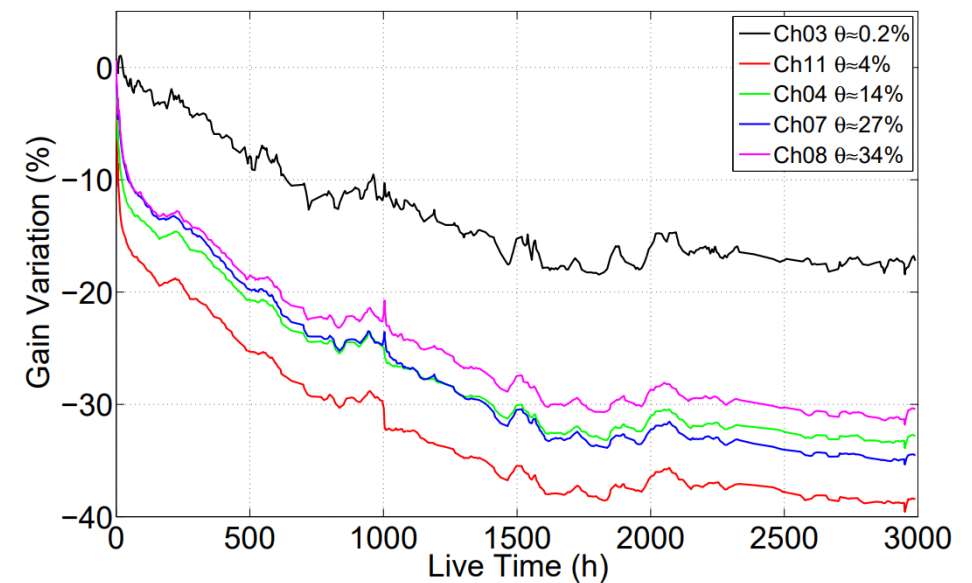


Figure 2.13: The relative gain variation at 875 V versus the LED exposure time for four of the illuminated pixels. The reference pixel operating at low current is shown in black (upper curve).  $\Theta$  indicates the corresponding level of occupancy in a specific channel.

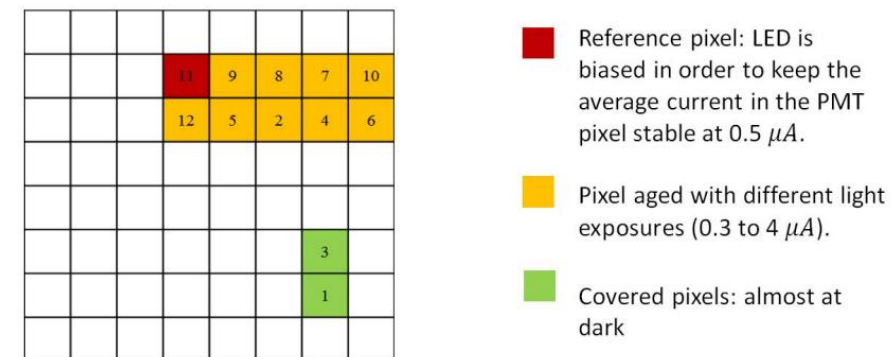


Figure 2.12: A front view of the anode indicating the reference channel and the measured pixels.

# Design considerationと角度分解能

## ➤ 角度分解能の内訳

### ➤ Chromatic

#### ➤ 屈折率の波長依存性による

### ➤ Emission point

#### ➤ 鏡の収差や傾きによる検出面での広がり

#### ➤ 検出面が前後することでも同様に広がる

→ ring reconstruction で輻射体の中心から  
光が出たとして計算することによる

### ➤ Pixel

#### ➤ Pixel size による

### ➤ Tracking

#### ➤ Tracking から Emission point を求める際

Table 2.1: Characteristics of the radiator materials used in RICH 1 and RICH 2, respectively.

| Parameter                        | C <sub>4</sub> F <sub>10</sub> | CF <sub>4</sub> |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| $L$ [cm]                         | ~110                           | 167             |
| $n$                              | 1.0014                         | 1.0005          |
| $\theta_c^{\max}$ [mrad]         | 53                             | 32              |
| $p_{\text{thresh}}(\pi)$ [GeV/c] | 2.6                            | 4.4             |
| $p_{\text{thresh}}(K)$ [GeV/c]   | 9.3                            | 15.6            |
| $p_{\text{thresh}}(p)$ [GeV/c]   | 17.7                           | 29.7            |

Table 2.2: Contributions (expressed in fractions of a radiation length) to the material in RICH 1 and RICH 2, which fall within the LHCb acceptance.

| Item            | RICH 1 | RICH 2 |
|-----------------|--------|--------|
| Entrance window | 0.001  | 0.014  |
| Gas radiator    | 0.026  | 0.017  |
| Mirror          | 0.015  | 0.079  |
| Exit window     | 0.006  | 0.014  |
| Total ( $X_0$ ) | 0.048  | 0.124  |



# RICH1 光学系(1)

➤ 最初に独立に optimize

➤ 用いた software

➤ Optica 3

<http://www.opticasoftware.com>

➤ Wolfram Mathematica

<http://www.wolfram.com/mathematica>

⇒ どちらも有料

➤ 球面鏡の傾け角

→ emission-point error を最小にするように

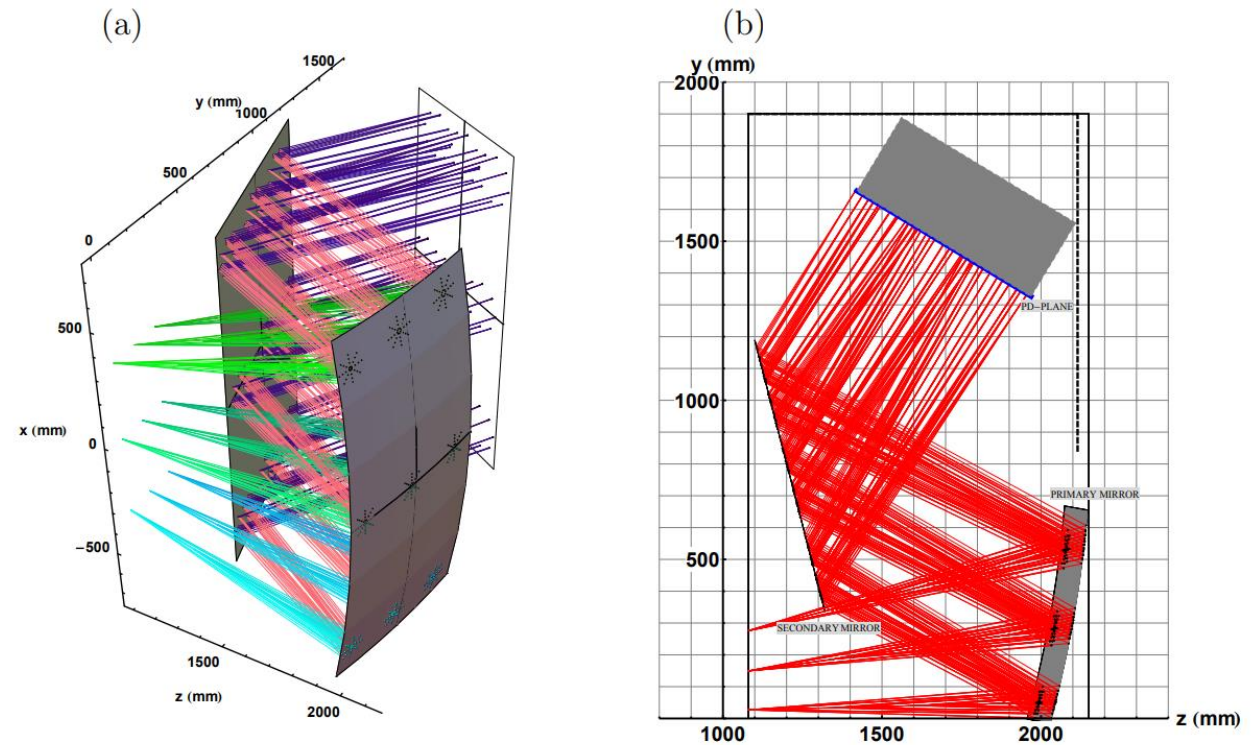


Figure 2.21: Simulated Cherenkov photons in the upper half of the upgraded RICH1; (a) 3D view, (b) 2D view in the vertical plane.

# RICH1 光学系(2)

- 球面鏡の曲率半径を 2710 mm → 3800 mm
- これに伴い, Detector Plane の位置も調整

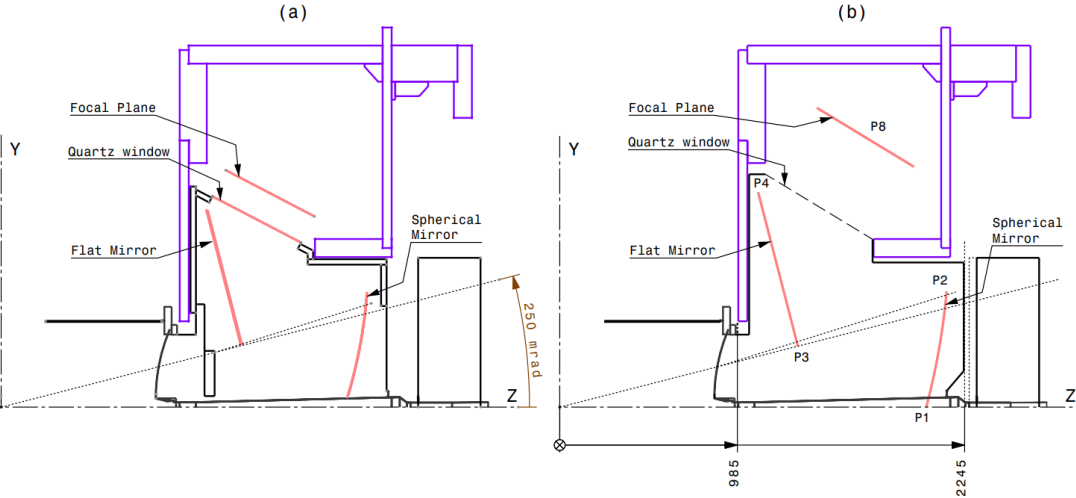


Figure 2.20: The optical geometries of (a) the current and (b) the upgraded RICH1. The points  $P(n)$  in the figure are referred to in Table 2.6.

Table 2.4: The spherical and flat mirror properties for the current RICH1, and the specifications for the upgrade. The reflectivity value is averaged over 200 – 600 nm.

|                        | Spherical RICH1<br>current | Spherical RICH1<br>upgrade specs | Flat RICH1<br>current | Flat RICH1<br>upgrade specs |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Dimensions $x$ [mm]    | 835                        | 750                              | 347.5                 | 370                         |
| $y$ [mm]               | 640                        | 650                              | 380.5                 | 440                         |
| Area [m <sup>2</sup> ] | 2.1                        | 2.0                              | 2.1                   | 2.6                         |
| Thickness [mm]         | 33                         | 33                               | 8.0                   | 6.0                         |
| Radius of curv. [mm]   | 2710                       | 3800                             | $> 6 \times 10^5$     | $> 6 \times 10^5$           |
| Spot-size $D_0$ [mm]   | 1.2                        | $< 2.5$                          | $< 2.5$               | $< 2.5$                     |
| Reflectivity           | 90%                        | $\geq 90\%$                      | 90%                   | $\geq 90\%$                 |
| $X_0$                  | 1.2%                       | $< 2\%$                          | –                     | –                           |
| $\lambda_I$            | 0.6%                       | $< 1\%$                          | –                     | –                           |

Table 2.6: Geometrical data of the re-optimized RICH1 optics. The points  $P(n)$  are shown in Fig. 2.20.

|  |                   |                  |
|--|-------------------|------------------|
| Centre of the spherical mirror                                       | $z = -1640$ (mm)  | $y = +978$ (mm)  |
| Point 1  | $z = +2032$ (mm)  | $y = 0$ (mm)     |
| Point 2  | $z = +2145$ (mm)  | $y = +640$ (mm)  |
| Point 3  | $z = +1320$ (mm)  | $y = +337$ (mm)  |
| Point 4  | $z = +1100$ (mm)  | $y = +1189$ (mm) |
| Point 8  | $z = +1695$ (mm)  | $y = +1492$ (mm) |
| Axis of the spherical mirror: angle with respect to the beamline.    | 10.0°             |                  |
| Normal of the plane mirror: angle with respect to the beamline.      | 14.5°             |                  |
| Normal of the PD-plane: angle with respect to the beamline.          | 58.8°             |                  |
| PD-Assembly: $x$ -size (full geometrical acceptance)                 | $\approx 1380$ mm |                  |
| PD-Assembly: size in the $y - z$ plane (full geometrical acceptance) | $\approx 630$ mm  |                  |

# Single Photon resolution

Table 2.13: Single photon resolutions and photon yields for isolated tracks from the full simulation in the two RICH detectors with MaPMTs. For comparison, also shown is the simulated performance of the current RICH 1 detectors with HPDs. The various contributions to the resolutions are listed. For the upgraded geometry, the comparison with the optical optimisation (Table 2.7) shows good agreement.

| Resolutions<br>[mrad] | Current<br>RICH 1<br>(MaPMTs) | Current<br>RICH 1<br>(HPDs) | Upgraded<br>RICH 1 | Upgraded<br>RICH 2 |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| Emission point        | 0.63                          | 0.61                        | 0.37               | 0.27               |
| Chromatic             | 0.58                          | 0.84                        | 0.58               | 0.31               |
| Pixel                 | 0.61                          | 0.99                        | 0.44               | 0.20               |
| Tracking              | 0.40                          | 0.40                        | 0.40               | 0.40               |
| Total resolution      | 1.12                          | 1.50                        | 0.88               | 0.60               |
| Photon yield          | 32                            | 34                          | 40                 | 22                 |



# 球面鏡

- シアン酸エステルレジンでプリプレグされたカーボンファイバーシートで表面を作成
  - Borosilicate (Pyrex) glass mandrel の上に重ねている
  - このガラスが反射面の形を決めている
- 反射面は  $\text{MgF}_2$  でコーティングされた Al

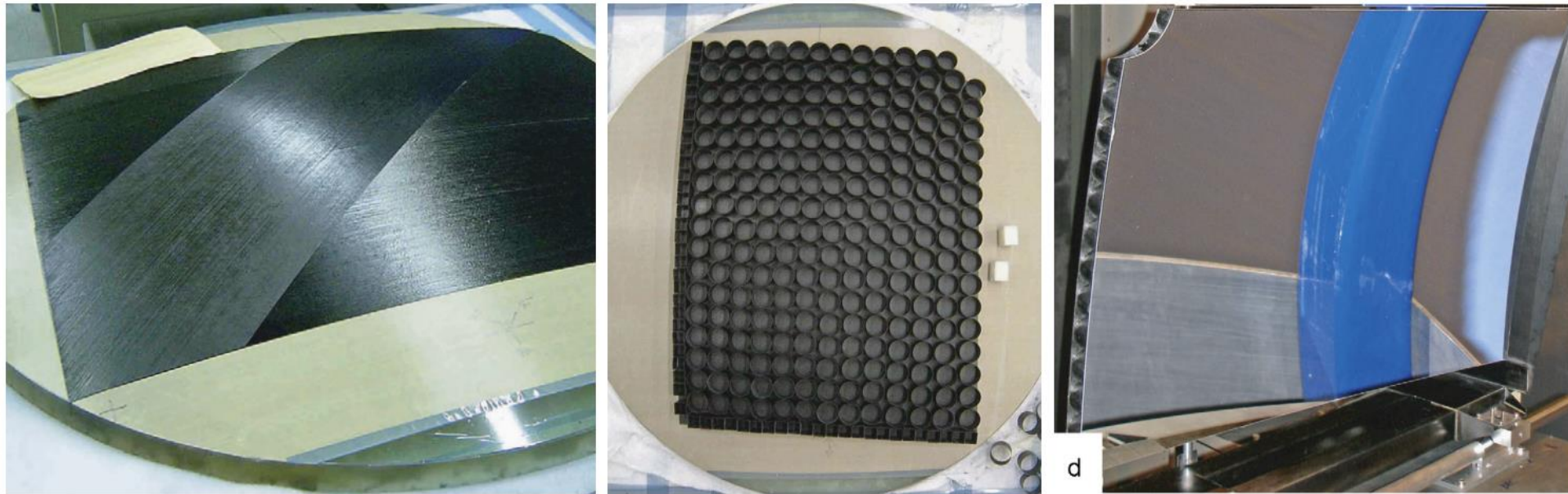


Figure 2.23: Stages of the RICH 1 spherical mirror manufacturing process, from left to right: carbon fibre sheets are being layered onto the mandrel; the front skin and the core structure; the finished product.

# Gas enclosure

- 筐体は基本 30mm厚のアルミ合金
  - Exit window
    - Made from carbon-fibre-reinforced epoxy skins separated by a 16mm-thick PMI foam core
  - Quartz windows
    - 2つの窓をくっつけて, EPDM O-ring でガス封入して筐体にくっつけている

# Calibration & monitoring

- Gas radiator
  - 温度 :  $0.1^{\circ}\text{C}$  精度で
  - 圧力 : 0.1 mbar relative to atmospheric
- Safety Interlocks
  - 光検出器の温度測定
    - Overheating した場合 RICH 全体の電源が落ちる
- Mirror alignment
  - 球面鏡の精度は 0.5 mrad より良く
  - レーザーとカメラで alignment monitoring

# ガスシステム

- *The mixer module:* fresh gas is injected into the loop via this module. For the RICH 2 system, mass flow controllers allow an adjustment of the ratio between  $\text{CO}_2$  and  $\text{CF}_4$ .
- *The distribution module:* this limits the gas flow in the loop.
- *The pump module:* the pump, coupled with a controlled return valve placed on the outlet of the gas chamber, regulates the flow, hence the pressure, inside the gas enclosure.
- *The buffer tank:* the compressed gas passes into a buffer tank to compensate for atmospheric pressure changes.
- *The membrane module:* this is used to separate the gases (radiator and  $\text{CO}_2$ , or  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2$ ) during the filling or the emptying procedure.
- *The purifier module:* this removes water, oxygen and other contaminants, where the gas passes through a molecular sieve.
- *The liquefying module:* this module is specifically used to recover the RICH 1 gas. It separates the  $\text{C}_4\text{F}_{10}$  which liquefies, while  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  and  $\text{O}_2$  remain gaseous.

➤ ガスリークは 20 kg/year

# Pattern reconstruction

- データを取得(tracking, hit pattern etc.)
  - 実際のデータと同じ Tracking を引いて粒子を変えながらシミュレーションを行う
  - Log-likelihood algorithm を用いて尤度関数を比較
- もっともそれらしい粒子を決定

## PID 性能

- 検出面を平面鏡から離していくと kaon efficiency が落ちていく
  - 25, 50, 75, 100 mm と位置を変えると, 0.5, 1.5, 2.5, 5.0 % と efficiency が落ちる
  - @ pion misidentification probability 1%
- 検出面の傾き
  - $\pm 25$  mrad のずれは PID 性能に影響しなかった

# 決めてほしいこと

## ➤何を beam-RICH に要求するのか

- 時間はそこまでのない
- ガスと Aerogel の 2 radiator はおそらく厳しい(サイズの的に)
  - 作るなら別々
- ガスのみならどの運動量領域を見たいのかが非常に重要
  - 今の実験の要求は？
    - E50 :  $\pi$  20 GeV/c
    - 成木さん Proposal : K 5-8 GeV/c ?
  - $T_0$  が 分解能 50 ps が出れば, 8 GeV までは K-p separation ( $3\sigma \times 2$ ) できる
    - beam-RICH で Pion-veto ができればよい
    - ガスは  $C_4F_{10}$ ,  $C_3F_8$  にこだわらず, もう少し低い屈折率のガスで良い
- 中間の運動量(10 GeV/c ~ 16 GeV/c くらい) の要求はあるのか？
  - ガスは実験要求に応じて変えるのもありか？(ガスタイトにしておく)
  - とりあえず今回は安いガスでテストするのもあり？

最低限分離したい運動量領域を決めてほしい (20 GeV/c まで全部は無理)

- Aerogel に注力するのか, ガス RICH を作るのか