

スーパーカミオカンデでの ニュートロン崩壊で探る 新物理

2017/3/11

ニュートリノ物理班

日色 史奈
大矢 淳史

水町 亮介
中島 立稀
ハン スンホ

目的

	第一世代(first)	第二世代(second)	第三世代(third)
レプトン LEPTON	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ
クォーク QUARK	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム

MNS行列による混合
(ニュートリノ振動)

混合は未発見 → 新物理！

CKM行列による混合

→ 今回はミューオンの崩壊に注目

レプトン数の保存

レプトン世代数	+1	-1
第一世代 L_e	e^- 、 ν_e	e^+ 、 $\bar{\nu}_e$
第二世代 L_μ	μ^- 、 ν_μ	μ^+ 、 $\bar{\nu}_\mu$
第三世代 L_τ	τ^- 、 ν_τ	τ^+ 、 $\bar{\nu}_\tau$

➤ それぞれの世代でレプトン数の和は保存
(ニュートリノ振動は例外)

➤ μ 通常崩壊では $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

$$L_\mu \quad 1 \quad = \quad 0 + 0 + 1$$

$$L_e \quad 0 \quad = \quad 1 + (-1) + 0$$

➡ 崩壊前後で
レプトン数の和は保存

μ の崩壊

μ 粒子の通常崩壊

- ▶ $\text{Br}(\mu \rightarrow e \nu \nu) \sim 100 \%$
- ▶ $\text{Br}(\mu \rightarrow e \nu \nu \gamma) = 1.4 \% (E_\gamma > 10 \text{ MeV})$ ←エネルギー閾値に依る
(Branching ratio : 分岐比)

Lepton Flavor Violation (LFV)

- ▶ $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (by MEG実験 (2016))
- ▶ 標準理論 (SM) + ニュートリノ振動 で起こる

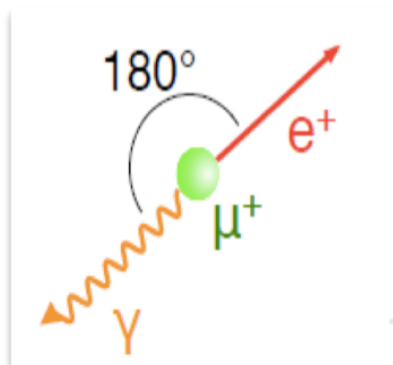
$\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊 $O(10^{-60})$

- $\mu \rightarrow e \gamma$ の探索を行うには、
大強度 μ × 高い検出効率 × 長時間測定 が重要

➡ スーパーカミオカンデで探索できないか？

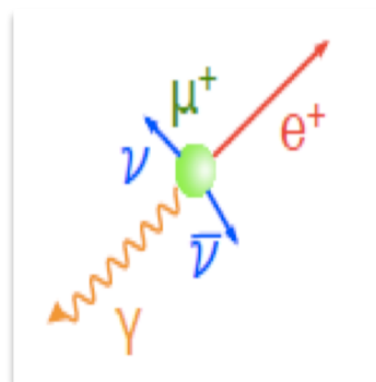
$\mu \rightarrow e \gamma$ の信号

・ $\mu \rightarrow e \gamma$



- μ 静止 $\rightarrow$ 二体崩壊
- $E_\gamma = E_e = 52.8 \text{ MeV}$
- $\Theta_{e\gamma} = 180^\circ$
- $t_{e\gamma} = 0$

・ $\mu \rightarrow e \nu \nu \gamma$

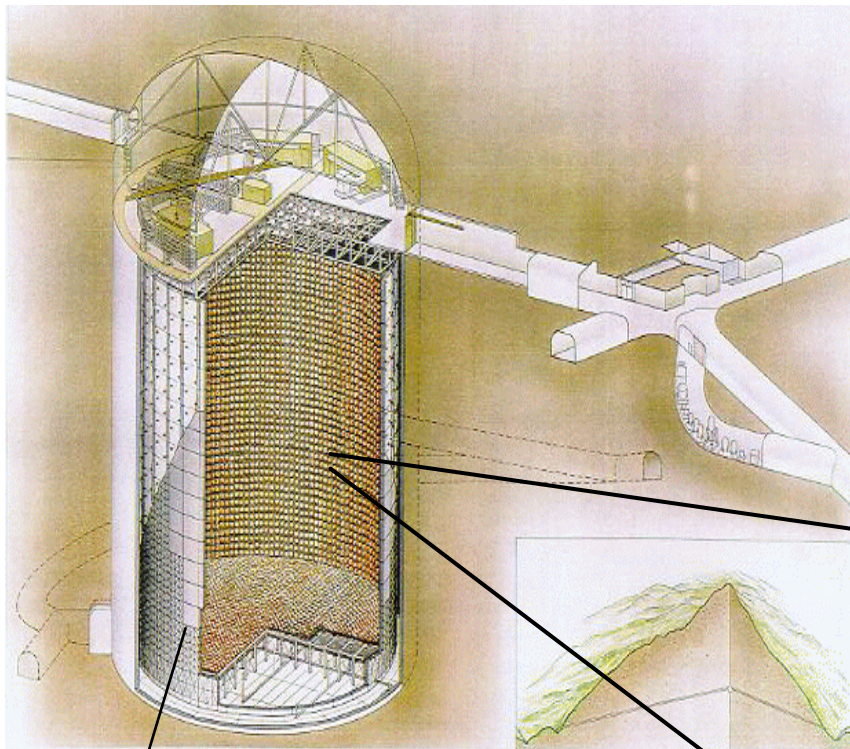


- E, Θ はランダム

大量に信号をみると、
 $\mu \rightarrow e \gamma$ と間違えることも
(バックグラウンド)

- 信号を見つけて、バックグラウンドを抑えるために
カット条件を課して、欲しい領域(信号が多く、バックグラウンドが少ない)を
選び出す
- それぞれの Br を求める

スーパーカミオカンデ検出器の構造



水タンク

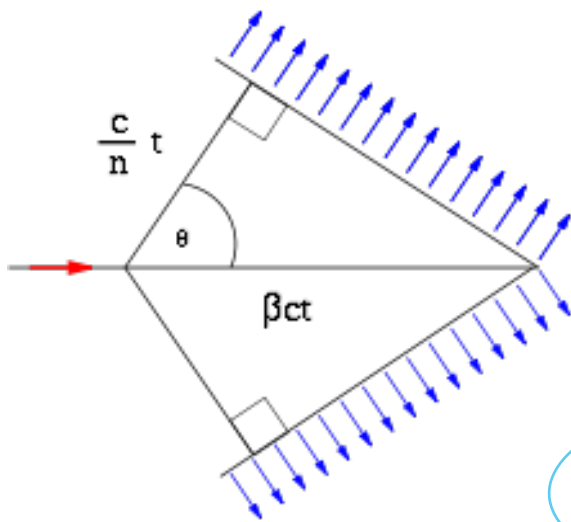
↳ 50万トンの純水で満たされている

↳ 約11000本
光電子増倍管(PMT)



チェレンコフ放射

- ▶ 荷電粒子がある物質(屈折率 n)を一定速度で通過する際、その速さが物質中の光速(c/n)以上の時に起こる現象



➤ しきい値 $v \geq \frac{c}{n}$

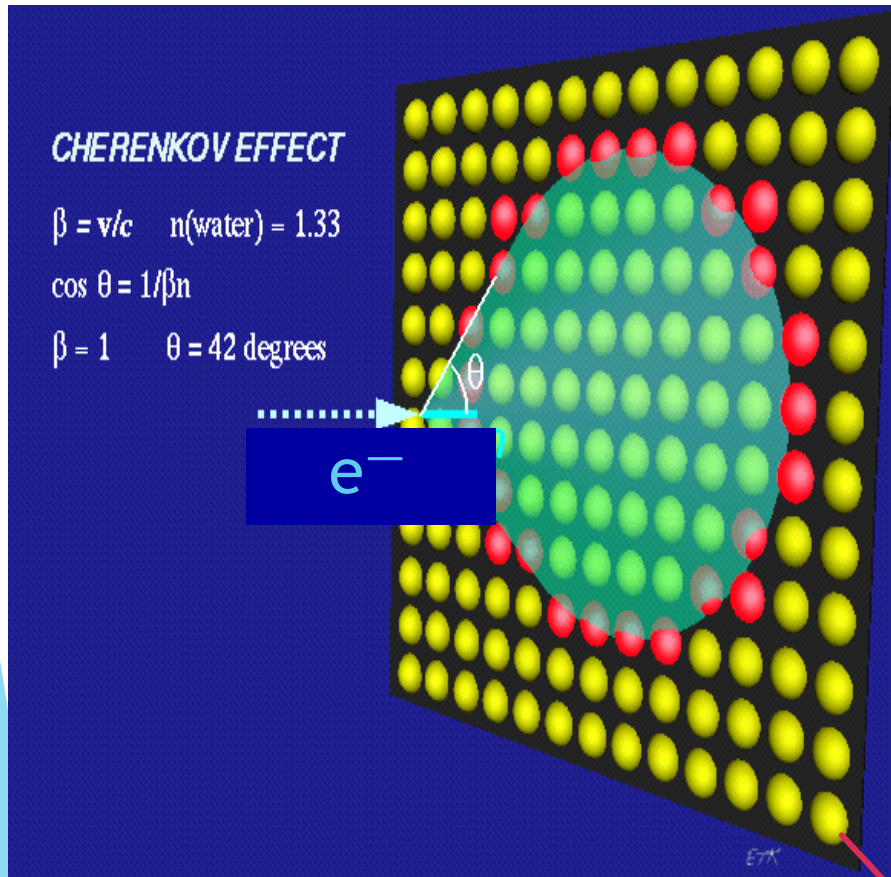
➤ 放射角 $\theta_C = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta n}\right)$

$\beta \sim 1$ の荷電粒子
水中($n \approx 1.34$)

→ : チェレンコフ光

$\theta_c \sim 42$ (一定)

測定可能な物理量



1. 相互作用が起こった点
(vertex)

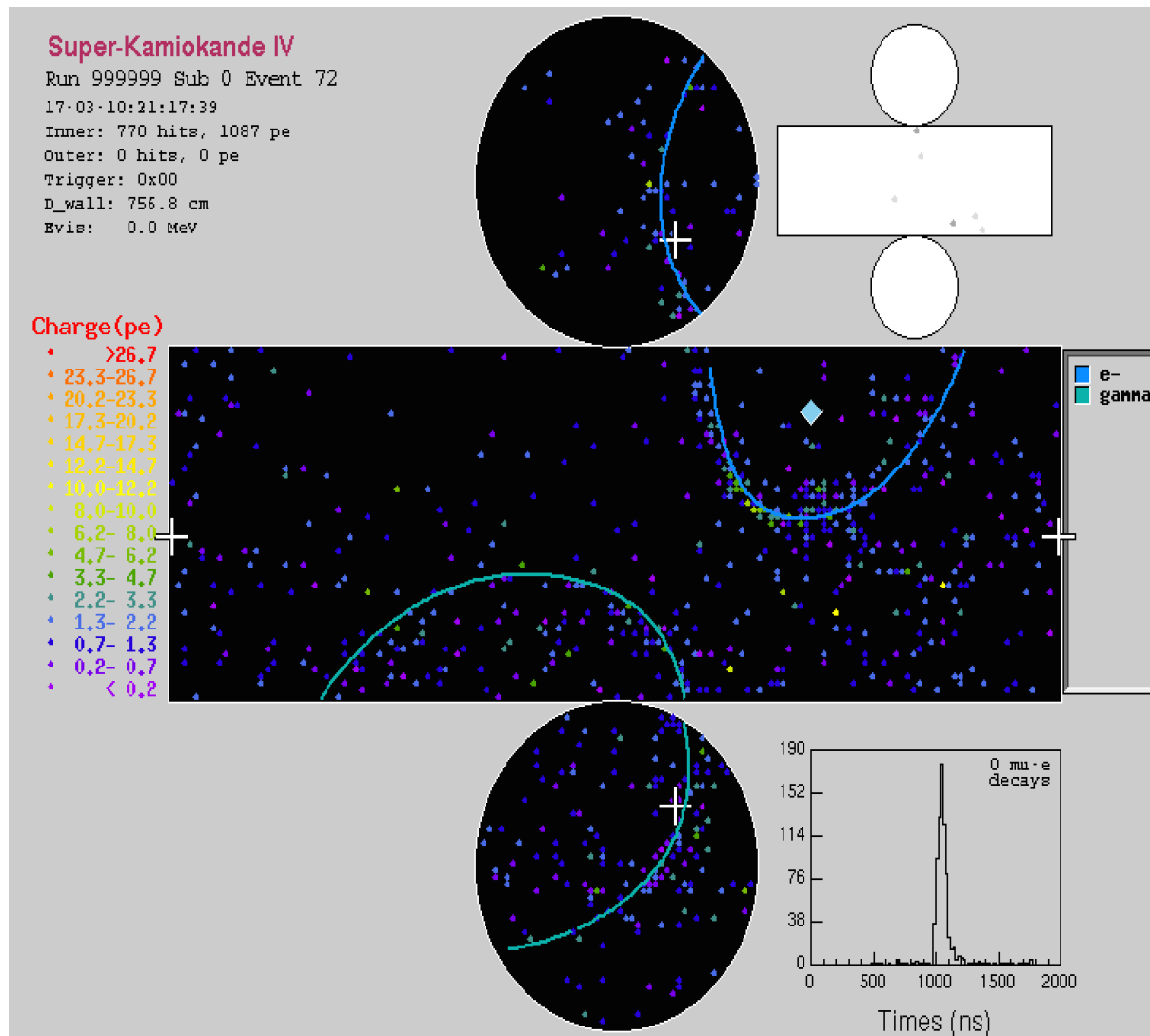
2. 運動量

3. エネルギー

4. 粒子の種類

PMT

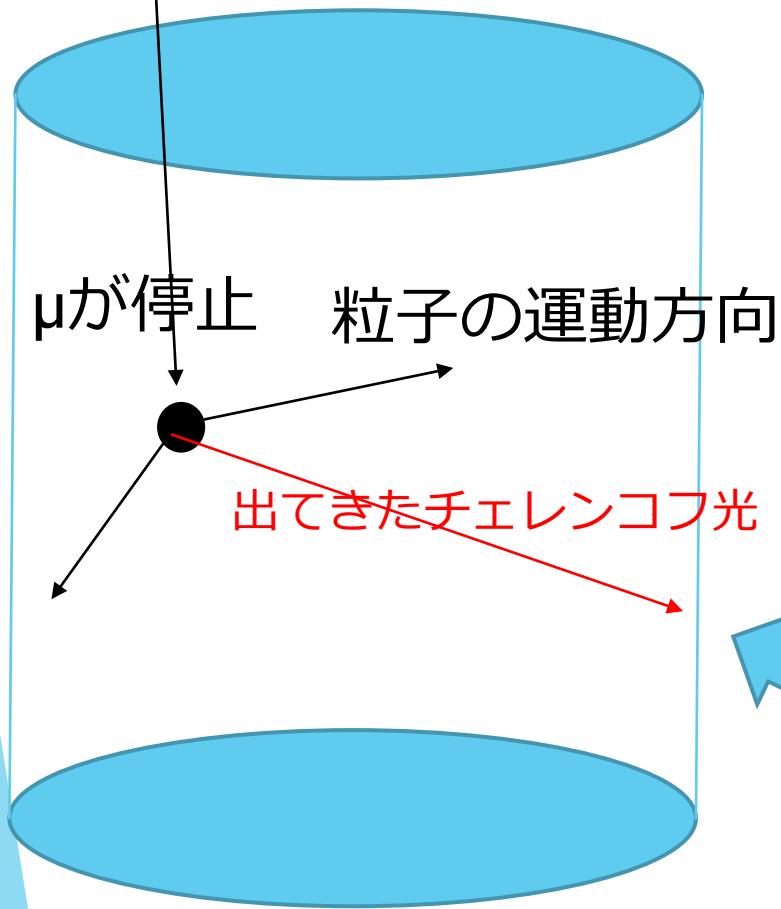
イベントディスプレイ



$\mu \rightarrow e \gamma$ (シミュレーション) によるイベント

実験で取得されるデータ

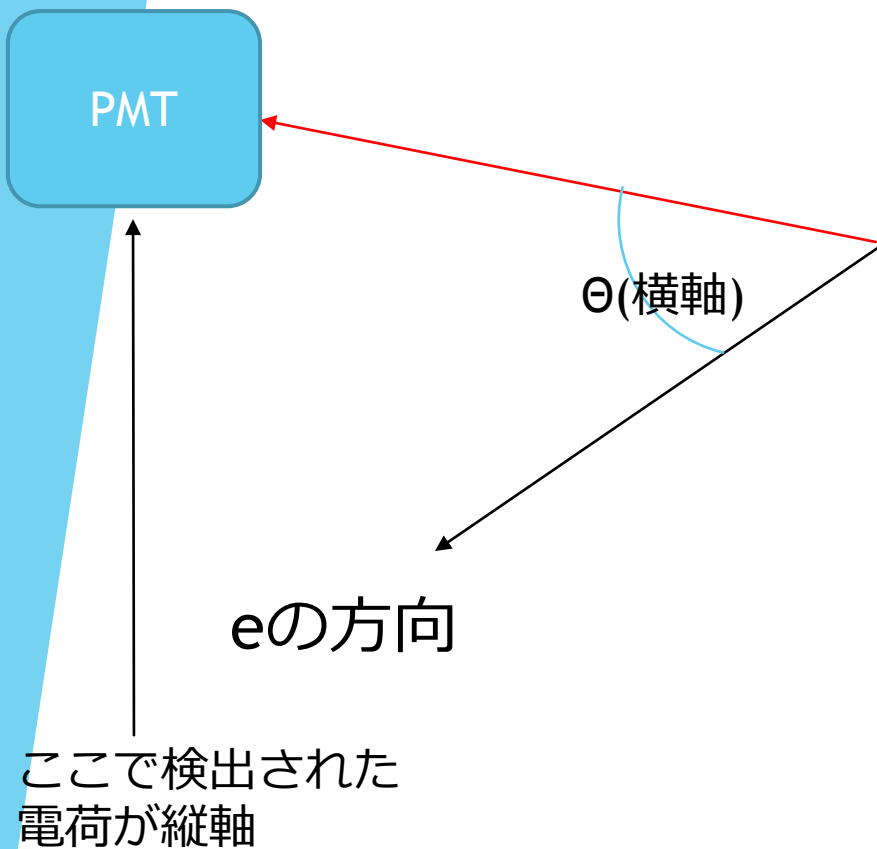
宇宙線 μ



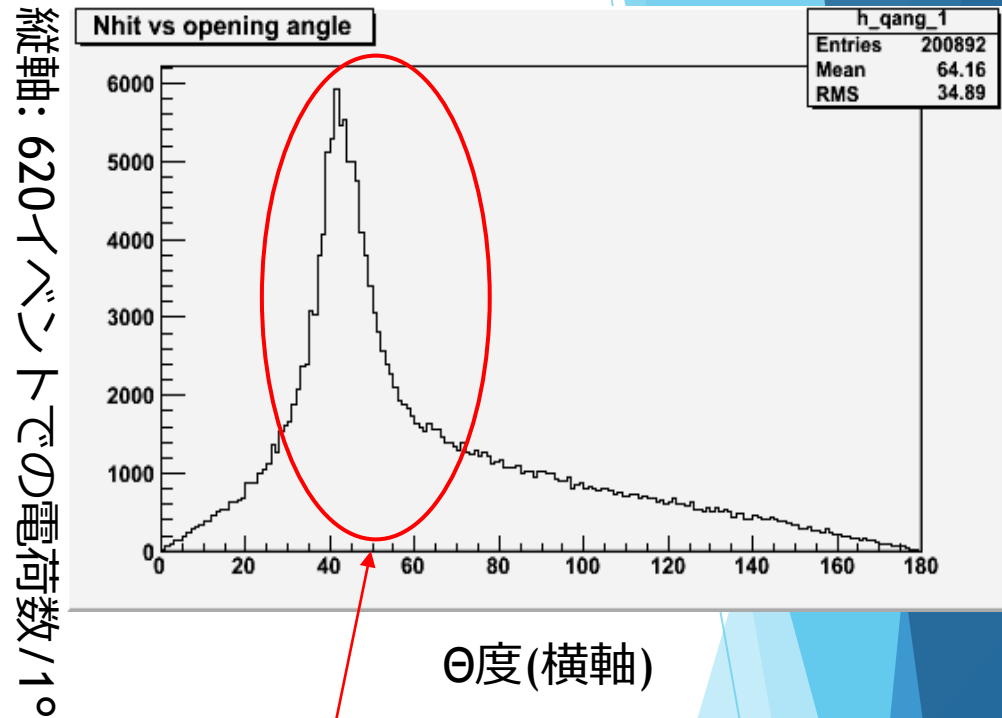
止まった μ に由来
すると推定された
イベント

ここにPMT。電荷数の
形でシグナルを得る。

得られた物理量



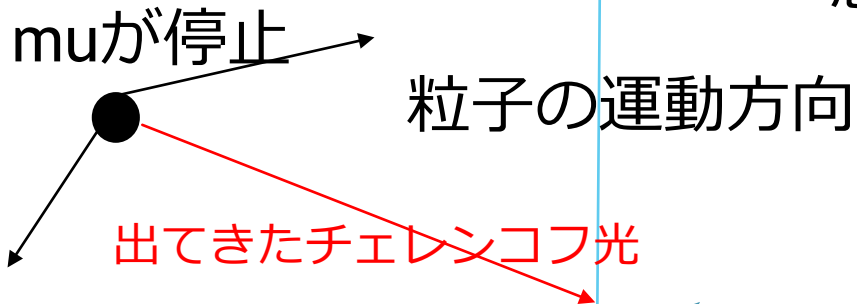
PMTでの電荷 $\propto$ 運動量



μ→evvの内、e由来
(42にピーク)

シミュレーション方法

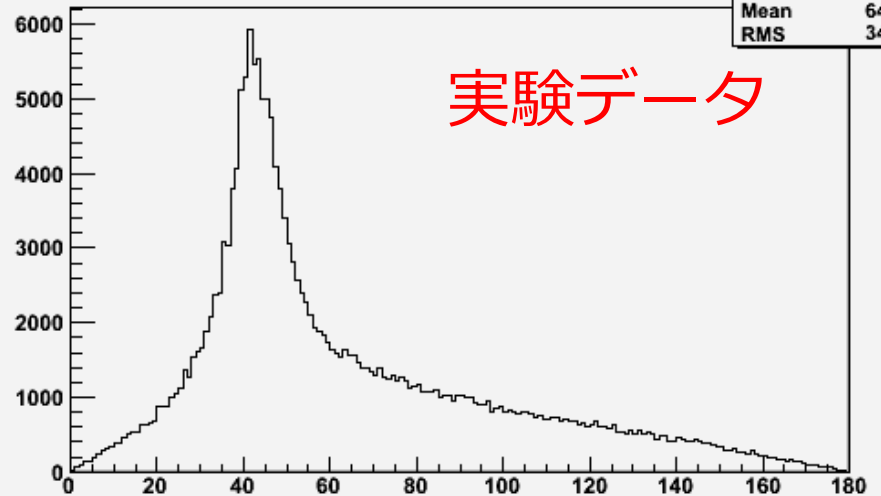
$\mu \rightarrow e\nu\nu$ 、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 、 $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$
3つについて計算。
実験環境をできるだけ
忠実に再現



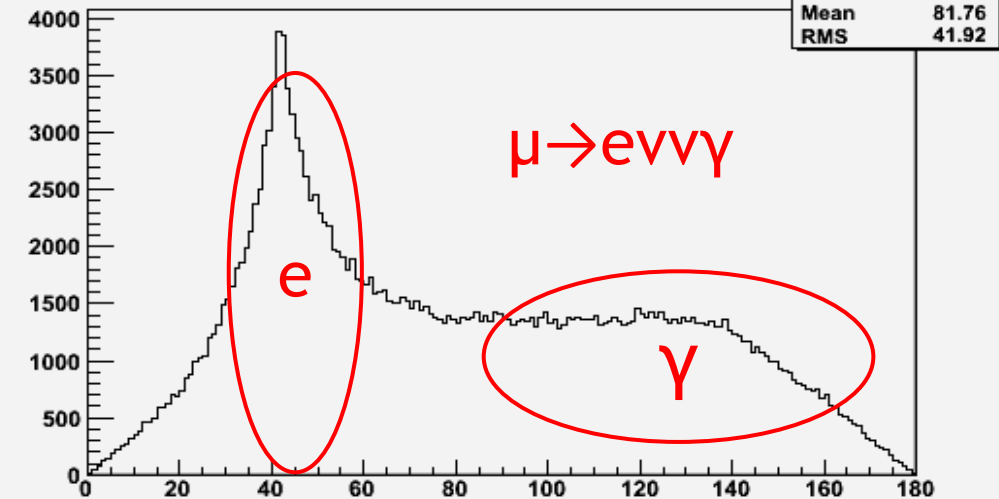
PMTでの電荷を計算していく

電荷-角度分布

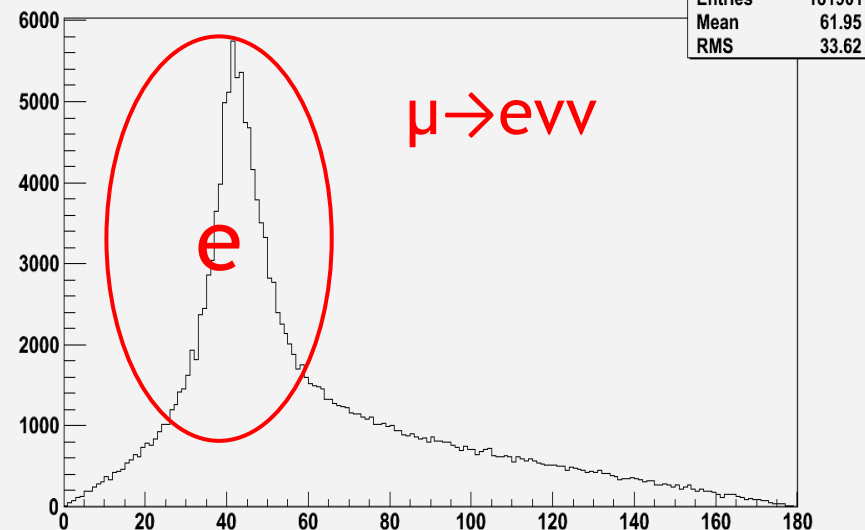
Nhit vs opening angle



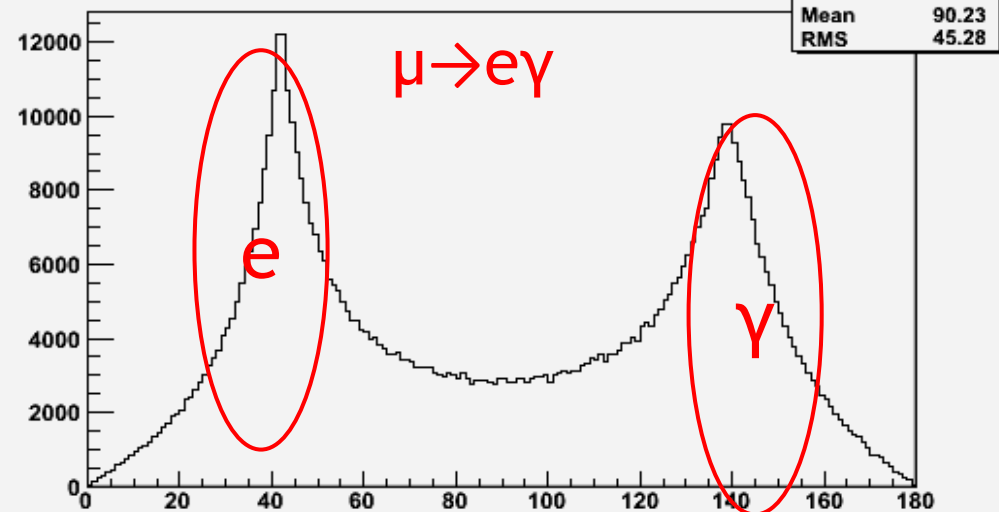
Nhit vs opening angle



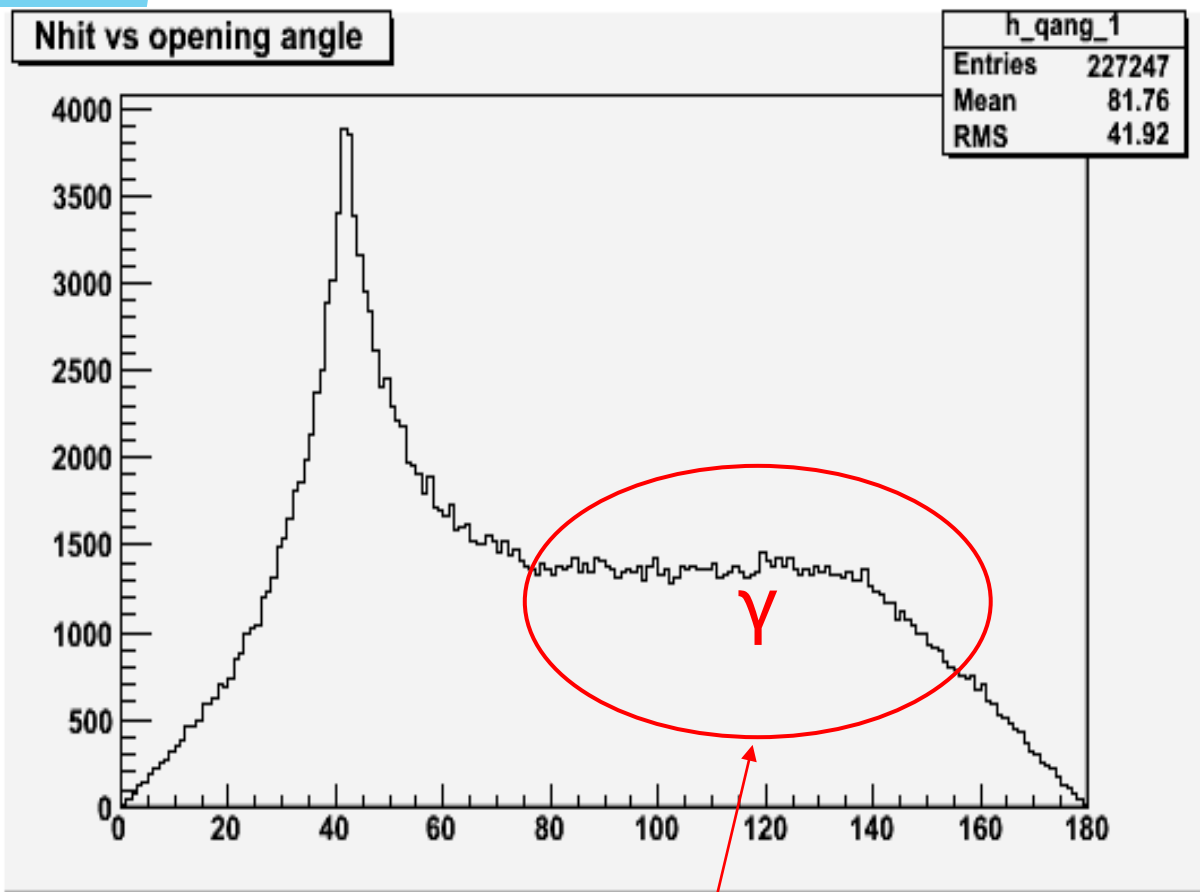
Nhit vs opening angle



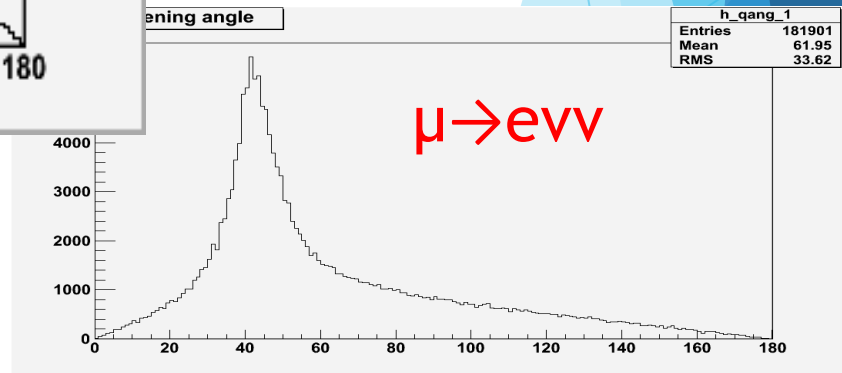
Nhit vs opening angle



$$\mu \rightarrow e \nu \nu \gamma$$

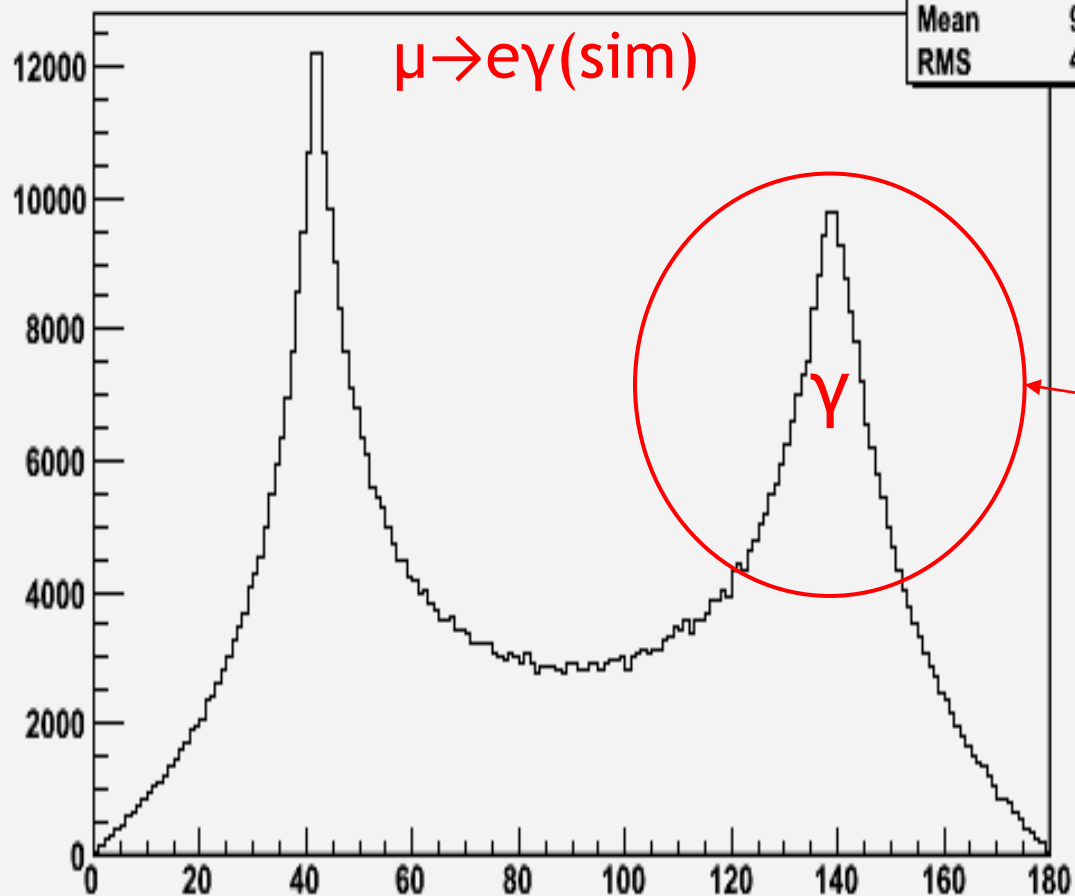


あらゆる方向を向く γ

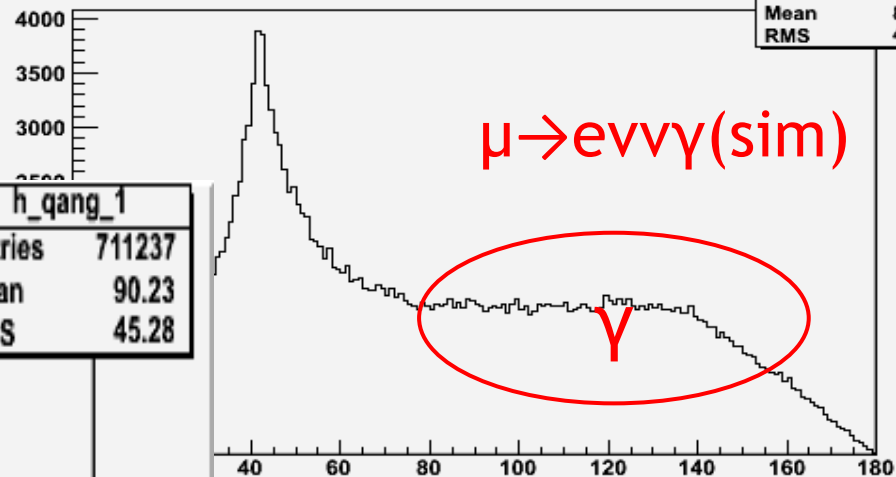


$$\mu \rightarrow e\gamma$$

Nhit vs opening angle



Nhit vs opening angle



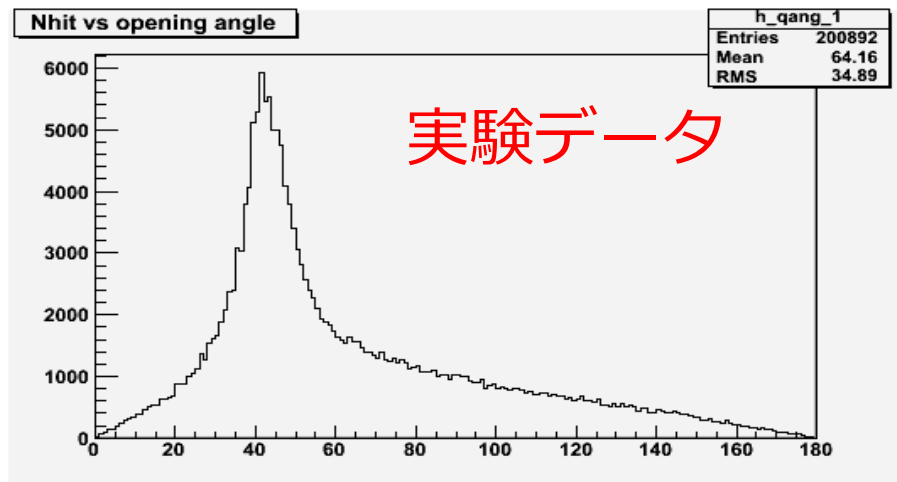
Γは180
方向のみ

$\mu \rightarrow e \nu \nu \gamma$ の分岐比

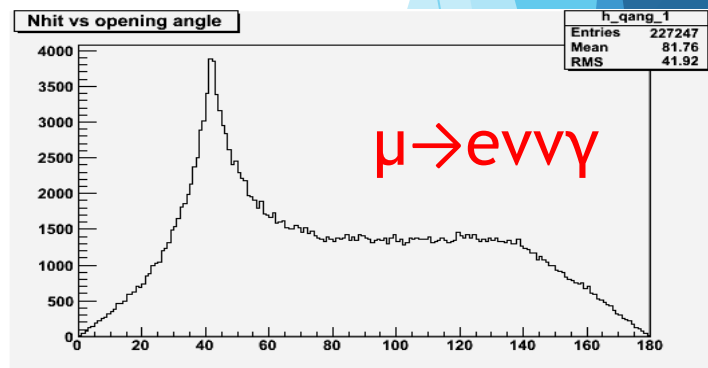
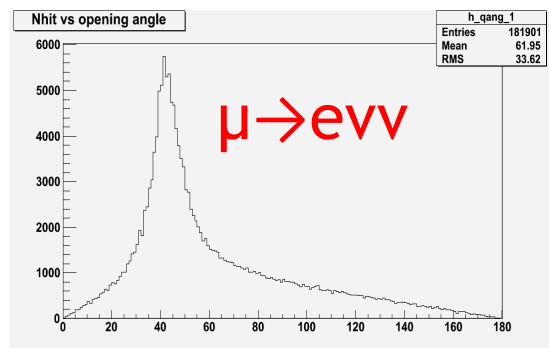
2通りの方法で解析した

1. 電荷の角度分布を用いたフィット
2. γ 由来の電荷を用いた計算

解析1(電荷の角度分布)



それぞれの重みa,bの
最尤値を決める

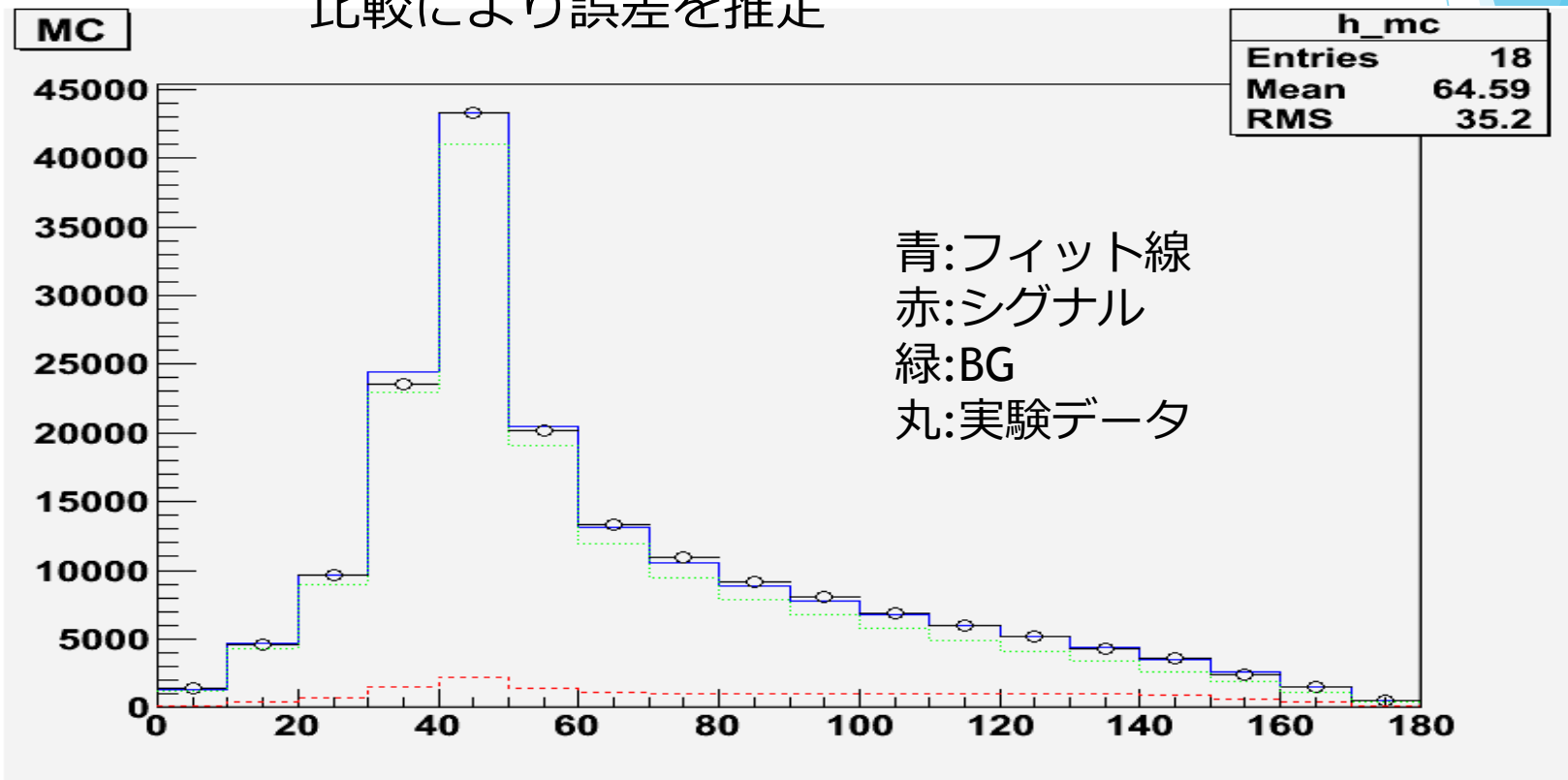


= a x

+ b x

フィッティングの結果

- 分岐比 $\rightarrow 5 \pm 2\%$ (過去の実験 $\rightarrow 1.4 \pm 0.4$)
 - ここでの誤差は主に系統誤差。
 - 他のシミュレーションを用いた際の計算結果との比較により誤差を推定

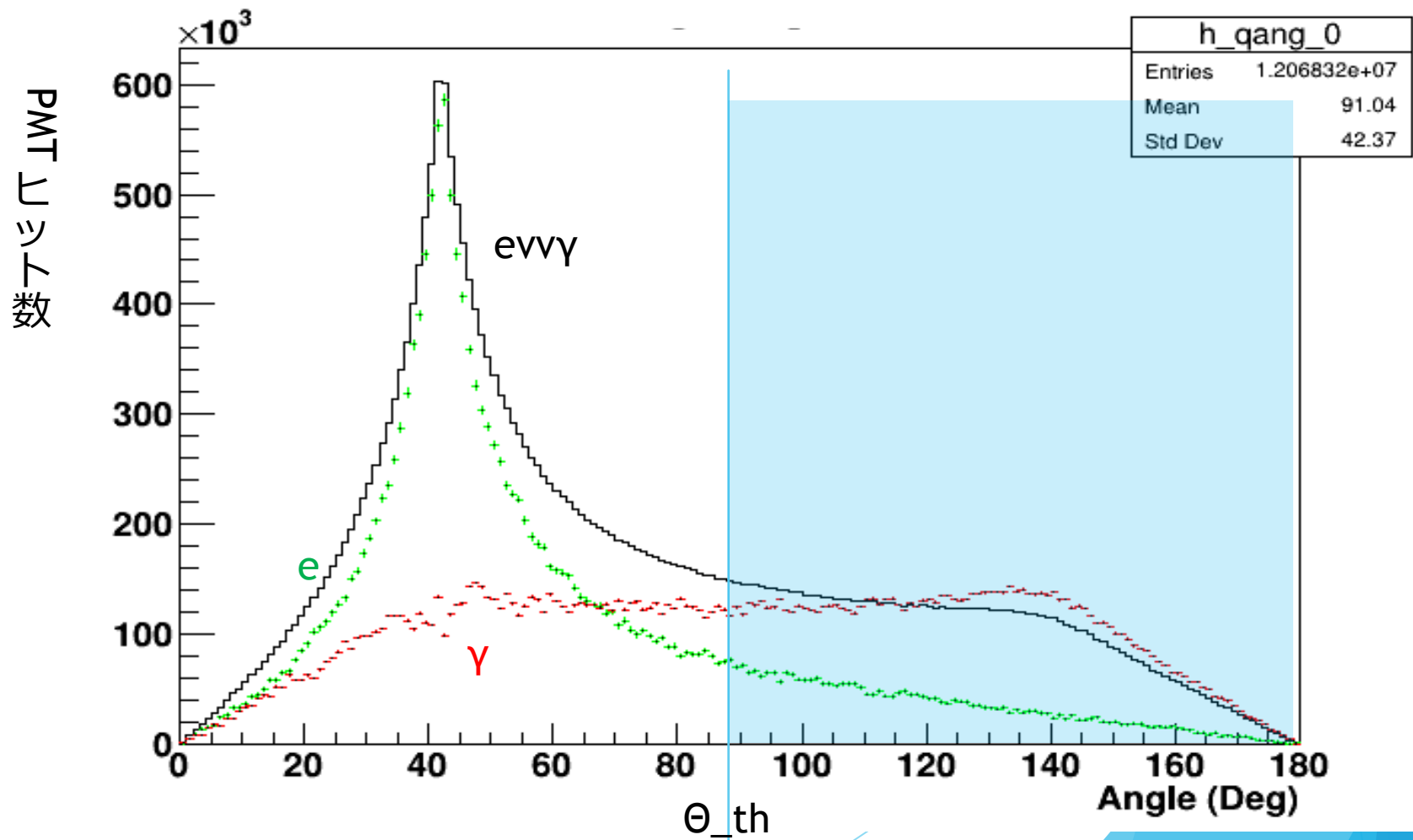


Method 2 : PMTのヒット数分布で u->evvrの分岐比を求める

大矢：信号とバックグラウンドの
電荷量・角度分布でFit

ハン：信号とバックグラウンドの
電子の後ろ側で光ったPMTのヒット
数分布でFit

Angle/PMTヒット数 分布



n_backとは？

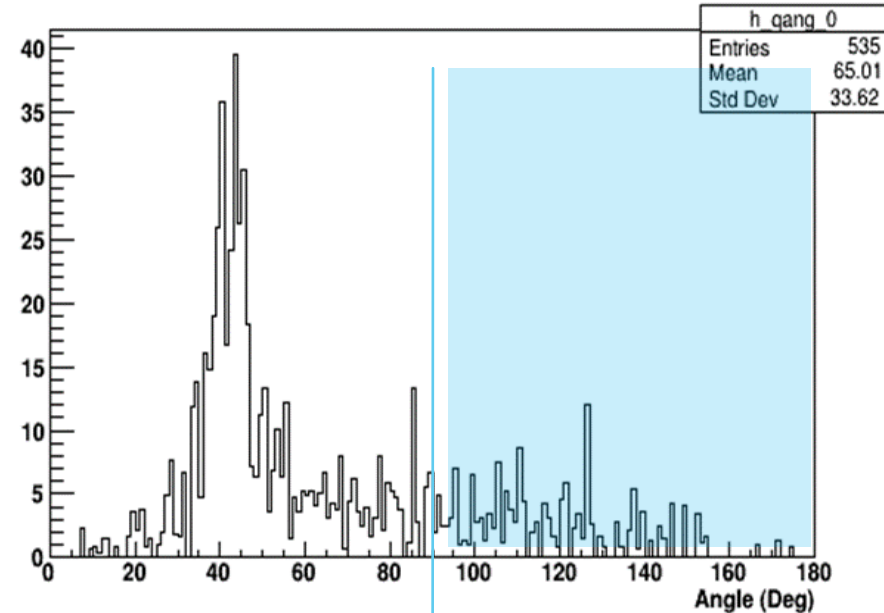
n_back: 電子の後ろ側で光ったPMTの数

～

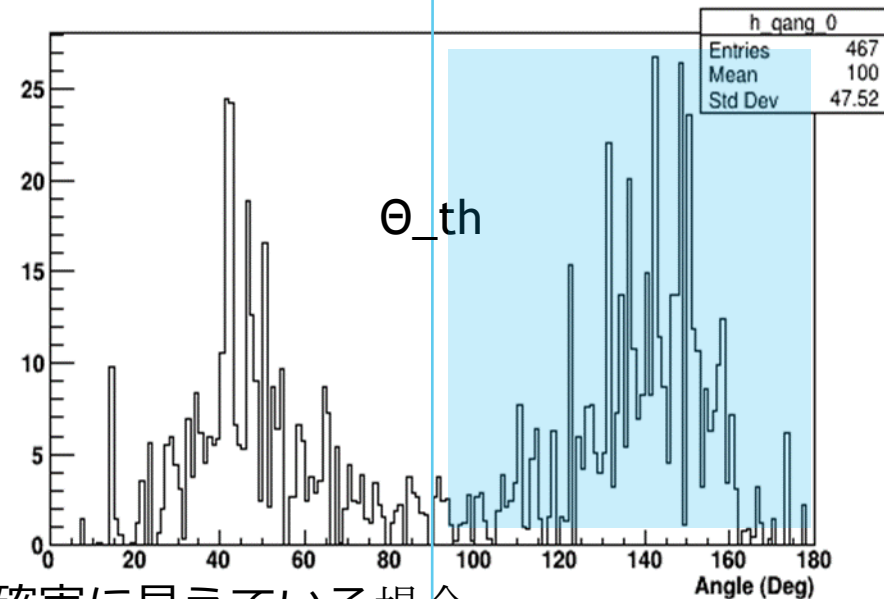
ヒットPMTの中で電子の方向との角度がThreshold angle以上のPMTの数

電子によるシグナルを除き、ガンマ線によるシグナルを絞れる

$\Theta_{th} = 90.0 \text{ deg}$ に設定



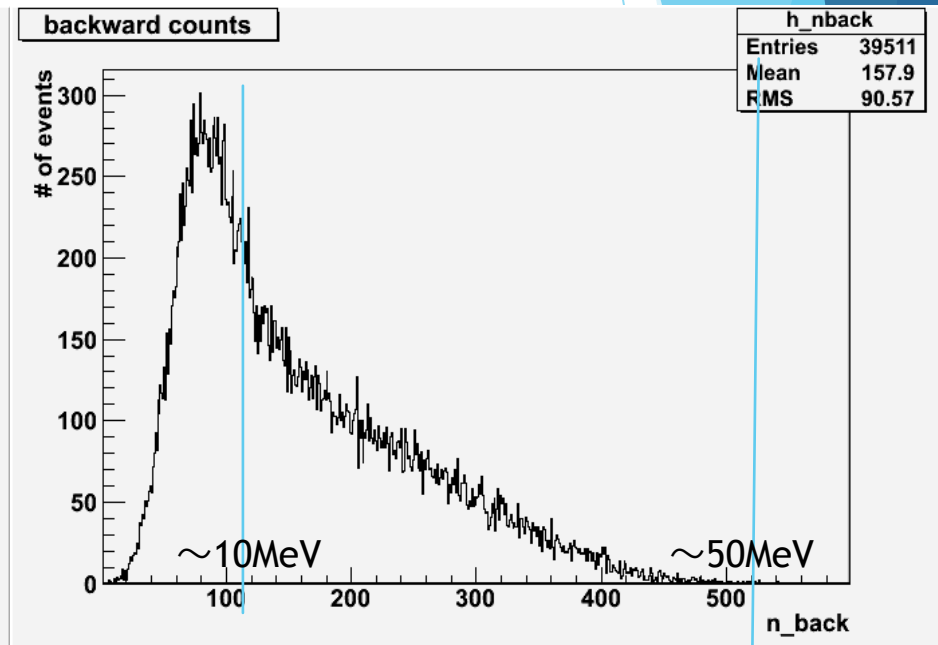
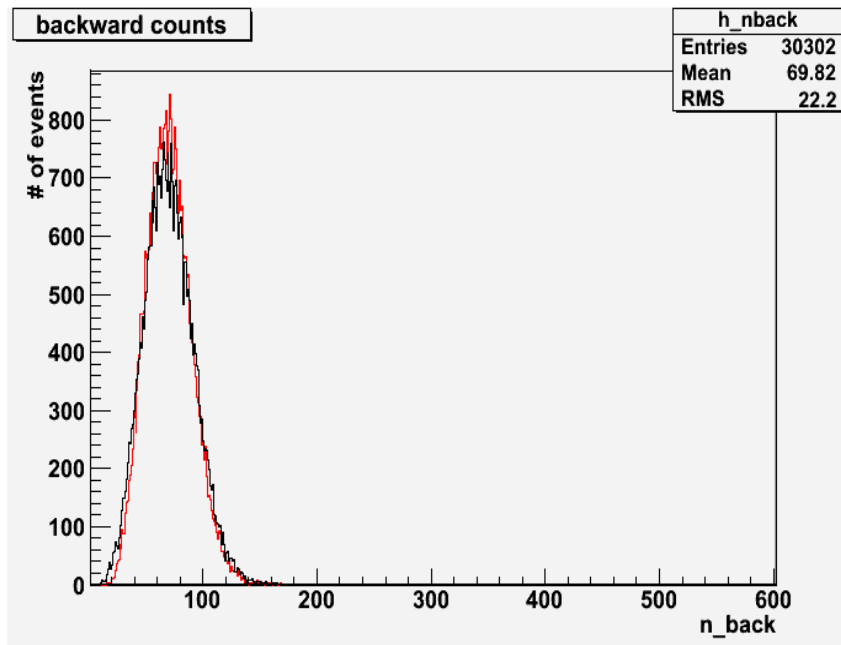
γ 線があまり見えていない場合



γ 線が確実に見えている場合

n_back distribution

1イベント：ミューオン一つが崩壊した事件



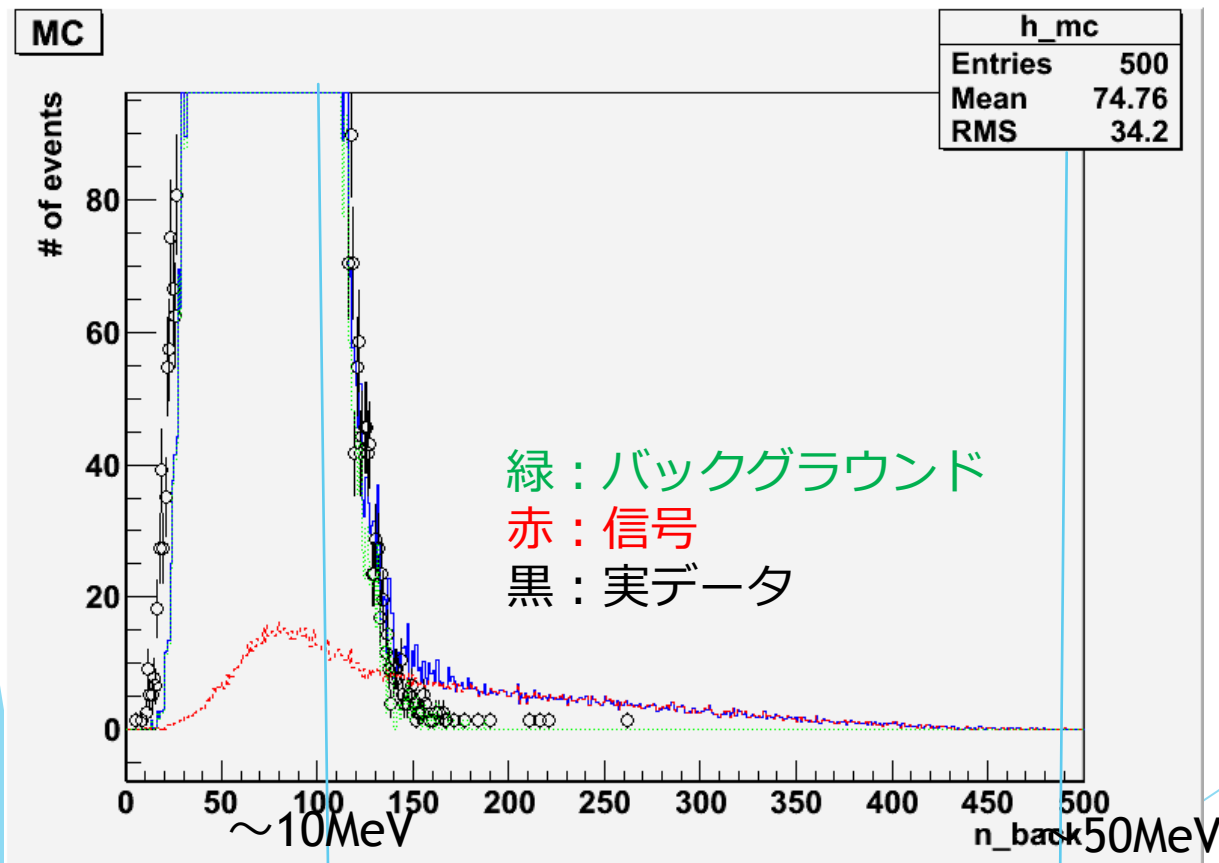
赤：u->evvのMC 黒：実データ

u->evvrのMC

Tailの有無が信号とバックグラウンドの違い！

MC Chi-square Fit

実データ = 分岐比 1 ×バックグラウンド + 分岐比 2 ×信号



分岐比 1
 $u \rightarrow e\nu\nu$: 94.6%

分岐比 2
 $u \rightarrow e\nu\nu r$: 5.1%

最小chi-square:
約4,000

Results

evvr 分岐比：

角度分布(大矢)： $5 \pm 2\%$

n_back (ハン)：5.1% (フィットエラーはとても大きい)

共に約5%。(consistent)

文献値：1.40% ($\gamma > 10\text{MeV}$ の場合)

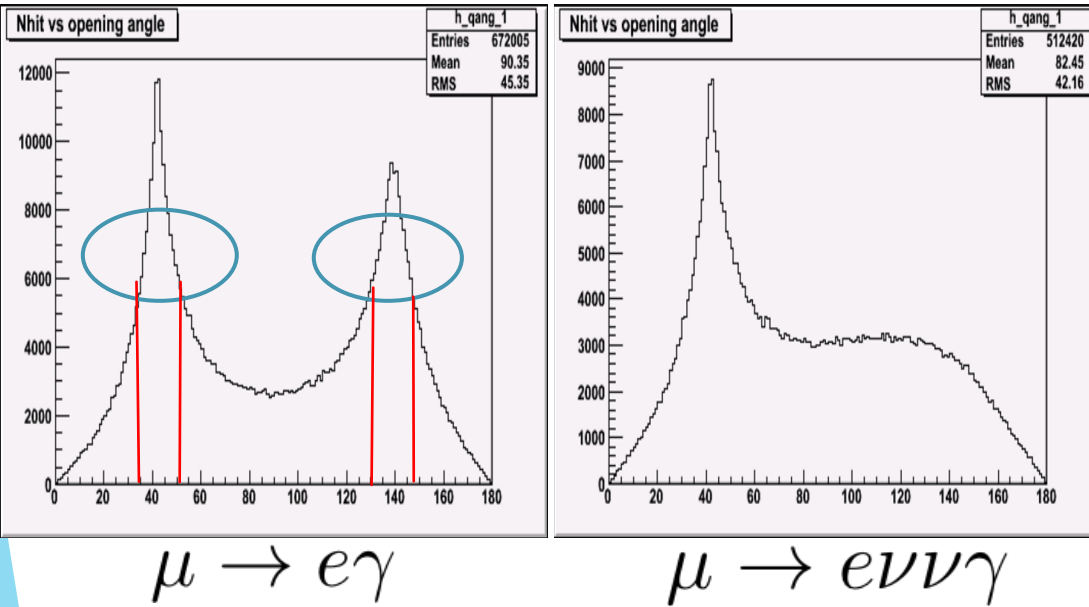
Sources of errors

系統誤差の原因についての結論は出ていないが、以下のような可能性があり得ると思われる。

- MCはSKを完璧には再現していない
(水中での光の散乱など)
- evvrのシミュレーション
4体崩壊のevvr崩壊を3体崩壊に近似したので
実際とは合っていない

目的

最適なパラメータを決定する



eか γ かは、 θ の大きさにて判定する
※シミュレーションではeの方向を $\theta=0$ と定義する

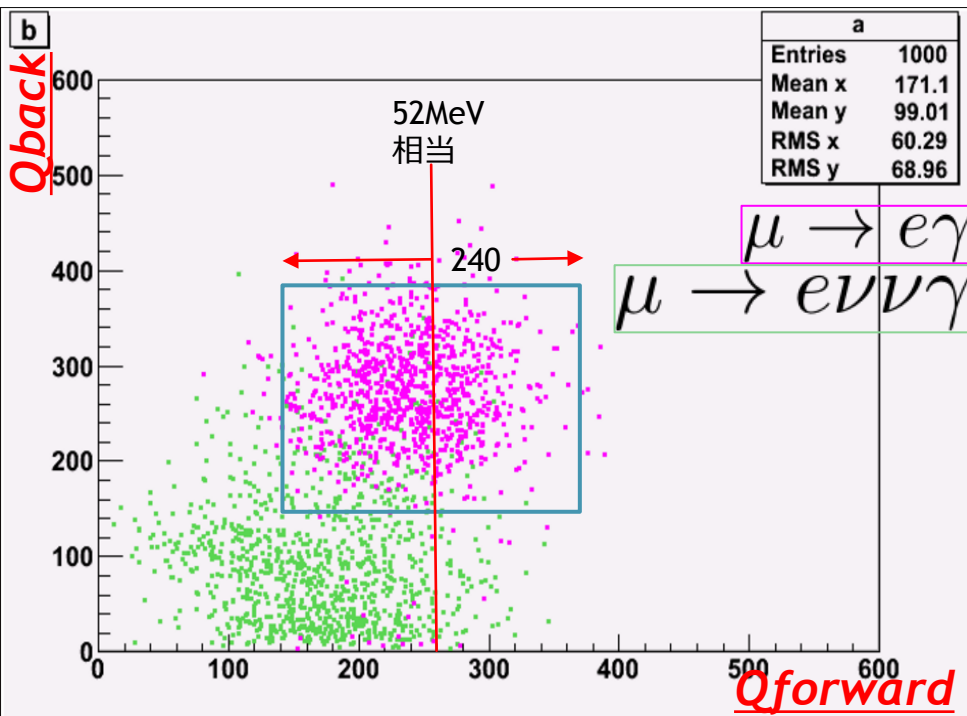
角度 θ から半値幅でしきい値を決め、
電荷量を定義する

Qforward:しきい値 θ 内で、
eを起因とするチェレンコフ光より
生じる電荷量

しきい値
 $38 < \theta < 56$: e
 $126 < \theta < 150$: γ

Qback:しきい値 θ 内で、
ガンマ線を起因とするチェレンコ
フ光より生じる電荷量

解析方法



$\mu \rightarrow e\gamma$ はeと γ を180°で生成する



$Q_{forward} = Q_{back}$ のグラフ上に乗る

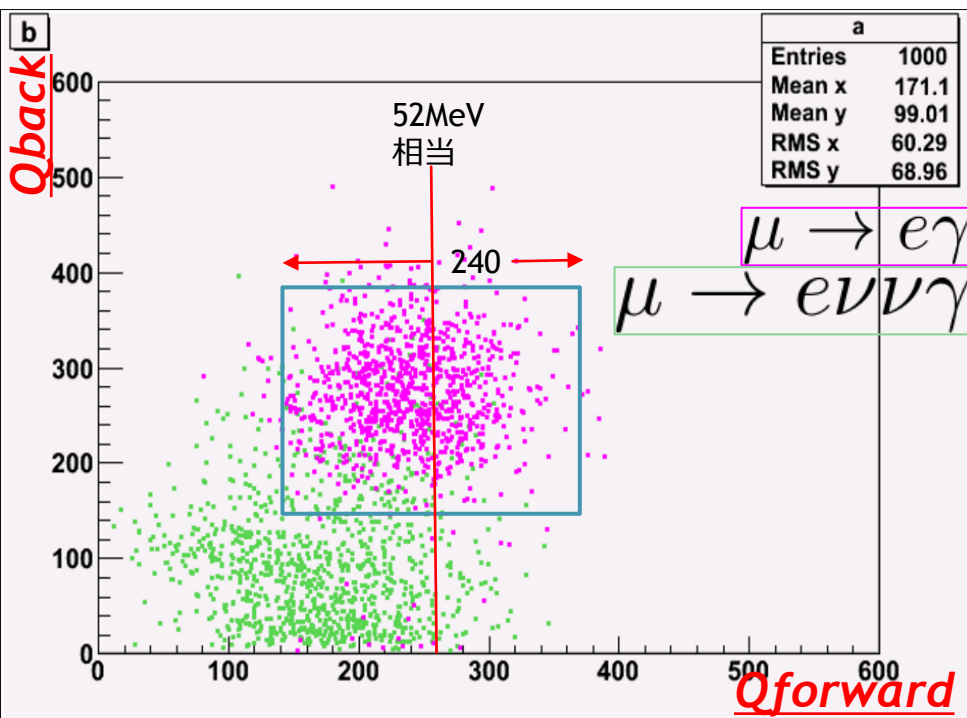
□内を $\mu \rightarrow e\gamma$ とするには

- $\mu \rightarrow e\gamma$ の90%が入るように
- $\text{event}(\mu e\gamma) / \text{event}(\mu e\nu\nu\gamma)$ の値が最も大きくなるように選ぶ

求めた値は

$$\text{event}(\mu e\gamma) / \text{event}(\mu e\nu\nu\gamma) = 922 / 169 = 5.46$$

解析方法



□ のなかにN個のイベントが入る確率を ε とすれば、全イベント数 M より $N = \varepsilon M$ でNが求まる。

すべての崩壊モードに対してシミュレーションで ε を求め、それぞれNを推定する。



$\mu \rightarrow e\gamma$ があるか探る

例) 全イベント $M=1000$, $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ の分岐比は1.4%より $M_\mu = 14$
 $\varepsilon = 0.2$ であれば、 $N_\mu = 14 \times 0.2 = 7$ event

パラメータの最適化

▶ $\mu \rightarrow e\gamma$ の信号が最大になるように、またバックグラウンドが最小になるようにパラメータを決めた

- ▶ 角度の範囲は先の半値幅の議論から決めた
- ▶ ボックスの幅を徐々に変えていき、上の条件を満たすような幅を決定することで決めた

以上の結果より、基準（電子の運動方向）から $38^\circ \sim 56^\circ$ 、基準の逆側の角度を $126^\circ \sim 150^\circ$ に、ボックス幅を120に選んでカットを行うと、 $\mu \rightarrow e\gamma$ の信号を最も効率よく得られる

イベント数の計算

1. 実際のデータとMCのそれぞれでボックスに入るイベントをカウントする

モンテカルロシミュレーションの結果

	全イベント	ボックスに入っ たイベント	ε
$\mu \rightarrow e\gamma$	1000	922	92.2%
$\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$	1000	169	16.9%
$\mu \rightarrow e\nu\nu$	1000	0	<0.1%

モンテカルロから期待される イベント数

データ

イベント総数 : 82465 (一ヶ月分のデータ)

ボックス内の粒子数 : 3

ボックス内の期待値

	B.R.	ϵ	イベント数	ボックス内粒子数
$\mu \rightarrow e\nu\nu$	0.986	0%	81310	0
$\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$	0.014	16.9%	1155	195
$\mu \rightarrow e\gamma$	BR	92.2%	BR*82465	BR*82465*0.922

イベント数の計算

- ▶ 以上より解析したデータから

$$\mu \rightarrow e\gamma$$

のB.R.を計算する.

- ▶ 生データのボックス内に入った粒子は他の崩壊モードでのボックス内の粒子の和で評価できると考えられる

$$3 = M \cdot (922/1000) + 195 + 0$$

$$\therefore M = -208$$

M (非負整数) が負になったので
この上限を 1 とし $M < 1$ とする

$$\therefore \text{BR} < 1/82465 = 1.2 \cdot 10^{-5}$$

	イベント数	ボックス内粒子数
データ	82465	3
$\mu \rightarrow e\nu\nu$	81310	0
$\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$	1155	195
$\mu \rightarrow e\gamma$	BR*82465	M=BR*82465*0.922

考察

- ▶ モンテカルロ法のシミュレーションから期待される $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ の個数が 1 9 5 だったにも関わらず、実際のデータからは3つしかボックス内に入らなかった.

これは $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ が実際には4体散乱だが、プログラムでは3体問題で計算していることが一つの原因であると考えられる.

まとめ

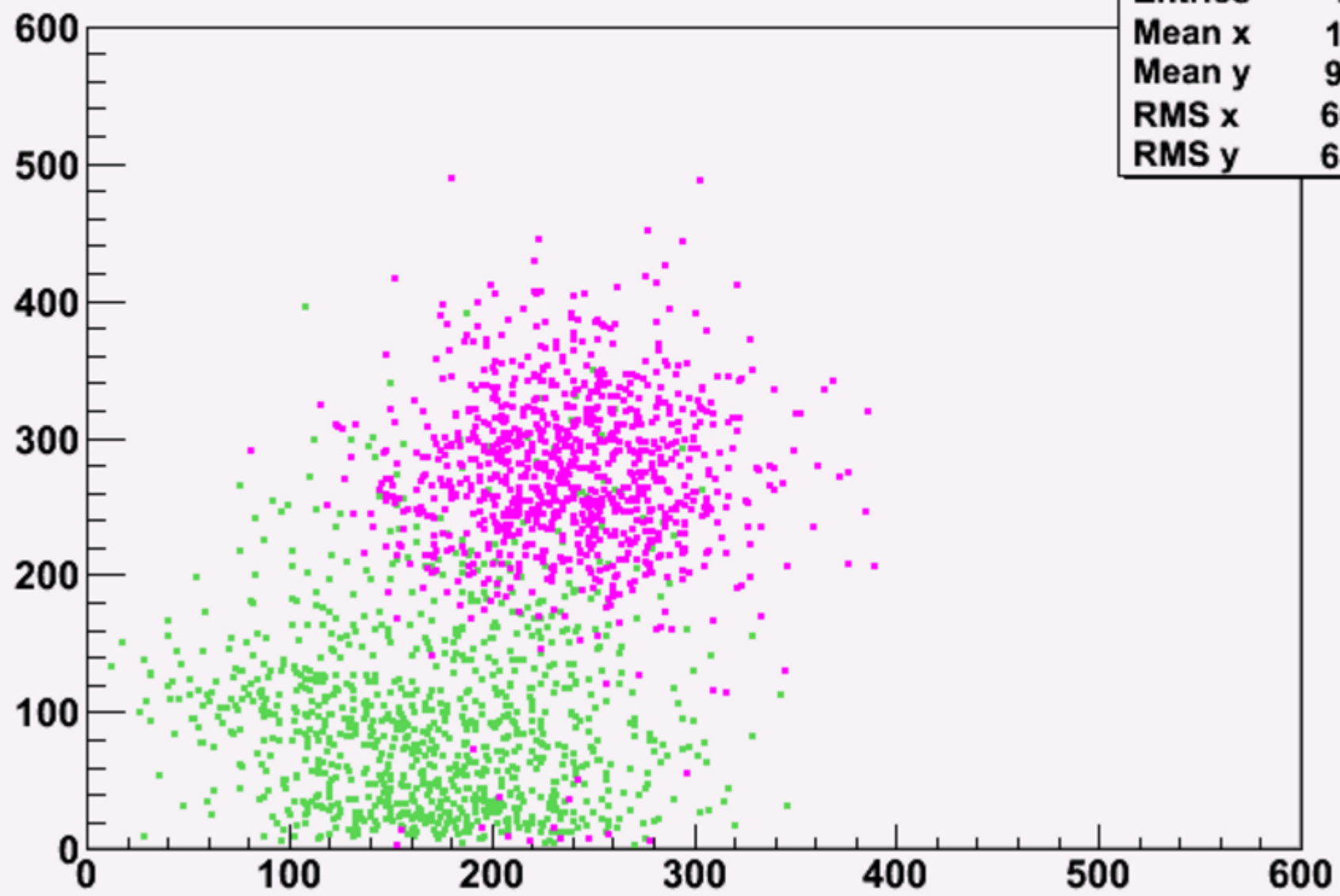
▶ スーパーカミオカンデで

$\mu \rightarrow e + \gamma$ を探索したことをはじめとし今回紹介したことは世界でも初めての試み

$\mu \rightarrow e + \gamma$ は発見に至らなかったが、 $\mu \rightarrow e + \gamma + \nu + \bar{\nu}$ はそれなりによいコンシステントな結果を得られた

スーパーカミオカンデのデータをより多く使って計算すれば新物理の発見につながるかもしれない

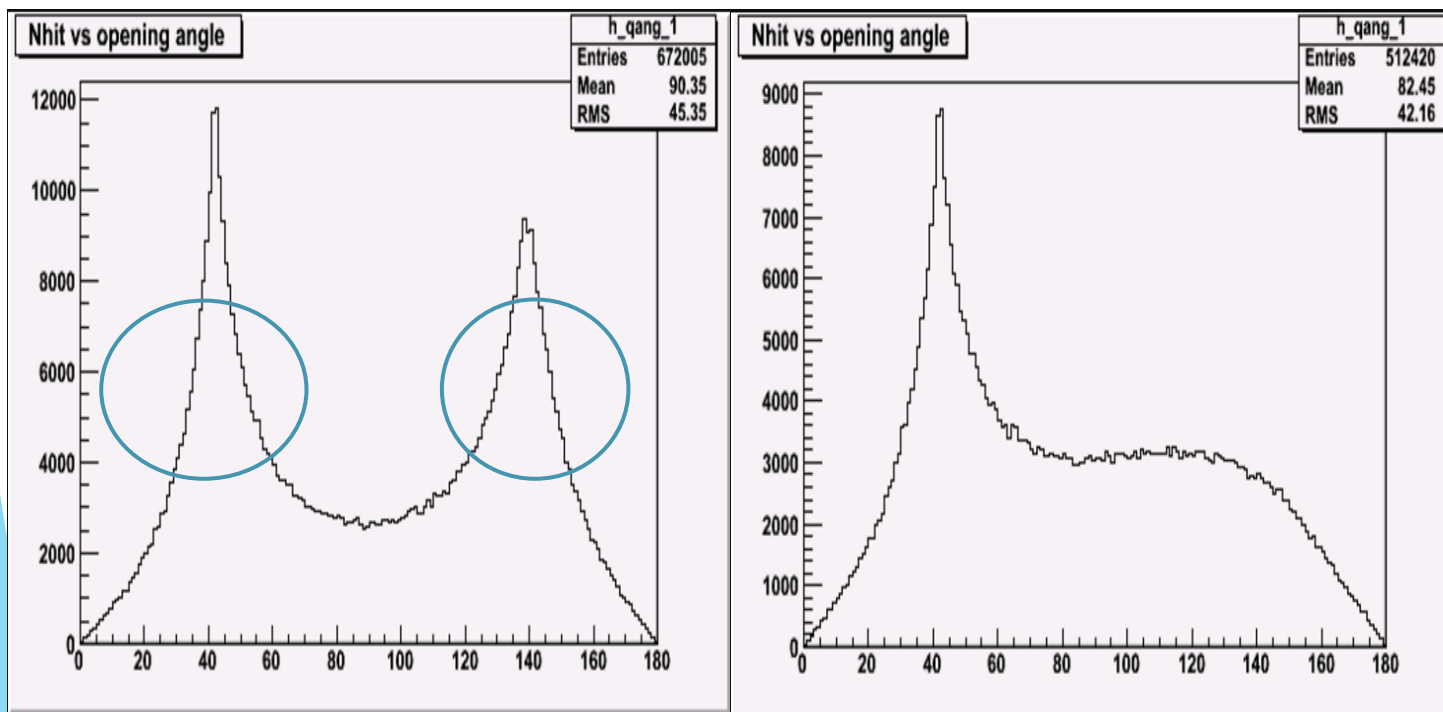
b



a	
Entries	1000
Mean x	171.1
Mean y	99.01
RMS x	60.29
RMS y	68.96

目的

$\mu \rightarrow e\gamma$ のモードがあるか調べる



$$\mu \rightarrow e\gamma$$

$$\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$$

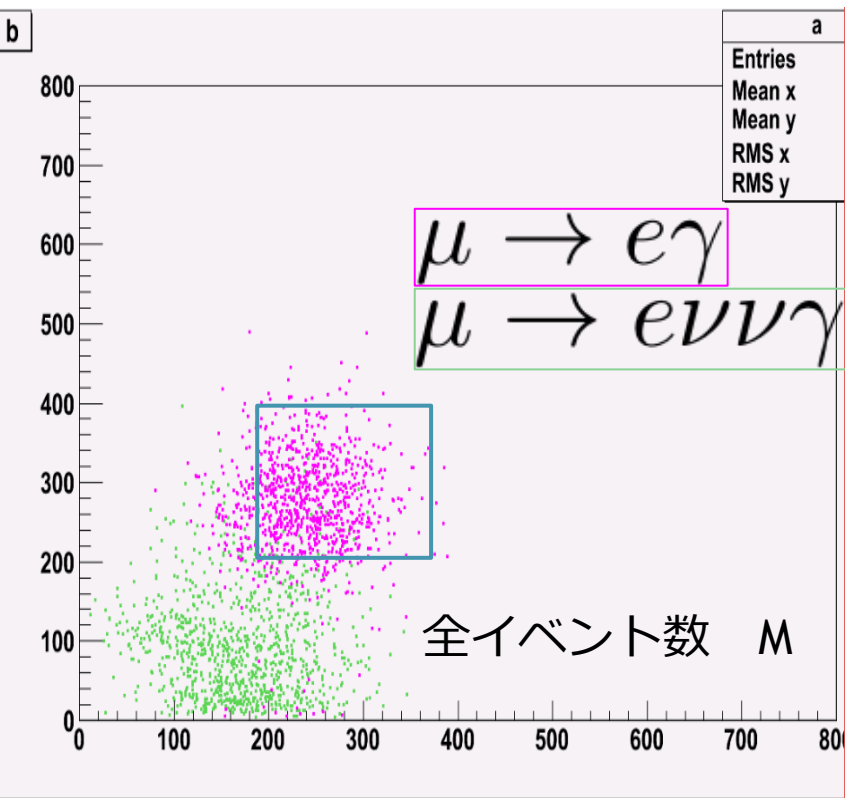
角度 θ から半値幅でしきい値を決める

$$38 < \theta < 56$$

$$126 < \theta < 150$$

角度の条件のもと、チェレンコフ光による電荷量で評価する

解析方法



Ex) 全イベント $M=1000$, $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ の分岐比は1.4%より $M_\mu = 14$
 $\varepsilon = 0.2$ であれば、 $N = 14 \times 0.2 = 7$ event

解析方法

- ▶ 図：QforwardとQbackの散布図
- ▶ ・ Qのしきい値は散布図のシグナルボックスから決める
- ▶ ・ $\mu_{e\gamma}$ の90%を入れるように
- ▶ ・ $\text{event}(\mu_{e\gamma})/\text{event}(\mu_{ev\nu\gamma})$ の値が最も大きくなる

Next Event

Display Options

< spin > >>

radius(Q)

Time Window

OF Cut

Charge mode

Line mode

Law Times

Residual Times

Color scale

Timing Gate

0

x: 959

y: 97

x: 6503.9

y: 4890.0

Super-Kamiokande IV

Run 999999 Sub 0 Event 873

17-03-09:23:31:28

Inner: 432 hits, 570 pe

Outer: 2 hits, 2 pe

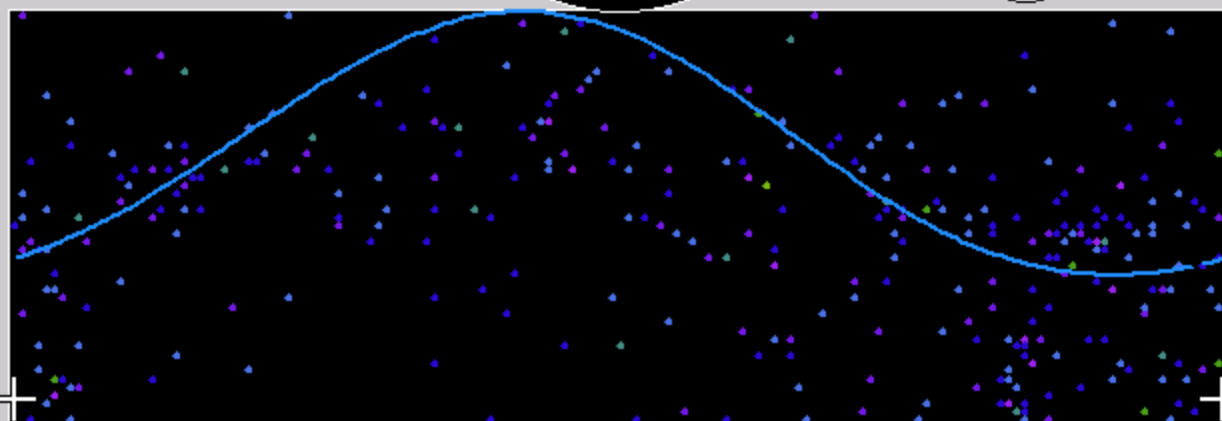
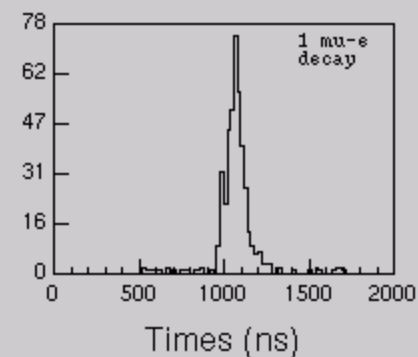
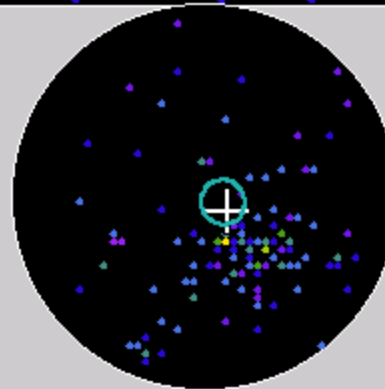
Trigger: 0x00

D_wall: 207.0 cm

Evis: 0.0 MeV

Charge(pe)

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

e-
gamma

vent
tions
> >>

low
de

Tines
ale

ate
9

03.9
35.4

Super-Kamiokande IV

Run 999999 Sub 0 Event 670
17-03-09:23:31:27
Inner: 400 hits, 584 pe
outer: 5 hits, 4 pe
Trigger: 0x00
D_wall: 260.0 cm
Evis: 0.0 MeV

Charge (pe)

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

