

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu (K_{\mu 3})$
を用いた時間反転対称性
の破れ探索実験

東京大学 理学系研究科 物理学専攻

吉原 圭亮

16th ICEPP Symposium

Outline

- ◆時間反転対称性の破れとCPの破れ
- ◆ミュオン横偏極
- ◆KEK-PS E246実験
- ◆J-PARC E06(TREK)実験と検出器のアップグレード
- ◆ミュオンポラリメータ試験
- ◆まとめ

◆時間反転対称性の破れとCPの破れ

何故、我々の宇宙が物質優勢の宇宙なのか？

物質優勢の宇宙を作るためには...

サハロフの3条件

今日の素粒子、宇宙物理の最重要課題の一つ

1. Baryon数を破る反応の存在
2. C、CPの破れ
3. 熱的非平衡

- 場の量子論の立場からはCPT定理が成り立っているのでCPの破れとTの破れは同値である。
- 現在、 K^0 系やB系で確立しているCPの破れはStandard ModelでのCKMで説明できる。
- 物質優勢の説明には不十分である。

新しいCP-Violationの phaseを探すこと！

T-violation 探索実験

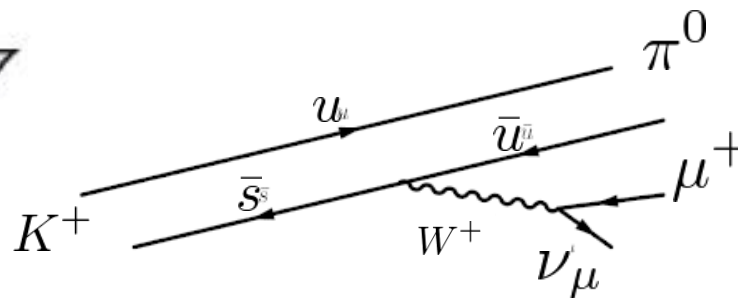
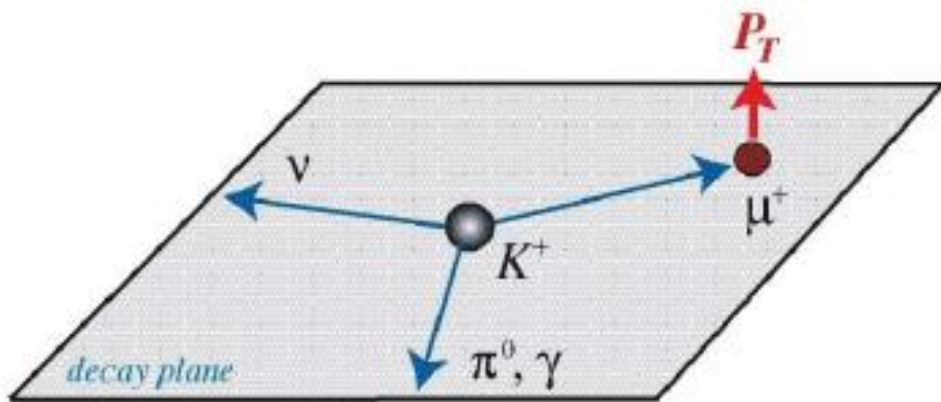
- 素粒子、核子、粒子のEDM
- Kaon Decay

我々の実験は $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu (K_{\mu 3})$ を用いて
T-violationを探す。

* $K_{\mu 3}$ はCKMに対してinsensitiveなのでnew physicsを探す
のに都合がよい。

◆ ミュオン横偏極

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ decay



$$P_T = \frac{\sigma_\mu \cdot (p_{\pi^0} \times p_{\mu^+})}{|(p_{\pi^0} \times p_{\mu^+})|}$$

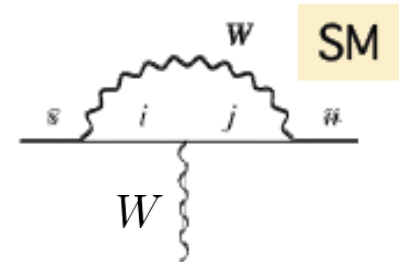
	時間反転
σ	-(odd)
P	-(odd)
$P \times P$	+(even)
$\sigma \cdot (P \times P)$	-(odd)

σ : spin P :運動量

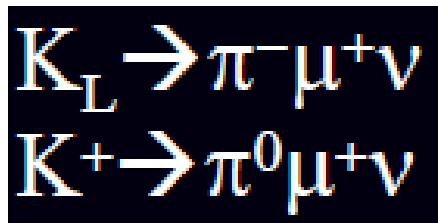
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu (K_{\mu 3})$ のバックグラウンド

① Standard Model からの寄与 (vertex correction) が小さい。

$$P_T(\text{SM}) < 10^{-7}$$

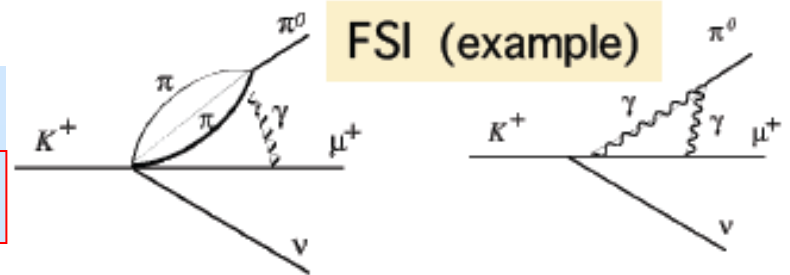


② FSI (Final State Interaction) により擬似的に誘起される P_T が小さい。



$$P_T(\text{FSI}) < 10^{-3}$$

$$P_T(\text{FSI}) < 10^{-5}$$



* $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu (K_{\mu 3})$ を用いた場合、 P_T は 10^{-5} まで時間反転対称性の破れを探ることが出来る。

◆ KEK-PS E246実験

Setup

μ の
運動量測定

Side View

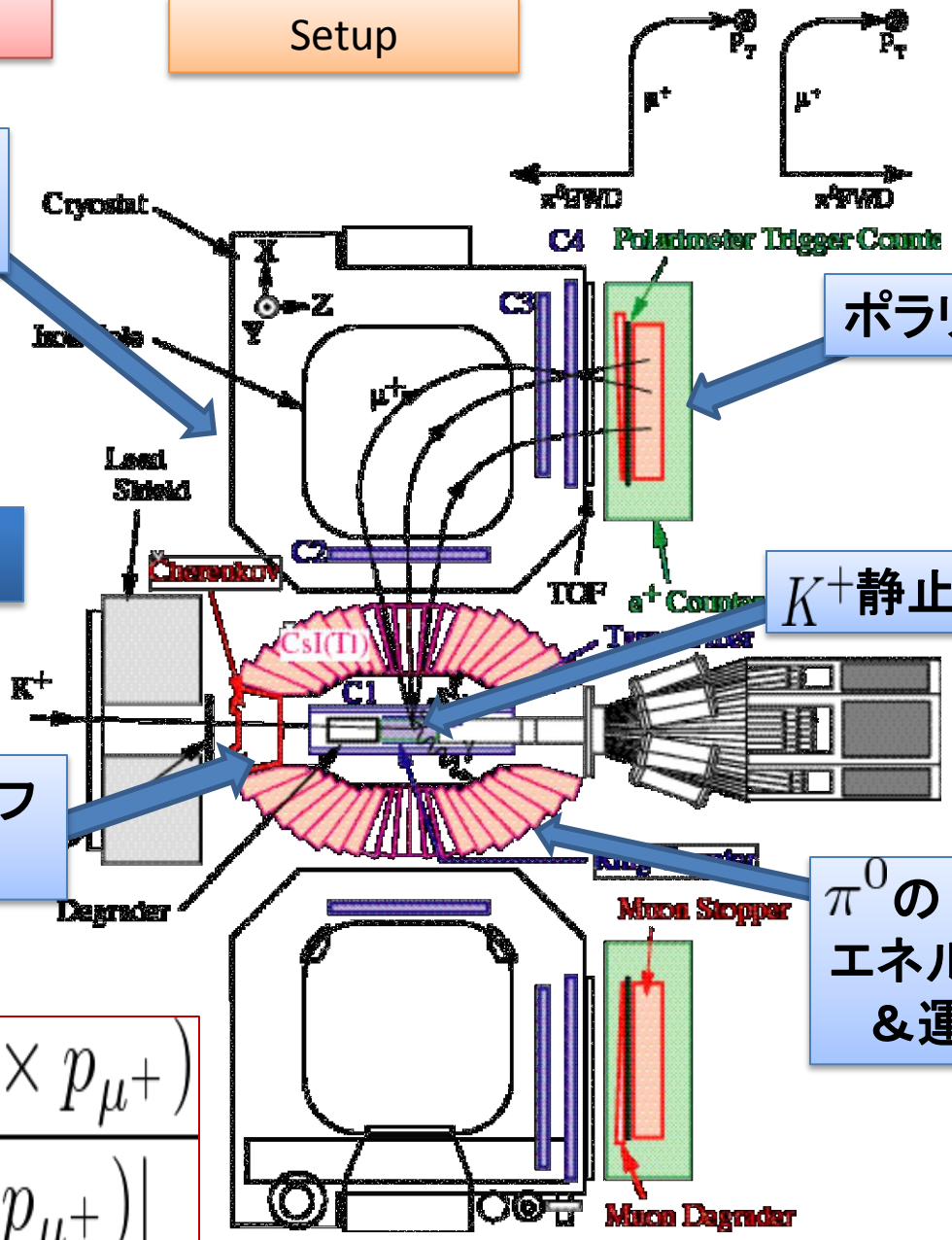
ポラリメータ

K^+ 静止標的

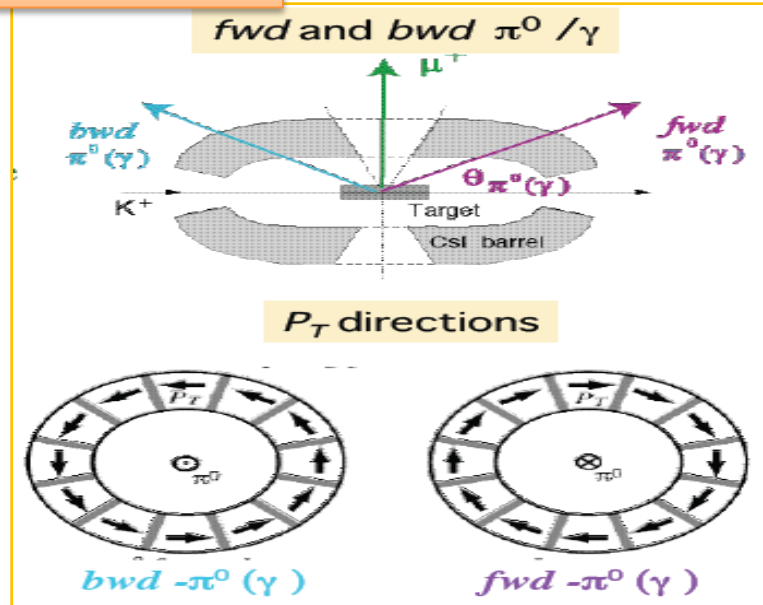
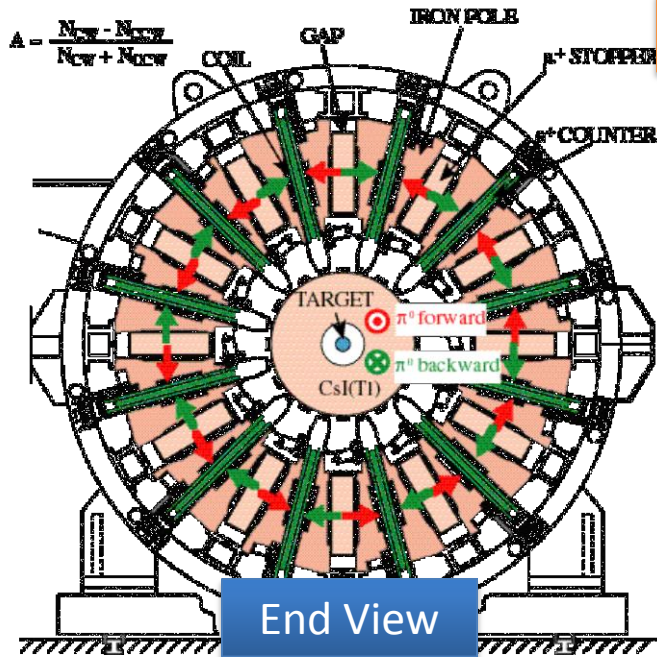
チェレンコフ
カウンタ

π^0 の
エネルギー
&運動量測定

$$P_T = \frac{\sigma_\mu \cdot (p_{\pi^0} \times p_{\mu^+})}{|(p_{\pi^0} \times p_{\mu^+})|}$$



Double Ratio Analysis

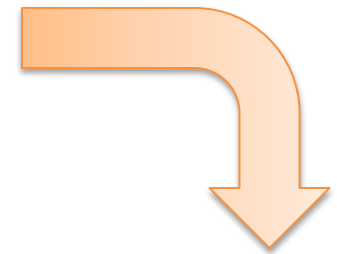


1. ある e^+ カウンタに注目すると N_{ccw} と N_{cw} の両方を測るのでカウンタの検出効率の違いは相殺される。

$$A^{fwd(bwd)} = \frac{N_{cw} - N_{ccw}}{N_{cw} + N_{ccw}}$$

2. A^{fwd} と A^{bwd} から Asymmetry を算出する。

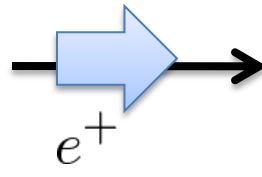
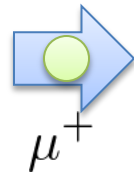
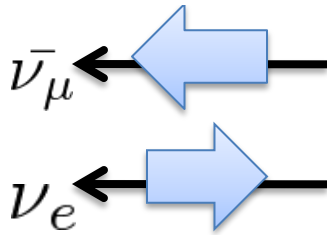
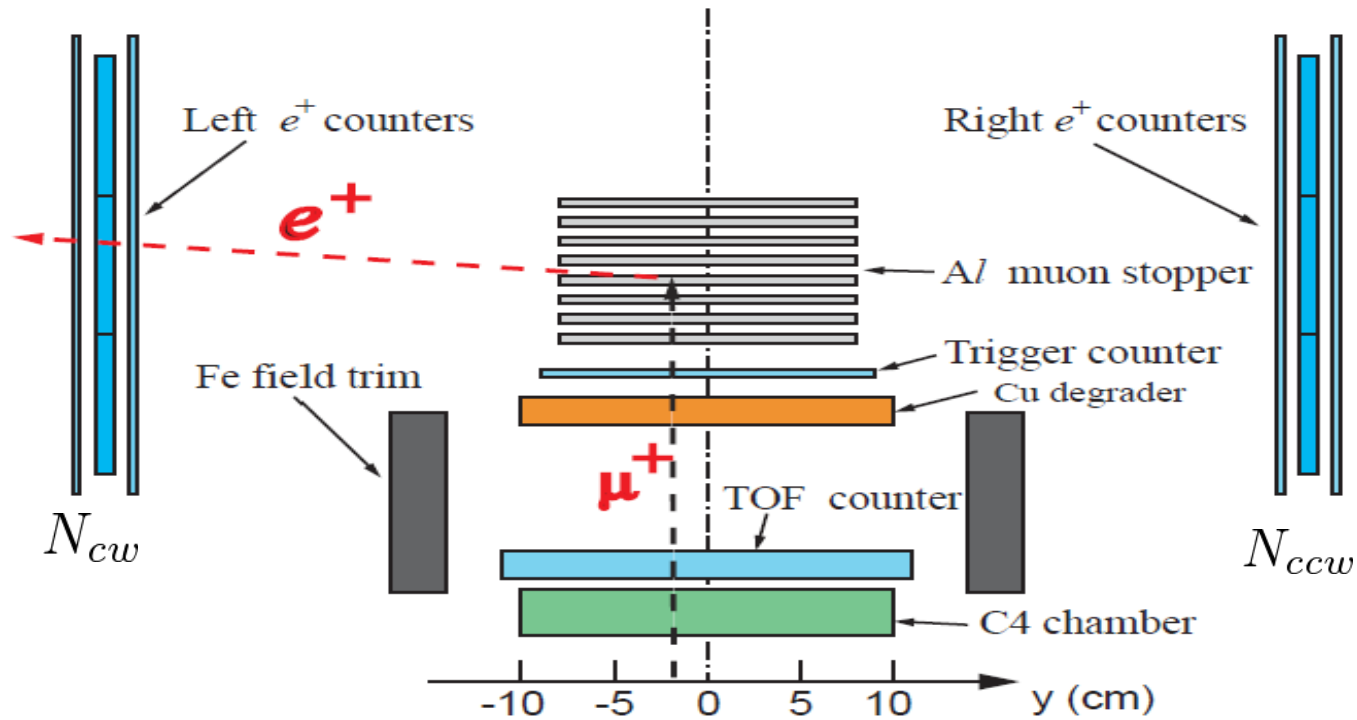
$$A_T = (A^{fwd} - A^{bwd}) / 2$$



$$P_T = A_T / \{ \alpha \langle \cos \theta_T \rangle \}$$

α : analyzing power
 $\langle \cos \theta_T \rangle$: attenuation factor

E246 Polarimeter



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

$$W(e^+) \propto 1 + A \cos \theta$$

e^+ は μ^+ の spin の方向に出やすいことを利用する。

Systematic Error and Result

Source	Σ_{12}	Canceled by <i>fwd/bwd</i>	$\delta P_T \times 10^4$
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^+ DIF background	Yes	No	<1.9
$K_{\pi 2}$ DIF 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

} \longrightarrow 磁場の不定性

} \longrightarrow K^+ 静止位置の不定性

} \longrightarrow μ^+ の multiple scattering

} \longrightarrow Decay planeの不定性

$$P_T = - 0.0017 \pm 0.0023(stat) \pm 0.0011(syst)$$

($|P_T| < 0.0050$: 90% C.L.)

Statistical error dominant

J-PARC TREK実験



統計誤差 \rightarrow ビーム強度のアップ。
 系統誤差 \rightarrow 特に上記項目を抑える。

◆J-PARC E06(TREK)実験と検出器のアップグレード

The number of $K_{\mu 3}$ events

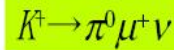
KEK PS E246
12MeV



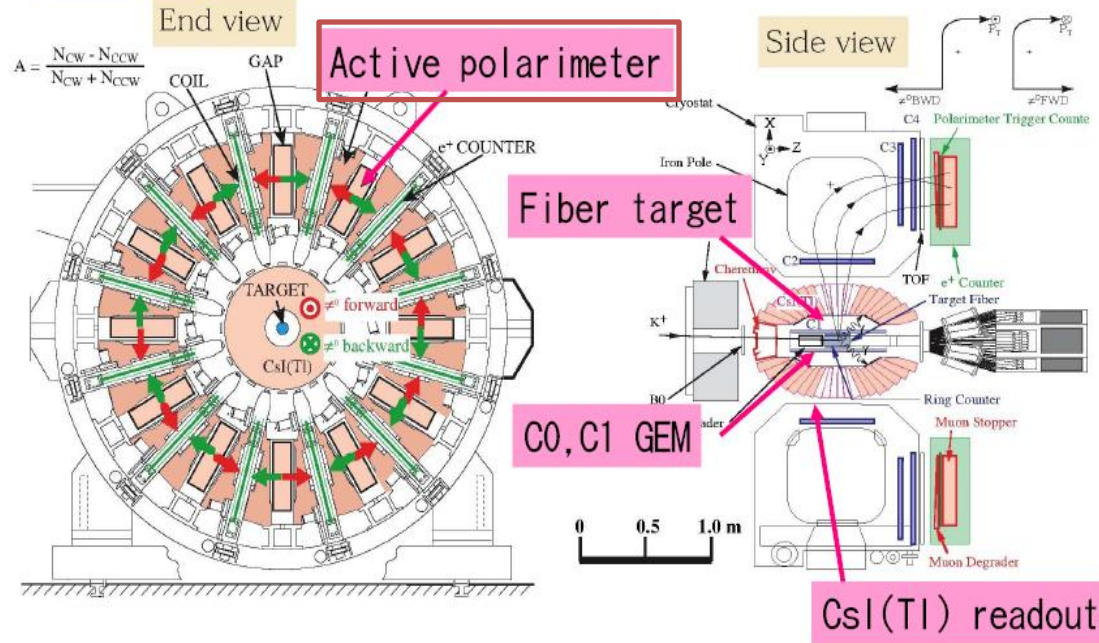
× 600

J-PARC
7200MeV
(estimation)

$$\delta P_T \sim 10^{-4}$$

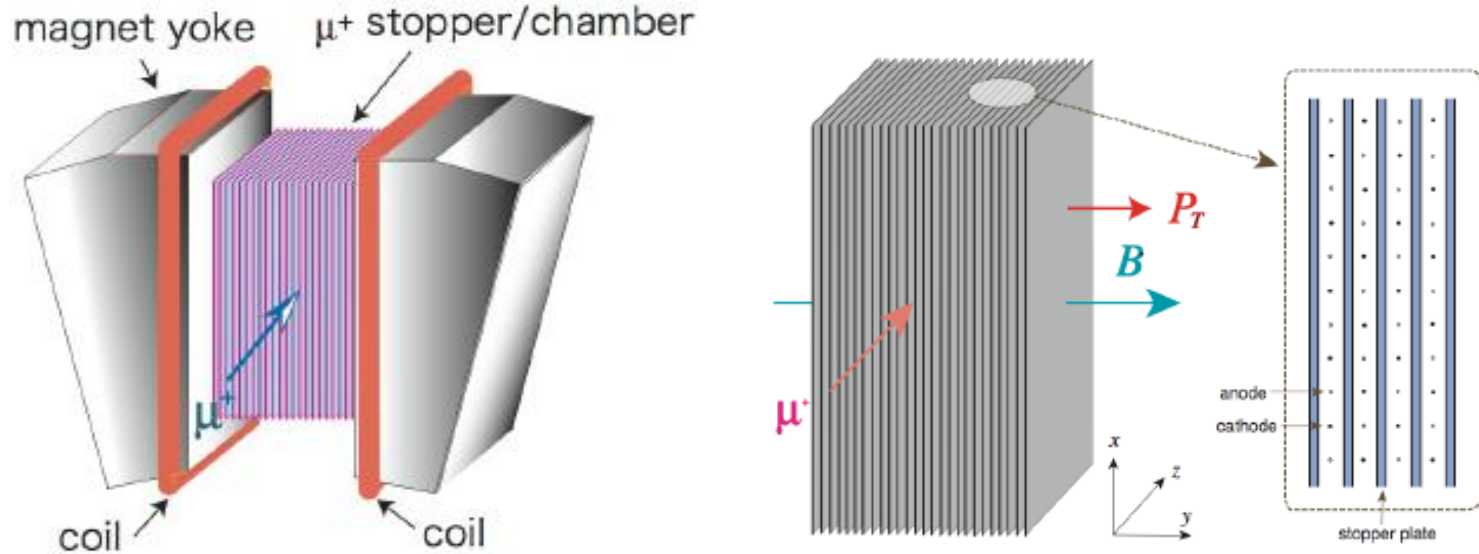


Use of upgraded E246 detector



- Muon polarimeter : **separate system** → **unified system** → μ^+ multiple scattering
- Muon magnetic field : **toroid** → **muon field magnet** → 磁場の不定性
- Target : **smaller and finer segmentation** → K^+ 静止位置の不定性
- Charged particle tracking : **addition of two GEM chambers** → Decay planeの不定性
- CsI(Tl) readout : **PIN diode** → **APD**
- Electronics and data taking: **TKO** → **KEK-VME & COPPER**

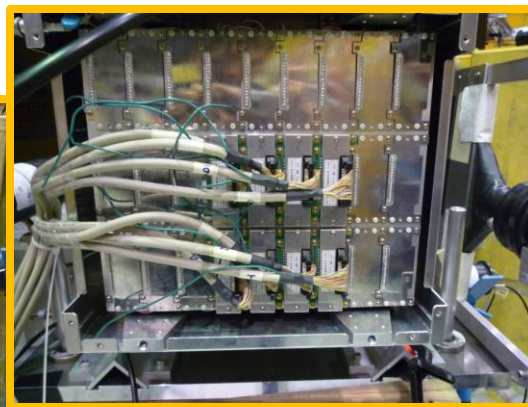
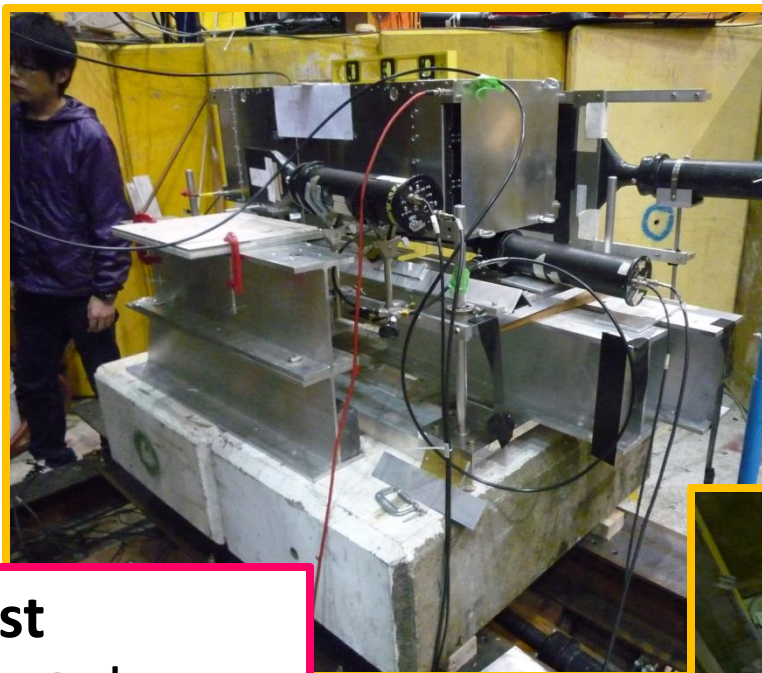
Polarimeter Design



Polarimeter = Drift chamber with stoppers + Muon field magnet

- Positron detection acceptanceが高い。(統計をあげる。)
- Decay vertexを決められる。(BGを減らす。)
- μ^+ multiple scatteringを減らす。(系統誤差を小さくする。)
- 角度分布を測ることができ、近似的にエネルギーを測れる。
(Analyzing powerをあげる。)

◆ミュオンポラリメータ試験

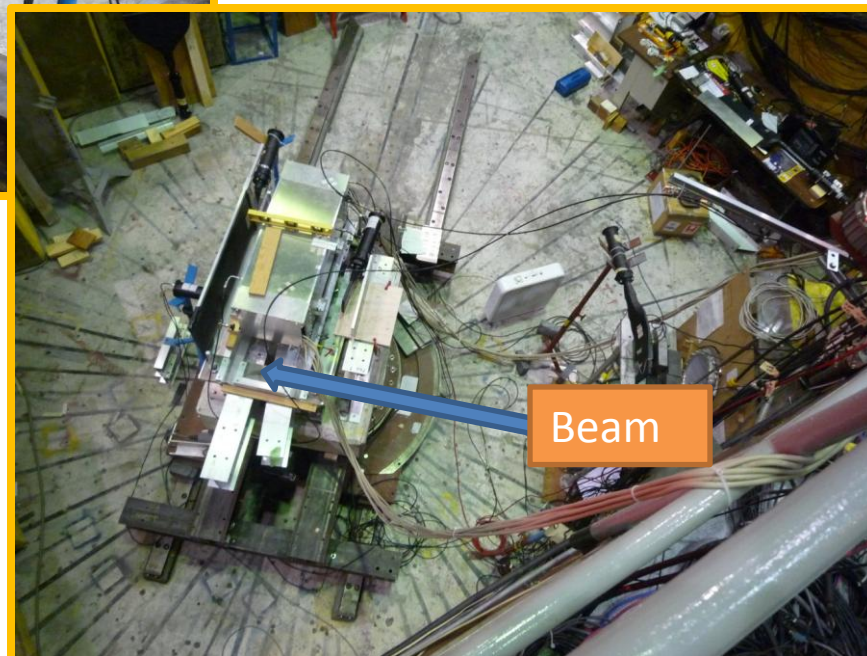


AMPは全体の1/3のみカバーしている。

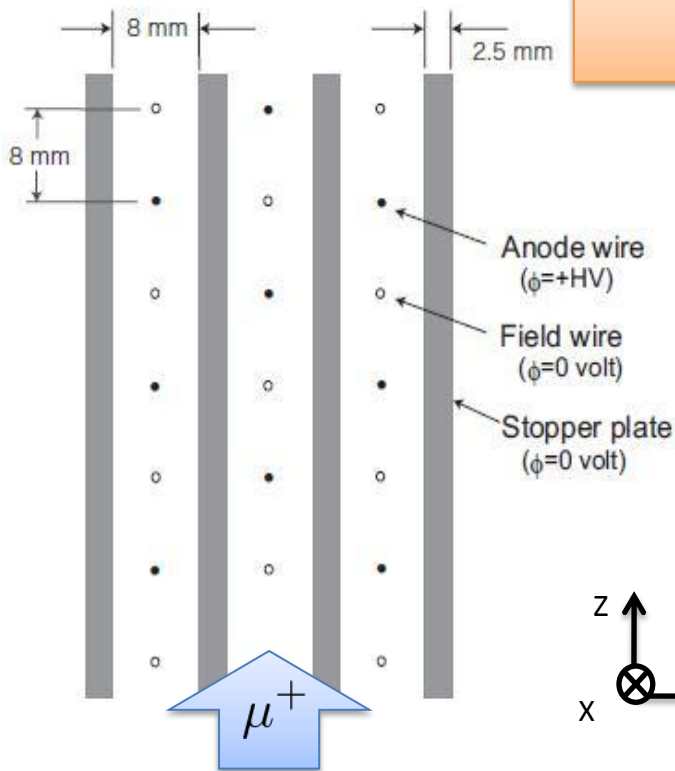
Beam Test
16th Nov.~2nd Dec.
@TRIUMF

目的: 本実験に効く系統誤差の評価。

- π^+ ビーム試験
→ Null Asymmetryの測定
- μ^+ ビーム試験



Prototype Chamber (最終デザイン)



基本的なパラメタ

Al Plate:24枚
Al Plate Thickness:2.5mm
Plate Gap:8mm
Anode Wire:20 μ m、約500本
HV:1950V
 μ^+ stop efficiency:~85%

* 最終的には12個のPol. Chamber
が使われる。

● Y-Z平面に対してはDrift timeで、X
方向に対してはcharge divisionを用
いてのtrackingが可能。

● Charge divisionは2mmの
resolutionを達成。

Read outはAMP + VME-Discr
Board(~100 mV) + TDC(or Decoupler
Card + ADC)

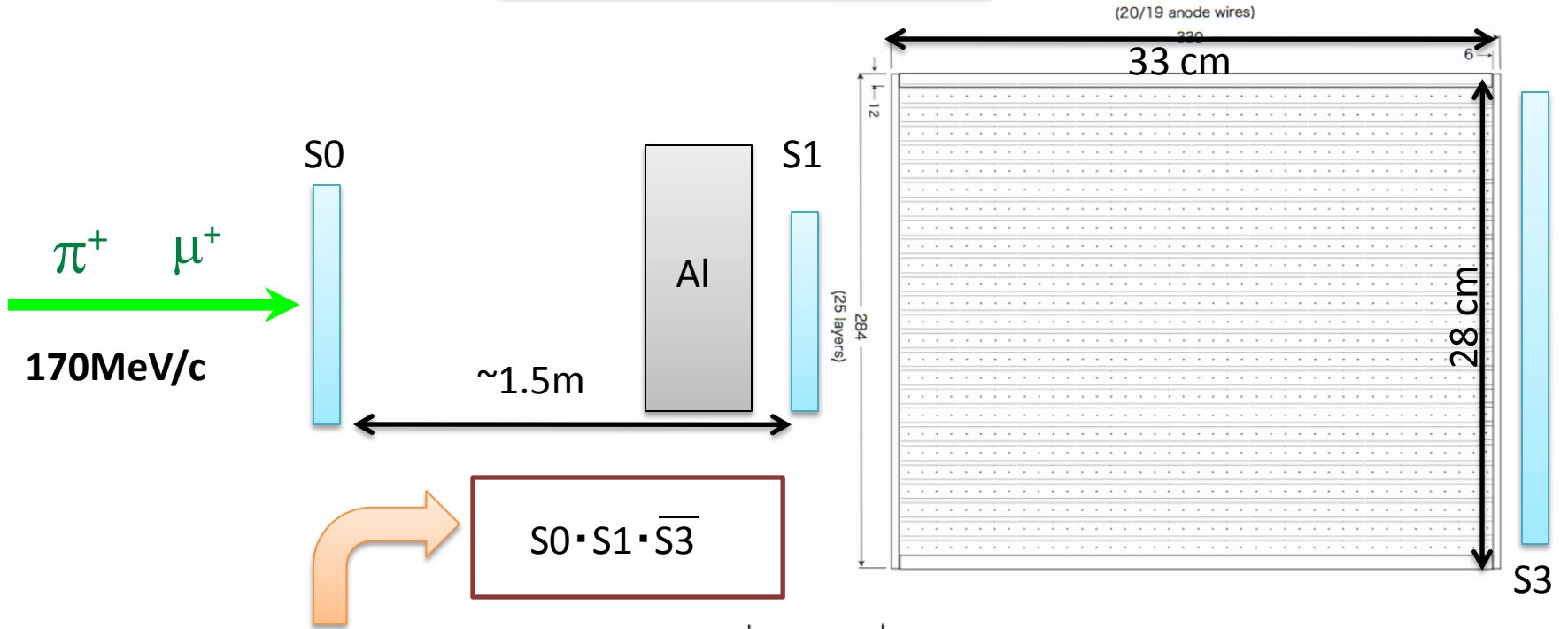


Chamber Signal

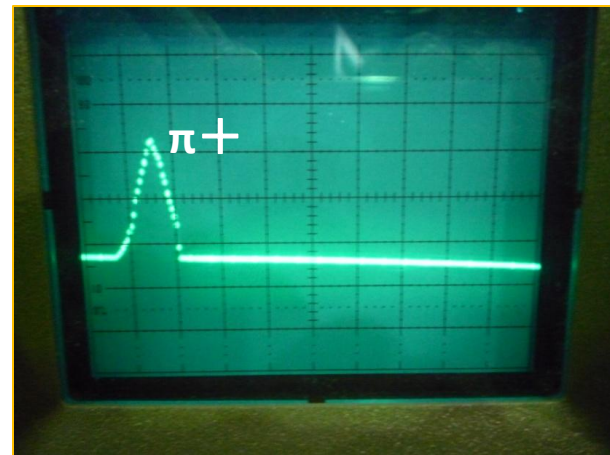
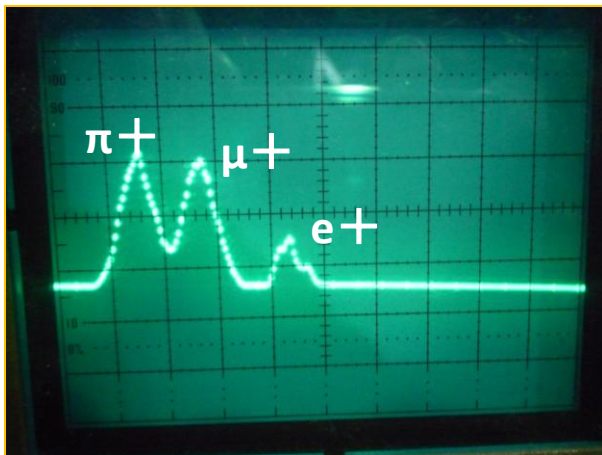


青 : VME-DiscrBoard
赤 : CAEN ADC , TDC

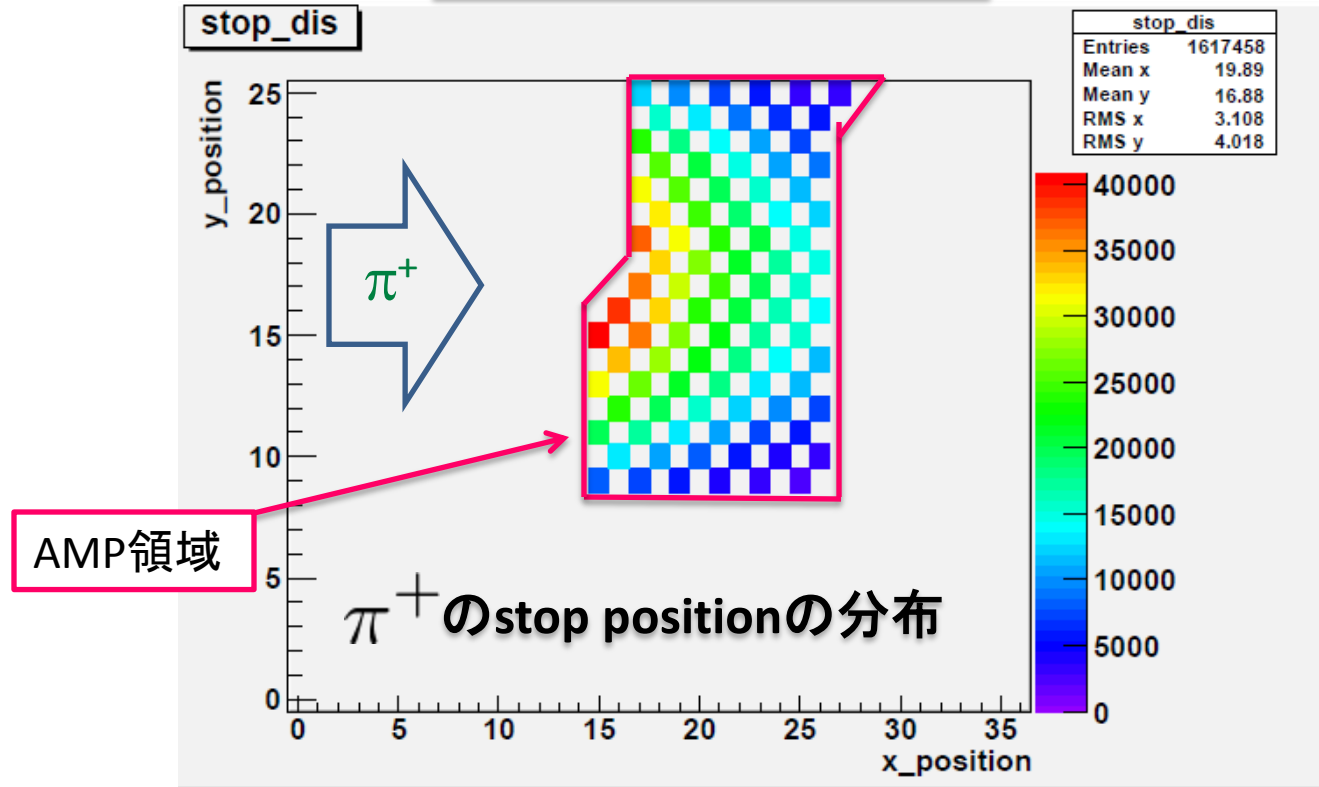
ビームチューニング(1)



チェンバー中に止まる μ^+ と π^+ を分ける。(TOFで約8ns)

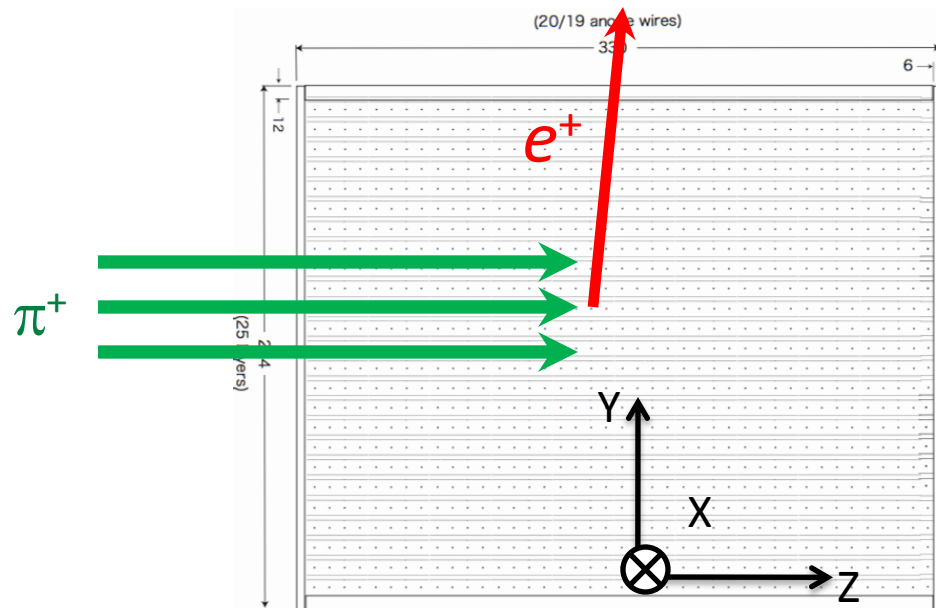


ビームチューニング(2)

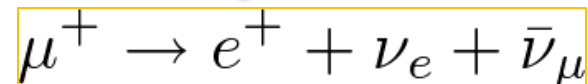
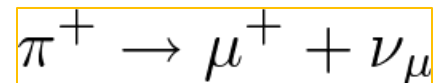


- ディグレーダの厚さを調節してAMPのカバーしている領域にビームが止まるようにした。
- 上図の1つ1つの■はWireを現わしている。
- 比較的広がりのあるビームのため、Al Plateに対して平行に入射したビームもだいたいAMPのカバーしている領域で止まっている。

Null Asymmetry Measurement



Decay Chain



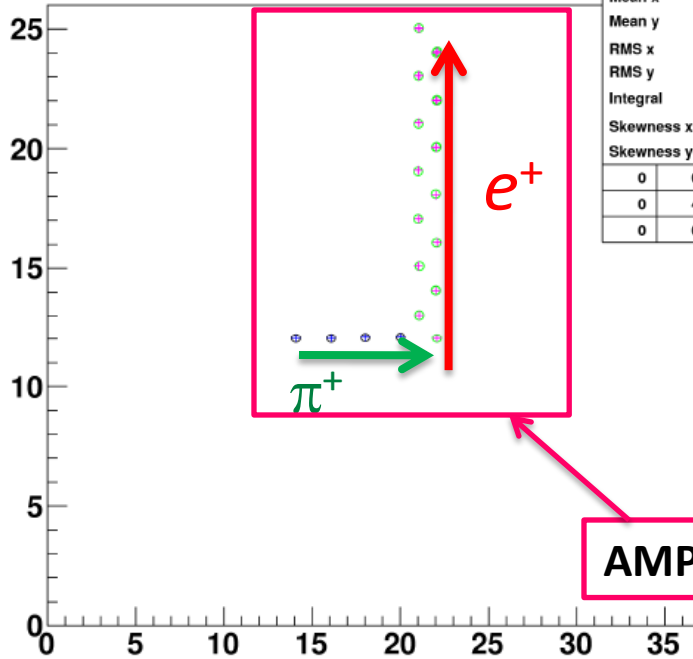
π^+ のビームをつかってNull asymmetryを確認する。

└──────────┘ e^+ の異方性がない。

- π^+ はスピンを持たないので一様に μ^+ が放出される。したがって e^+ も一様に放出される。
- ビームを当てる箇所を変えながらチェンバー全体の応答を試験した。
- DAQ rateは600~800Hzくらい。

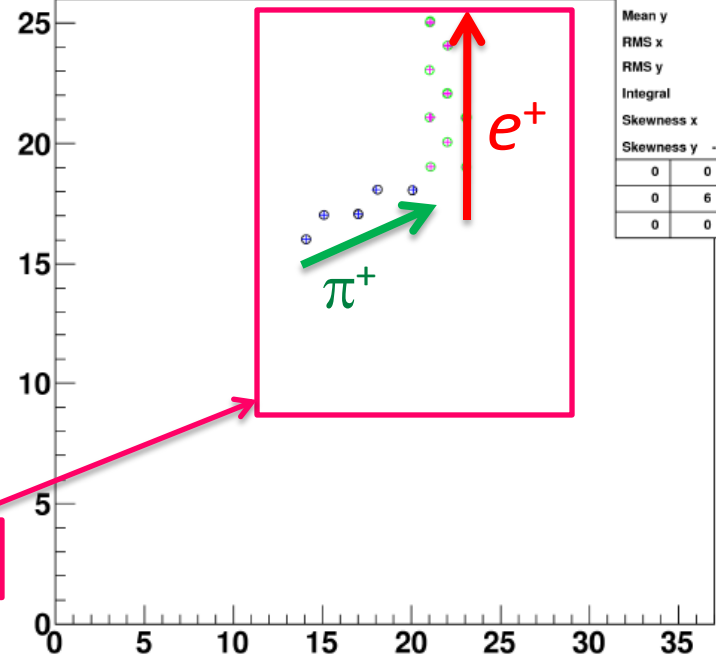
Tracking Map

TDC Hit Map L



thitmapl		
Entries	4	
Mean x	17	
Mean y	12	
RMS x	2.236	
RMS y	0	
Integral	4	
Skewness x	0.06709	
Skewness y	inf	
0	0	0
0	4	0
0	0	0

TDC Hit Map L



thitmapl		
Entries	6	
Mean x	16.83	
Mean y	17.17	
RMS x	1.951	
RMS y	0.6872	
Integral	6	
Skewness x	0.1767	
Skewness y	-0.009602	
0	0	0
0	6	0
0	0	0

- 現在は2次元トラックでの解析を行っている。
- Tracking Mapは π^+ と e^+ を時間で分けている。
- μ^+ は、 π^+ と同じセル内でdecayするためにはtrackとしては現れていない。

*ビームテストで解析に必要な十分な統計のデータが取れた。
現在、Null Asymmetryの解析途中

◆まとめ

- 我々はJ-PARKで $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu (K_{\mu 3})$ を用いてT-violationを探す。
- 過去の実験のアップグレードをすることを考えている。
- 系統誤差を評価するためにポラリメータのビーム試験を行った。
- 十分な統計量のデータを取得することが出来た。
- 現在、以下のような解析を進めている。
 - ✓ wire efficiencyの評価
 - ✓ Drift解析
 - ✓ **Asymmetry**の評価

Backup

Model descriptions of P_T

$$P_T = \text{Im}\xi \cdot \frac{m_\mu}{m_K} \frac{|\vec{p}_\mu|}{[E_\mu + |\vec{p}_\mu| \vec{n}_\mu \cdot \vec{n}_\nu - m_\mu^2/m_K]} \quad \text{Im}\xi = \frac{(m_K^2 - m_\pi^2)\text{Im}G_S^*}{\sqrt{2}(m_s - m_u)m_\mu G_F \sin\theta_C}$$

P_T is sensitive to scalar interactions

- Multi-Higgs doublet (3 Higgs doublet) model
 - $\text{Im}\xi = (m_K^2/m_H^2) \text{Im}(\gamma_1\alpha_1^*)$
 - $|\text{Im}(\gamma_1\alpha_1^*)| < 544 (m_H/\text{GeV})^2$ from the E246 limit
 - $B \rightarrow \tau\nu X$ constraints also $\text{Im}(\gamma_1\alpha_1^*)$ but weaker ($< 1900 (m_H/\text{GeV})^2$)
 - N-EDM and $b \rightarrow s\gamma$ constraint differently $\text{Im}(\alpha_1\beta_1^*)$
- SUSY with squark mixing
 - $\text{Im}\xi \propto \text{Im}[V_{33}^{H+} V_{32}^{DL*} V_{31}^{UR*}] / m_H^2$
 - $m_H \geq 140 \text{ GeV}$ from the E246 limit and no stringent limit from other modes
- SUSY with R-parity violation
 - $\text{Im}\xi^l \sim \text{Im}[\lambda_{2i2}(\lambda_{i12})^*]$, $\text{Im}\xi^d \sim \text{Im}[\lambda'_{21k}(\lambda'_{22k})^*]$
 - No stringent limits from other modes

Exotic scalar interactions

$$P_T = \text{Im}\xi \cdot \frac{m_\mu}{m_K} \frac{|\vec{p}_\mu|}{\underbrace{[E_\mu + |\vec{p}_\mu| \vec{n}_\mu \cdot \vec{n}_\nu - m_\mu^2/m_K]}_{\text{Kinematic factor}}}$$

- Generic four fermion interaction Lagrangian analysis

$$\text{Im}\xi = \frac{(m_K^2 - m_\pi^2) \text{Im}G_S^*}{\sqrt{2}(m_s - m_u)m_\mu G_F \sin\theta_C} \quad ; \quad \xi = f/f_+$$

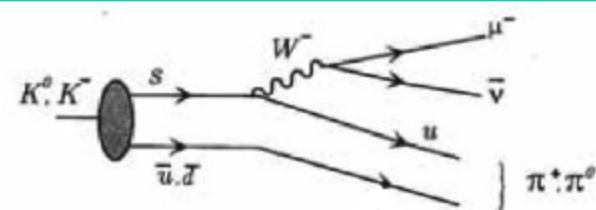
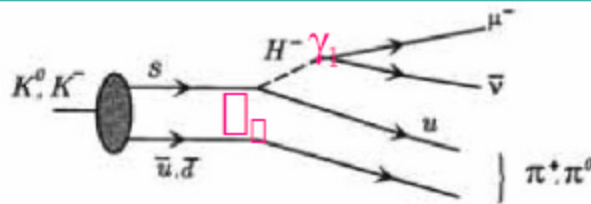
- Effective field theory with Wilson coefficients

$$P_\perp \sim \left[0.38 \text{Im}C_S^K - 0.27 \frac{p_K \cdot (p_\nu - p_\mu) + m_\mu^2/2}{M_K^2 (f_+/f_T)} \text{Im}C_T^K \right] \left(\frac{\text{TeV}}{\Lambda} \right)^2$$

- Typical models with scalar interactions allowing a sizable P_T :
 - Multi-Higgs doublet model
 - SUSY with R-parity violation or large squark mixing

Three Higgs doublet model

$$L = (2\sqrt{2}G_F)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^2 \{ \alpha_i \bar{u}_L V M_D d_R H_i^+ + \beta_i \bar{u}_R M_U V d_L H_i^+ + \gamma_i \bar{\nu}_L M_E e_R H_i^+ \} + \text{h.c.},$$



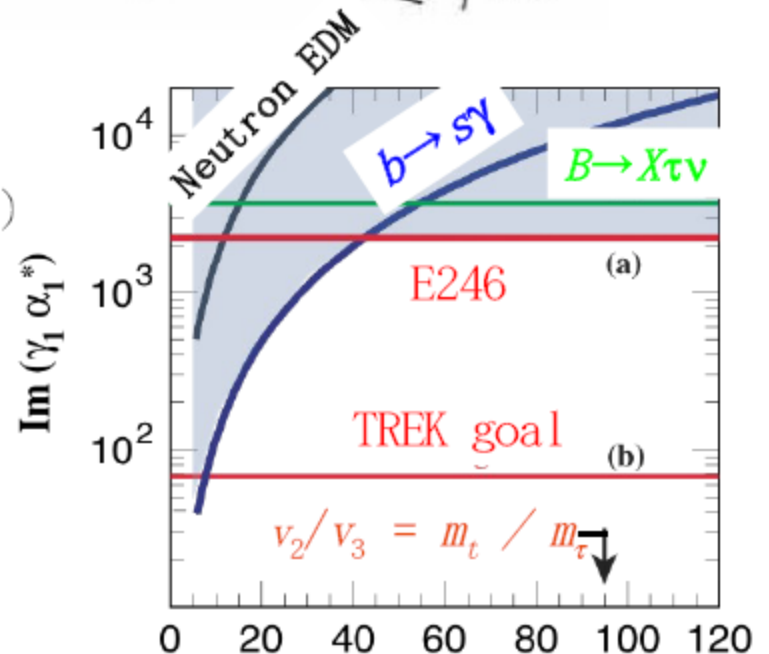
$$\text{Im}\xi = \frac{m_K^2}{m_H^2} \text{Im}(\gamma_1 \alpha_1^*)$$

- *c.f.* d_n , $b \rightarrow s\gamma \propto \text{Im}(\alpha_1 \beta_1^*)$, $(\alpha_1 \beta_1^*)$
 $\text{Im}(\alpha_1 \beta_1^*) = -v_2^2/v_3^2 \text{Im}(\gamma_1 \alpha_1^*)$

Higgs field *v. e. v.*

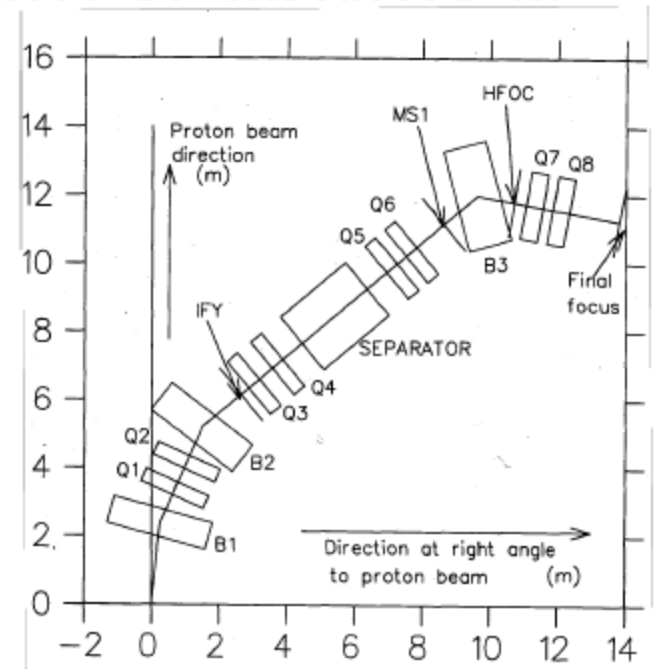
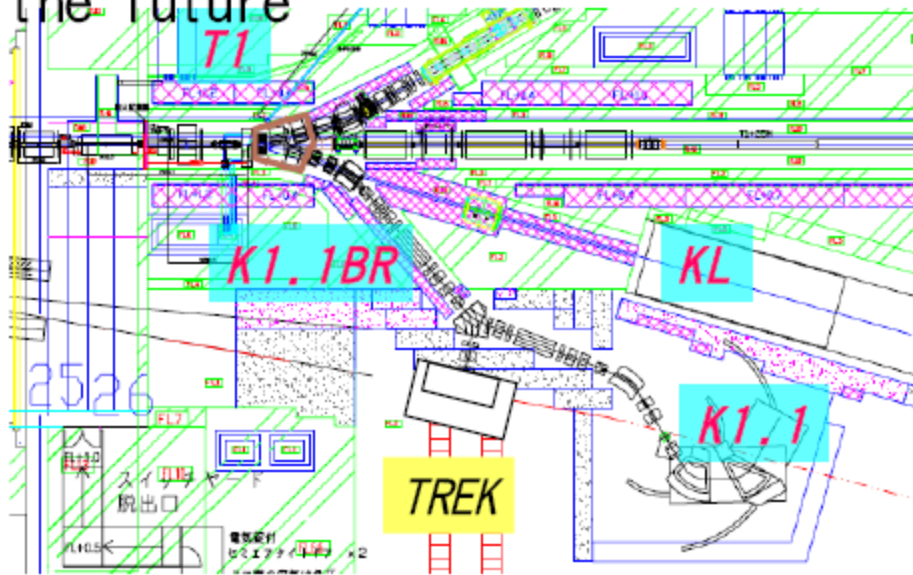
- $B \rightarrow X\tau\nu$ and $B \rightarrow \tau\nu$ at Super-Belle corresponds to $P_T < 3 \times 10^{-4}$
c.f. TREK goal : $P_T \sim 1 \times 10^{-4}$

P_T is the most stringent constraint for $\text{Im}(\gamma_1 \alpha_1^*)$



K0.8 (K1.1-BR) for stopped K^+

- Low momentum ($p=0.8$ GeV/c) separated K^+ beam
- Simultaneous operation with K1.8/K1.8BR and KL
- Time share with K1.1, when it will be installed in the future



- $I_{K^+} = 2.1 \times 10^6$ /s @ 9 μ A - 30 GeV protons on T1

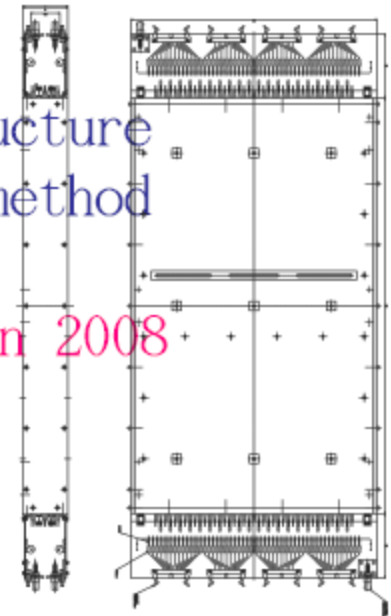
Development of Polarimeter Chamber

- **Prototype with the 1/5 size**

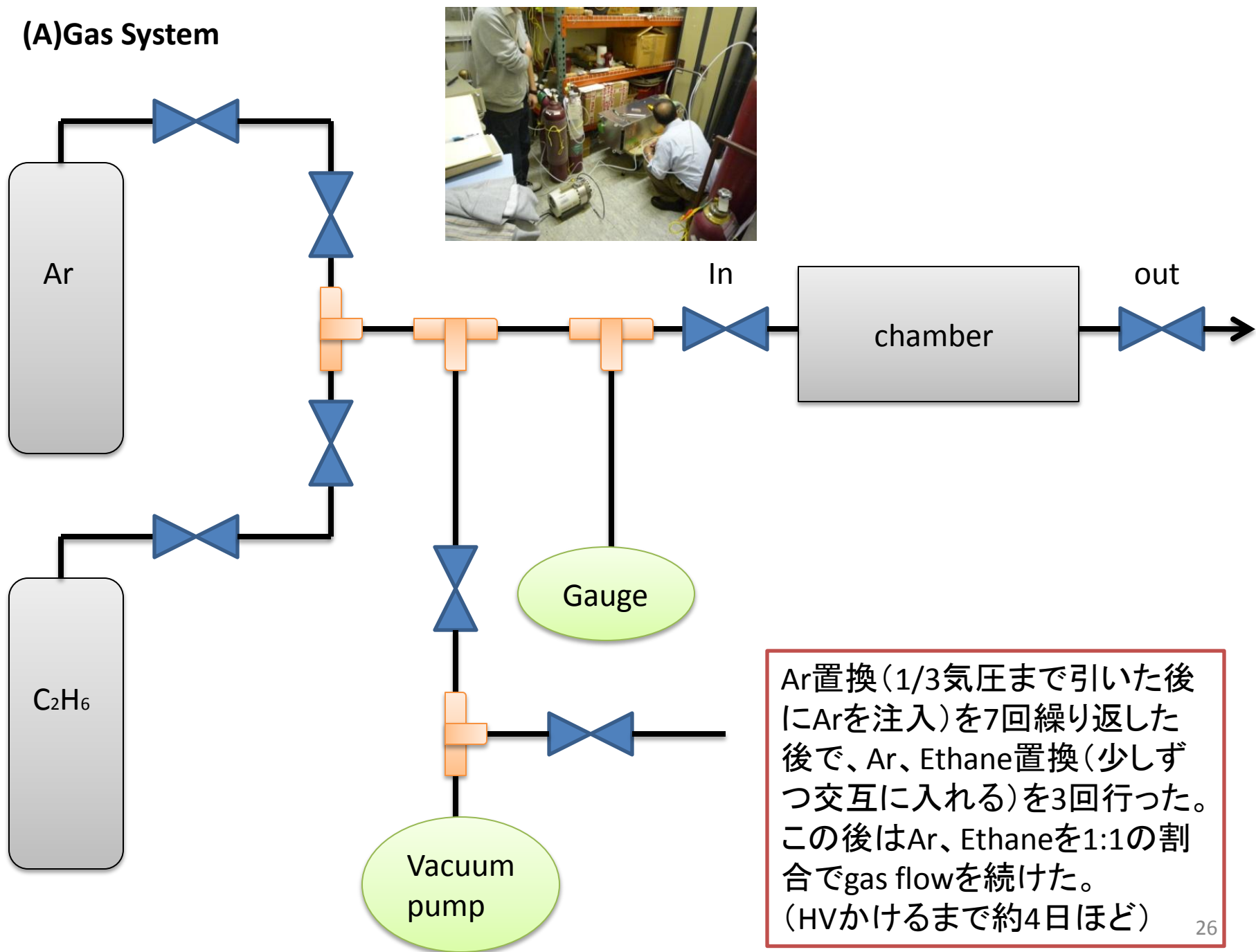
- DC performance check of long cell structure
- Performance check of charge division method
- Efficiency measurement
- Beam test at FTBL with 2 GeV e^+ beam in 2008
- Results were reported to PAC-6

- **Full Size Model (FSM)**

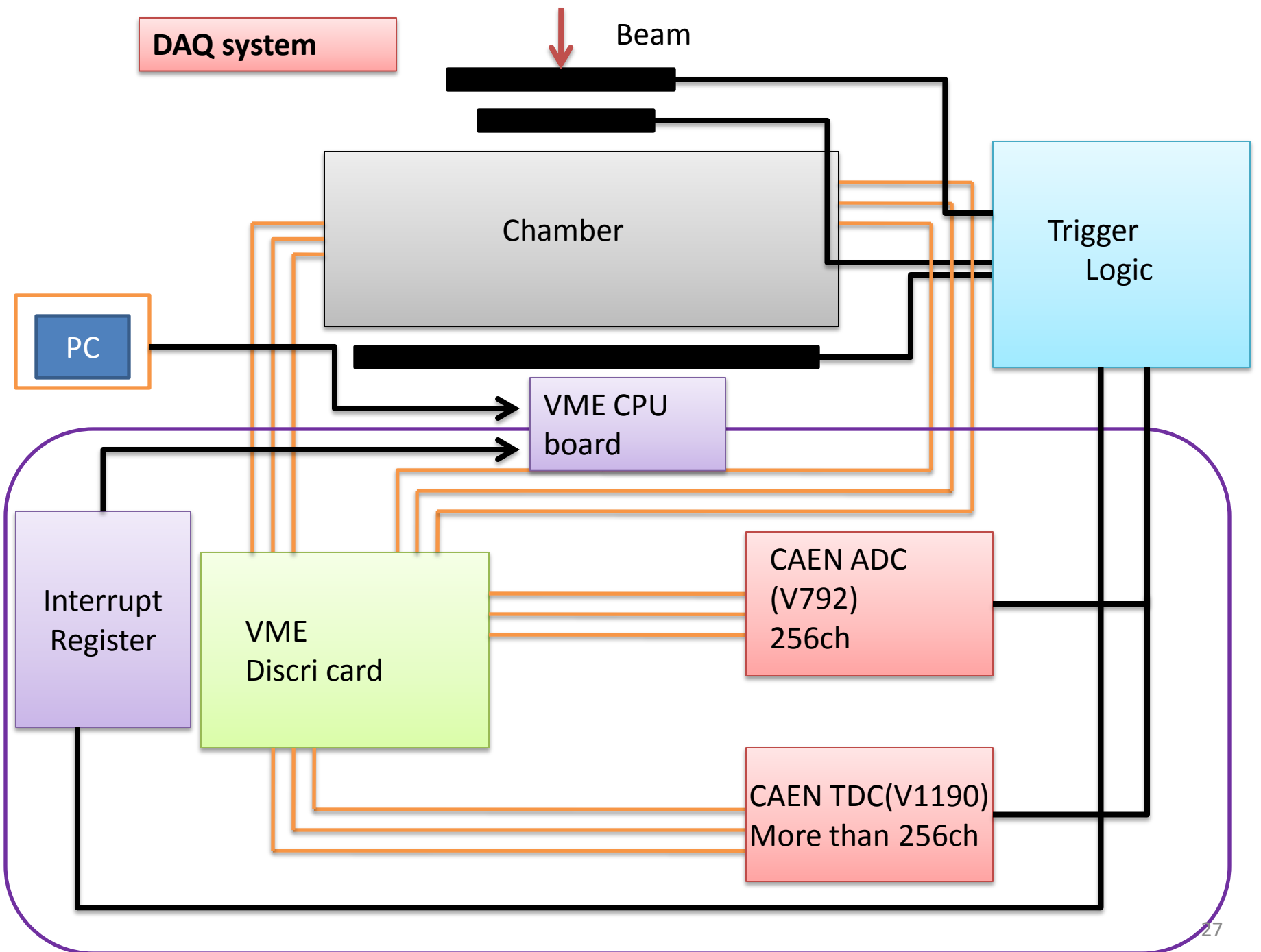
- Tracking performance test
- Analyzing power/ beam polarization measurement
- Test of non-baisness or non-existence of spurious asymmetry due to:
 - Chamber structure (e.g. misalignments of wires)
 - Inhomogeneous inefficiency distribution
- Test of readout electronics; ASB etc
- Beam tests at TRUIMF using μ^+ and π^+ beams in Nov. 2009



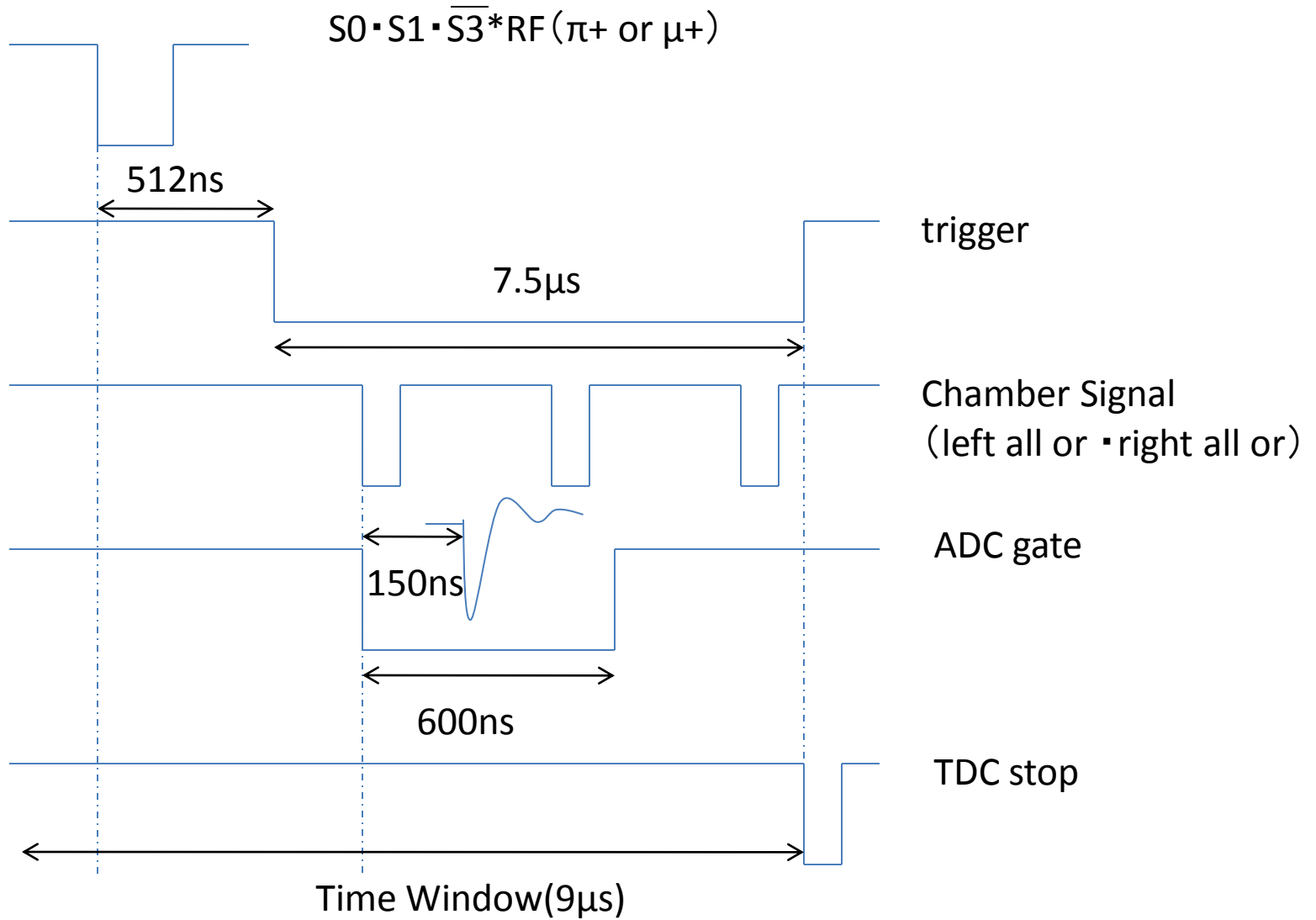
(A) Gas System

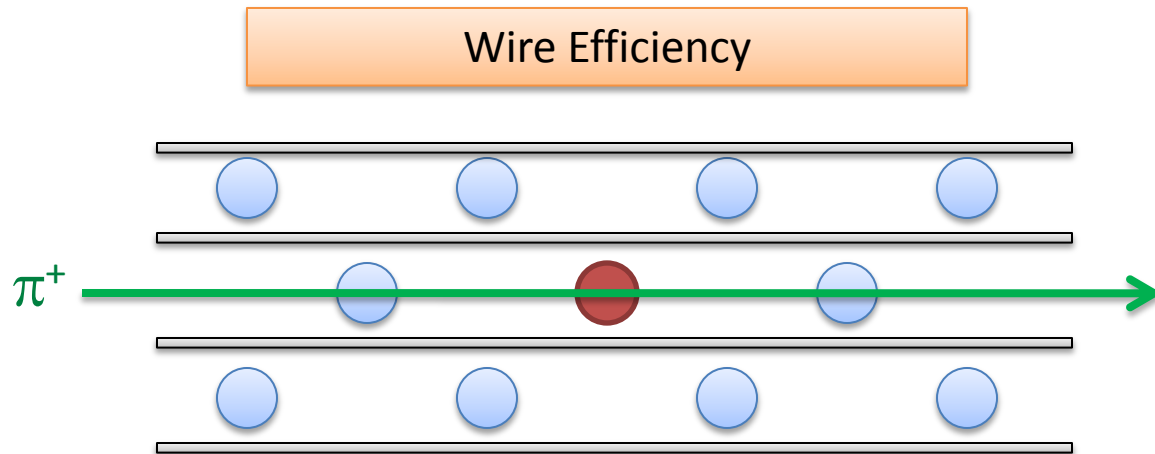


Ar置換(1/3気圧まで引いた後にArを注入)を7回繰り返した後で、Ar、Ethane置換(少しずつ交互に入れる)を3回行った。この後はAr、Ethaneを1:1の割合でgas flowを続けた。(HVかけるまで約4日ほど)



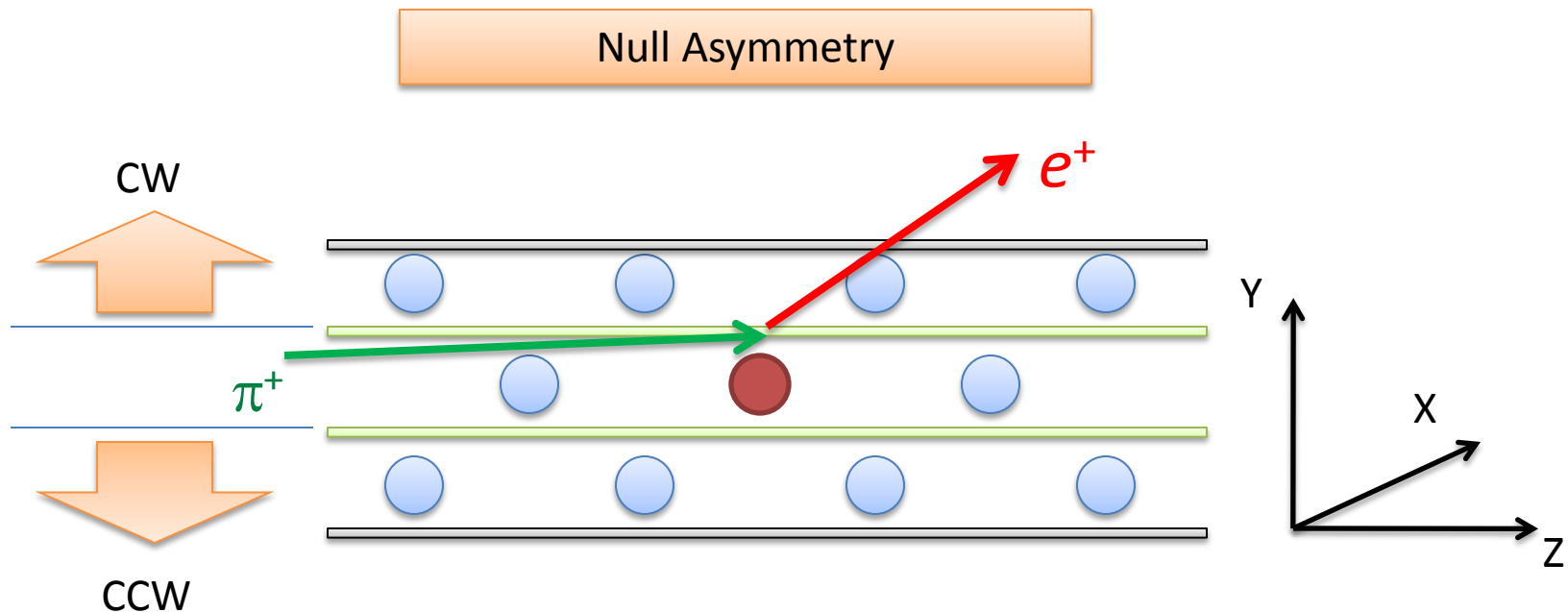
Timing chart





$$\text{Efficiency} = (\text{両隣のWire} + \text{見ているWire}) / (\text{両隣のwire})$$

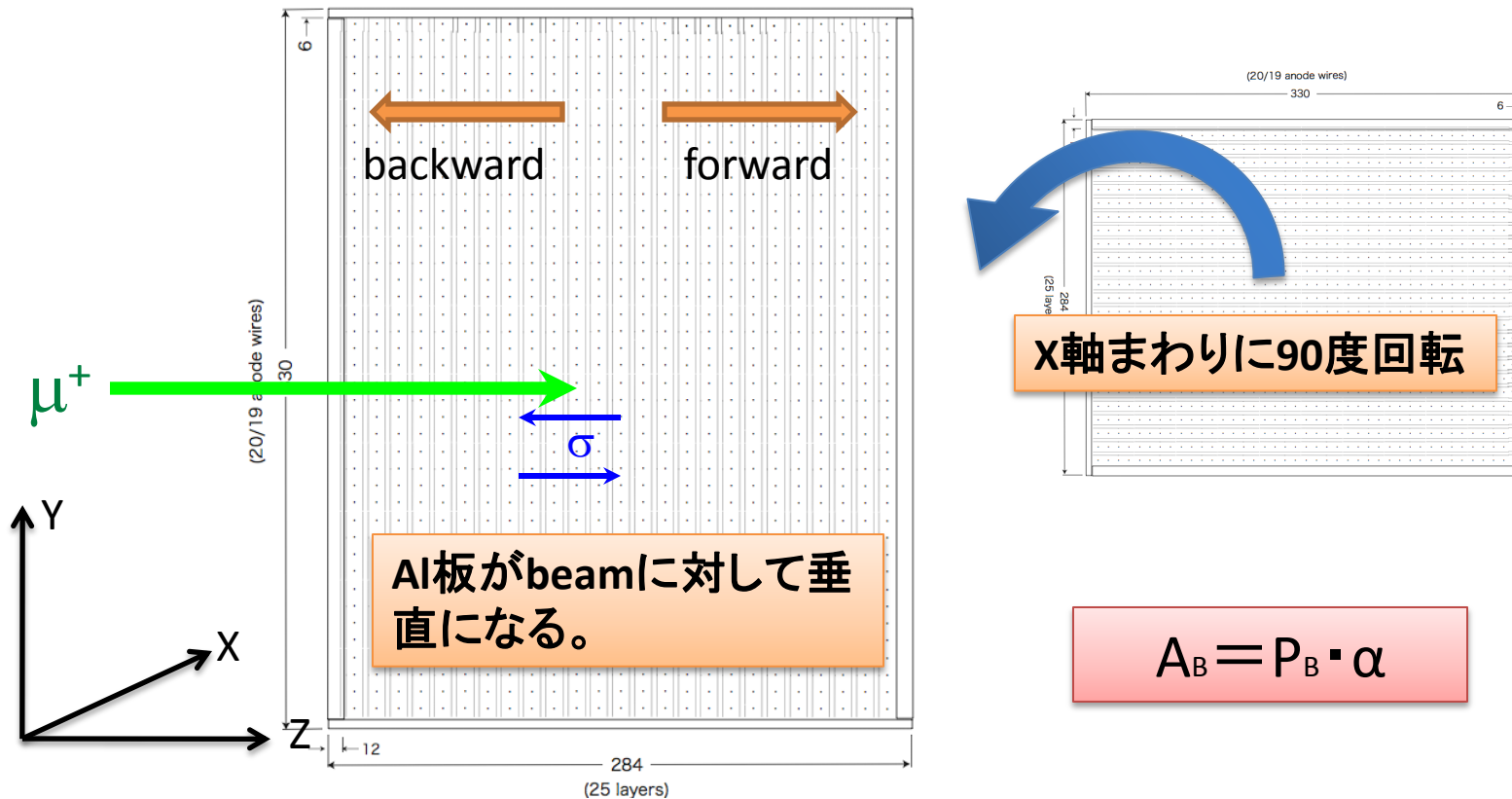
- π^+ で両隣のWireが鳴ったときに、真ん中のWireが鳴るかどうかでEfficiencyを定義した。
- 今後、BG低減等による、より信頼性のある評価を目指す。
- 最終的にTREK実験に効くのはtrack detection efficiencyである。



$$A = \frac{N_{cw} - N_{ccw}}{N_{cw} + N_{ccw}}$$

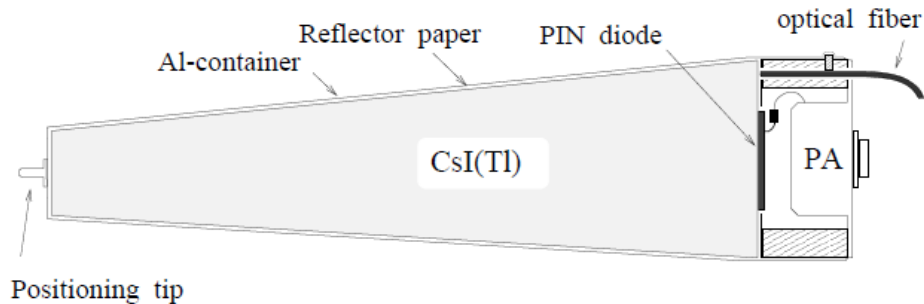
- Vertex セルからみて上(CW)に出たか、下(CCW)に出たかで数を数えてAsymmetryを算出した。
- この場合、y軸方向がTREK実験でのTransverse方向に対応する。

Analyzing Power Measurement

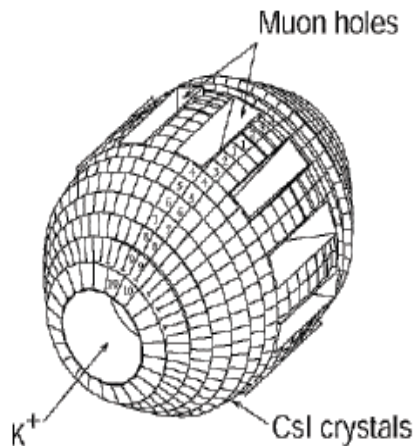


- チェンバーを90度回転し、 μ^+ ビームを用いて試験をした。
- μ^+ が崩壊して出てくる e^+ が fwd、bwd のどちらにでるかの非対称性から Analyzing Power を見積もる。

CsI(Tl) Readout



PIN diodeからAPDへ
変更する。

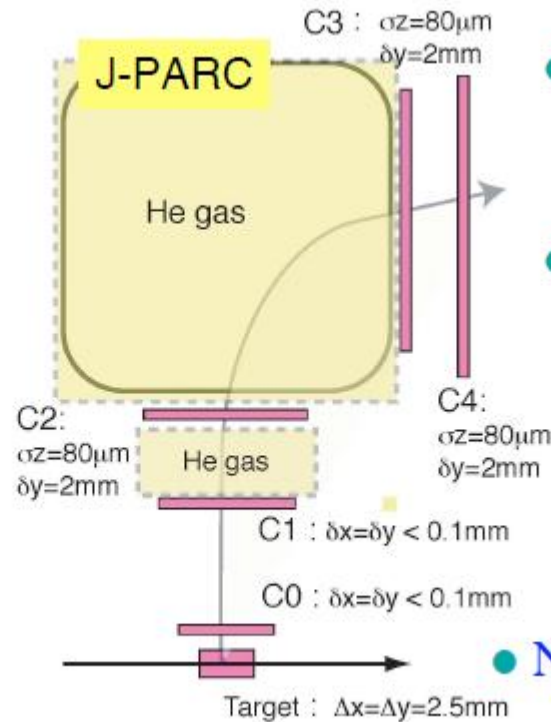
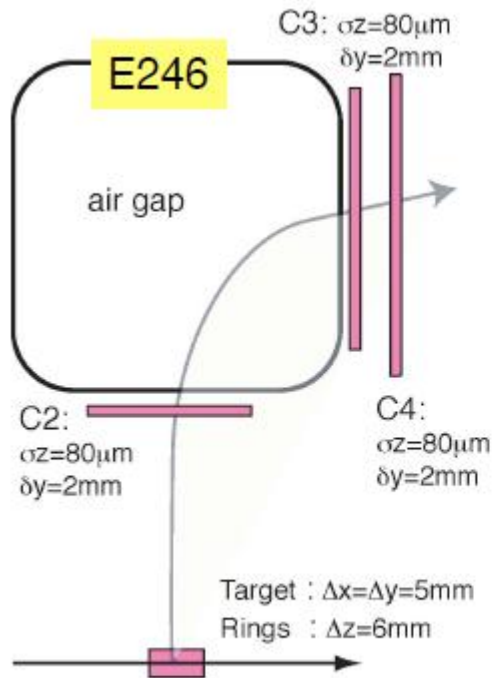


- CsI(Tl) + APD + Amplifier + FADC
- Electrons after APD : $\sim 2 \times 10^7$ @ 100 MeV
- Max count rate / module : ~ 100 kHz
- Max K^+ decay rate : ~ 20 MHz
 - enough for the beam intensity in Phase 1
- Noise level : to be tested
- Module energy resolution : to be tested
 - Energy resolution is determined by lateral shower leakage

Tracking System

- Better kinematical resolution
- Stronger $K_{\pi 2}$ *diff* μ^+ BG suppression

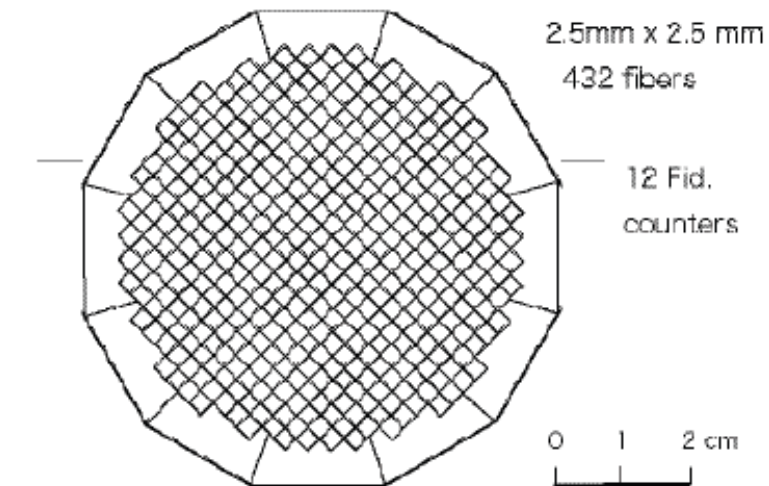
- Addition of C0 and C1 GEM chambers with
 - high position resolution
 - higher rate performance



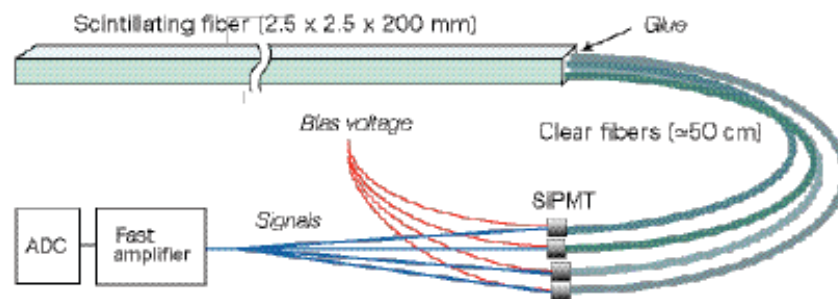
- Larger C3-C4 distance
- Use of He bags

- New target

Target

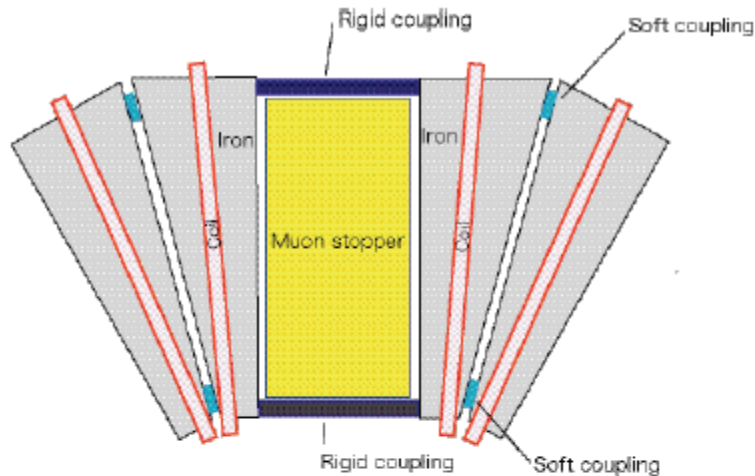


- Smaller size (smaller beam spot)
- Finer segmentation
- Sci. fiber of 20 cm length
- Clear optical fiber
- Light readout by SiPMTs



Diameter	6 cm
Active length	20 cm
Fiber size	2.5 x 2.5 mm
No. of fibers	432
Light readout	4 clear fibers
Light yield	\sim 10/SiPMT

Muon Field Magnet



- Uniform field of 0.03 T
- Precise field alignment of 10^{-3}
- Gap : 30 cm
- Pole face : 60 cm × 40 cm
- No. of coils : 24
- Mag. motive force : 3.6×10^3 A Turn/coil
- Total power : 6 kW
- Total weight : ~ 5 t

