

時間反転対称性の破れ探索実験のための ミューオンポーラリメーターの開発

Development of a Muon Polarimeter for the T-violation search experiment

2013.2.20

19th ICEPP Symposium

東京大学

小林愛音

目次

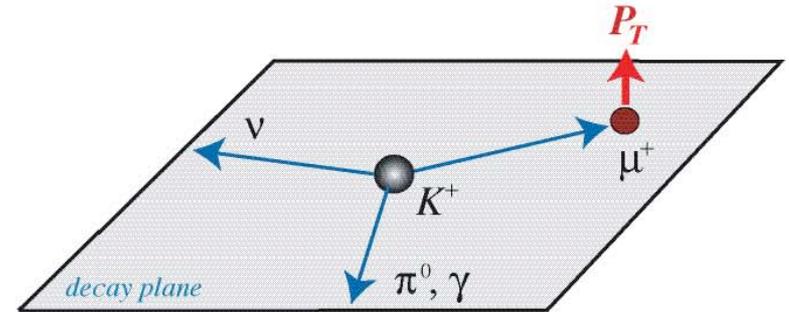
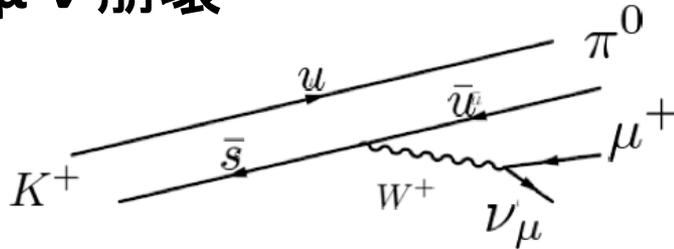
- $K_{\mu 3}$ 崩壊の μ^+ の横偏極 P_T
- KEK E246実験, J-PARC TREK実験
- ポーラリメーター
- ビーム試験
- 飛跡再構成
 - 検出効率
 - ドリフト速度
 - 飛跡再構成
- まとめ

$K_{\mu 3}$ 崩壊の μ^+ の横偏極 P_T

宇宙の物質と反物質の非対称性を説明するサハロフの条件の一つであるCPの破れ場の量子論の立場より,CPTが保存する. CPの破れ \Leftrightarrow Tの破れ

標準理論を越えた**時間反転対称性の破れ**を直接検証する!

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊



$$P_T = \frac{s_\mu \cdot (p_\pi \times p_\mu)}{|p_\pi \times p_\mu|}$$

$$\left(s = \frac{P}{|P|} \right) \quad (s: \text{スピン}, p: \text{運動量})$$

崩壊面に垂直な成分横偏極 P_T は,T-oddな物理量

→ **時間反転対称性の破れの探針**

標準理論の P_T の寄与が 10^{-7} 以下

FSIの大きさは 10^{-5} 程度

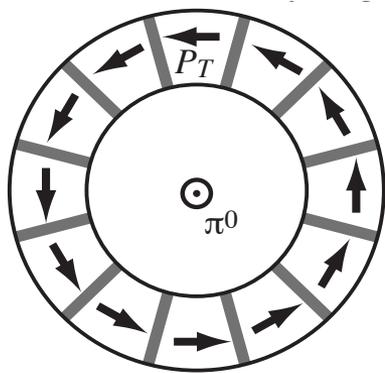
→ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ の範囲で見つければ,新しい物理

成分	T \rightarrow -T
s	odd
p	odd
$p \times p$	even
$s(p \times p)$	odd

E246 実験

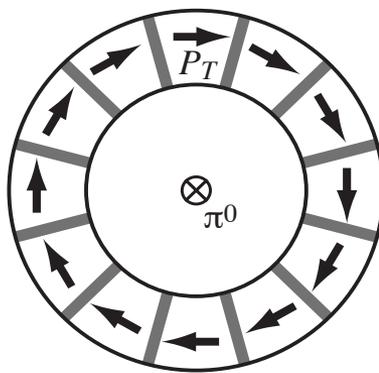
二重比測定

ある e^+ カウンターに注目すると N_{CW} と N_{CCW} の両方を測るのでカウンター検出効率の違いは相殺される. 位相空間で P_T が正になる部分と負になる部分の両方を測定し, それらの差(あるいは比)として P_T を引き出す.



$bwd - \pi^0 (\gamma)$

π^0 -forward



π^0 -backward

$fwd - \pi^0 (\gamma)$

$$A_{fwd(bwd)} = \frac{N_{CW} - N_{CCW}}{N_{CW} + N_{CCW}}$$

$$A_T = (A_{fwd} - A_{bwd}) / 2$$

$$P_T = A_T / \alpha$$

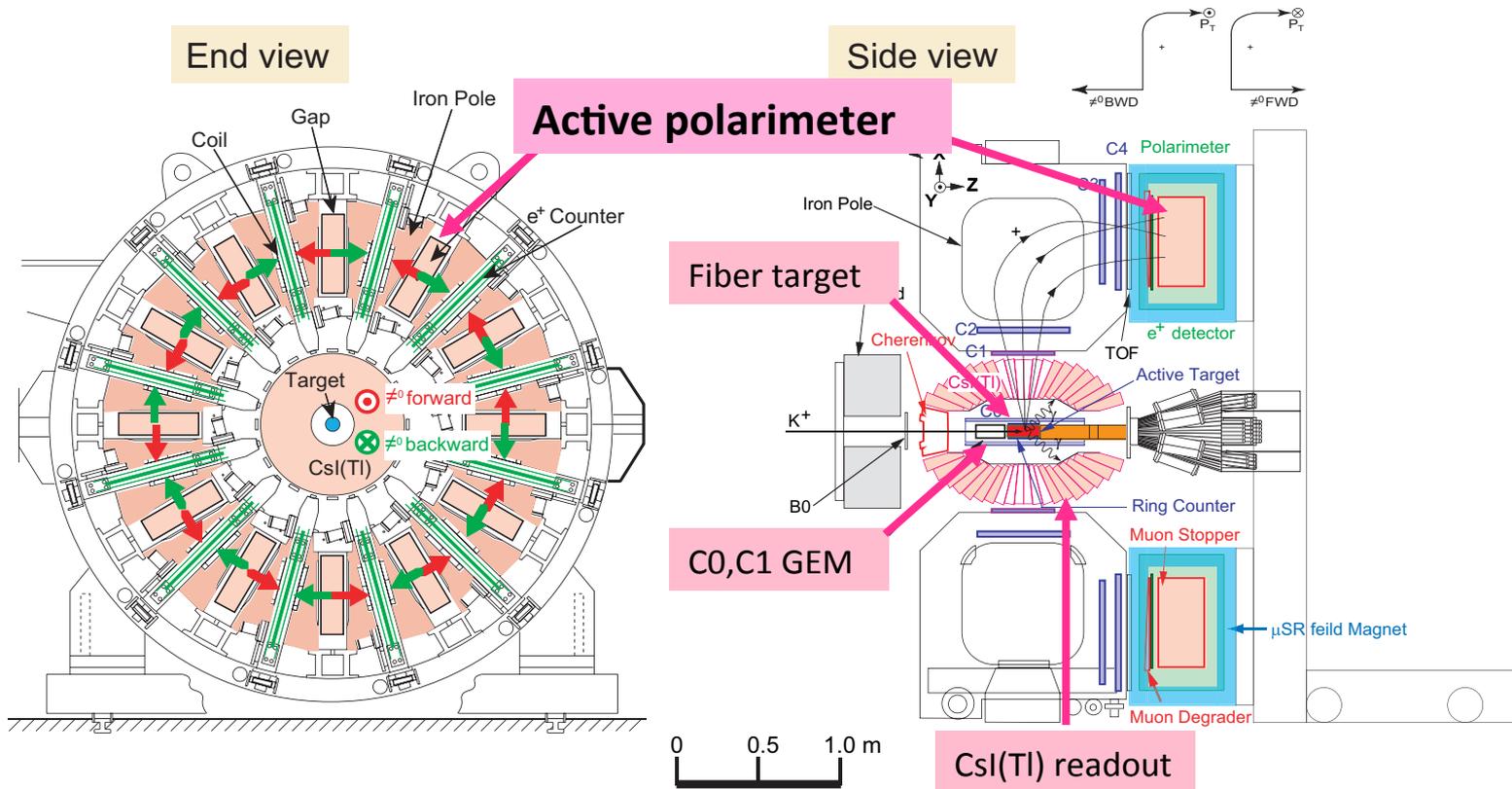
KEK-E246 (M. Abe et al., Phys. Rev. D73, 072005 (2006)):

$P_T = -0.0017 \pm 0.0023(stat) \pm 0.0011(sys)$ ($|P_T| < 0.0050 : 90\% C.L.$)世界記録

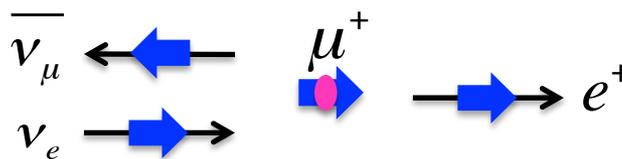
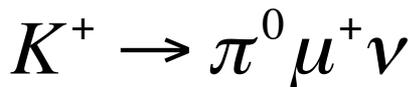
J-PARC TREK実験では, ビーム強度および測定器のアクセプタンスの改良 (total感度 $\times 20$) によって 10^{-4} の精度で有限の P_T を測定する.

TREK 実験

J-PARC TREK実験ではKEK-E246測定器を改良して使う。



ターゲットで静止した K^+ から放出されるミュオンの横偏極をポーラリメータで測定する。
 ポーラリメータでは、ミュオン崩壊からの陽電子がミュオンスピンの方向に出やすいことを
 用いて、トラックキングを行い、横偏極に対応する非対称度の測定をする。



$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

Michel muon decay

陽電子の方向とエネルギー

Michel spectrumの陽電子の放出エネルギー $x=E/E_{max}$ と角度の関係



$$\frac{d\Gamma}{dx d\cos\theta} \propto F(x) [1 + \alpha(x) \cos\theta]$$

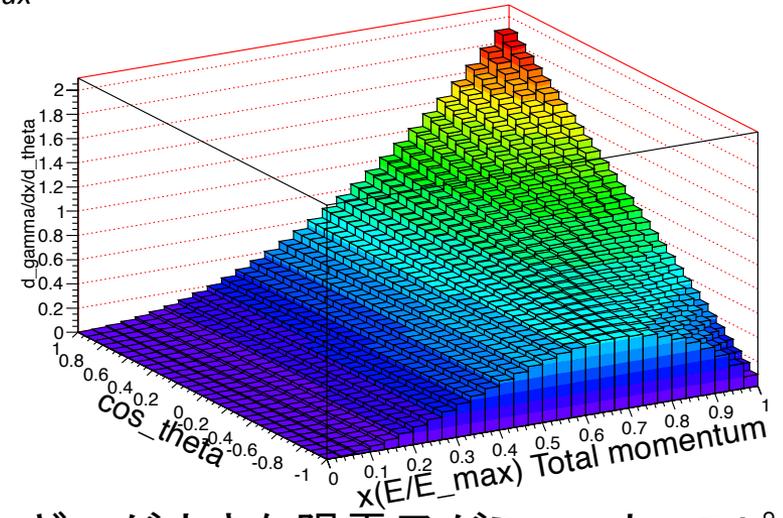
$$\alpha(x) = P_\mu \frac{2x-1}{3-2x} \quad : \text{非対称度}$$

$$F(x) = 2x^2(3-2x)$$

x_{min} は物質中でのエネルギー損失を免れた陽電子のカットオフエネルギー。

ここで $x_{min} \sim 0$ と仮定すると、右のように計算できる。

$$x^2 x^2 ((3-2x)^{-1} y^2 (1-2x))$$



エネルギーが大きな陽電子がミュオンスピンの方向を示す。

$$\int_{x_{min}}^1 F(x) \alpha(x) dx \approx \frac{P_\mu}{3}$$

$$\frac{d\Gamma}{d\cos\theta} \propto 1 + \frac{P_\mu}{3} \cos\theta$$

$$\alpha = \frac{P_\mu}{3}$$

ポーラリメーター

大きな改良点は、ポーラリメータの作り。

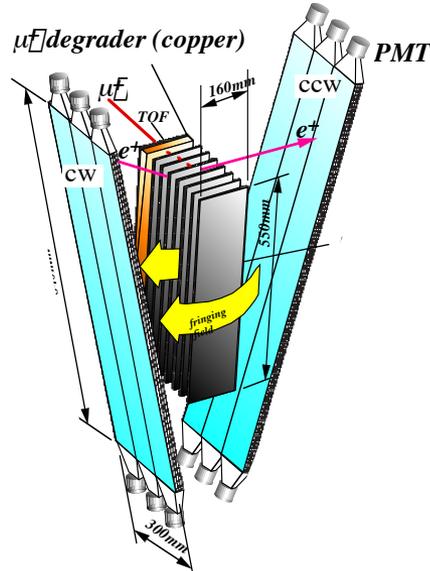
E246実験: ミューオンストッパーの両側に置いたカウンターで陽電子の数を数える。

TREK実験: ミューオンを止め、ミューオンと陽電子のトラッキングを行う。

陽電子の放出角度を測定し、ミューオンの偏極度を決定する。

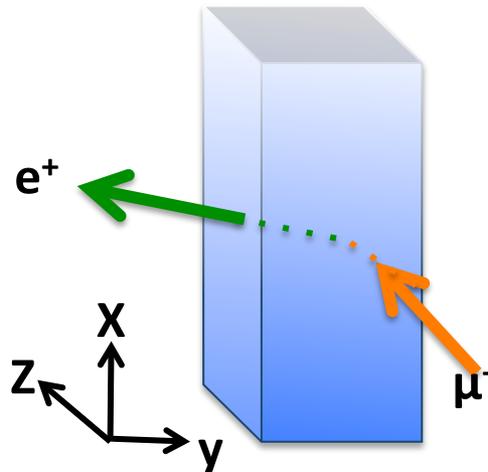
→ 10倍のアクセプタンスと大きなアナライジングパワーによって、 10^{-4} の高感度 P_T の検出を可能にする。

E246ポーラリメータ
One-sector view



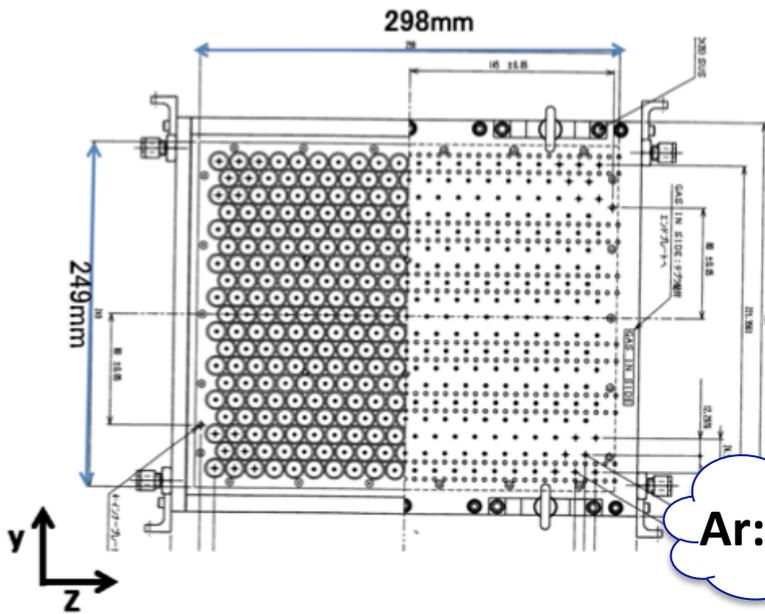
Passive polarimeter

TREKポーラリメータ
One-sector view

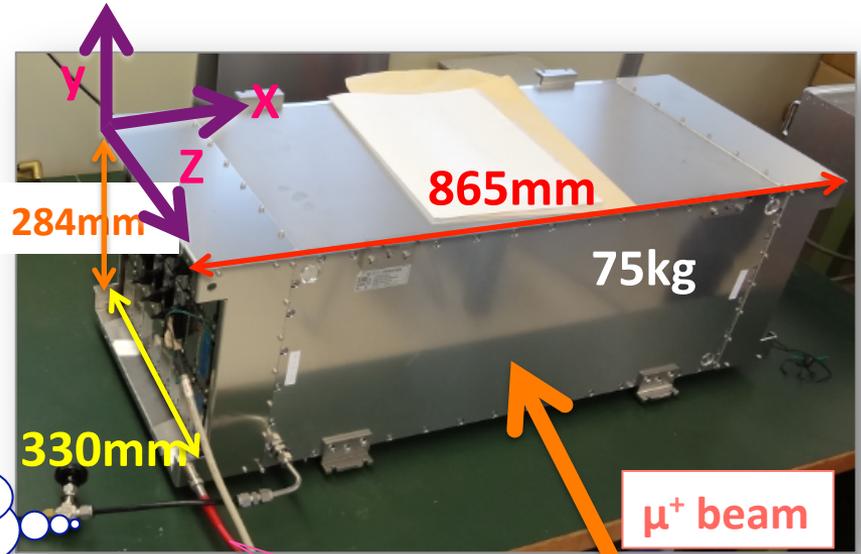


Active polarimeter

ポーラリメーター第二試作器 -MTP-



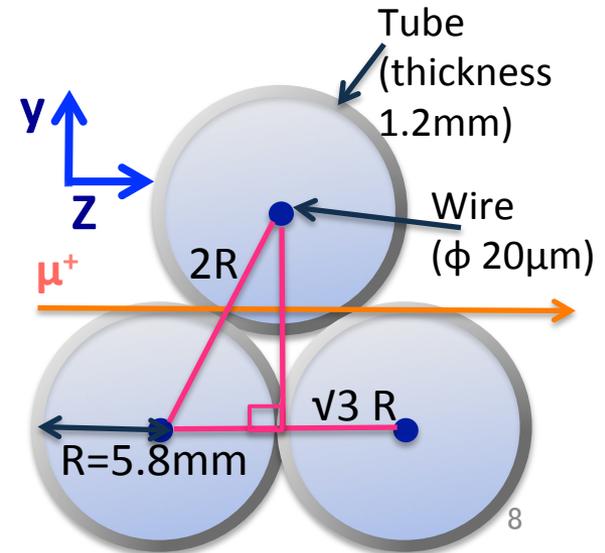
Ar:Et=50:50



HV +1980V

Muon Tube Polarimeter (MTP)

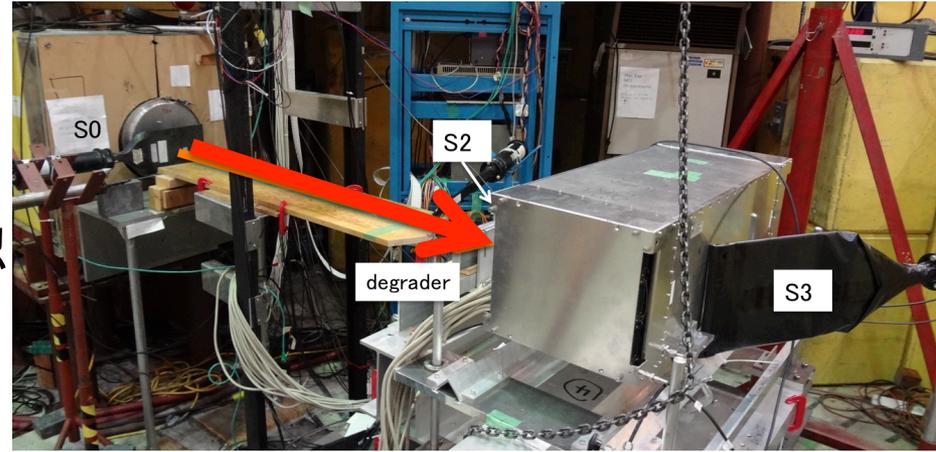
- チューブ型ドリフトチェンバー
- ポーラリメータの中心でミュオンを止められるようにチューブの壁に厚みがある(Geant4 simulationに基づいて決定).
- 等ドリフト時間分布が完全に円であり,容易にドリフト速度を実測できる.トラッキングも比較的容易.
- ワイヤーが切れても他の層に影響しない.
- YZ 面 :等ドリフト円をトラッキングし飛跡再構成
- x 軸 :電荷分割法で位置を決定



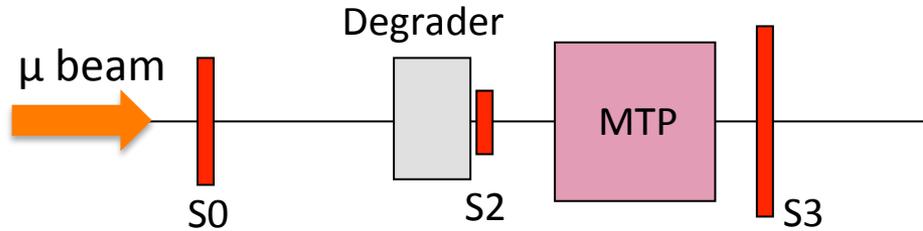
ビーム試験 @ TRIUMF

目的

- 飛跡の評価, 解析
- 非対称度測定
- アナライジングパワーの決定
- 10^{-4} の解析精度のための系統誤差の確認
- 電荷分割法の測定



ビーム運動量 : 170MeV/c

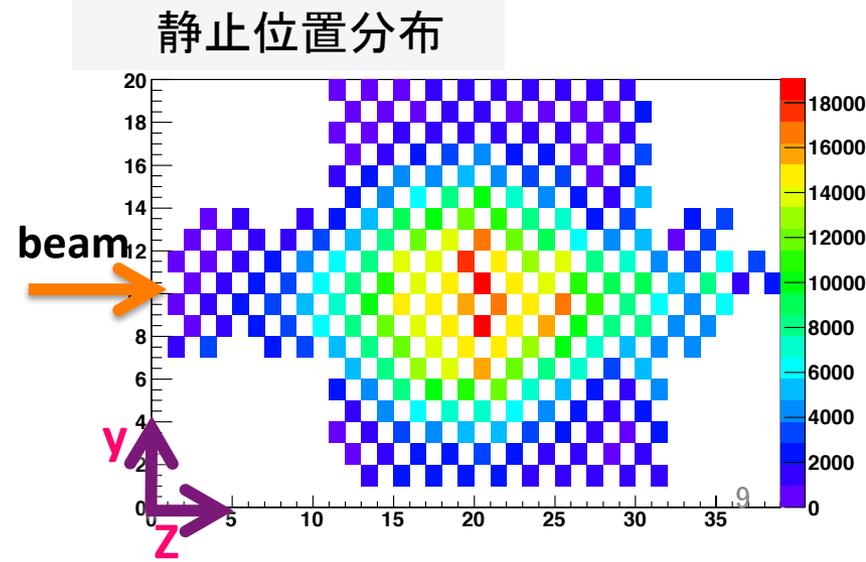


トリガー : $S0 * S2 * TOF(\mu \text{ or } \pi)$

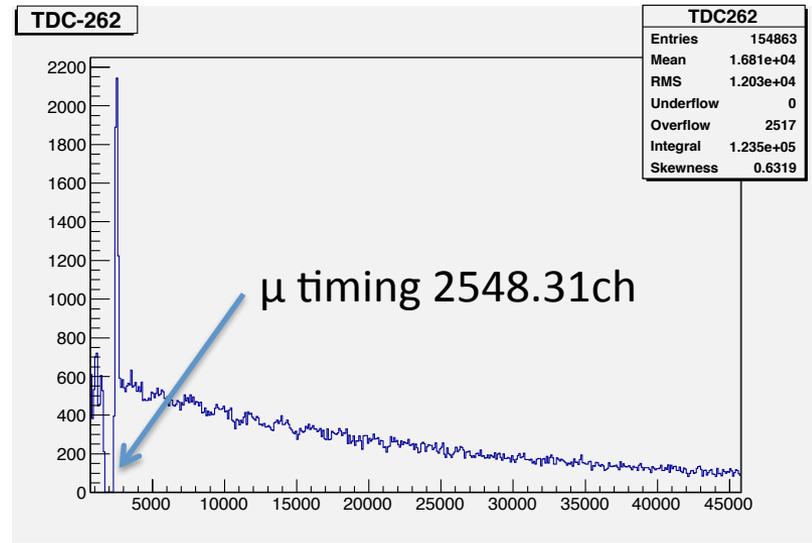
減速材 : Al

TOFによりトリガーで μ, π 選別

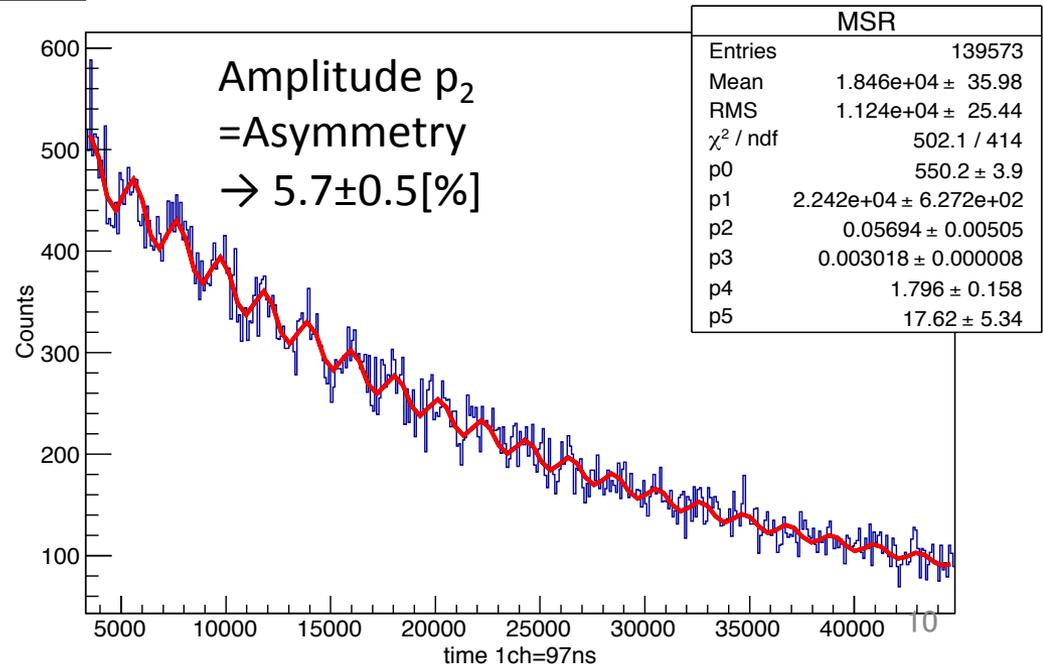
CAEN V792QDC, CAEN V1190B TDC



μ SR測定



MSR



Fitting function

$$f(T) = N_0 \exp\left(-\frac{T}{\tau_\mu}\right) \left(1 + A \cos(\omega T + \phi)\right) + B.G.$$

$$\equiv p_0 \exp\left(-\frac{T}{p_1}\right) \left(1 + p_2 \cos(p_3 T + p_4)\right) + p_5$$

μ SR 解析

時間原点でのスピンの向きを知りたい.

$$T=T_0+\beta t, \beta=1/0.09746$$

これを $f(T)$ に代入して $f(t)$ に変換すると,

$$\begin{aligned} f(t) &= p_0 \exp\left(-\frac{T_0}{p_1}\right) \exp\left(-\frac{\beta}{p_1}t\right) \left(1 + p_2 \cos(p_3\beta t + p_3T_0 + p_4)\right) + p_5 \\ &= a_0 \exp\left(-\frac{t}{a_1}\right) \left(1 + a_2 \cos(a_3t + a_4)\right) + a_5 \end{aligned}$$

$$\phi_0 = 3.20 \pm 0.17 [\text{rad}] \sim 183^\circ$$

実験に用いたミュオンビームは後ろ
向きに約17%偏極していた

$$P_\mu = \alpha_{beam} \times 3$$

a_1 : 崩壊の時定数 $2.1851 \pm 0.0611 \mu\text{s}$,
PDGより $2.19698 \mu\text{s}$

a_2 : 振動の振幅 $5.694 \pm 0.505 [\%]$

a_3 : スピン回転の角振動数

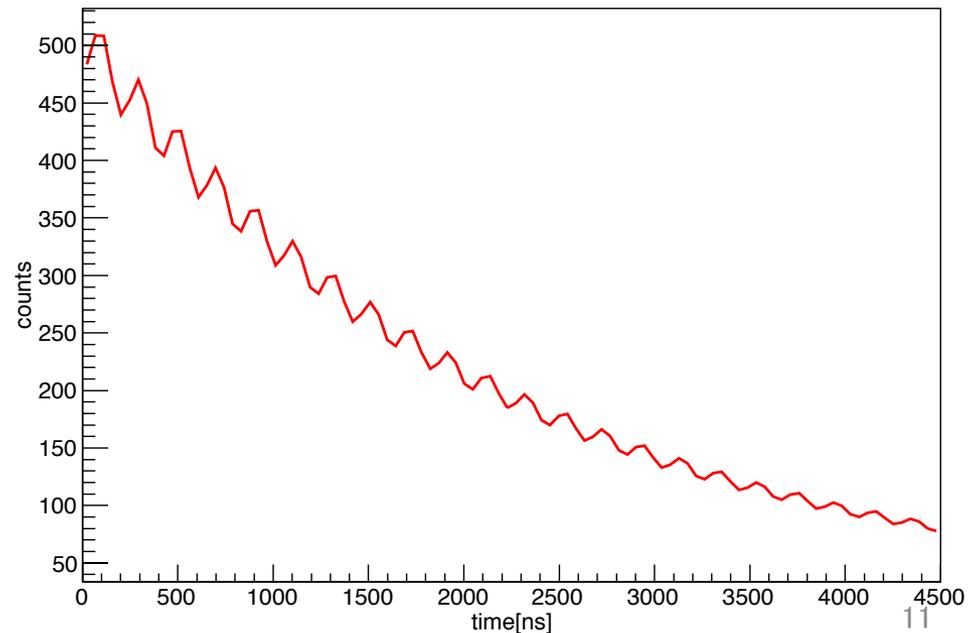
$$\omega = 2\pi f \text{より } f = 4.931 \times 10^{-3} (1\text{ns}) = 4.931 \pm 0.013 \text{MHz}$$

ミュオンの磁気回転比: 153.3MHz/T

磁場が 0.0366T より $f = 4.96 \text{MHz}$ が期待される

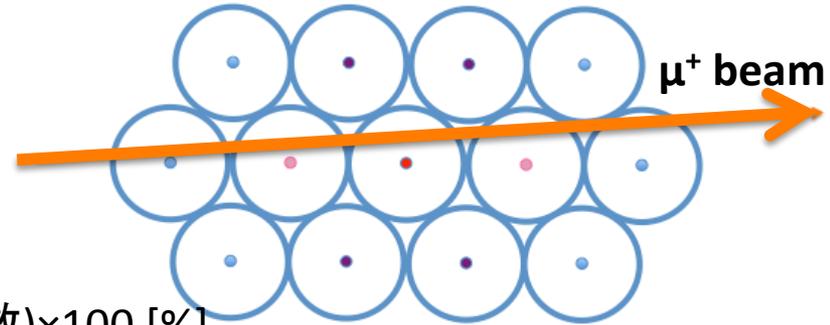
a_4 : $t=0$ の時のスピンの向きの位相

$$490.9 \cdot \exp(-x/2185.1) \cdot (1 + 0.05694 \cdot \cos(0.03097 \cdot x + 9.487)) + 17.62$$



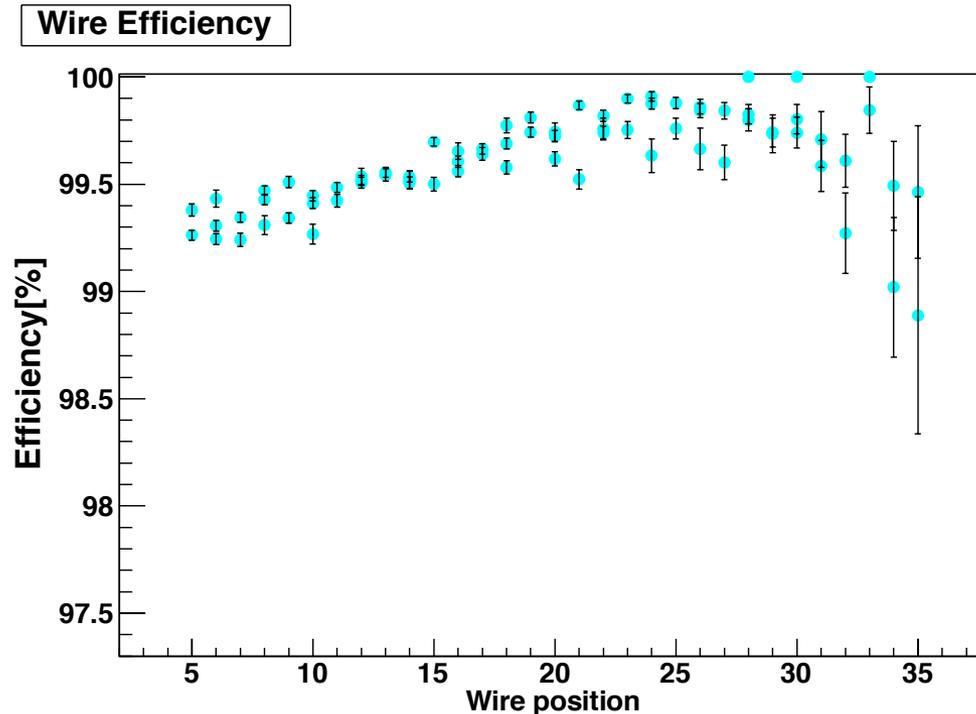
ワイヤー検出効率

ビームが通ったときに鳴る確率.
前後のワイヤーが鳴っているときに,
真ん中が鳴っているかどうかを調べた.



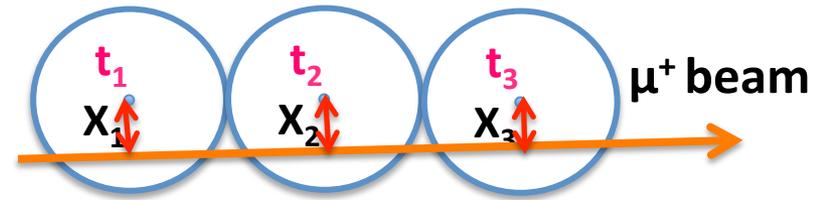
ワイヤー検出効率

= (前後と真ん中全て鳴った回数)/(前後が鳴った回数) \times 100 [%]



ドリフト距離に依存するワイヤー検出効率

ワイヤーとチューブの壁までのドリフト距離に依存する検出効率を調べた。

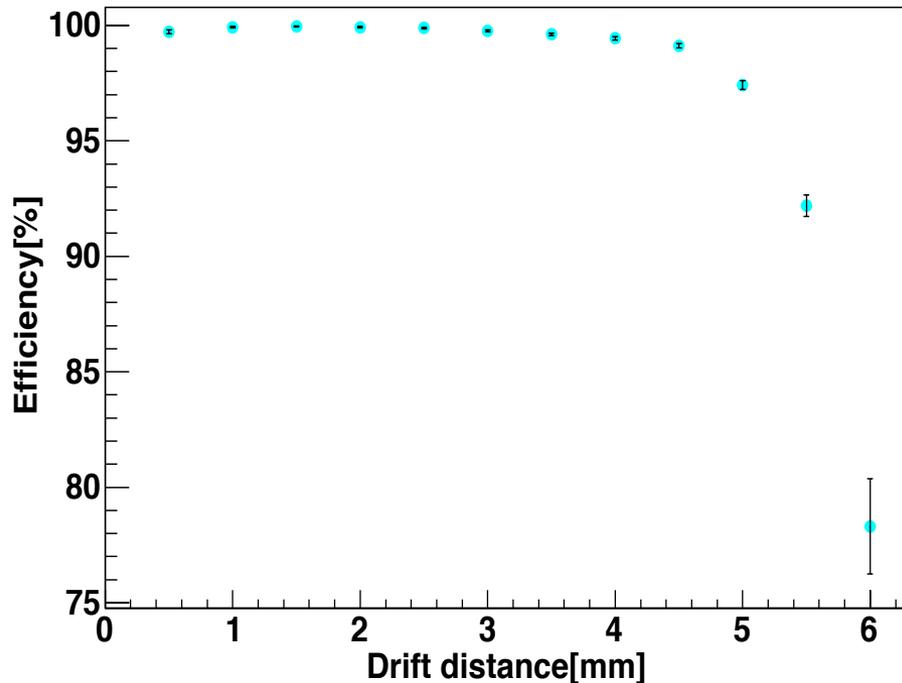


$$X_2 = (X_1 + X_3) / 2$$

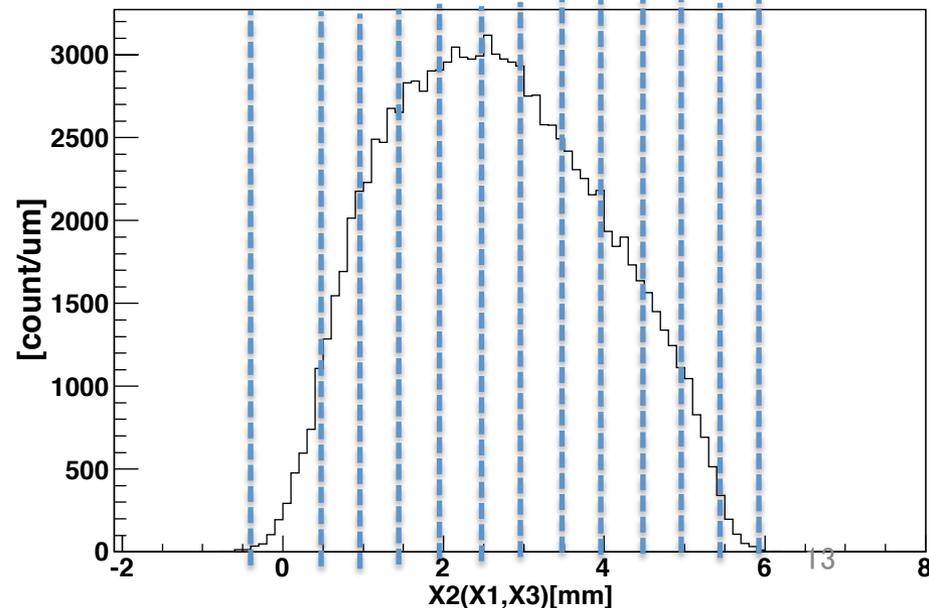
チューブに平行に入ってくるビームに対して真ん中のワイヤーがなっていることを0.5mm 毎に調べプロットした。

チューブ半径は5.8mmであり期待する検出効率を得られていることを確認した。

Efficiency



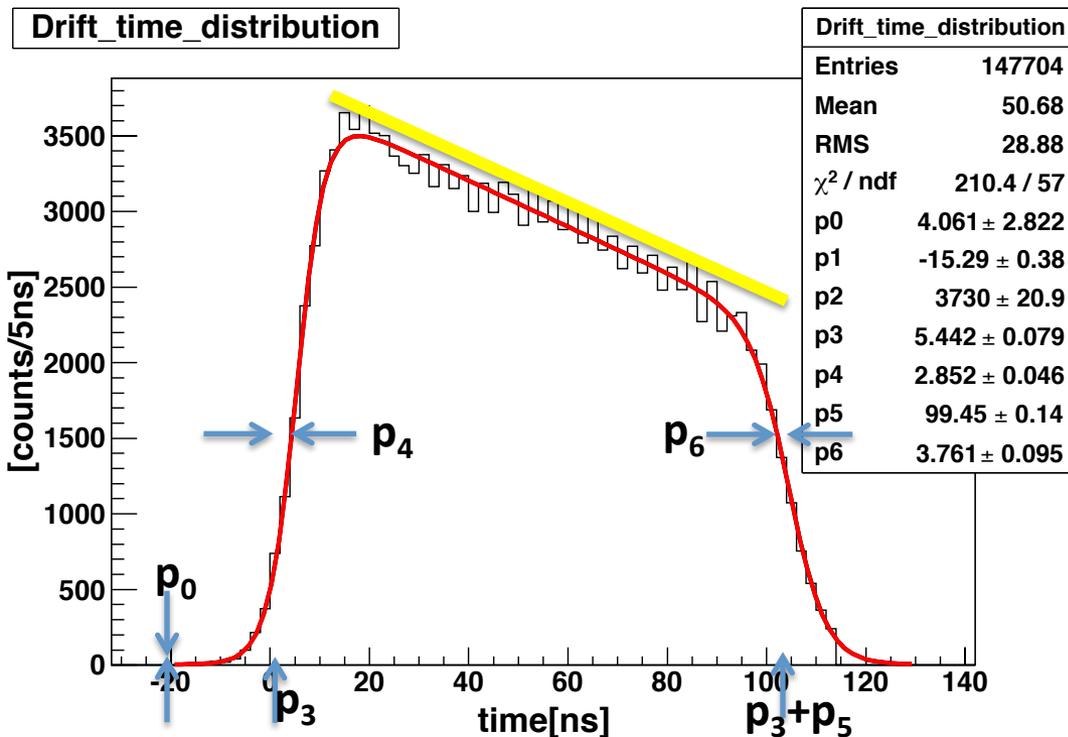
X2 distribution



ドリフト速度解析(パラメーターの決定)

ミュオンビームのみを選ぶカットをかけたドリフト時間分布を作った。
チューブ型ドリフトチェンバーとして期待される形である。

この分布を用いて時間と移動距離の関係およびドリフト速度を求めた。
ドリフト時間分布の傾きを一次関数で、立ち上がりと立ち下がり
Fermi-Dirac関数で表す式でフィットし、変数を決定した。



$$f(\tau) = p_0 + \frac{p_1((\tau - p_3) + p_2)}{(1 + \exp(-(\tau - p_3)/p_4))(1 + \exp(((\tau - p_3) - p_5)/p_6))}$$

- p_0 : back ground
- p_1 : slope of the drift time distribution
- p_2 : intercept
- p_3 : time starting point
- p_4 : width of the rising time
- p_5 : max of the drift distance
- p_6 : width of the fall time

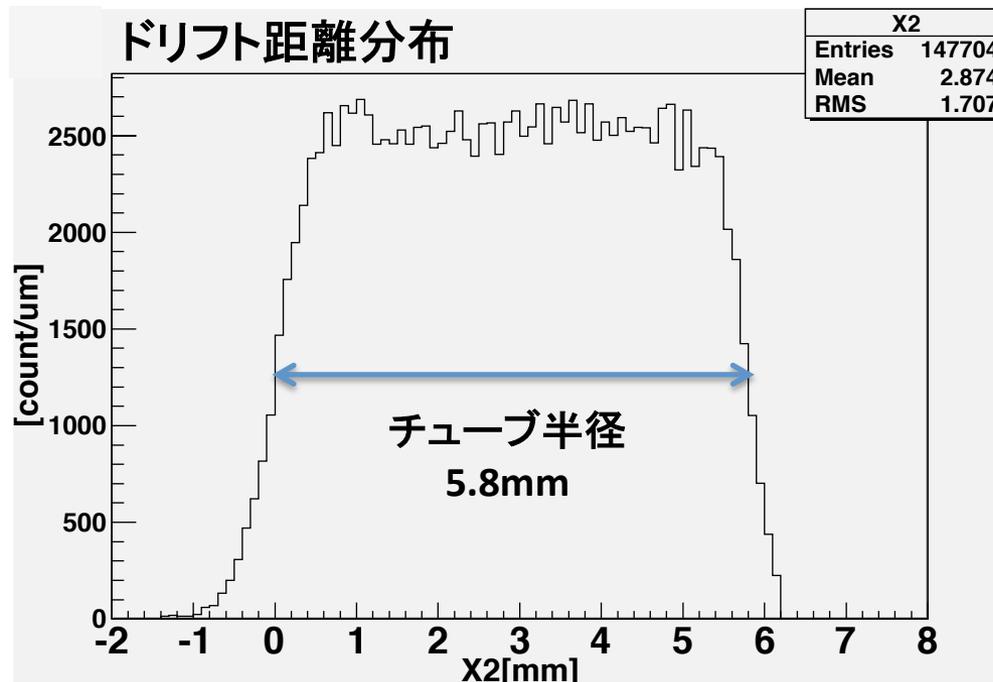
ドリフト速度解析

ドリフト時間分布の式を積分し、ワイヤー位置とチューブの壁面を境界条件としてX-T相関(ドリフト距離と時間)の式を決定した。

フィットの結果よりX-T相関の式は、以下の通りである。

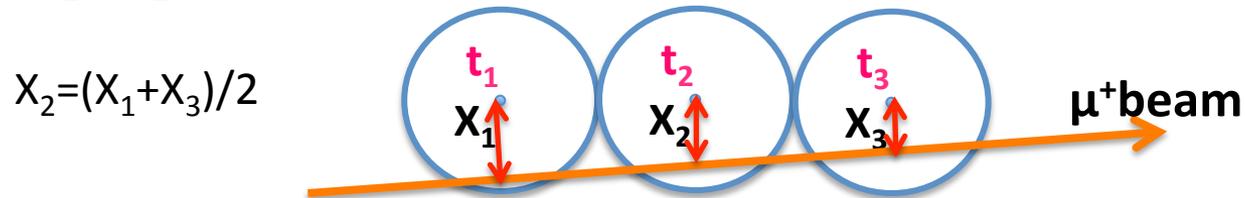
$$x(t) = \left(-1.50 \times 10^{-4}\right)t^2 + \left(7.33 \times 10^{-2}\right)t \quad (t \equiv \tau - p_3)$$

この式を用いてドリフト距離Xの分布を作り、ビームが一様に入射されていることが確認できた。さらにドリフト距離分布がチューブの構造をよく再現していることから、ドリフト速度の見積りが尤もらしいことが確認できた。

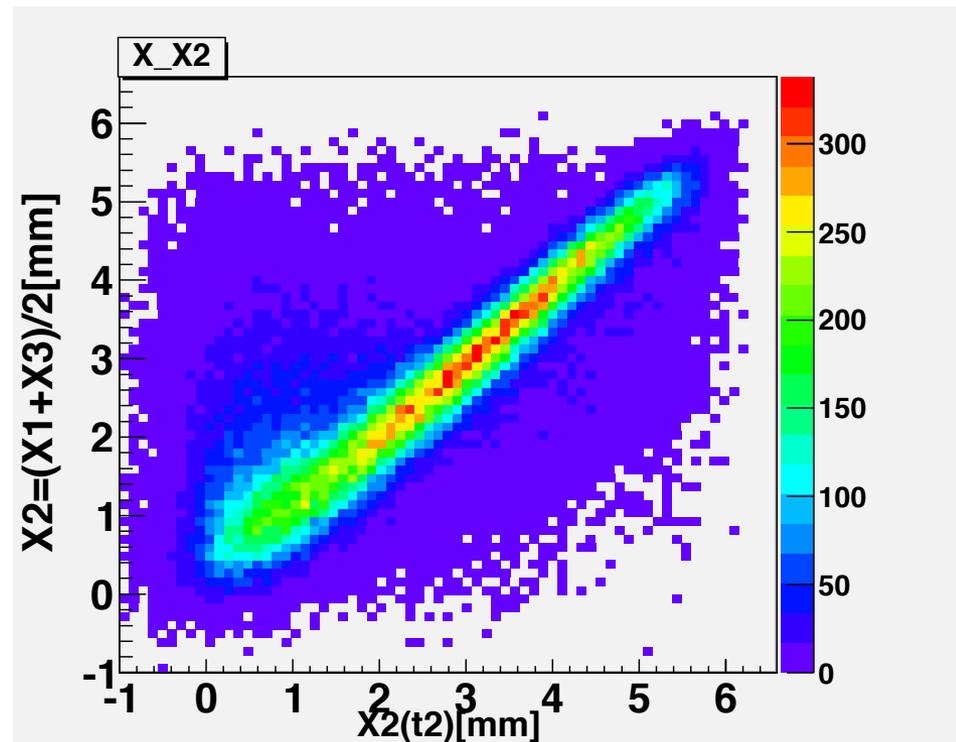


ドリフト速度解析(cross check)

図の位置関係にある3つのワイヤーを用いて真ん中のワイヤーの時間 t_2 を用いずに求めた距離 X_2 と t_2 の相関関係を調べた。



以下の $X_2(X_1, X_3)$ と $X_2(t_2)$ の相関関係より、フィットの結果とつじつまが合うことが確かめられた。

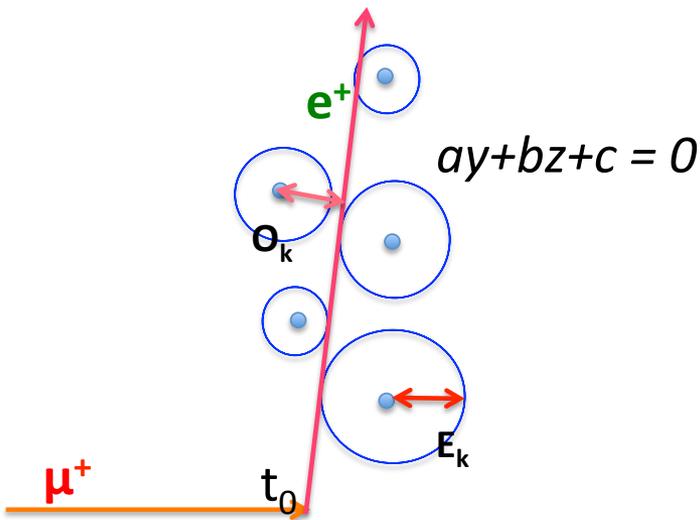


飛跡再構成

2次元(y-z面)での飛跡再構成

X-T相関を用いてヒットしたワイヤーを中心にドリフト円を描くことができる。
ドリフト円に接する, χ^2 値が小さい直線をひいた。

- ・ ミューオンの時間原点: trigger timingでわかる。
- ・ 陽電子の時間原点(t_0): イベント毎に異なるためフリーパラメーターとした。



$$O_k = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{ワイヤーと直線の距離}$$

$$E_k = Q_0(t - t_0)^2 + Q_1(t - t_0) \quad \text{ドリフト円の半径}$$

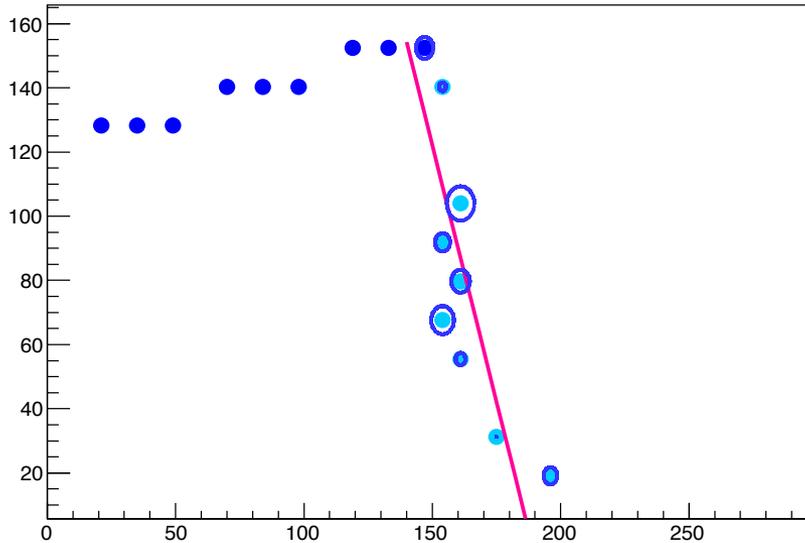
$$\sigma = \frac{p_0}{\sqrt{t - t_0}} + p_1 \quad \begin{array}{l} Q_0 = -0.00015014 \\ Q_1 = 0.073252 \end{array}$$

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(O_k - E_k)^2}{N_k \sigma^2} \quad \begin{array}{l} p_0 = 1.599 \\ p_1 = 0.1229 \end{array}$$

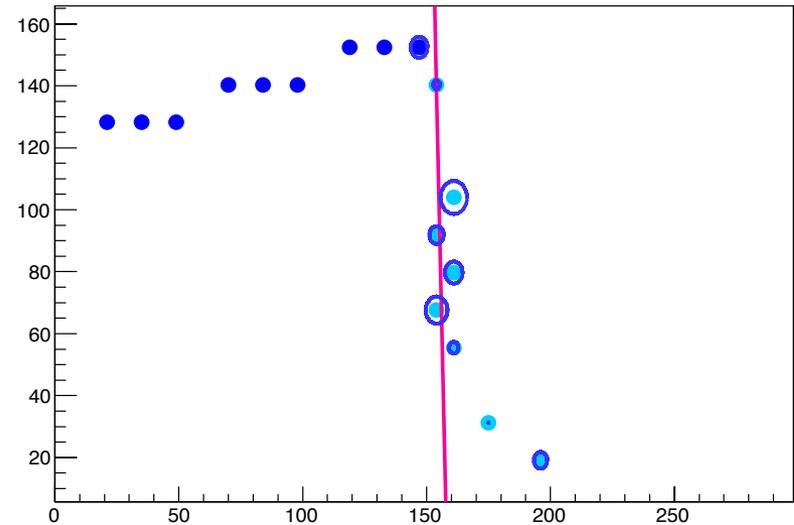
多重散乱の影響を考慮し正しく陽電子の放出角を測るため、重みをいれた

χ^2 に重みを入れた効果

Without weight
Tracking Map



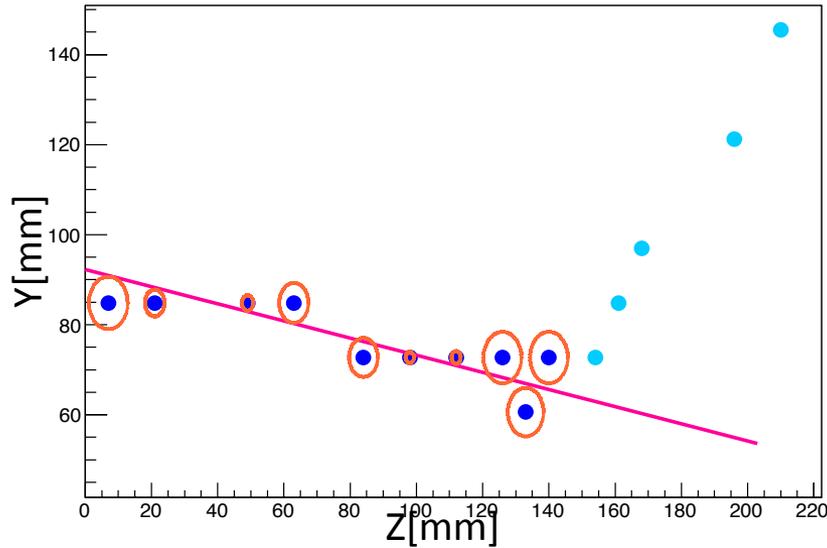
With weight
Tracking Map



重みを入れることで, 多重散乱された粒子に直線がひっぱられるのを防ぐことができ, 放出角を適切に測ることができるようになった.

結果

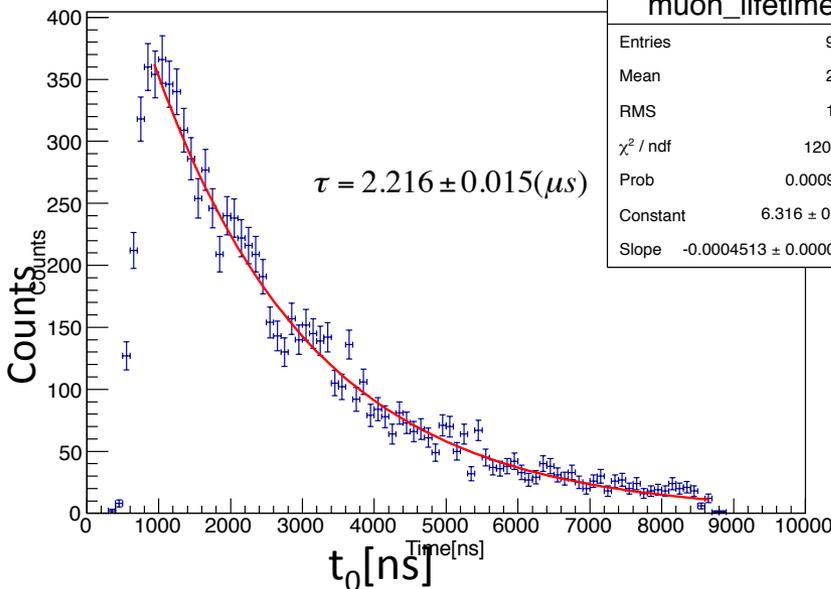
Example of Muon fitting



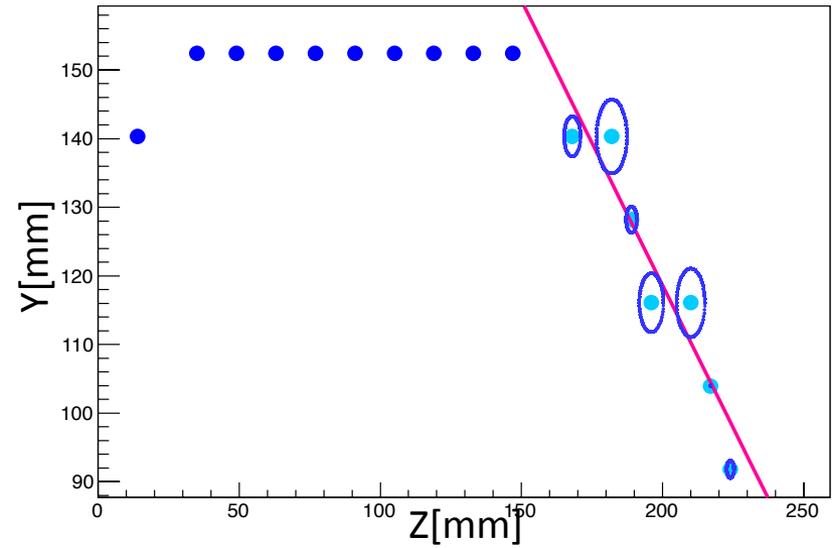
飛跡再構成効率 > 96%
muon_lifetime

muon_lifetime	
Entries	9086
Mean	2664
RMS	1816
χ^2 / ndf	120 / 76
Prob	0.0009614
Constant	6.316 ± 0.022
Slope	-0.0004513 ± 0.0000067

$$\tau = 2.216 \pm 0.015 (\mu\text{s})$$



Example of positron fitting



飛跡再構成効率 ~ 68%

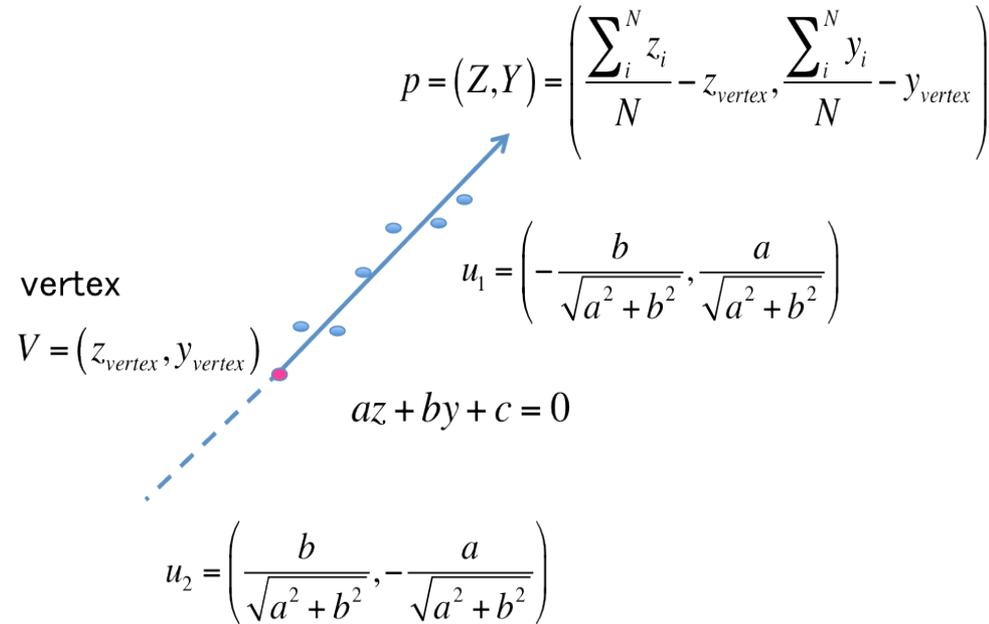
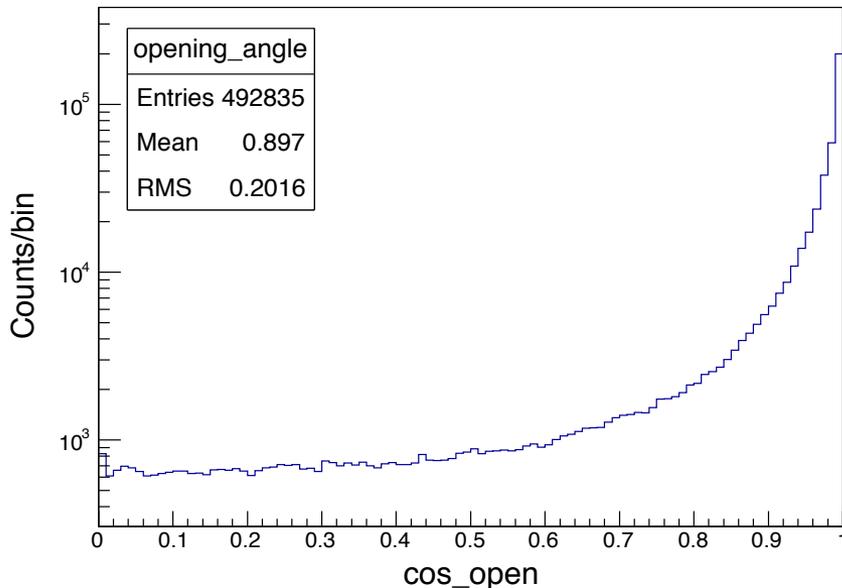
(二次元での飛跡再構成を行っているため、チューブに平行な飛跡は再構成が難しい.)

陽電子の飛跡再構成によって得られた t_0 分布を調べるとミュオンから崩壊した陽電子であることが確かめられた.

角度の定義

Fittingから決まるのはひとつの直線であり方向は決まらない。vertexから見た直線の方法方向ベクトルは2通りあるが、陽電子の出した方向を向いているものを選びたい。まず、直線の方法方向ベクトル u_i のうち、陽電子のhitの座標の平均を示すベクトル p との内積が正になるものを選択した。

opening_angle



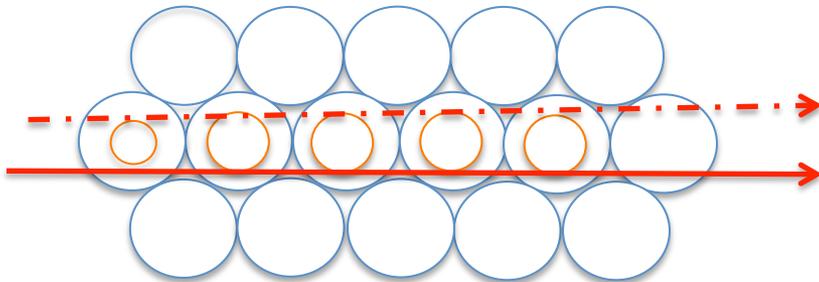
内積の角度 \cos は1になることが望ましいが、0付近にもなだらかに分布している。

飛跡再構成によって、vertexと陽電子の放出角が決められるようになった。

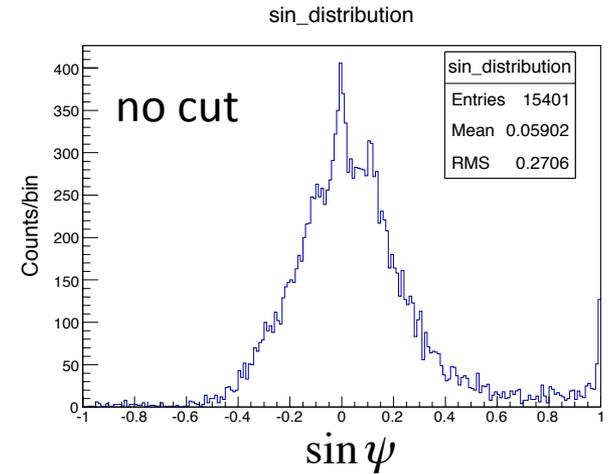
入射ビーム

入射ビームの角度分布を調べた。
 χ^2 値が大きいイベントは飛跡再構成がうまくおこなわれていないものであったため除いた。

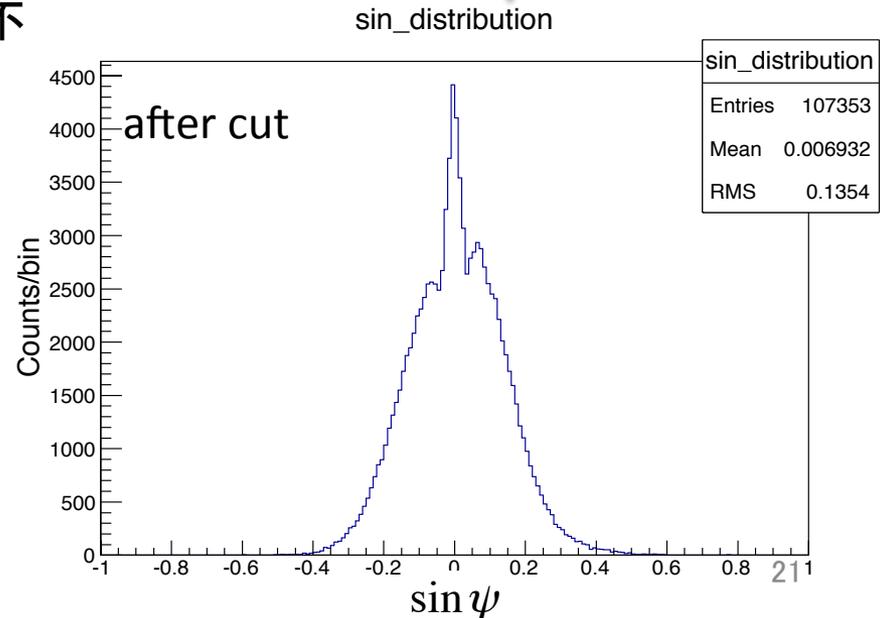
角度の拡がりは130mradくらいであった。
これはDegraderでの多重散乱(約94mrad)とビームの拡がり(約33mrad)によるものに相当する。
3つの山はまっすぐ通ったビーム, チューブの並びに平行に通った飛跡の再構成における左右の不定性によるものであると考えられる。



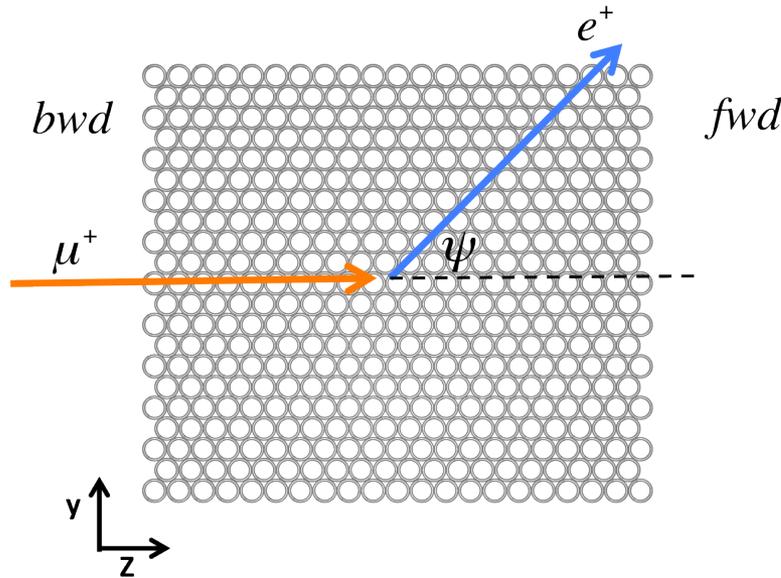
Left-right ambiguity



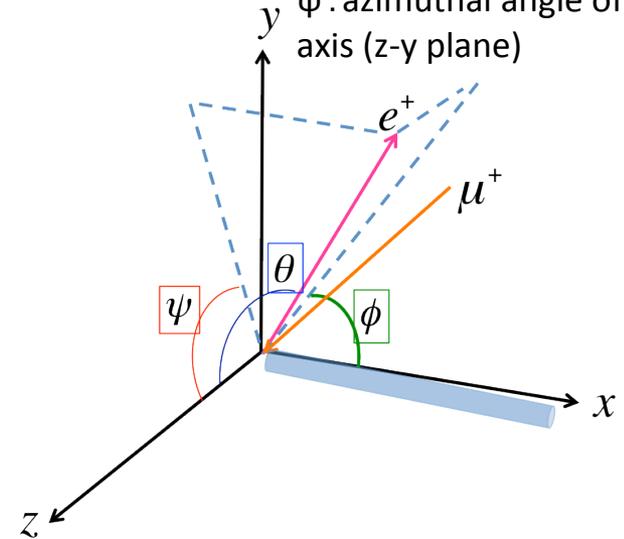
$\chi^2/\text{NDF} < 20$



非対称度解析



θ : polar angle of z-axis
 ϕ : azimuthal angle of x-axis (x-z plane)
 ψ : azimuthal angle of z-axis (z-y plane)



ψ : positron emitted angle on 2-dimension

陽電子放出角の非対称度を測れているか.

二次元に射影した角度 ψ を用いて,
 前方($\cos\psi > 0$) or 後方($\cos\psi < 0$)の数を数える.

$$A_{fb} = \frac{N_{fwd} - N_{bwd}}{N_{fwd} + N_{bwd}}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi \\ \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\cos\psi = \frac{z}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (1 - \cos^2\theta)\sin^2\phi}}$$

$$\sin\psi = \frac{y}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{\sin\theta \sin\phi}{\sqrt{\cos^2\theta + (1 - \cos^2\theta)\sin^2\phi}}$$

まとめ

- TREK実験では $K_{\mu 3}$ 崩壊でのミュオンの横偏極 P_T を用いて時間反転対称性の破れを探索する.
- P_T 測定の要であるポーラリメーターの性能評価の為にビームテストを行った.
- 実験に用いたビームの偏極度は μ SRを測定することで調べた.
- 期待されるワイヤー検出効率が得られた.
- ドリフト速度を見積もり,飛跡再構成を行った.
- 陽電子放出角を測れるようになった.
- ポーラリメーターには系統性があることがわかり(ポーラリメーターが有限の大きさであることに由来), 現在その詳細についてシミュレーションも行うことで解析している.

Backup Slides

シミュレーション

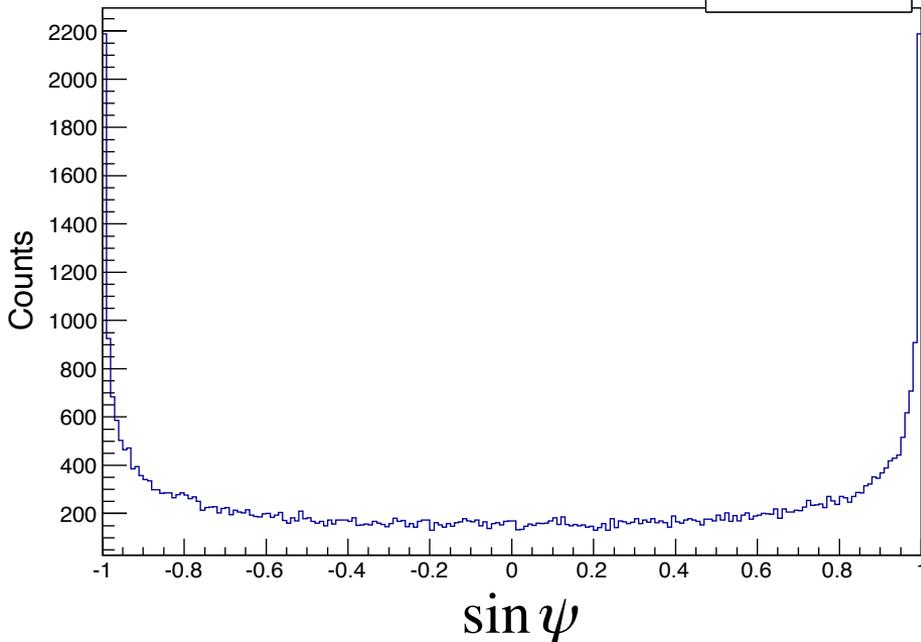
$$\frac{d\Gamma}{dx d\cos\theta} \propto F(x) [1 + \alpha(x) \cos\theta]$$

Geant4により,期待される角度分布.

$$\sin\psi = \frac{y}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{\sin\theta \sin\phi}{\sqrt{\cos^2\theta + (1 - \cos^2\theta) \sin^2\phi}}$$

sin distribution

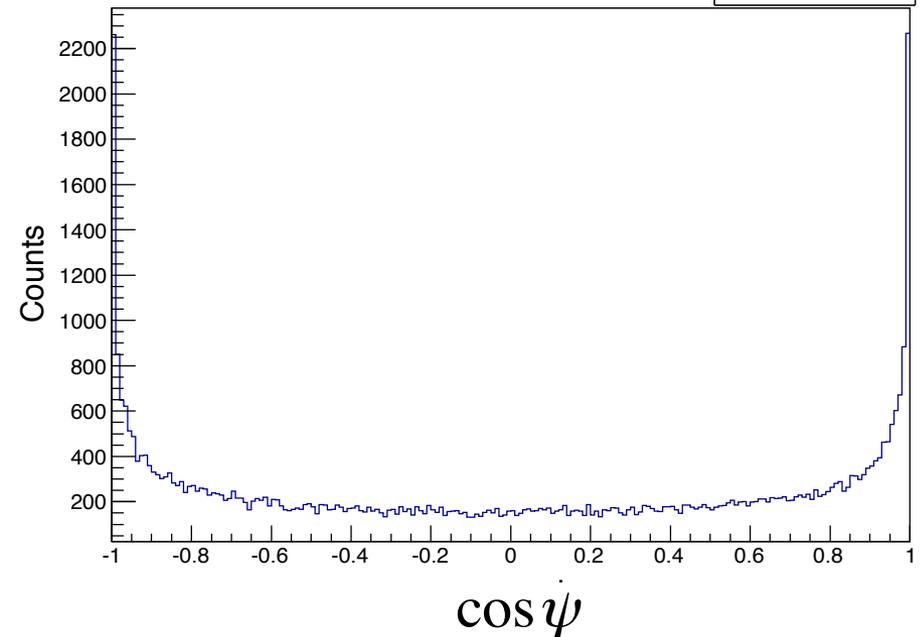
Entries 48511



$$\cos\psi = \frac{z}{\sqrt{z^2 + y^2}} = \frac{\cos\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + (1 - \cos^2\theta) \sin^2\phi}}$$

cos distribution

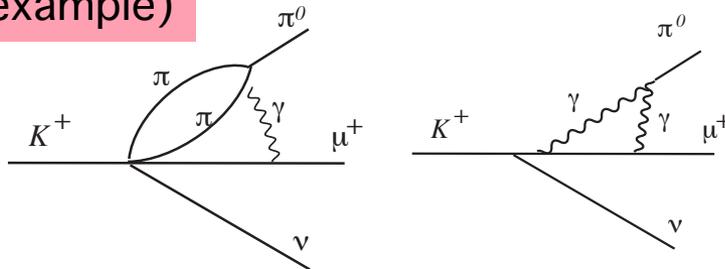
Entries 48511



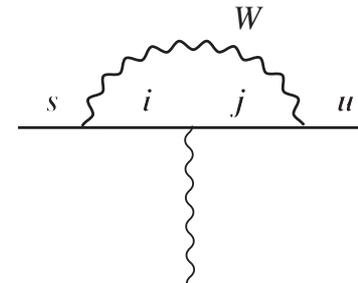
Transverse μ^+ polarization (P_T) in $K_{\mu 3}$

- P_T が0でない値を持ち,崩壊後の終状態相互作用(FSI)で擬似的に P_T が誘起されないならば時間反転性が破れている。
- ($K_L \rightarrow \pi \mu^+ \nu$ 崩壊ではFSIの2個の荷電粒子の間にCoulomb力が働いてしまうが, K^+ ならFSIが非常に小さい)。
- Kobayashi-Masukawa理論のStandard Modelでは P_T はとても小さい。
- 10^{-5} より大きい値で P_T を見つければ、SM以外のCPの破れの起源を見つけたことになる。

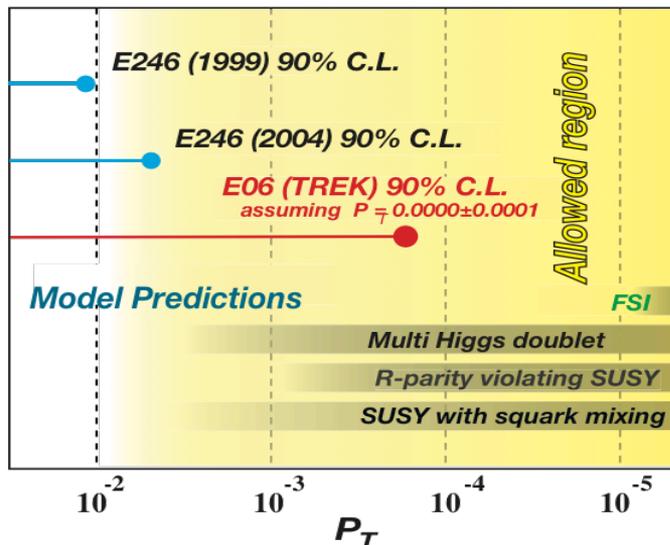
FSI (example)



SM

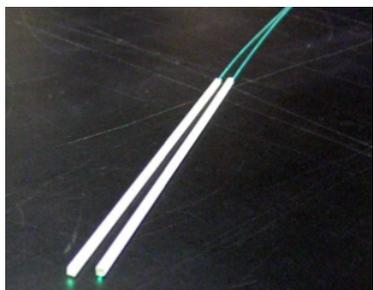


small vertex correction

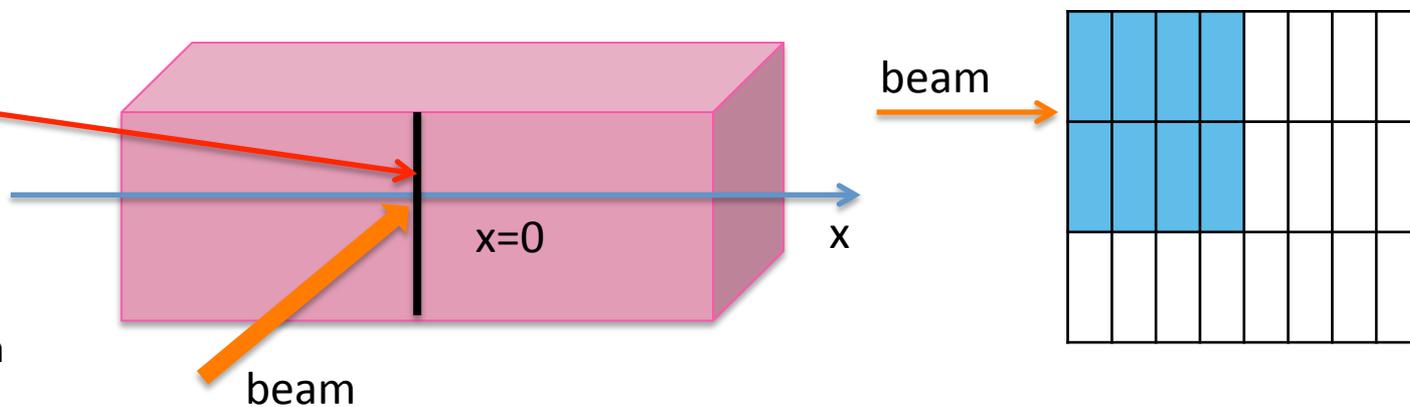


Charge division study

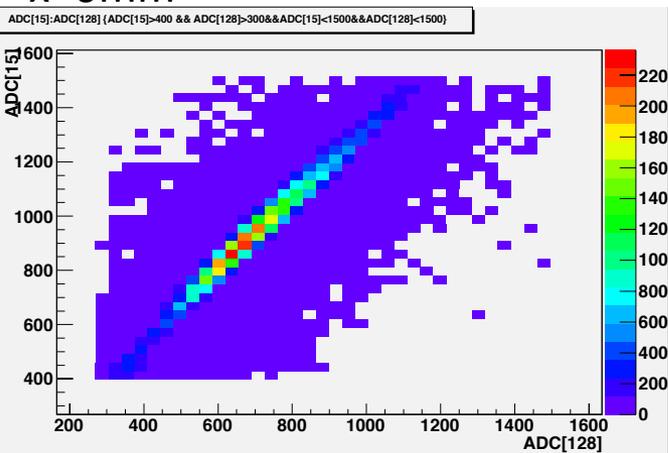
- Read both sides of wire
- The position where particle hit on each wires could be determined using the charge ratio.
- To find offset parameter derived from such as amps, we focused narrow beams on chamber and changed position for x-axis.



3mm×3mm×200mm
fiber scintillator

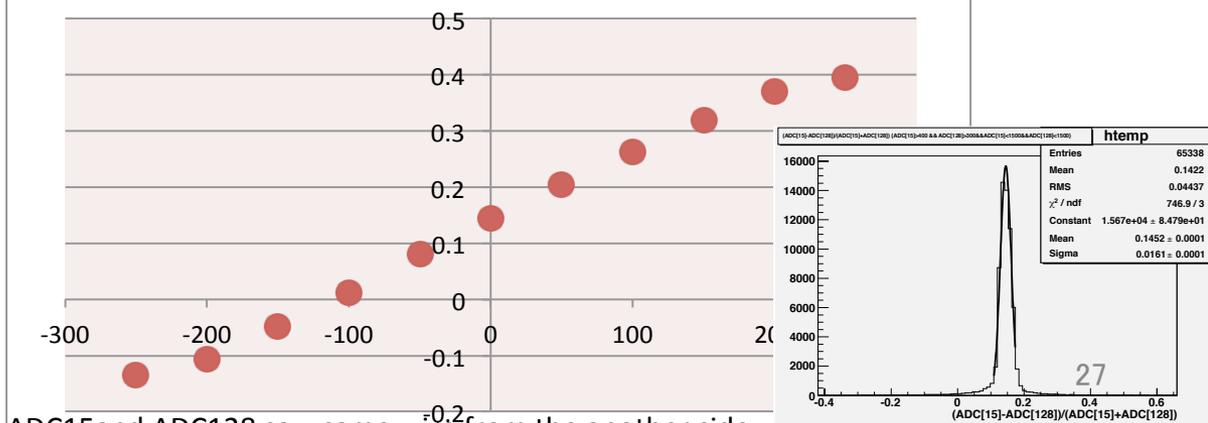


x=0mm



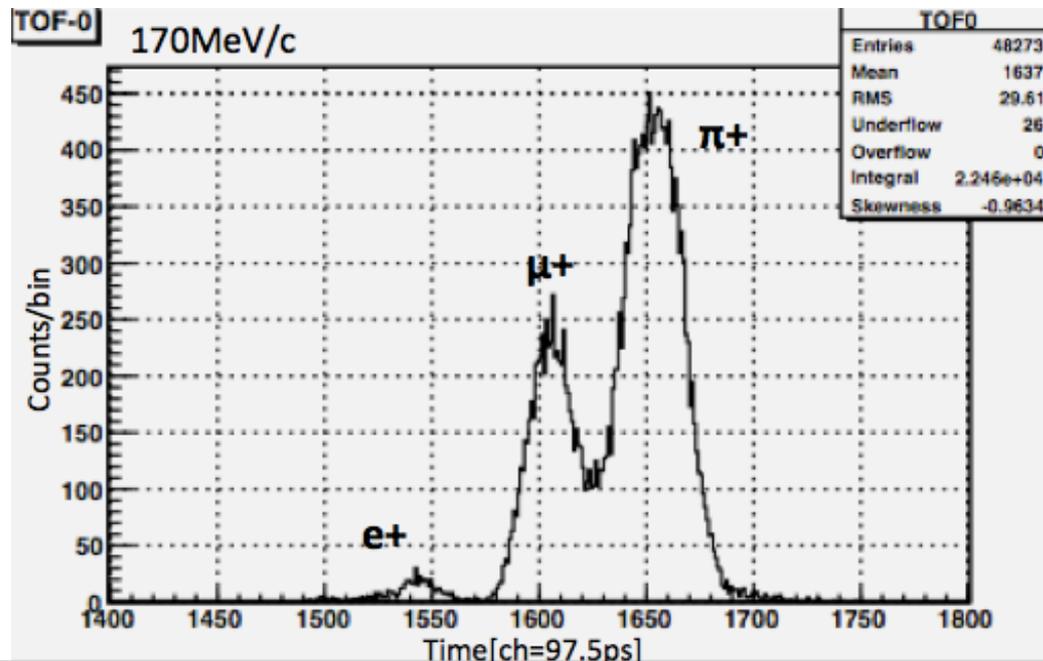
$$R = \frac{Q_{ADC15} - Q_{ADC128}}{Q_{ADC15} + Q_{ADC128}}$$

x-R relation



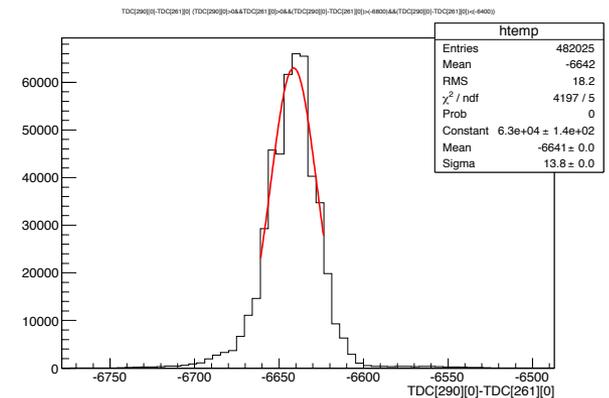
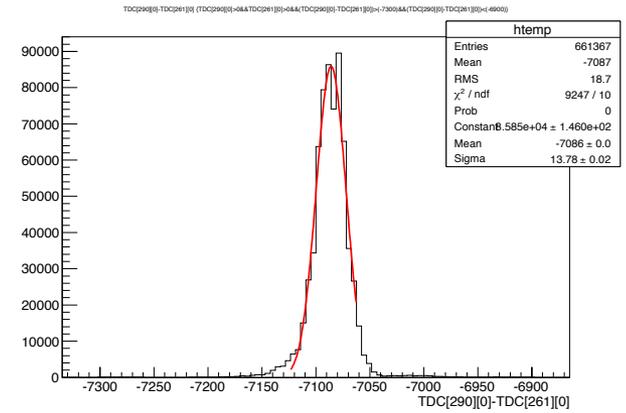
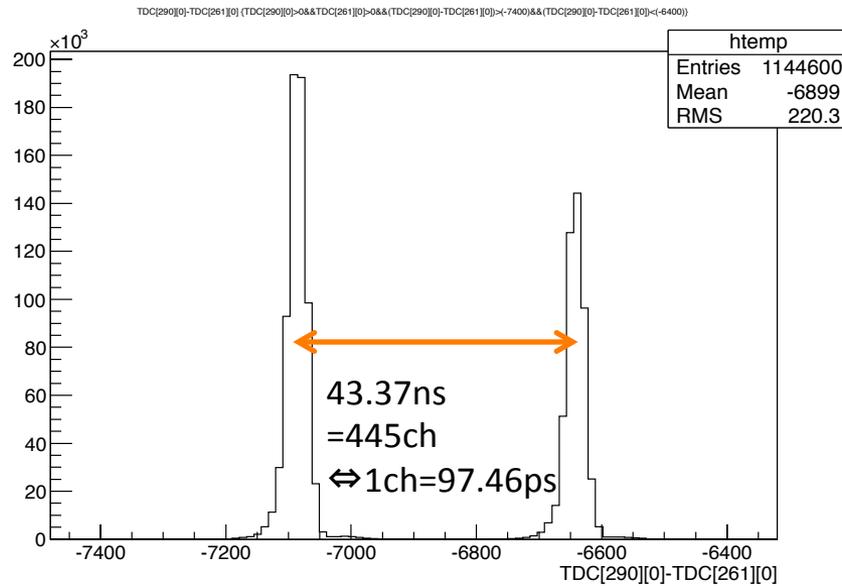
ADC15 and ADC128 saw same wire from the other side

TOF spectrum



	π^+	μ^+	e^+
Lifetime	26.033(5) ns	2.19703(4) μ s	$> 4.3 \times 10^{23}$ y
Mass (MeV/ c^2)	139.56995(35)	105.8389(34)	0.51099907(15)
Charge (e)	+1	+1	+1
Spin (\hbar)	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Delay (ns)	8	24	38

TDC calibration



The frequency for the TRIUMF cyclotron is 23.06 MHz so the time separation of the beam pulses is 43.37 nsec.

E246 Systematic errors

Source	Canceled by		$\delta P_T \times 10^4$
	Σ_{12}	<i> fwd/bwd</i>	
e^+ counter r -rotation	yes	yes	0.5
e^+ counter z -rotation	yes	yes	0.2
e^+ counter ϕ -offset	no	yes	2.8
e^+ counter r -offset	yes	yes	< 0.1
e^+ counter z -offset	yes	yes	< 0.1
\vec{B} offset (ϵ)	no	yes	3.0
\vec{B} rotation (δ_r)	no	yes	0.37
\vec{B} rotation (δ_z)	no	no	5.3
μ^+ counter y -offset	no	yes	< 0.1
CsI(Tl) misalignment	yes	yes	1.6
K^+ stop distribution	yes	yes	< 3.0
MWPC y -offset (C4)	no	yes	2.0
K^+ - <i>dif</i> background	yes	no	< 1.9
$K_{\pi 2}$ - <i>dif</i> background	no	yes	0.6
μ^+ multiple scattering	yes	no	7.1
e^+ time spectrum	no	yes	0.8
Decay plane angle (θ_r)	no	yes	1.2
Decay plane angle (θ_z)	no	no	0.66
Uncertainty of α	-	-	1.3
$\langle \cos \theta_T \rangle$ uncertainty	-	-	3.3
P_T gradient	-	-	0.3
Analysis	-	-	0.9
Total			11.4

磁場の不定性

K^+ 静止位置の不定性

μ^+ 多重散乱

崩壊面の不定性

$P_T = -0.0017 \pm 0.0023(stat) \pm 0.0011(sys)$
 ($|P_T| < 0.0050 : 90\% C.L.$)
Statistical error dominant

Table 4: Outline of the proposed experiment in comparison with E246

	TREK	E246
<i>Methodology</i>		
Beam	stopped K^+	stopped K^+
Detector setup	Toroidal Spectrometer with upgraded E246 setup	Toroidal Spectrometer with E246 setup
Asymm. measurement		
Polarimeter	Active polarimeter	Passive polarimeter
Field method	Longitudinal $\mathbf{B} \parallel P_T$ $B = 300$ Gauss by dipole magnets	Longitudinal $\langle \mathbf{B} \rangle \parallel P_T$ $B = 150-300$ Gauss by SC toroidal magnet
π^0 selection	primarily in <i> fwd </i> and <i> bwd </i> integral or event-by-event option of event by event in <i> L/R </i> $\langle \cos \theta_T \rangle$ correction for integral	integral in <i> fwd </i> and <i> bwd </i> correction by $\langle \cos \theta_T \rangle$
e^+ detection	event-by-event with E_{e^+} , θ_{e^+} measurement	integral in the e^+ counter
P_T deduction	weighted analysis	use of analyzing power α $P_T = A_T / (\alpha \langle \cos \theta_T \rangle)$
π^0 detection	2γ	$2\gamma + 1\gamma$
μ^+ tracking	5 chambers + target	3 chambers + target
Alignment	10^{-4} by positioning and using data	10^{-3} by positioning
<i>Main upgrades</i>		
Tracking	C0(GEM)+C1(GEM)+C2+C3+C4 in He gas bag	C2+C3+C4 in air
Target	$\sim 60\text{mm}\phi$ with $2.5 \times 2.5\text{mm}$ Sci.fiber (L=0.2m) SiPMT readout	$93\text{mm}\phi$ with $5 \times 5\text{mm}$ Sci.fiber (L=1.85m) $1/2^\circ$ PMT readout
π^0 detection	CsI(Tl) with APD readout with FADC	CsI(Tl) with PIN readout with PH-ADC
e^+ detection	active stopper with DWPCs	plastic counters
Data taking	KEK-VME, COPPER system	TKO+FASTBUS, UNIDAQ

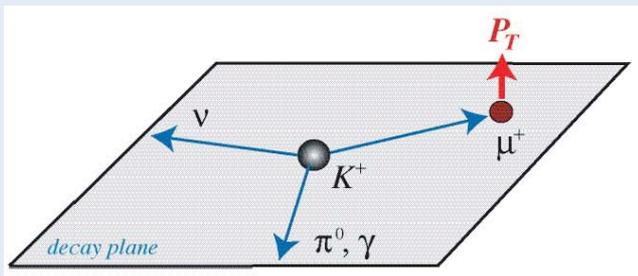
計画されている主な測定

時間反転対称性の破れの測定

$K_{\mu 3}$ 崩壊における μ^+ 垂直偏極測定



$$P_T = \frac{\sigma_\mu \cdot (\mathbf{p}_{\pi^0, \gamma} \times \mathbf{p}_{\mu^+})}{|(\mathbf{p}_{\pi^0, \gamma} \times \mathbf{p}_{\mu^+})|}$$



TREK 実験では 10^{-4} の目標精度で測定を行う

LFU 検証実験

$\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$ の測定

$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu)}{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)} = \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2} \right)^2 (1 + \delta_r)$$

V-A 型相互作用による
ヘリシティ抑制

$K \rightarrow l \nu \gamma$ 崩壊 IB 部分の補正

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

$$R_\pi^{SM} = (12.352 \pm 0.001) \times 10^{-5}$$

標準模型での不確定さ $\Delta R_K / R_K \sim 0.05\%$

$$R_K = (2.488 \pm 0.009) \times 10^{-5} \text{ (KLOE, NA62)}$$

標準模型から 1.9σ 離れている

目標測定精度は $\Delta R_K / R_K \sim 0.002$