

「Boer-Mulders 関数」

Boer-Mulders 関数 $h_1^\perp(x, k_T)$ は、無偏極核子中 (ハドロ) における、quark スピンに依存した quark の横運動量の非対称を示し、quark の $\vec{L} \cdot \vec{s}$ 結合とも関連づけられる。Boer-Mulders 関数は、Drell-Yan 過程から得られる。2つのハドロ h_1, h_2 の衝突の際に h_1 中の反 quark と h_2 中の quark が仮想光子を経て、レプトン対になる過程である。すなわち、 $h_1 + h_2 \rightarrow l + \bar{l} + X$ で、素過程は $\bar{q} + q \rightarrow l + \bar{l}$ である。角分布は、3つのパラメータ λ, μ および ν を用いて、

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\lambda+3} \left(1 + \lambda \cos^2 \theta + \mu \sin^2 \theta \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right)$$

第2項の $\cos 2\phi$ 型のモジュレーションは、anti-quark と quark の Boer-Mulders 関数の関 :

$\bar{h}_1^\perp(x_1, k_T) h_1^\perp(x_2, k_T)$ に比例する。

$$\nu \propto \bar{h}_1^\perp(x_1, k_T) h_1^\perp(x_2, k_T)$$

摂動論的 QCD では、 $\lambda \approx 1, \mu \approx 0, \nu \approx 0$ が期待されるが、実験によると大きな ν が報告されている。

Drell-Yan 過程を調べる実験は、 $p p, \pi p, \bar{p} p$ で行われてきたが、すべて無偏極実験で、偏極実験は行われていない。将来の偏極実験によって、より詳細な情報が得られる。COMPASS では、パイ中間子ビームと、偏極陽子ターゲットを用いて、 $\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ の研究を計画。また、J-PARC では $p^\uparrow + p^\uparrow \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ 、ドイツの GSI では偏極反陽子ビームを開発し、 $\bar{p}^\uparrow + p^\uparrow \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ の測定が計画されている。

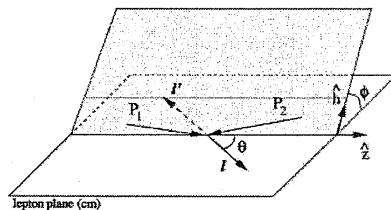


FIG. 1. Kinematics of the Drell-Yan process in the lepton center of mass frame.

		unpol.	Nucleon long. pol.	trans. pol.
Quark	unpol.	$f_1 (= q)$ number density 		f_{1L}^\perp Sivers I-odd k_T
	long. pol.		$g_{1L} (= \Delta q)$ helicity 	g_{1T}
	trans. pol.	h_1^\perp Boer-Mulders 	survive after integration over k_T	$h_{1T} (= \Delta_T q)$ transversity
	trans. pol.	I-odd k_T	h_{1L}^\perp 	h_{1T}^\perp

7 実験例 I COMPASS

COMPASS は、ジュネーブのヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の陽子加速器 SPS (Super Proton Synchrotron) を利用した実験で、2つの研究計画を持つ。

- (1) ミューオンプログラム
- (2) ハドロンプログラム

COMPASS は COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy の略で、プログラムに共通のスペクトロメータのことである。COMPASS 共同研究グループは、共通装置を用いて、異なる物理プログラムを遂行するために組織され、11カ国から200名以上の研究者が参加。

- (1) ミューオンプログラムは、レプトンビームを用いて原子核やハドロンの構造を研究する伝統的な研究手法の実験。偏極ミューオンビームと偏極ターゲットを用いて深部非弾性散乱データを収集。
- (2) ハドロンプログラムは、陽子や π 中間子などのハドロンビームを用いて、グルーボールなど通常の間接子とは違うエキゾチックハドロンの探索を行う。探索粒子の崩壊をさまざまなモードで検出するため、RICH による PID、ハドロンカロリメータ、電磁カロリメータが装備されている。また、標的には水素標的が用いられる。

以下では、ミューオンプログラムに限定して、話を進める。

7-1 COMPASS ミューオンプログラムの概要

COMPASS ミューオンプログラムでは、高エネルギー偏極ミューオンビームを偏極陽子、重陽子標的に入射し、散乱されるミューオンおよび、生成されるその他のハドロンを検出し、スピン非対称度の測定を行う。これまでのレプトンを用いた散乱実験では、散乱されたレプトンだけを観測してきたが、COMPASS では、同時にハドロンも検出。

ねらう主な物理テーマは、

- (1) 偏極構造関数 (g_1) の高精度測定 → グルーオンスピン寄与
- (2) グルーオン偏極度の測定による、グルーオンスピン寄与の研究
- (3) 横方向偏極分布関数 (Transversity, Sivers-PDF) の研究 → 軌道回転のヒント

7-1 偏極ミューオンビーム

偏極ミューオンビームは以下のようにして生成される。

- (1) SPS から 400 GeV の陽子ビームを引き出し、Be 標的に入射し、荷電 π 中間子を生成 (π^+)
- (2) π^+ を運動量分析し、ビームラインに導入
- (3) π は、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ で崩壊。この時、 π の重心系で、 μ は left handed

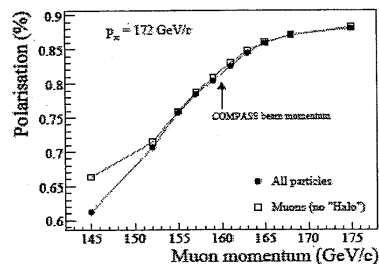


Fig. 3. The muon beam polarisation as a function of central muon momentum, assuming a central hadron momentum of 172 GeV/c.

- (4) 実験室系で最も高い運動量を持つ μ を選択 (π の進行方向に大きな運動量を持つ) する
- (5) μ は進行方向と反対向きに偏極
- (6) μ 以外の粒子を除去するため、ハドロンアブソーバーとして 10m 程度の Be の中を通し、COMPASS の実験室まで導く

この方法で、190GeV までの偏極度 80% 以上のミュオンが 2×10^8 muons/sps cycle で得られる。ここで、SPS の cycle は 16.8s で、spill は 4.8s である。

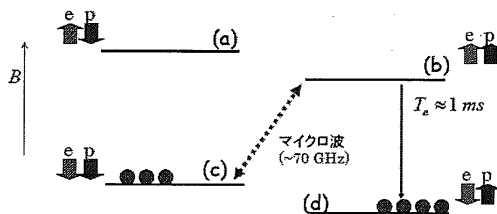
7-2 偏極ターゲット

能動核偏極法 (DNP=Dynamic Nuclear Polarization) による固体偏極ターゲットを利用。

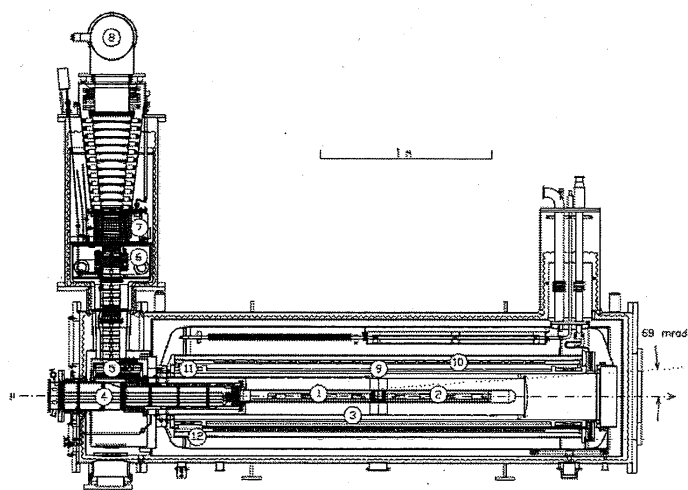
低温、高磁場中での電子の高偏極を、マイクロ波により電子スピン・核スピン結合させ、核偏極を励起する。ターゲットとして NH_3 と ${}^6\text{LiD}$ を用いる。いずれも、電子線照射で格子欠陥を作り、不対電子を得る。 NH_3 では水素核、つまり陽子が偏極するが、 ${}^{14}\text{N}$ は核磁気モーメントが小さいため、ほとんど偏極しない。標的中の偏極できる核子の割合、dilution factor は、 $f=3/17 \sim 0.176$ となる。

${}^6\text{LiD}$ では、 ${}^6\text{Li}$ と D の両方が偏極。ここで、 ${}^6\text{Li}$ 核は、d クラスタ + α クラスタと考えられ、 ${}^6\text{Li}$ 偏極は d 偏極とみなされるので、 ${}^6\text{LiD}$ は、 $\alpha +$ (偏極した 2 つの d 核) とみなされる。よって、高い dilution factor ($f=50\%$) が得られる。

COMPASS の偏極ターゲットシステムでは、直径 3cm、全長 1.2m の筒状のターゲットセルを用いている。ターゲットセルは、長さが 0.6m の 2 つのセルにわかれており、それぞれ独立に偏極させることができる。ターゲットセルは、世界最大の希釈冷凍器を用いて最低温度 30mK まで冷却。ソレノイド型の超伝導電磁石によって、2.5T の高い均一度 (100ppm/1.2m) の磁場がかけられている。最大偏極度は、陽子で 90%、重陽子で 50% 程度。スピン反転には、マイクロ波周波数を変えて DNP を行えばよいが、最大偏極までかなりの時間がかかる。これを回避するため、field rotation を用いる。超伝導電磁石システムには、ソレノイド型に加え、ダイポール型コイルが組み込まれている。2 種類のコイルを利用して、磁場の方向をゆつ

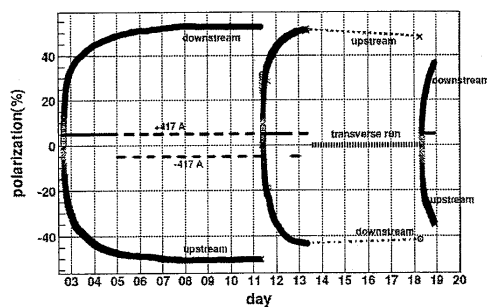


能動核偏極の原理: 核と電子のスピン系のエネルギーレベルはゼーマン効果で 4 つに分裂する。電子スピンの向きは、(a)、(b) では上向き、(c)、(d) では下向きになる。低温、高磁場での熱平衡状態では (c)、(d) の占有率が高い (電子の偏極度はほぼ 100%)。しかし、(c) と (d) の差は非常に少なく、核はほとんど偏極していない。ここで、(b) \leftrightarrow (c) に対応するマイクロ波を照射し、2 つのレベルを飽和させる。(b) の状態は周りの格子との緩和によって、すぐに (d) へ遷移する (緩和時間は数 ms)。これを継続することにより、(c) \rightarrow (d) の状態変化が能動的に引き起こされ、核スピンの高偏極が得られる。一般的に、核スピンの緩和時間は電子に比べ、1000 倍程度長いので、(d) \rightarrow (c) の遷移は無視できる。



で 50% 程度。スピン反転には、マイクロ波周波数を変えて DNP を行えばよいが、最大偏極までかなりの時間がかかる。これを回避するため、field rotation を用いる。超伝導電磁石システムには、ソレノイド型に加え、ダイポール型コイルが組み込まれている。2 種類のコイルを利用して、磁場の方向をゆつ

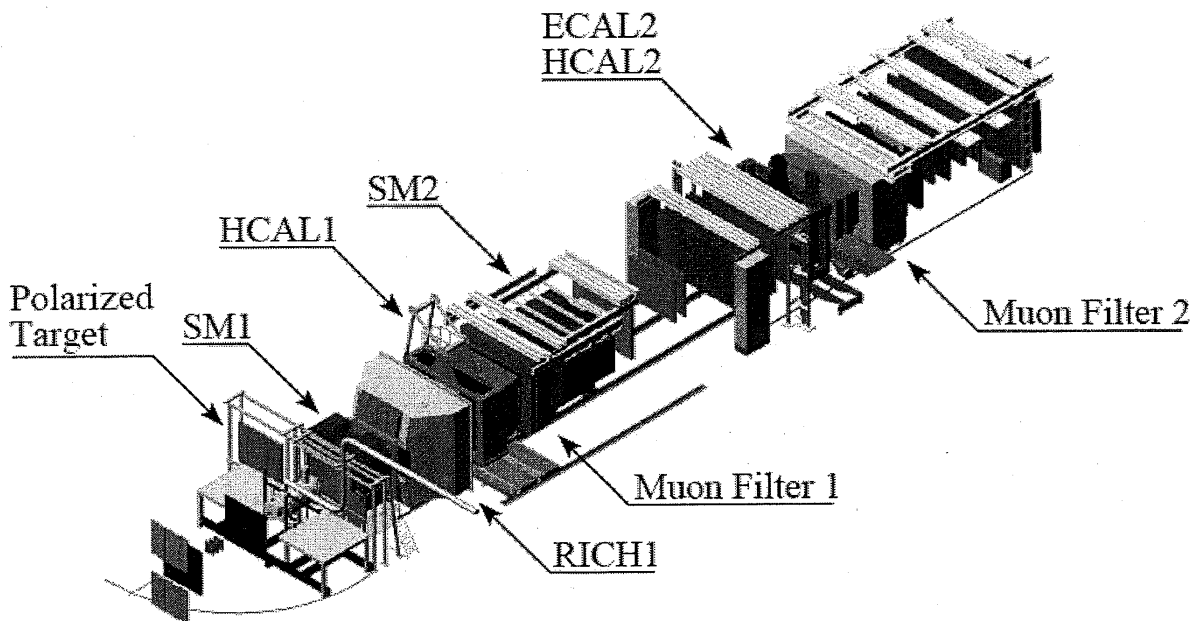
くり変化させると、スピンは磁場の変化に従って、変化する。結果として30分程度でスピン反転がなされる。

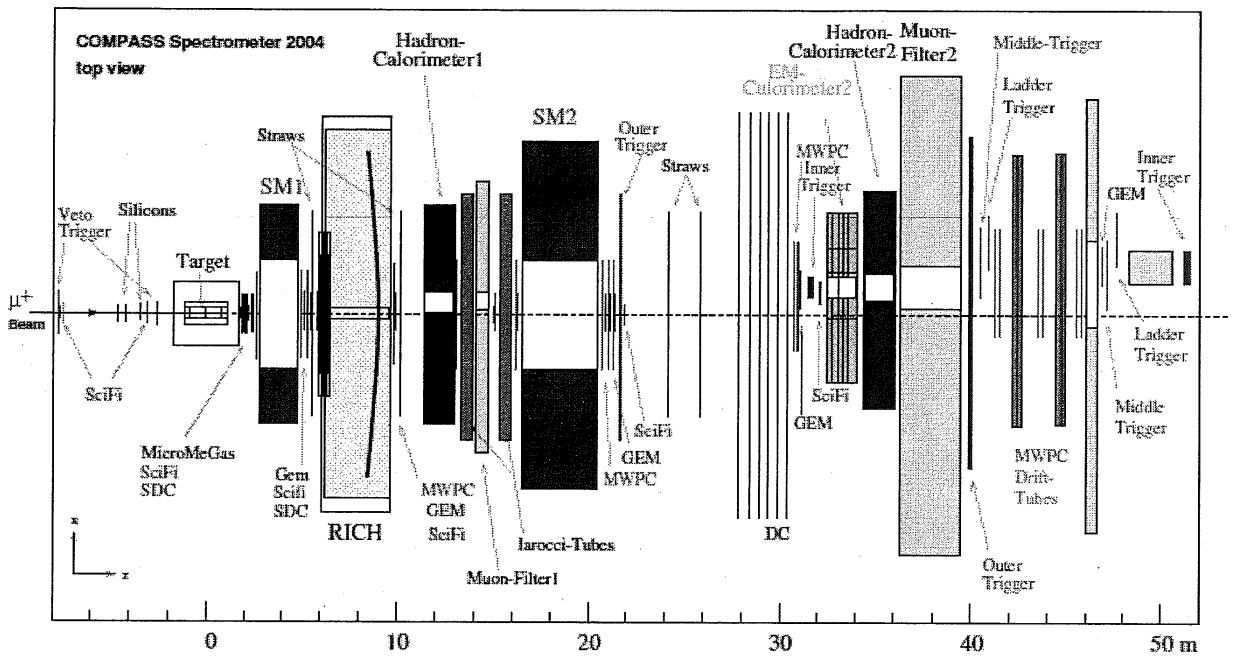


重陽子偏極度の時間的变化

7-3 COMPASS スペクトロメータ

COMPASS スペクトロメータは2つの分析用電磁石 (SM1, SM2) を有する2段スペクトロメータである。上流側のスペクトロメータ (Large Angle Spectrometer) では、大角度に出る低いエネルギーのドロンを検出を行い、下流側 (Small Angle Spectrometer) では、散乱ミュオンや高エネルギーのドロンをとらえる。これらの Spectrometer は、粒子飛跡検出器 (tracking detector)、カロリメータ、粒子認識装置(PID-devices)から構成されている。





「Tracking Detectors」

COMPASS の Tracking Detector は、放射線強度によって次のように分類される。

(1) VSAT (Very Small Area Trackers)

ビーム領域を含む、高い放射線強度 ($10^5 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-2}$) の領域でのビーム粒子や荷電粒子のトラッキングに使用、SciFi (Scintillation Fiber) tracker

(2) SAT (Small Area Trackers)

ビーム軸から直径 2.5cm から 30-40cm の比較的高い放射線強度 ($10^4 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-2}$) の領域をカバー。GEM、Micromegas

(3) LAT (Large Angle Trackers)

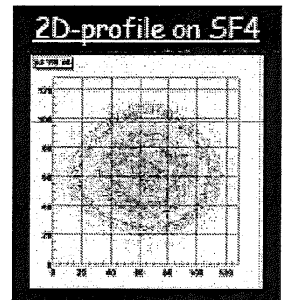
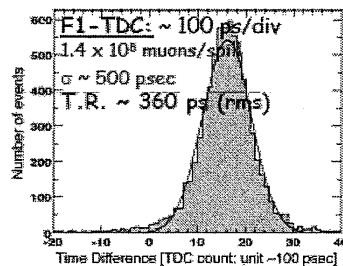
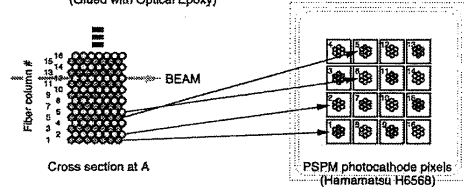
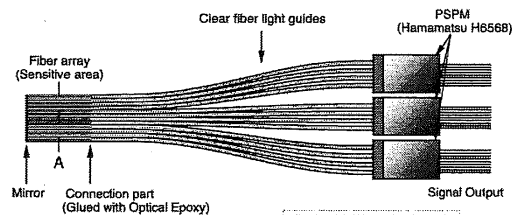
数 m x 数 m にわたる大きな領域をカバーする。drift chamber、straw tube chamber、multiwire proportional counter (MWPC) など

(1) VSAT

[SciFi tracker]

直径 0.5-1.0mm のプラスチックシンチレーションファイバー (SciFi) と Multi-Anode-PMT の

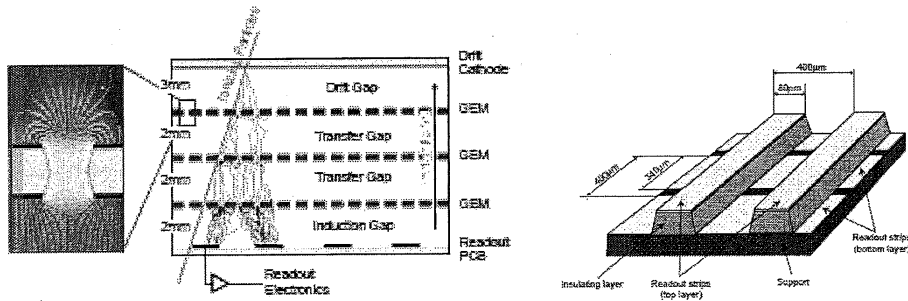
組み合わせ。SciFi の発光の立ち上がりは 1ns 以下で、また PMT の応答も 1ns 以下。高いビーム強度 ($10^8/\text{spill}$) でも、使用可能。高速応答、高時間分解能 ($\sigma=360\text{ps}$)。中心付近は常時ビームにさらされているにもかかわらず、散乱粒子も高効率で検出できる。



(2) SAT

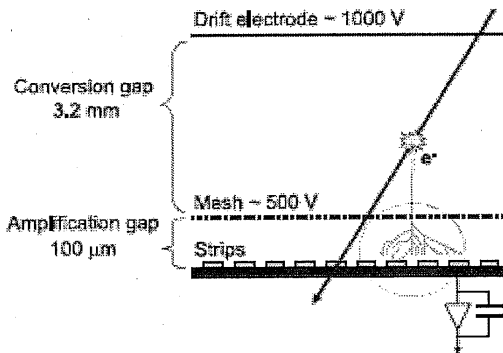
[GEM detector]

直径 $70\mu\text{m}$ の穴が多数 ($10^4/\text{cm}^2$) あいている絶縁性の薄いシートの両面に電圧を加え、穴の、にできる電場を利用してガス電子増幅を行う機構を持った粒子検出器。このようなシートをガス電子増幅器 (GEM=Gas Electron Multiplier)と呼ぶ。COMPASS では、GEM を3層組み込み、各層での増幅度を低く抑えることによって、放電による検出器の劣化を抑えている。プリント、ーキットボード上に $400\mu\text{m}$ ピッチで縦と横方向に作られてストリップで、2次元読み出しを、っている。1つのプレーンの位置分解能として、 $\sigma=70\mu\text{m}$ 程度が得られている。



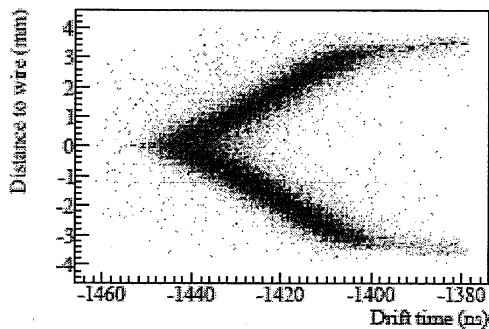
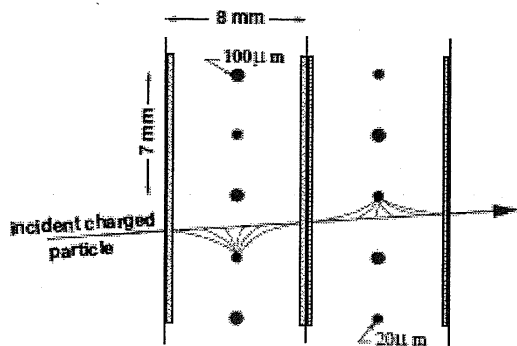
[Micromegas]

Micromegas (Micromesh Gaseous Structure) は、メッシュ状の電極とカソードの間に電圧を印加し、ガス電子増幅をおこなう飛跡検出器である。メッシュ状電極とカソード間は $100\mu\text{m}$ 狭く、大きな電場が生まれる。読み出しは、カソード電極上に $360\mu\text{m}$ または $420\mu\text{m}$ ピッチで作られてストリップによって行われる。1つのプレーンの位置分解能として、 $\sigma=90\mu\text{m}$ 程度、時間分解能は、 $\sigma=9.3\text{ns}$ が得られている。



(4) LAT

[drift chamber]



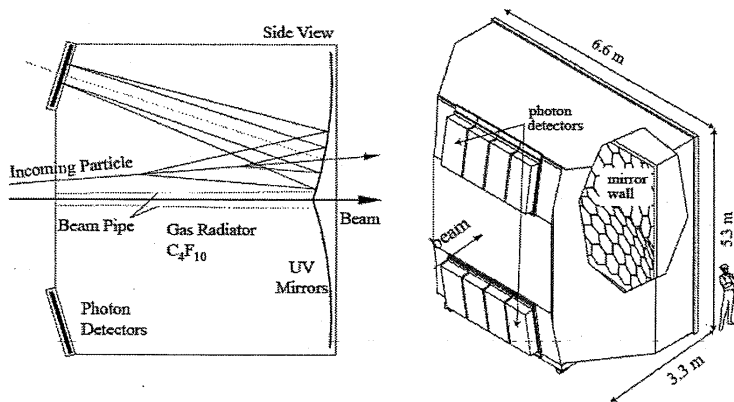
[straw tube chamber]

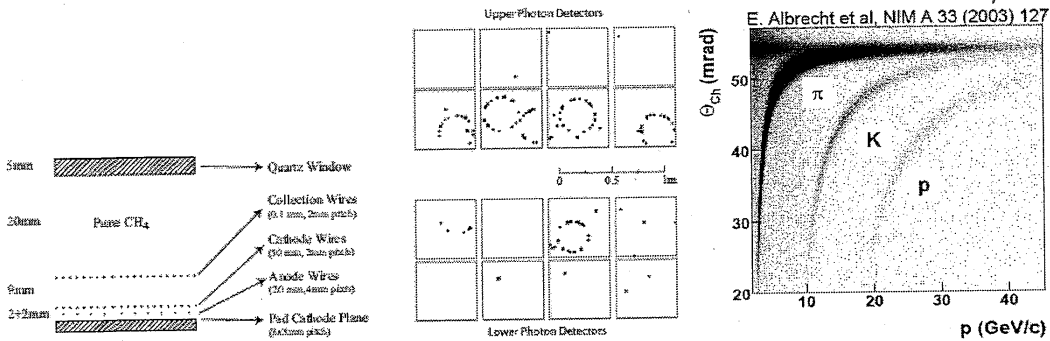
[multiwire proportional counter(MWPC)]

「PID-devices」

[RICH]

RICH(Ring Image Cherenkov Detector)は、高速の荷電粒子が物質中で放射するチェレンコフ光を利用して、粒子の速度を計測する装置である。速度がわかれば、運動量の情報と合わせることで、検出粒子の静止質量が判明するので、粒子認識 (PID) がなされる。チェレンコフ光は、屈折率 n の物質中では、速度 v の荷電粒子の進行方向に対して、 $\cos\theta = c/nv$ を満たす方向に放射される。つまり、高速の荷電粒子ほど、進行方向に対して大きな角度で放射を起こすことになる。この放射をミラーで反射させ、集光すると光子は円周上に分布することになる。すなわち、この円の直径から荷電粒子の速度を知ることができる。COMPASS では、 $n-1=0.0015$ の C_4F_{10} の 1 気圧のガスを放射体として用いることで、 $10\text{GeV}/c$ 以上の運動量領域のハドロン の PID を可能としている。周辺部での光検出は、CsI にチェレンコフ光を当て、高電子を作り、その光電子をガス電子増幅し MWPC で検出している。MWPC の読み出しは、 $8\times 8\text{mm}$ のパッドで行われている。また、ビーム領域に近い部分の光検出は、高速応答性の 16ch の Multi-Anode-PMT、576 本が用いられている。





[Muon Filter]

Muon は、物質中で大きく方向を変えたり、放射によってエネルギーを失ったりする確立が低いので、50cm 程度の鉄でも貫通することができる。この性質を利用して、Muon のPID を行うことができる。COMPASS では、Muon filter と呼ばれる 60cm の鉄を tracking detector ではさんだ検出器を装備している。π、K、p などのハドロンや、電子は鉄中で相互作用を起こして track が失われてしまうが、Muon の場合は、鉄の filter の前後の track がはっきりとつながる。これにより、muon のPID がなされる。

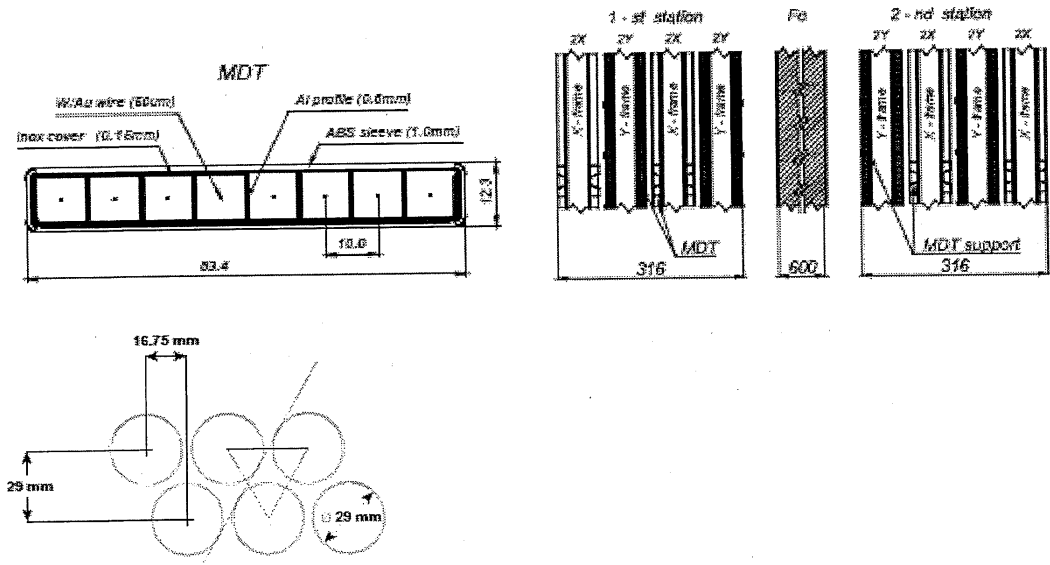


Fig. 46. The layout of the tubes in a double layer of MW3 planes. Dimensions in mm. An imaginary equilateral triangle formed by centres of three adjacent tubes and a common tangent to their interior are shown.

「カロリメータ」

[HCAL]

鉄とプラスチックシンチレータを交互に積層した構造を持つサンドイッチ型検出器。HCAL に入射したハドロンは鉄原子核と反応し、ハドロンシャワーの生成。ハドロンシャワー中の2次的ハドロンのプラスチックシンチレータ内でのエネルギー損失を測定することで、入射ハドロンの全エネルギーを求め、このためには、2次ハドロンを止めるのに十分な物質量が必要である。

HCALの構成： 鉄（厚さ2.5cm）36層、プラスチックシンチレータ（厚さ3mm）36層 エネルギーレンジ 10-100GeV のハドロンに対応。

