

Belle II実験用 粒子識別装置ARICHの 宇宙線事象の解析

首都大学東京 高エネルギー実験研究室

修士1年 為近彩智

目次

イントロダクション

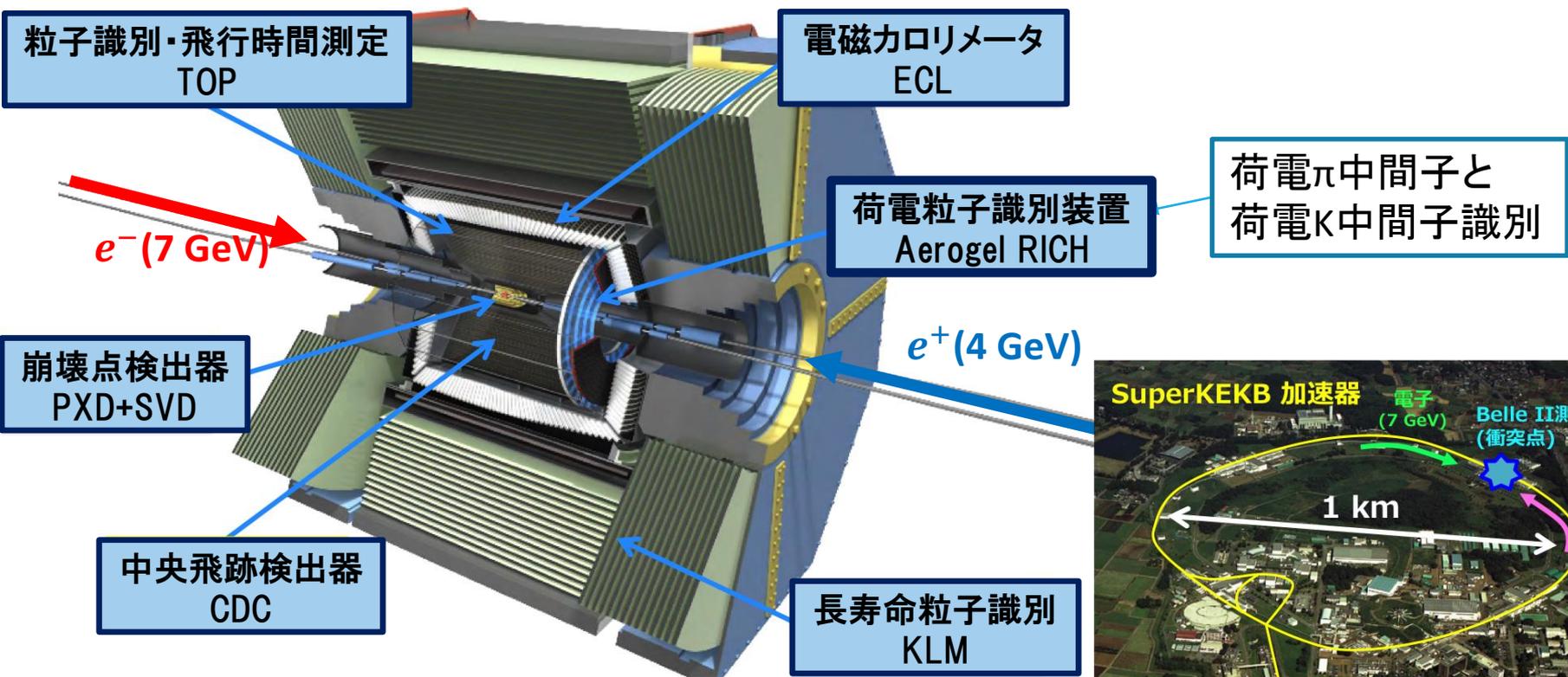
- Belle II実験
- ARICH検出器、光検出器HAPD

研究内容

- 研究の目的
- 解析の手順
- 使用したデータ
- 解析結果
- まとめ

Belle II実験

SuperKEKB加速器を用いて電子(7 GeV)と陽電子(4 GeV)を衝突させB中間子対を生成し、崩壊過程をBelle II検出器で大量に観測する実験。



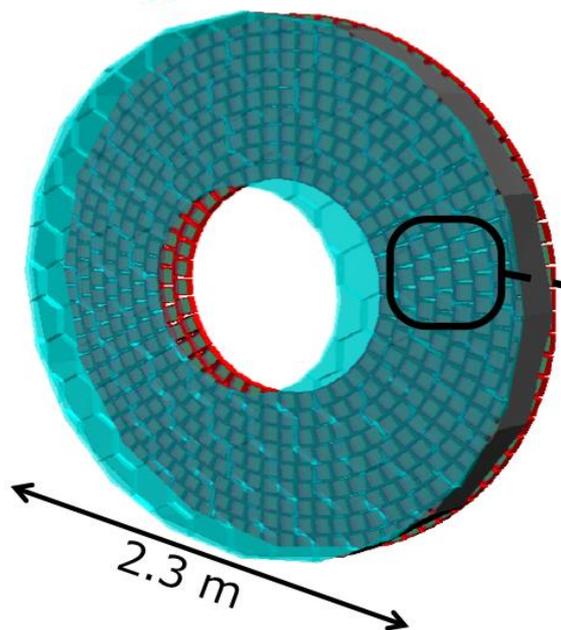
目的:
B中間子の崩壊過程に含まれるごく稀な事象を精密に調べ、標準模型を超える新しい物理を探索する。

ARICH検出器

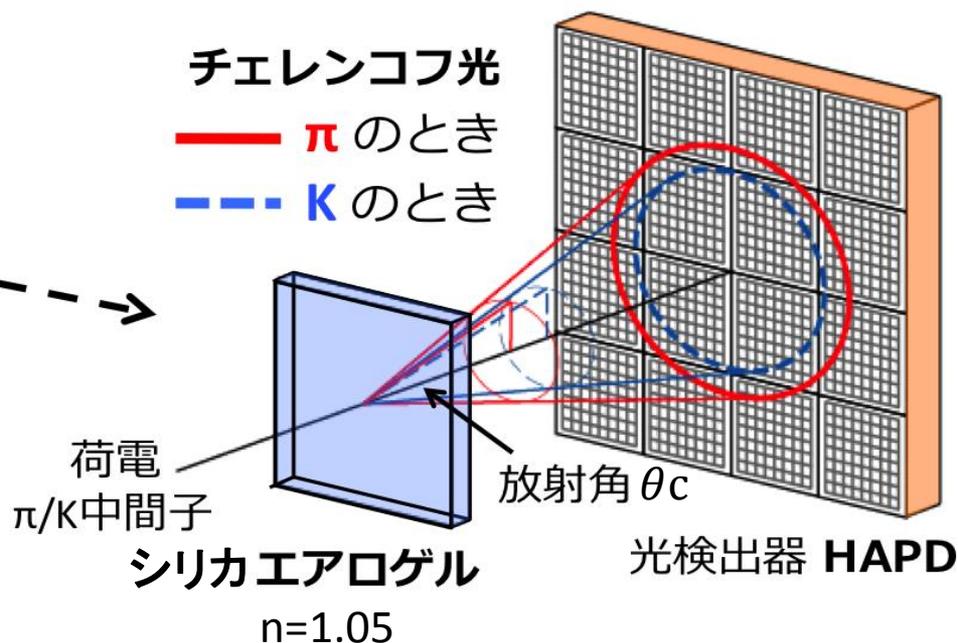
Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter

チェレンコフ光: 荷電粒子が物質中を運動する時、荷電粒子の速度がその物質中の光速よりも速い場合に放出される光。

Aerogel RICH検出器



識別原理 概念図



1. 荷電 π/K 中間子がシリカエアロゲルを通過
2. チェレンコフ光をリングイメージとして観測し、放射角を測定
3. 粒子を仮定した時に予測される放射角 (右の式)と比較。→粒子識別

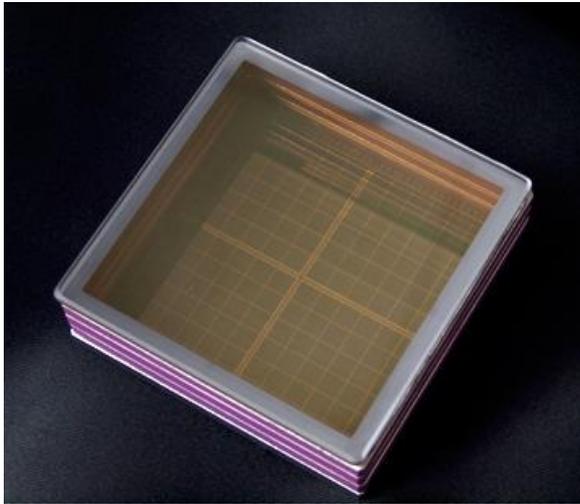
$$\cos \theta_c = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{p}$$

m : 粒子質量、 p : 運動量、 n : 屈折率、 θ_c : 放射角

HAPD

Hybrid Avalanche Photo Detector

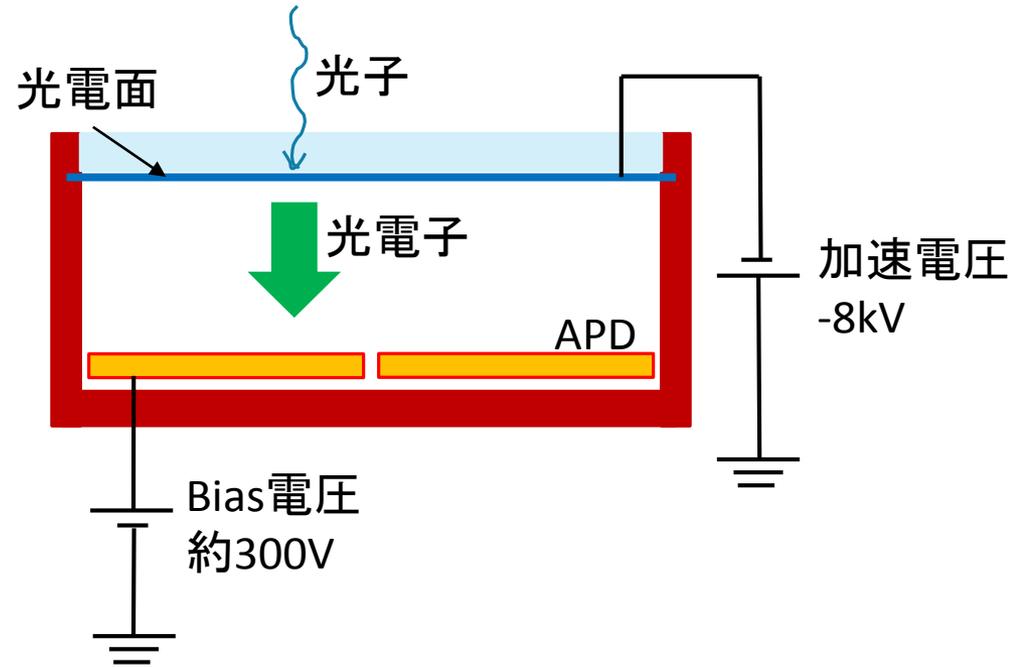
ARICHで用いる光検出器



サイズ: 73mm × 73mm

ピクセルサイズ: 4.9mm × 4.9mm

チャンネル数: 144ch



原理:

チェレンコフ光が光電面に入射し光電子が放出。
光電子に-8kVの電圧をかけAPDに衝突させる。
これによる電子打ち込み増幅は約1700倍。
APD内部で約300Vの電圧をかけ、
電子を約40倍に増幅させる。

ARICH検出器の現状

ARICH検出器の開発

現在

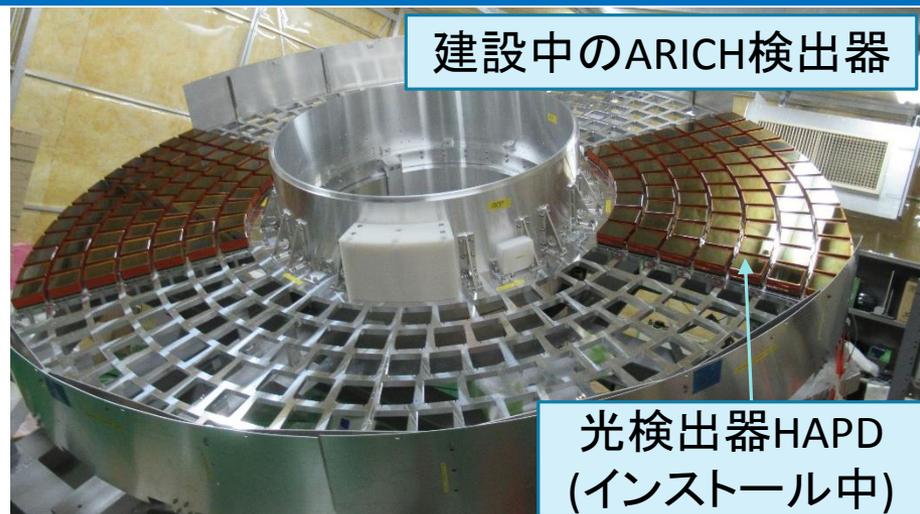
ARICH検出器の建設

- ・HAPDのインストール
- ・宇宙線を用いた性能確認
など

2017年秋

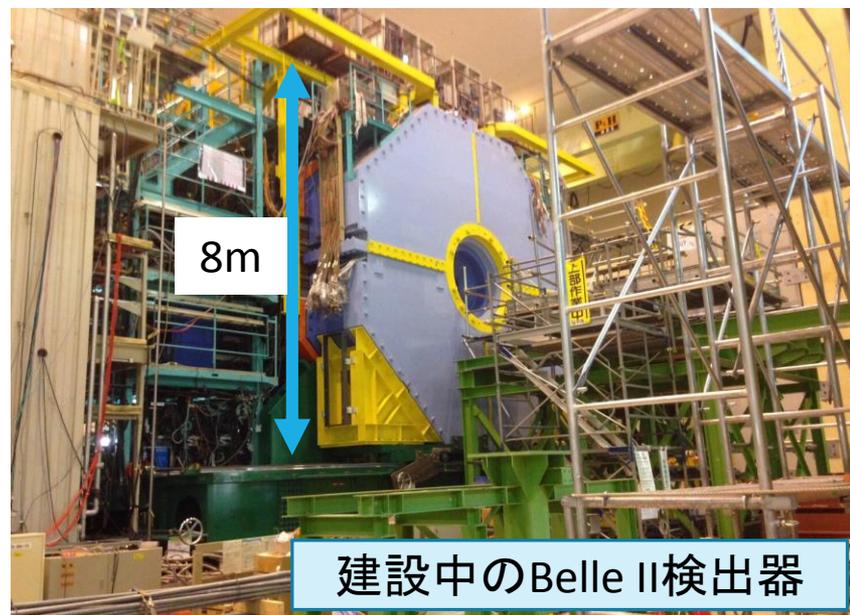
Belle II検出器へのインストール

実験開始



建設中のARICH検出器

光検出器HAPD
(インストール中)

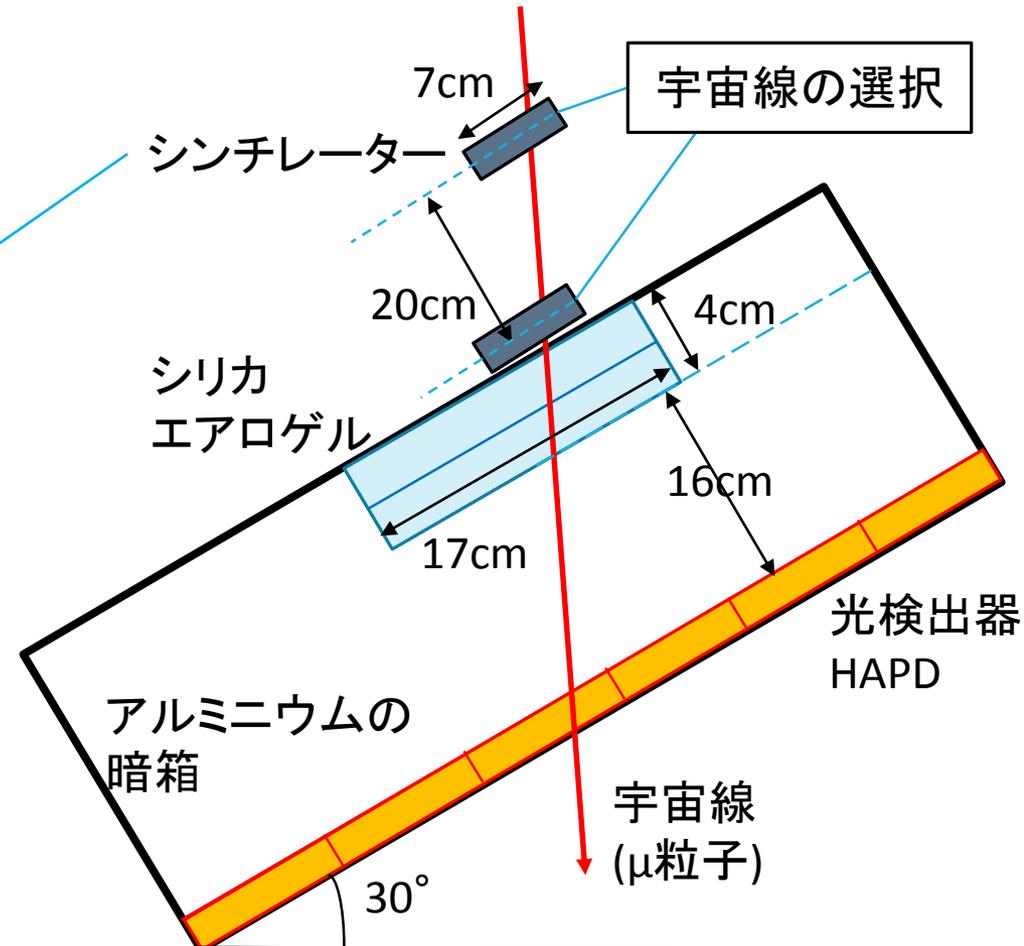
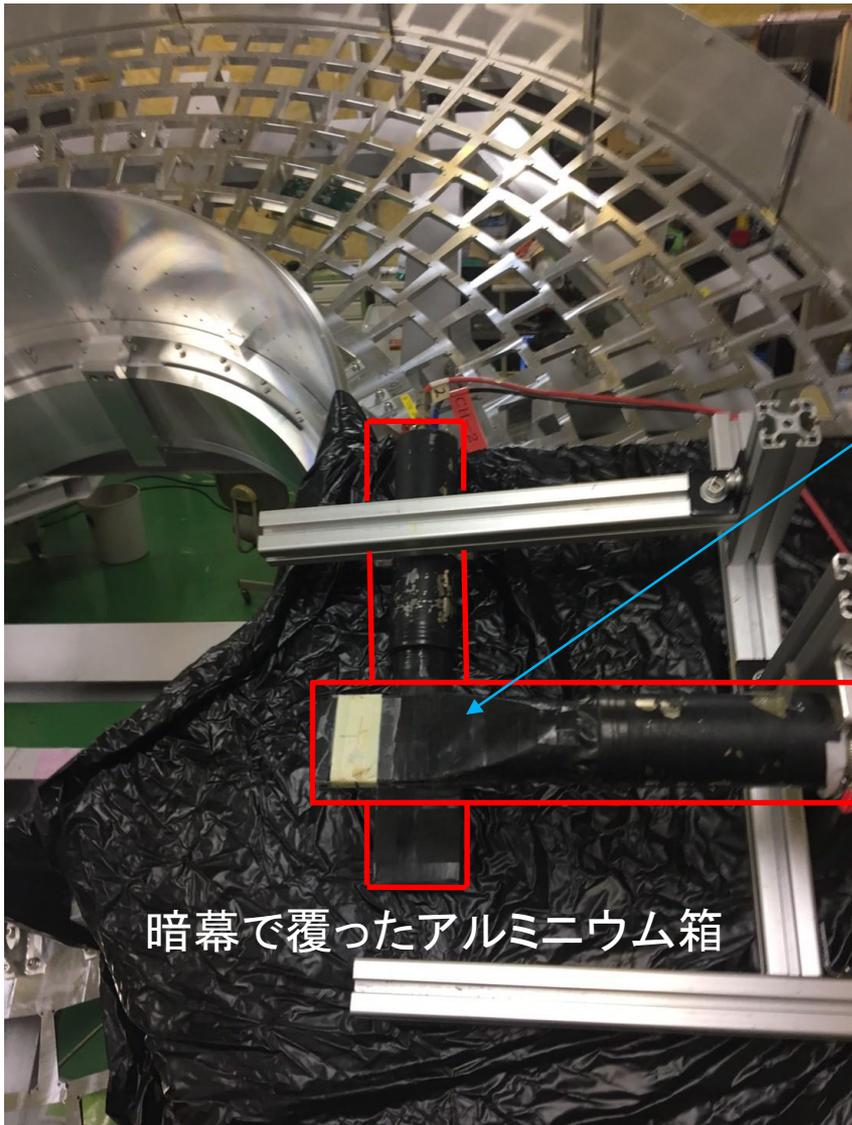


8m

建設中のBelle II検出器

ARICHの宇宙線試験

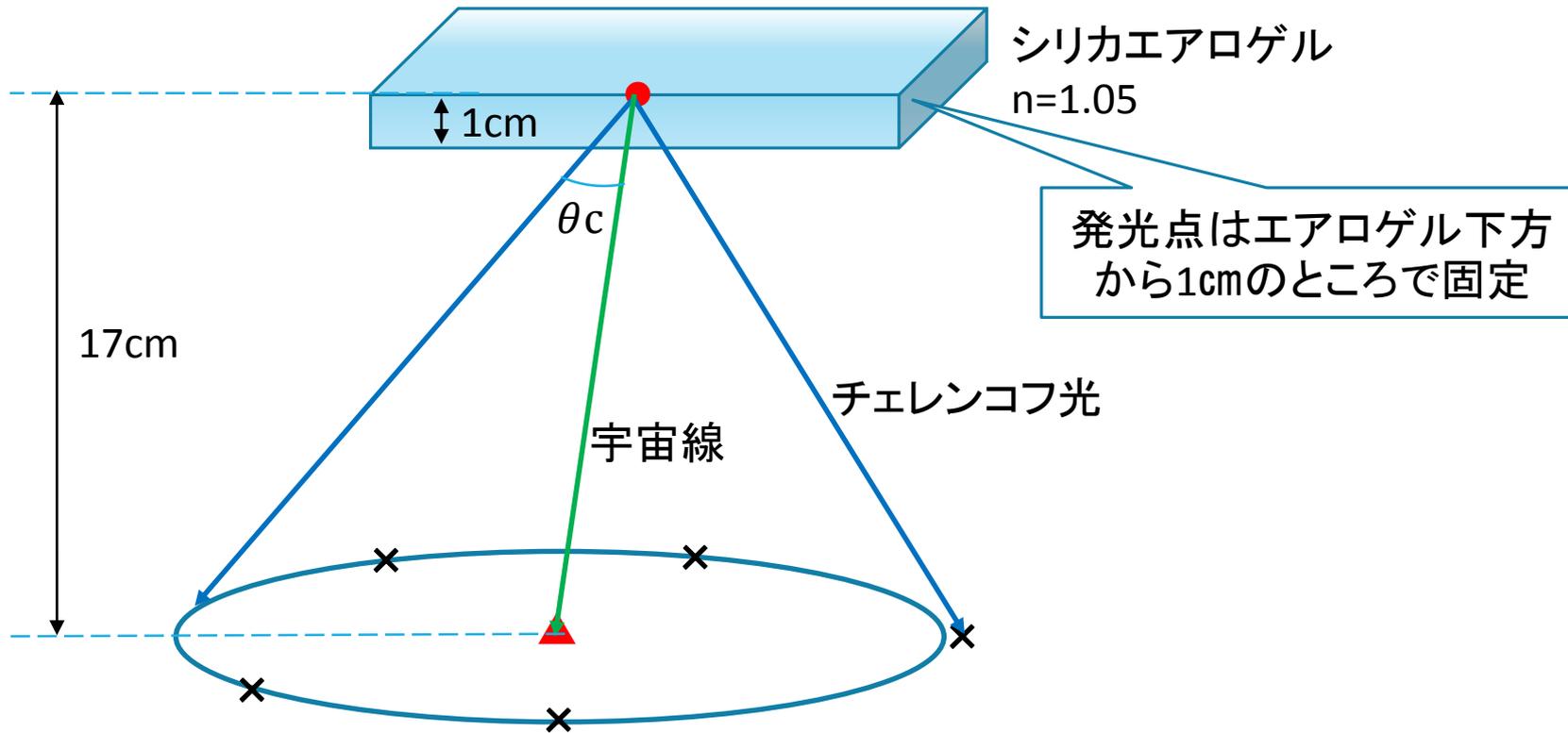
部分的に建設されたARICH検出器に対する宇宙線を用いた性能確認



研究内容(目的)

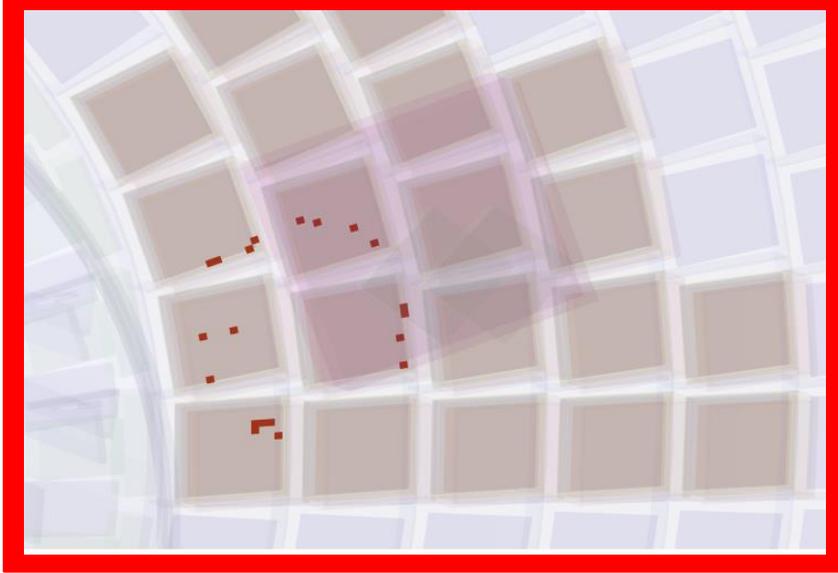
ARICHの宇宙線事象の解析

飛跡検出器が存在しない環境で、ARICHからの情報のみで宇宙線 μ 粒子を用いて、放射角 θ_c や検出光子数からARICHの性能を調べる



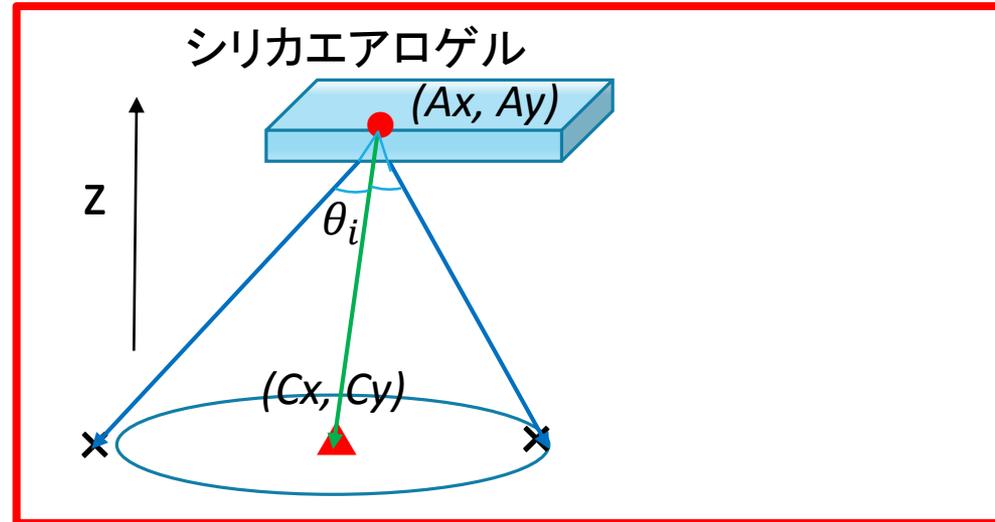
ARICHの宇宙線事象の解析手順

- 1.宇宙線データからリングに対応するイベントを目視で選択。
- 2.各イベントのリング状に見えたヒットを目視で選択。



ARICHの宇宙線事象の解析手順

1. 宇宙線データからリングに対応するイベントを目視で選択。
2. 各イベントのリング状に見えたヒットを目視で選択。



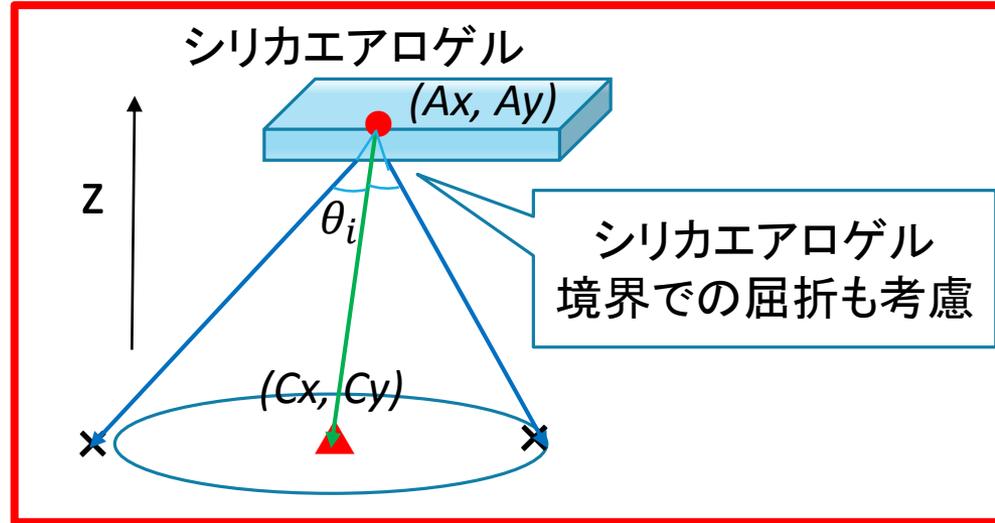
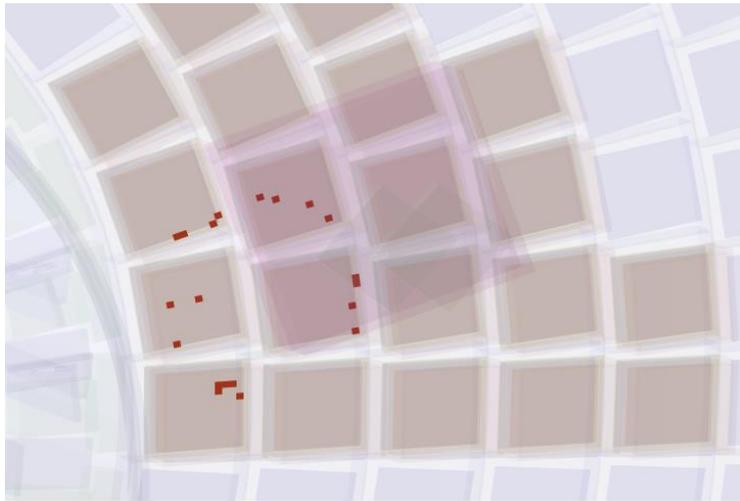
3. 発光点 (A_x, A_y) と宇宙線の通過点 (C_x, C_y) をフリーパラメータに設定
→各ヒットに対応した θ_i を計算
4. χ^2 が最小になるよう座標 (A_x, A_y) と (C_x, C_y) とチェレンコフ光の放射角 θ_c をフィット。

$$\chi^2 = \frac{\sum (\theta_i - \theta_c)^2}{(\Delta\theta)^2}$$

θ_i : i番目のヒットの検出角度
 θ_c : フリーパラメータ(チェレンコフ光の放射角)
 $\Delta\theta = 0.012 \text{ rad}$: 角度分解能(光子発生位置とHAPDの位置分解能から)

ARICHの宇宙線事象の解析手順

1. 宇宙線データからリングに対応するイベントを目視で選択。
2. 各イベントのリング状に見えたヒットを目視で選択。

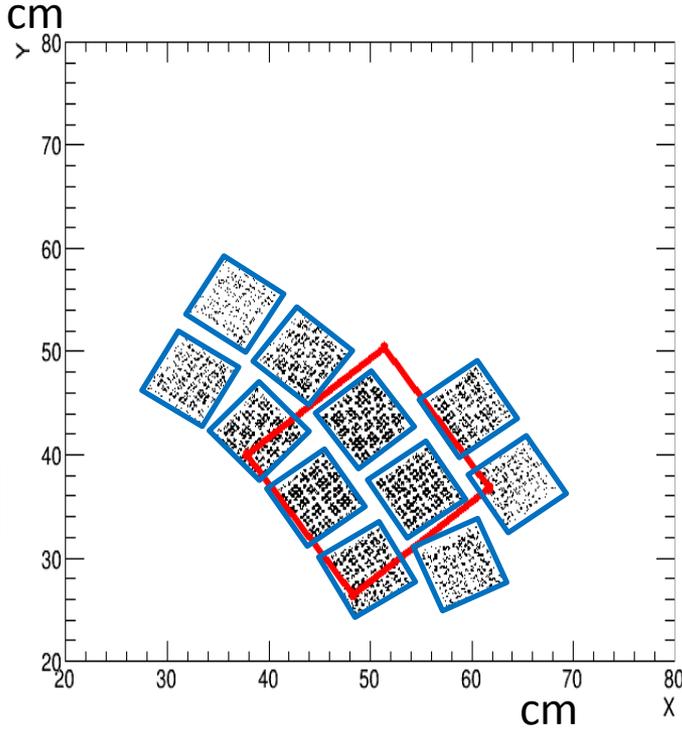
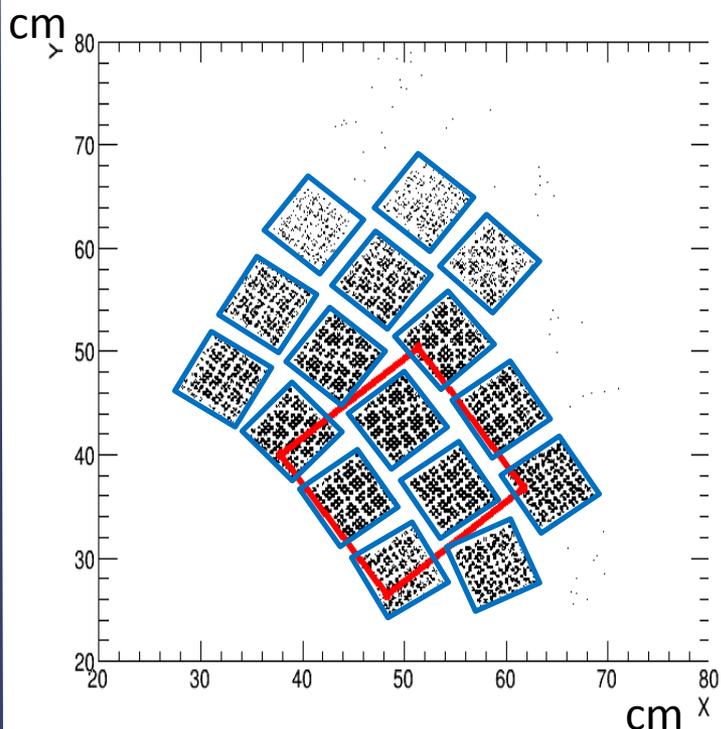


3. 発光点 (Ax, Ay) と宇宙線の通過点 (Cx, Cy) をフリーパラメータに設定
→各ヒットに対応した θ_i を計算
4. χ^2 が最小になるよう座標 (Ax, Ay) と (Cx, Cy) とチェレンコフ光の放射角 θ_c をフィット。

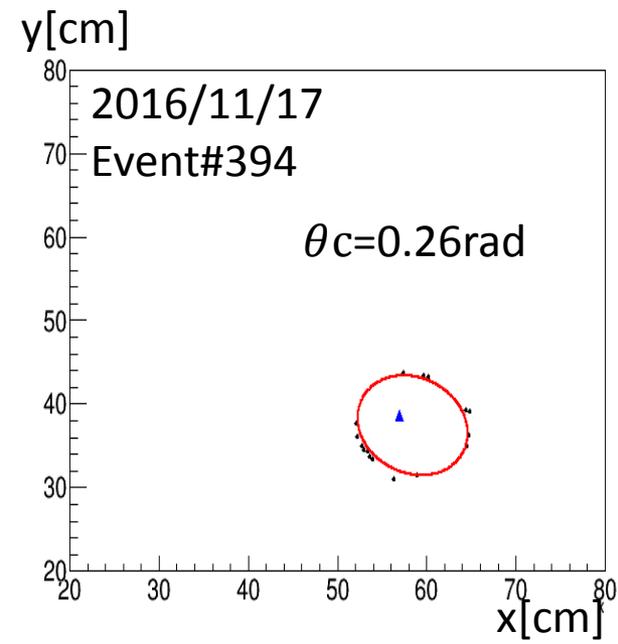
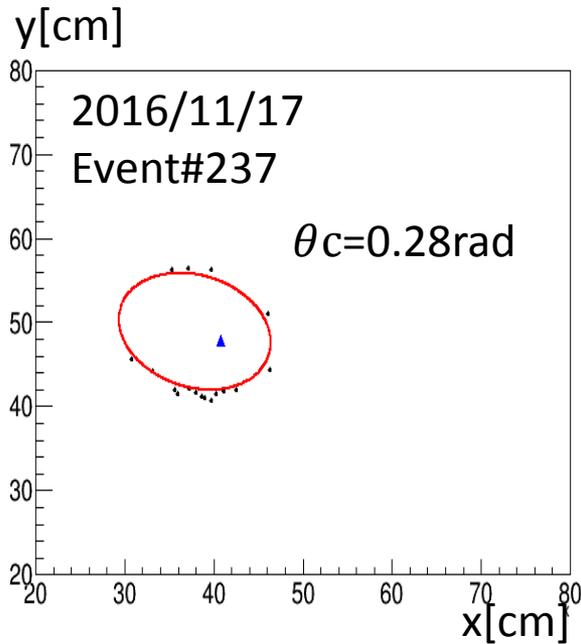
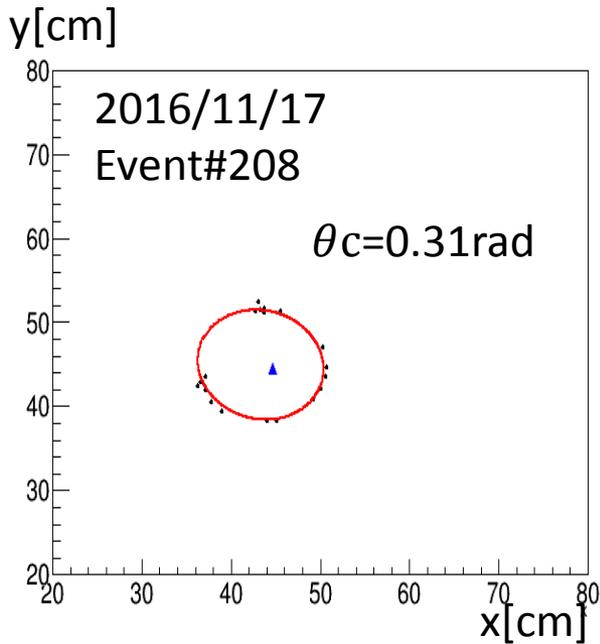
$$\chi^2 = \frac{\sum (\theta_i - \theta_c)^2}{(\Delta\theta)^2}$$

θ_i : i番目のヒットの検出角度
 θ_c : フリーパラメータ(チェレンコフ光の放射角)
 $\Delta\theta$: $\Delta\theta = 0.012$ rad: 角度分解能(光子発生位置とHAPDの位置分解能から)

解析に使用したデータ

データ収集日時	2016/11/17	2017/1/17
選んだイベント数 /全イベント数	42/1375	446/5609
使用した HAPDの数	11台	16台
HAPDの配置 シリカエアロゲルの位置 (49.8, 38.4)		
HAPDの量子 効率の平均	33.9%	33.2%

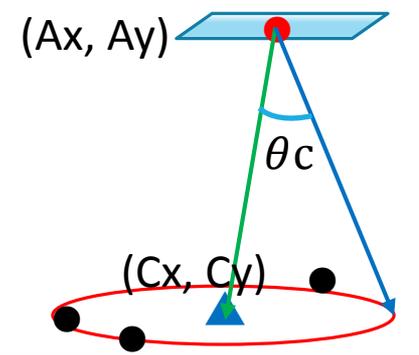
フィットの実行結果の例



⋅: フィットする際に使用した点。(目視で選択)

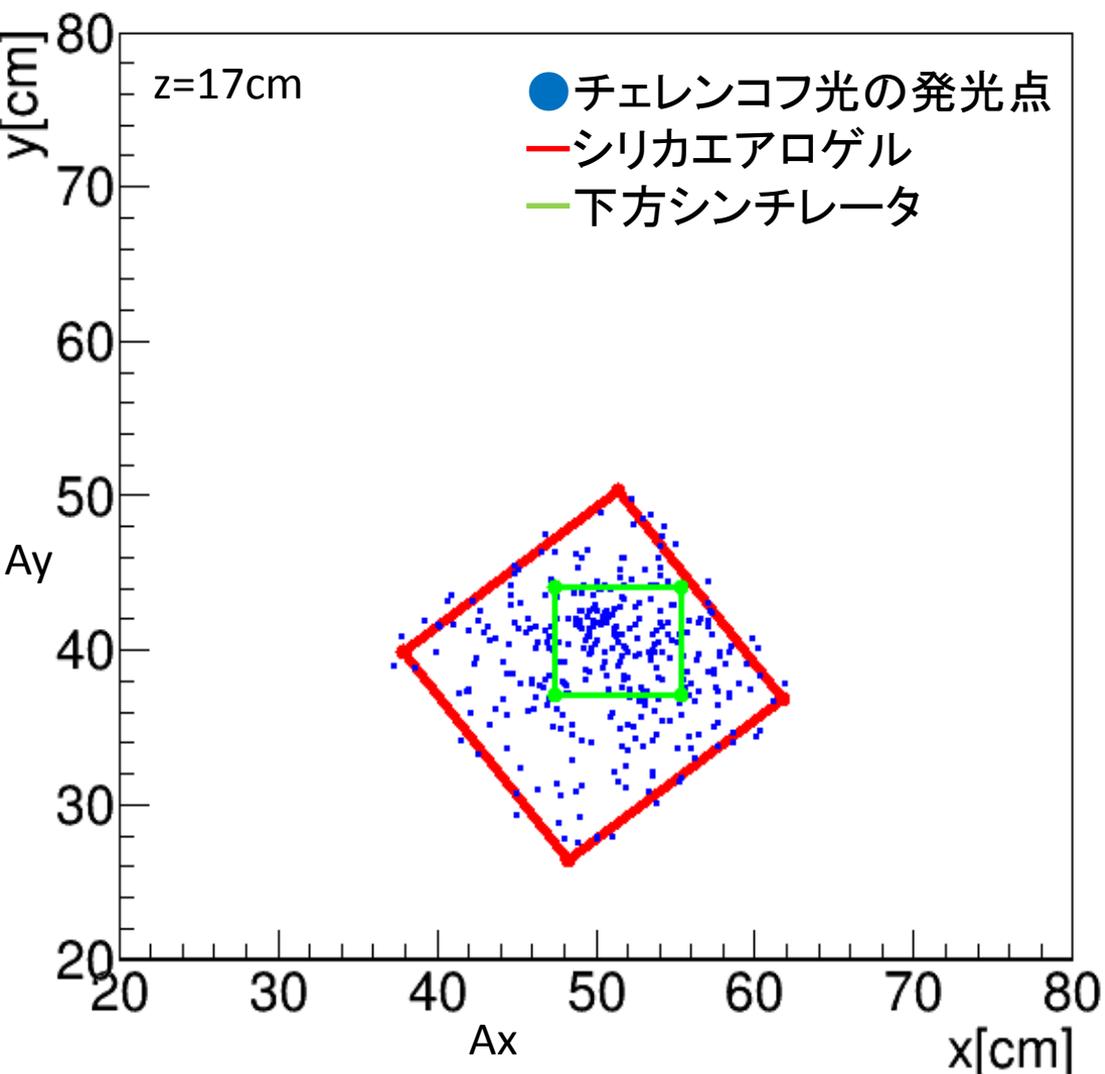
▲: フィットの実行結果。 μ 粒子の飛跡点。

○: フィットの実行結果の5つのパラメータ($A_x, A_y, C_x, C_y, \theta_c$)を用いて表示した楕円。



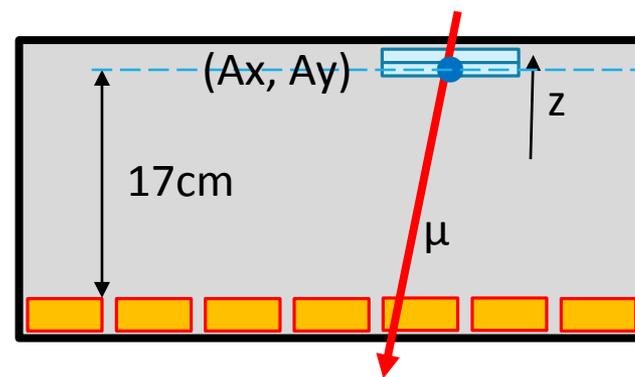
エアロゲル上の発光点

2016/11/17と2017/1/17のデータ



円、楕円に見えるイベントを選んでフィットし、シリカエアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

左図は選んだ488イベントのうちエアロゲルから外れたものを除いた347イベントを表示している。



多くのイベント(選んだ円の約71%)が、シリカエアロゲル内に入っていることが確認できた。

チェレンコフ光放射角 θ_c の分布

2016/11/17と2017/1/17のデータ
347イベント

フィットにおける θ_c の許容範囲

宇宙線 μ 粒子の平均エネルギー: 3 GeV
→宇宙線 μ 粒子はほぼ $\beta = \frac{p}{E} = 1$

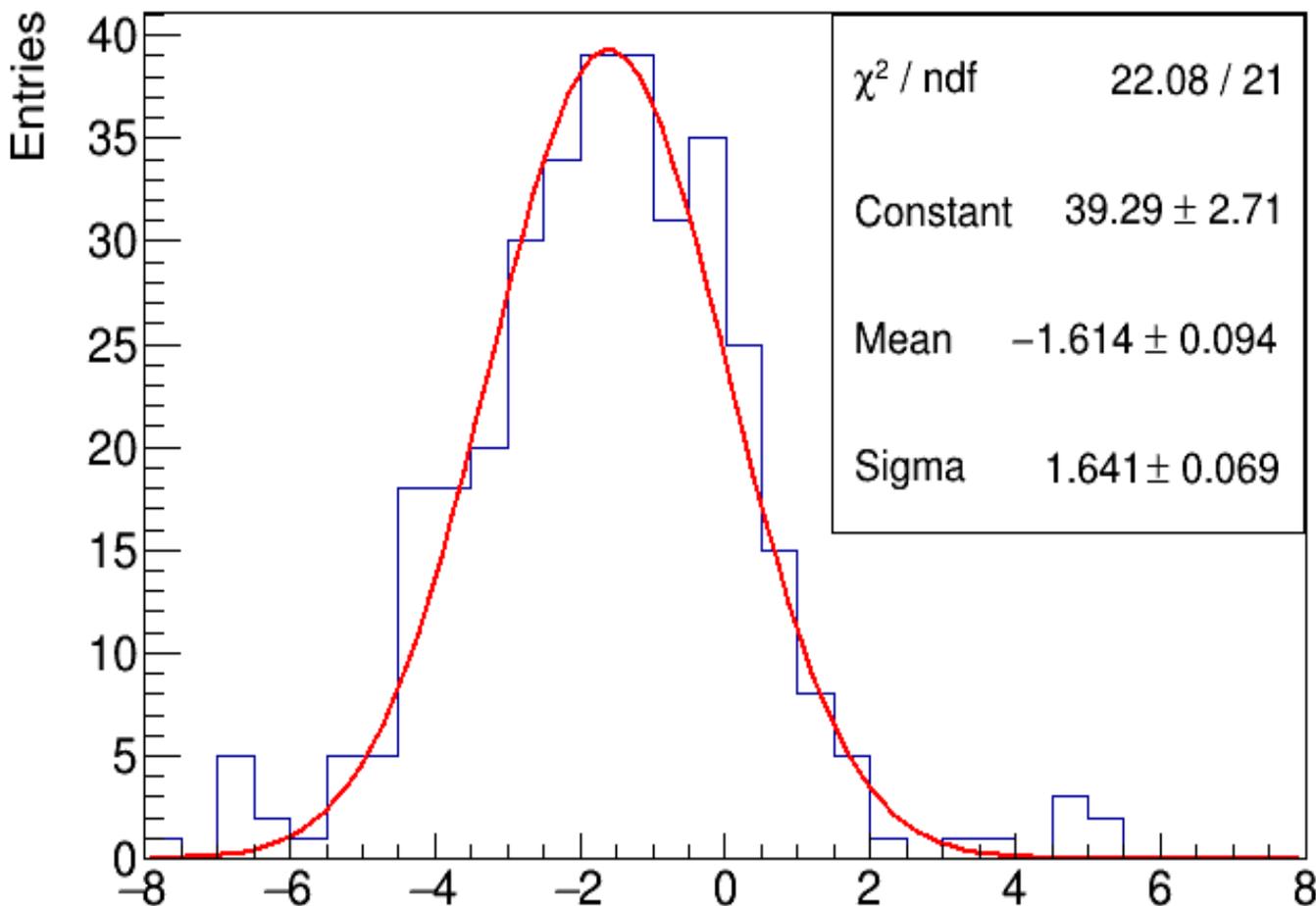
期待される
チェレンコフ光放射角
$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$
$$\theta_c = 0.31 \text{ rad}$$
 $(n=1.05, \beta=1)$

計算値に比べ、 θ_c が小さく再構成されたイベントが多い。

チェレンコフ光放射角 θ_c 残差の分布

$\frac{\theta_c - 0.31}{\theta_c \text{の誤差}}$ の分布

2016/11/17と2017/1/17のデータ
347イベント



$\sigma=1$ ならば誤差の範囲で正しいといえる。
 $\sigma>1$ となった。

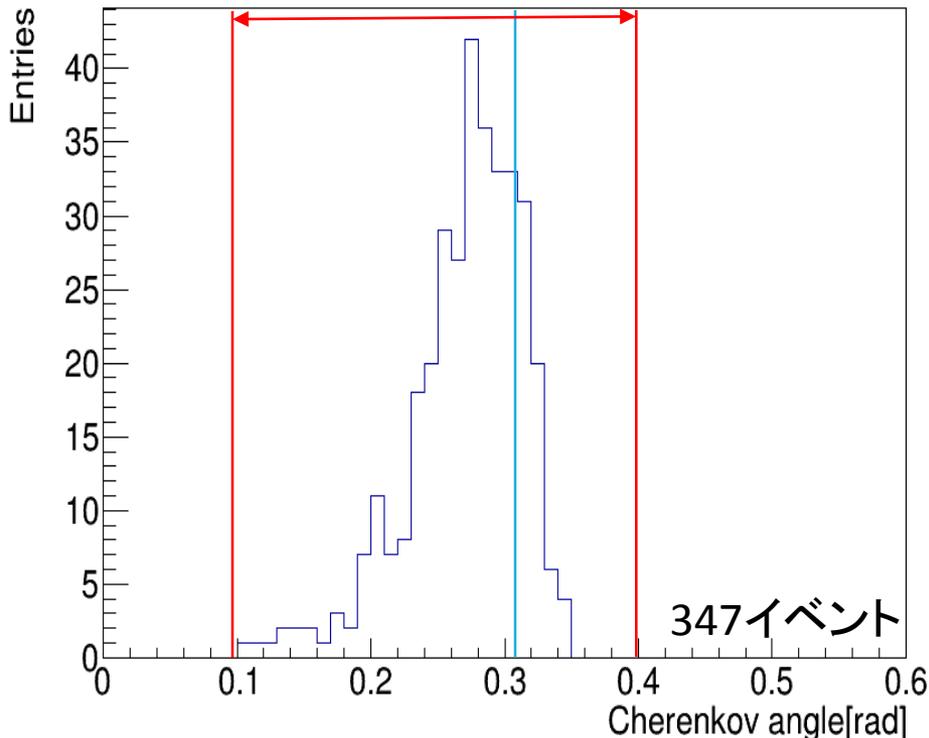
誤差を考慮しても計算値に比べて、有意に小さな値になった。

チェレンコフ光放射角 θ_c の分布

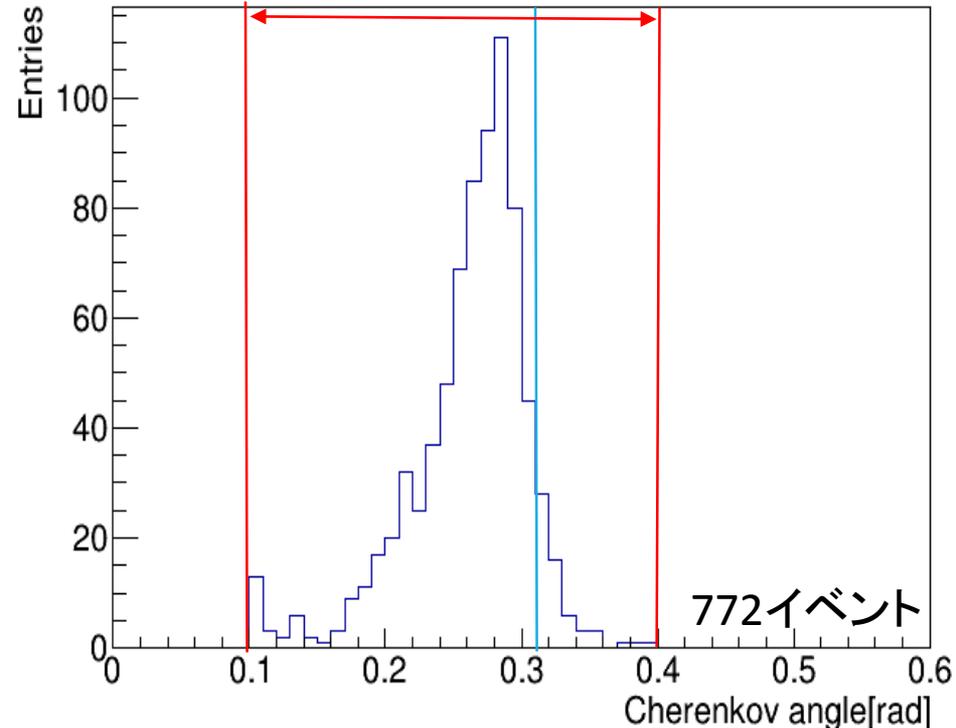
2016/11/17と2017/1/17
宇宙線試験のデータ

$\theta_c=0.31\text{rad}$ の
toyシミュレーション結果

フィットにおける θ_c の許容範囲



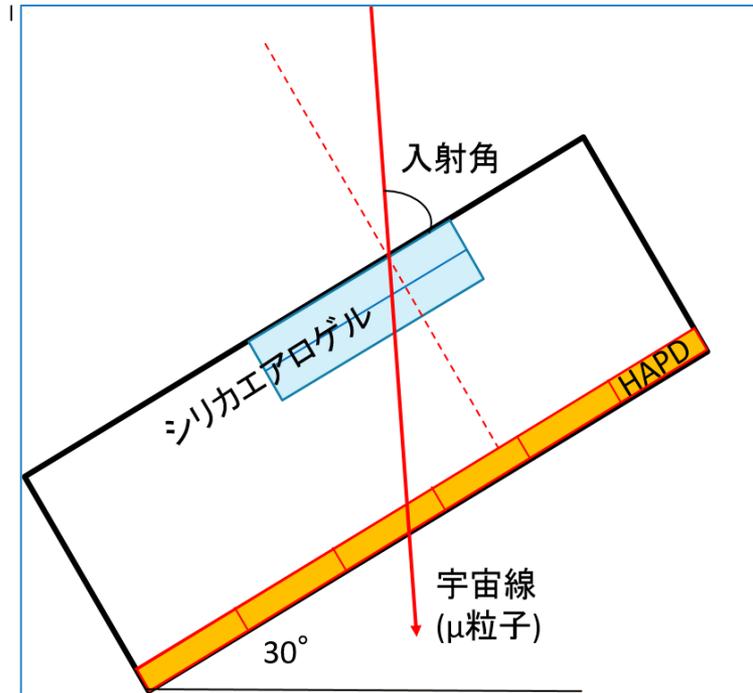
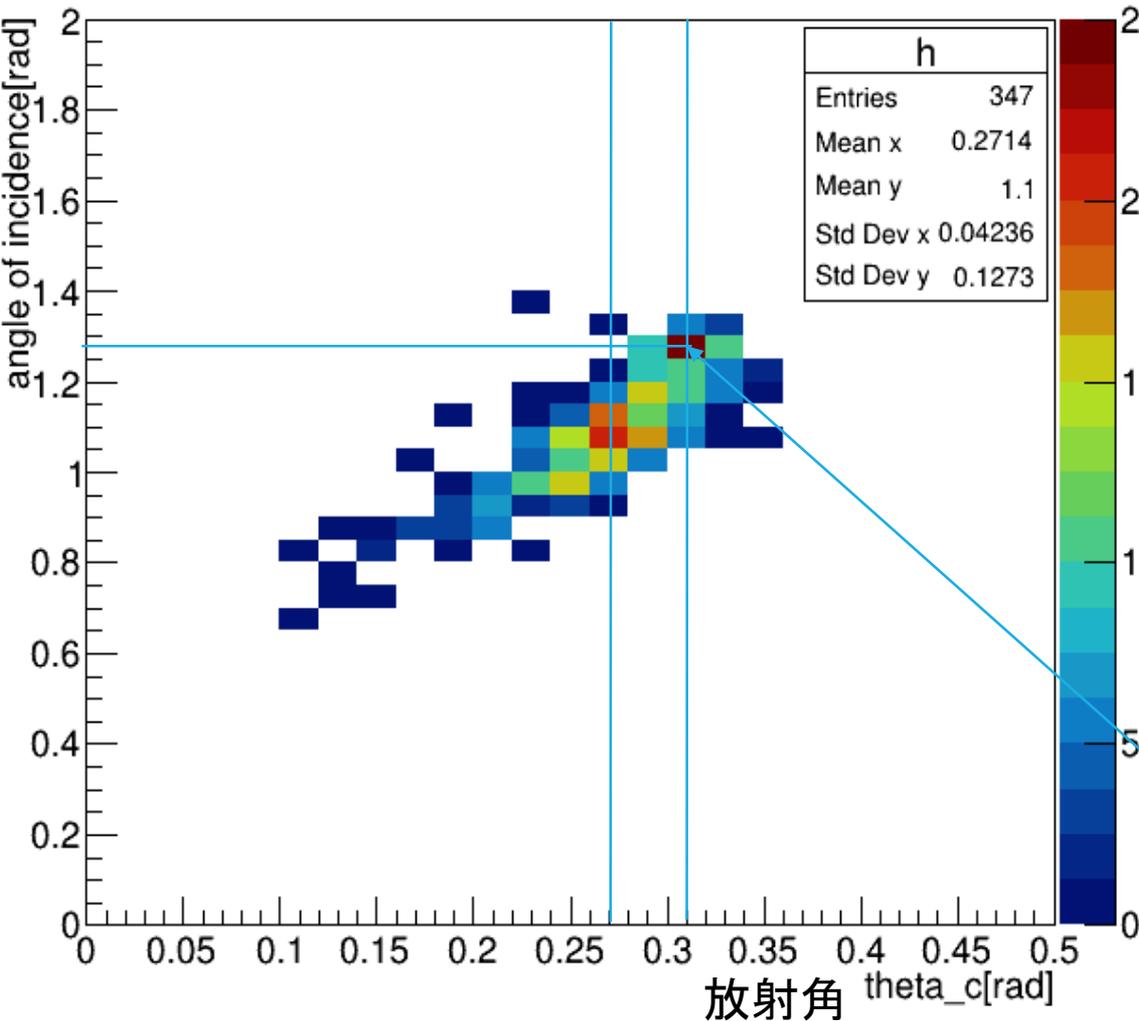
フィットにおける θ_c の許容範囲



$\theta_c = 0.31\text{rad}$ のシミュレーション結果と宇宙線データは形状は矛盾しない。
 θ_c が小さく再構成される要因は、フィットによるバイアスとして理解できる。

入射角と放射角 θ_c の関係

2016/11/17と2017/1/17の宇宙線のデータ347イベント

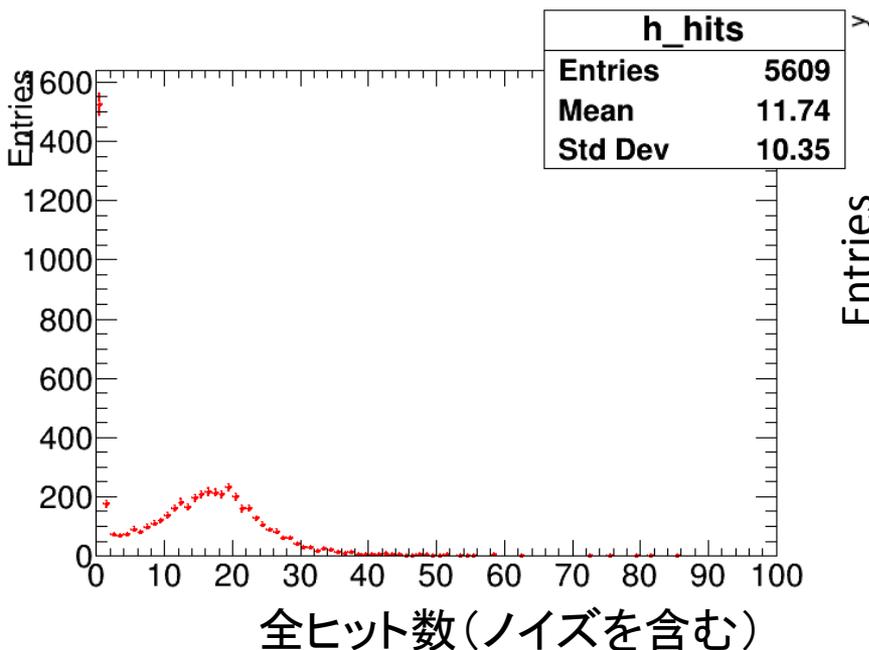


正の相関がみえる。

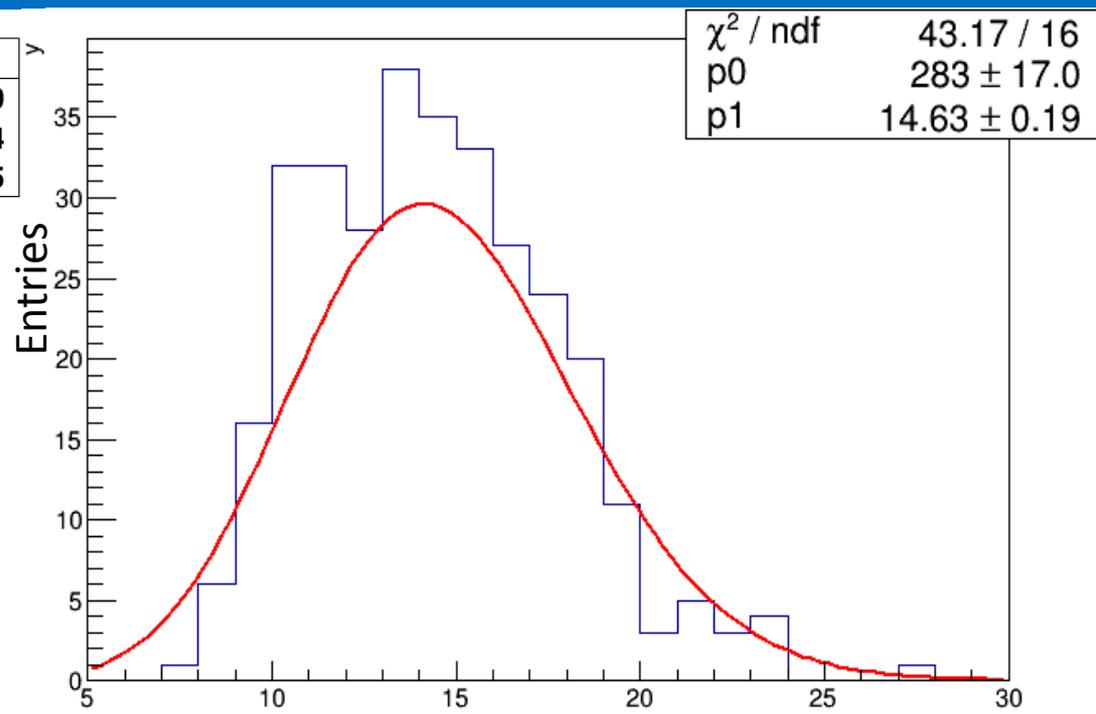
放射角0.31rad
入射角1.27rad(73°)
のイベントが多い

1イベント当たりの光子数

2017/1/17のデータ



トリガーを通ったイベント数: 5609



Fitが成功したイベント数: 319
1イベント毎のリングに相当する光子数の平均値: 14.6
計算値: 約11.8

計算値に比べてやや大きな値となった。目視によるバイアスが考えられる。1つのポアソン分布として矛盾なし。→ μ 粒子1トラックの光子数が多い

まとめ

宇宙線(μ 粒子)を用いたチェレンコフリングの観測とチェレンコフ光の放射角の再構成に成功した。

計算値 0.31rad に比べ、 $\theta_c = 0.27\text{rad}$ と小さく再構成されたイベントが多い。
→放射角分布はtoyMCによる $\theta_c = 0.31\text{rad}$ シミュレーション結果と矛盾がない。

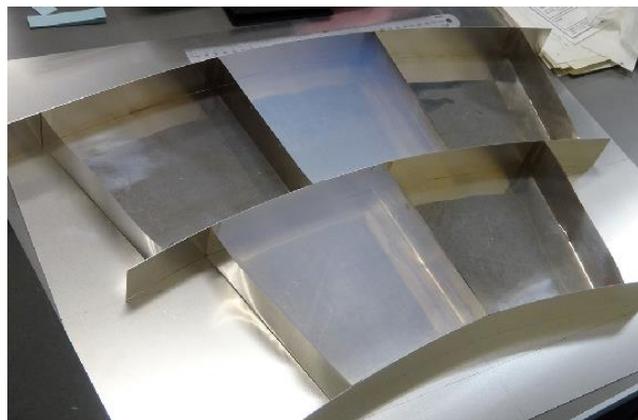
リングに相当する検出光子数を求めた結果 14.6 で、計算値 11.8 より多いことがわかった。

Back up

シリカエアロゲル

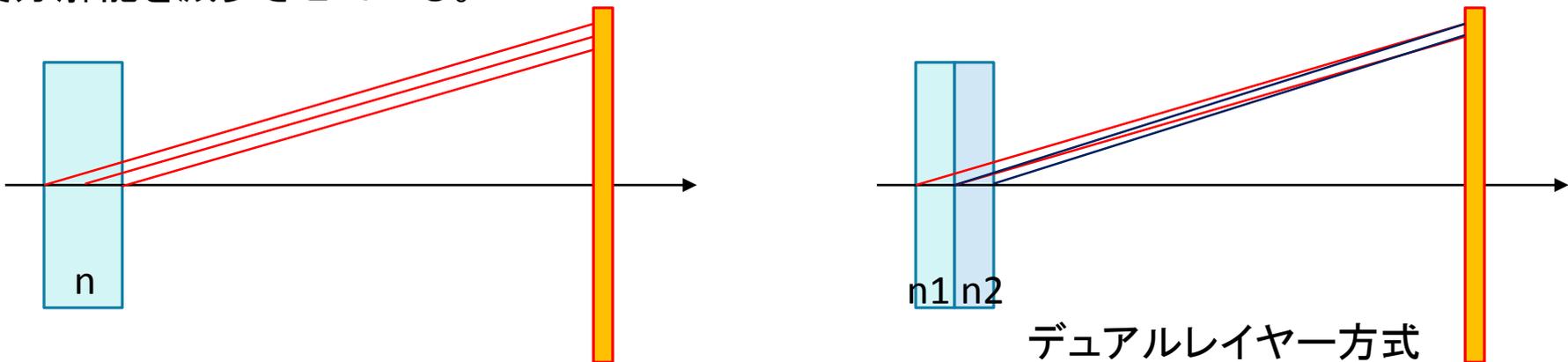
二酸化ケイ素主体の固体が微細な気泡を多量・均一に含んだもの。

サイズ: 17cm × 17cm



デュアルレイヤー方式

屈折率が $n_1=1.045$ と $n_2=1.055$ の二枚を使用し、検出光子数を減らさず、角度分解能を減少させている。



宇宙線のエネルギーと θ_c

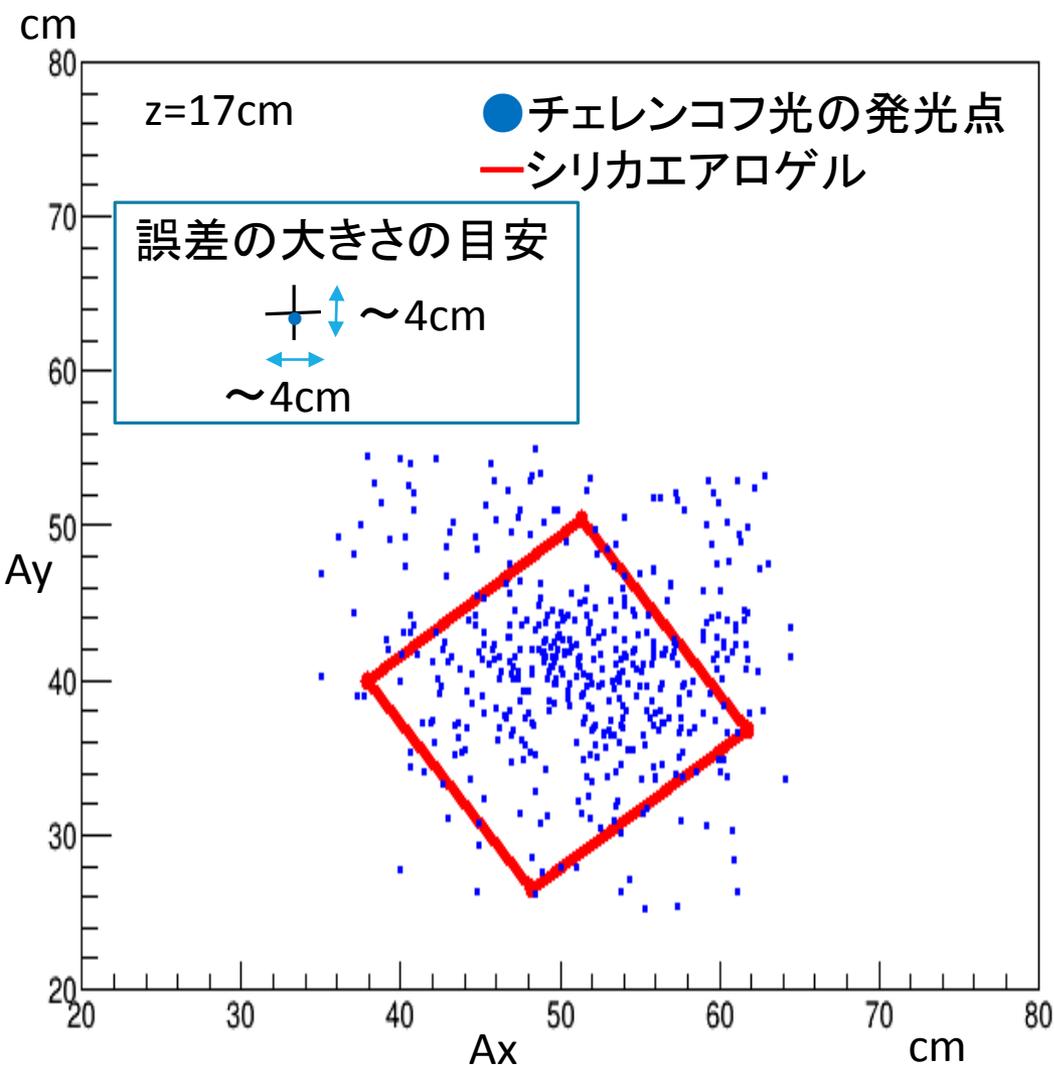
μ 粒子のエネルギー [GeV]	$\beta=P/E$	放射角 θ [rad]	μ 粒子のエネルギー [GeV]	$\beta=P/E$	放射角 θ [rad]
0.5	0.979795897	0.237114849	2.3	0.999054373	0.30687442
0.6	0.986013297	0.261935547	2.4	0.999131567	0.307118141
0.7	0.989743319	0.275642799	2.5	0.99919968	0.307333002
0.8	0.992156742	0.284116172	2.6	0.999260081	0.307523394
0.9	0.99380799	0.289751701	2.7	0.999313894	0.307692899
1.0	0.994987437	0.293701464	2.8	0.999362041	0.30784447
1.1	0.995859195	0.296582073	2.9	0.999405293	0.307980553
1.2	0.996521729	0.298749961	3.0	0.99944429	0.308103191
1.3	0.997037031	0.300423624	3.1	0.999479573	0.3082141
1.4	0.997445717	0.301743385	3.2	0.999511599	0.308314731
1.5	0.997775303	0.302802862	3.3	0.999540758	0.308406317
1.6	0.998044964	0.303666522	3.4	0.99956738	0.308489912
1.7	0.998268397	0.304379974	3.5	0.999591753	0.308566419
1.8	0.998455598	0.304976241	3.6	0.999614123	0.308636618
1.9	0.998613998	0.305479719	3.7	0.999634703	0.308701185
2.0	0.998749218	0.305908756	3.8	0.99965368	0.308760707
2.1	0.99886557	0.306277369	3.9	0.999671215	0.308815696
2.2	0.998966408	0.306596417	4.0	0.999687451	0.308866602

宇宙線のエネルギーと θ_c

μ 粒子のエネルギー [GeV]	$\beta=P/E$	放射角 θ [rad]	μ 粒子のエネルギー [GeV]	$\beta=P/E$	放射角 θ [rad]
0.5	0.98	0.24	2.3	1.00	0.31
0.6	0.99	0.26	2.4	1.00	0.31
0.7	0.99	0.28	2.5	1.00	0.31
0.8	0.99	0.28	2.6	1.00	0.31
0.9	0.99	0.29	2.7	1.00	0.31
1.0	0.99	0.29	2.8	1.00	0.31
1.1	1.00	0.30	2.9	1.00	0.31
1.2	1.00	0.30	3.0	1.00	0.31
1.3	1.00	0.30	3.1	1.00	0.31
1.4	1.00	0.30	3.2	1.00	0.31
1.5	1.00	0.30	3.3	1.00	0.31
1.6	1.00	0.30	3.4	1.00	0.31
1.7	1.00	0.30	3.5	1.00	0.31
1.8	1.00	0.30	3.6	1.00	0.31
1.9	1.00	0.31	3.7	1.00	0.31
2.0	1.00	0.31	3.8	1.00	0.31
2.1	1.00	0.31	3.9	1.00	0.31
2.2	1.00	0.31	4.0	1.00	0.31

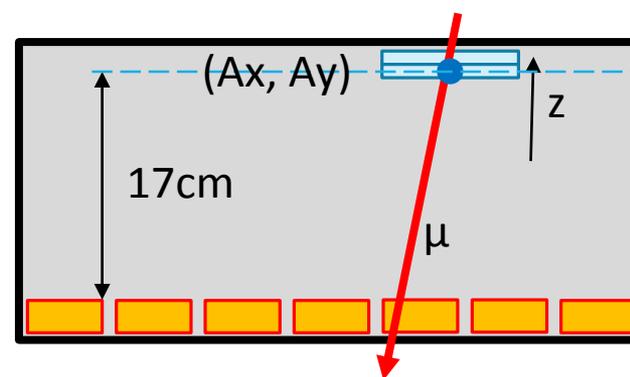
エアロゲル上の発光点

2016/11/17と2017/1/17のデータ



円、楕円に見えるイベントを選んでフィットし、シリカエアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

左図は選んだ488イベントのうちエアロゲルから大きく外れたものを除いた461イベントを表示している。



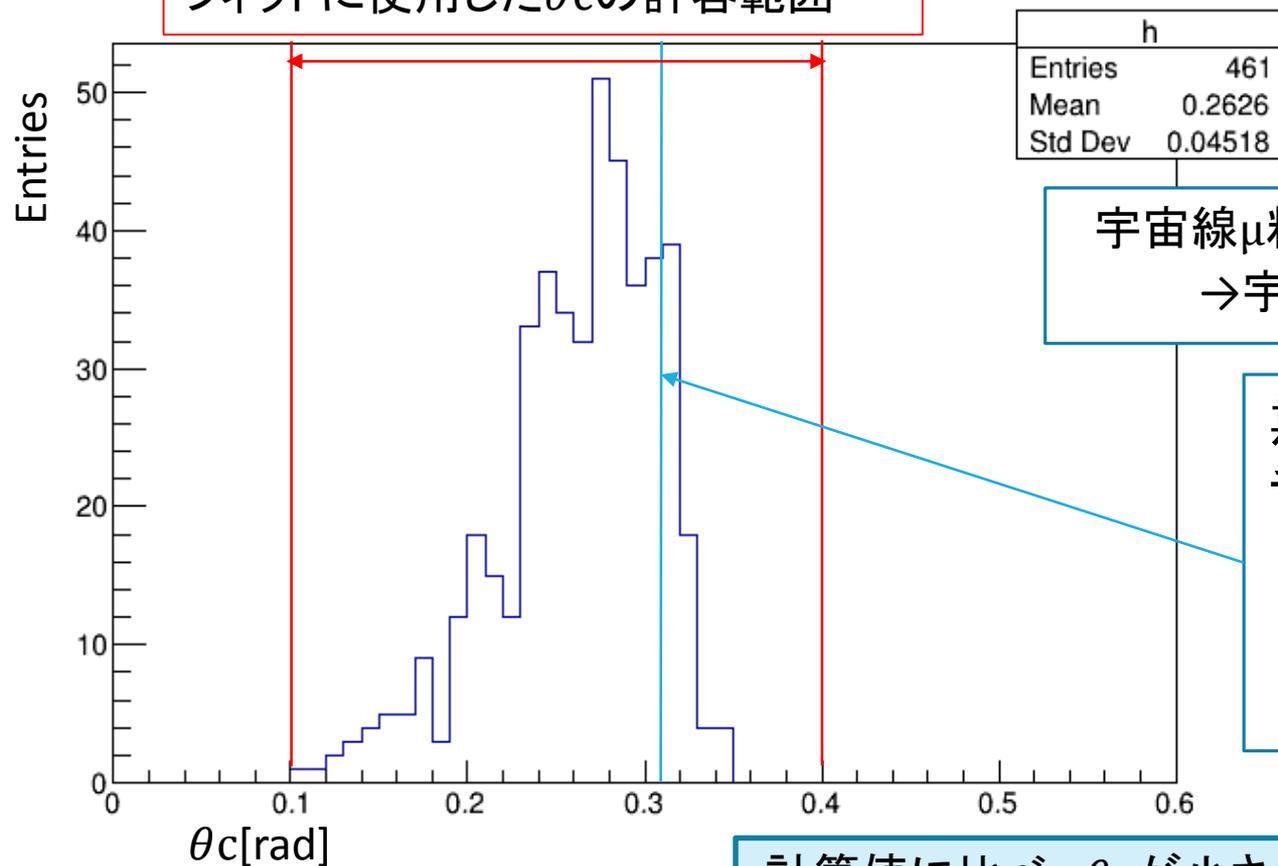
多くのイベントが誤差の範囲内でシリカエアロゲル内に入っていることが確認できた。

θ_c のヒストグラム

2016/11/17と2017/1/17のデータ

宇宙線からのチェレンコフ光のリングイメージが観測できた
461イベントの放射角分布

フィットに使用した θ_c の許容範囲

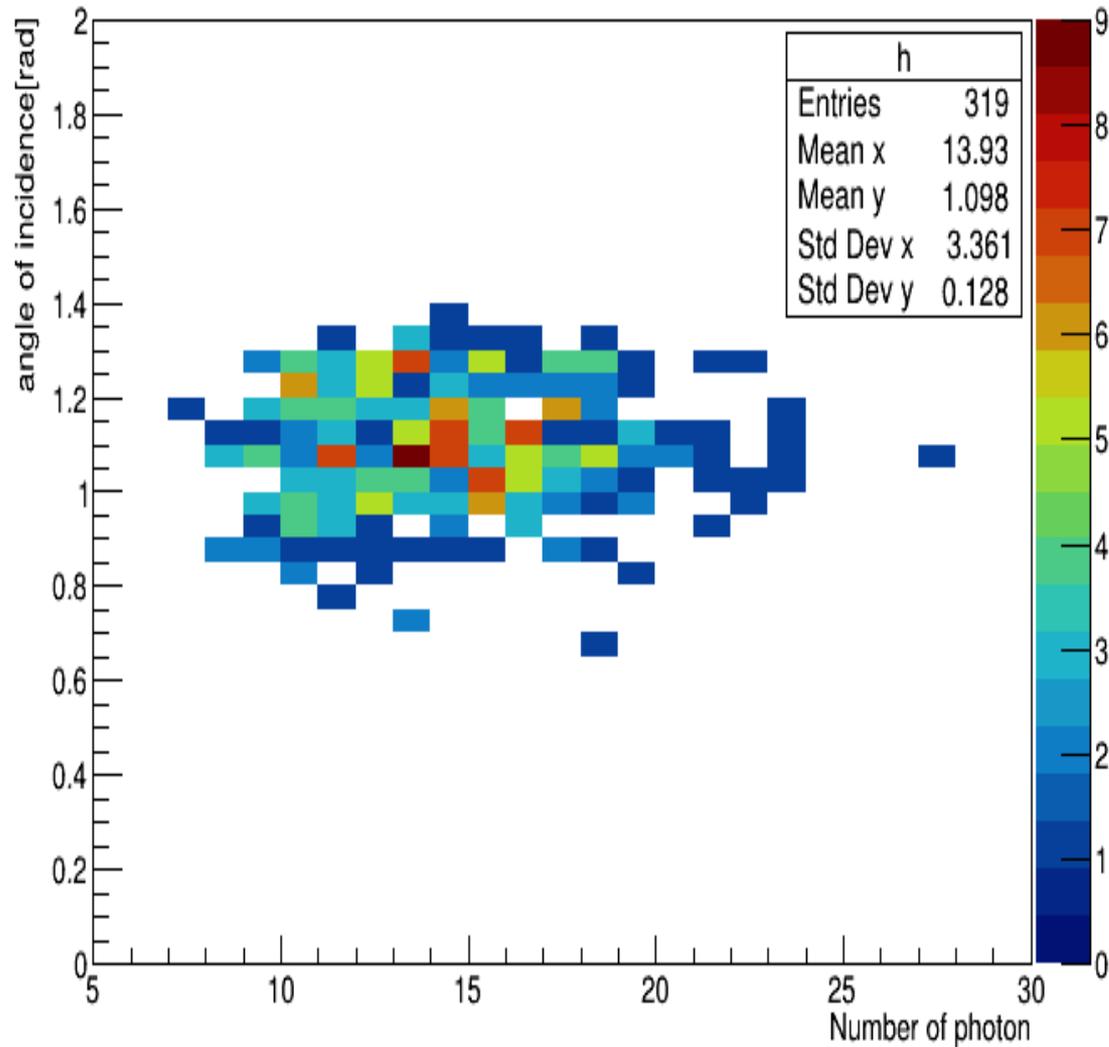


宇宙線 μ 粒子の平均エネルギー: 3 GeV
 \rightarrow 宇宙線 μ 粒子はほぼ $\beta = \frac{p}{E} = 1$

期待される
チェレンコフ光放射角
$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$
$$\theta_c = 0.31 \text{ rad}$$
 $(n=1.05, \beta=1)$

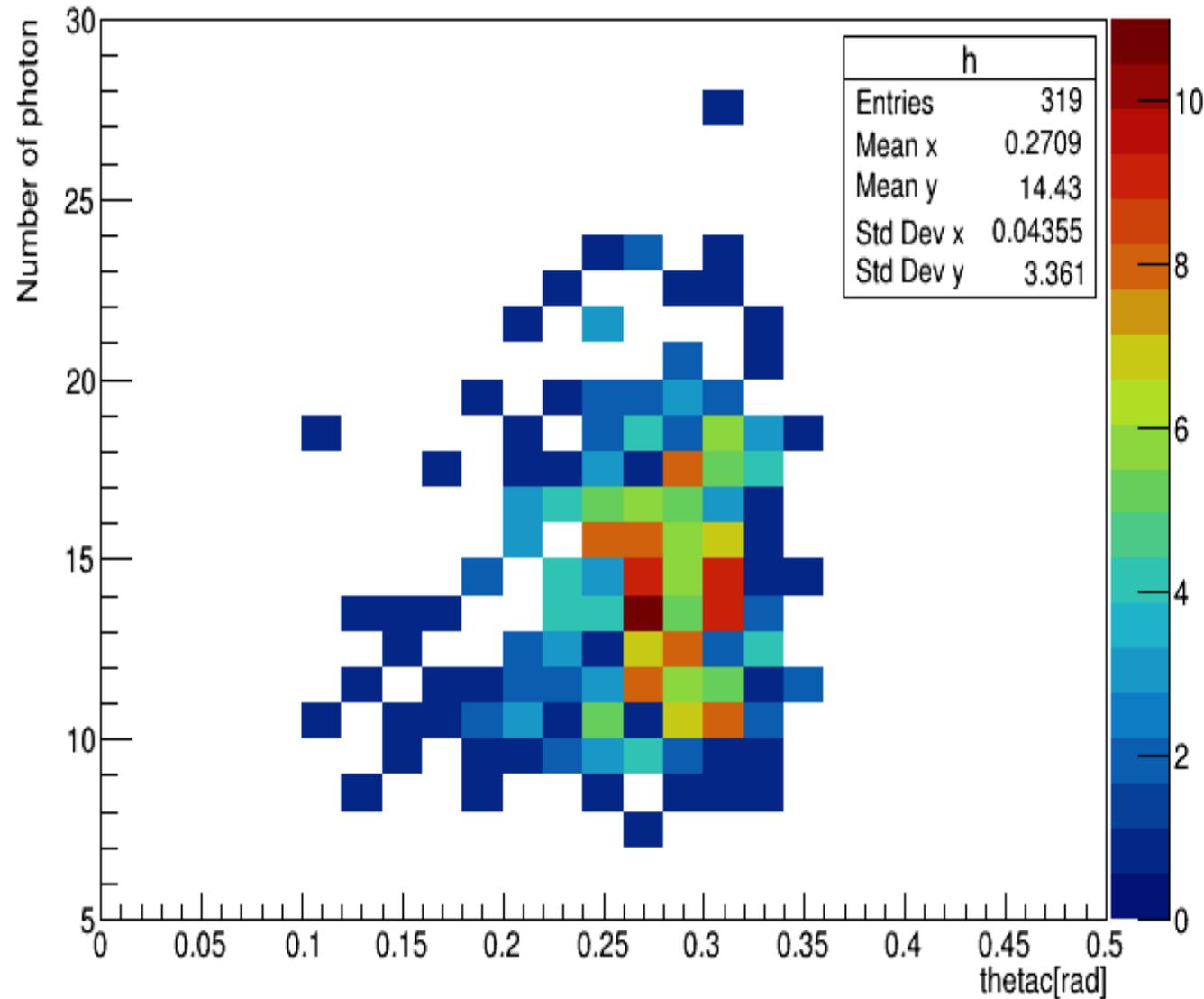
計算値に比べ、 θ_c が小さく再構成されたイベントが多い。

入射角と検出光子数の関係



相関なし

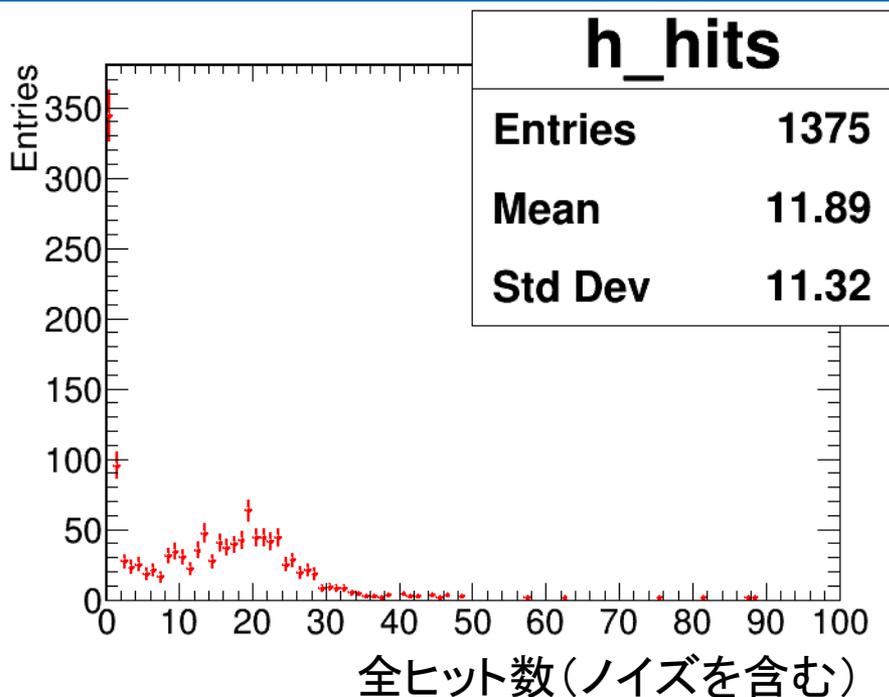
放射角 θ_c と検出光子数の関係



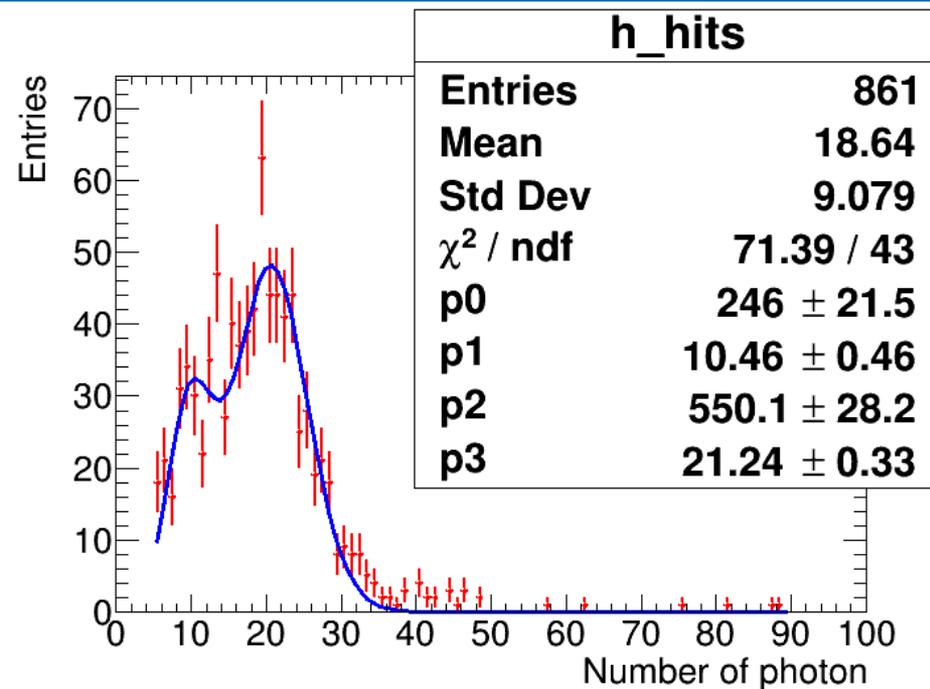
相関なし

1イベント毎の光子数

2016/11/17のデータ



トリガーを通ったイベント数: 1375

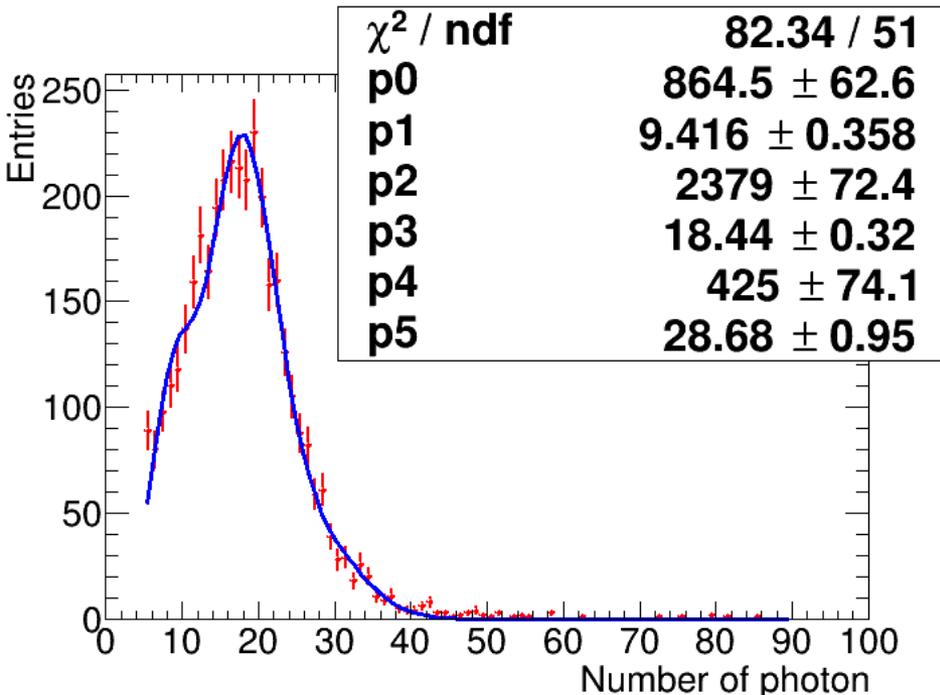


5ヒット以上のイベント数: 861
2つのポアソン分布でFit

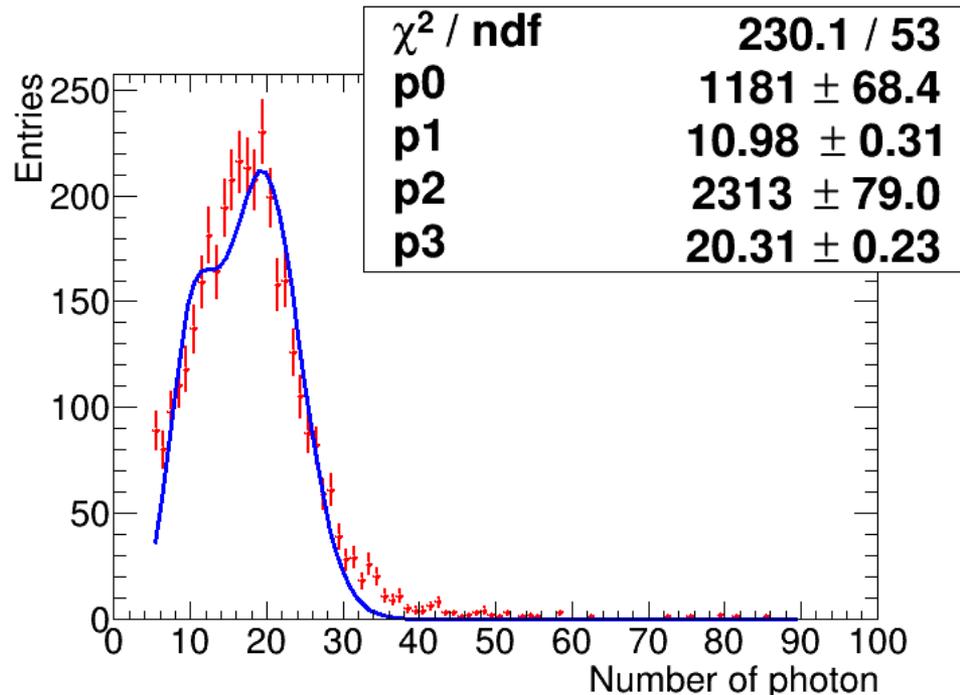
2トラックイベントが多いように見える。
これはリングに含まれていないノイズやリングの中心点(μ 粒子のガラスチェレンコフ光)を含んでいるため光子数が多いと考えられる。

1イベント毎の光子数

2017/1/17のデータ



3つのポアソン分布でFit



2つのポアソン分布でFit

5ヒット以上のイベント数: 3702

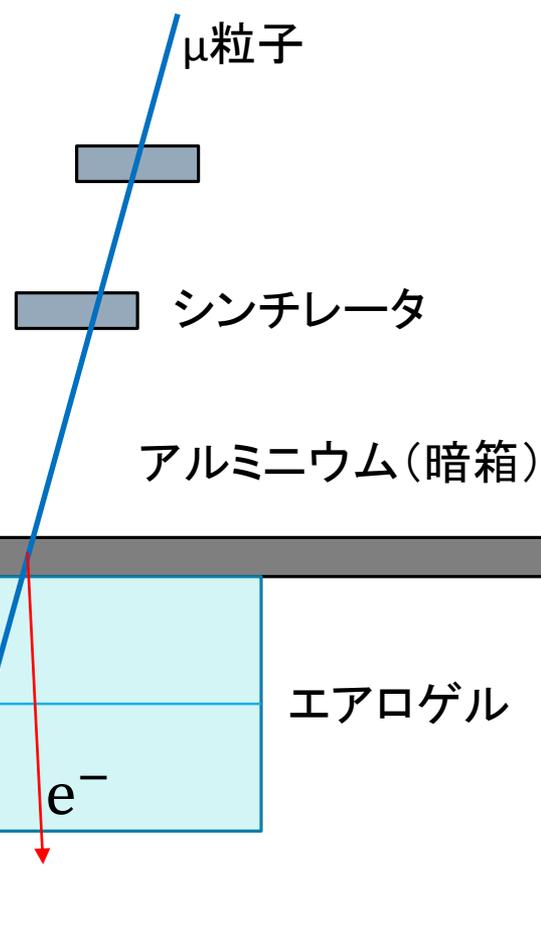
2トラックイベントが多いように見える。

これはリングに含まれていないノイズやリングの中心点(μ 粒子のガラスチェレンコフ光)を含んでいるため光子数が多いと考えられる。

2トラック、3トラックイベントの原因

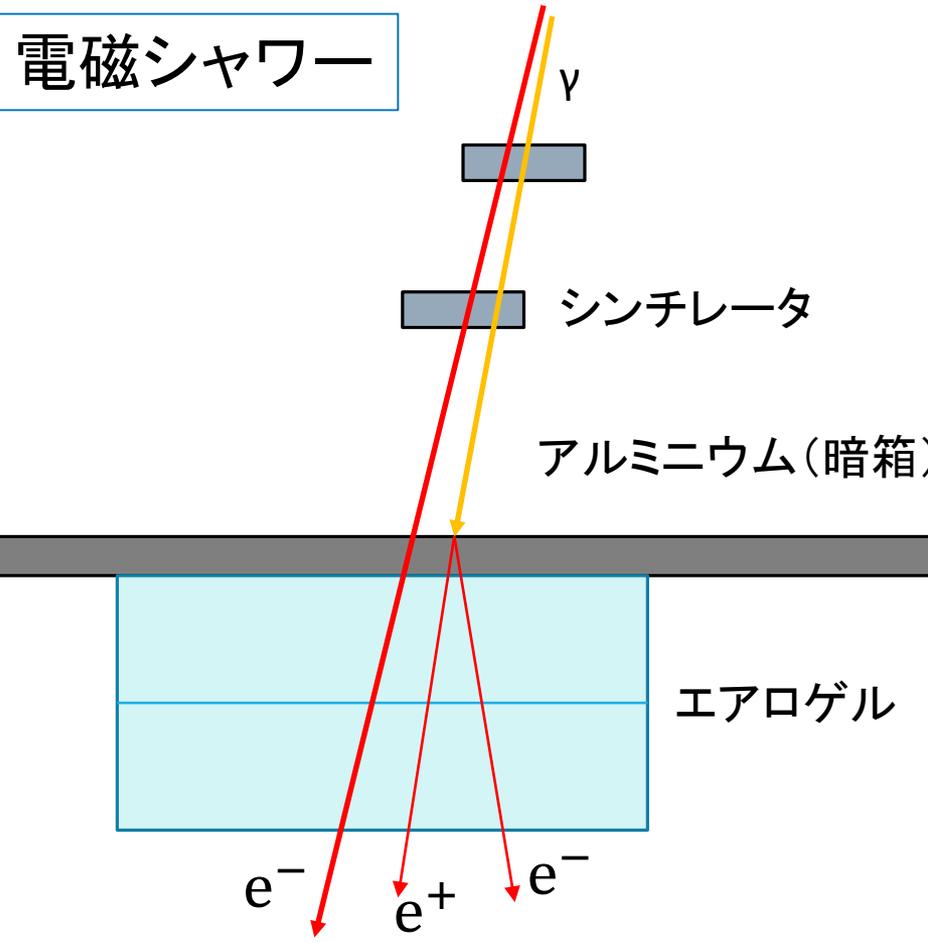
2トラックイベント

δ -ray



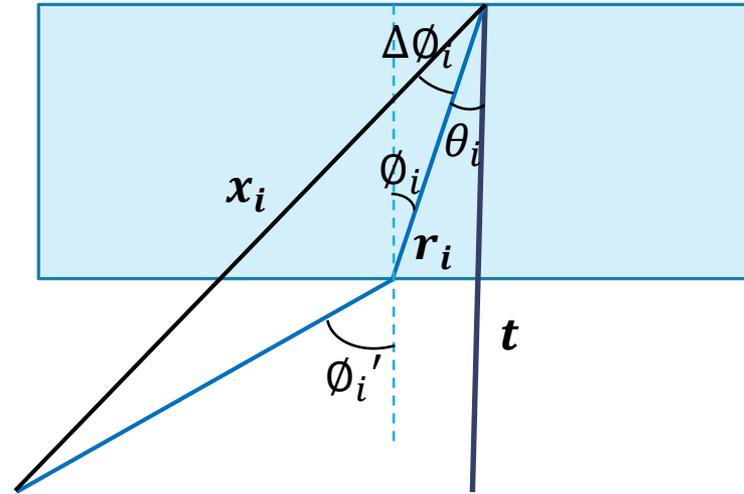
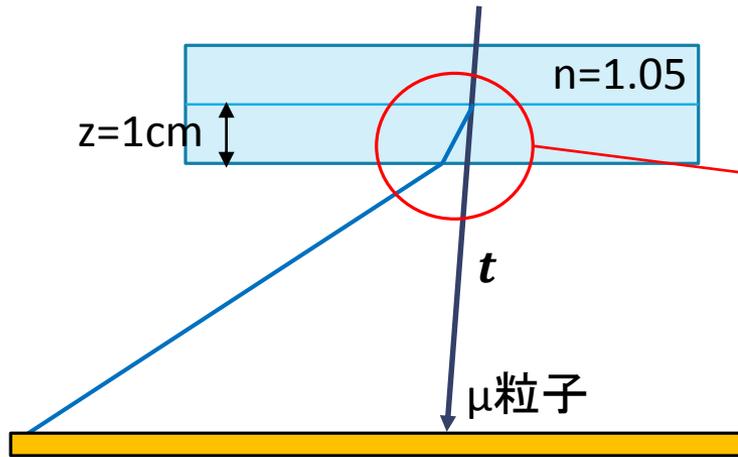
3トラックイベント

電磁シャワー



エアロゲル上方物質と宇宙線との相互作用による複数トラック

エアロゲル→空気 屈折

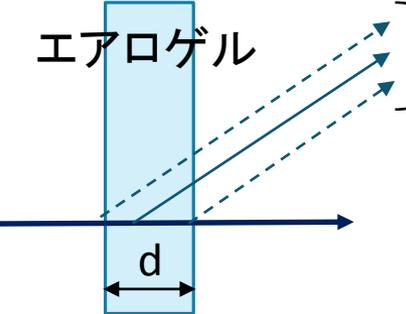


$$\theta = \cos^{-1} \frac{t \cdot x}{|t||x|} - \Delta\phi$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{\Delta \sin \phi}{\cos \phi} = \frac{1}{\cos \phi} (\sin \phi' - \sin \phi) \\ &= \frac{1}{\cos \phi} \left(\frac{n(\text{gel})}{n(\text{air})} - 1 \right) \sin \phi \\ &= \frac{|r|}{z} \left(\frac{n(\text{gel})}{n(\text{air})} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(\frac{z}{|r|} \right)^2} \end{aligned}$$

$\Delta\theta$ (岩田さんのスライドから) 垂直の宇宙線のための考慮

発光点の不定性



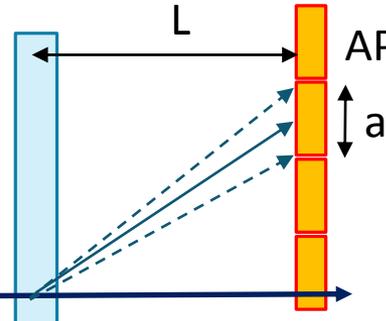
エアロゲル

チェレンコフ光は厚さdの中で一様に発生するためリングは幅を持つ

$$\frac{d}{L\sqrt{12}} \cos \theta_c \sin \theta_c = 0.00986221 \text{ rad}$$

$d=2\text{cm}, L=17\text{cm}$

測定位置誤差



L

APDピクセルサイズ=0.49cm

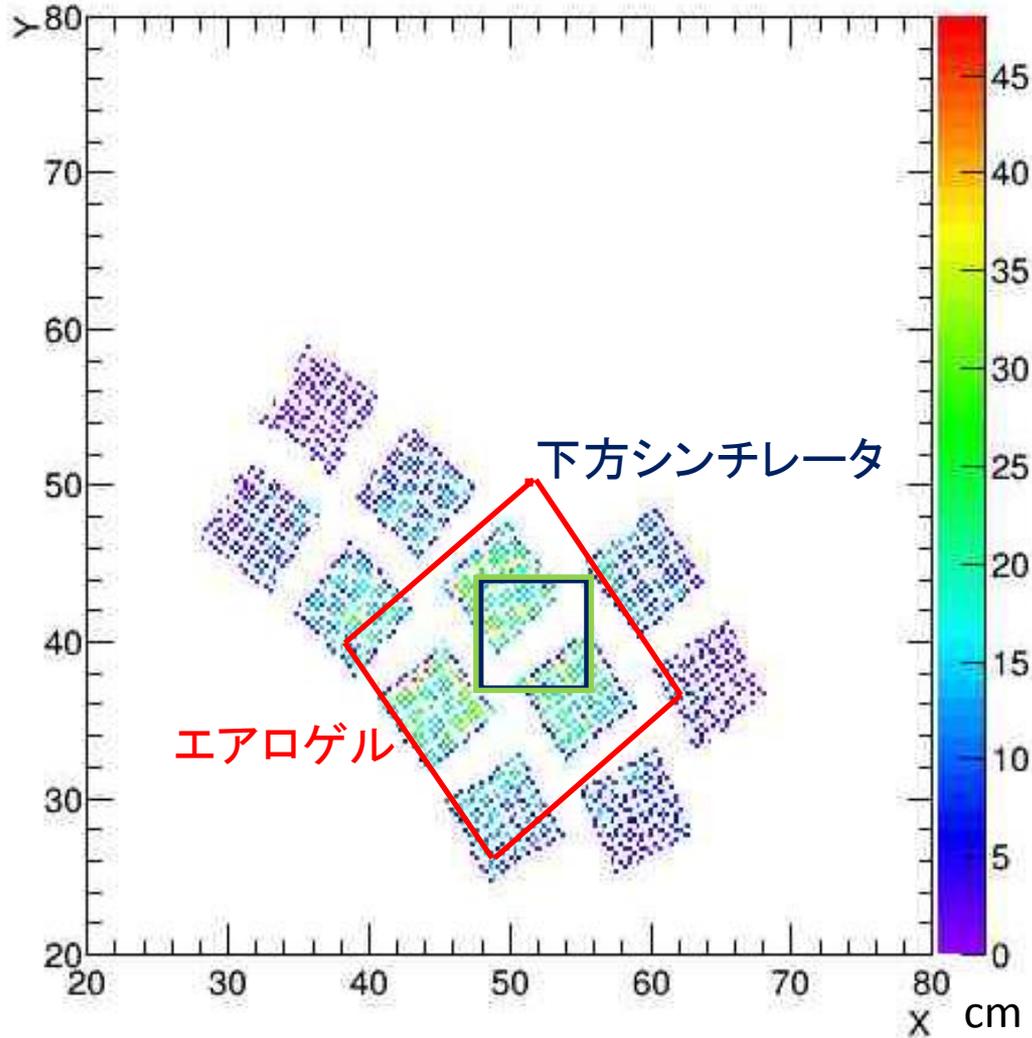
ピクセル位置分解能 $\propto \frac{a}{\sqrt{12}}$

$$\frac{a}{L\sqrt{12}} \cos^2 \theta_c = 0.00754706 \text{ rad}$$

$$\Delta\theta = \sqrt{0.00986221^2 + 0.00754706^2} = 0.0124186 \text{ rad}$$

シンチレータ位置の測定

cm



2016/11/17の宇宙線データ

全1375イベント

チェレンコフ光のヒット点の2次元
ヒストグラム

ただしシンチレータの位置は不
確か

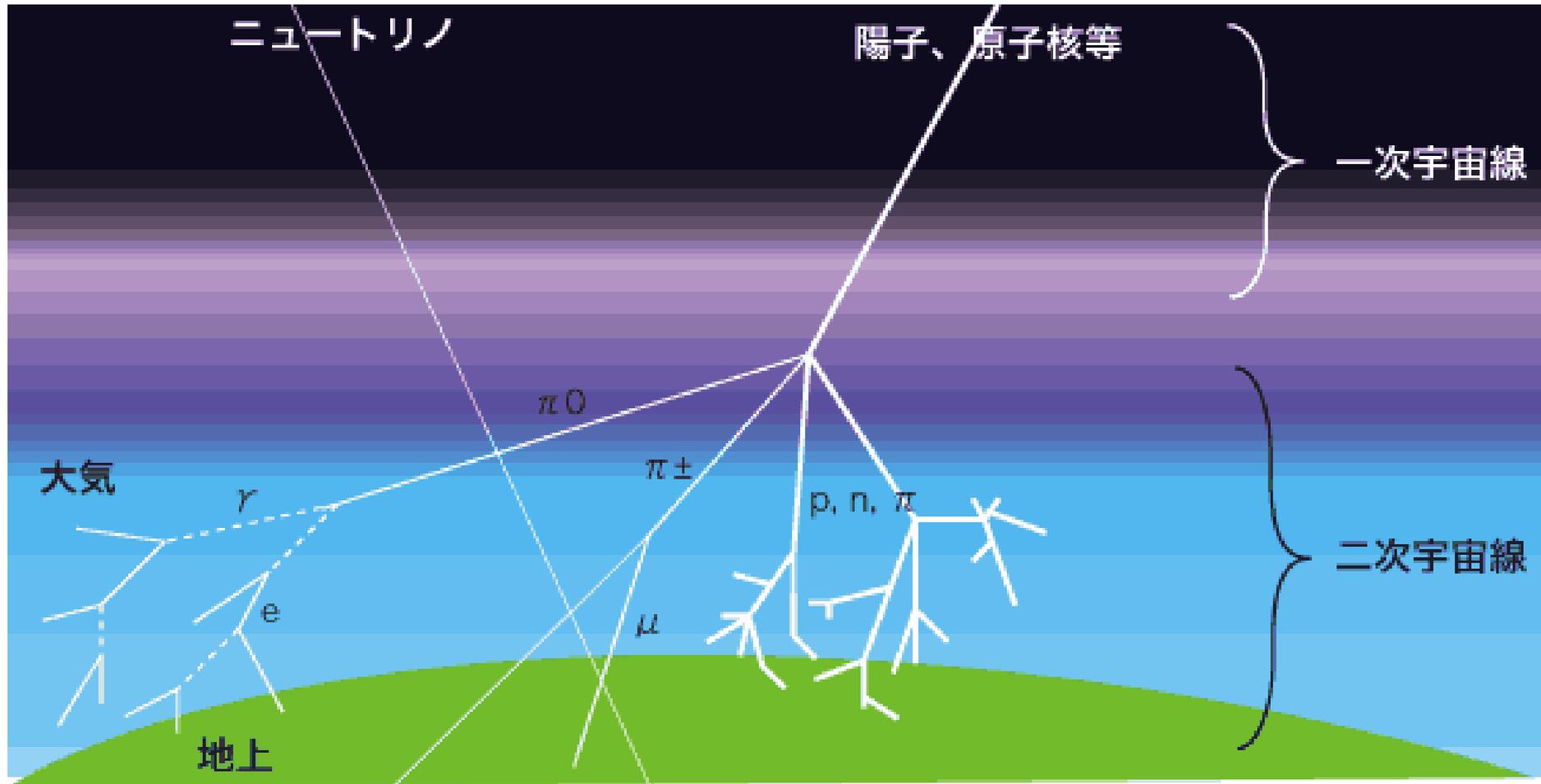
エアロゲルの中心値
(49.8, 38.4)

シンチレータの中心値
(51.4, 40.6)

宇宙線の計数率

	2016/11/17	2017/1/17
開始時刻	10:10	23:53
終了時刻	15:09	翌日 15:36
計測時間	4時間59分	15時間43分
イベント数	1375	5609
計数率	0.0766/s	0.0991/s

宇宙線



引用: インターネット講座2004「宇宙から素粒子へ」

Belle II実験の新物理の例

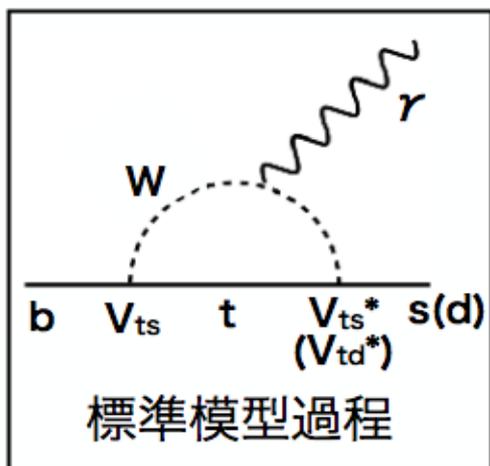
米永さんのスライド

$b \rightarrow s \gamma$ 、 $b \rightarrow d \gamma$ 過程

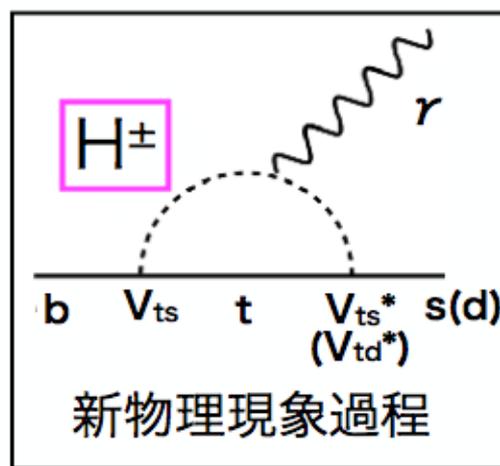
Flavor Changing Neutral Current過程

⇒世代は変わるが電荷は変わらない過程

標準模型ではループを介して発生

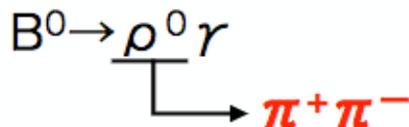


+

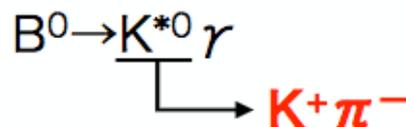


⇒ 新物理現象があると観測結果に標準模型との"ズレ"が生じる
(ズレ：崩壊分岐比やCP対称性など)

$b \rightarrow s \gamma$ 過程を含む崩壊例



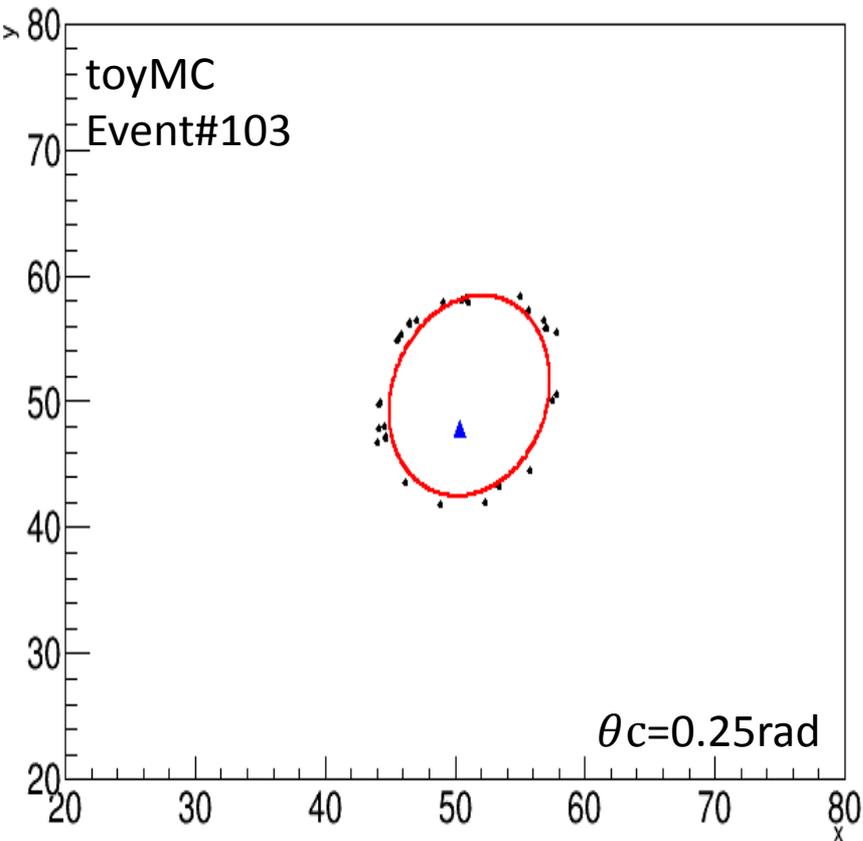
$b \rightarrow d \gamma$ 過程を含む崩壊例



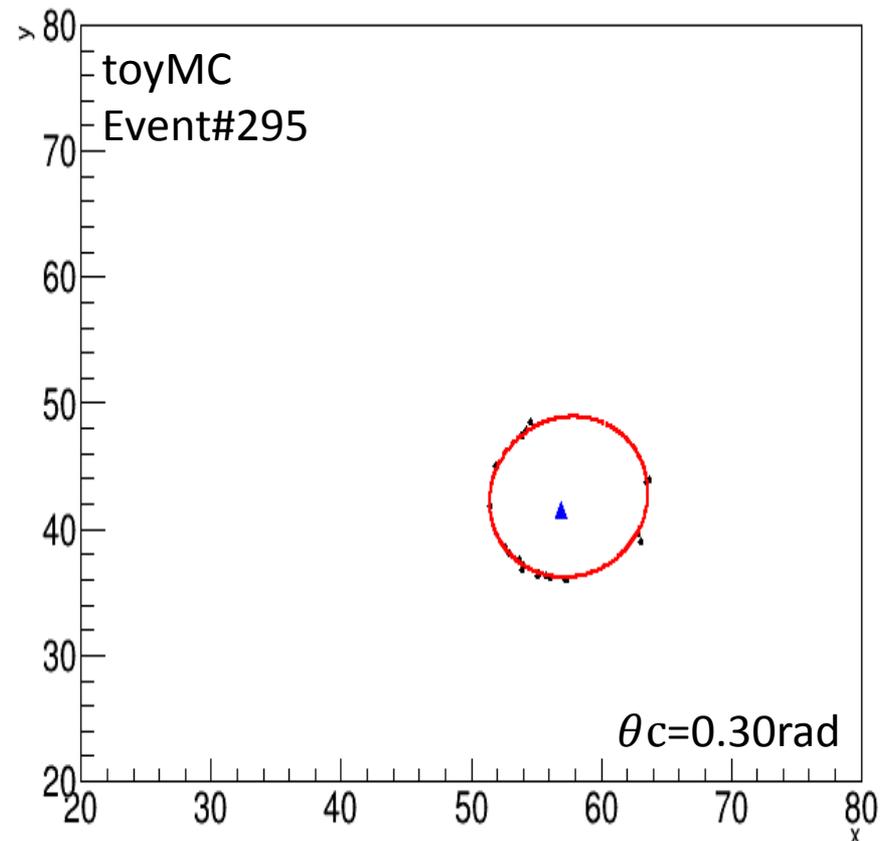
粒子識別能力の向上により、終状態に $K^\pm \cdot \pi^\pm$ を多く含む B^0 の崩壊過程を精密に測定することが可能となる

toyMC

フィット結果の例



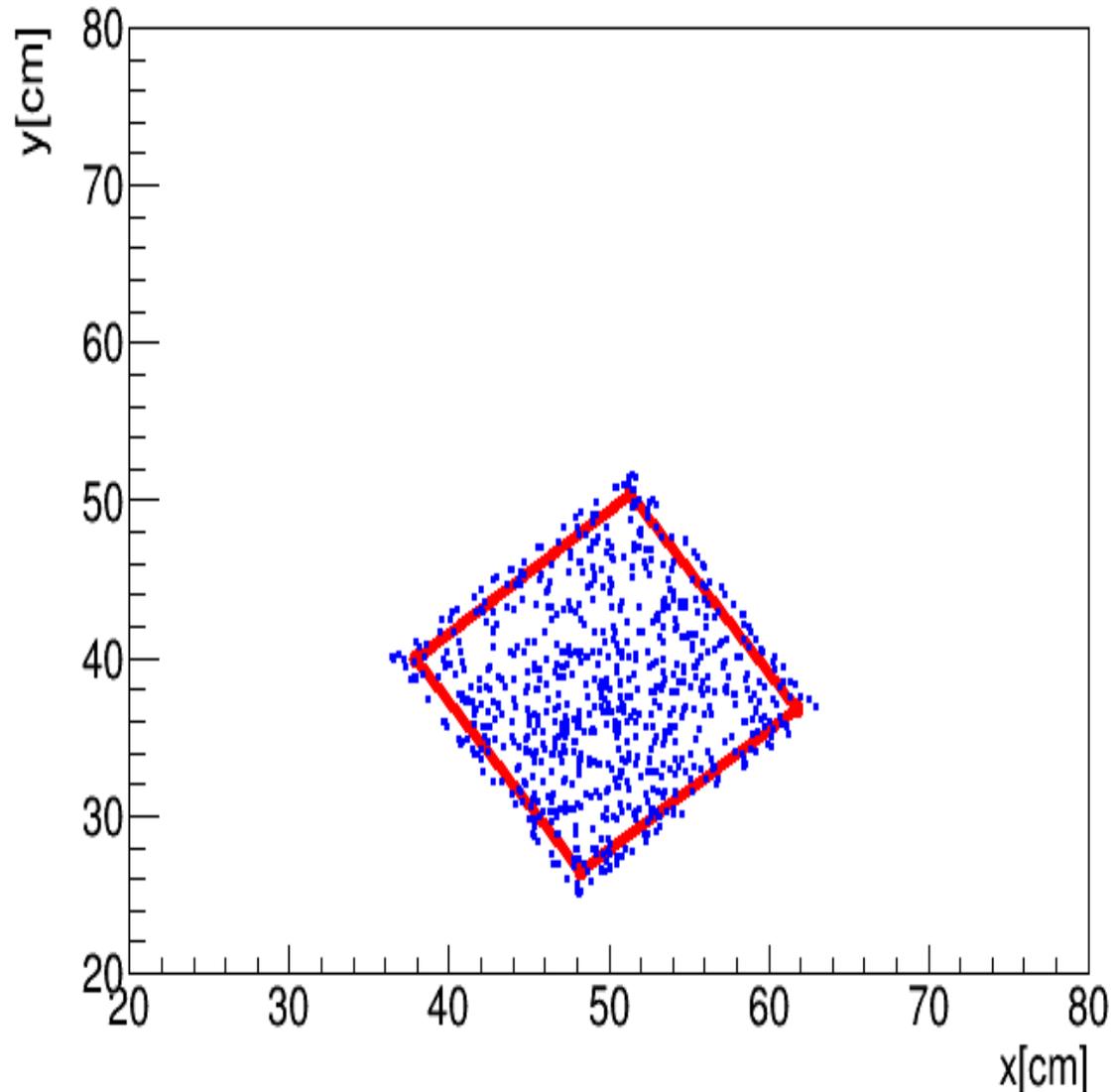
フィットが小さい



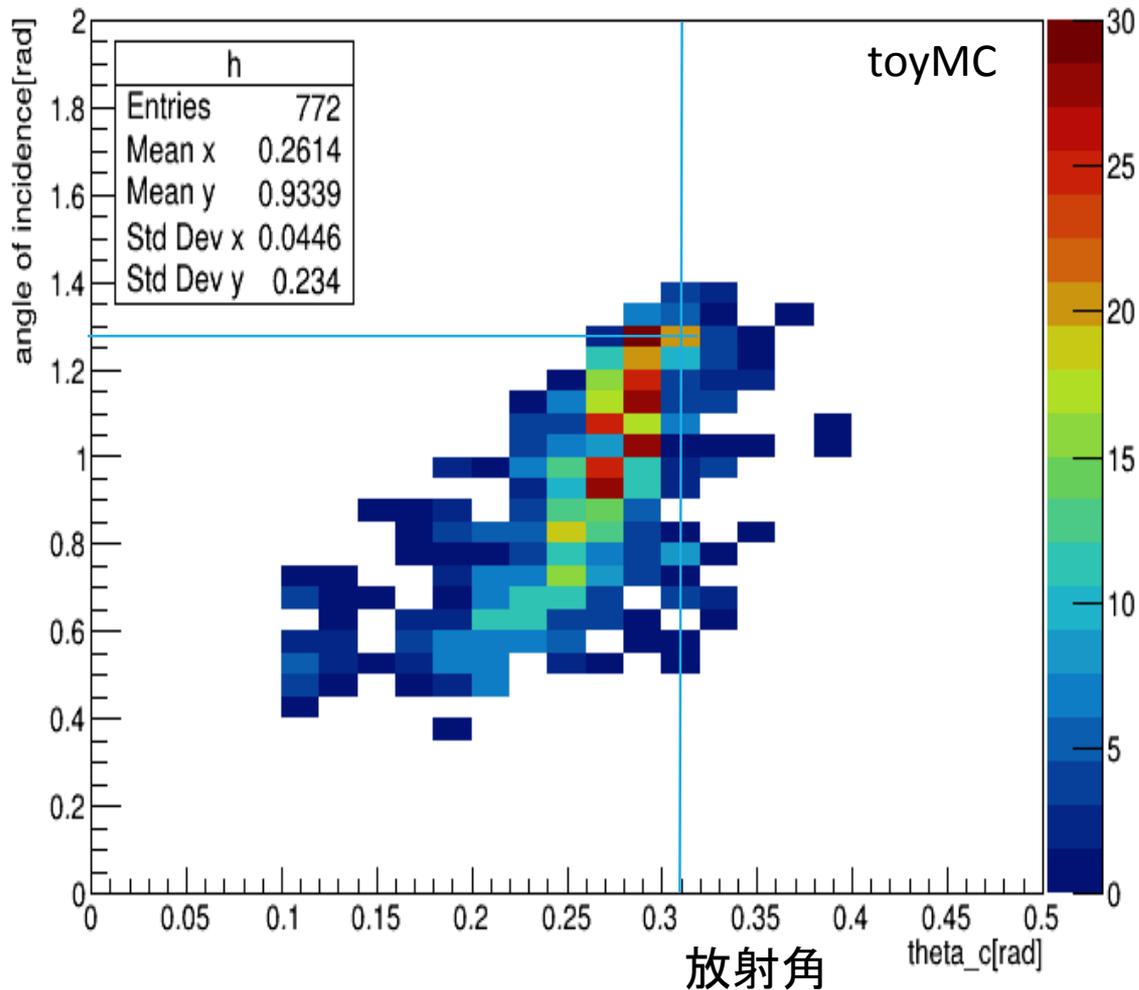
エアロゲル上の発光点

チェレンコフ光の放射角 0.31rad
光子数は平均値14のポアソン分布
 μ 粒子はエアロゲル内に一様分布

以上の条件で1000イベント作成、
Minuitを用いてFitを実行。
エアロゲル内に入ったイベントは、
772イベント。



入射角と放射角 θ_c の関係



正の相関が見える

量子効率

HAPDの量子効率

$$\eta = \frac{hc}{q\lambda} * \frac{I}{P}$$

h:プランク定数 c:真空中の光速 P:光出力
q:電子電荷 λ:波長[μm] I:電流

チェレンコフ光 発生する光子数

チェレンコフ光:透明な媒質を、その媒質中の光の伝播よりも速い荷電粒子が通過すると発生する光

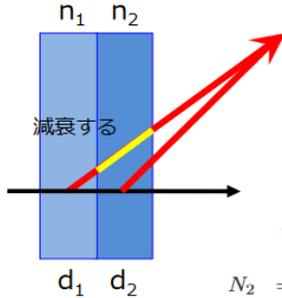
$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right)$$

α:微細構造定数
n:屈折率 λ:波長
z:入射粒子の電荷

検出光子数の理論値

引用: 岩田修一氏博士論文

検出光電子数の検証



上流ゲルからの光電子数 N_1 (下流エアロゲルでの減衰項)

$$N_1 = 2\pi\alpha \sin^2\theta_{c1} \epsilon_a \int \exp\left(-\frac{d_2}{\Lambda_2(\lambda) \cos\theta_{c1}}\right) \times \Lambda_1(\lambda) \cos\theta_{c1} \left(1 - \exp\left(-\frac{d_1}{\Lambda_1(\lambda) \cos\theta_{c1}}\right)\right) \epsilon_q(\lambda) \lambda^{-2} d\lambda,$$

下流ゲルからの光電子数 N_2

$$N_2 = 2\pi\alpha \sin^2\theta_{c2} \epsilon_a \int \Lambda_2(\lambda) \cos\theta_{c1} \left(1 - \exp\left(-\frac{d_2}{\Lambda_2(\lambda) \cos\theta_{c2}}\right)\right) \epsilon_q(\lambda) \lambda^{-2} d\lambda,$$

予測される検出光電子数

$$N_1 + N_2 = 2.79 + 7.97 = \mathbf{10.76}$$

$$\begin{aligned} n_1 &= 1.0467 \\ n_2 &= 1.0592 \end{aligned}$$

$$\text{測定値 } N = \mathbf{10.71}$$

概ね予測どおりの結果が得られた

エアロゲル内のトラックの通過距離が増えれば光子の散乱・吸収も増えるため、単純増加ではない。
11.8は少し大きく見積もっている可能性が高い。

今回の宇宙線テストの量子効率

: 32.9%

岩田さんのビームテストの量子効率

: 26.95%

光電子収率の比: 7/9

$$10.76 * \frac{32.9}{26.95} * \frac{7}{9} \approx 10.2$$

量子効率と光電子収率の違いを考慮

$$10.216 * \frac{\sqrt{(Cx-Ax)^2 + (Cy-Ay)^2 + 17^2}}{17} \approx \mathbf{11.8個}$$

斜め入射を考慮

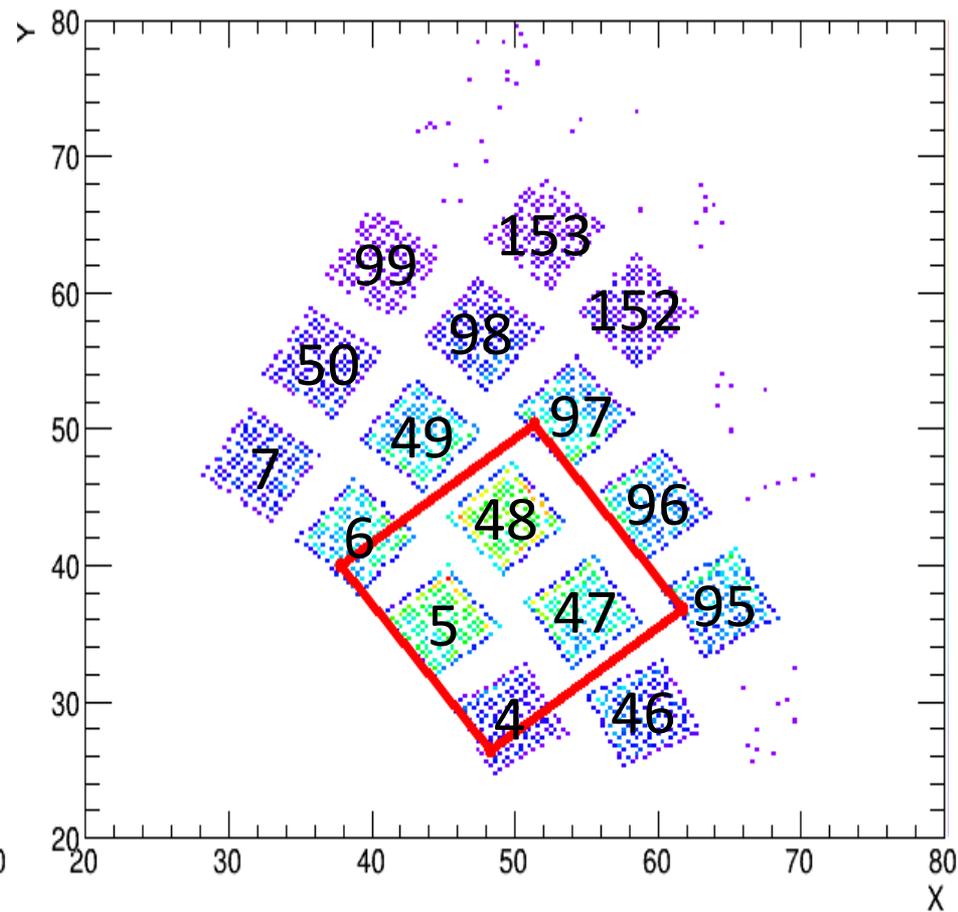
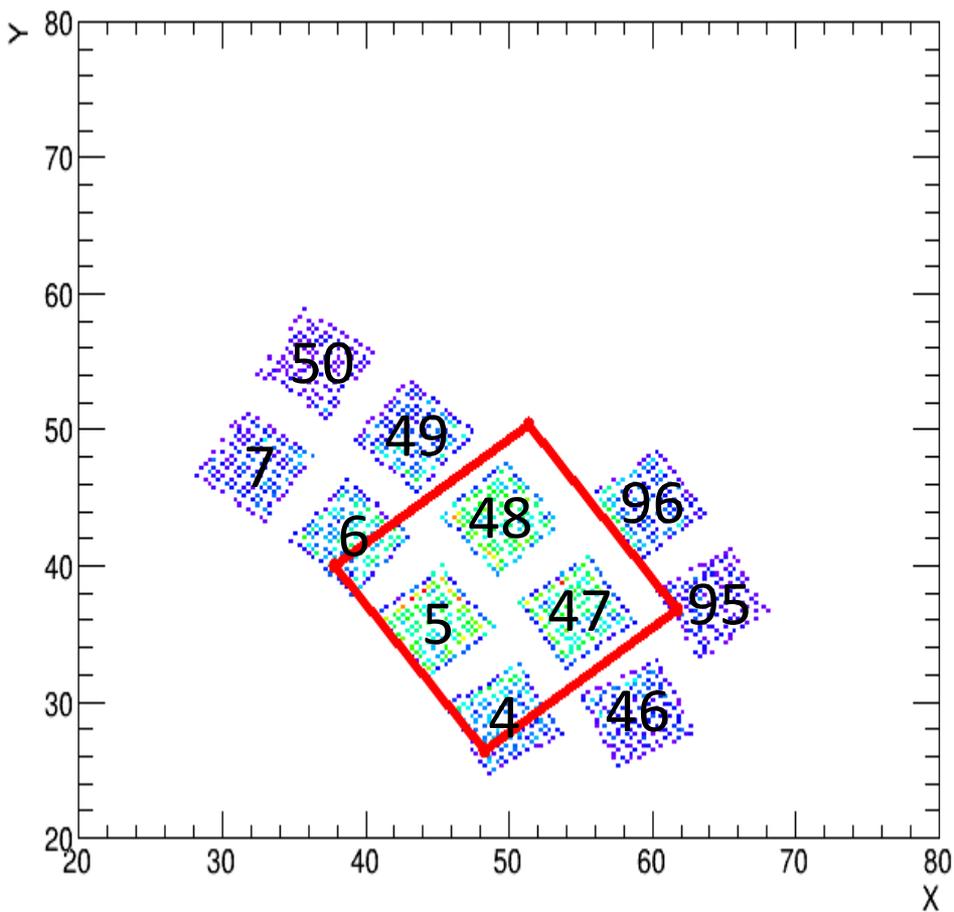
← 平均値を使用

参考文献:

岩田修一氏博士論文

Beam Test Analysis: Aerogel Study

HAPD ID



使用したHAPD

位置番号	個体名	QE[%]
4	KA1043	32.3
5	ZJ6731	37.6
6	KA0520	35.3
7	KA0540	35.3
46	KA1121	39.5
47	ZJ5862	27.3
48	KA1077	34.1
49	KA0696	29.8
50	KA0888	32.8
94	KA0987	30.3
95	KA0309	35.4
96	KA0840	34
97	KA0447	31.2

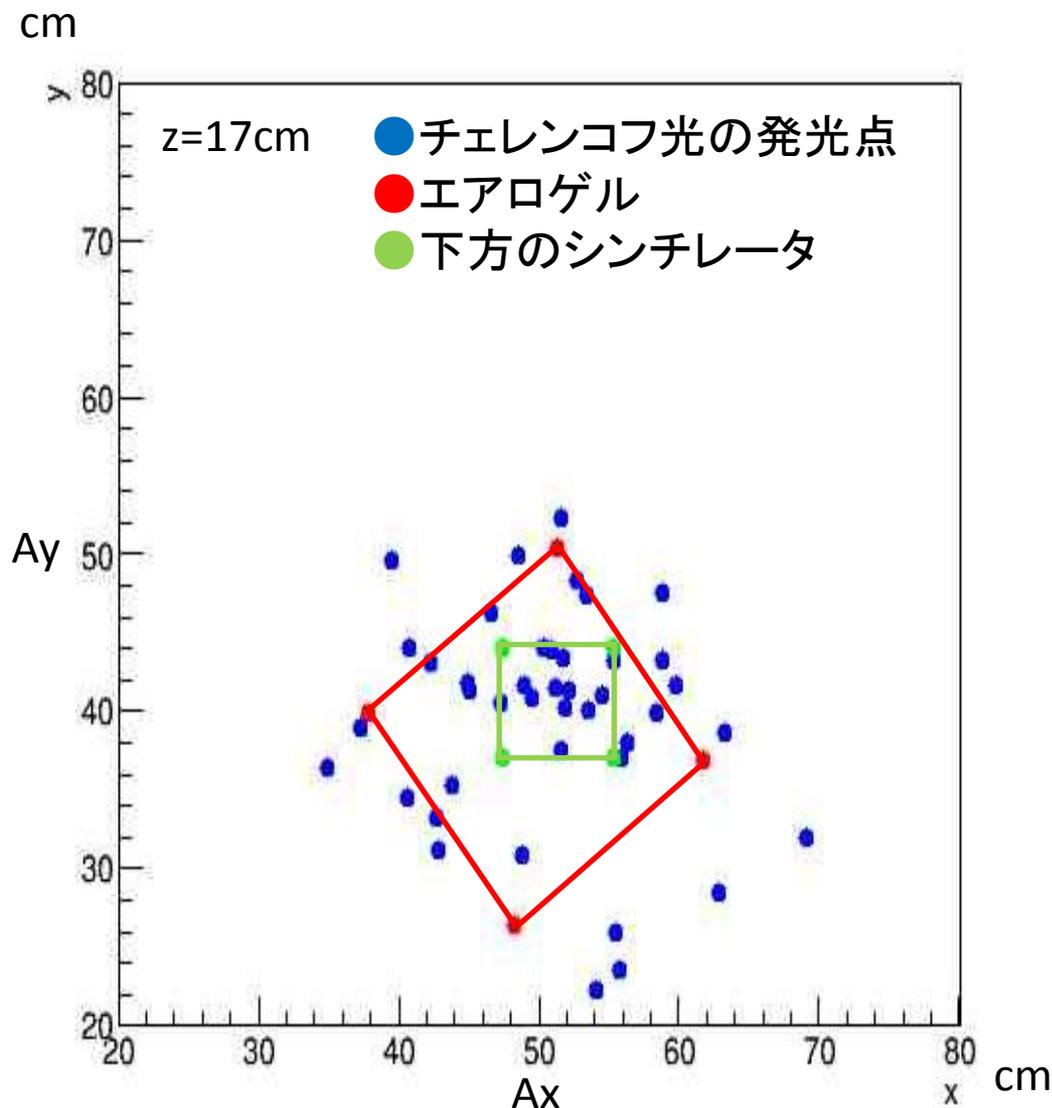
位置番号	個体名	QE[%]
98	KA0203	32.2
99	KA0667	26.9
150	KA0903	32.8
151	KA1096	32.6
152	KA0785	36.5
153	ZJ7888	30.9
154	ZJ7464	34.6
213	KA1094	32
214	KA1024	35.6
215	KA0466	27.7

■ 2016/11/17 HAPDの量子効率平均: 33.9%
■ 2017/1/17 HAPDの量子効率平均: 32.9%

エアロゲルからはみ出す理由

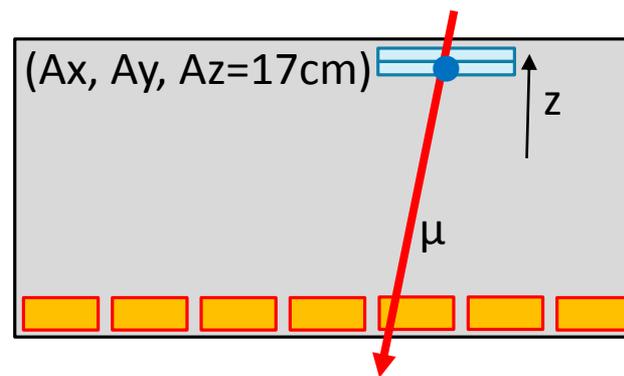
2016/11/17のデータ

エアロゲル上の発光点

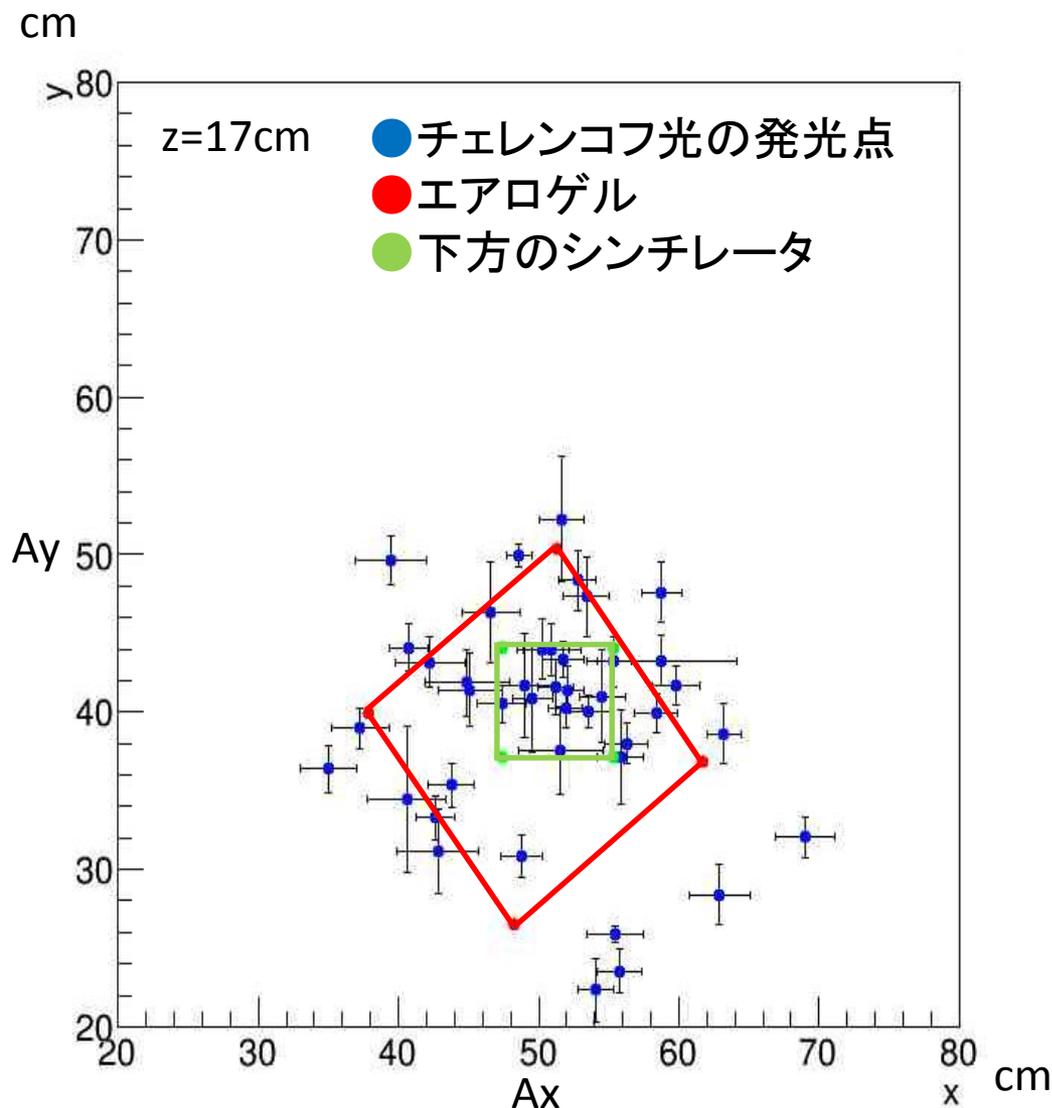


円、楕円に見える42イベントを選んでFitし、エアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

下方のシンチレータの位置は11/17にこの位置であったかが確かでない。



エアロゲル上の発光点

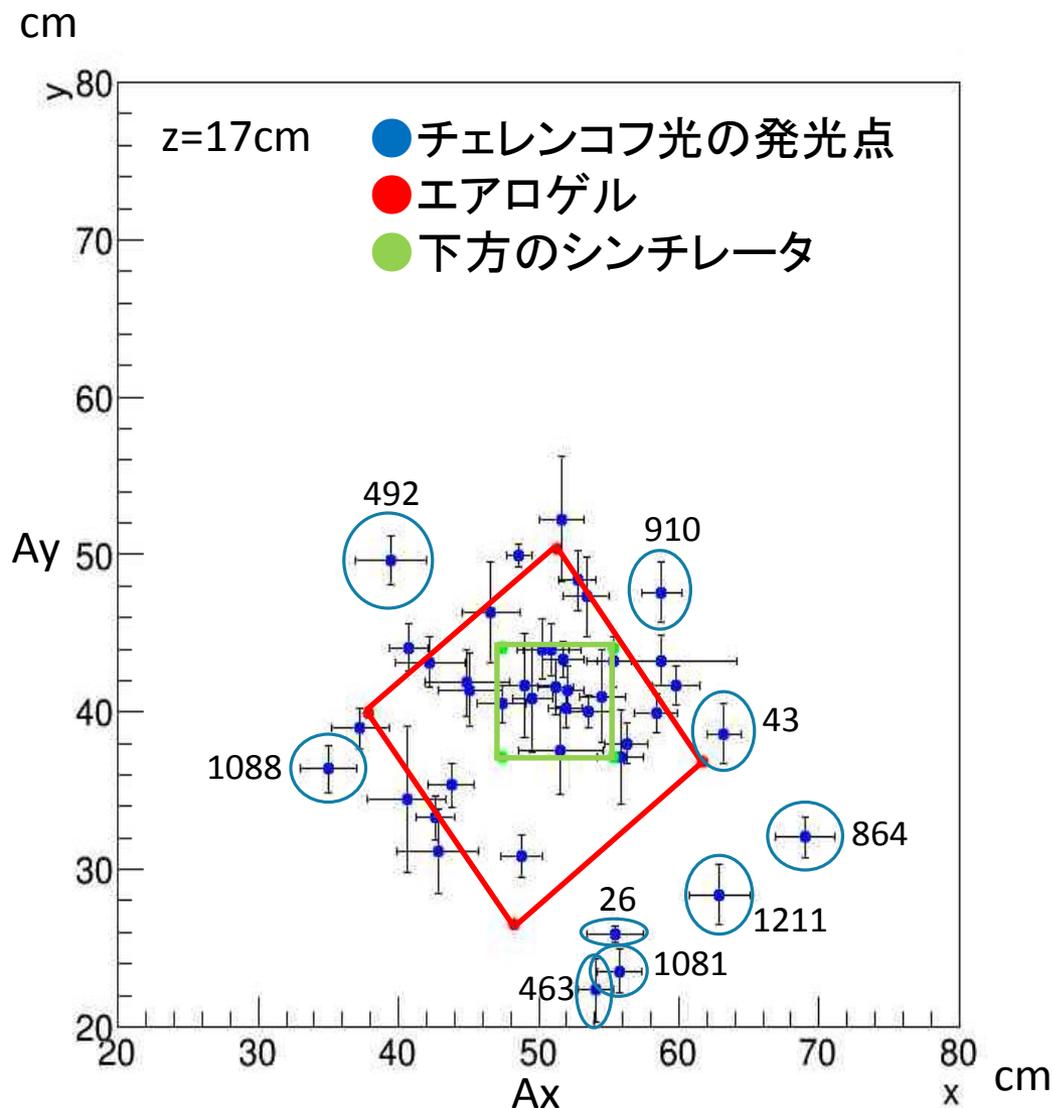


円、楕円に見える42イベントを選んでFitし、エアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

下方のシンチレータの位置は11/17にこの位置であったかが確かでない。

誤差付き。
誤差を考慮してもエアロゲル外にFitされたものが9イベント。

エアロゲル上の発光点

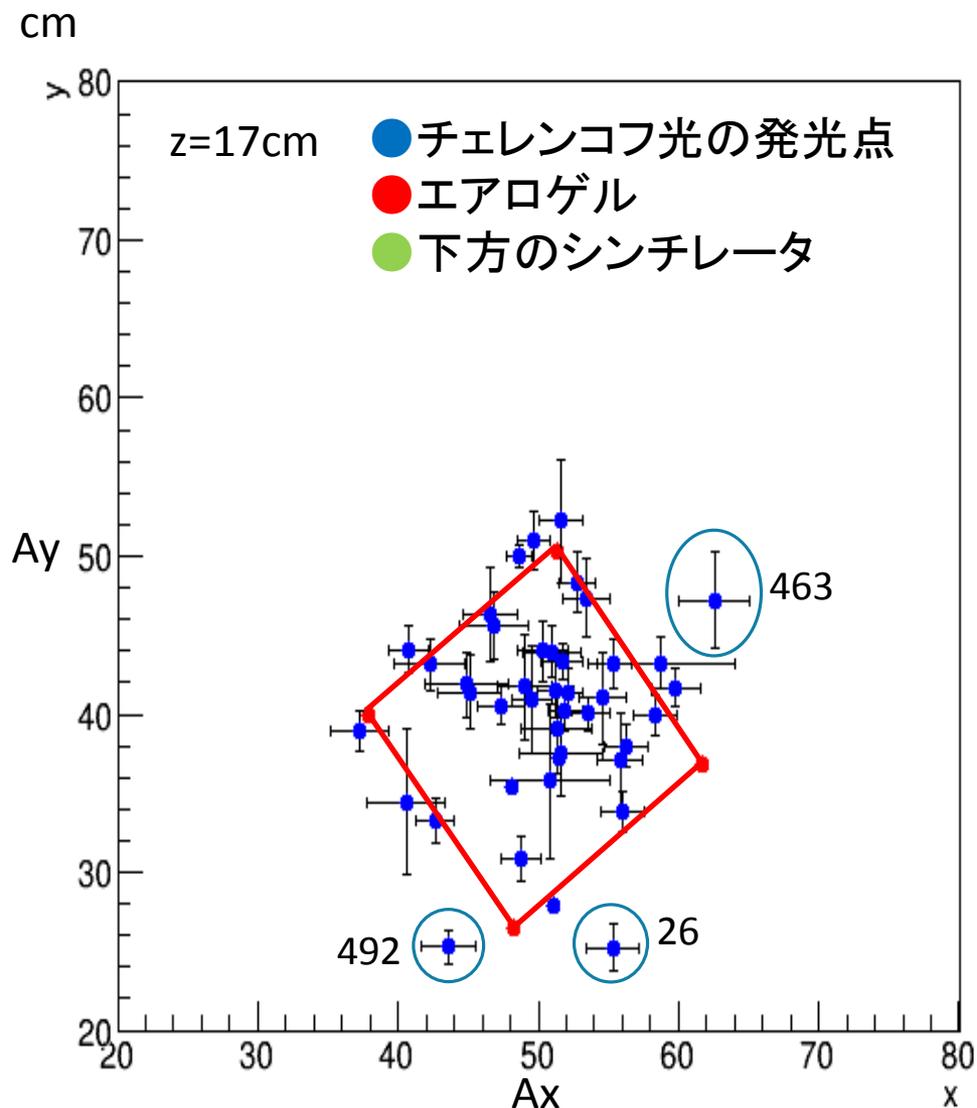


円、楕円に見える42イベントを選んでFitし、エアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

下方のシンチレータの位置は11/17にこの位置であったかが確かでない。

誤差付き。
誤差を考慮してもエアロゲル外にFitされたものが9イベント。

エアロゲル上の発光点



円、楕円に見える42イベントを選んでFitし、エアロゲル上のチェレンコフ光の発光点を調べた。

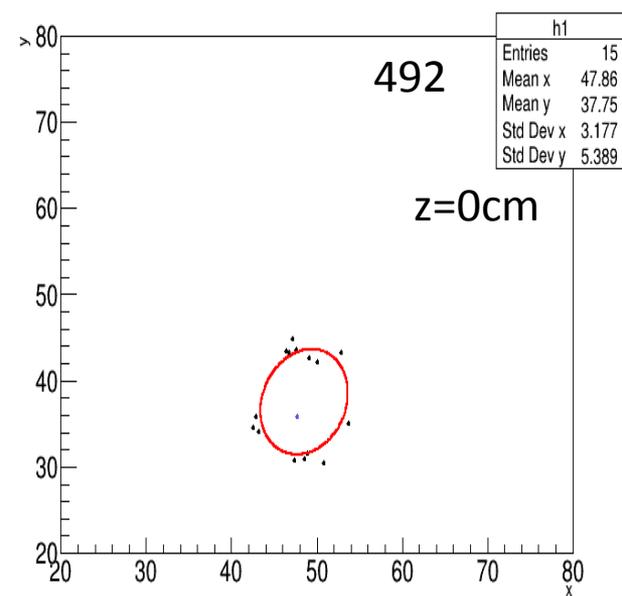
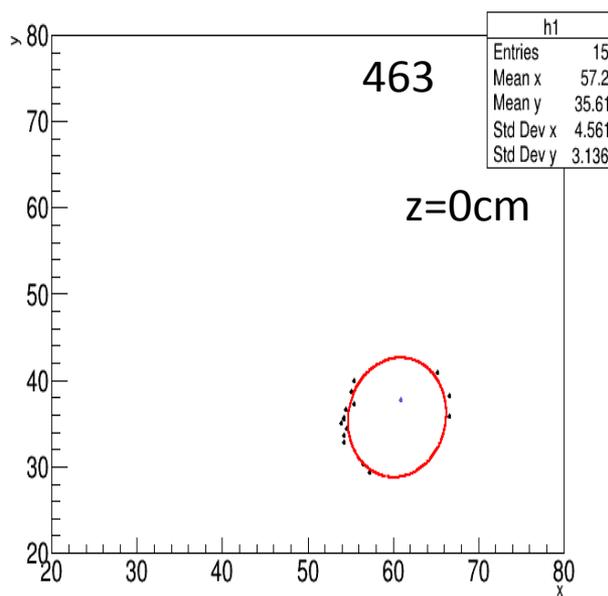
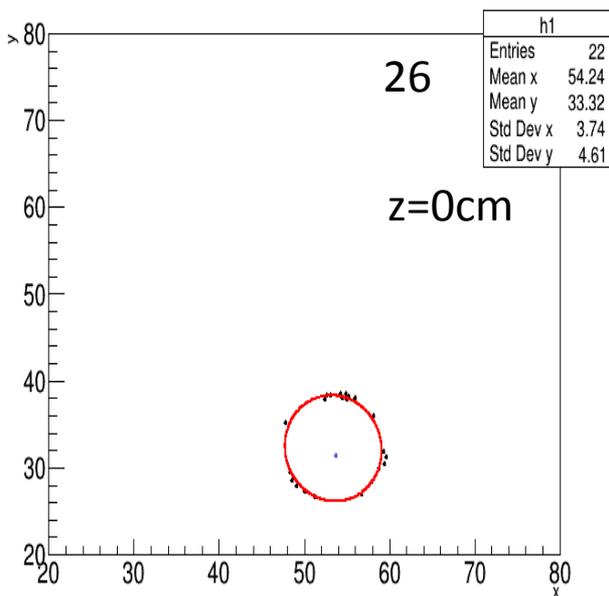
誤差を考慮してもエアロゲル外にFitされたものが3イベント。

エアロゲルのパラメータの範囲を狭くする。
選ぶ点を変える。
中心点の初期値を変える。
↓
Fit結果は大きく変わる。

463,492はat limit となりFitが完成していなかった

Minuit実行結果

エアロゲル外のイベント



Event463, 492

At limitとなりFitができていない。

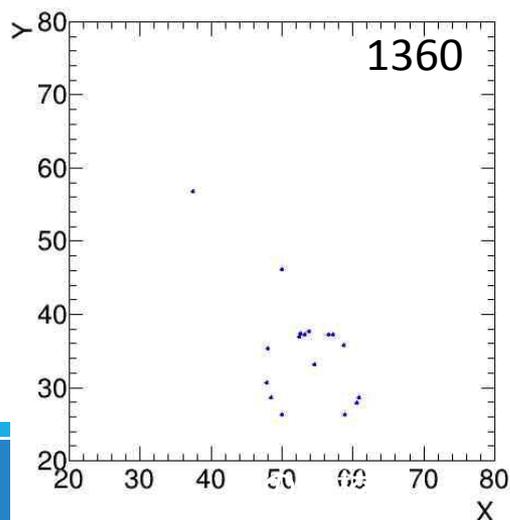
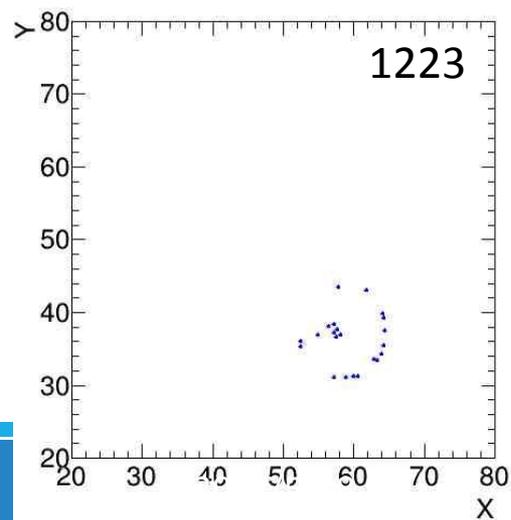
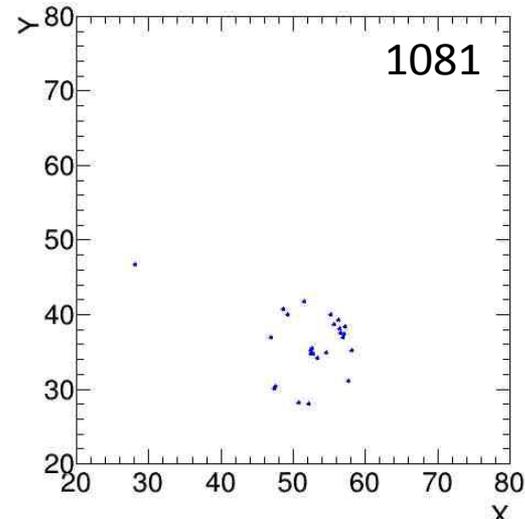
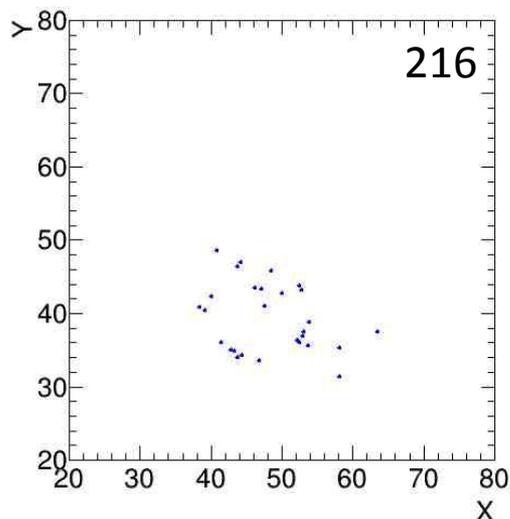
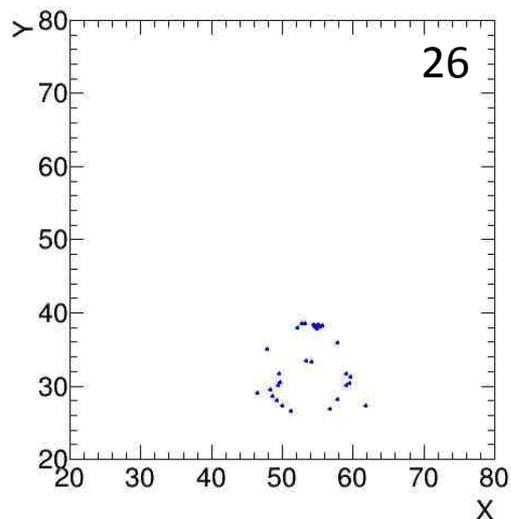
Fitに使用する点を1点でも変更するとFitting結果が大きく変わる。
ノイズによって左右されていると考えられ、正しいFittingが困難。

選んだリングと選んだ点 Fitの結果

チェレンコフ光のリング

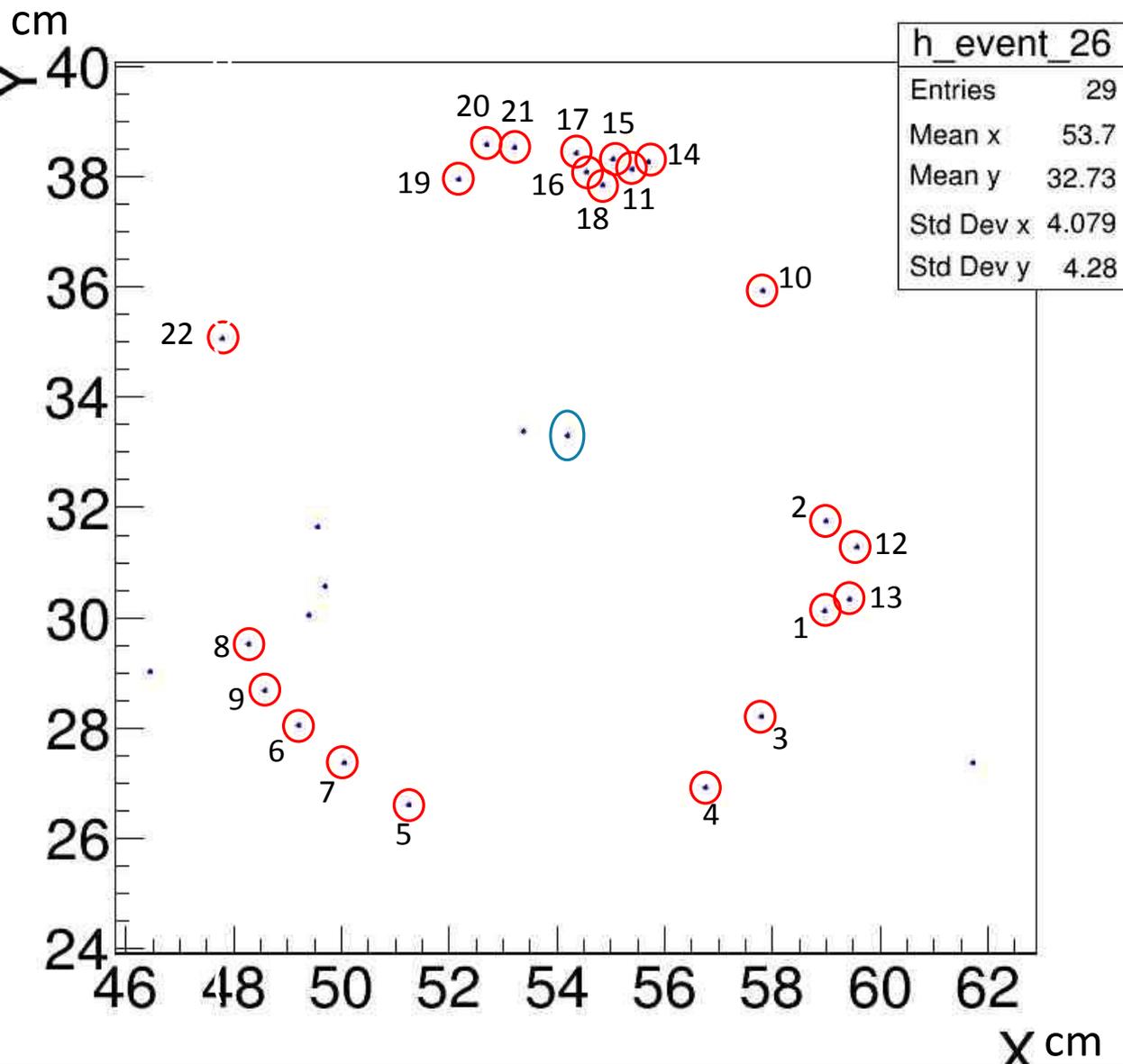
5ヒット以上のヒット点があるイベントの全1374イベントを1イベントずつ表示し、円が見えているものを探した。

その中から円の中心付近にヒット点が見えているものを選んだ。



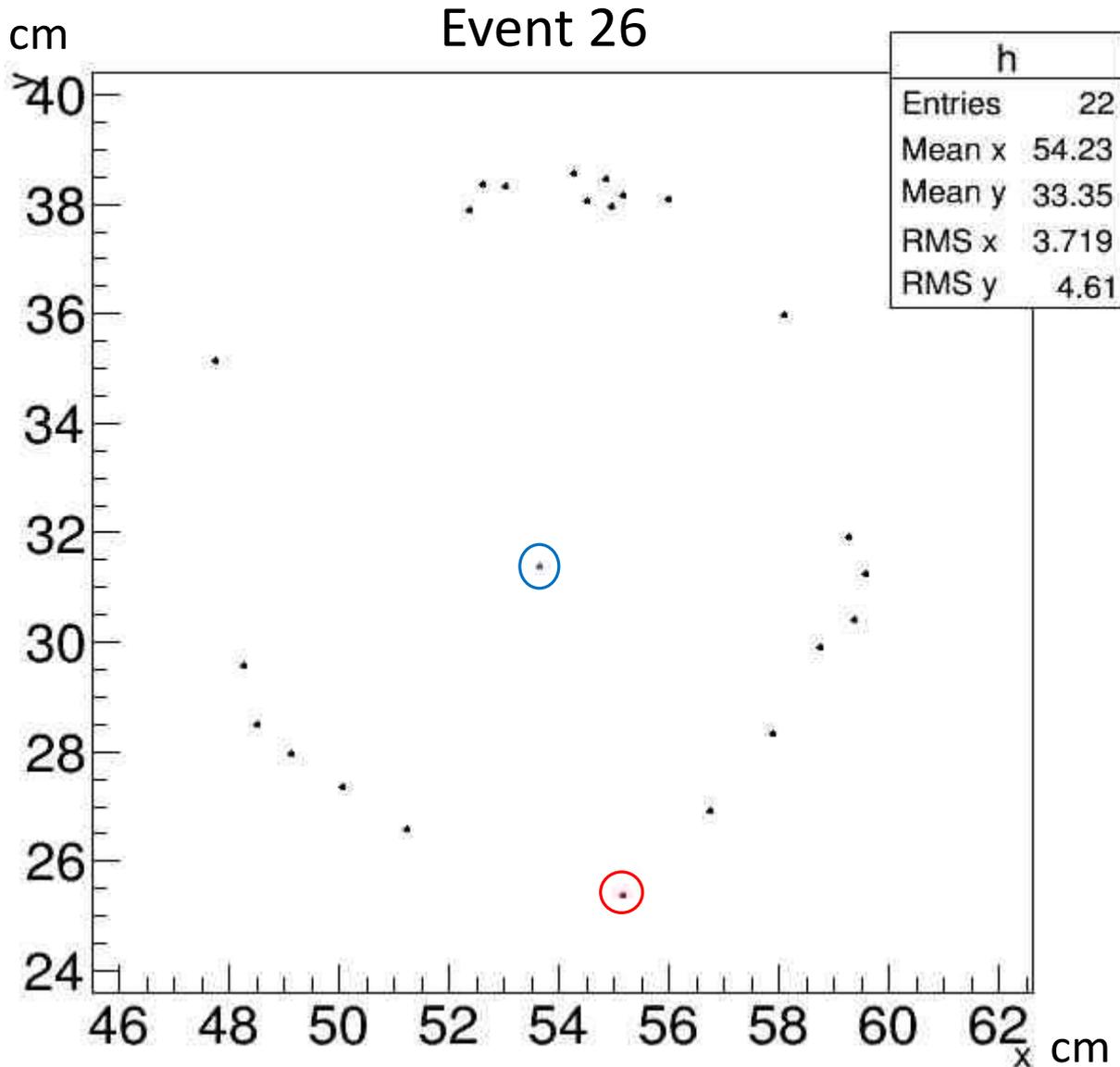
分割数200

チェレンコフ光のリング (座標)



1	(58.9476, 35.0639)
2	(59.1857, 31.8297)
3	(57.9584, 28.214)
4	(56.8117, 27.0799)
5	(51.3923, 26.3458)
6	(49.1041, 27.9692)
7	(50.0558, 35.9082)
8	(48.2641, 29.4241)
9	(48.7741, 28.5408)
10	(58.0063, 35.9082)
11	(55.3748, 38.0105)
12	(59.4113, 31.3723)
13	(59.405, 30.2319)
14	(55.7989, 38.2939)
15	(55.0915, 38.4346)
16	(54.6674, 38.1512)
17	(54.3841, 38.5753)
18	(54.9508, 37.7272)
19	(52.2798, 37.7826)
20	(53.1279, 38.3493)
21	(52.4205, 38.49)
22	(47.7699, 35.0639)

チェレンコフ光のリング (結果)



円の中心点の初期値

$C_x=54.0651$

$C_y=33.2748$

Minuit 結果

エアロゲル発光点 ○

$A_x=55.328 \pm 1.86156$

$A_y=25.2484 \pm 2.41677$

円の中心点 ○

$C_x=53.7102 \pm 0.226804$

$C_y=31.1698 \pm 0.241535$

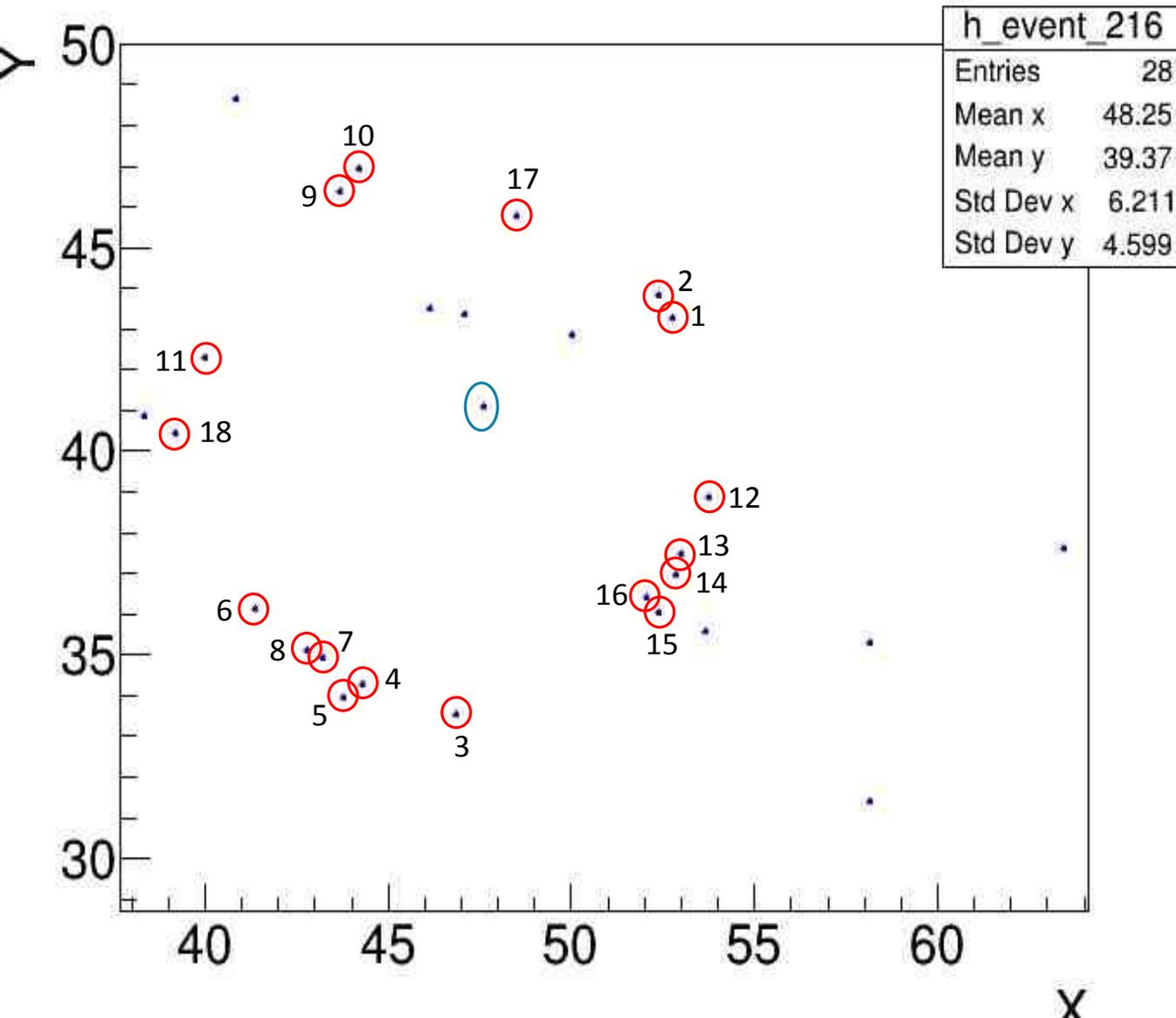
$\theta_c=0.284915 \pm 0.0162471$

$\chi^2=10.8053$

μ 粒子の軌跡

(-1.6178, -2.105, -17)

チェレンコフ光のリング (座標)



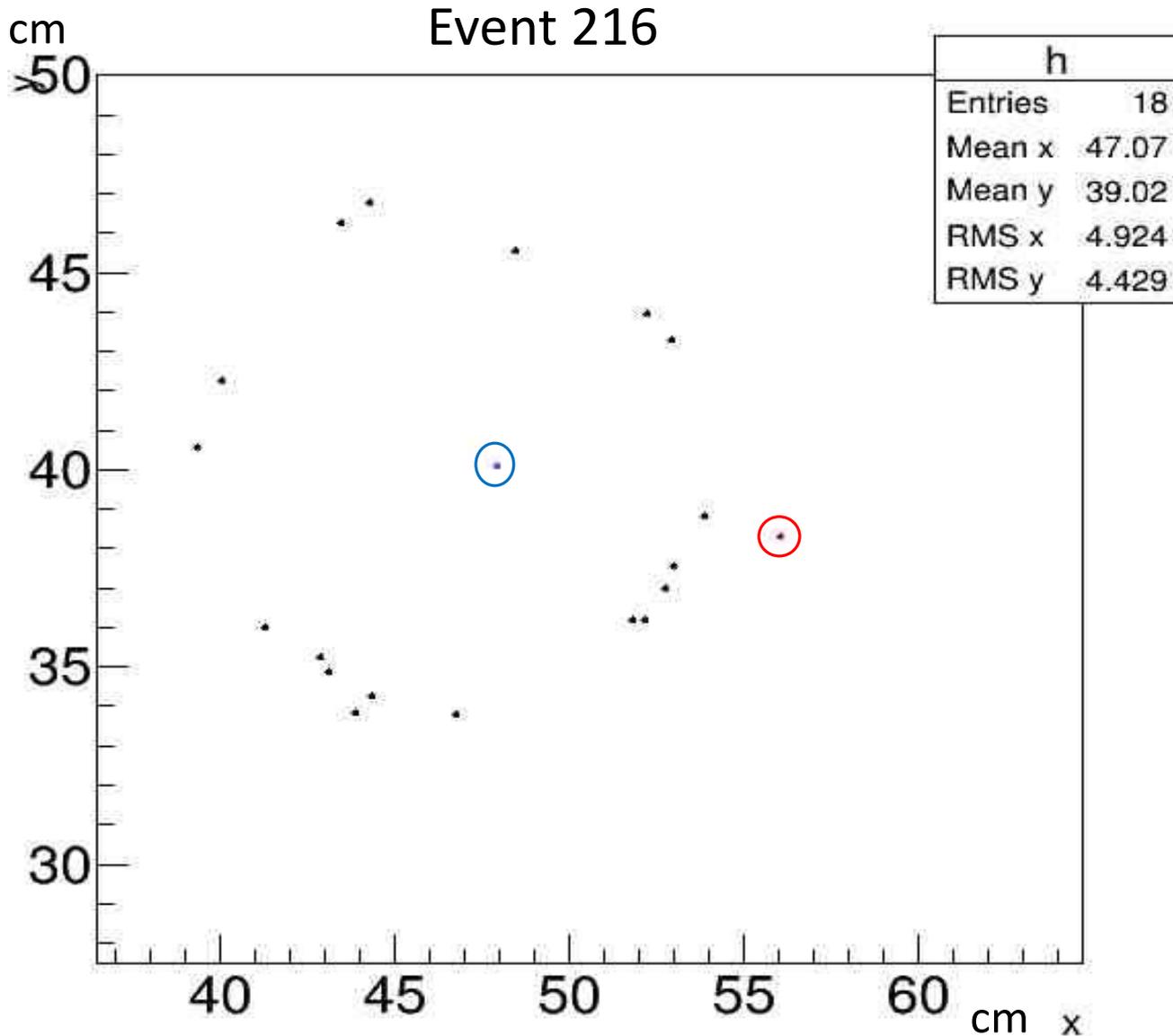
- 1 (52.8231, 43.1723)
- 2 (52.1506, 43.9392)
- 3 (46.8917, 33.7112)
- 4 (44.3063, 34.2587)
- 5 (43.9076, 33.9407)
- 6 (41.5074, 36.1324)
- 7 (43.1781, 34.8555)
- 8 (42.8601, 35.2542)
- 9 (43.6109, 46.1341)
- 10 (44.2833, 46.9009)
- 11 (39.8212, 42.4318)
- 12 (53.6767, 38.716)
- 13 (52.9872, 37.6419)
- 14 (52.8465, 36.9345)
- 15 (52.2818, 35.9438)
- 16 (51.9984, 36.3679)
- 17 (48.5475, 45.7273)
- 18 (39.4262, 40.5065)

円の中心点 (初期値)

Cx=47.5309

Cy=41.2445

チェレンコフ光のリング (結果)



Minuit 結果

エアロゲル発光点 ○
 $A_x = 56.2593 \pm 1.5285$
 $A_y = 38.0062 \pm 1.30815$

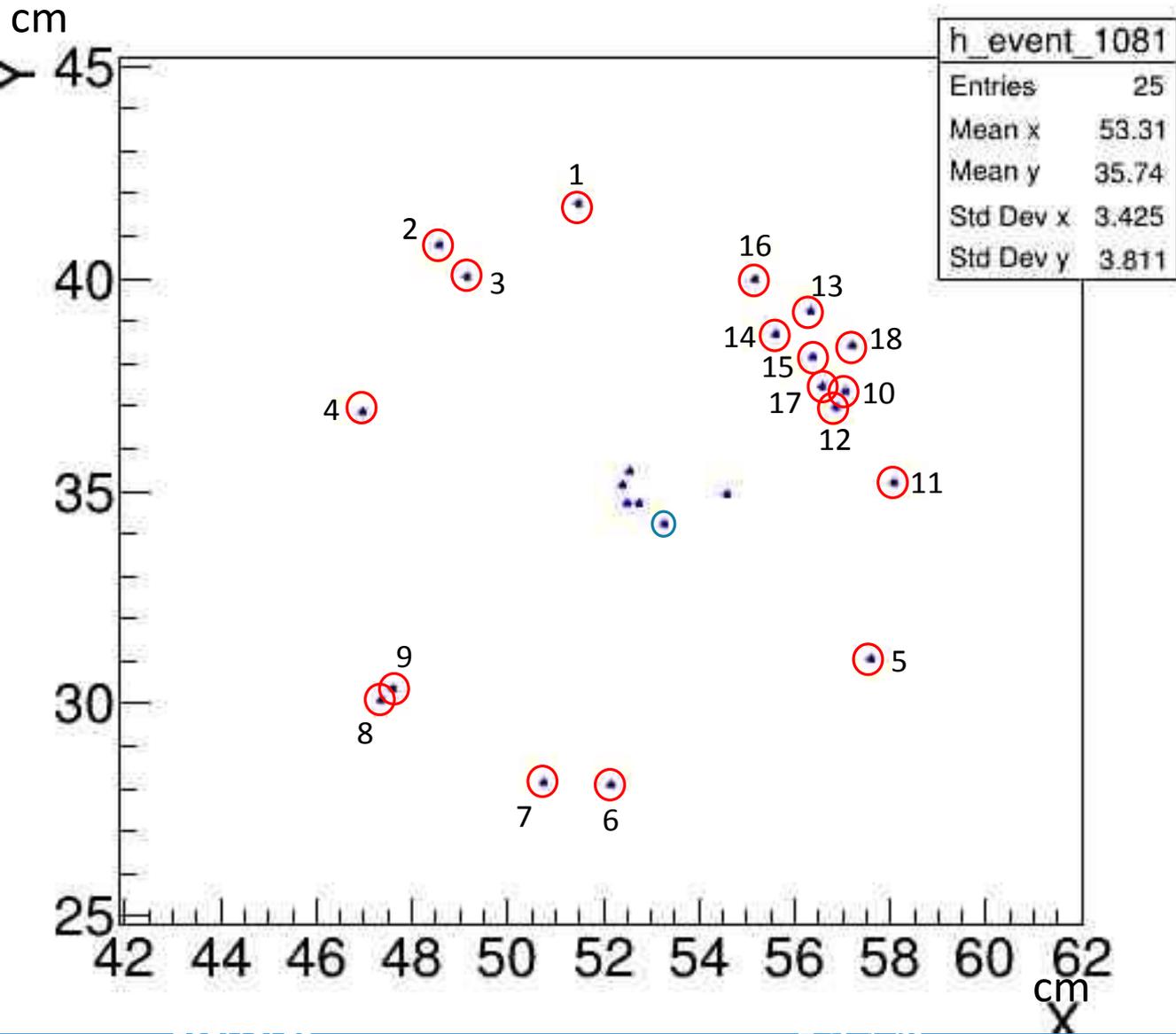
円の中心点 ○
 $C_x = 48.1021 \pm 0.169695$
 $C_y = 39.8518 \pm 0.218841$

$\theta_c = 0.283576 \pm 0.0181754$

$\chi^2 = 13.1472$

μ 粒子の軌跡
(-8.1572, 1.8456, -17)

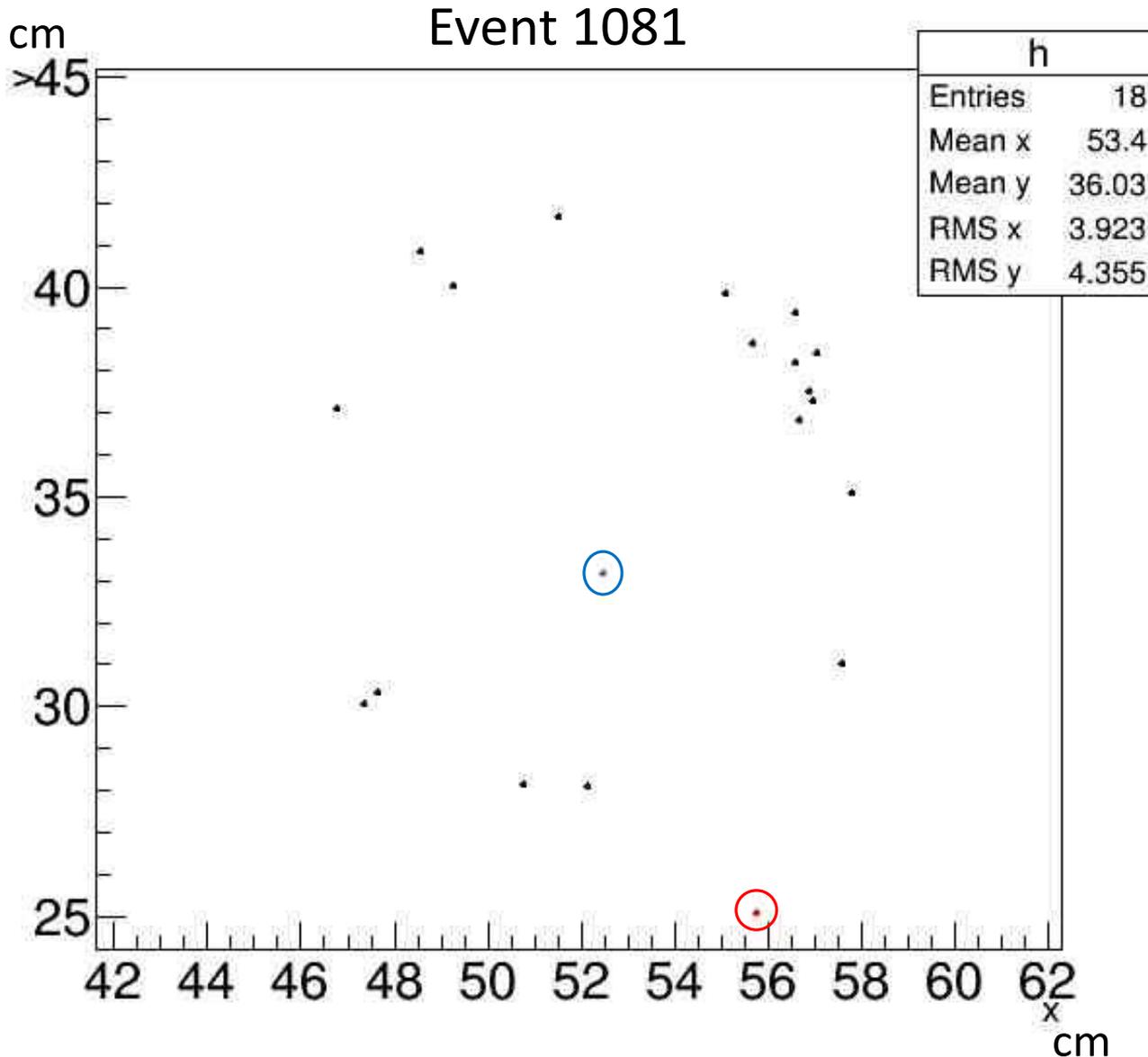
チェレンコフ光のリング (座標)



- 1 (51.2893, 41.8273)
- 2 (48.5868, 40.8139)
- 3 (49.2594, 40.047)
- 4 (46.8967, 36.9768)
- 5 (57.679, 31.0867)
- 6 (52.2074, 27.9942)
- 7 (50.814, 28.3675)
- 8 (47.3124, 30.3075)
- 9 (47.7541, 30.3075)
- 10 (57.1536, 37.1803)
- 11 (57.8656, 35.2008)
- 12 (56.7322, 36.897)
- 13 (56.3636, 39.2846)
- 14 (55.5155, 38.4365)
- 15 (56.5063, 38.1532)
- 16 (55.3729, 39.8494)
- 17 (56.8729, 37.1803)
- 18 (56.9303, 38.4365)

円の中心点 (初期値)
Cx=53.4985
Cy=34.1229

チェレンコフ光のリング (結果)



Minuit 結果

エアロゲル発光点 ○
 $A_x = 55.7145 \pm 1.58304$
 $A_y = 25.0000 \pm 0.573802$

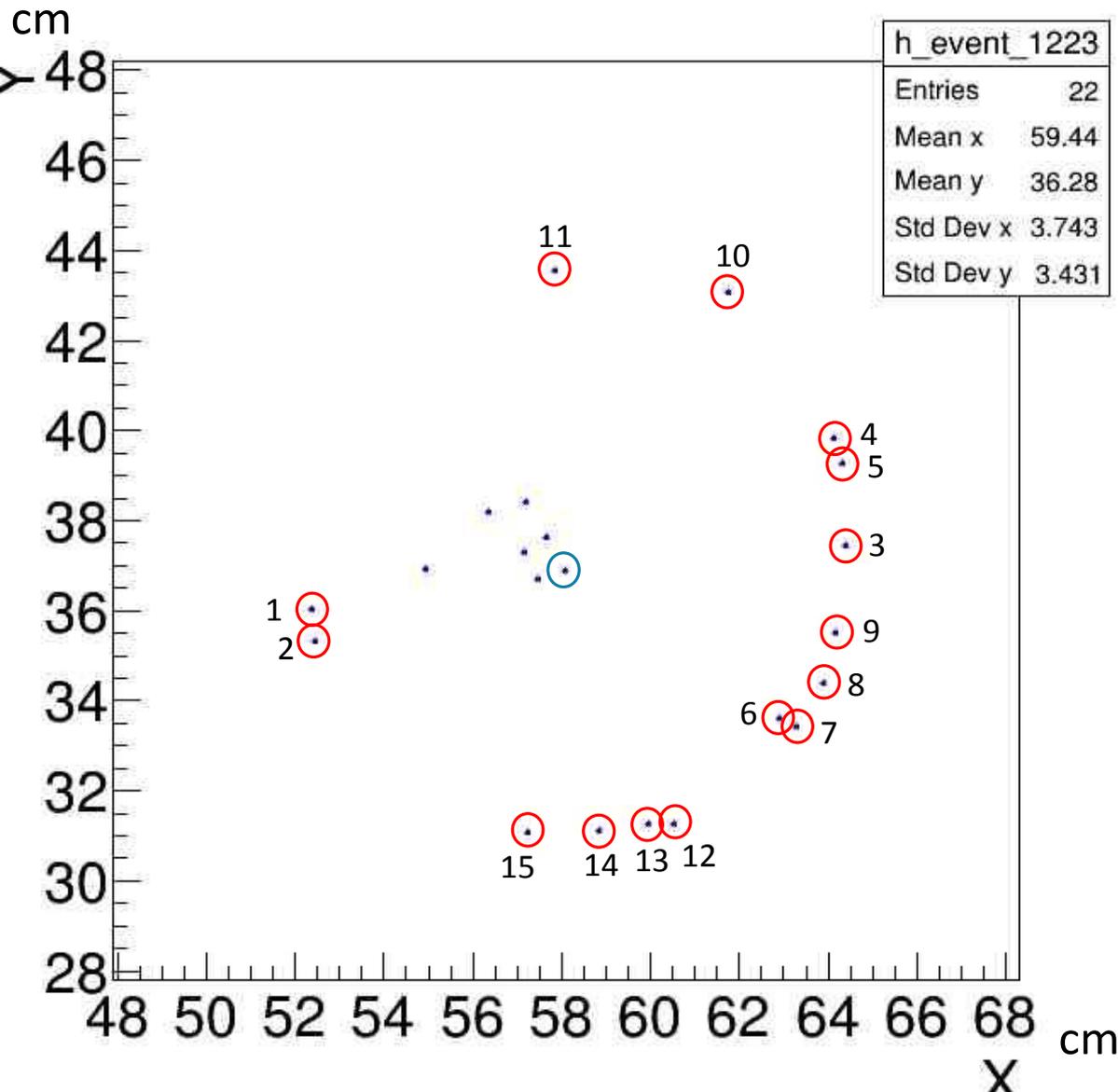
円の中心点 ○
 $C_x = 52.5463 \pm 0.247160$
 $C_y = 33.1013 \pm 0.102716$

$\theta_c = 0.260529 \pm 0.00597436$

$\chi^2 = 23.3981$

μ 粒子の軌跡
(-0.9522, 8.1013, -17)

チェレンコフ光のリング (座標)



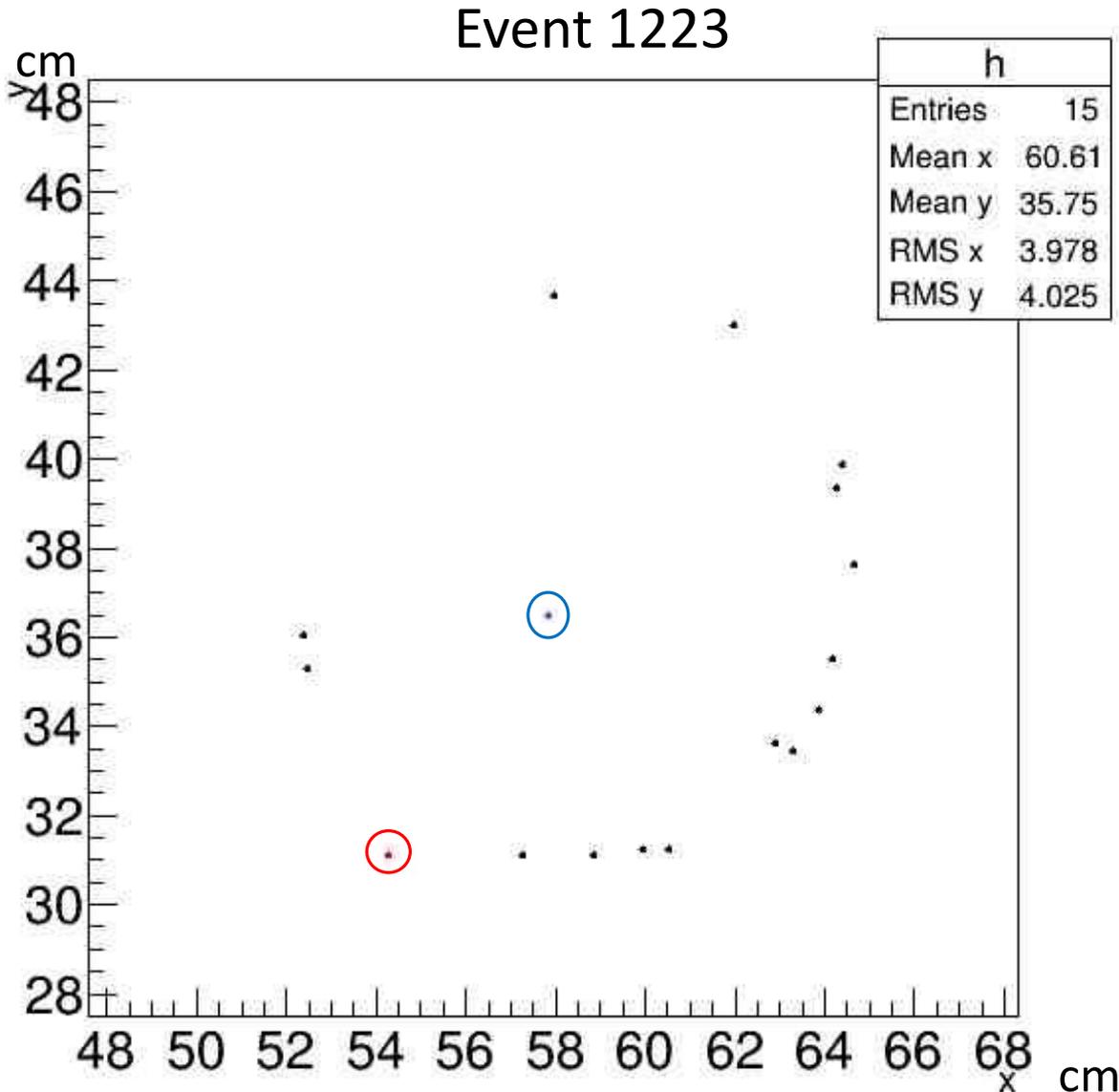
- 1 (52.2818, 35.9438)
- 2 (52.5651, 35.5198)
- 3 (64.5271, 37.6358)
- 4 (64.3905, 39.9125)
- 5 (64.2038, 39.2158)
- 6 (63.0972, 33.6925)
- 7 (63.3522, 33.2508)
- 8 (63.9805, 34.2025)
- 9 (64.3539, 35.5959)
- 10 (61.743, 43.0113)
- 11 (57.9649, 43.5647)
- 12 (60.5517, 31.366)
- 13 (60.0943, 31.1405)
- 14 (58.9539, 31.1467)
- 15 (57.2216, 30.8611)

円の中心点 (初期値)

$C_x=57.8637$

$C_y=37.0396$

チェレンコフ光のリング (結果)



Minuit 結果

エアロゲル発光点 ○
 $A_x = 54.4859 \pm 2.19011$
 $A_y = 31.0166 \pm 1.87999$

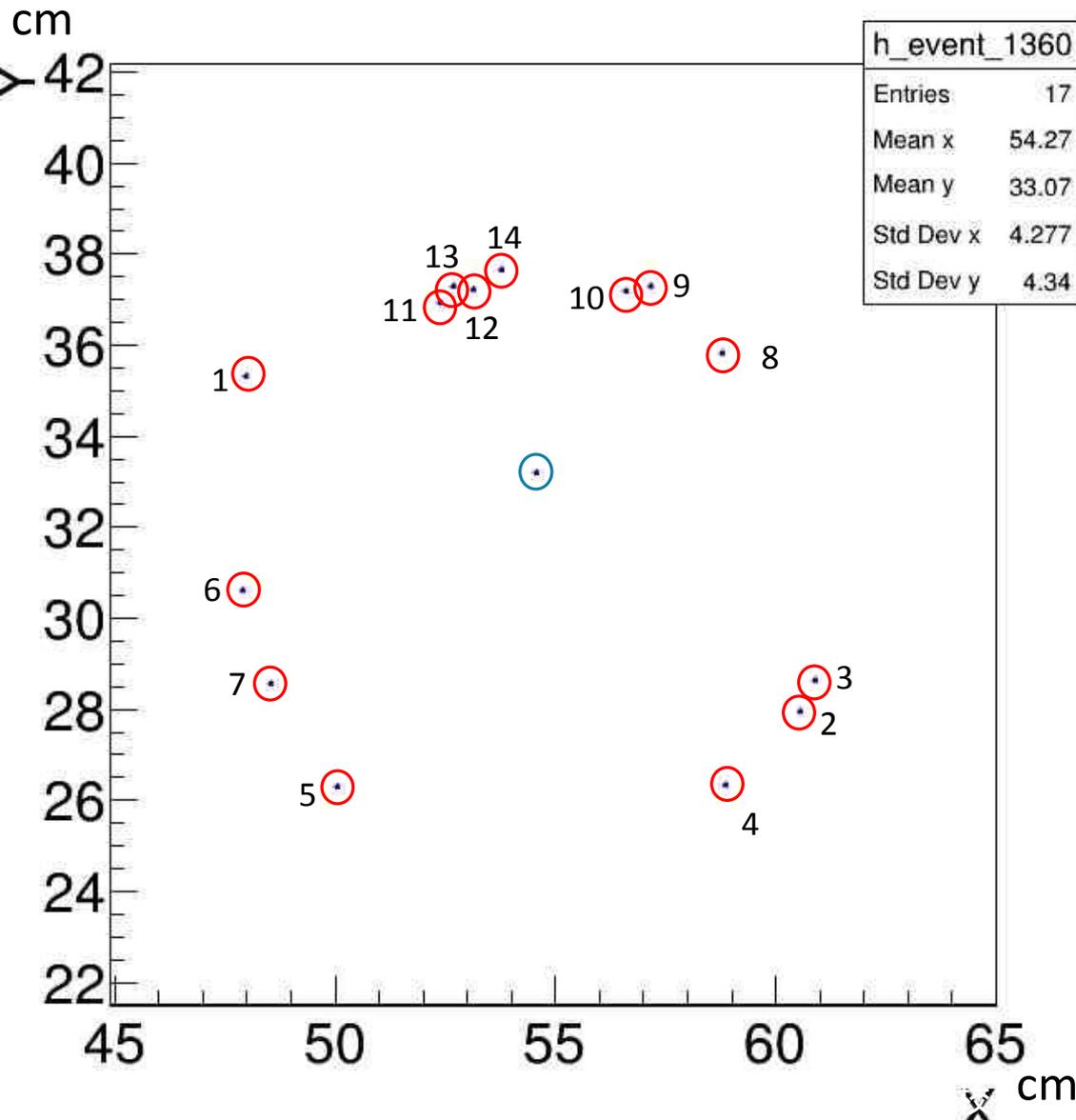
円の中心点 ○
 $C_x = 57.8784 \pm 0.280781$
 $C_y = 36.2797 \pm 0.272676$

$\theta_c = 0.362797 \pm 0.0240599$

$\chi^2 = 4.93616$

μ 粒子の軌跡
(3.3925, 5.2631, -17)

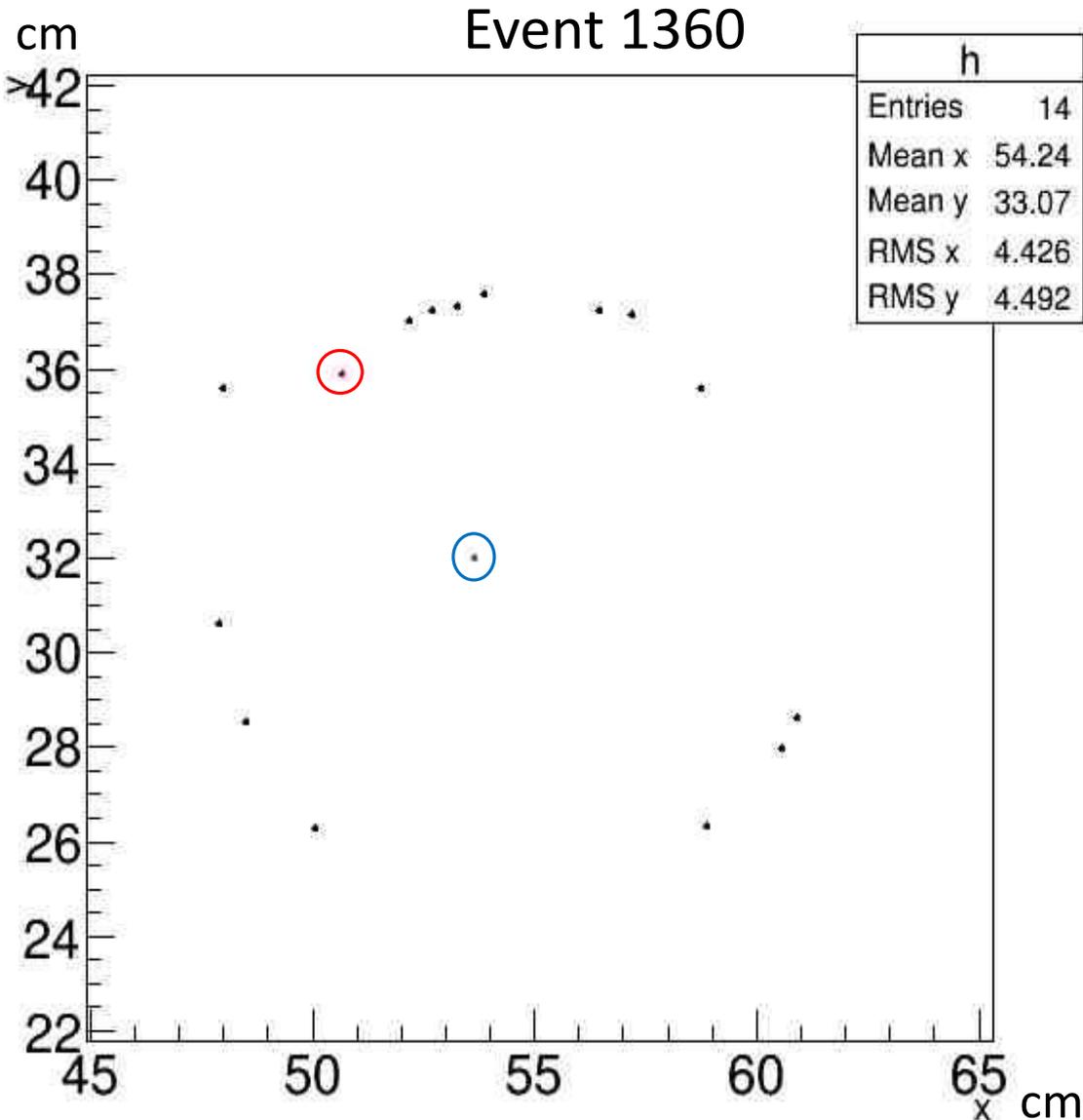
チェレンコフ光のリング (座標)



1	(48.1686, 35.3819)
2	(60.5992, 27.8104)
3	(60.8311, 28.4933)
4	(58.8606, 26.3843)
5	(50.1241, 26.2025)
6	(48.1958, 30.5625)
7	(48.7741, 28.5408)
8	(58.7137, 35.7675)
9	(57.1563, 37.1803)
10	(56.4489, 37.3211)
11	(52.1391, 37.0752)
12	(53.2706, 37.2179)
13	(52.5632, 37.3586)
14	(53.6946, 37.5012)

円の中心点 (初期値)
Cx=54.7725
Cy=33.1341

チェレンコフ光のリング (結果)



Minuit 結果

エアロゲル発光点 \circ
 $A_x = 50.8680 \pm 4.03674$
 $A_y = 35.7534 \pm 4.63597$

円の中心点 \circ
 $C_x = 53.8172 \pm 1.15281$
 $C_y = 31.8511 \pm 0.596329$

$\theta_c = 0.321858 \pm 0.0307686$

$\chi^2 = 28.1445$

μ 粒子の軌跡

(2.9492, -3.9023, -17)

選んでいないイベントの例

