大阪大学セミナー

# 光を用いた放射線測定器

神戸大学
伊藤 博士

2017年10月27日

H棟6階　H601　セミナー室B

# INDEX

1. 光検出器による放射線検出器の基礎
2. 素核実験検出器
3. 環境放射能測定

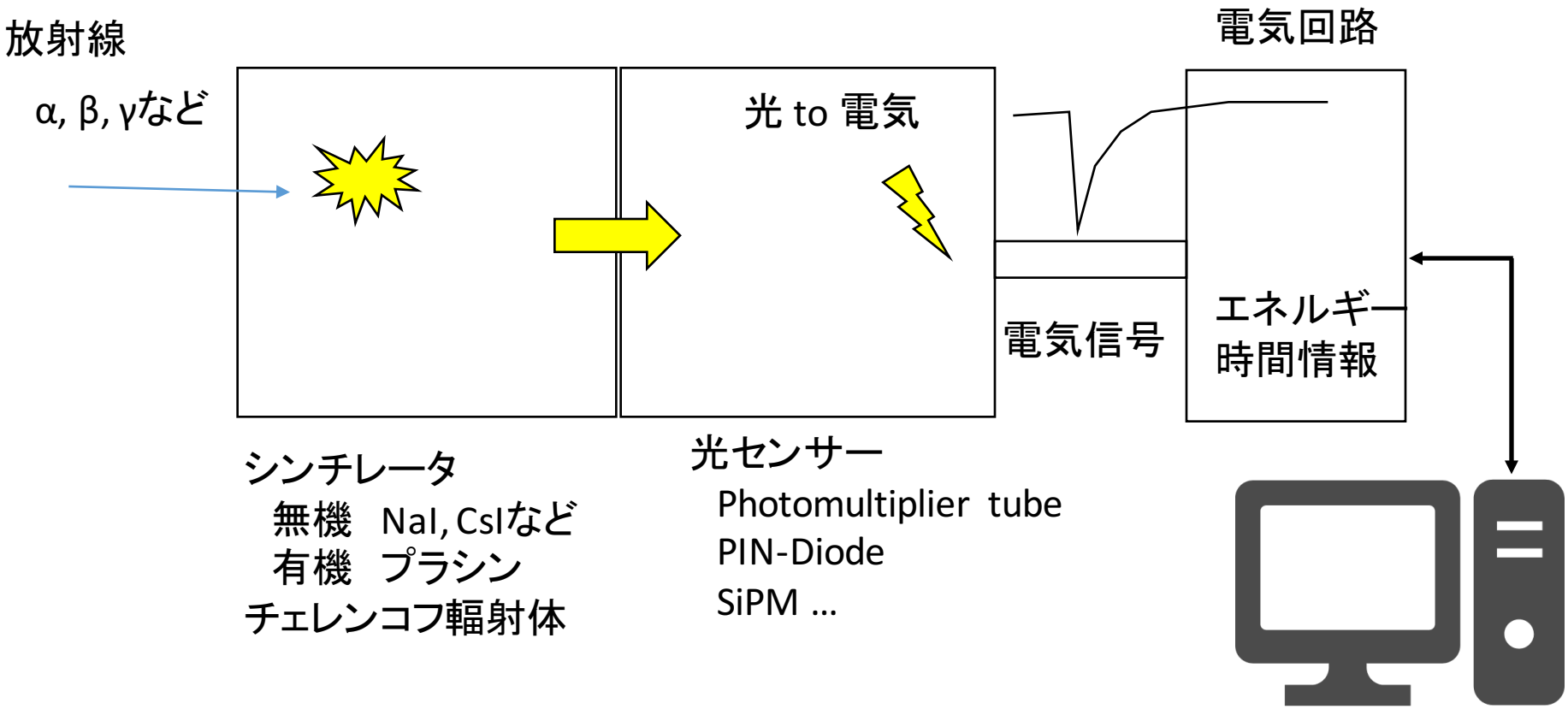
各パートの最後にまとめがあります。
質問どうぞ！

# INDEX

1. 光検出器による放射線検出器の基礎
2. 素核実験検出器
3. 環境放射能測定

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## イメージ

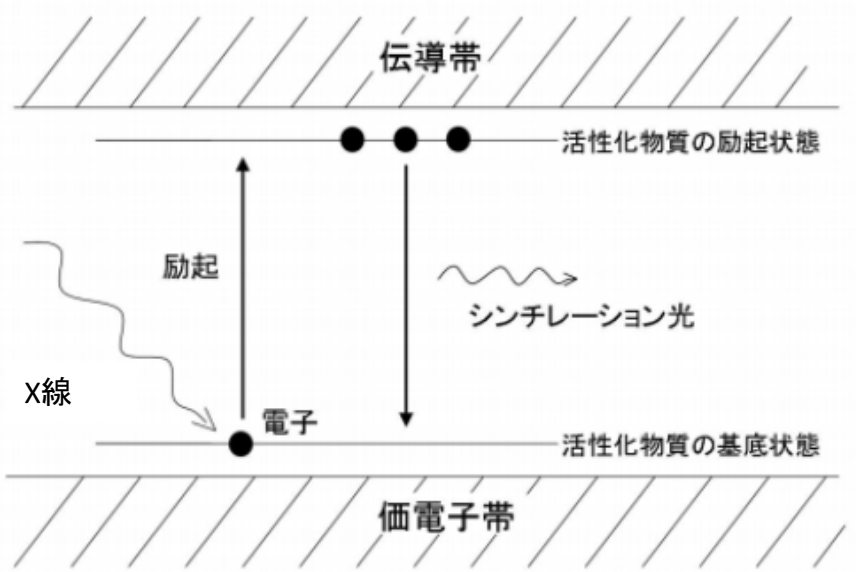


# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## シンチレータとシンチレーション光

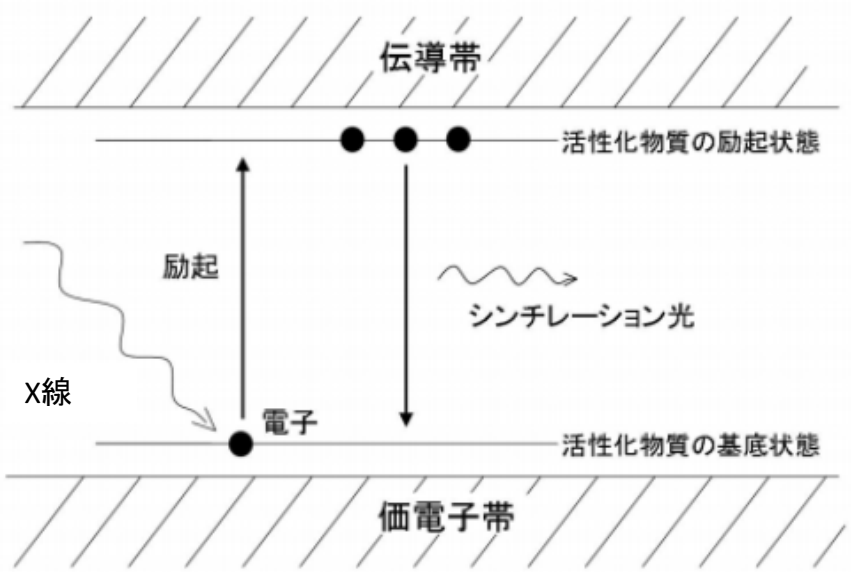
# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

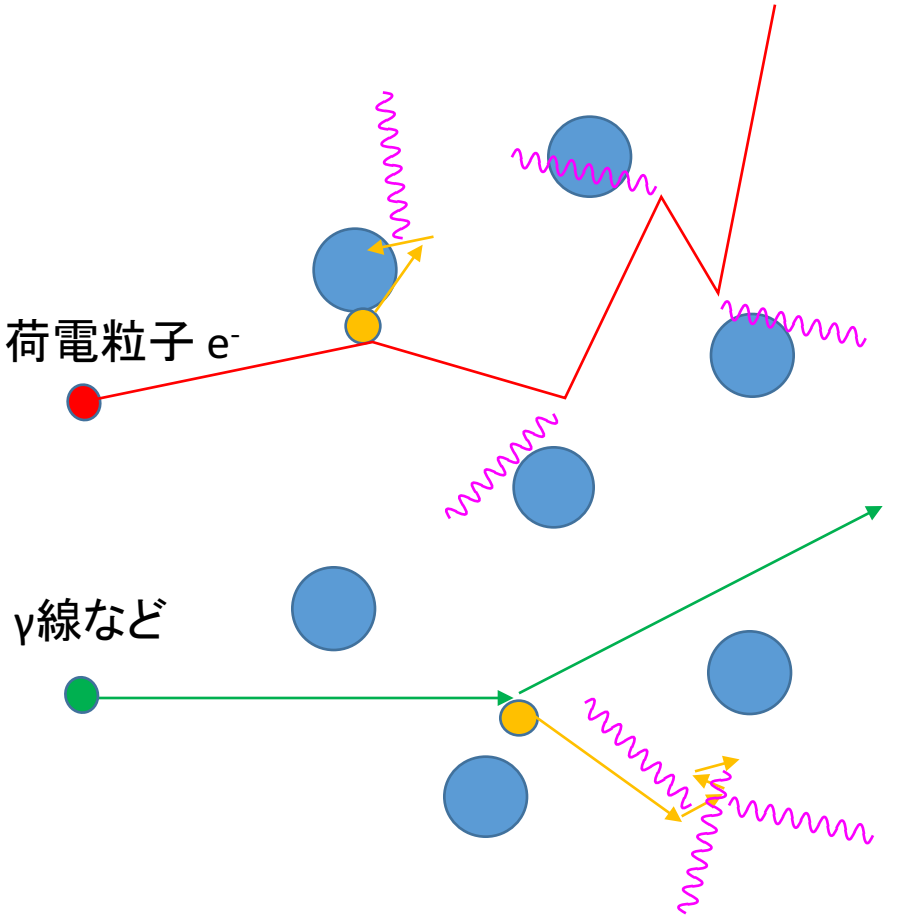
## シンチレータとシンチレーション光



# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## シンチレータとシンチレーション光




荷電粒子が落としたエネルギーに依存して光子が発生する

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## シンチレータとシンチレーション光

有機シンチ(プラシン)

早い時間特性のため荷電粒子検出に向いている

加工が容易

無機シンチ

高密度なためγ線検出などに向いている

NaI(Tl), CsI(Tl)など

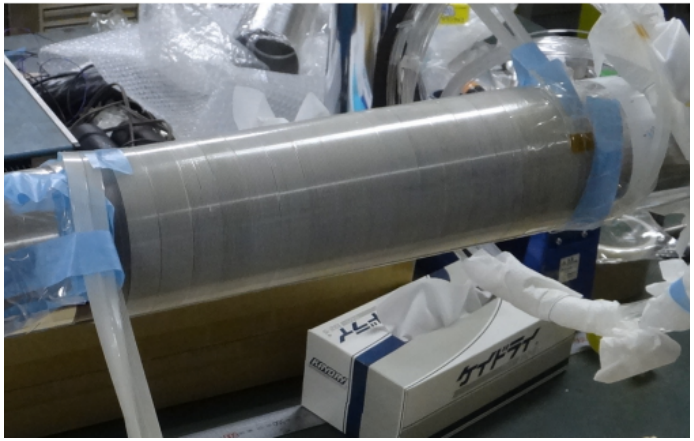
TlやCeなどドープすることで減衰時間を短い特性にする

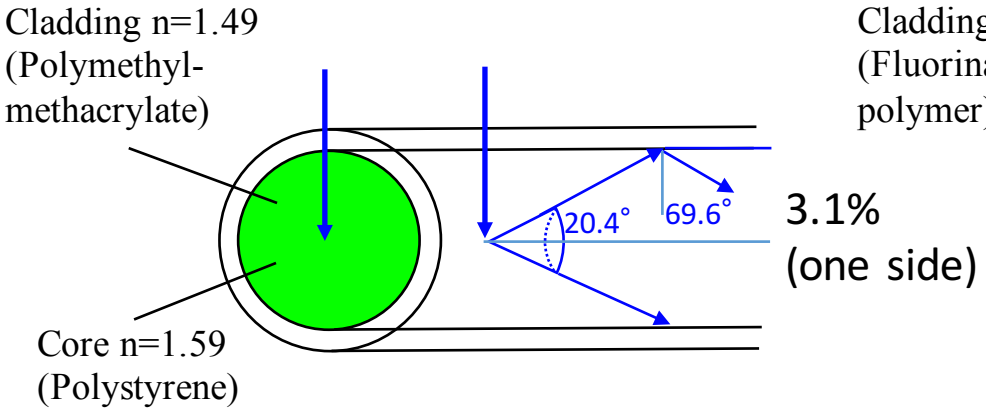
| シンチレータ | 密度 ($g/cm^3$) | 発光波長 (nm) | 蛍光減衰時間 (ns) | Light output (/MeV) | 放射長 * (cm) | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NaI(Tl) | 3.67 | 415 | 230 | 39000 | 2.59 | 潮解性 |
| CsI(Tl) | 4.51 | 565 | 1000 | 33000 | 1.86 | 潮解性 |
| GSO(Ce) | 7.13 | 440 | 60 | 9000 | 1.38 | |
| $LaBr_3$(Ce) | 5.29 | 380 | 25 | 63000 | 2.1 | 潮解性 |

*511keV の γ 線が 1/e に減衰する距離

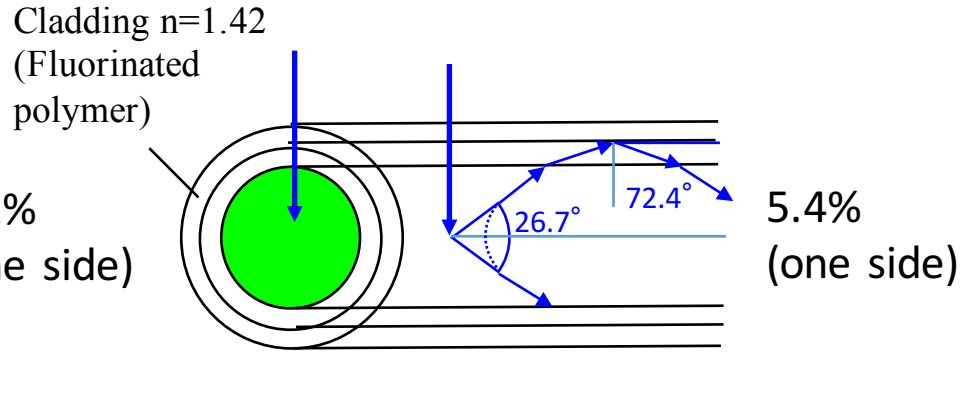
# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## シンチレーティング・ファイバー





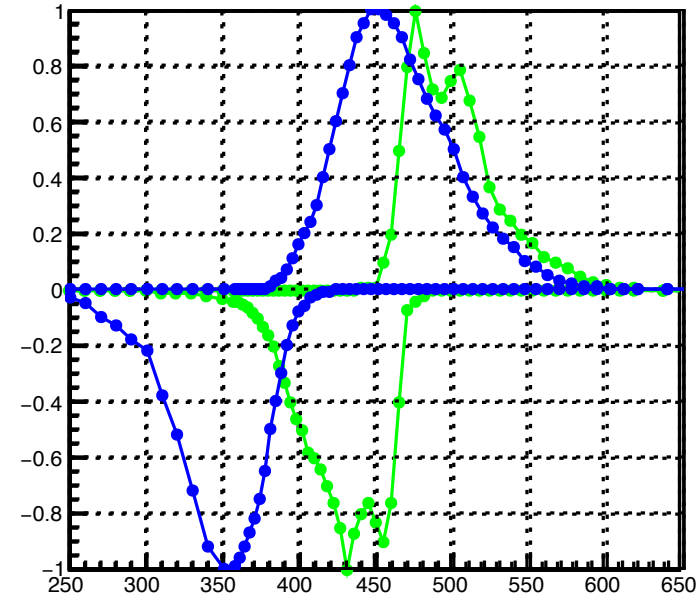

Single cladding

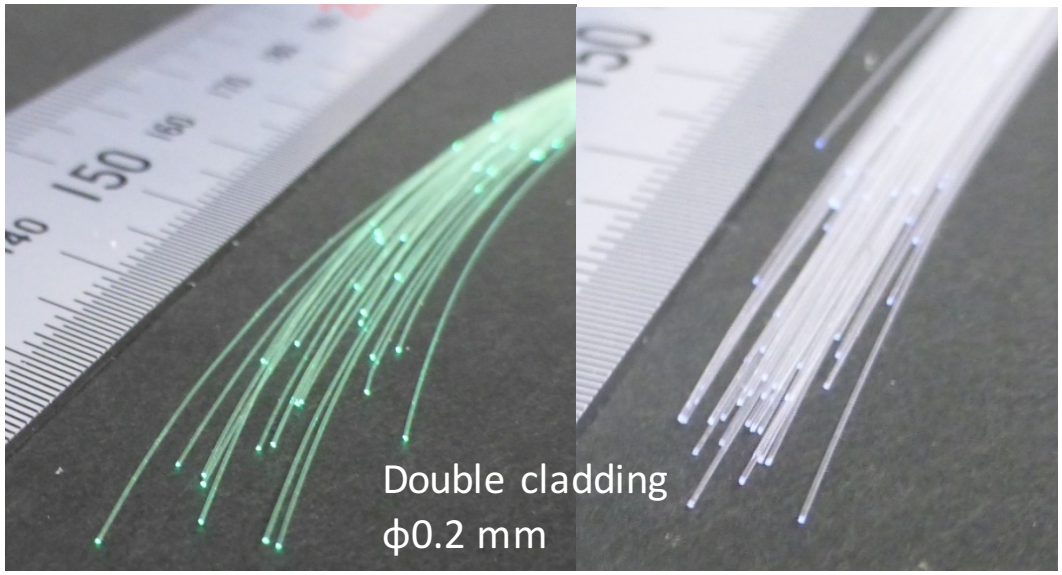



Double cladding

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## 波長変換ファイバー

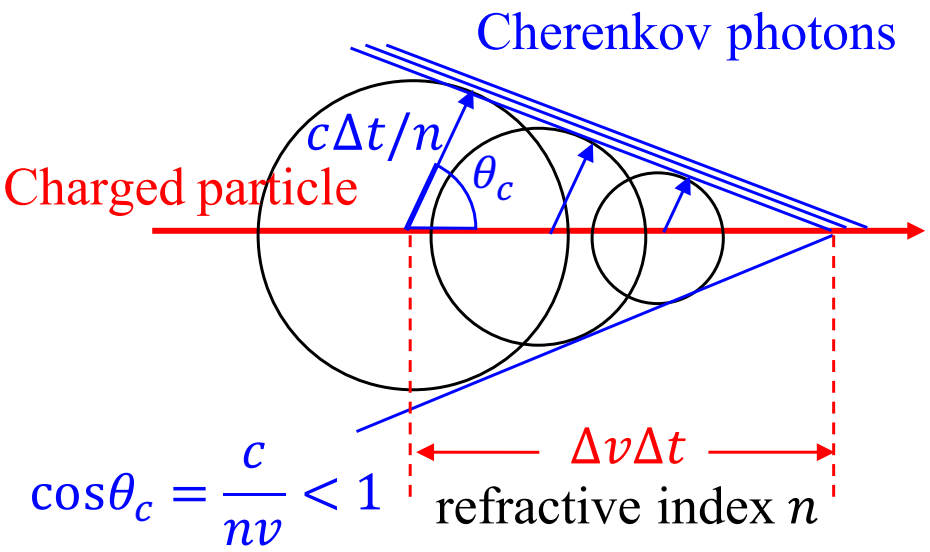


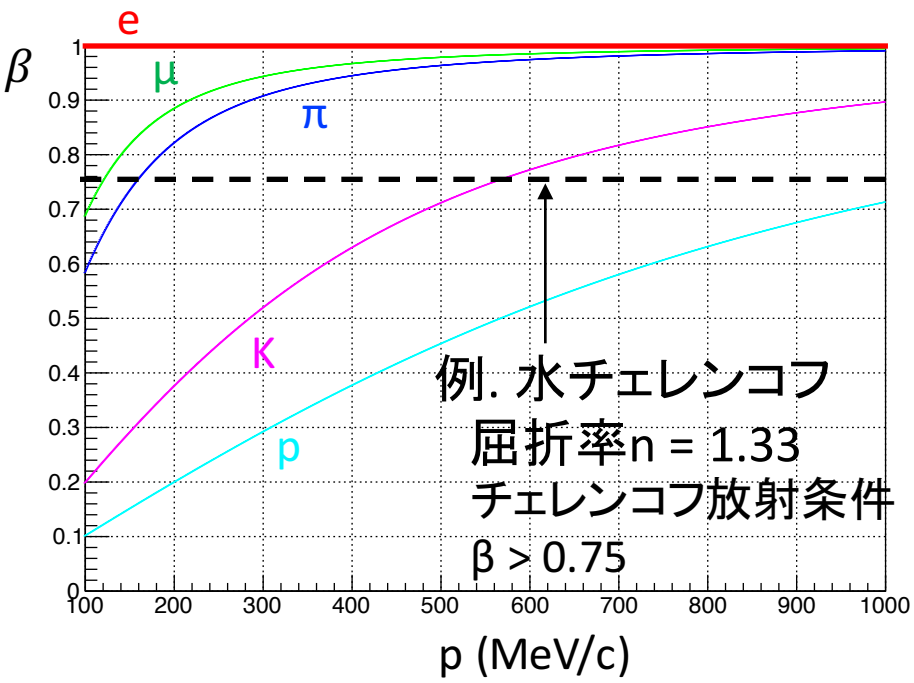

Kuraray Y-11(300)MJ　　B-3(300)MJ

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## チェレンコフ放射




$$\cos\theta_c = \frac{c}{nv} < 1$$




相対論で計算

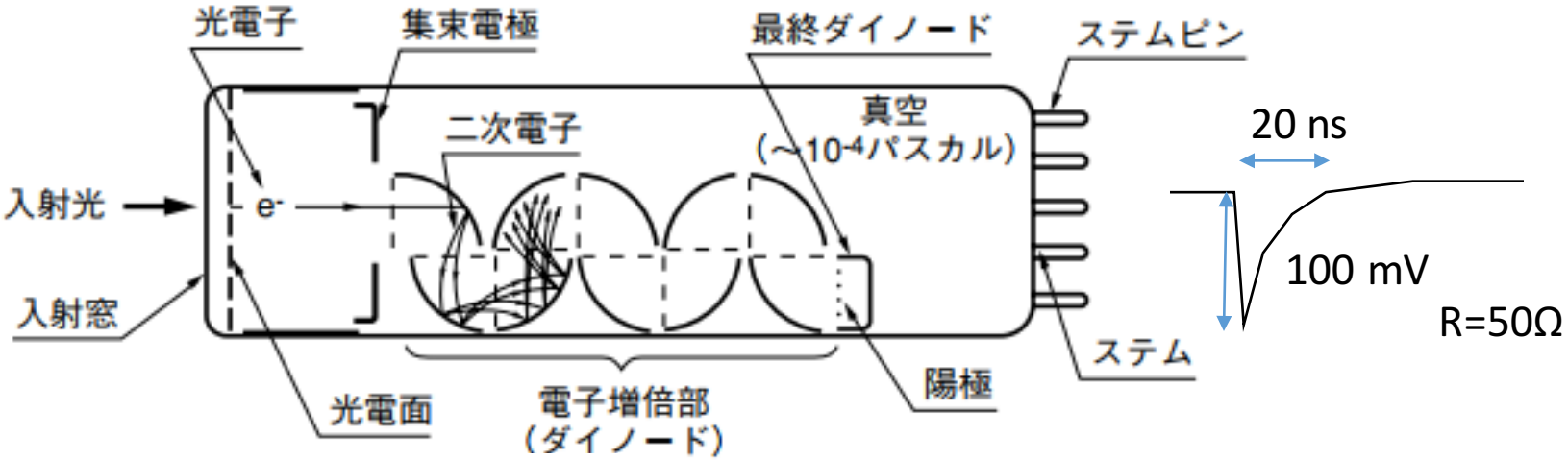
$$\beta = v/c = p/E$$
$$= p/\sqrt{m^2 + p^2}$$

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

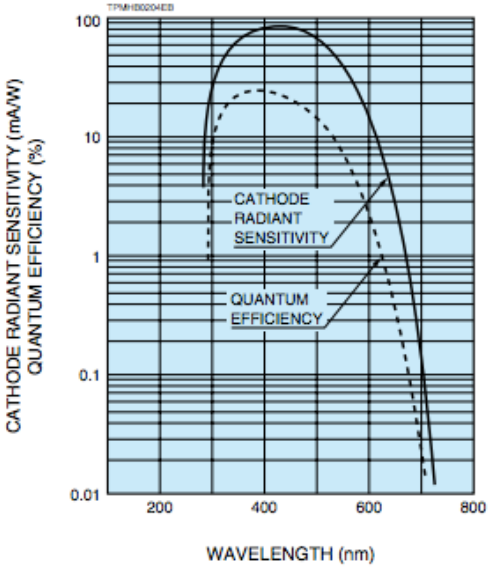
## 光検出器

# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

PMTの原理




光電面
　バイアルカリ
　マルチアルカリ
など




ダイノード
- ラインフォーカス型
- メッシュ型
- メタルチャンネル型

など

素電荷 $1.6 \times 10^{-19}$ C

観測する電荷量

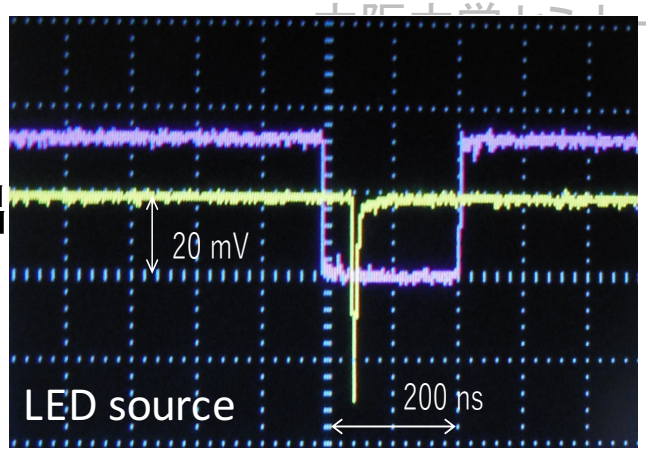
$Q = I\,t = Vt/R$

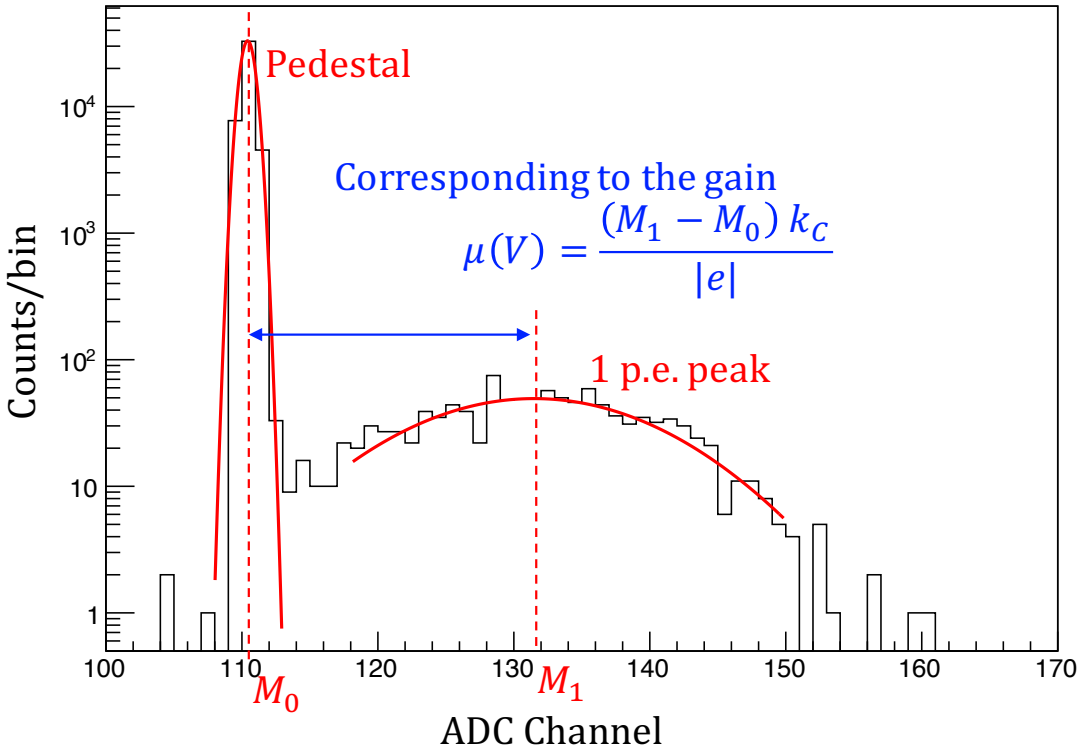
$\sim 2 \times 10^{-12}$ C

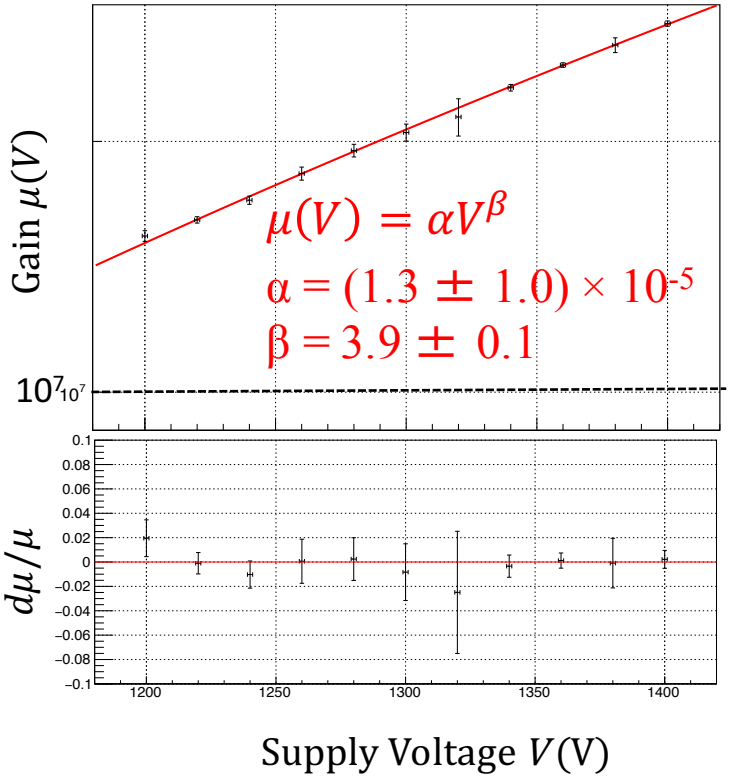
増幅率 $10^{7}$くらい要る

# 1. 光検出器による放射線検出

## PMTの原理



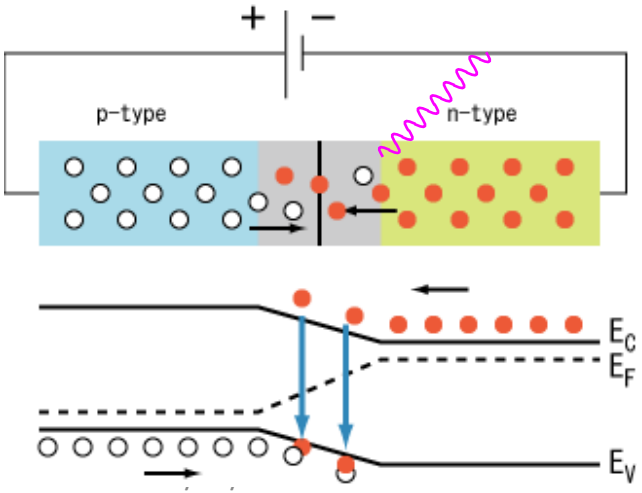



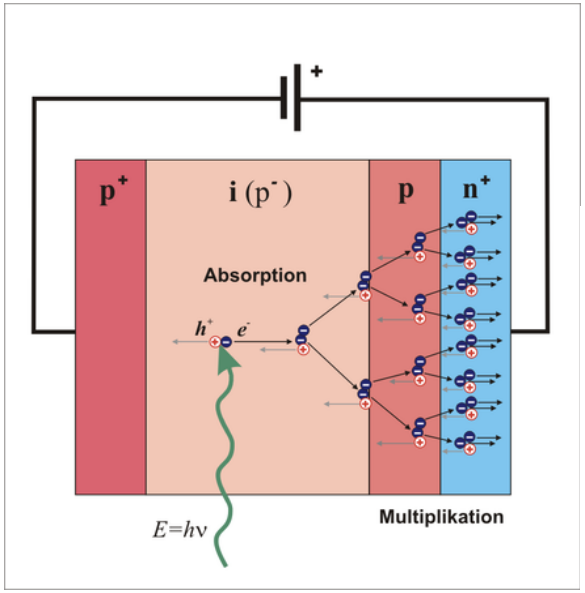
# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

## 半導体光検出器

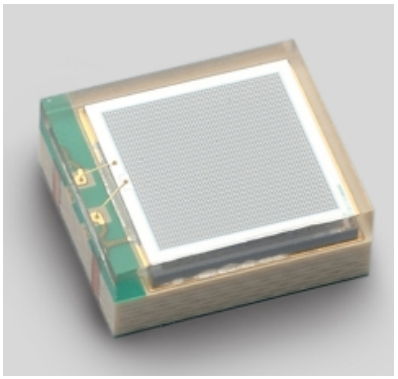
PIN-Photodiode

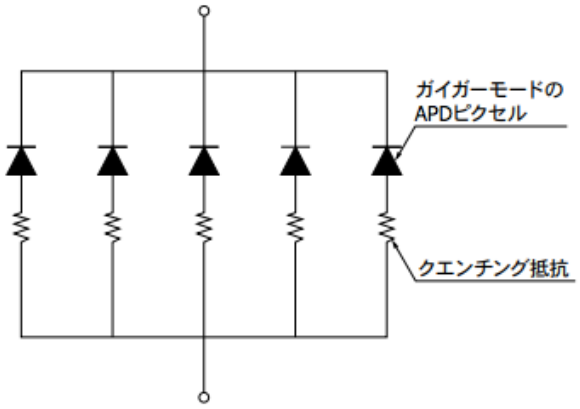



Avalanche photodiode




SiPM
Geiger mode APD
MPPC





# 1. 光検出器による放射線検出器の基礎

一旦まとめ

- 光を用いた放射線測定の技術は発光体、光センサーの組み合わせ.
- 有機シンチレータは加工が容易でファイバー形状などある.
- シンチレーション光は荷電粒子が落としたエネルギーに依存、等方的に放射
- チェレンコフ放射は荷電粒子の速度に依存、粒子進行方向に発光特性
- 光検出器は真空管と半導体がよく使われてる、用途に応じて使い分ける.
- 発光メカニズムやシンチレータ材質、集光システム、光センサーの組み合わせで実験のアイデアは広がる.

# INDEX

1. 光検出器による放射線検出器の基礎
2. 素核実験検出器
3. 環境放射能測定

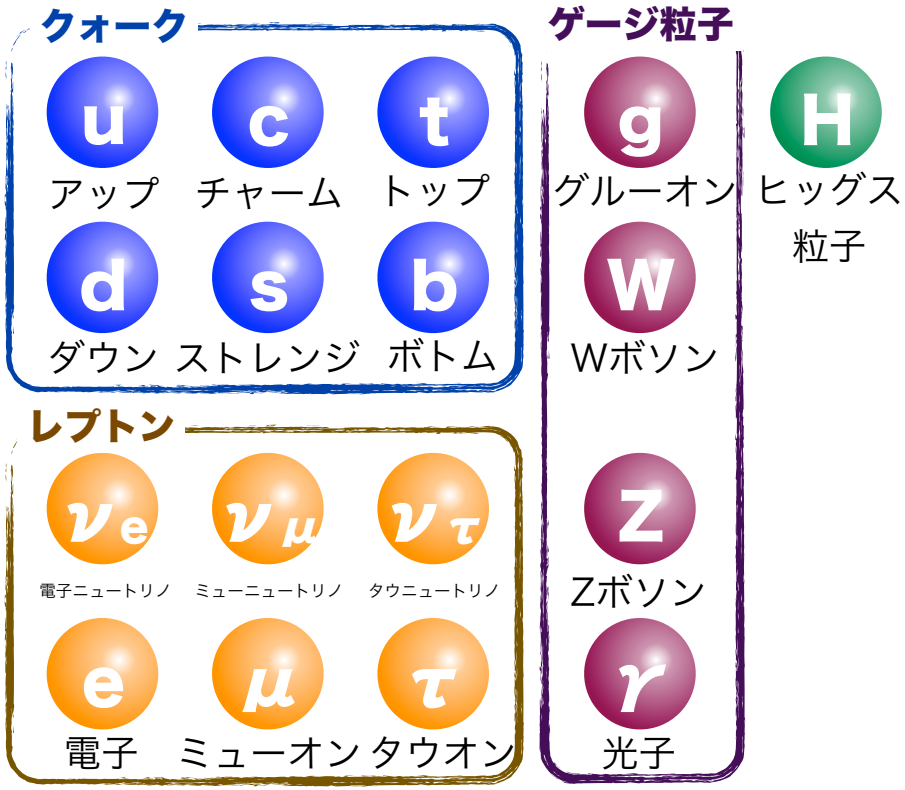
# 2. 素核実験検出器

## 素粒子物理と標準模型

素粒子:　物質を構成する最小単位

標準模型:　素粒子の振舞いを記述する理論体系

- クォーク・レプトン:　物質を構成
- ゲージ粒子:力を媒介
- ヒッグス粒子:質量起源
- 多くの実験結果を精度よく説明




問題点:ダークマター、ダークエネルギー、レプトンフレーバー破れなど説明できない

⟹ <u>標準模型を超える新物理があるはず</u>

>> 標準模型の精密検証、新物理探索

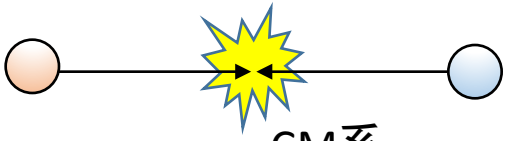
ニュートリノmass, LFV, LUV, エキゾティックハドロン…

# 2. 素核実験検出器

## ハドロン実験

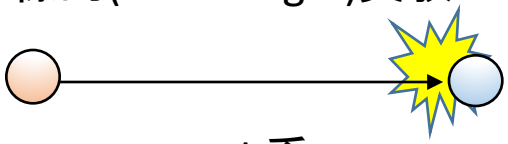
ハドロンとは？
強い相互作用で結合した複合粒子
　メソン: クォーク2つ　$q\bar{q}$　… $\pi, \rho, K, \phi, D, J/\Psi, B$
　バリオン: クォーク3つ　$qqq$ … $p, n, \Delta, \Sigma, \Lambda$

コライダー(collider)実験

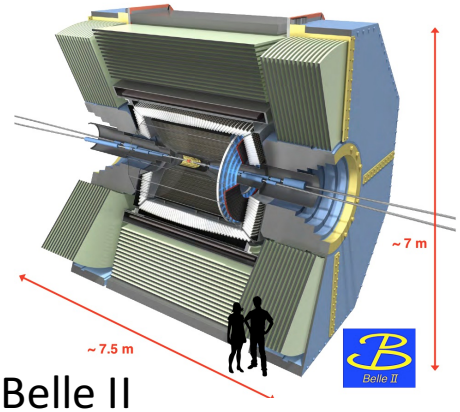


CM系

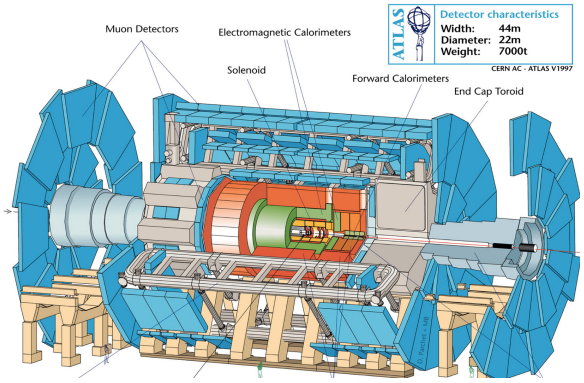
標的(fixed target)実験



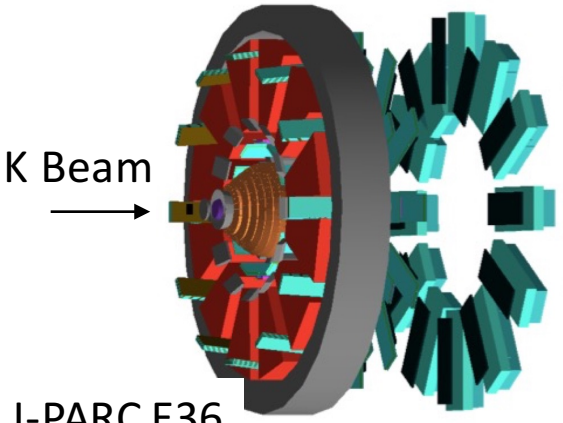
Lab系




Belle II
$e^+$(4 GeV) – $e^-$(7 GeV)

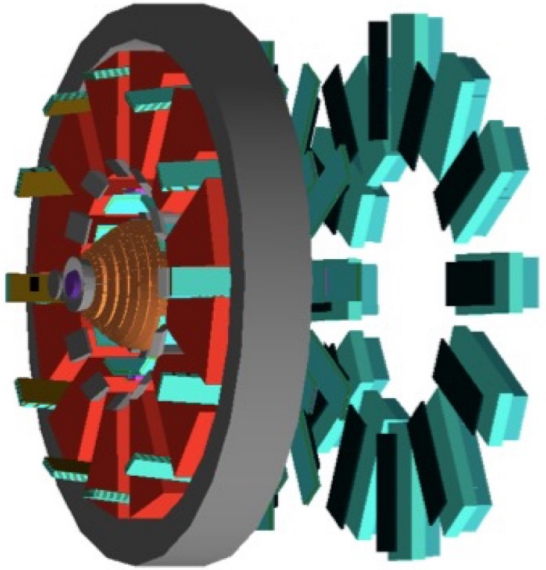


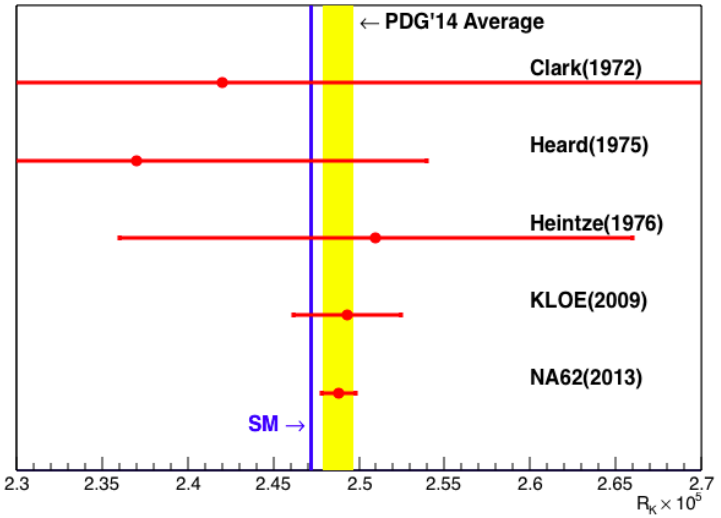

ATLAS　p(7 TeV) - p(7 TeV)




J-PARC E36

# 2. 素核実験検出器






J-PARC E36実験

静止$K^+$を用いた$\Gamma(K^+ \to e^+\nu_e)/\Gamma(K^+ \to \mu^+\nu_\mu)$の精密測定実験

レプトン普遍性:「弱い相互座用結合定数はレプトン世代に依らず同じ」$g_e = g_\mu$?

$K^+ \to l^+\nu_l \ (K_{l2})$

$\Gamma(K_{l2}) = g_l^2 (G^2/8\pi)\ f_K^2 m_K m_l^2 \{1-(m_l^2/m_K^2)\}^2$

$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(K^+ \to e^+\nu_e)}{\Gamma(K^+ \to \mu^+\nu_\mu)}$$

$$= \frac{m_e^2}{m_\mu^2}\left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2}\right)^2 (1 + \delta_r)$$

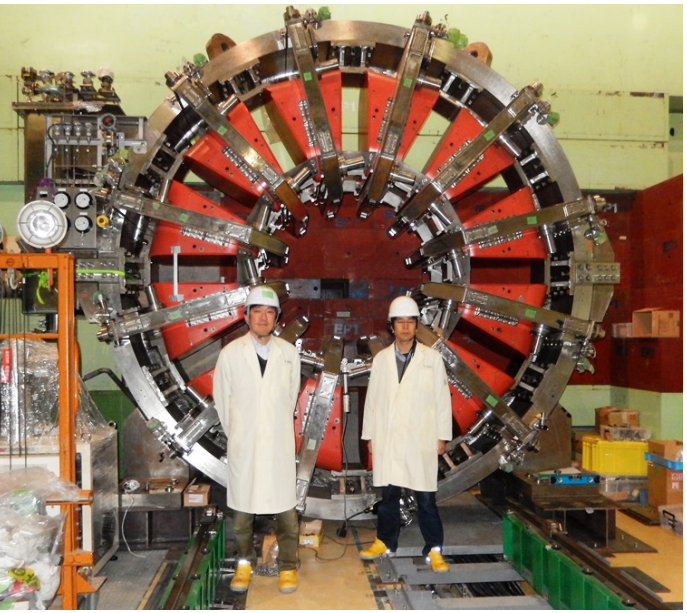
helicity suppression　　radiative correction

$$= (2.477 \pm 0.001)\times 10^{-5}$$

$m_e \sim 0.511\ \mathrm{MeV/c^2}$
$m_\mu \sim 105.6\ \mathrm{MeV/c^2}$
$m_K \sim 493.7\ \mathrm{MeV/c^2}$

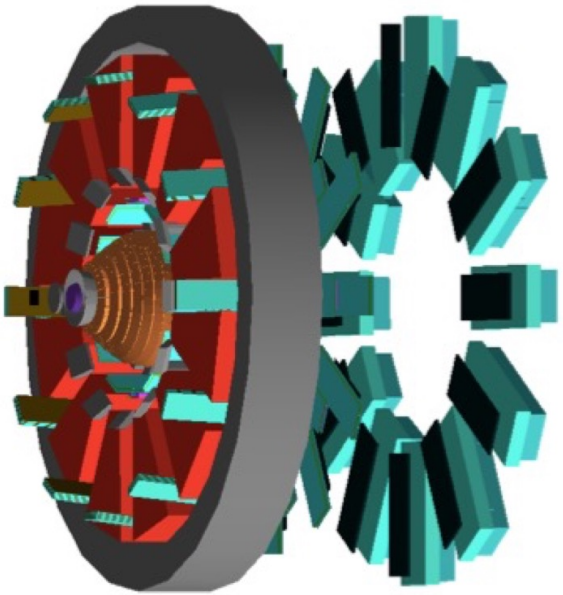
# 2. 素核実験検出器

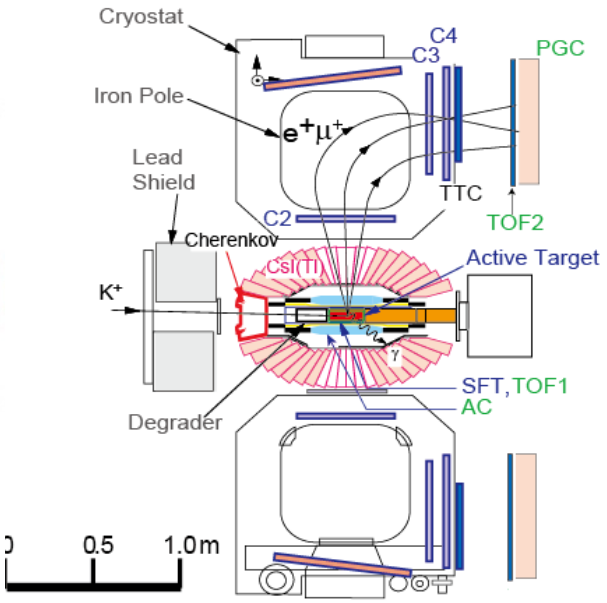
## J-PARC E36検出器

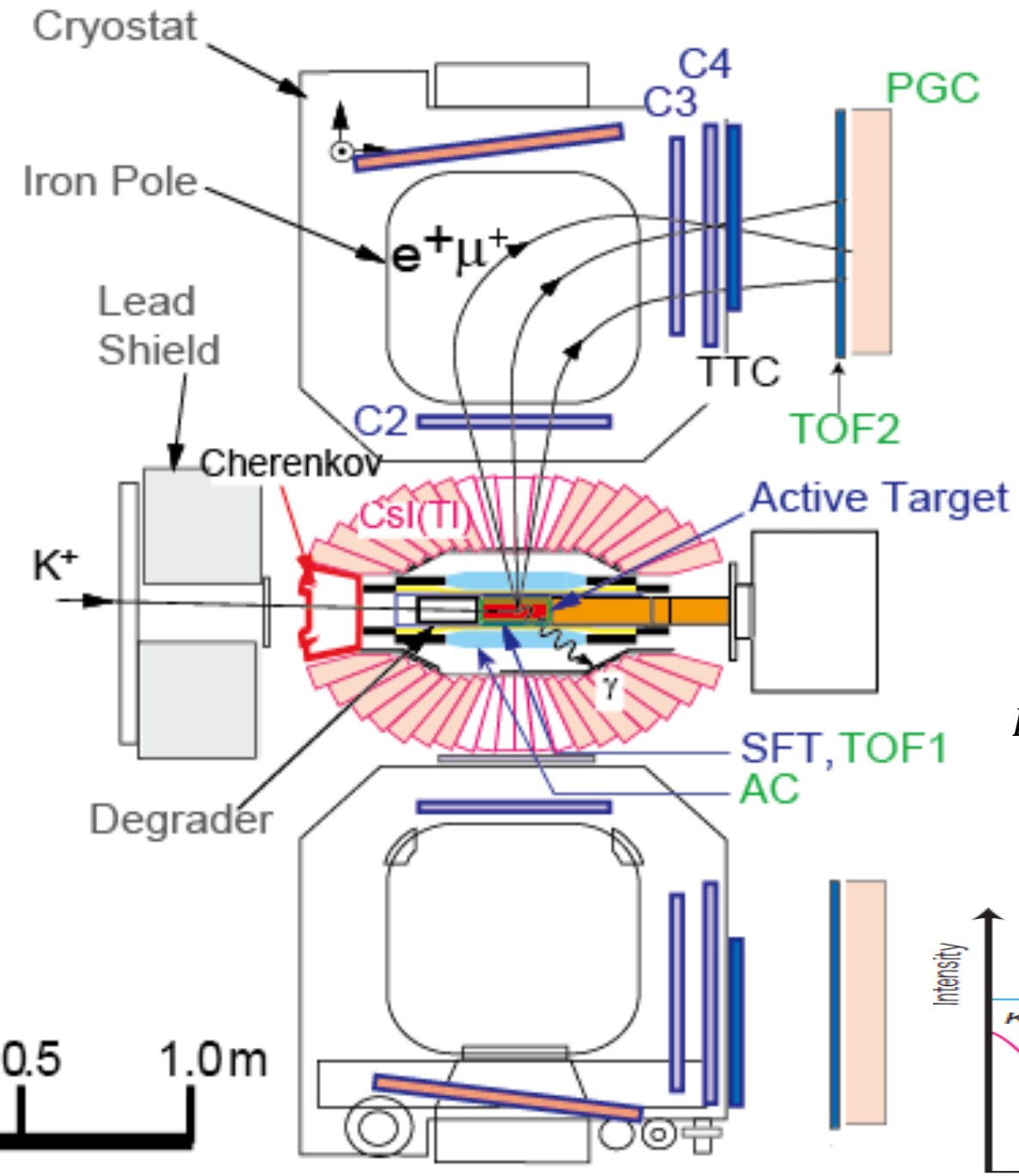


大阪大　清水俊先生（左）

KEK　五十嵐洋一先生（右）





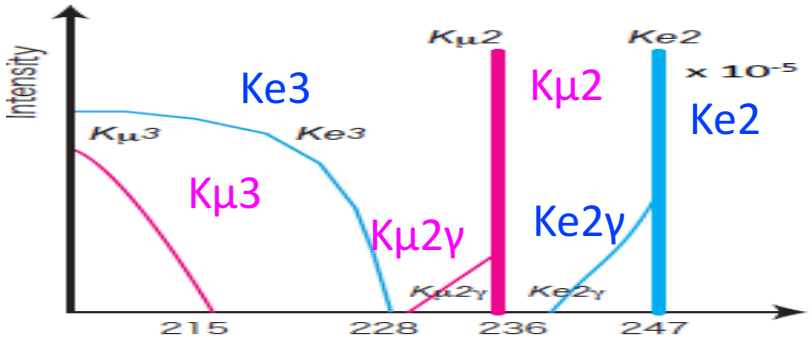


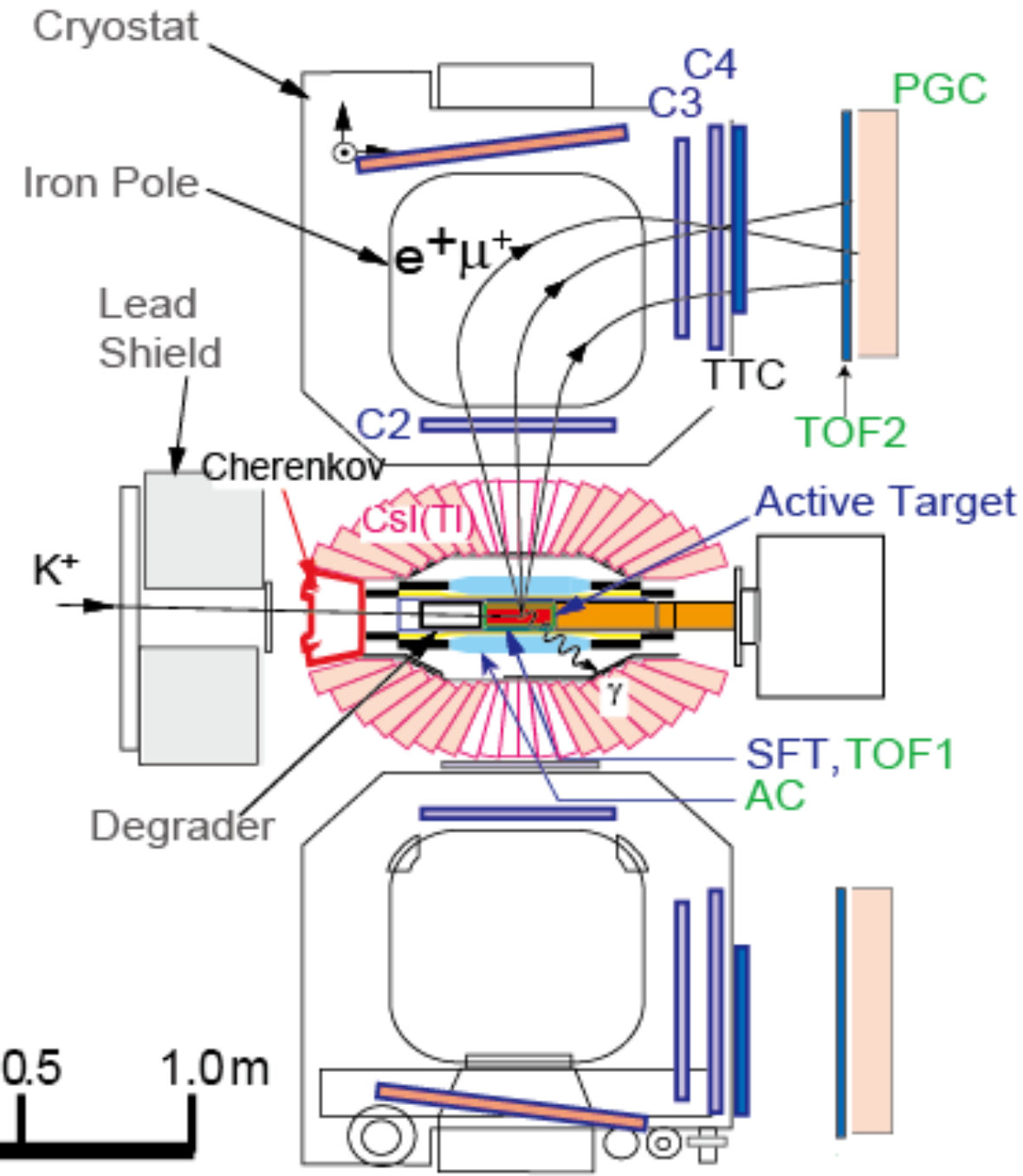

$m_e$~0.511 MeV/c$^2$
$m_\mu$~105.6 MeV/c$^2$
$m_K$~493 .7 MeV/c$^2$

| Decay channel | Branching ratio |
|---|---|
| $K^+ \to e^+\nu_e(K_{e2})$ | $1.58 \times 10^{-5}$ |
| $K^+ \to \mu^+\nu_\mu(K_{\mu2})$ | 63.55% |
| $K^+ \to e^+\pi^0\nu_e(K_{e3})$ | 5.07% |
| $K^+ \to \mu^+\pi^0\nu_\mu(K_{\mu3})$ | 3.35% |
| $K^+ \to \pi^+\pi^0(K_{\pi2})$ | 20.66% |
| $K^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0$ | 1.76% |
| $K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$ | 5.59% |

$K^+ \to l^+\nu_l\ (K_{l2})$

$e^+$ from $K_{e2}$ $p_e = 246.8$ MeV/$c$
$\mu^+$ from $K_{\mu2}$ $p_\mu = 235.5$ MeV/$c$






**静止$K^+$法**

- K1.1BR beamline
- Beam Cherenkov
- $K^+$ stopping target

**トラッキング**

- MWPC (C2, C3, C4)
- Spiral Fiber Tracker (SFT)
- Thin trigger counter (TTC)

**粒子識別**

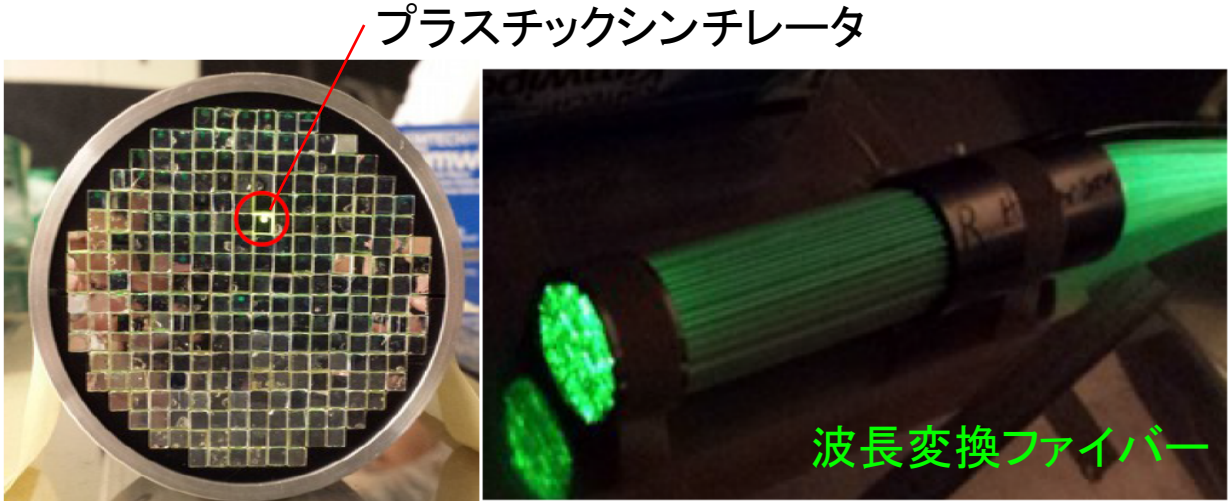
- TOF (TOF1, TOF2)
- Aerogel Cherenkov (AC)
- Pb glass counter (PGC)

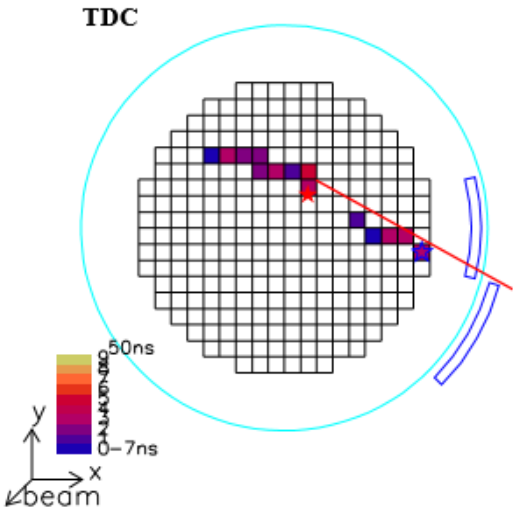
**ガンマ線**

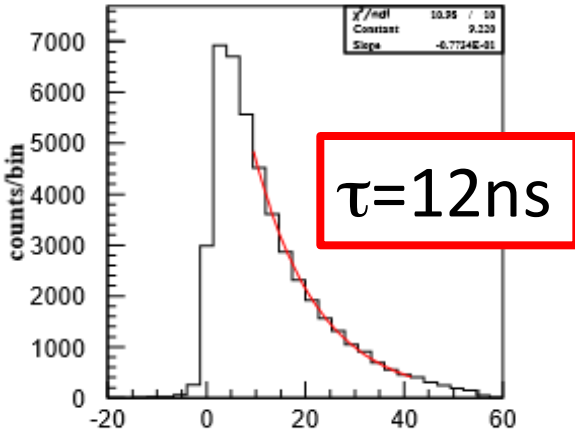
- CsI(Tl)
- Gap veto (GV)

# 2. 素核実験検出器

Active Target

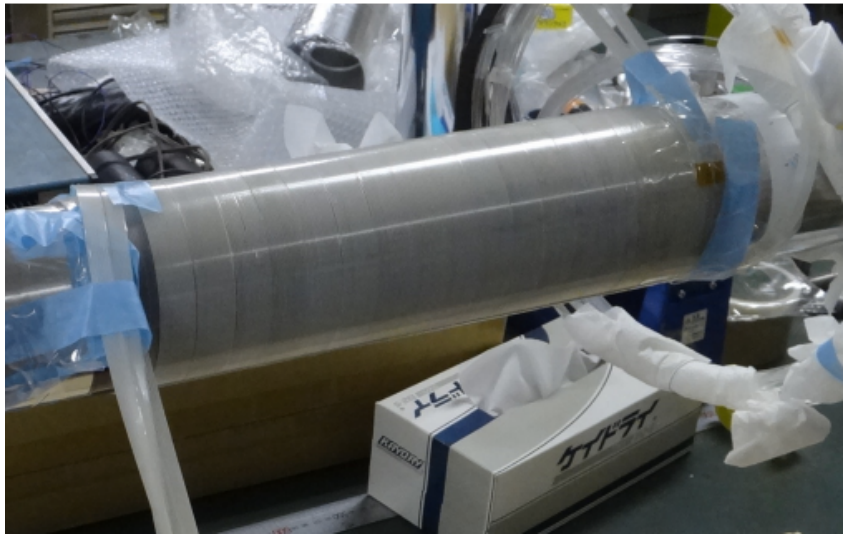


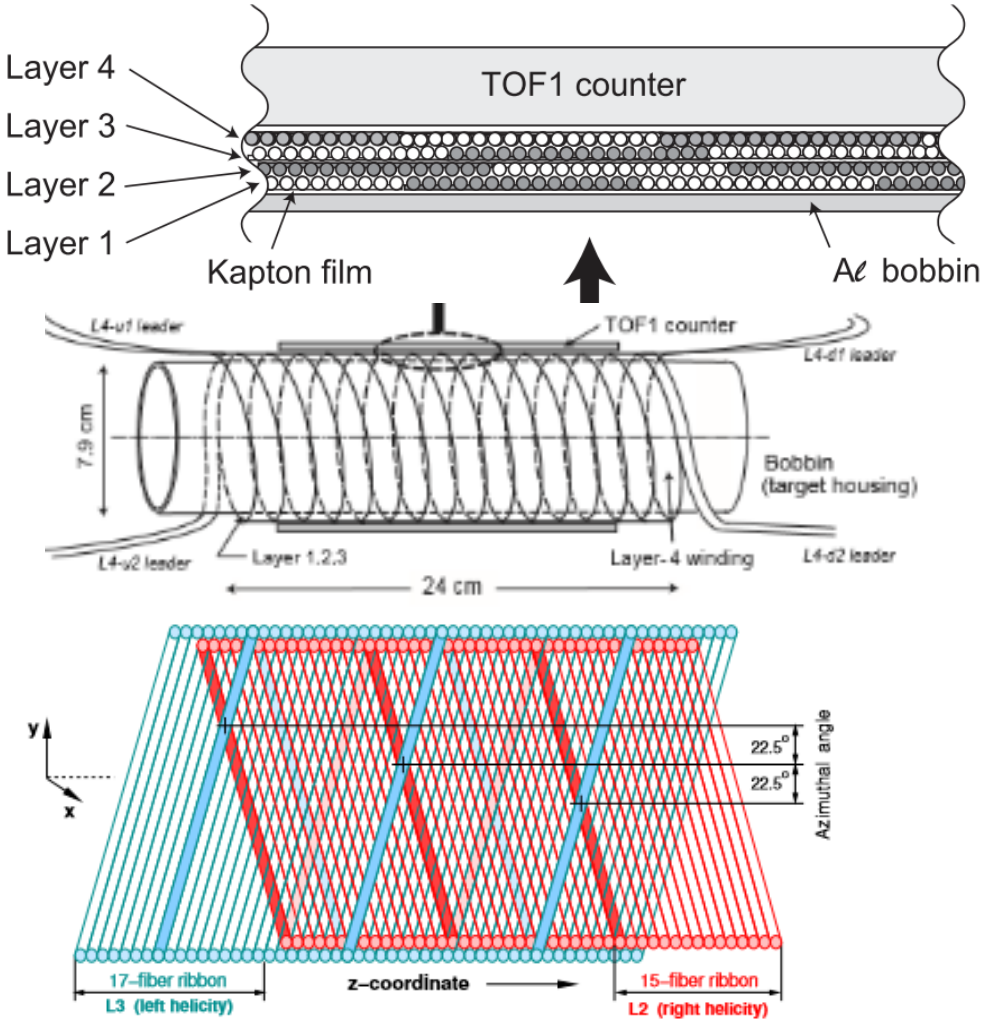





# 2. 素核実験検出器

## スパイラル・ファイバー・トラッカー



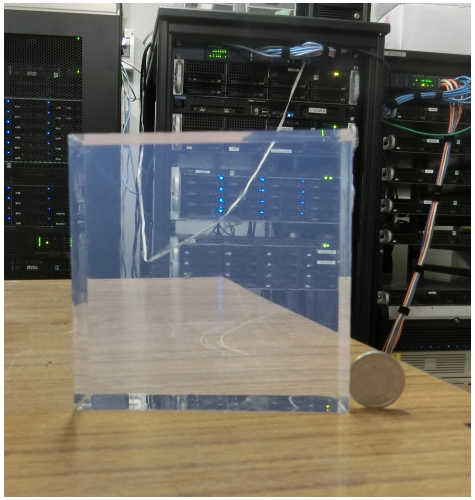


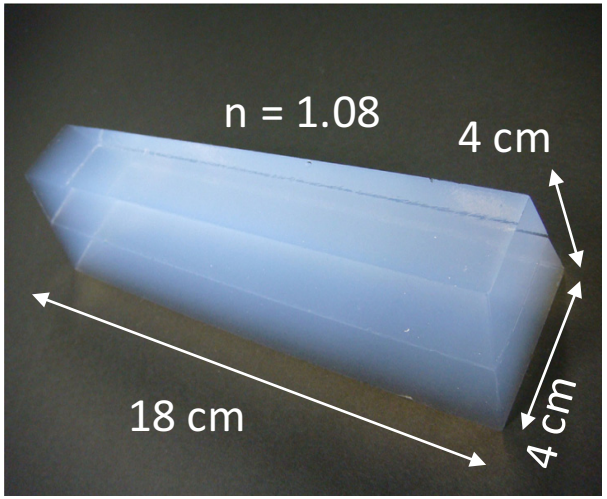

- 右巻helicity(2層）左巻きhelicity(2層)の4層構造。
- 右巻と左巻きリボンは幅が異なる。
- 交点位置がターン毎に22.5度ずれていく。
- Target解析と合わせ、z位置をユニークに決定

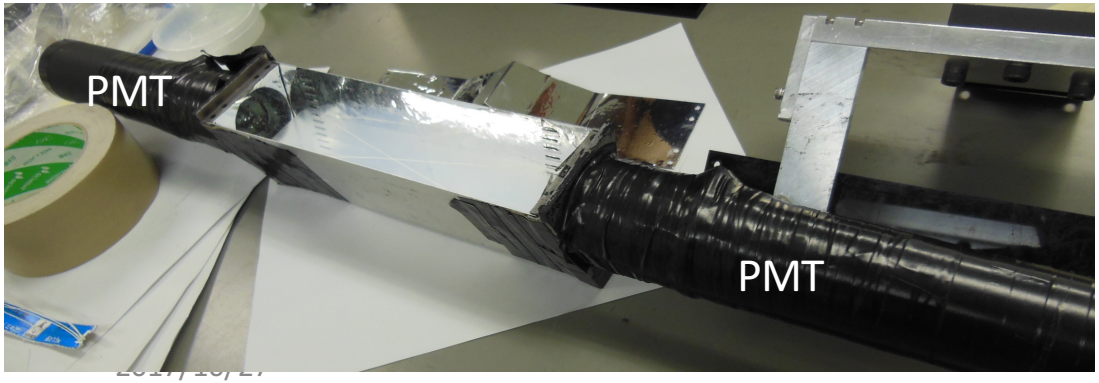
# 2. 素核実験検出器

## エアロゲル・チェレンコフ検出器

シリカエアロゲル





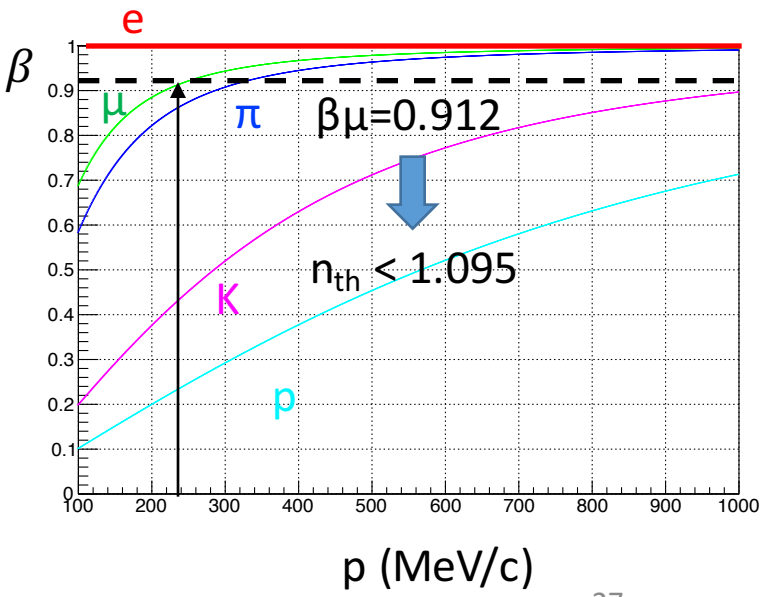




$K^+ \to l^+ \nu_l \ (K_{l2})$

$e^+$ from $K_{e2}$ $p_e = 246.8$ MeV/$c$

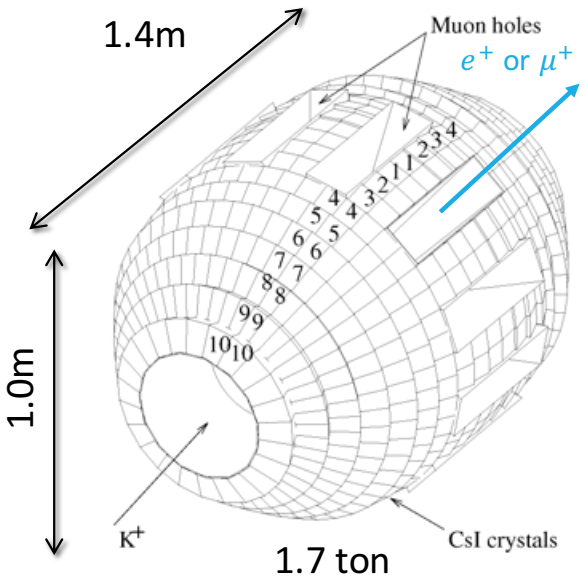
$\mu^+$ from $K_{\mu 2}$ $p_\mu = 235.5$ MeV/$c$

eで鳴って、μでならない屈折率は？

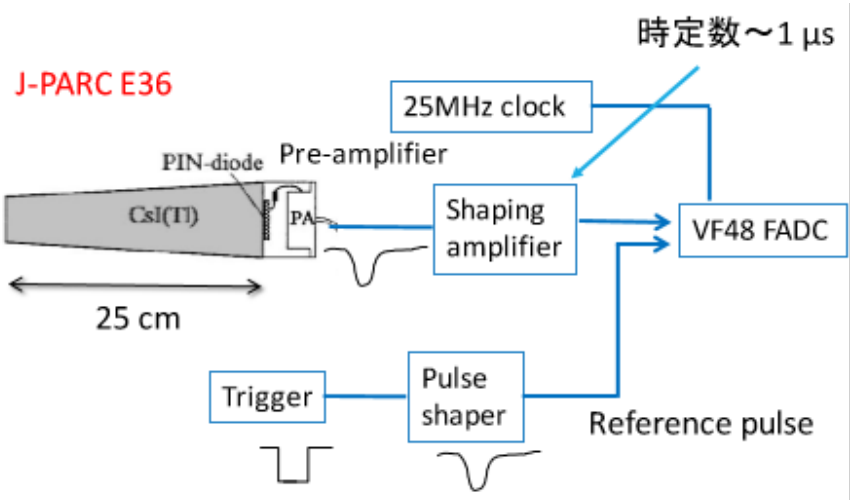


# 2. 素核実験検出器

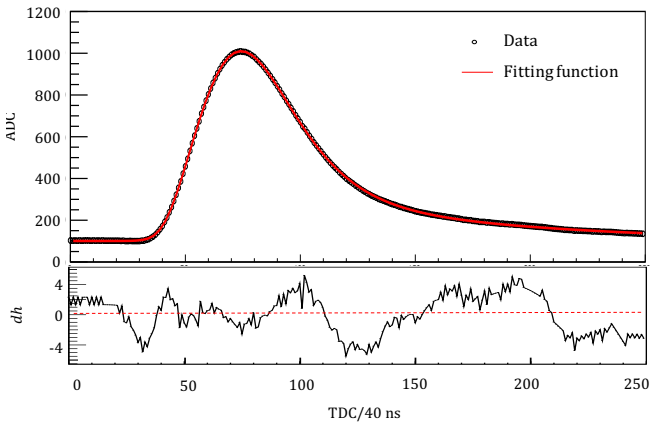
## 678 個 CsI(Tl) 結晶



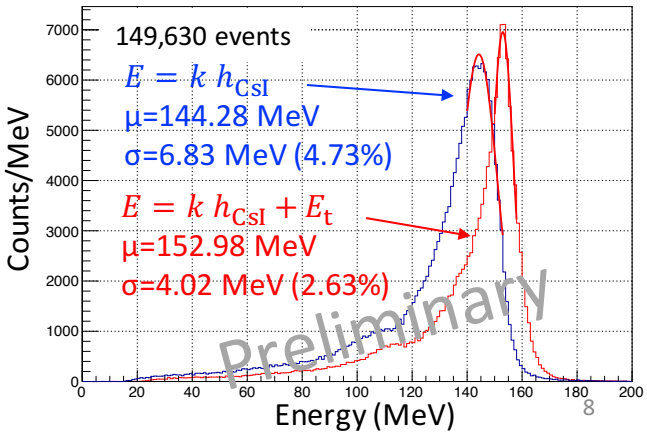

## CsI(Tl)カロリメータ



## 波形解析

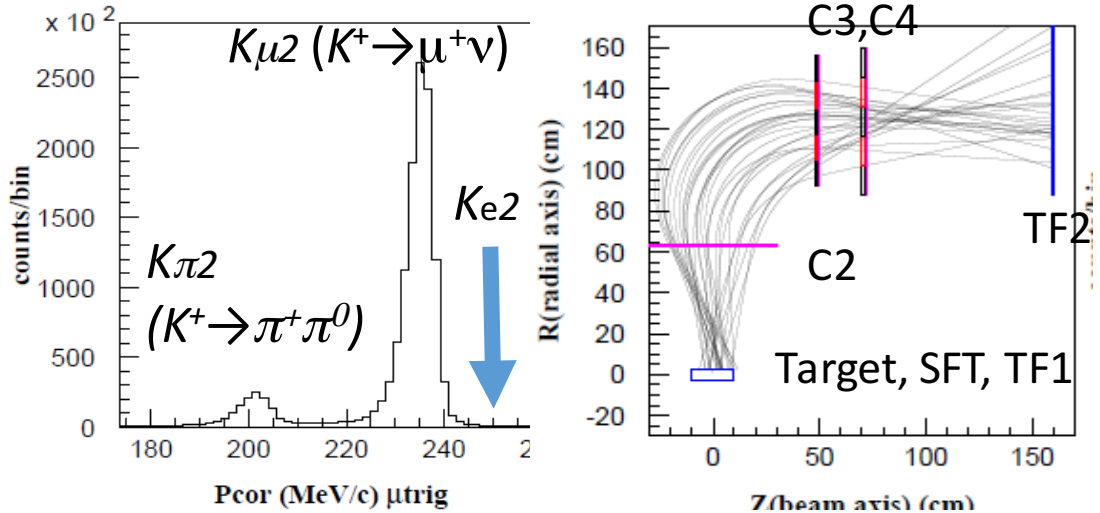



## エネルギー較正



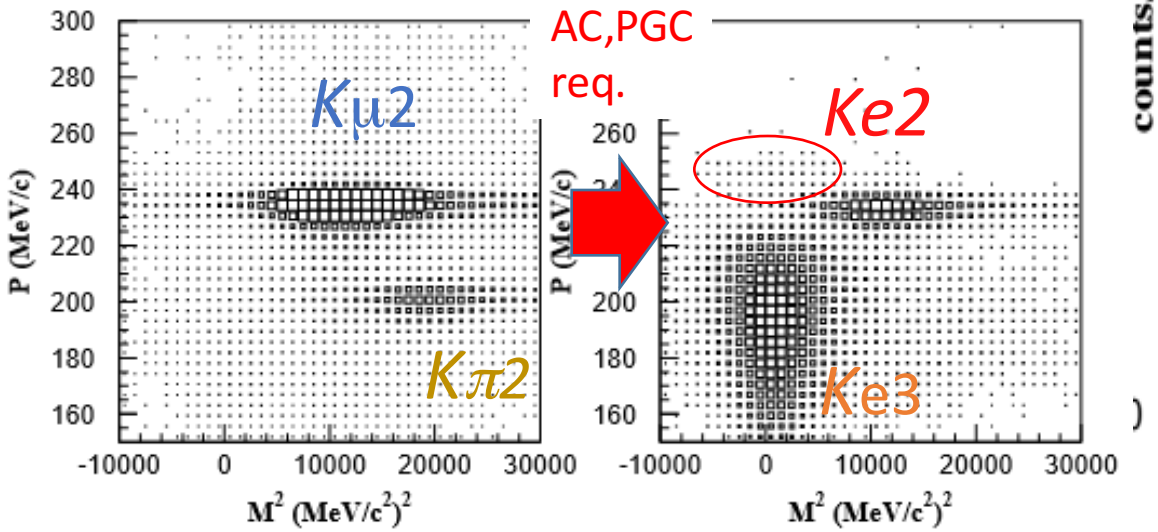
# 2. 素核実験検出器

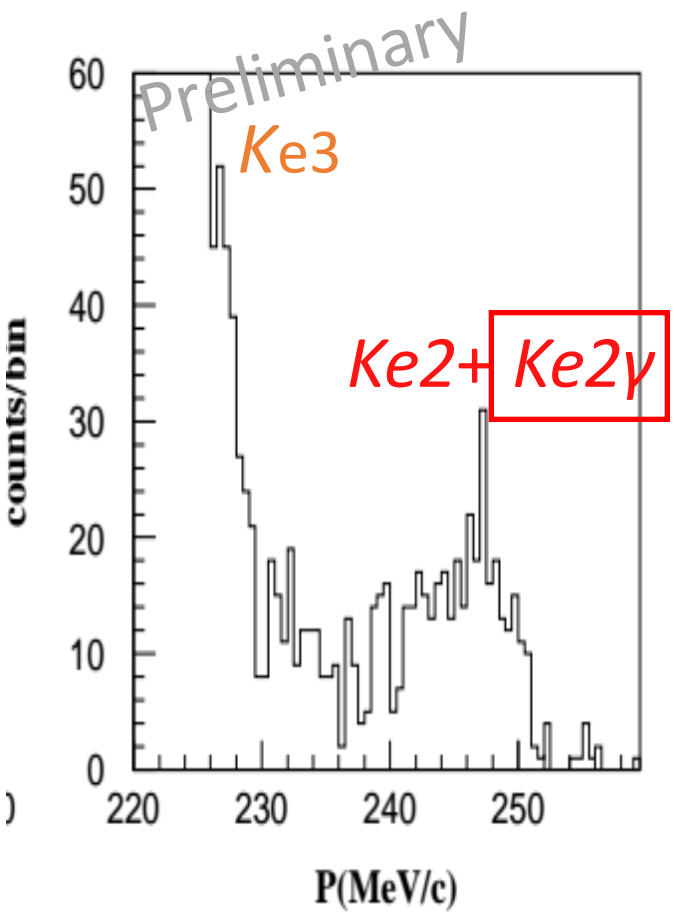
## データ解析









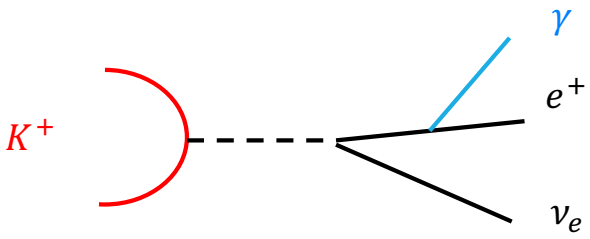
# 2. 素核実験検出器

## データ解析

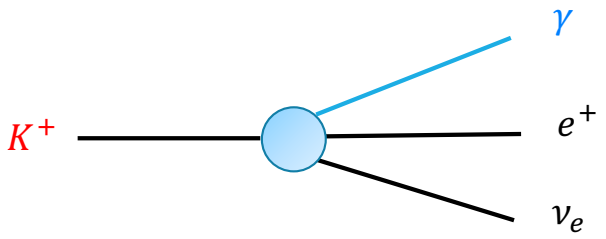
$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(Ke2\,) + \Gamma(Ke2\gamma(IB))}{\Gamma(K_{\mu 2}\,) + \Gamma(K_{\mu}2\gamma\,(IB))}$$

Background: $Ke2\gamma$ (SD)

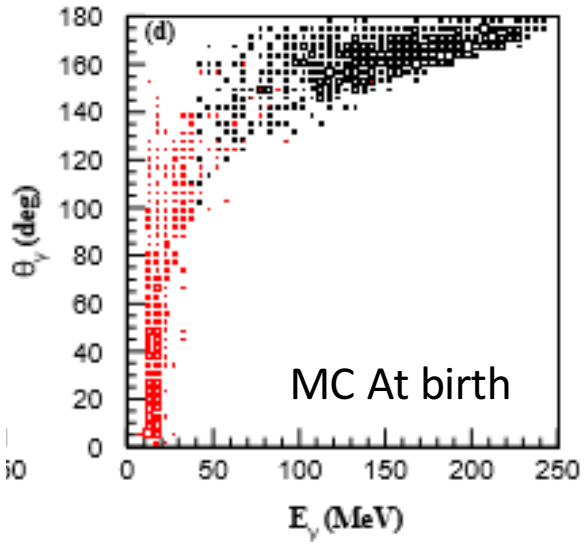
$Ke2\gamma$: $K^+ \rightarrow e^+\,\nu_e\,\gamma$

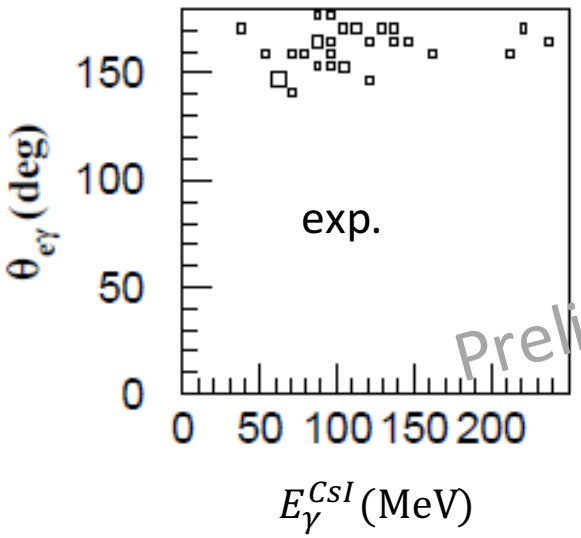


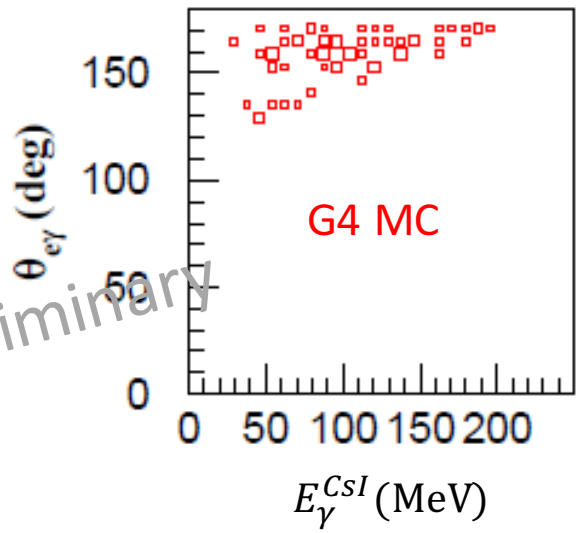

Internal Bremsstrahlung (IB)




Structure Dependent (SD)




Preliminary

# 2. 素核実験検出器

## 一旦まとめ

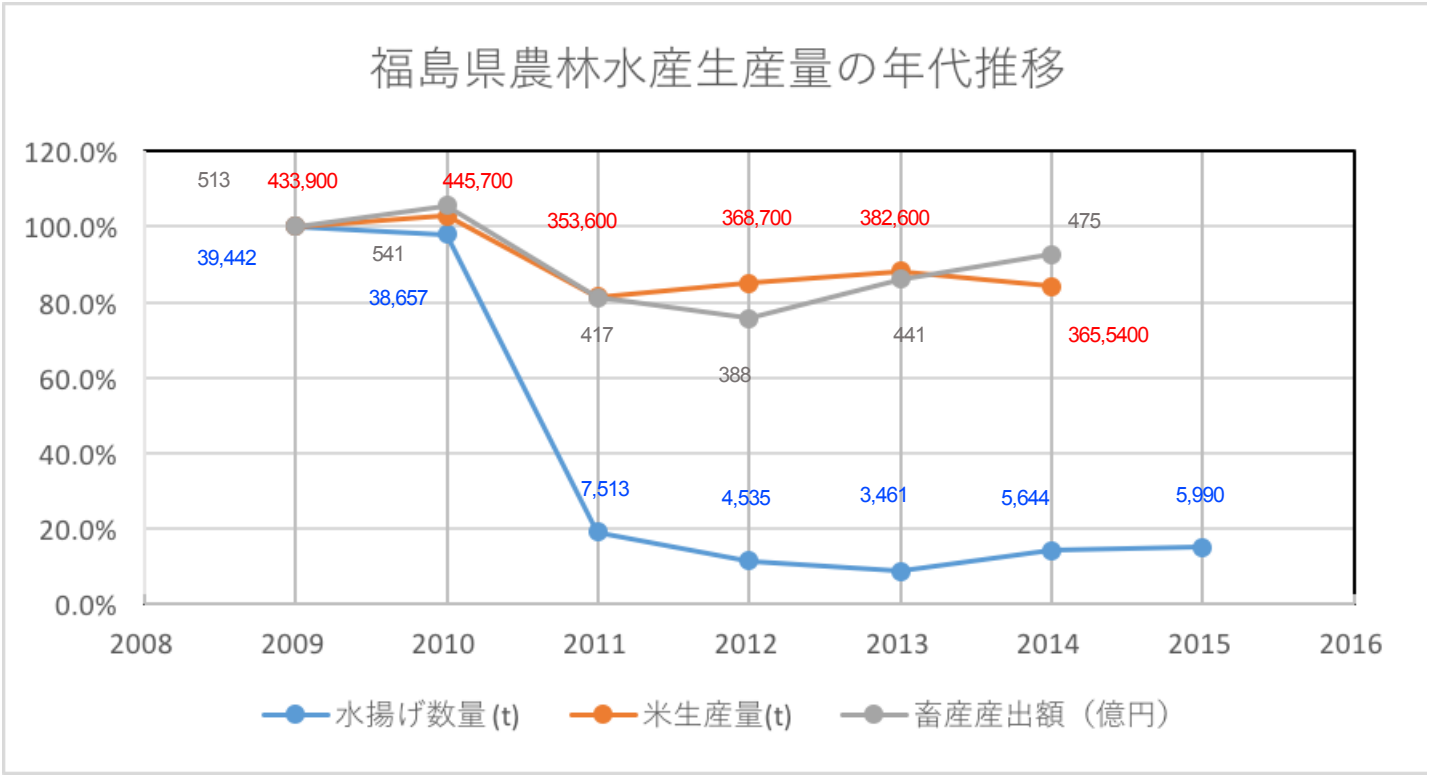
- J-PARC E36実験はほぼ光検出器を用いたFixed Target実験
- 光検出器は荷電粒子の識別、γ線カロリメータ、K静止位置の役割に応用された。
- これらの検出器を組み合わせ、レプトン普遍性破れ探索の研究を行っている
- 現在、解析は順調に進んでいる
  - Ke2ピークを観測
  - Ke2γ(SD)事象を観測、シミュレーションと一致
- 今後は解析データ統計を増やし、Ke2γ由来雑音抑制を行なっていく

# INDEX

1. 光検出器による放射線検出器の基礎
2. 素核実験検出器
3. 環境放射能測定

# 3. 環境放射能測定

## 福島原発事故の影響



# 3. 環境放射能測定

## 放射線核種のいろいろ

アルカリ金属

$^{137}Cs$　$\tau_{1/2}$ = 30 yr

$\beta^-$ (0.51 MeV)

$^{137m}Ba$

$\tau_{1/2}$ = 2 ms

$\beta^-$(1.17 MeV)

γ (0.66 MeV)

$^{137}Ba$

アルカリ金属

$^{40}K$　$\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ yr （12億年）

E.C.

γ (1.46 MeV)

$\beta^-$ (max. 1.31 MeV)

$^{40}Ar$

$^{40}Ca$

$\beta^-$ (max. 0.55 MeV)

$^{90}Sr$ → $^{90}Y$ → $^{90}Zr$

$\tau_{1/2}$ = 29 yr　　$\tau_{1/2}$ = 64 hr　$\beta^-$ (max. 2.28 MeV)

アルカリ土類金属

# 3. 環境放射能測定

## ストロンチウム90放射能濃度測定

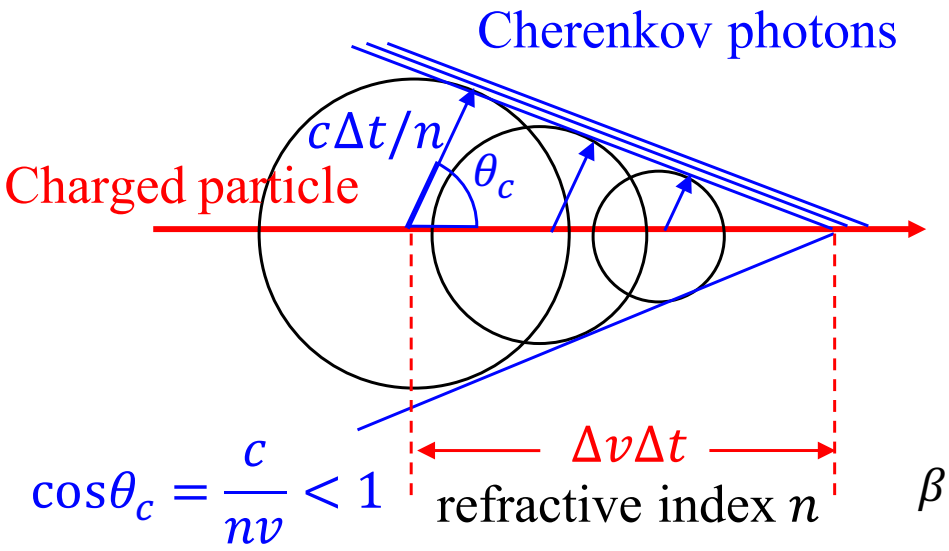
化学抽出法
- JIS規格
- 放射平衡を待つため数週間から1ヶ月測定にかかる
- 試料全て灰にするため生鮮食品の汚染検査は難しい

エンドポイント法
- 磁場、カロリメータを用いたエネルギースペクトロメータ
- 環境放射能によってエンドポイント決定が困難

レンジ測定法
- β線飛程を用いた計数測定
- γ線がBGになるが、10分で数Bq/g (500-1000 Bk/kg@1時間)

チェレンコフ光検出手法
- 90Yからのβ線だけがチェレンコフ放射する閾値型チェレンコフ検出器
- n=1.047のシリカエアロゲルで先行研究
- Eff.(β(137Cs))/Eff.(β(90Y)) = $(2\sim4)\times10^{-2}$ .

# 3. 環境放射能測定

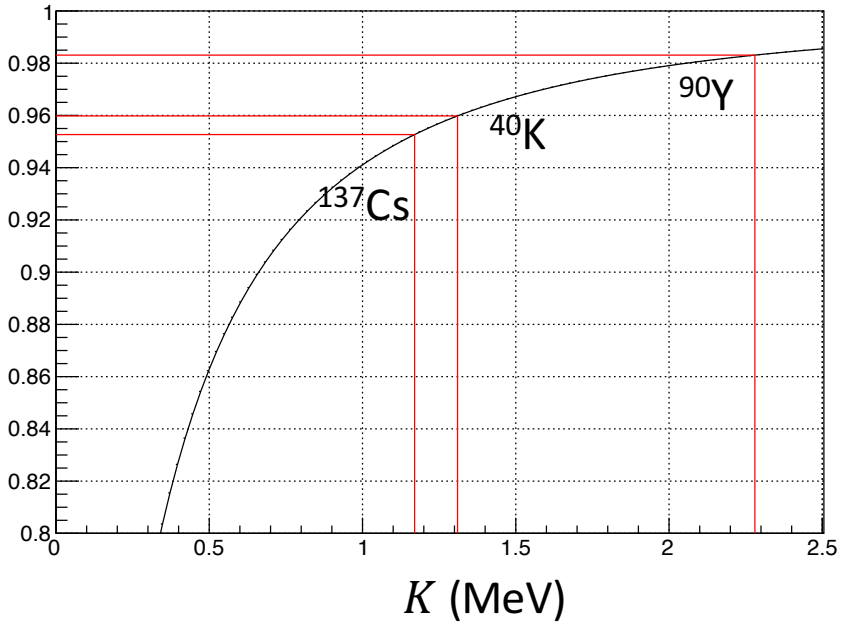



$$\cos\theta_c = \frac{c}{nv} < 1$$

カリウム40からの1.31 MeVβ線で
チェレンコフ放射しない屈折率

電子運動エネルギー K
電子速度β

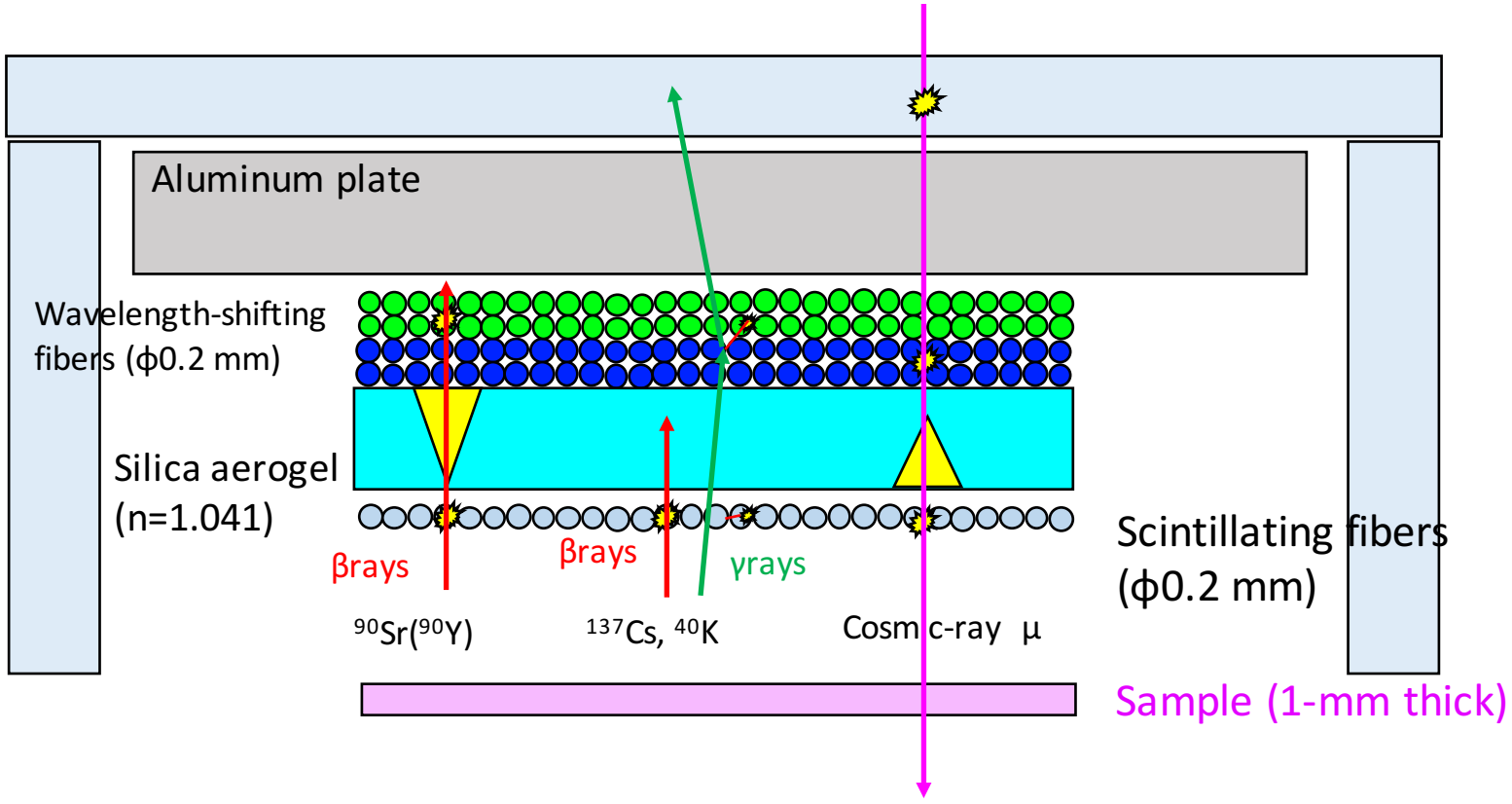
$$\beta = \frac{mc^2 + K}{\sqrt{(m_e c^2 + K)^2 - m_e^2 c^4}}$$

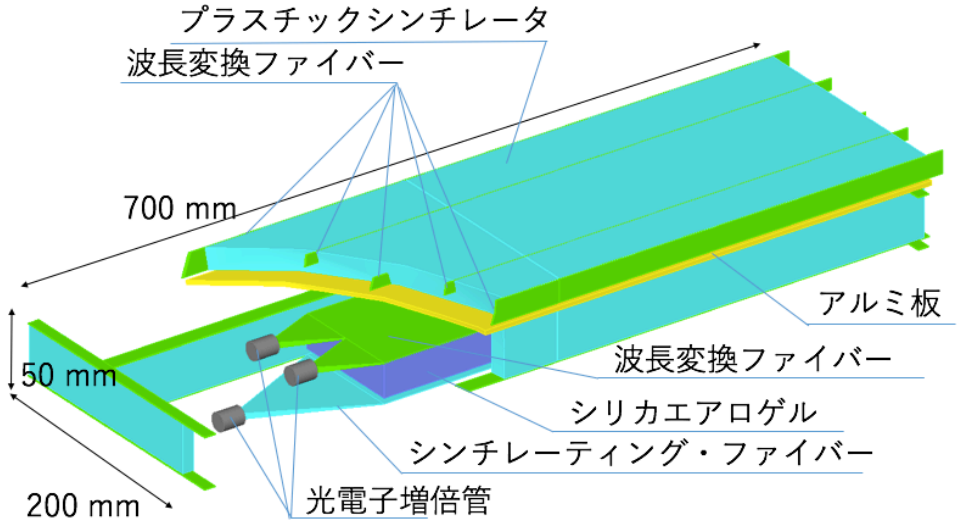


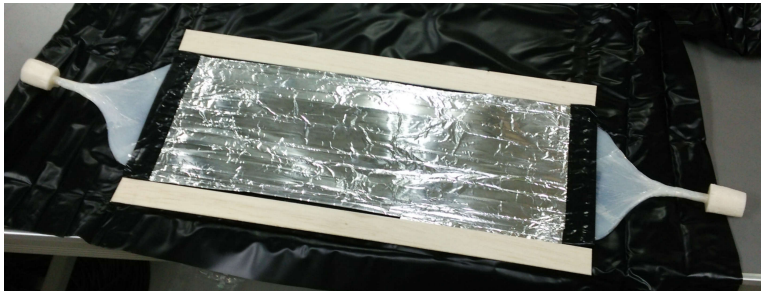

$\beta_{40K} = 0.96$
$n_{th} < 1.042$

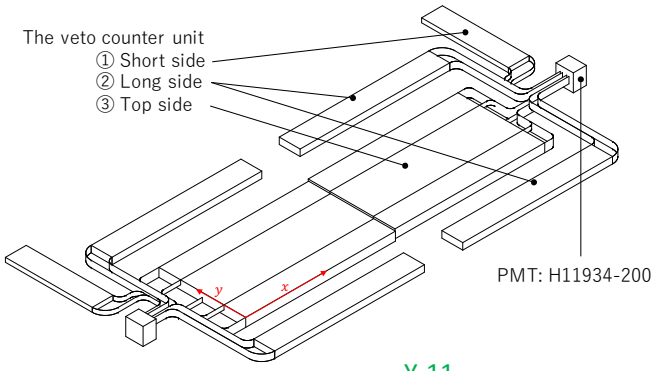
# 3. 環境放射能測定

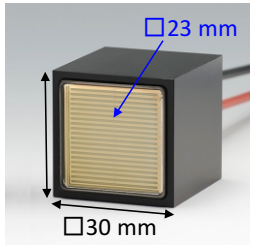
## リアルタイムストロンチウム90カウンター



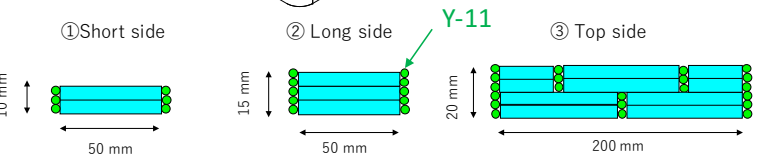


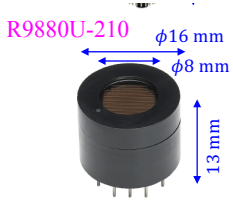





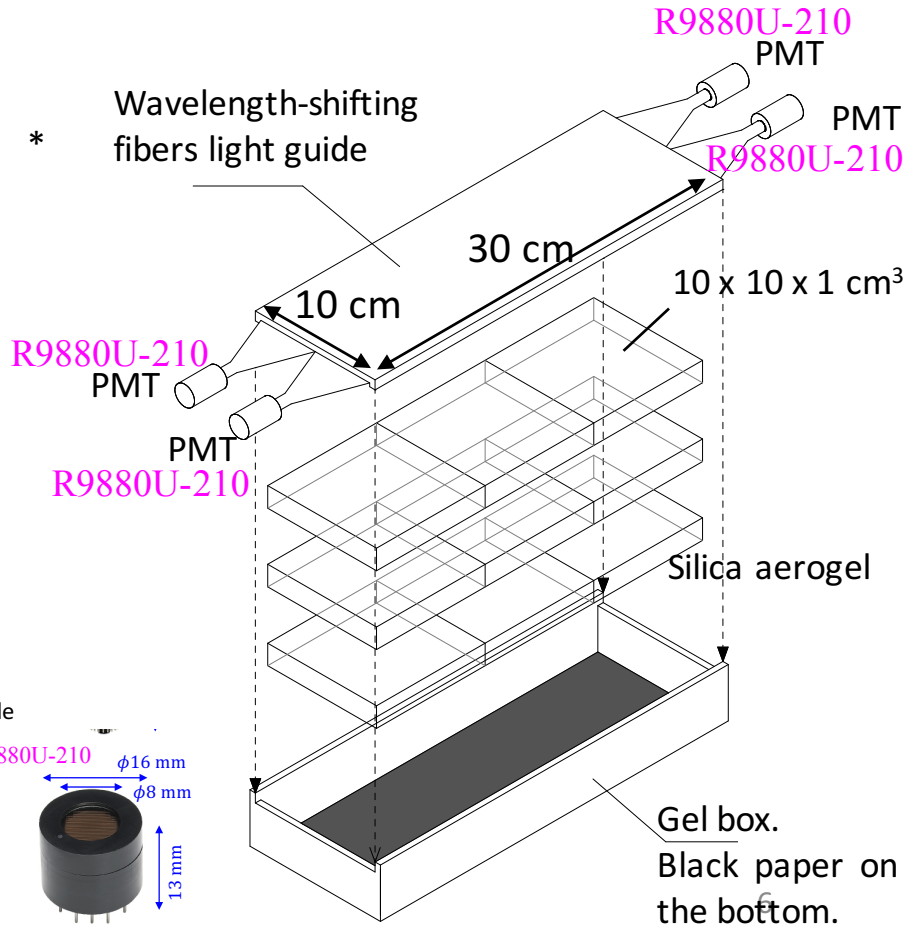



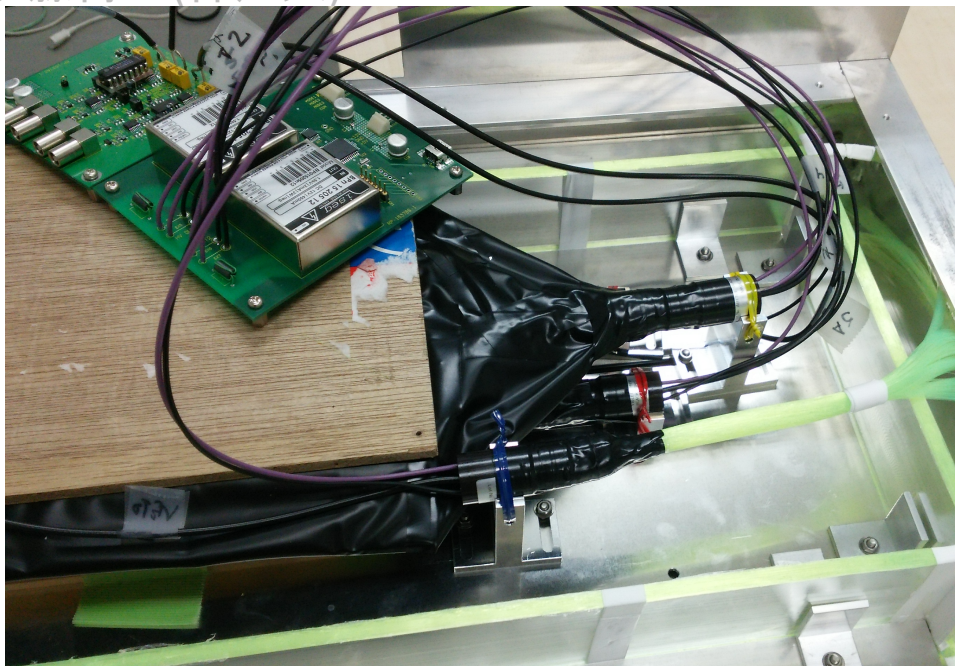

- Photocathode
  - □23 mm
  - Ultra Bialkali
- Metal Channel Dynode

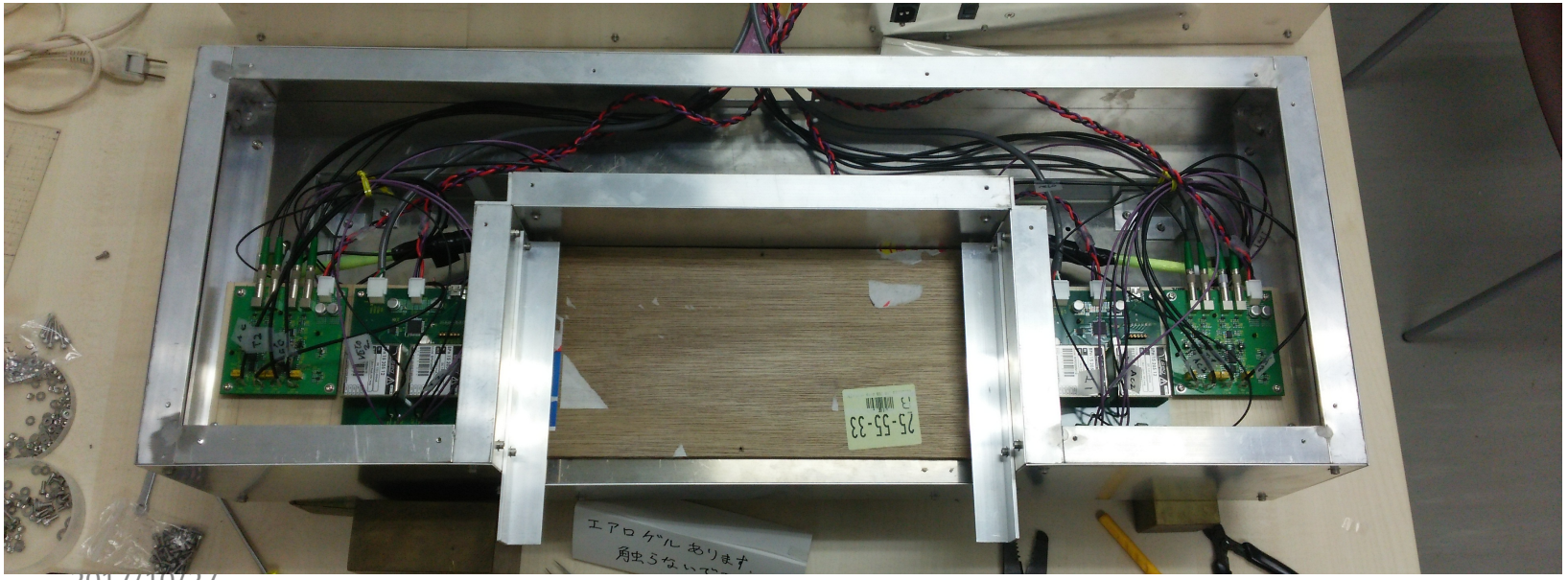



*

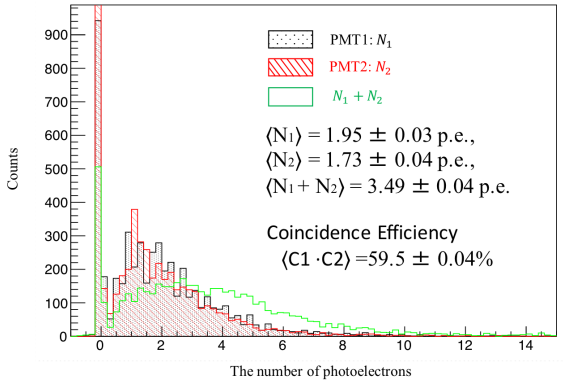




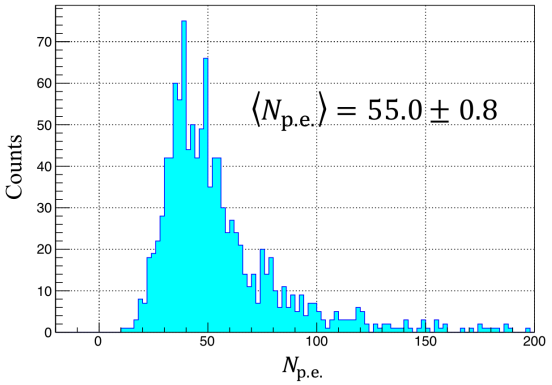

25-55-33
エアロゲル あります

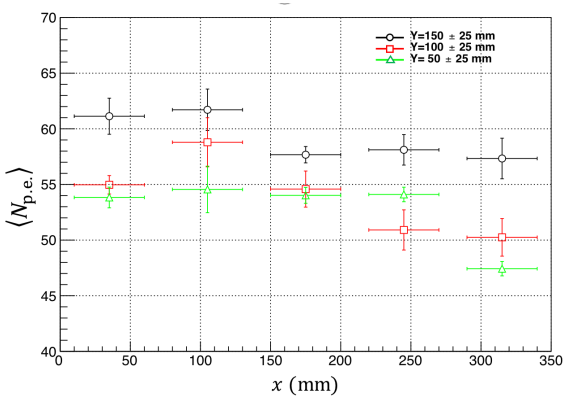
# 3. 環境放射能測定

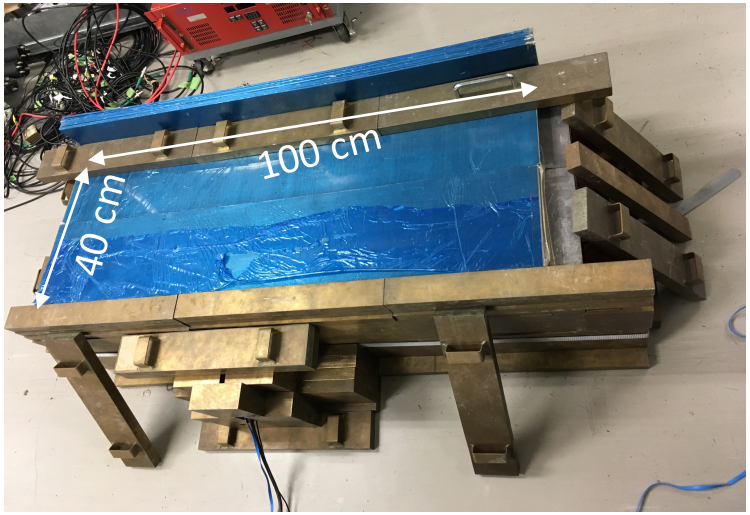
Trigger counter performance

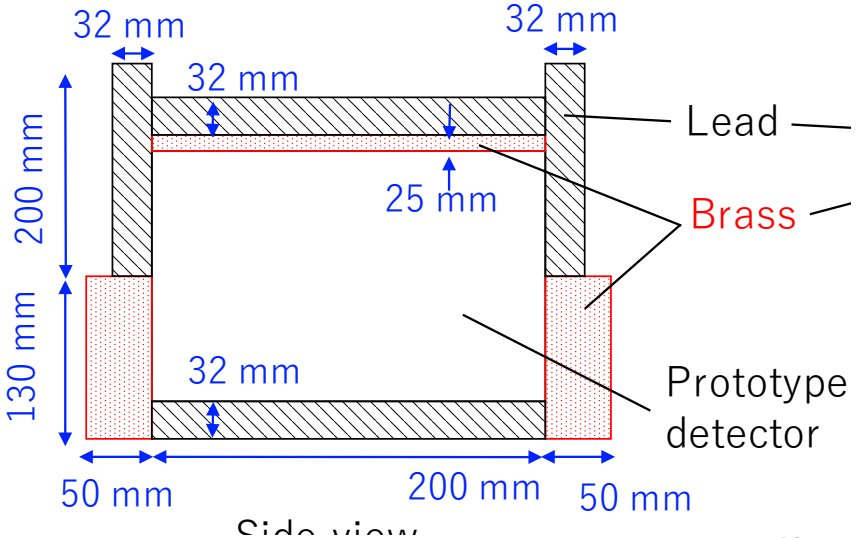



Cosmic-ray veto counter performance



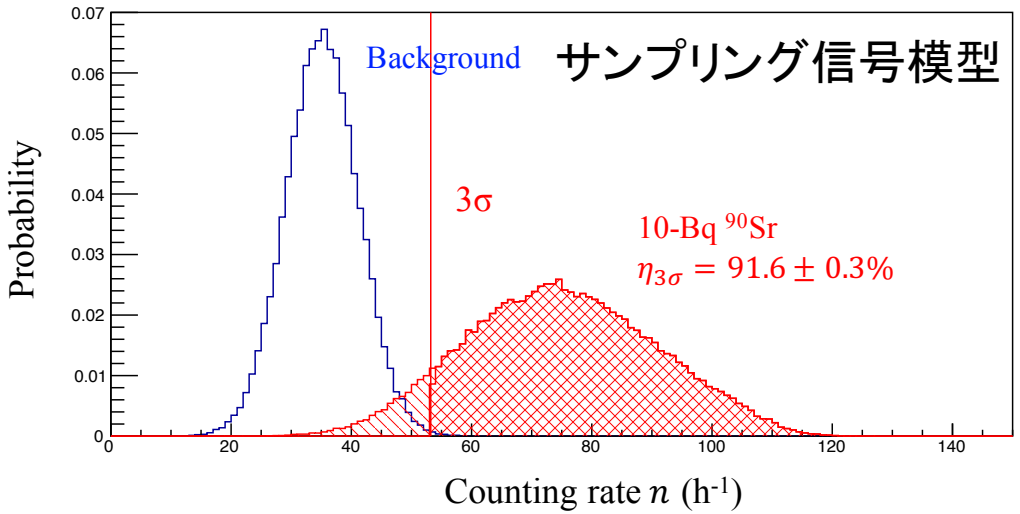




ウラン・トリウム系列核種からのBGを抑制

# 3. 環境放射能測定




$$\Gamma_{\rm BG}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\rm BG}^2}} \exp\left\{-\frac{(n-\nu_{\rm BG})^2}{2\sigma_{\rm BG}^2}\right\},$$

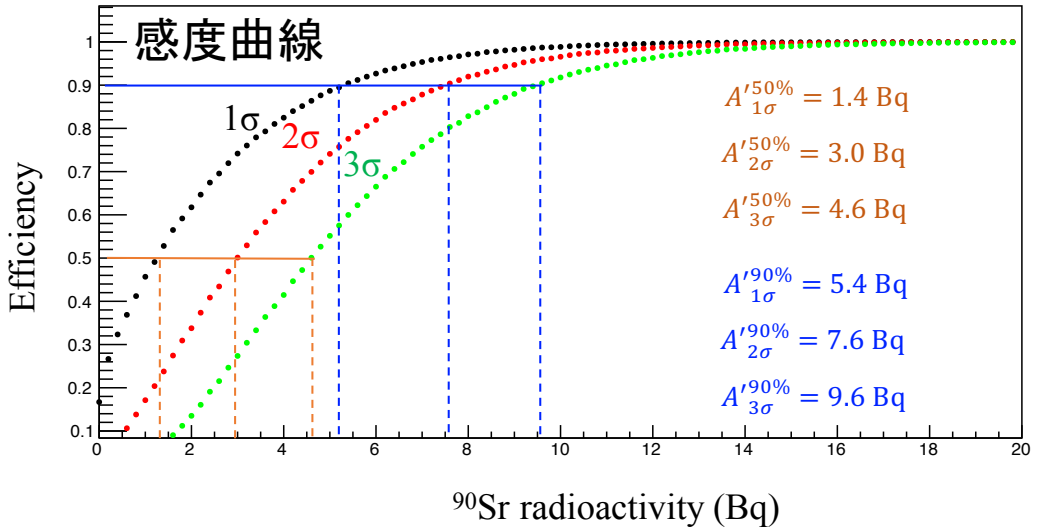
$\nu_{\rm BG} = 35.1\ {\rm h}^{-1}$
$\sigma_{\rm BG} = 6.0\ {\rm h}^{-1}$

$$\phi_x(n) = \frac{e^{-\nu/\alpha^2}(\nu/\alpha^2)^{n/\alpha^2}}{\Gamma(n/\alpha^2+1)}$$

$$\Gamma_x(n) = \int d\tilde{n}\ \phi_x(\tilde{n}) \cdot \Gamma_{\rm BG}(\tilde{n}-n),$$

$k_{\rm Sr} = \nu_{\rm Sr}/A_{\rm Sr}$

| Source | $\alpha$ | $k$ (Bq$^{-1}$ h$^{-1}$) |
|---|---|---|
| $^{90}$Sr | $2.50 \pm 0.50$ | $6.23 \pm 0.13$ |
| $^{137}$Cs | $0.532 \pm 0.044$ | $(4.77 \pm 0.09) \times 10^{-3}$ |
| $^{40}$K | $1.067 \pm 0.106$ | $(1.95 \pm 0.04) \times 10^{-2}$ |




乾燥した海産物サンプルの密度1 g/cm$^3$、体積圧縮率ε=0.3、厚さ1 mm、質量m=30 gとすると1時間測定における検出限界は、

$$A^{50\%}_{3\sigma}\ m\ \varepsilon^{-1} = 46\ {\rm Bq/kg}$$

$A \propto S^{-1}$; it expected to be 8.4 Bq/kg @S=1 m$^2$

海水における検出限界は

$$A^{50\%}_{3\sigma}\ m\ \varepsilon^{-1} = 1.5\ {\rm Bq/L}$$

# 3. 環境放射能測定

ストロンチウム90カウンターの今後

化学抽出法で事前に90Srを測った土壌サンプルをスクリーニング

↓

数Bq/kgの90Srが実際に測定できるか検証

↓

サンプル統計数をためて性能評価

↓

海産物・生鮮食品に置き換えてスクリーニング検査

↓

漁港に実戦配備！！

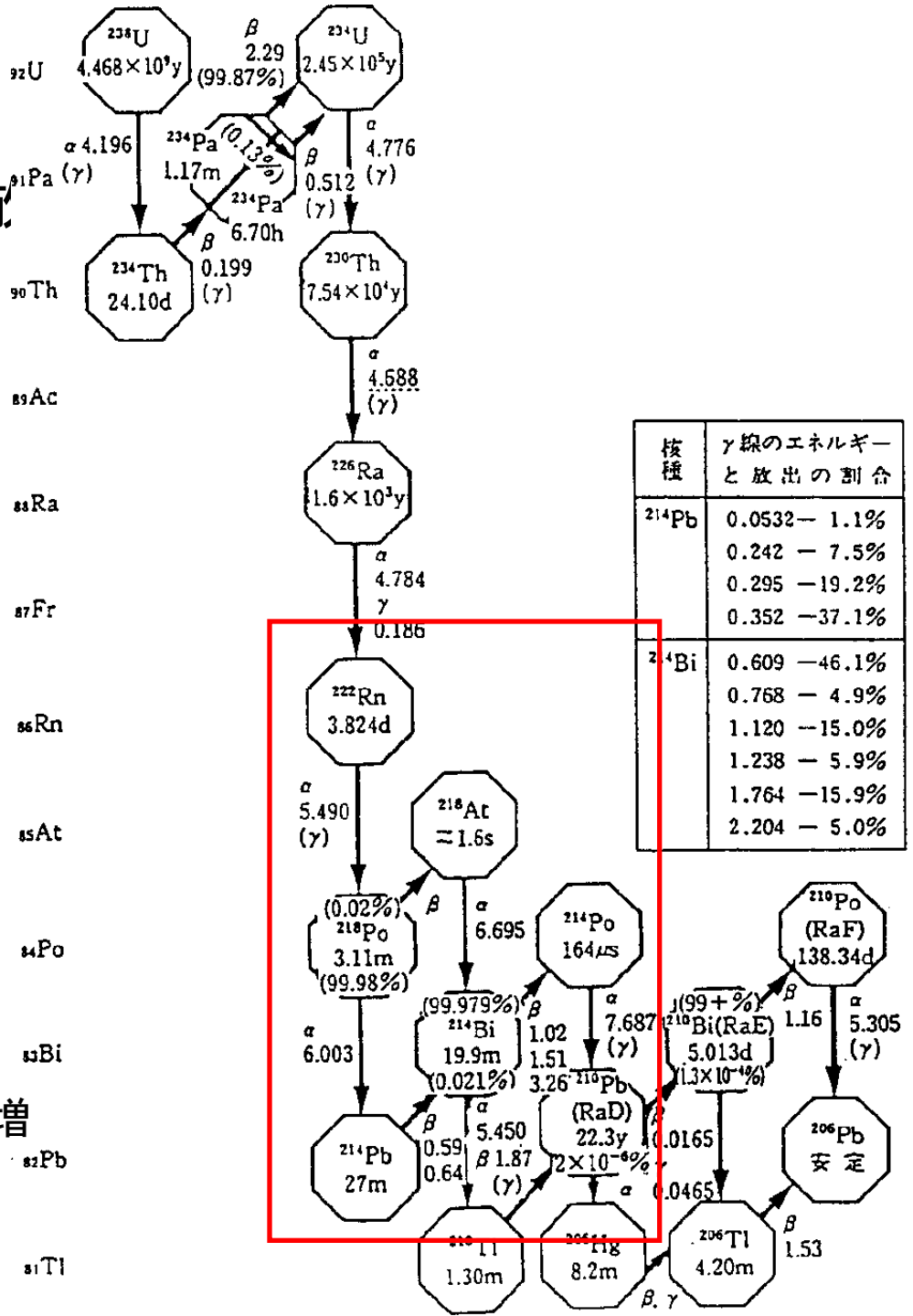
# 3. 環境放

## 空気中$^{214}$Bi測定

- $^{90}$Sr測定におけるバックグラウンドが環境中$^{214}$Biと$^{208}$Tlからのγ線
- 1.5 MeV以上のγ線のコンプトン散乱
- 反跳電子のエネルギーは1.31 MeV以上

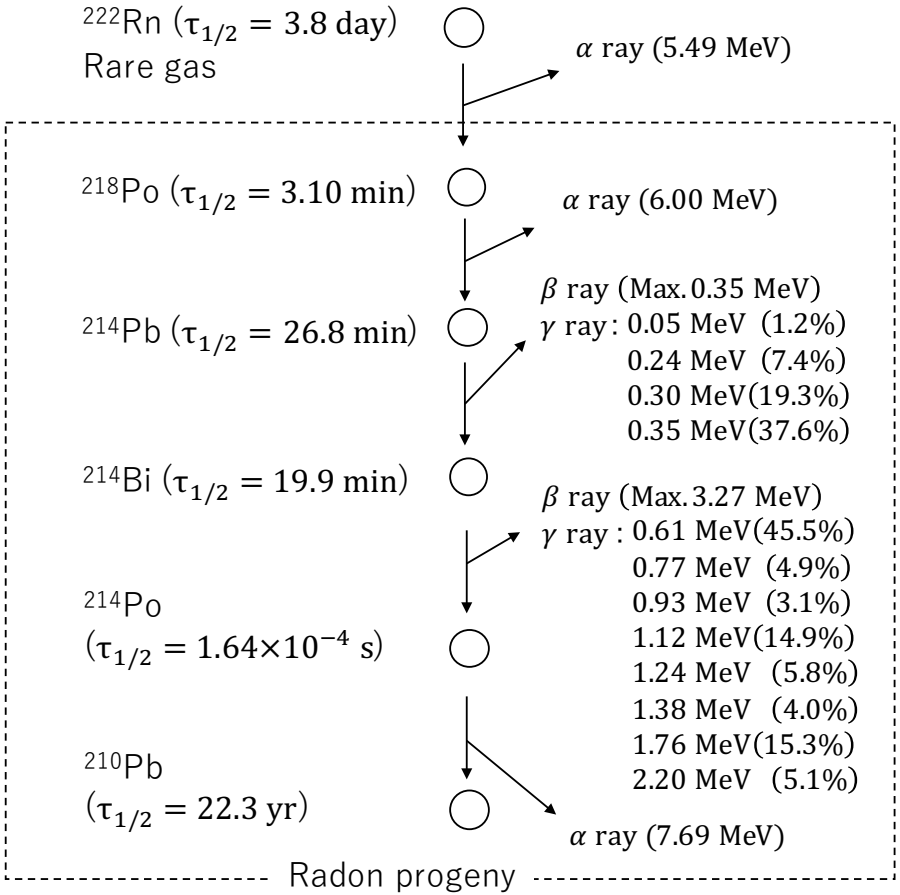
- ラドンは空気中に存在
- 崩壊後Po, Pb, Biは地面にすぐ落ちる？
- 空気中にPo, Pb, Biが漂っているはず

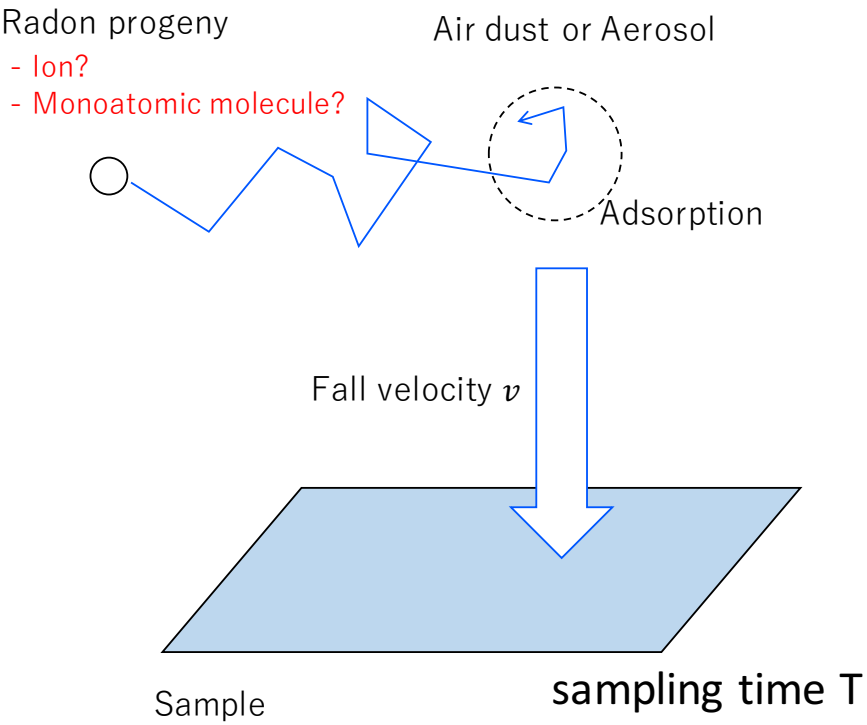
- ラドン吸入による被曝線量 1.1 mSv
- ラドンと肺がんの相関関係
- 100 Bq/m3上昇で非喫煙肺がん患者8%増
- 孫核の吸入が肺がんの関係しているかも？



# 3. 環境放射能測定

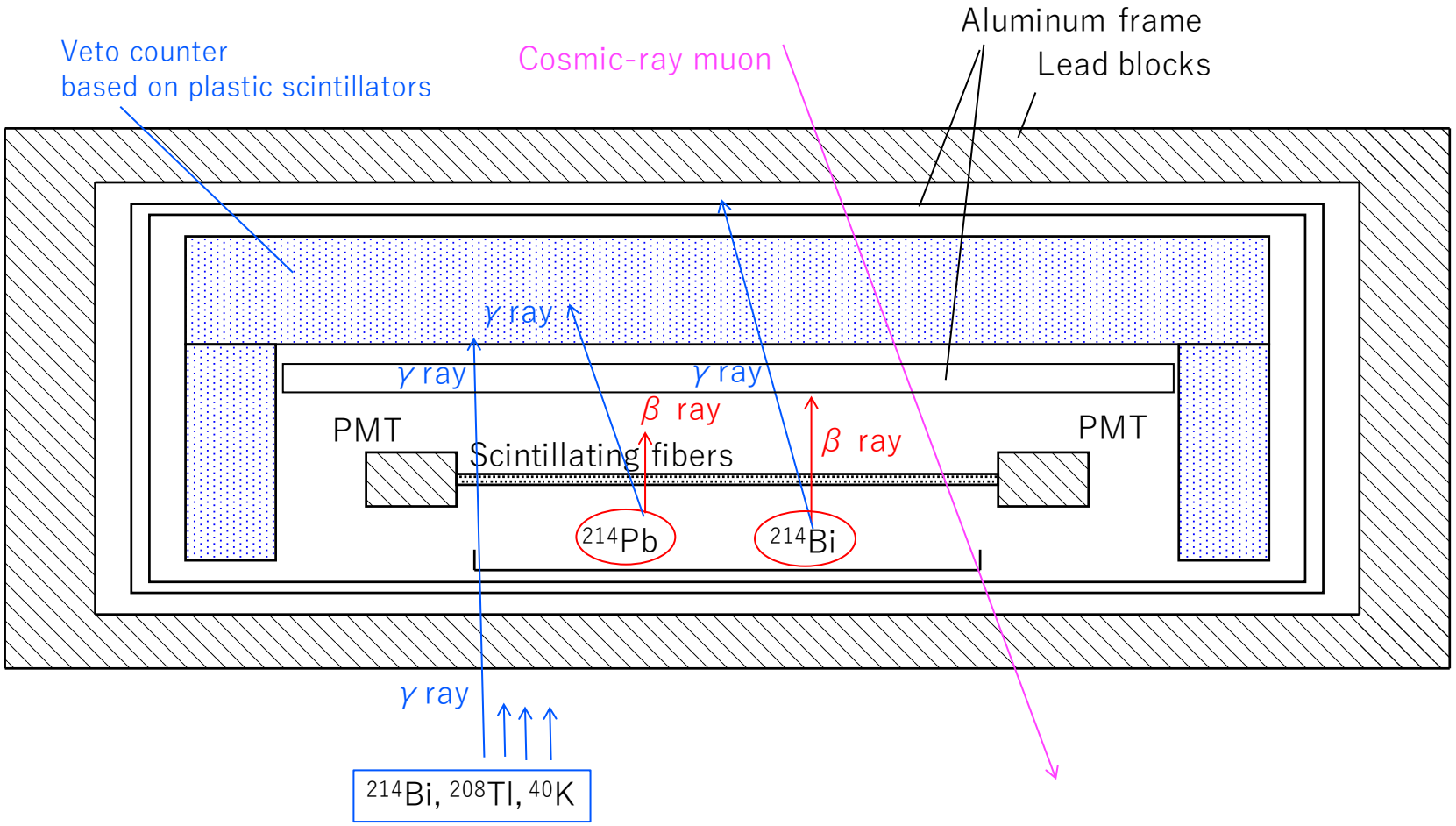
## サンプリングシート測定



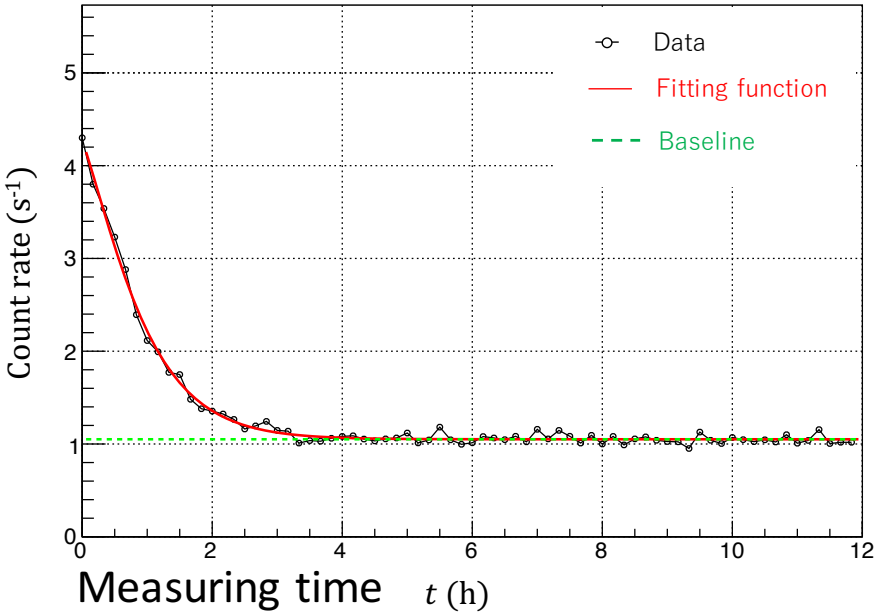




ラドン孫核はエアロゾルに吸着されて落下する.
吸着率はわかってない.
空気中に孫核が漂っている可能性がある.

# 3. 環境放射能測定


Veto counter
based on plastic scintillators
Cosmic-ray muon
Aluminum frame
Lead blocks
γ ray
γ ray
γ ray
β ray
β ray
PMT
PMT
Scintillating fibers
214Pb
214Bi
γ ray
214Bi, 208Tl, 40K

# 3. 環境放射能測定




j=1, 2, 3 is ($^{218}$Po, $^{214}$Pb, $^{214}$Bi)

kρ=1.15

| | |
|---|---|
| $\varepsilon_1^{\alpha} = 0.0001$ | $\lambda_1 = 7.76 \times 10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$ |
| $\varepsilon_2^{\beta} = 0.0591$ | $\lambda_2 = 8.97 \times 10^{-4}\ \mathrm{s}^{-1}$ |
| $\varepsilon_3^{\beta\gamma} = 0.2051$ | $\lambda_3 = 1.21 \times 10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}$ |
| $\varepsilon_{\mathrm{Sr}} = 0.3161$ | $\eta_{\mathrm{Sr}} = (8.89 \pm 0.04) \times 10^2\ \mathrm{Bq}^{-1}\ \mathrm{h}^{-1}$ |

$$f(t) = \left\{ A_1\, \varepsilon_1^{\alpha} + A_2\, \varepsilon_2^{\beta} + A_3\, \varepsilon_3^{\beta\gamma} \right\} \frac{\eta_{\mathrm{Sr}} k_{\rho}}{2\varepsilon_{\mathrm{Sr}}} + R_{BG},$$

$$\begin{cases} A_1(t) = -\dfrac{dN_1(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) \\ A_2(t) = -\dfrac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_1 N_1(t) \\ A_3(t) = -\dfrac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_3 N_3(t) - \lambda_2 N_2(t), \end{cases}$$

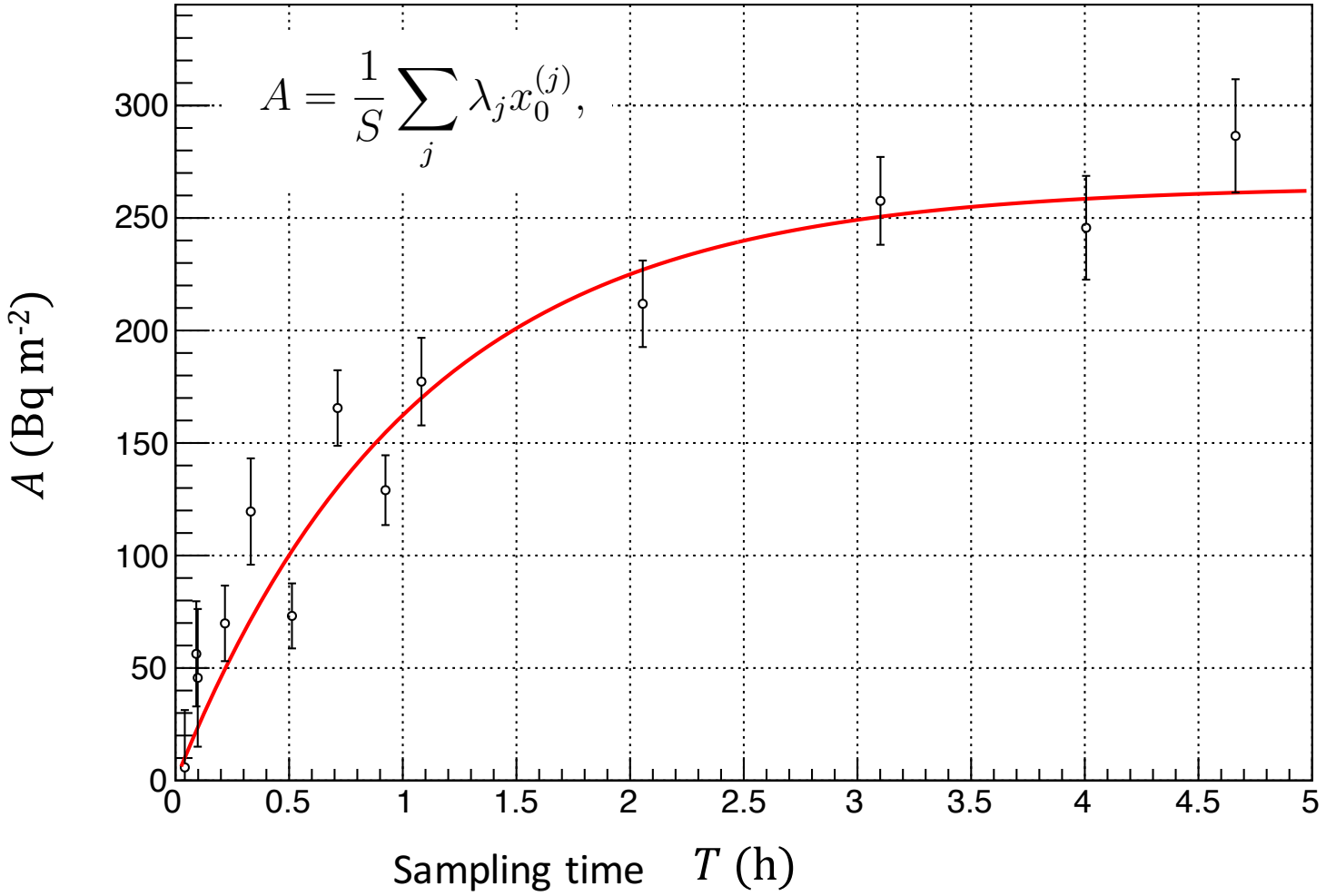
$$A_1 = \lambda_1 x_0^{(1)} e^{-\lambda_1 t},$$

$$A_2 = \frac{\lambda_1 x_0^{(1)}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left\{ \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \right\} + \lambda_2 x_0^{(2)} e^{-\lambda_2 t},$$

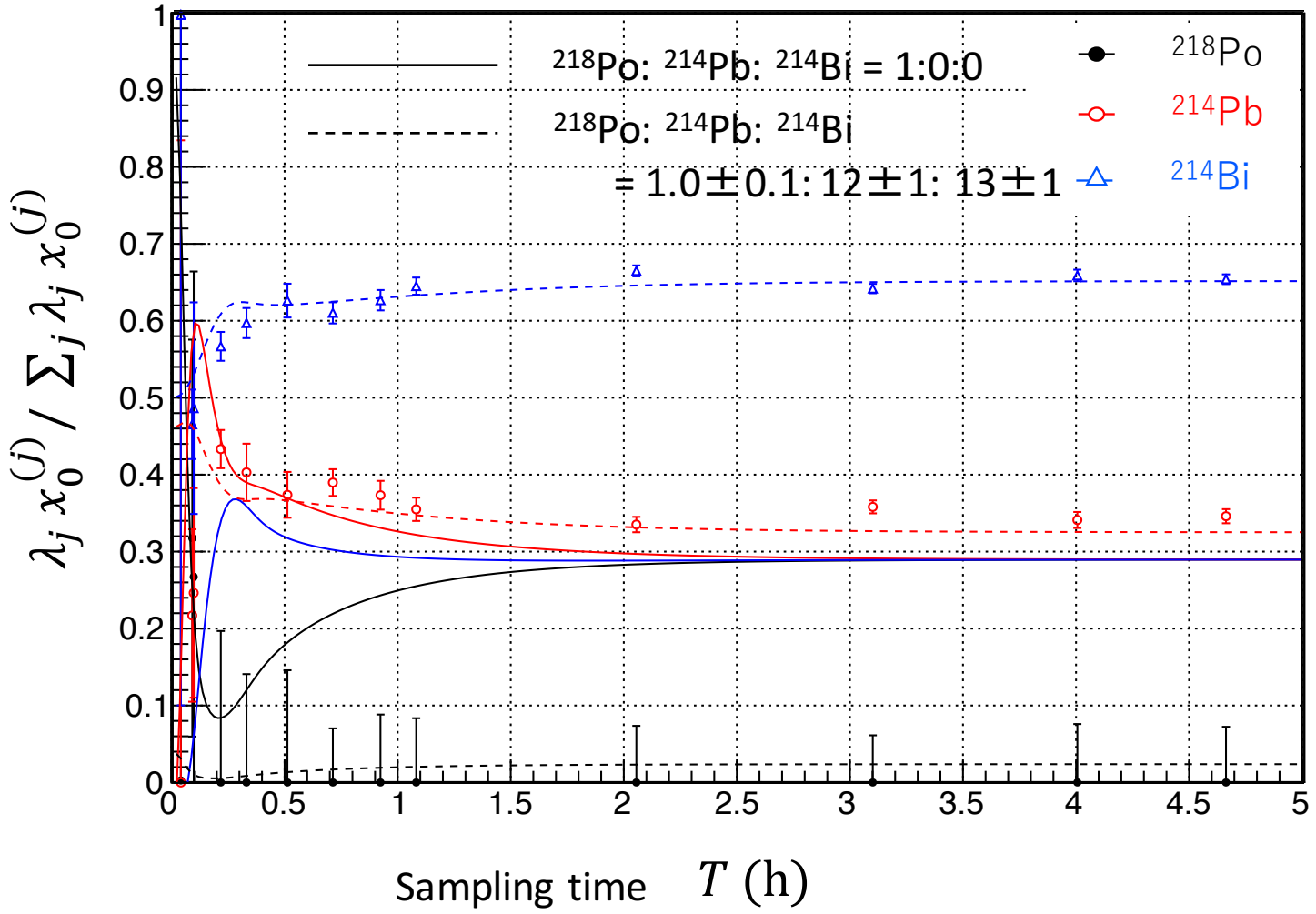
$$A_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 x_0^{(1)}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \left\{ \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_3 e^{-\lambda_3 t} \right\} + \frac{\lambda_2 x_0^{(2)}}{\lambda_3 - \lambda_2} \left\{ \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_3 e^{-\lambda_3 t} \right\} + \lambda_3 x_0^{(3)} e^{-\lambda_3 t}.$$

$x_0^{(j)}$ … t=0 sでサンプルに付着していた核種の数
フィットのFree Parameters

# 3. 環境放射能測定


$A = \frac{1}{S}\sum_j \lambda_j x_0^{(j)}$,
A (Bq m-2)
Sampling time T (h)
0
50
100
150
200
250
300
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

# 3. 環境放射能測定


$^{218}$Po: $^{214}$Pb: $^{214}$Bi = 1:0:0
$^{218}$Po: $^{214}$Pb: $^{214}$Bi
= 1.0±0.1: 12±1: 13±1
$^{218}$Po
$^{214}$Pb
$^{214}$Bi
$\lambda_j x_0^{(j)} / \sum_j \lambda_j x_0^{(j)}$
Sampling time $T$ (h)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

# 3. 環境放射能測定

まとめ

- 福島県沖漁業復興のためのストロンチウム90カウンターを閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器を基にして開発した。
- 波長変換ファイバーを用いて有効面積を拡張して、海産物において検出限界は46 Bq/kgと評価された.
- 実際に90Srをサンプリングするための研究が始まった.
- 背景雑音を調べると空気中214Biについて気になりだした。
- サンプルシート測定法はエアロゾルに吸着されたラドン孫核を自然落下で捕集し、β線で観測する。
- この実験で空気中に孫核Po，Pb，Biは漂っていることを明らかにした。
- エアロゾルにおける孫核の吸着率測定のための実験計画中.