

# 注型成形プラスチックシンチレータと波長変換 ファイバーを使った飛跡検出器の開発

修士論文発表会  
素粒子実験（加速器）  
駒場はるか

# 目次

## ・背景

- ・ニュートリノのCP対称性破れの探索
- ・ハイパーカミオカンデ実験および前置検出器の課題

## ・注型成形プラスチックシンチレータの製作

- ・注型成形プラスチックシンチレータ
- ・波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング
- ・シンチレータの製作
- ・宇宙線ミュオンの観測による性能評価

## ・まとめ

# ニュートリノの未解決問題

- ・ 質量の絶対値
- ・ 質量順序は順階層か逆階層か
- ・ マヨラナ粒子かディラック粒子か
- ・ (レプトンの) CP対称性は破れているか (Sakharovの3条件のうちの1つ)

- ・ ニュートリノ振動でCP対称性の破れを探索
- ・ ニュートリノと反ニュートリノで振動確率が異なる  
 → CP対称性が破れている証拠

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	

# 長基線ニュートリノ振動実験

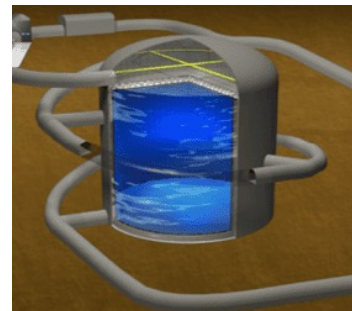
## T2K実験

- ・ニュートリノと反ニュートリノにおける振動の違いを測定し、レプトンのCP対称性の破れを調査
- ・J-PARCからのニュートリノビームを、前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデで観測
- ・前置検出器ND280では振動前のニュートリノビームを測定し、フラックスや反応断面積を制限



## ハイパーカミオカンデ

- ・2027年に稼働開始予定の次世代大型水チェレンコフ検出器
- ・有効体積はスーパーカミオカンデの **8.4 倍**
- ・統計量が劇的に増えるので、系統誤差の削減がより重要
- ・前置検出器によるさらに高精度の測定が必要



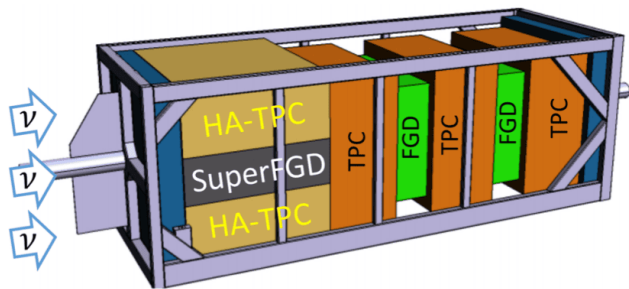
# 前置検出器

## ND280検出器

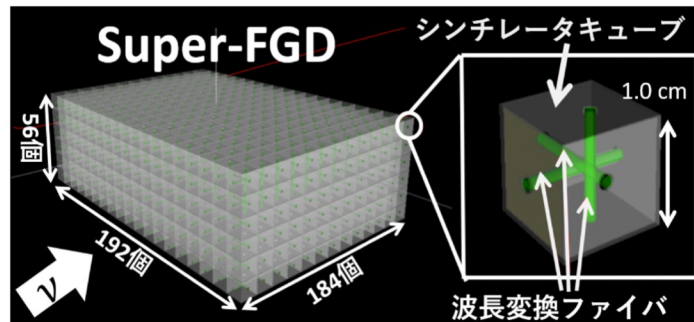
- ・ 振動前のニュートリノを精密測定
- ・ 2023年にアップグレードされ、Super-FGDが導入された
- ・ ハイパーカミオカンデ実験に向けてアップグレードを計画中

## Super-FGD

- ・ ニュートリノの標的兼飛跡検出器
- ・ 1cm立法のプラスチックシンチレータキューブ約200万個
- ・ キューブは白色の反射層に覆われている
- ・ 各キューブ3方向に波長変換ファイバーを通して



▲ ND280 の概念図

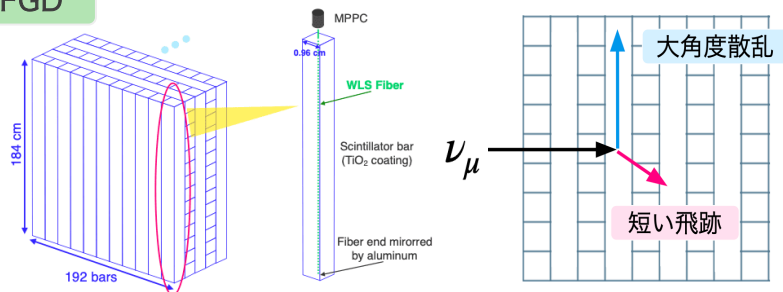


▲ Super-FGD の概念図

# 前置検出器の更なるアップグレード

- ・ハイパーカミオカンデ実験に向けて前置検出器はアイデアを出し合っている段階
- ・FGD の代わりに Super-FGD のように高い性能を持つ検出器で置き換えることが検討されている

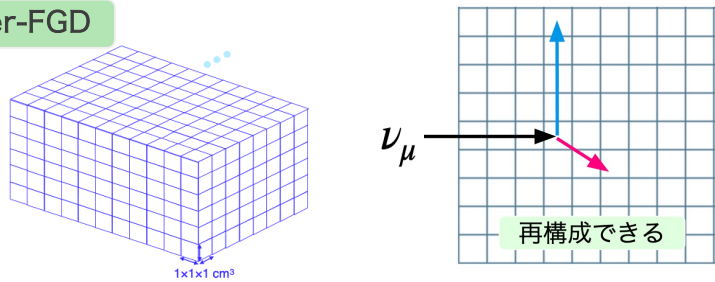
## FGD



- ・棒状のシンチレータバーで構成

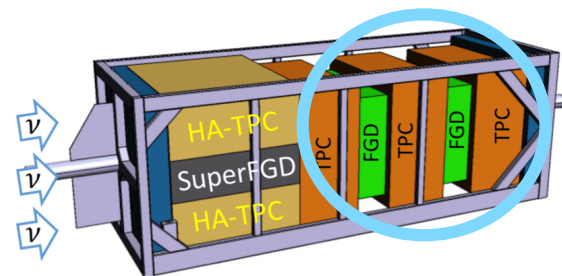
・短い飛跡、大角度散乱  
の検出効率が低い

## Super-FGD



- ・立方体上に積み重ねられた構成

・短い飛跡、大角度散乱  
の粒子に対する感度が  
高い



▲ ND280

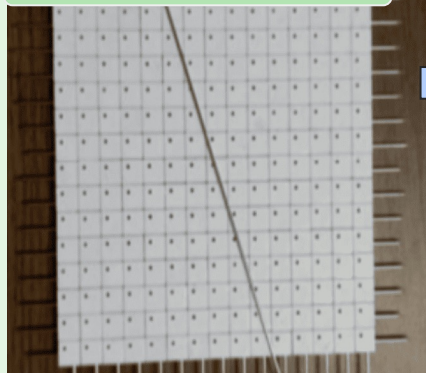
# 開発コンセプト

ハイパーカミオカンデ実験に向けたアップグレード案

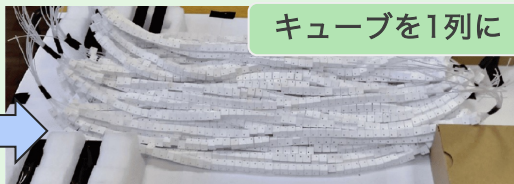
- ・ Super-FGDの体積拡張が候補案の1つ
- ・ 従来の方法では、約200万個のキューブを組み立ててファイバーを通す作業が大変
- ・ 体積拡張のためには、検出器の組み立て作業効率化は必須

➡ 注型成形プラスチックシンチレータを使うことで作業効率化を図る

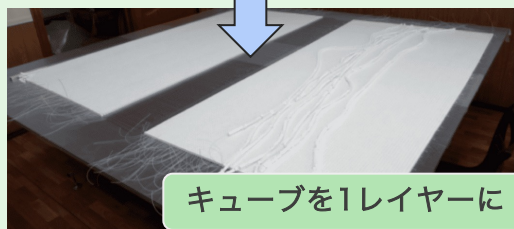
キューブの品質チェック



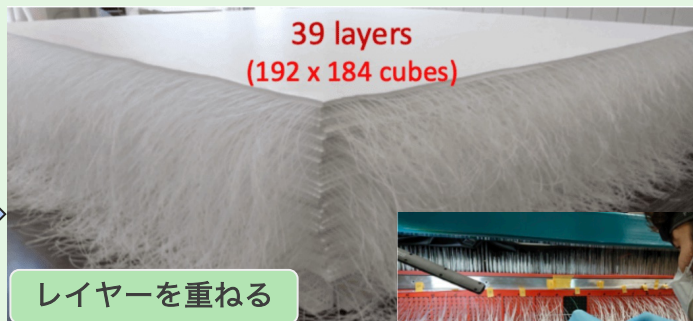
キューブを1列に



キューブを1レイヤーに



39 layers  
(192 x 184 cubes)



レイヤーを重ねる

ファイバーに入れ替える



# 目次

- ・ 背景
  - ・ ニュートリノのCP対称性破れの探索
  - ・ ハイパーカミオカンデ実験および前置検出器の課題
- ・ **注型成形プラスチックシンチレータの製作**
  - ・ 注型成形プラスチックシンチレータ
  - ・ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング
  - ・ シンチレータの製作
  - ・ 宇宙線ミュオンの観測による性能評価
- ・ まとめ

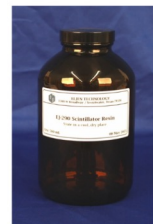


# シンチレータの製作方法

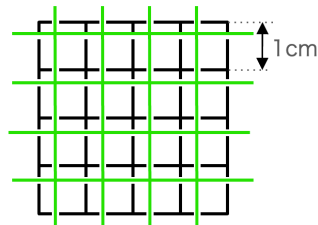
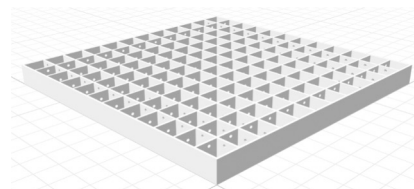
## 【注型成形プラスチックシンチレータ】

- ・ レジン、触媒、溶媒を混ぜ合わせて型に流し込む
- ・ 47°Cの水槽で2週間、80°Cで8時間**温めると硬化**
- ・ 硬化後は**固体プラスチックシンチレータと同様の性質を示す**

CASTING RESIN  
EJ-290



- ・ 3Dプリンタで 1cm立法ごとに区分けされた型を作成
- ・ 白色のフィラメントを使用したかったが、廃盤のため**半透明**を使用
- ・ そこに注型成形プラスチックシンチレータを流し込んで  
1レイヤー分製作
- ・ 波長変換ファイバーは2方向に通す



※最終的には、もっと大きなブロックを組み合わせて大きな検出器にすることを想定

# シンチレータの製作方法

波長変換ファイバーを 先に入れる方法/後から入れる方法 の2通りを試みた

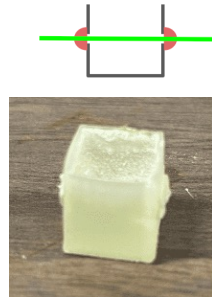
## ファイバーを先に入れる方法

波長変換ファイバーを保護する必要がある

→ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング

skip

キューブ組み立て、  
ファイバー入れ替え



波長変換ファイバーは  
固まる前の EJ-290  
に溶けてしまう

## ファイバーを後から入れる方法

- ・ チューブを通した状態でシンチレータを硬化
- ・ チューブを抜いて開いた穴にファイバーを差し込む

skip

キューブ組み立て



型に穴を開けておき、  
チューブを通す



シンチレータを流し  
込んで、固める



チューブを抜き取る



空いている穴にファイ  
バーを差し込む

# 目次

- ・ 背景
  - ・ ニュートリノのCP対称性破れの探索
  - ・ ハイパーカミオカンデ実験および前置検出器の課題
- ・ **注型成形プラスチックシンチレータの製作**
  - ・ 注型成形プラスチックシンチレータ
  - ・ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング
  - ・ シンチレータの製作
  - ・ 宇宙線ミュオンを観測による性能評価
- ・ まとめ

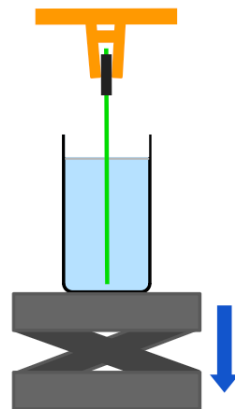
目的 波長変換ファイバーを注型成形プラスチックシンチレータから保護する

- ・ 必要条件： 1. 波長変換ファイバーの性能に悪影響を与えない  
2. コーティングした波長変換ファイバーが EJ-290 に対して不溶

## CYTOP

- ・ 特殊な構造を有するフッ素樹脂
- ・  $1\mu\text{m}$  以下の薄膜コーティングが可能（膜厚を厚くするために複数回塗りが可能）
- ・ 極めて高い透明性を実現
- ・ 多くの溶剤に不溶
- ・ 低屈折率性、電気絶縁性、撥水・撥油性、対薬品性などの特性を有する

- ・ 膜厚やキュアー条件を変えながら、適切なコーティング条件を探る



▲手動でディップコーティングを行った

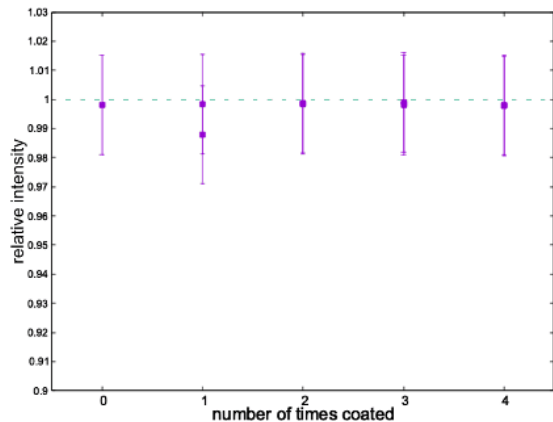
# コーティング前後の光量測定

ファイバーを先に  
入れる方法

13

## 【コーティングしたファイバーの光量測定】

- ・コーティング回数 0, 1, 2, 3, 4 回のファイバーを用意
- ・コーティング前後で LED 光を当てた時の光量を測定



▲コーティング前後の相対光量

- 結果
- ・コーティング回数に関わらず光量損失率は 0.7% 以下
  - ・誤差の範囲内で無損失である

$$\text{光量損失率} = \frac{A - B}{A} = 1 - \frac{B}{A}$$

A: コーティング前の測定値  
B: コーティング後の測定値

コーティング回数	光量損失率 (%)
0	0.2 ± 1.8
1	0.7 ± 1.8
2	0.1 ± 1.8
3	0.1 ± 1.8
4	0.2 ± 1.8

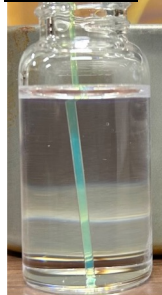
# コーティングの効果

ファイバーを先に  
入れる方法

14

- 結果**
- ・コーティングしていない場合と比べればダメージは軽減されている
  - ・コーティング回数, キュア条件に依らず波長変換ファイバーはダメージを受けてしまった

シンチレータ  
を温める前



コーティングなし



コーティング1回



コーティング4回



コーティング3回+キュアー



- 原因の考察**
- ・シランカップリング剤併用で金属・ガラスにコーティング可能
  - ・専用プライマー併用でプラスチックにコーティング可能
  - ・波長変換ファイバーが傷つくことを懸念し前処理を施さなかった
- 前処理を施さなかったことで、密着性が低かったことが原因だと考えられる



ファイバーを後から入れる方法で検出器を作る

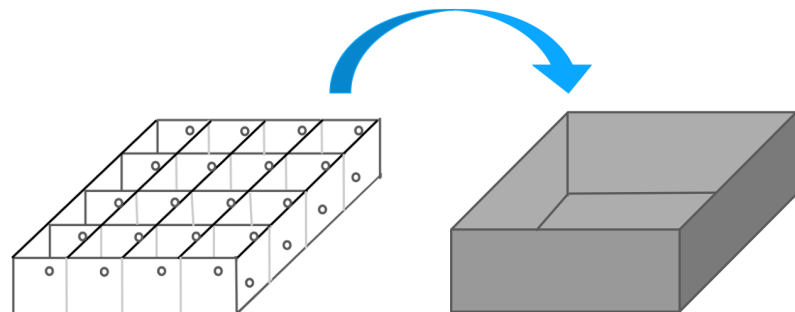
# 目次

- ・ 背景
  - ・ ニュートリノのCP対称性破れの探索
  - ・ ハイパーカミオカンデ実験および前置検出器の課題
- ・ **注型成形プラスチックシンチレータの製作**
  - ・ 注型成形プラスチックシンチレータ
  - ・ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング
  - ・ シンチレータの製作
  - ・ 宇宙線ミュオンの観測による性能評価
- ・ まとめ

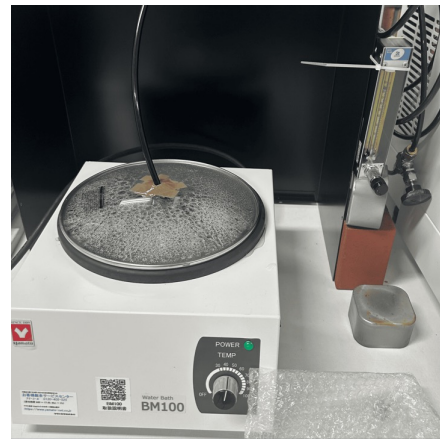
ファイバーを後から入れる方法でシンチレータを製作

### 【シンチレータ製作の流れ】

- ・ 3Dプリンタでポリアミドの格子型を作成
- ・ 格子型にチューブを通して容器に入れる
- ・ シンチレータを格子型に流し込む
- ・ 恒温水槽で温める
- ・ 固まったシンチレータを取り出す
- ・ チューブをファイバーと入れ替える



3Dプリンタで作成した格子型





# シンチレータの製作

ファイバーを後から入れる方法

17

## 【チューブの選定】

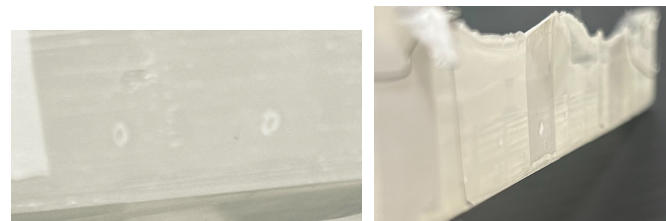
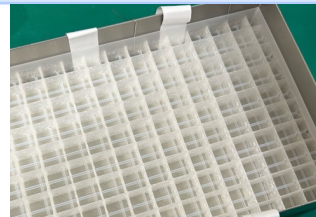
- ・ PTFEチューブ、ステンレス棒を使って試験
- ステンレス棒はシンチレータが固まった後に引き抜けなかった

PTFEチューブ 1.18mmφ が適切

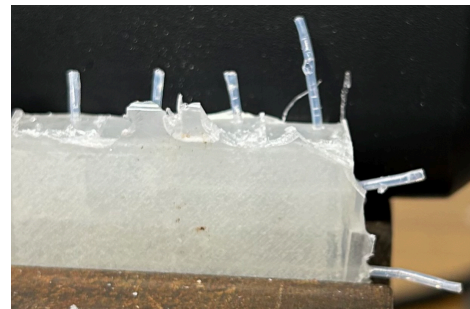
## 【チューブの引き抜き】

- ・ チューブの端が埋まってしまう

格子型の外にブロックを設置してチューブの端を通す



▲シンチレータの側面にチューブが埋まっている



# シンチレータの製作

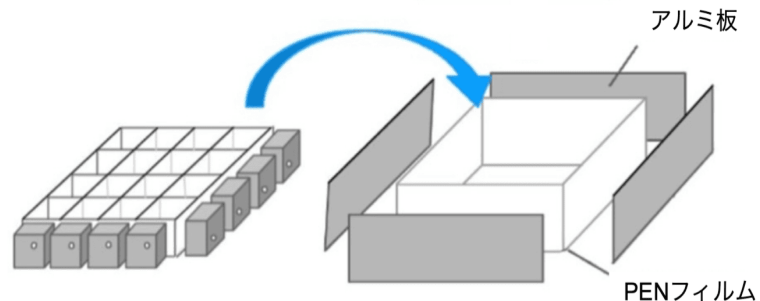
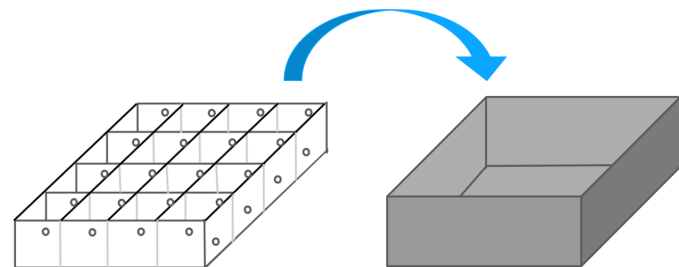
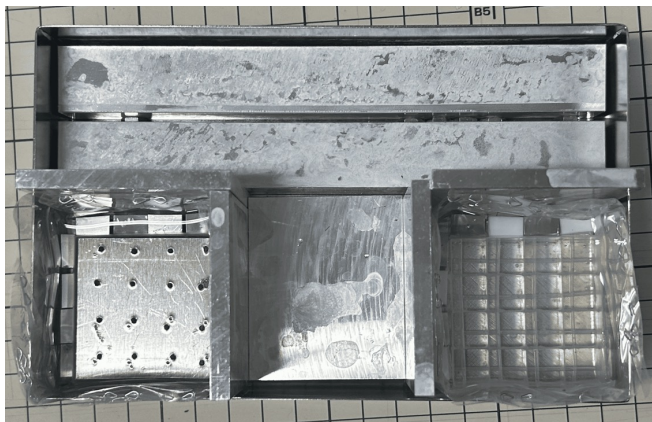
ファイバーを後から入れる方法

18

## 【鋳型からの取り出し】

- ・ポリアミドで製作した格子型では、シンチレータが底面から流出してしまう  
→ 格子型を容器に入れることで流出を防ぐ
- ・角形ではシンチレータの取り出しが困難

PENフィルムとアルミ板を使ったセットアップが適切



# シンチレータの製作

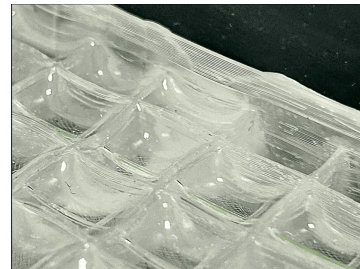
ファイバーを後から入れる方法

19

## 【シンチレータの収縮問題】

- ・ EJ-290 は固まる際に 20~30% の収縮が起きる
- ・ 量が少なかった場合各セルで中心が凹むように固まる

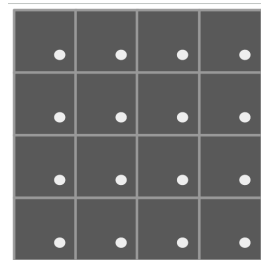
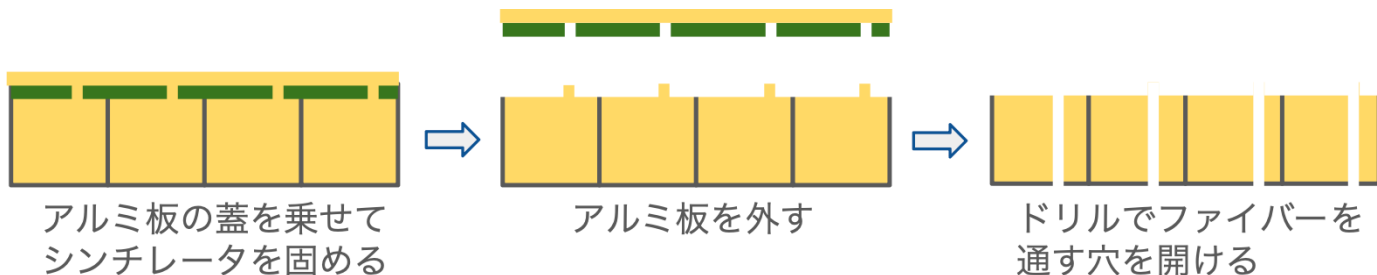
アルミ板の蓋を被せることで高さを調整できた



▲シンチレータが凹んで固まった様子

アルミ板には

- ・ シンチレータ流入用の穴を開けておく
- ・ 穴部分でシンチレータが飛び出るので除去する必要あり  
→ファイバーを鉛直方向に通す穴を開ける際に除去できる



アルミ板の蓋  
(上から見た図)

## 【シンチレータの脱泡】

- ・材料を混ぜ合わせる際/シンチレータを型に流し込む際に気泡が発生
- ・型に流し込む前と後の2回、真空引きを行った

## 真空引きによる問題

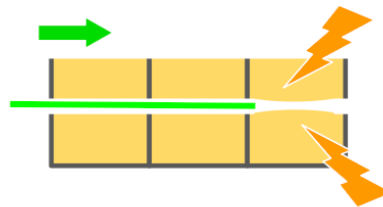
- ・アルミ板の蓋を乗せたセットアップでは、気泡を取り除くのに時間がかかる
- ・長時間真空引きをするとチューブが潰れることがある



一部分でチューブが潰れる

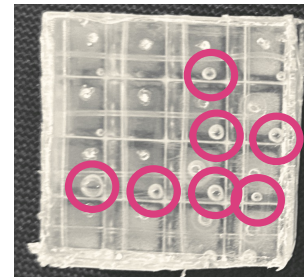
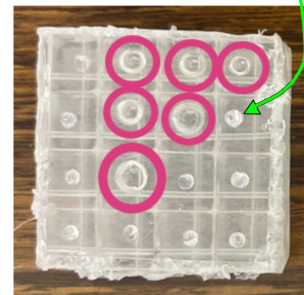


チューブを抜くと、  
穴が狭くなっている



ファイバーが差し込みにくい

これは飛び出し



▲アルミ板を乗せたセットアップでは気泡が残ってしまった

# シンチレータの製作

ファイバーを後から入れる方法

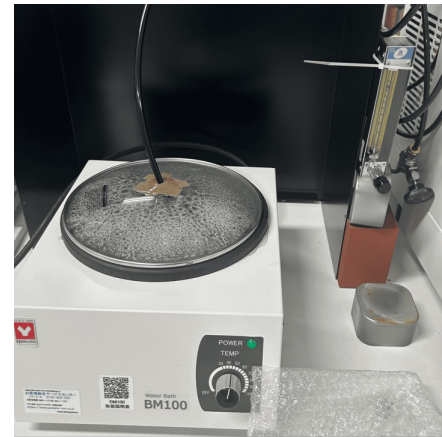
21

## 【Arガスの使用】

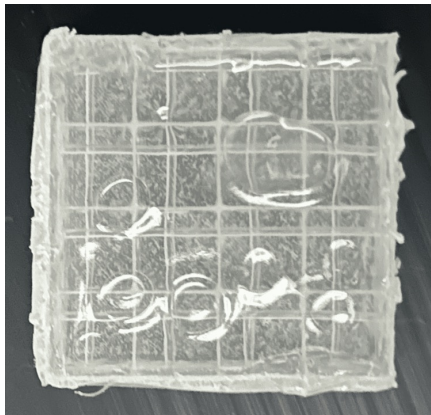
- ・ EJ-290 は不活性ガス中で固めることを推奨されている
- ・ 恒温水槽で温める際に Ar ガスを流した

## 【水滴の混入対策】

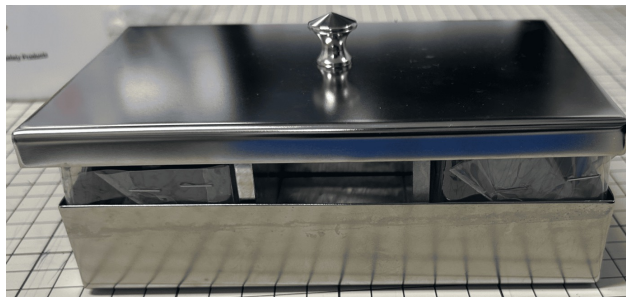
- ・ 恒温水槽で温める際に、シンチレータに水滴が落ちて混入した
- ・ 容器に蓋を被せることで混入を防いだ



▲ Ar ガスを流している様子



▲ 水滴が落ちてシンチレータの表面が凹んだ



▲ 水滴混入対策のために蓋を被せた

# 製作したシンチレータ

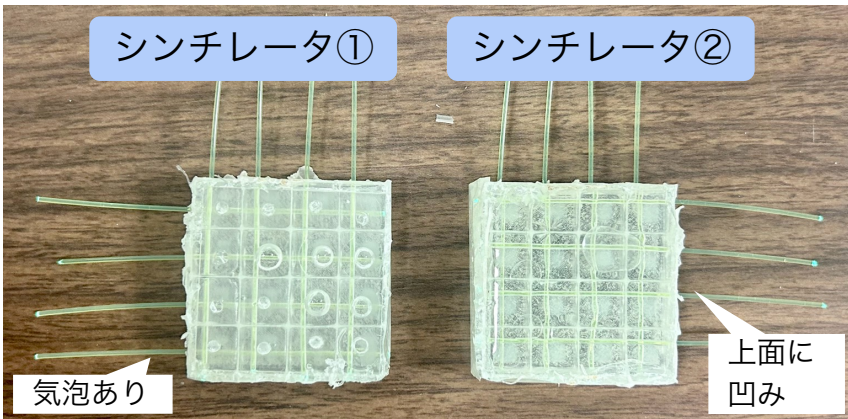
ファイバーを後から入れる方法

22

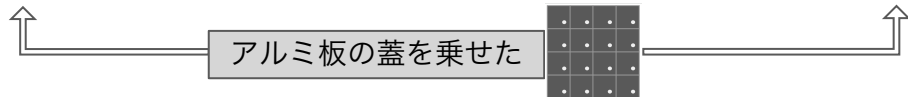
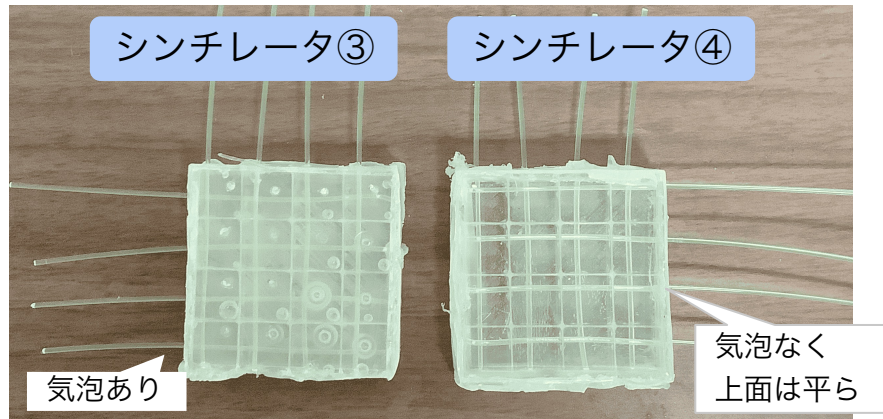
- ・ 4×4 キューブサイズのシンチレータを4つ製作した



水滴混入あり



水滴混入なし



- ・ 最も状態の良いシンチレータ④を性能評価に使う

# 目次

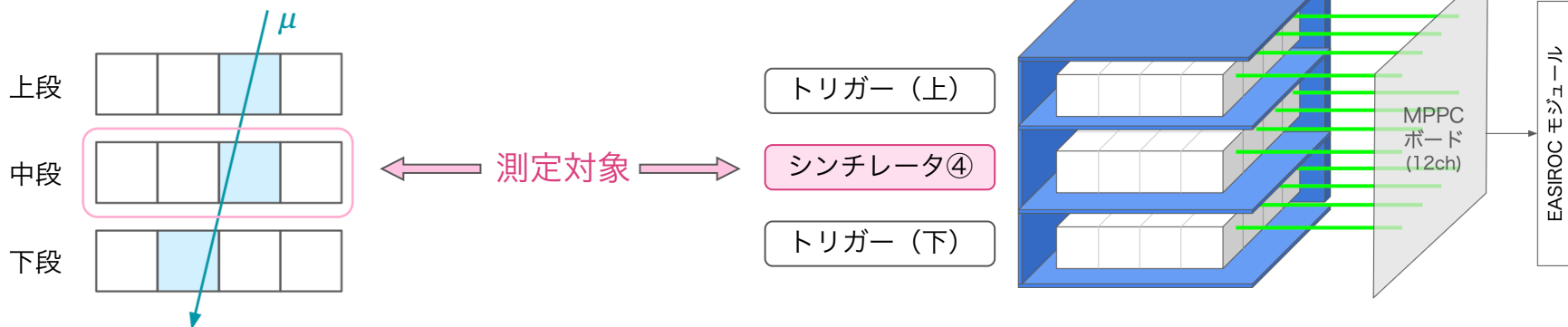
- ・ 背景
  - ・ ニュートリノのCP対称性破れの探索
  - ・ ハイパーカミオカンデ実験および前置検出器の課題
- ・ **注型成形プラスチックシンチレータの製作**
  - ・ 注型成形プラスチックシンチレータ
  - ・ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング
  - ・ 検出器の製作
  - ・ 宇宙線ミュオンの観測による性能評価
- ・ まとめ

# 製作したシンチレータの性能評価

## 宇宙線ミュオンの観測

### 【測定方法】

- ・それぞれファイバーを1方向に通す
- ・シンチレータ①と③で上下を挟む
- ・上段と下段が光った時に中段が光ったかを見る
- ・12チャンネルで約12時間測定



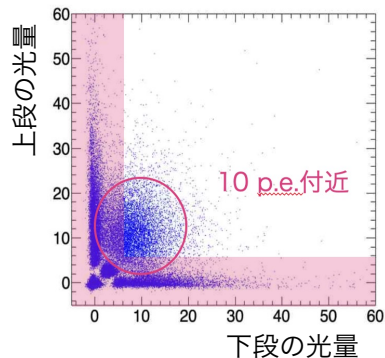


# 製作したシンチレータの性能評価

## 宇宙線ミュオンを観測

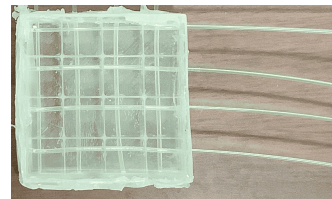
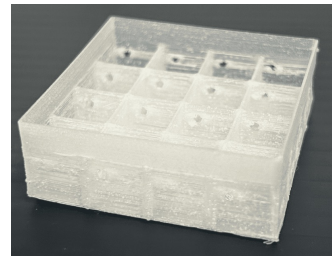
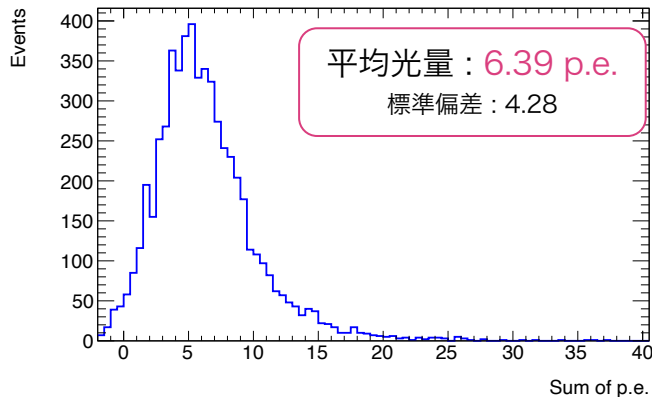
### 【測定結果】

上下のシンチレータの光量



6 p.e. 以上の  
イベントを選択

中段のシンチレータの二次元ヒストグラム



▲ 型が半透明で反射が不十分

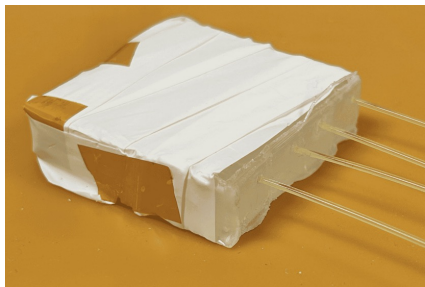
- ・ 上下のシンチレータが光っている時、中段のシンチレータも光っている
- ・ 光量が少ない → 光がシンチレータの外に逃げている可能性が高い

# 製作したシンチレータの性能評価

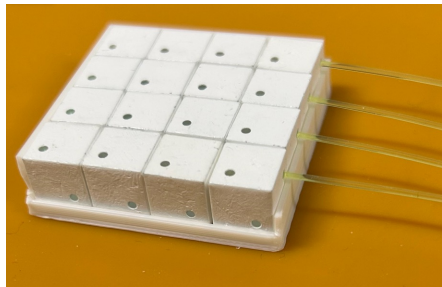
## 宇宙線ミュオンの観測

### 【測定方法】

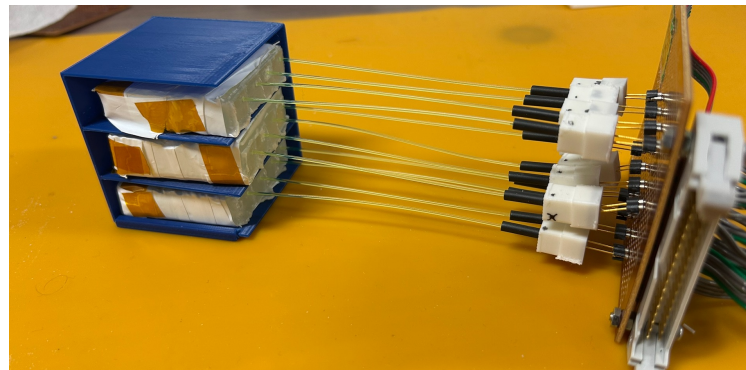
- ・シンチレータ5面に**白いテフロンテープ**を巻いて再測定
- ・比較用として Super-FGD キューブで測定



▲ テフロンテープを巻いたシンチレータ



▲ Super-FGDを4×4個並べた

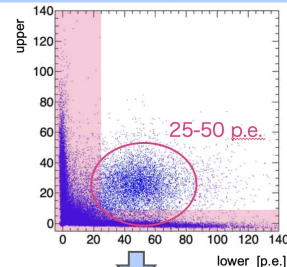
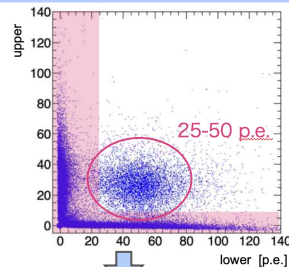


▲ 測定セットアップ  
上下のシンチレータにもテープを巻いた

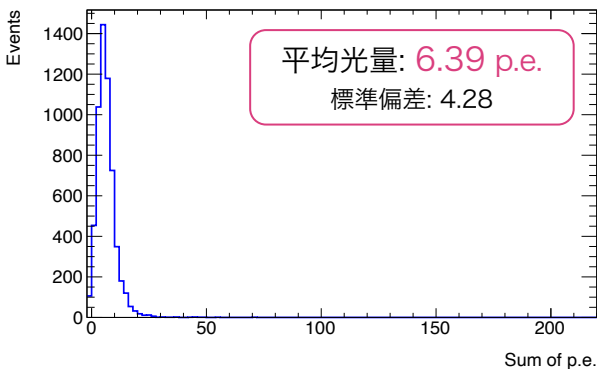
# 製作したシンチレータの性能評価

## 宇宙線ミュオンの観測

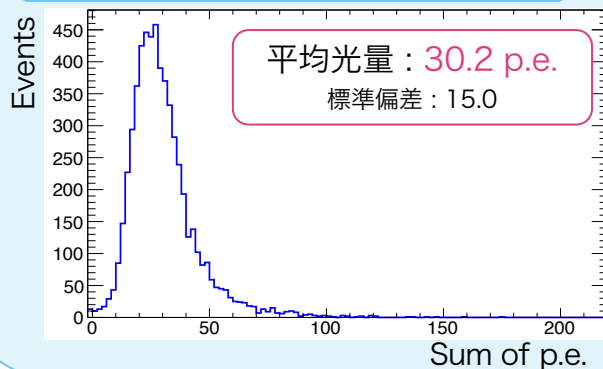
### 【測定結果】



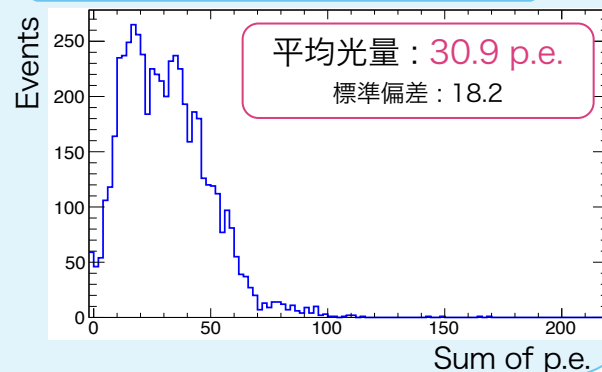
反射用テープなし



シンチレータ④ (反射用テープあり)



Super-FGDキューブ



- ・ 反射用テープを巻くことで光量は約**4.7倍**になった
- ・ 反射用テープを巻いた場合、Super-FGDと同程度の光量を達成

# まとめ

- ・ハイパーカミオカンデ実験に向けて前置検出器のアップグレードが検討されている
  - ・ Super-FGDの体積拡張を実現するためには、組み立て工数の削減は必須
- ・ファイバーを後から入れる方法で4×4キューブのシンチレータを4つ製作した
  - ・ 波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティングはうまくいかなかった
- ・ 宇宙線ミュオン測定による性能評価
  - ・ 反射用テープを巻くことで Super-FGD と同等の光量を達成
- ・ 今後の課題
  - ・ 白い格子型にし、各セルごとの測定
  - ・ 検出器の大型化に向けた製作方法の開発

