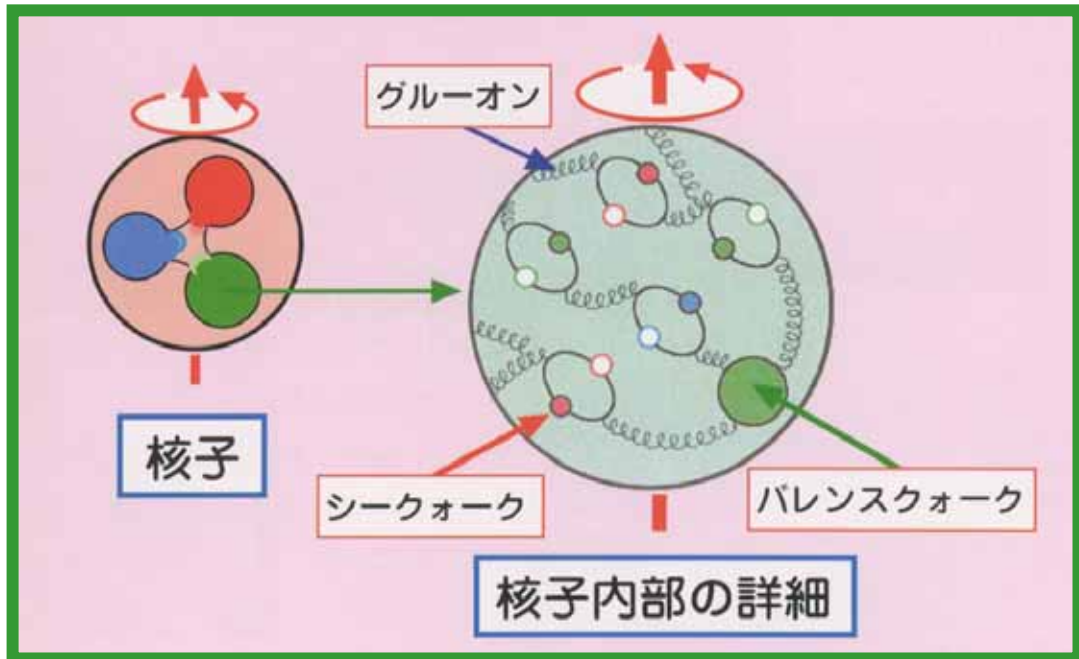


核子（陽子・中性子）スピンの起源に挑む —クォークスピンからグルーオンスピンへ—

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（通称CERN）において、10カ国の国際共同研究としてCOMPASS(COmmun Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)を進めています。

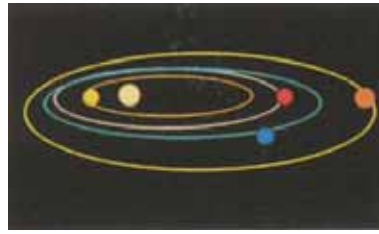
これは最高エネルギー4、500億電子ボルト（450 GeV）の陽子シンクロトロンによって生成されるスピンのそろった高エネルギーミュー粒子（ミューオン）を、同じくスピンを揃えた陽子や中性子に衝突させ、陽子や中性子の**スピンの起源**を解明しようとするものです。この研究では、物質の最小単位である陽子や中性子（この二つを核子と呼ぶ）の内部構造を更に微小な粒子であるクォーク・グルーオンの段階から解明しようとしています。

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やCERNでのSMC共同実験の実績を持って中心的役割を果たしています。

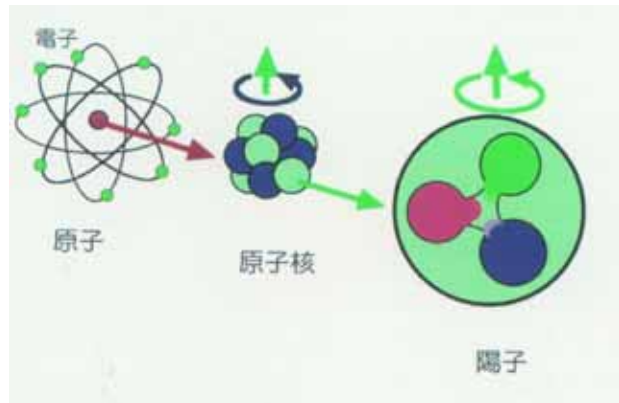
山形大学 理学部 岩田高広
中部大学 工学部 堀川直顕
宮崎大学 工学部 長谷川武夫

- 「自然界における回転運動」 -

自然が創っているものは、大きいものは宇宙の星雲から小さなものは、原子核やクォークまで、回転運動することで、安定な姿を保っているように見えます。



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。回転の根源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。

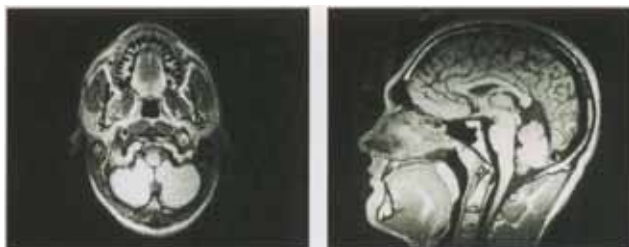


核子は更に微小な粒子クォークとグルーオンでできており、それらの自転の根源を明らかにすることは宇宙の安定の解明にもつながると言えます。

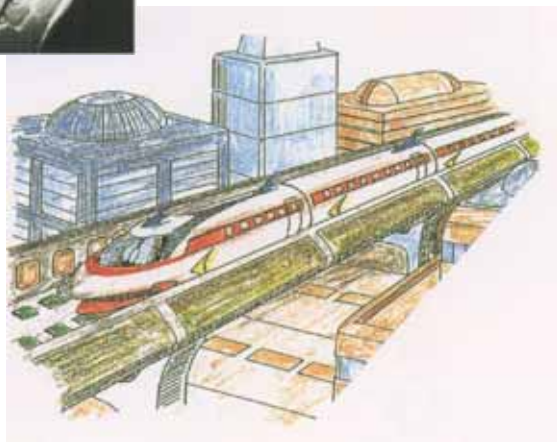
本研究は、核子自転（スピン）の源を、クォークやグルーオンのスピンの説明できるかどうかを調べるものです。 2

「夢をはぐくむ微小磁石“スピン”」

下の写真は、現在病院でCTスキニングの一つとして非常に威力を発揮しているMRI（核磁気共鳴断層撮像検査）の映像です。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**が先端医療技術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どんなに役立っているが、スピンというミクロな手段の威力に感嘆させられます。



また、新世紀の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。



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のことでしょうか？

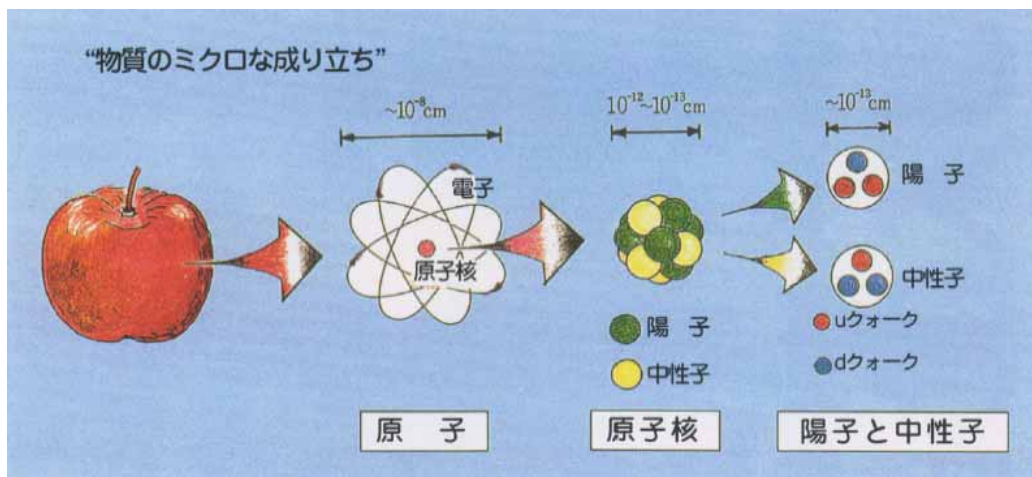
物質の最小単位である陽子や電子はあたかもコマのように自分自身で回転している性質を持っています。鉄の棒にエナメル線を何回も巻きつけ、電流を流すと磁界が発生し、鉄棒が磁石となります。電流がエナメル線の中を回転しながら流れるからです。電気をもった陽子や電子がくるくる回ると、それらは小さな磁石となります。



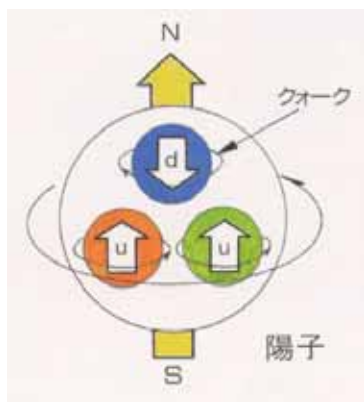
この自転の性質をスピンと呼び、右回り回転を上向き、左回り回転を下向きとして区別します。

「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粒子“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。



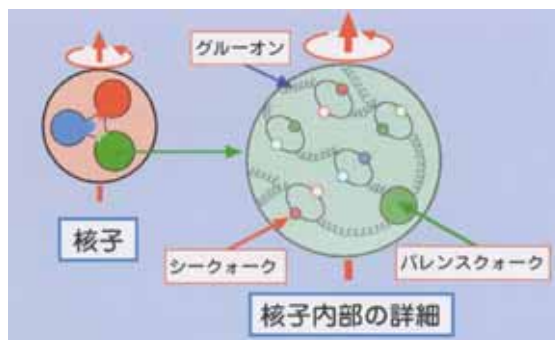
「クォークもまた“スピン”をもつ！」



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、もっと小さ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」になるのでしょうか？



「クォークスピンの奇妙な振る舞い！」

“スピクライシス(危機)”

1988年に、EMC (European Muon Collaboration) グループが報告したCERNでの実験結果は、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、「陽子のスピンに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。

この驚くべきクォークスピンの謎めいた振る舞いは、“スピクライシス”と呼ばれ、世界中の素粒子・原子核物理学者がおおいに頭を悩ませている現在の大問題の一つです。



「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、スピンに何か異変が起きているのでは？”



- 「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。

実験はスピン(磁石)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、衝突の割合が違つかどうかを調べます。

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とともに、標的の大きさも1.5倍以上にし、データ量の向上に努めました。

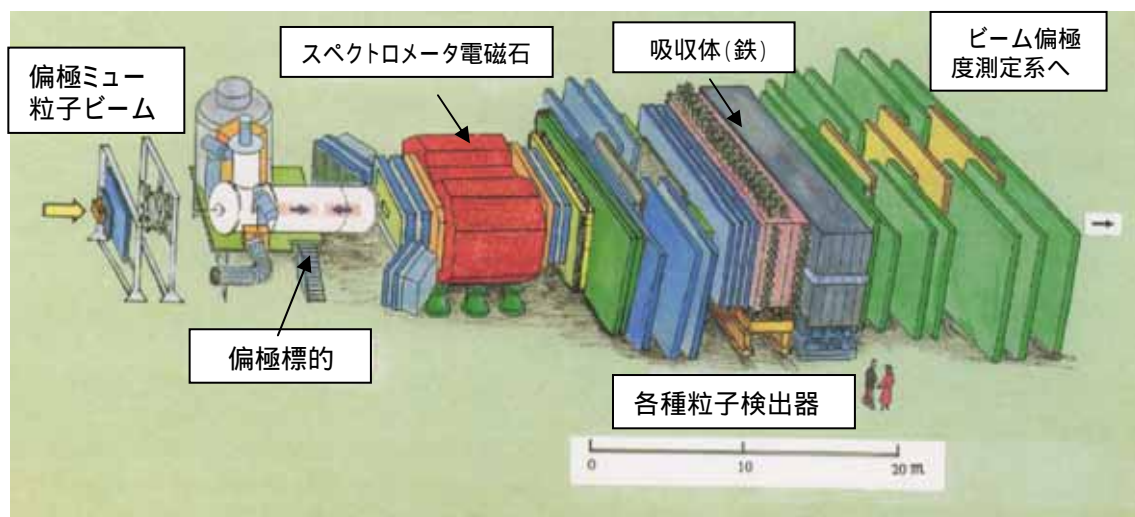
「最先端の装置をつかった実験」

下図に具体的な測定装置の配置図を、また写真を右に示します。4、500億電子ボルトまで加速できる陽子シンクロトロンで作られるスピン偏極ミュー粒子ビームを、スピン偏極した陽子や重陽子標的に当てます。入射粒子や放出粒子の方向、飛跡を求めたり、粒子の種類やエネルギーを決めたり、ミュー粒子のスピンの向きを判定するためなどに、スペクトロメータ磁石を含む全長100メートルにおよぶ各種の粒子検出器や粒子吸収体を使っています。

SMC偏極標的の内部



SMC実験装置



「実験を成功に導いたスピン偏極標的装置」

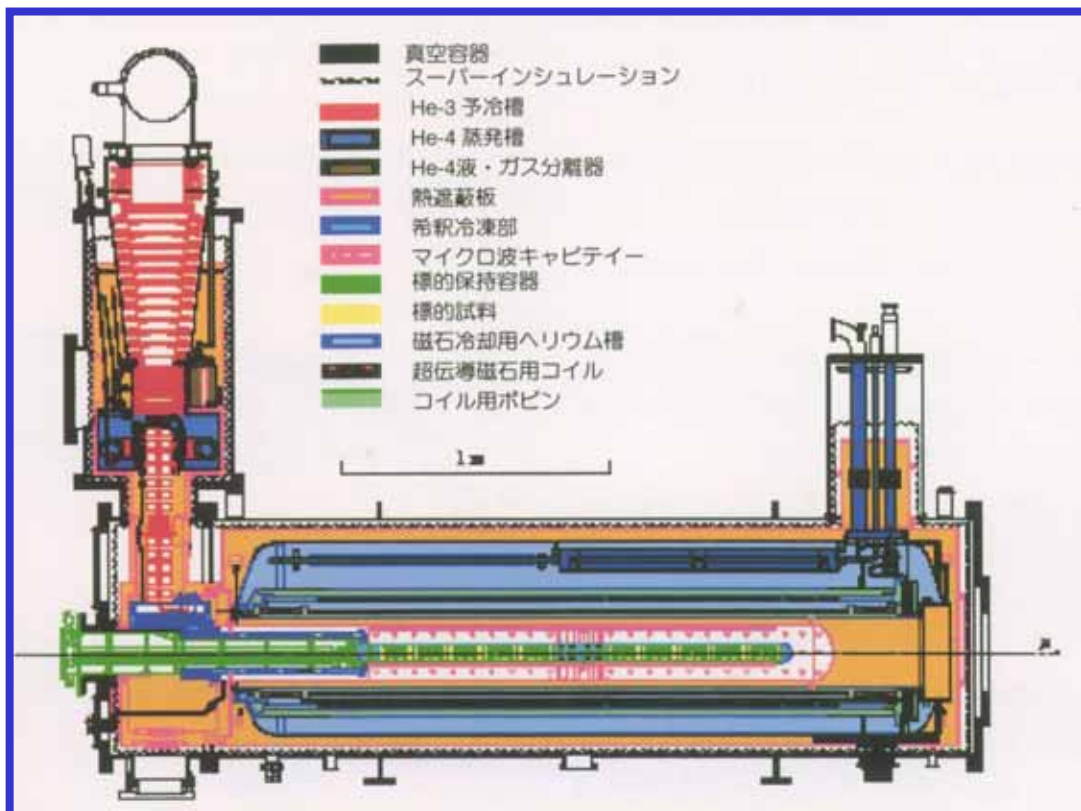
- 日本グループの役割 -

実験で使った偏極標的装置は下図のようなものです。この種の偏極標的としては、当時まさに世界最大のものです。陽子と同時に重陽子の偏極標的も使用しました。偏極重陽子標的は液体窒素中で仁丹状に固化させた全量リットルに及ぶ重陽子化ブタノール（ブタノール中の水素を重水素で置換）を、2.5テスラの超伝導電磁石の中で液体ヘリウム希釈冷却法で50ミリケルビン（ -273.1 ）という極低温まで冷やし、マイクロ波を加えてスピンの向きをそろえるものです。そのそろい具合は偏極度と呼ばれ、核磁気共鳴（NMR）法で正確に測定されます。

実験成功のカギは、できるだけスピンの向きを良くそろえること、そのそろい具合をできるだけ正確に測定することです。そのため、このような研究に実績と経験をもつ私たち日本グループがこの偏極標的の中心になって担当しました。

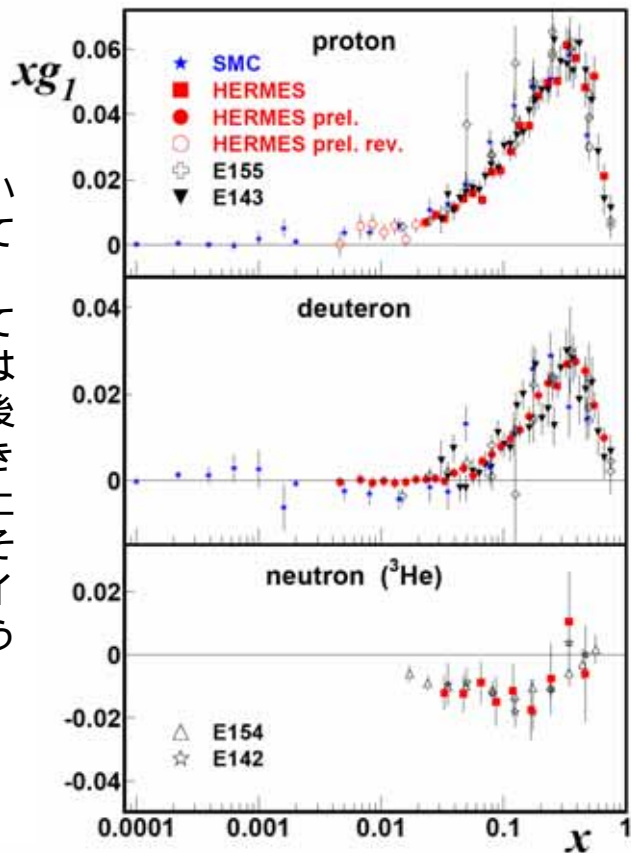
また、粒子検出系やデータ解析も分担し、最終的には他の研究所で測定されたデータも含めたグローバル解析も担当しました。

SMC偏極標的



「SMC実験で測ったもの」

SMC実験が測った偏極構造関数と呼ばれる量を下図に示します。横軸の x が小さいほど核子の中の極微の世界を探っていることを表わします。SMC実験がこれまでで最小の x まで探り、精度も上げていることがわかります。重陽子標的では世界で初めてのデータを発表し、その後測定を重ねて精度をどんどん上げてゆきました。また、重陽子標的の偏極度を上げる上で、画期的な発見をしました。それは、スピンをそろえるために使うマイクロ波の周波数に変調をかける、という方法です。これによって、重陽子は1.5 - 2倍、陽子は10%近く偏極度が増すことが判り、実験成功の決め手になりました。



「SMC実験でわかった極微の世界」

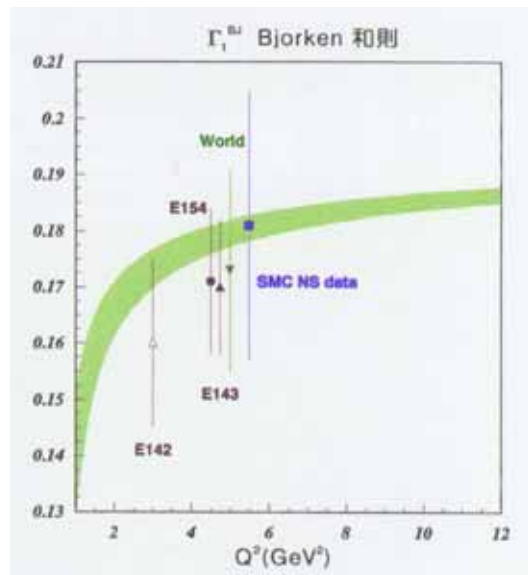
SMC実験で得られたデータを詳しく解析した結果、次のようなことがわかりました。

(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נק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。これはBjorken和則といわれる関係を、初めて実験で測定し、右図のようにQCDの予測(黄緑色の帯)と実験が良く合うことを確かめたことによる。



「クォークからグルーオンへ！」 (SMCからCOMPASSへ！)

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判明しました。「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。

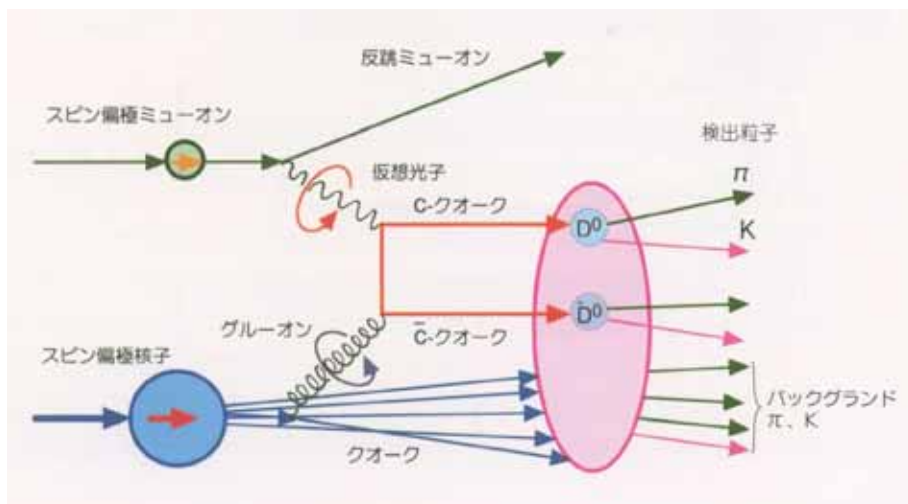
そこで、**核子スピンを担う次の候補**は何かが話題になります。クォークを結び付ける**グルーオン**もまた**スピン**を持っています。このグルーオンスピンの影響がどれだけ核子スピんに影響を及ぼしているかまったく判っていません、このグルーオン偏極の度合いを測るのがCOMPASS実験です。

「グルーオンスピンの役割の解明」

スピン偏極したミュオンは核子と衝突する時、円偏光した光子を出して相互作用をします。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。このグルーオンスピンは核子スピンの方向にそろっています。

スピンのそろった光子とグルーオンは下図の様に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ぶ）。発生するクォーク対の中では、重いチャームクォーク（cクォーク）に着目します。最後は、K中間子として検出されます。これにより、グルーオンが関与する反応を確実に捉えることができます。

グルーオンスピンの核子内でどれだけ揃っているかはミュオンと核子が平行な場合と反平行な場合の融合割合の差から引き出すことができます。

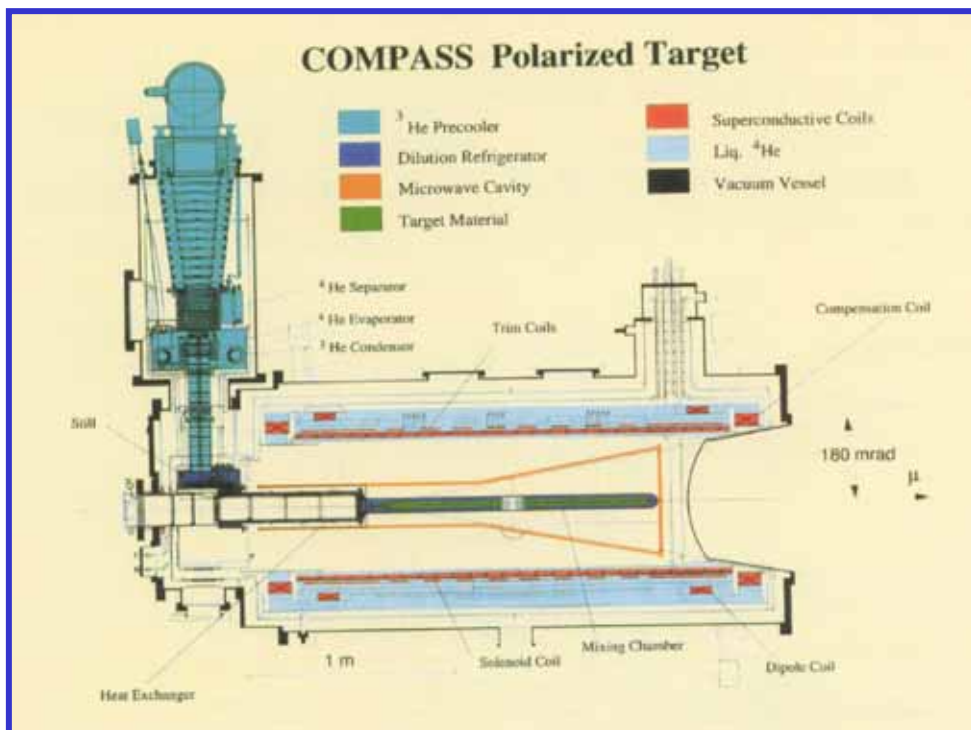


「大口径の偏極標的:再び日本グループの出番！」

1、900億電子ボルト (190 GeV) のミュオンビームで衝突させるとはいえ、チャームクォークの発生率はたいへん小さく、かつ、他のクォークがバックグラウンドとして混じってきます。「確かにチャームクォークを捕まえている」という反応はそれほど多くないため、できた反応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出来るだけ大きくとり、発生した反応はすべてデータとして取り込むことにします。

COMPASSでは開口径が60cmで、標的を置くビーム軸上の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磁石を作ることになりました。

この複雑で製作困難な磁石の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、といっても過言ではありません。

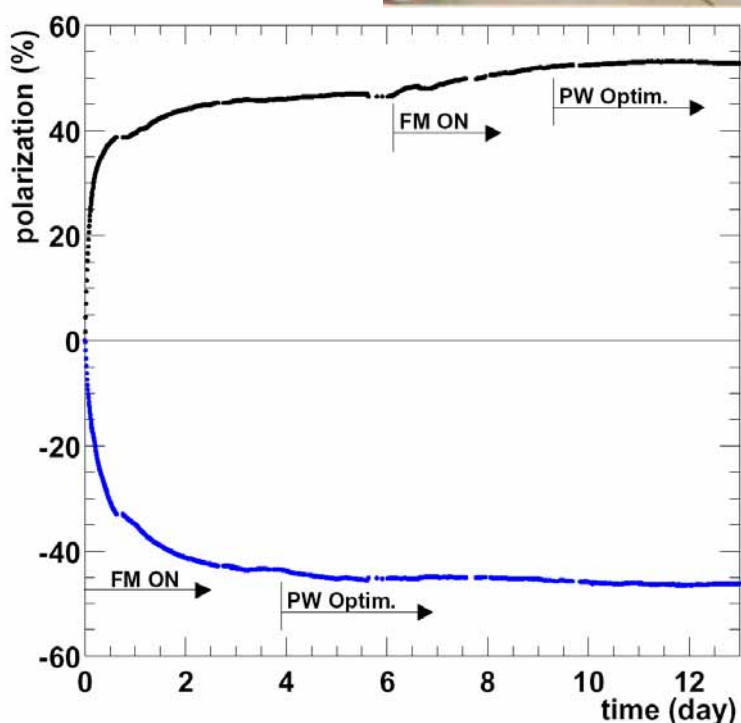


この磁石と、SMCで使った冷凍機を組み合わせ史上最大の偏極標的装置を作ります。これにより1リットルを超える標的試料を50ミリケルビンに冷やし、陽子を90%、重陽子を50%までスピンをそろえ、実験成功に寄与しよう、と計画しています。



希釈冷凍器

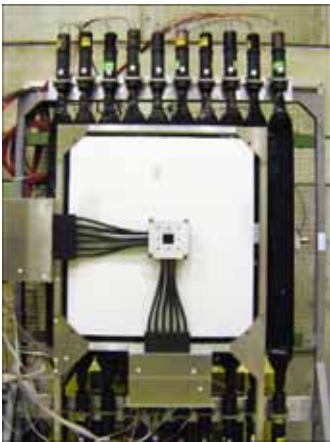
超伝導電磁石



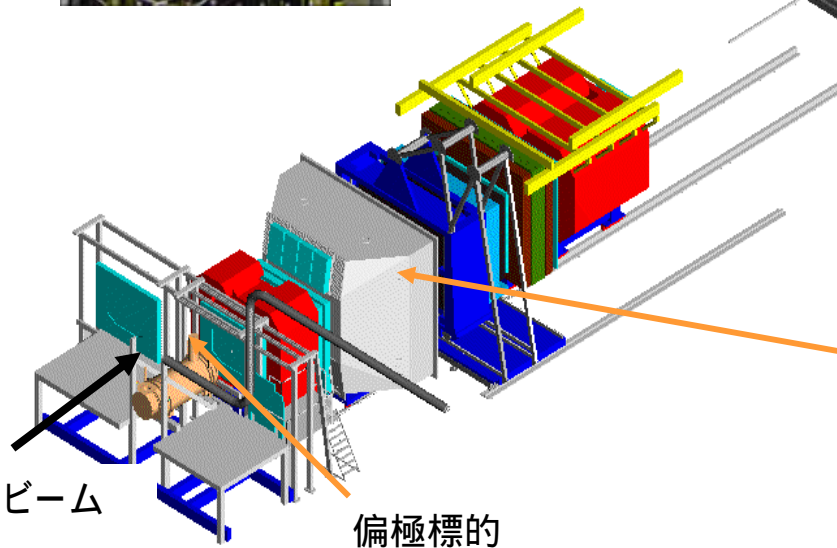
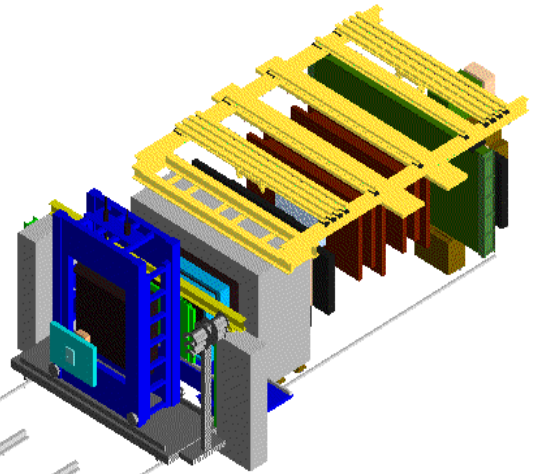
能動核偏極法によって重陽子化リチウム中の重陽子の偏極を増加させている様子。最高偏極度54%という世界最高記録が得られている。黒い線は上流側ターゲットセル、青い線は下流側のセルの偏極度を示す。

「反応事象発生の決定と粒子飛跡の検出」

反応の検出には、入射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、発生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。その様子は下図に描かれています。主に、この部分をドイツ、フランス、ロシアなどが分担しています。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。



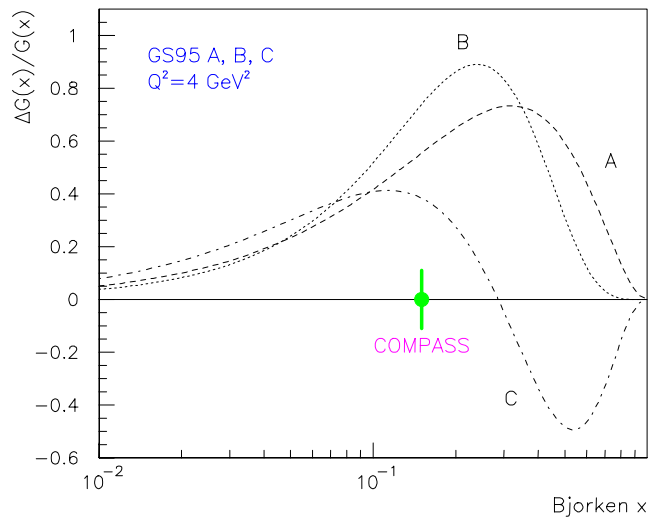
日本グループが開発したシンチレーション・ファイバートラッカー。浜松ホトニクス、クラレなど日本の会社の協力を得て、超高速の飛跡検出器になっている。



RICH

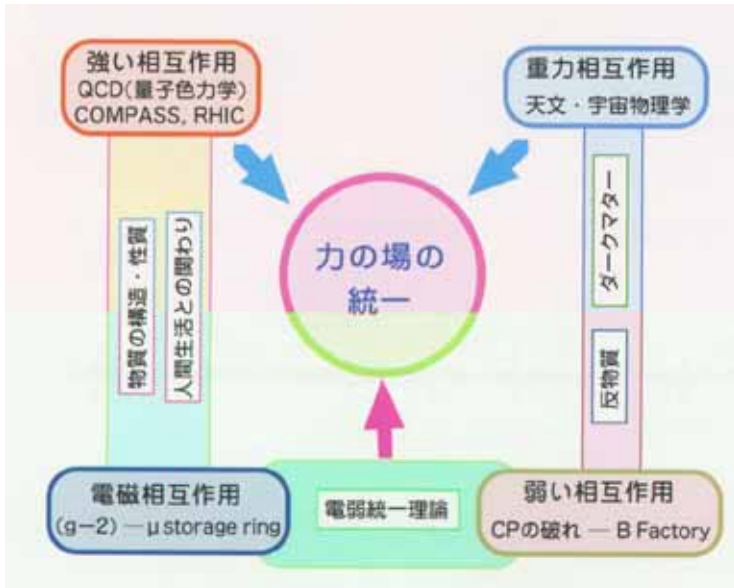
「予想される測定結果」

実験は重陽子標的 (^6LiD) と陽子標的 (アンモニア: NH_3) を用います。測定時間をそれぞれ、重陽子225日、陽子150日としたとき得られるグルーオン偏極度に対して予想される精度を右図に示しています。曲線は典型的な理論的予測を示しています。COMPASSの実験結果によって、どの理論が良いか、判断することが出来ます。



グルーオン偏極度に対する精度 (グルーオン偏極度0を仮定した場合)。横軸はグルーオンが核子内で担う運動量の割合を示す

「COMPASSへの期待」



今日、世界は4つの力 (重力、弱い力、電磁気の力、強い力) で成り立っているとされています。それぞれ性質の違う力の一つの基本原則から説明したいというのは、この分野の研究者の長年の夢です。古くはアインシュタインから湯川博士はじめ素粒子物理学者はこの夢を追って生きていくといってもよいでしょう。1960年代、ワインバーグとサラムによって、弱い力と電磁気の力の統一的な理解が成し遂げられました。

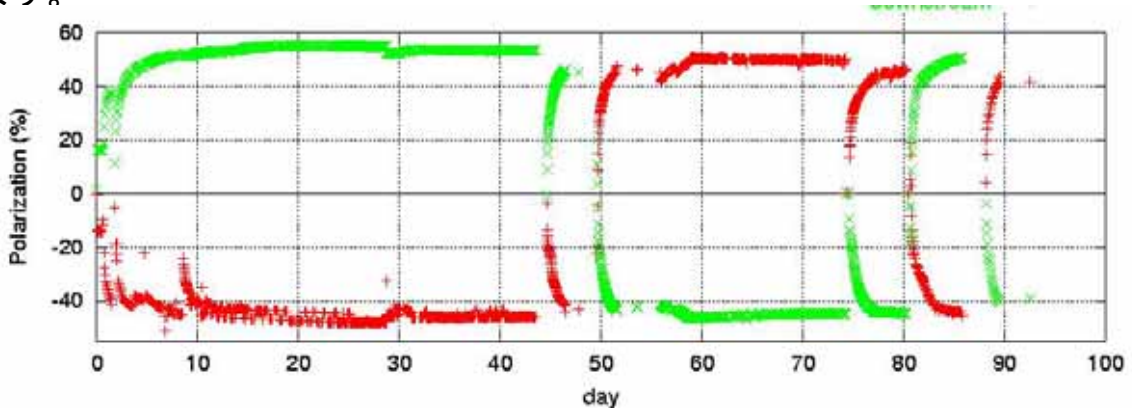
さらに、強い力がまとまって、より統一的な理解が進むか否かは「強い力の理解がどれだけ進むか」に依っているととも言えます。

核子のスピンの起源を探る研究は、「強い力」の性質を知る研究でもあります。研究を積み重ねることにより、自然の仕組みが徐々に明らかになって行くでしょう。

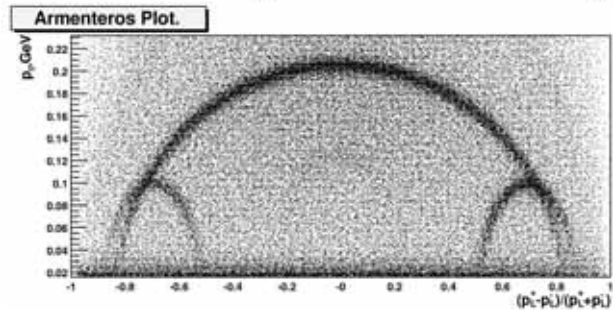
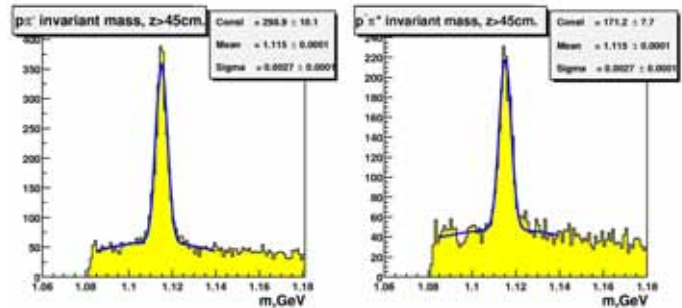
COMPASS日本グループは、世界各国の研究者と協力し、このような大きな目標に向かって頑張っています。

「実験の進行状況」

COMPASS実験は、2001年までに準備を完了し、2002年から本格的に始動しました。2002年には、約100日間のあいだに300テラバイト（CD-ROMで50万枚）のデータの採取に成功しました。下のチャートは2002年のランの様子を示したもので、測定期間中の偏極標的の偏極度を示しています。安定して高い偏極度が得られ、順調に実験が進行したことがわかります。



右図は、2002年のランで得られたデータの一部である。陽子とパイ中間子に崩壊するラムダ粒子を検出器が確実に捉えていることを示している。



「建設中の COMPASSスペクトロメータ」



1999年7月



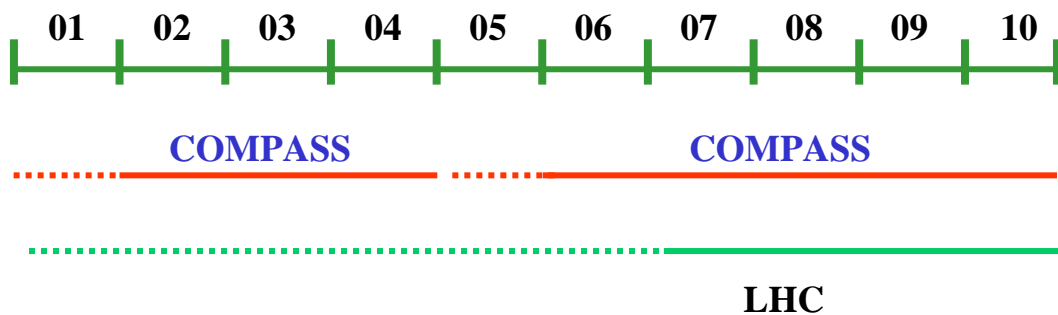
2000年7月



2000年7月

「COMPASS実験の今後の予定」

COMPASSは2001年までにほとんどの装置の準備を終了し、2002年から本格的なデータ収集に入り、2003、2004年とデータを順調に蓄積してきました。2005年には、CERNの加速器が休止するため、データ収集は中断しますが、翌年の2006年からデータ収集を再開し、2010年まで継続します。また、2007年には、CERNで建設中の世界最大の加速器LHCが完成し、実験が開始されます。

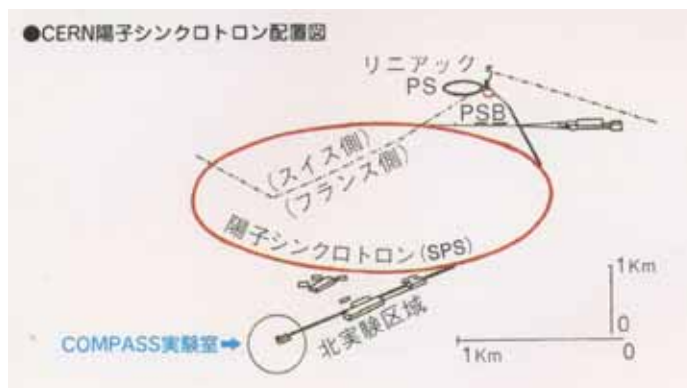


「CERN(ヨーロッパ原子核研究機構)とは」

大型加速器を使った原子核・素粒子の共同研究を推進するため、ヨーロッパの12カ国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10kmのところにあります。敷地はスイスとフランスの国境にまたがっており、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活躍している世界の中心的研究所です。

CERNは、単にヨーロッパの国々にかぎらず、アメリカや東欧、アジア、アフリカの国々の利用についても、自由に門戸を開いております。最近、日本も準加盟国待遇を受ける様になり、オブザーバーの資格で運営に協力しています。

CERN全景



「COMPASSに参加している日本グループメンバー」

岩田高広 山形大学理学部助教授
吉田浩司 山形大学理学部講師
田島靖久 山形大学学術情報基盤センター助手
松田達郎 宮崎大学工学部助教授
長谷川武夫 宮崎大学工学部教授
堀川直顕 中部大学工学部教授
石元茂 KEK素粒子原子核研究所助手

その他連携日本人研究者(CERN常駐)

堀川壮介 CERNアジアフェロー
堂下典弘 ドイツポッフム大学研究員
近藤薫 ドイツポッフム大学研究員