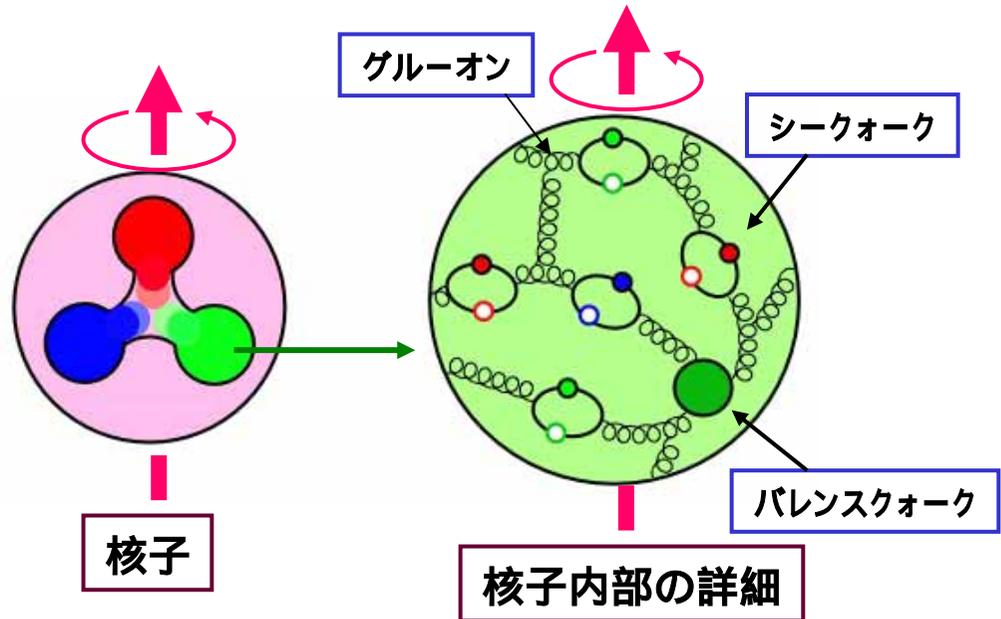


核子（陽子・中性子）スピンの起源に挑む —クォークスピンからグルーオンスピンへ—

COMPASS国際共同研究



私たちはスイスのジュネーブにあるヨーロッパ原子核研究機構(CERN)において、12カ国の国際共同研究としてCOMPASS(Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)を進めています。

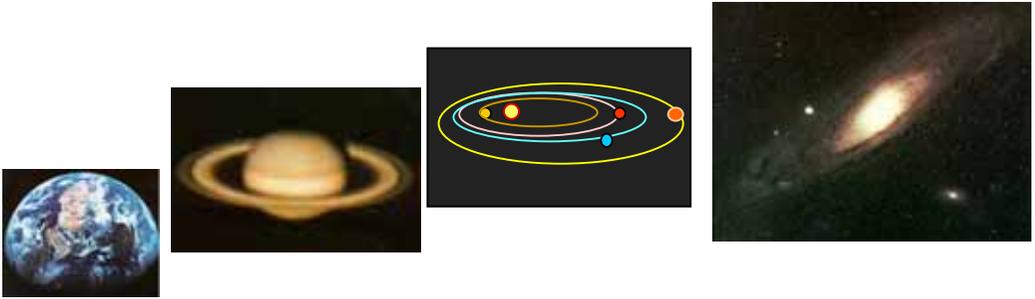
これは最高エネルギー4500億電子ボルト(450GeV)の陽子シンクロトロンによって生成される1600億電子ボルト(160GeV)のスピンのそろった高エネルギーミュー粒子(ミューオン)を、同じくスピンを揃えた陽子や中性子に衝突させ、陽子や中性子の**スピンの起源**を解明しようとするものです。この研究では、物質の最小単位である陽子や中性子(この二つを核子と呼ぶ)の内部構造を更に微小な粒子であるクォーク・グルーオンの段階から解明しようとしています。

このCOMPASS共同研究で、わたしたちは、これまでに日本グループが開発してきたスピン偏極ターゲットの技術を持って中心的役割を果たしています。

山形大学 理学部 岩田高広
宮崎大学 工学部 松田達郎
中部大学 工学部 堀川直顕

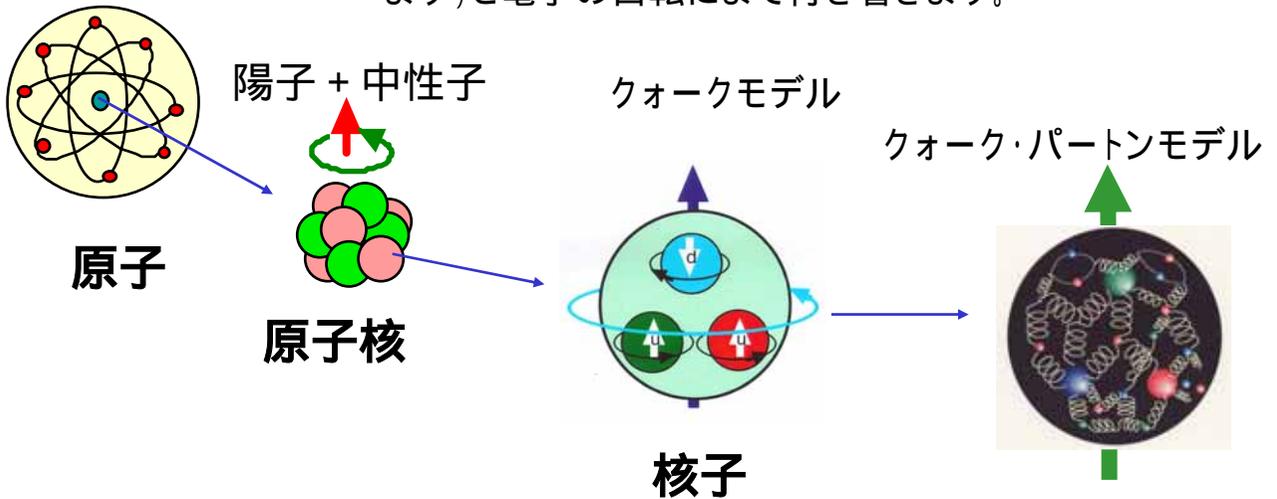
- 「自然界における回転」 -

自然界には、さまざまな回転があります。大きいものは宇宙の星雲から小さなものではくるくる回るコマ、さらに原子の中を回る電子など極微の世界にも回転が存在します。



原子核 + 電子

回転しない皿では皿回しができないし、止まったコマは倒れてしまうように、自然界では回転運動がものを安定に保つ重要な要素になっています。そして、微小な回転を突き詰めてゆくと、陽子や中性子(これらをまとめて核子と呼びます)と電子の自転にまで行き着きます。



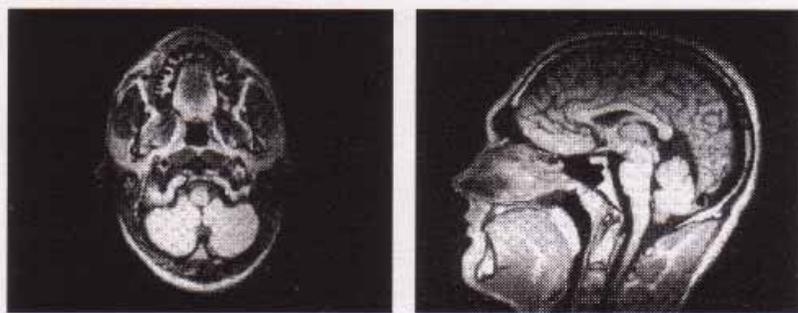
核子は更に微小な粒子クォークとグルーオンでできており、それらの自転の根源を明らかにすることは、物質の究極構造の解明につながります。

本研究は、核子の自転(スピン)の源を、クォークやグルーオンのスピンの説明できるかどうかを調べるものです。

「夢をはぐくむ微小磁石“スピン”」

下の写真は、現在病院でCTスキャンの一つとして威力を発揮しているMRI(核磁気共鳴断層撮像検査)の画像です。これは、主に陽子の“スピン”の性質を利用したもので、人体の水分子の中の**水素原子核(陽子)スピン**が先端医療に応用されている例です。人体を傷付けることなくガン検査等に役立っています。スピンというマイクロな手段の威力に感嘆させられます。

体内水分子の水素原子核(陽子)スピンを使ったMRIによる断層写真(2003年度ノーベル医学賞)



また、新交通機関として期待されている「磁気浮上式電車」も、元をたただせば**電子のスピン**から生ずる超伝導の性質を利用したものです。



電子スピン対で生じる超伝導による磁気浮上車

スピン:「クルクルまわるコマ磁石」

この“スピン”とはいったいどういう性質でしょうか？

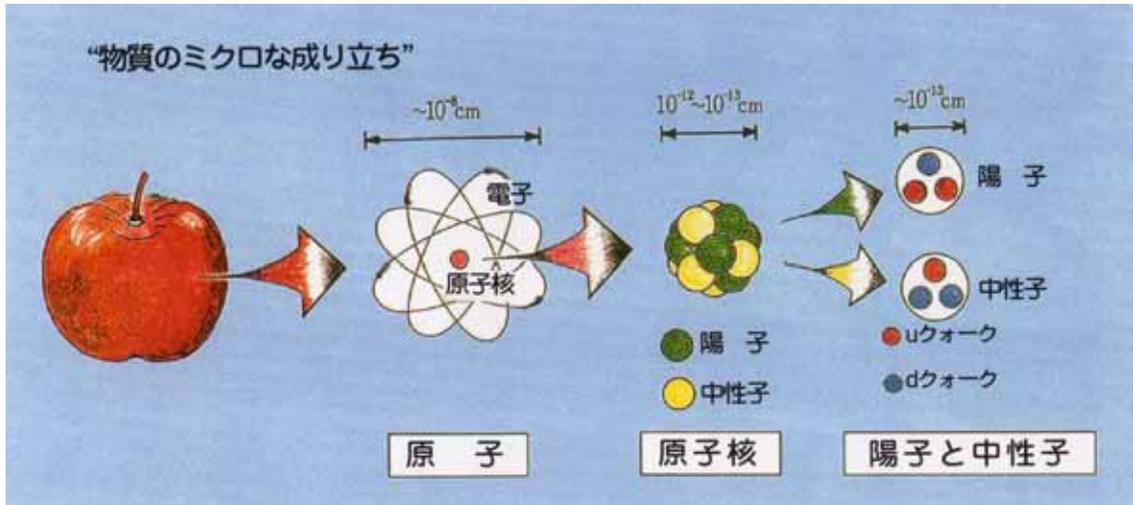
物質の最小単位である陽子や電子はあたかもコマのように自分自身で回転している性質を持っています。鉄の棒に電線を巻きつけ、電流を流すと磁界が発生し、磁石となります。電流が電線の中を回転しながら流れるからです。電気をもった陽子や電子がぐるぐる回ると、それらは小さな磁石となります。

この自転の性質をスピンと呼び、右回り回転を上向き、左回り回転を下向きとして区別します。

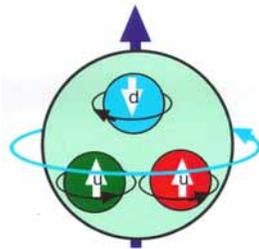


「物質のミクロな成り立ち:クォーク」

よく知られているように、物質は原子から、その原子は原子核と電子から、原子核は陽子と中性子から構成されています。いわゆる“クォークモデル”とは、陽子や中性子はより微小な“クォーク”といわれる基本粒子からできているという考えです。



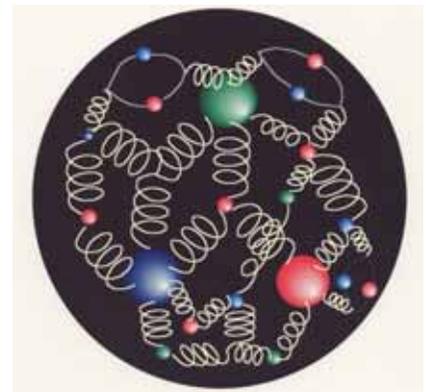
「クォークもまた“スピン”をもつ！」



クォークスピンについては“右回転(図の上向き矢印)”と“左回転(図の下向き矢印)”の二通りの場合があります。

そして、右回転と左回転のスピンを持つ3つのクォークの組み合わせで、陽子のスピンは見事に説明できます。これが今迄考えられているクォークモデルです。

高エネルギー粒子を使い、核子内部を高倍率で見ると、クォークは3個だけではなく、もっと細かなシークォークとそれを作り出すグルーオンで埋まっていることが判ります。それらクォークのスピンを足し合わせると「核子スピン」になるでしょうか？



「クォークスピンの奇妙な振る舞い！」 “スピクラシス(危機)”

1988年に、CERNのEMCグループが報告した実験結果は、クォークモデルから期待されるものとはまったくはずれた、「陽子のスピンはクォークスピンはほとんど関与していない！」というたいへん不思議なものでした。

このクォークスピンの謎めいた振る舞いは、“スピクラシス”と呼ばれ、世界中の物理学者がおおいに頭を悩ました大問題の一つです。



「いったい、クォークスピンの役割は？」

“クォークモデルはまちがっている？”

“まだまだ実験が不十分？”

“超ミクロな世界で、スピンの何か異変がおこっているのでは？”



「SMC実験による謎解き？」

そこで、世界中の研究者の強い要望と期待を一身に受けて私たちの参加した国際共同研究SMC(Spin Muon Collaboration)が1991年から1996年までCERNにおいて実験を行いました。

スピンの向きのそろったミュオン粒子を、これまたスピンの向きをそろえて陽子や重陽子に衝突させ、双方のスピンの向きが平行で衝突する場合と反平行の場合とで、衝突の割合が違うかどうかを調べました。

EMCの実験に比べて測定領域をずっと広くし、陽子や重陽子のスピンのそろい具合(偏極度)や測定精度をはるかに良くするなど、データの質の向上に努めました。

「SMC実験でわかった極微の世界」

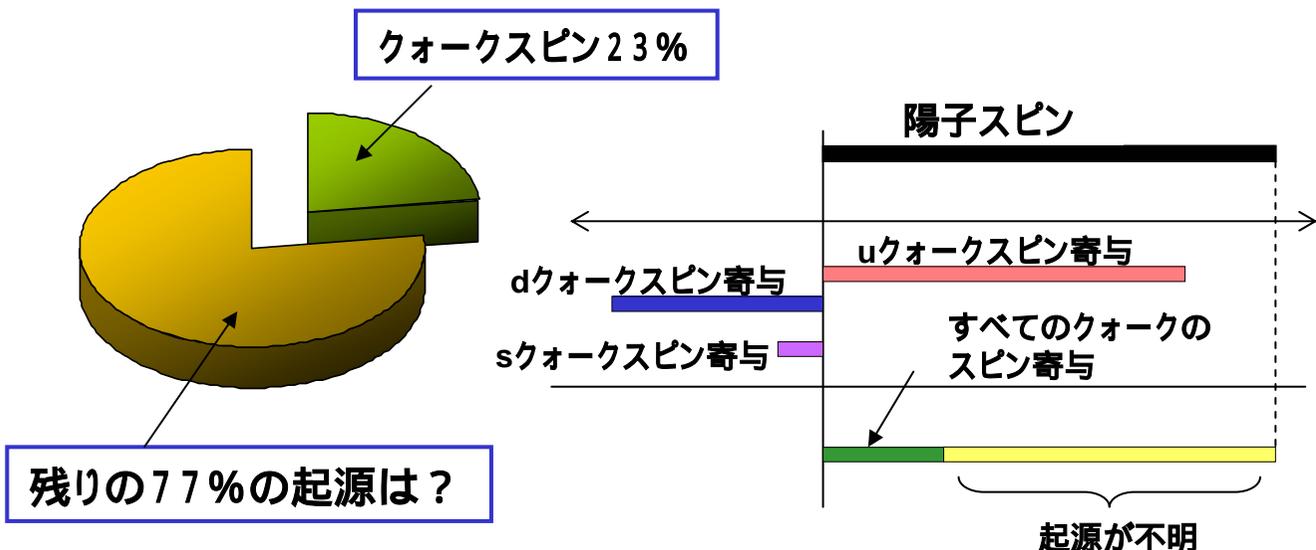
6年間に亘って得られたデータを詳しく解析した結果、次のようなことがわかりました。

- (1) クォークは陽子や中性子のスピンの20%程度しか担っていない。
- (2) クォークモデルでは考えられないストレンジクォークが核子スピンと反対向きに10%ほどスピンをそろえている。
- (3) 核子の中でできたり消えたりしているクォーク(シークォークと呼ばれる)はスピン偏極していない。
- (4) “スピクライシス”とはいうものの、QCD(量子色力学)の基礎的な枠組みは壊れていない。

「それでも残る核子スピンの謎」

核子のスピンを担うと思われたクォークスピンは、予想をはるかに下まわり少ない部分しか担っていないことがわかりました。「核子は3個のクォークでできている」とするクォーク模型はうまくいっていると思われたのに、より細部を見て出来たり消えたりしているシークォークまで勘定にいれると足らなくなってしまったのです。

そこで、**核子スピンを担う次の候補**は何かが問題になります。

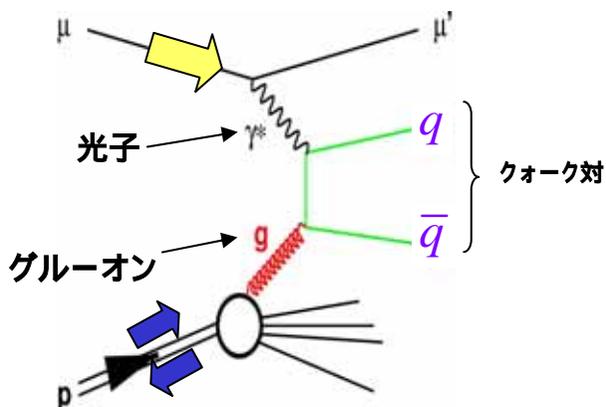


クォークを結び付ける**グルーオン**もまた**スピン**を持っています。このグルーオンスピンのどれだけ核子スピんに影響を及ぼしているかまったく判っていません、このグルーオン偏極の度合いを測るのが**COMPASS実験**です。

SMCからCOMPASSへ！

「グルーオンスピンの役割の解明」

COMPASSでは、グルーオンが関与する反応を選び出し、スピンの効果を調べます。ミュオンは、光子を出して核子と相互作用をします。また核子内ではグルーオンがクォークから放出されたり吸収されたりしています。光子とグルーオンは衝突してクォークと反クォークの対を発生します(これを「光子・グルーオン融合」と呼びます)。

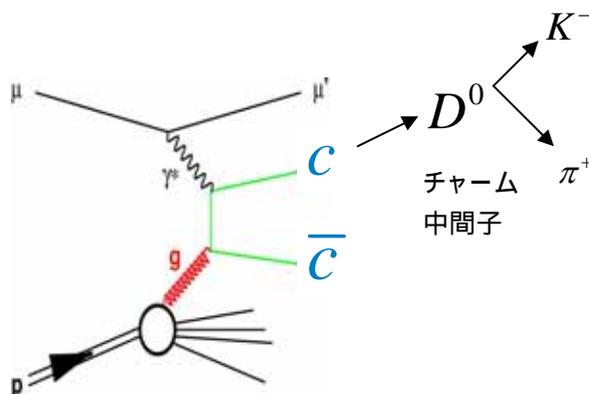


このとき、核子スピンの方向を変化させ、反応の起こりやすさを調べると、グルーオンのスピンの方向が分かります。

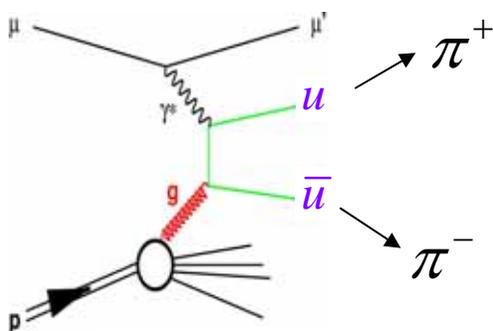
「光子・グルーオン融合」をつかまえるには、2つの方法を用います。

1つは、COMPASS独自の「オープンチャーム」と呼ばれる方法です。

クォーク対として、チャームクォーク対ができる時には、チャーム中間子が生成されます。この中間子の崩壊を捉えると、バックグラウンドを低く抑えて、光子・グルーオン融合を効率よく選び出せます。



オープンチャーム法



High Pt ハドロン法

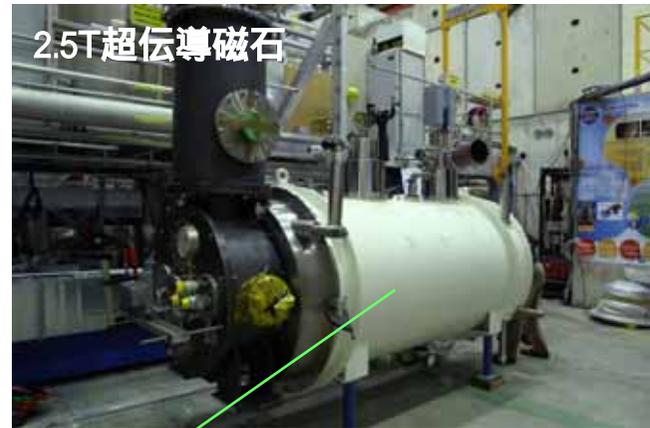
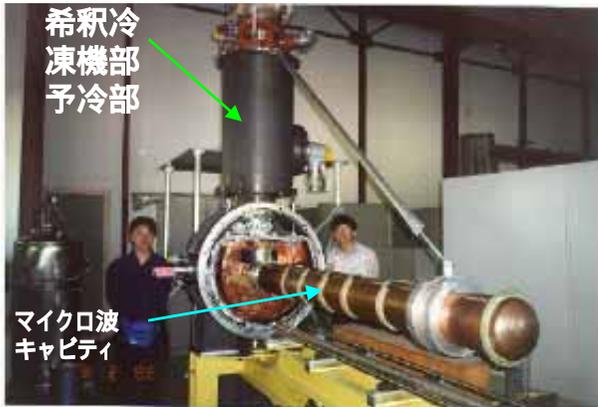
もうひとつは、「High Pt ハドロン」と呼ばれる方法です。uクォーク、dクォークなどの軽いクォーク対ができた場合には、2つのハドロンが大きな横運動量を持って発生します。この2つのハドロンをとらえます。

「史上最大の偏極ターゲット:再び日本グループの出番！」

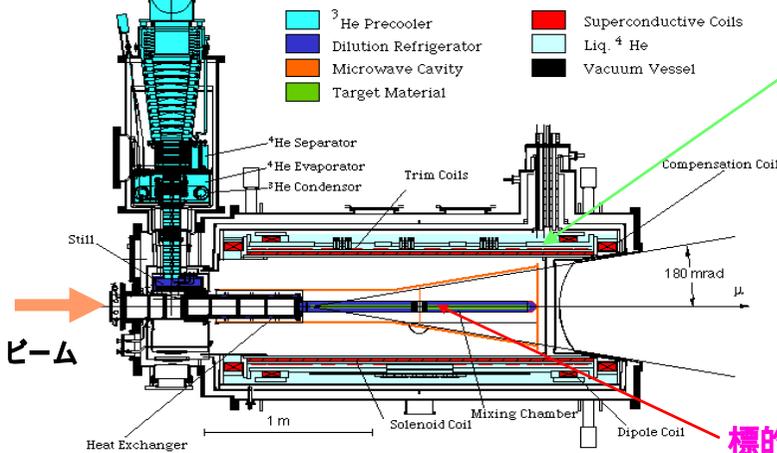
1600億電子ボルト(160GeV)のミュオンビームで衝突させるとはいえ、反応確率は小さく、かつ、バックグラウンドが混じってきます。必要なデータを効率良く抽出するため、発生した粒子は可能な限り検出しなければなりません。そのため偏極標的磁石の開口角を大きくとり、発生した粒子を逃さないようにします。

COMPASSでは開口径が60cmで、長さ130cm、直径3cmの空間を2.5テスラという高磁場で、均一度100ppmにすること、さらに、ソレノイドコイルの外側にダイポール磁石を置いて、ビーム軸と直交した方向に0.6テスラの磁場を出せる新型超伝導マグネットを作ることになりました。

この複雑で製作困難なマグネットの設計、製作を日本グループが引き受けたことがCOMPASS計画を前に動かした、と言っても過言ではありません。このマグネットは2006年度からの実験に使用されます。



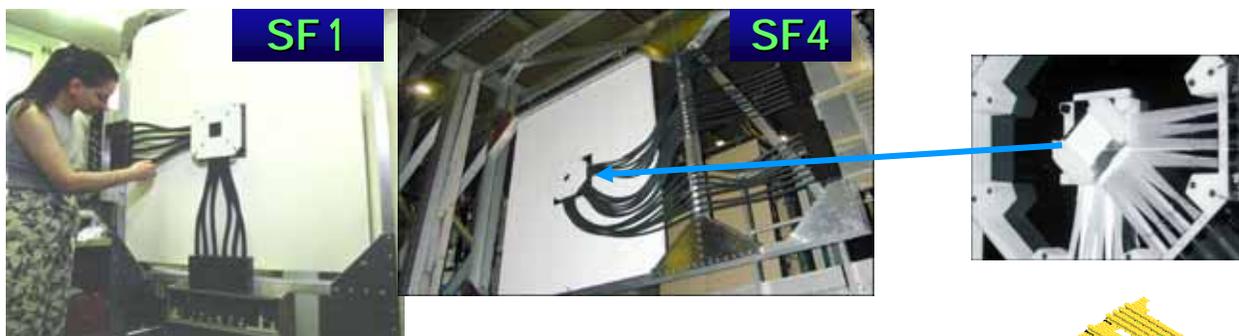
COMPASS Polarized Target



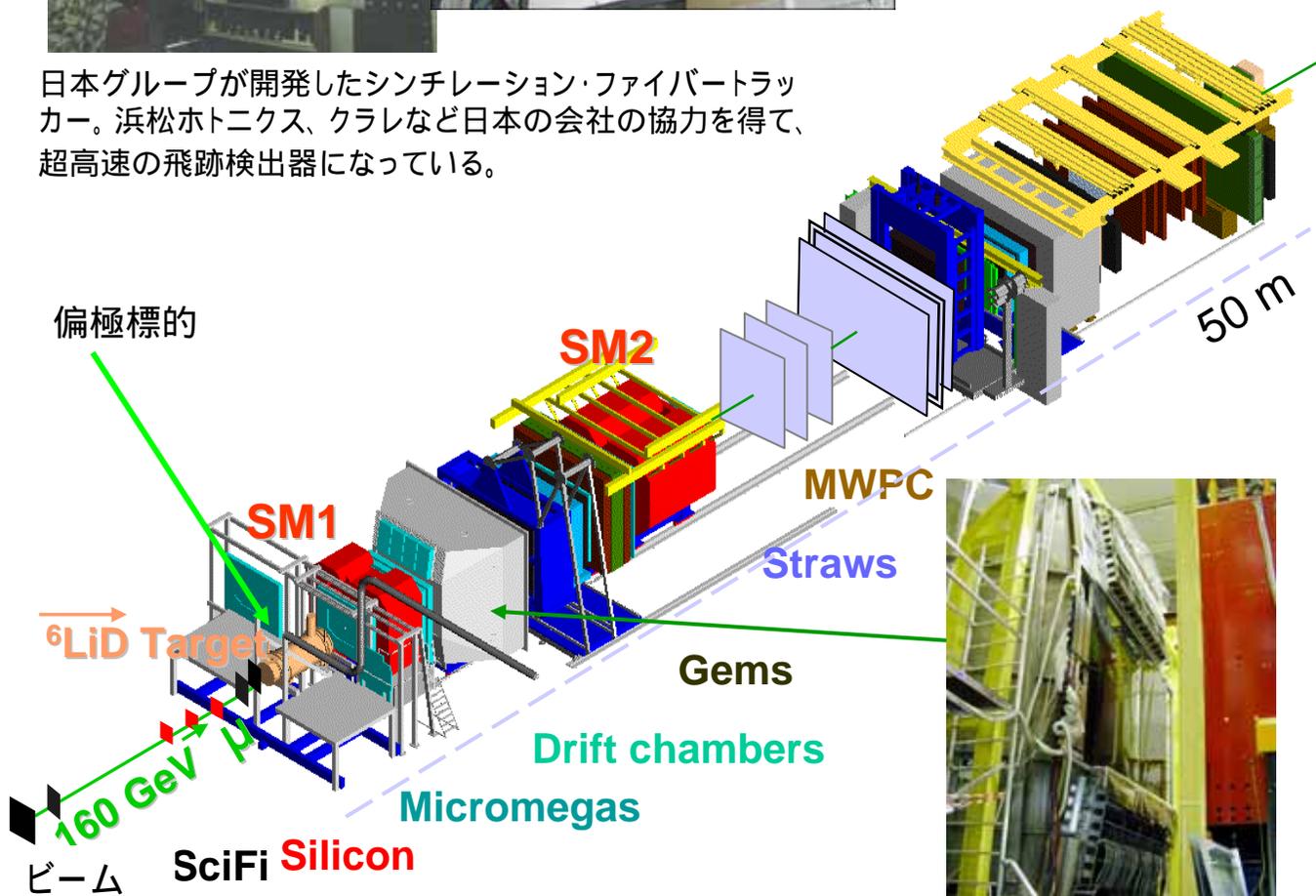
標的セル

「反応事象発生決定と粒子飛跡の検出」

反応の検出には、高エネルギービームにはね飛ばされて発生した、粒子を捉えなければなりません。そのために非常に多くの検出器が必要になります。特にミュオンを捉えるためのもの、ハドロン粒子を捉えるものなど、粒子の特徴にあわせて種類の違った検出器を装備します。日本グループも入射ミュオンビームの飛来時間、位置測定のための特殊な検出器(シンチレーション・ファイバートラッカー)を製作し、一翼を担っています。今後は、日本グループの光検出技術を活かし、新型リングイメージチェレンコフ粒子検出器への貢献も期待されています。



日本グループが開発したシンチレーション・ファイバートラッカー。浜松ホトニクス、クラレなど日本の会社の協力を得て、超高速の飛跡検出器になっている。

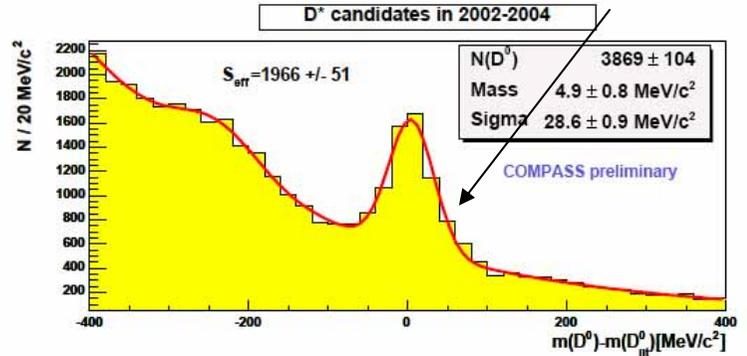


イタリアグループが製作したRICH検出器。粒子の種類を識別する。

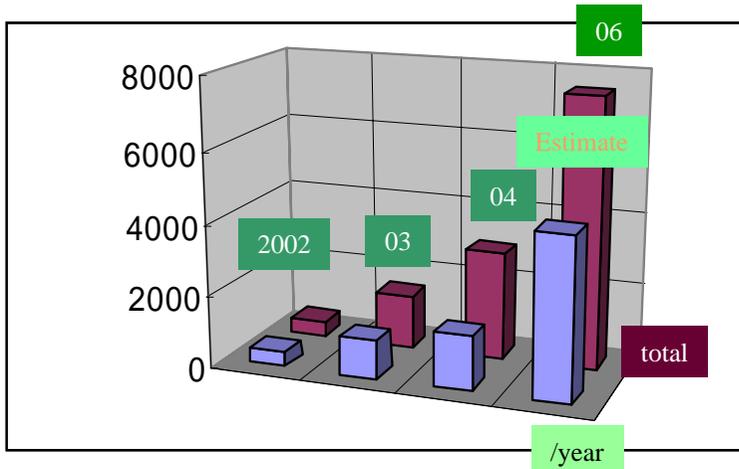
「これまでに得られた成果」

D^0 $K^- \pi^+$

「オープンチャーム」法では、チャーム中間子の検出に成功し、これからグルーオンの偏極度を初めて導きました。



K モードの不変質量分布



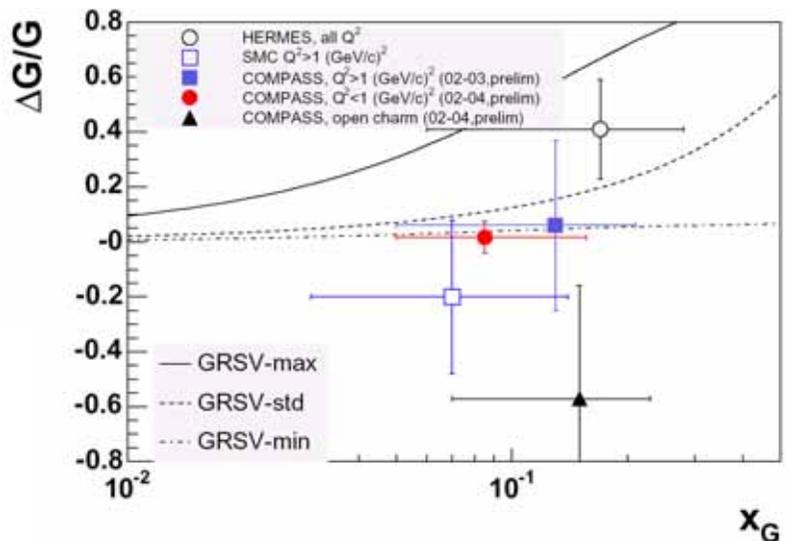
D^0 中間子の収量の増加の様子

「High Pt ハドロン」法では、これまでにない高い精度でグルーオンの偏極度を導きました。

結果は意外なことにグルーオンスピンの寄与が比較的小さいとするモデルに良く一致しています。

これが、本当ならば、クォークやグルーオンの回転運動効果を考える必要があり、大変興味深い事です。

偏極度の精度は、チャーム中間子の量がまだ少ないために充分ではありませんが、装置の改良により量が少しずつ改善しています。今後、よりよいデータが得られると期待できます。



これまでに得られたグルーオン偏極度。赤い がCOMPASSでの「High Pt ハドロン」によるもので、これまでの最高精度のデータになっている。黒い が「オープンチャーム」によるもの。横軸は、注目しているグルーオンの運動量(グルーオンの Bjorken x_G)。

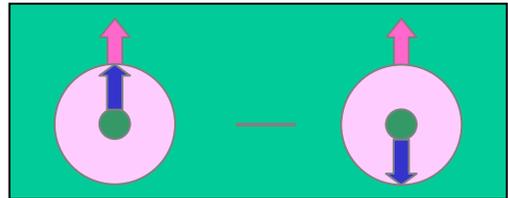
「COMPASSで追究するその他の研究課題」

COMPASSでは、グルーオンのスピン寄与を中心に研究が進めますが、同時に核子のスピン構造やハドロンのクォーク・グルーオン構造に関するさまざまな研究を行います。

クォークの横方向偏極分布

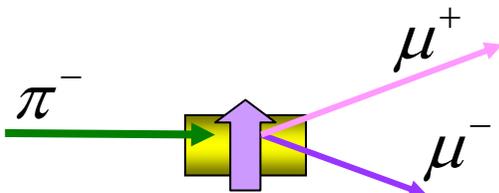
クォークの状態の決定には、3種類の情報が必要です。すなわち、

- (1)クォークの運動量分布、
- (2)クォークの”縦”方向偏極分布
- (3)クォークの”横”方向偏極分布



横方向偏極分布。横方向にスピン偏極した核子の中で、クォークスピンがどちらを向いているかを示す。

(1)と(2)はすでによく分かっています。ところが、“横”方向偏極分布はこれまでに明確に測定されたことがありません。この測定には、垂直(横方向偏極)にターゲットスピンをそろえる必要がありますが、ダイポール磁石を内蔵する特殊な構造のCOMPASS偏極ターゲットでは、横方向偏極が簡単に得られます。



COMPASS独自の偏極ドレール・ヤン反応による横方向偏極分布測定

また、COMPASSの実験ホールには 中間子ビームを引き出すことができます。それをターゲットに入射し、発生するミュー粒子対を検出し、スピン依存性を調べると、クォークの横方向偏極分布の情報が得られます。

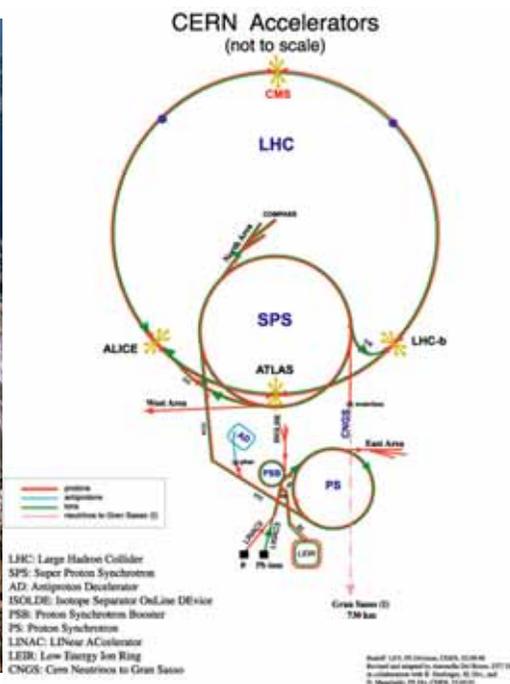
これは、**偏極ドレール・ヤン**と呼ばれるもので、横方向偏極分布を最も正確に抽出できると期待される方法です。これは、中間子ビームと横方向偏極ターゲットを組み合わせることができるCOMPASSならではの方法で、世界でも初の試みです。

COMPASSでは、以下の課題の研究も行ってゆきます。

- ・クォーク縦方向偏極分布の高精度測定
- ・クォーク偏極度計の研究
 - コリンズ効果の研究
 - 偏極破碎関数の研究(ラムダ偏極度の測定)
- ・横方向運動量依存パートン分布関数の研究
 - サイバース効果の研究
- ・ベクトル中間子生成での核子偏極効果
- ・ハドロンのエキゾチック状態の探索
 - グルーボール、ペンタクォーク、フォークォークなどの探索

CERN(ヨーロッパ原子核共同研究機構)

原子核・素粒子の研究のために、ヨーロッパを中心として創設された国際共同研究所で、スイス・ジュネーブの郊外にあります。今日高エネルギー物理学の分野で注目すべき成果を次々と生み出しています。COMPASSが利用しているSPS (Super Proton Synchrotron)などさまざまなタイプの大型加速器を擁しています。現在は、世界最高エネルギーのLHC(Large Hadron Collider)を建設中です。日本も準加盟国として運営に参画するとともに、LHCの建設への協力など、重要な役割を果たしています。



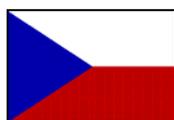
COMPASS国際共同研究の体制



Dubna (LPP and LNP),
Moscow (INR, LPI,
State Univ.),
IHEP



Warsawa (SINS),
Warsawa (TU)



Praha



Burdwan,
Calcutta



CERN



Torino
(University, INFN),
Trieste
(University, INFN)



Tel Aviv



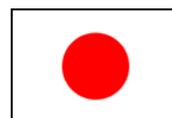
Helsinki



Bielefeld, Bochum,
Bonn (ISKP & PI),
Erlangen, Freiburg,
Heidelberg, Mainz,
München (LMU & TU)



Saclay



Yamagata/Miyazaki
Chubu/KEK

12カ国、200名以上の研究者
による国際共同研究

日本グループメンバー

山形大学*: 岩田高広、吉田浩司、加藤静吾、
田島靖久
宮崎大学: 松田達郎、長谷川武夫、坂口治隆
中部大学: 堀川直顕、鈴木肇
KEK: 石元茂

*COMPASS日本グループの代表研究機関