

大型偏極ターゲットを用いたハドロンの
クォーク・グルーオン構造の研究

(研究課題番号 18002006)

平成 18, 19, 20, 21 年度科学研究費補助金(特別推進研究)研究成果報告書

平成 22 年 3 月

研究代表者 岩田 高広

(山形大学理学部)

まえがき

私たちが補助を受けた科学研究費補助金・特別推進研究「大型偏極ターゲットを用いたハドロンのクォーク・グルーオン構造の研究」(平成18-21年度)が平成21年3月をもって終了した。この研究支援は、「ハドロンの構造や核子のスピン構造」を調べるCERNでの国際共同研究COMPASSに参加する日本グループを支援するためのものであった。この共同研究は、ヨーロッパを中心に11カ国、24の研究グループで構成されている。COMPASSは、1998年から実験準備を開始し、2002年にビームを用いた予備的な実験に入った。その後、実験装置の改良を続け、現在では本格的にデータ収集を継続し、世界的にも先端的な実験データを供給し続けている。本研究支援は、COMPASS実験がちょうど最盛期を迎えた時期に支給されたものであり、研究成果を生み出すために極めて有効に機能した。COMPASSは2010年、2011年にビームを用いたデータ収集を継続し、その後は新たな手法を用いた第二次計画を推進する予定である。

本研究は、古くから行われてきた物質の根源の探究の前線に位置する研究である。ある段階においてその根源だと考えられる原子は、電子と原子核が結合したものである。電子はスピンを持つが構造を持たない点状の基本粒子として、ディラック理論によって無理なく理解される。一方、原子核の構成要素である陽子や中性子などの核子は、基本粒子である3つのクォークが結合した複合粒子としてクォークモデルによって解釈され、そのスピンの発現機構も含めて説明できると考えられていた。しかし、クォークの相互作用を記述する量子色力学(QCD)を基礎にした時、その構造には多くの謎が残っている。クォークレベルにおいて核子のスピンのように発現するのか？何が核子のスピンを担っているのか？これらは未だに解決されていない謎である。

1980年代のCERNでのEMC実験、その後のSMC実験、SLACでの一連の実験的研究、および理論研究により「クォークモデルに反して、核子スピンに対するクォークスピンの寄与が極端に少ない」ことがはっきりした。この知見は、スピクライシスとして世に知られるようになり、それ以来スピン構造解明の努力が続けられてきた。

私たちは、CERNにおいて世界最大の偏極標的と高ミュオン偏極ミュオンビームを用いて実験を行い、核子スピンの謎の解明を進めてきた。特に、クォーク間の相互作用を媒介するグルーオンのスピン寄与に焦点を当て、グルーオンの偏極度の測定に努力を注いできた。これまでに、high-Ptハドロンチャンネルにおいては、世界最高精度のグルーオン偏極度データを得ることに成功した。また、オープンチャームチャンネルでは、精度は十分ではないが、世界初のユニークな結果を得ることができた。さらに、高エネルギー領域での圧倒的な統計量を誇るCOMPASSデータを含めたワールドデータに対してQCD解析を行うことで、クォークスピンの寄与を精度良く決定し、グルーオンスピン寄与も推定した。私たちの研究、および最近のRHIC-SPINの研究から、グルーオンスピン寄与は、実験前に予想されたような非常に大きくはなく、核子スピンのたかだか-30%から+30%程度であると結論される。しかしながら、核子スピンの描像を完全に決めるためには、測定精度が十分ではない。クォークスピン寄与に比べてグ

ルーオンスピンの寄与が小さいか、逆に大きく支配的であるのか、まだ結論づけられない状況である。今後、さらなる探求が求められる。

私たちは、クォークスピン状態の詳細を調べる研究も行ってきた。これは Transversity の研究である。従来の実験では、ビーム方向に偏極した核子中で、やはりビーム方向に偏極したクォークの確率分布（ヘリシティ分布）が主に調べられてきた。一方、Transversity は横偏極核子中での横偏極クォークの確率分布と解釈される。この量は、摂動論的 QCD の最低次近似（ツイスト 2）において非偏極クォーク分布、ヘリシティ分布と同じ重要性を持つ。私たちは横偏極陽子、重陽子からの中間子生成における方位角分布を調べ、Transversity を起源とする Collins 非対称度を実験的に明らかにした。陽子に対しては、すでに HERMES が結果を与えているが、重陽子に対しては、初めての結果だった。これらの Collins 非対称度と Belle 破砕関数のデータを総合解析することで Transversity が Anselmino らによって初めて推定されており、少なくともツイスト 2 レベルでクォークスピンの状態が完全に決定された。

一方、クォークモデルのスキームでは考えられていないクォークの軌道回転寄与も核子スピンを発現させるメカニズムとして注目されている。私たちは、横偏極核子標的からの中間子生成における Sivers 非対称度の予備的な測定を行い、クォークの軌道回転寄与の問題にアプローチしてきた。この非対称度は、核子スピンの方向とクォークの横方向運動量の相関を示し、軌道回転の有無の重要な指標となる。これまでに HERMES と COMPASS で調べられているが、測定精度の問題もあり、その有無についての共通理解は得られていない。今後は、精度向上によって軌道回転寄与の有無を判定してゆく。もし、核子を構成するクォークが軌道回転寄与を示すならば、従来の描像は根底から覆ることになり、パラダイムの変更を余儀なくされる。

COMPASS 実験は、偏極重陽子標的を用いて、2002年から2003、2004年にわたってデータを蓄積した。2005年には種々のアップグレードを行った。その後、2006年に偏極重陽子標的、2007年には偏極陽子標的を用いてデータ収集を行った。ここで、偏極標的を用いた実験はいったん終了し、2008年、2009年はハドロンプログラムのためのデータ収集や将来計画に関するテスト実験を行った。

この間、COMPASS 日本グループは、主に偏極標的の運転、基礎開発、偏極度データの解析や、ハドロンプログラムでの水素標的の運転などに取り組んだ。2007年から堂下典弘、近藤薫が山形大学の職員として CERN に常駐する体制を取ることができた。堂下は希釈冷凍器の整備やその運転、近藤は偏極度測定システムの構築と偏極度解析など、COMPASS 偏極標的グループの中で重要な貢献をした。また、堂下はハドロンプログラムにおいて水素標的の責任者としても活躍した。同年、山形県の高教諭の道上琢磨（山形大学理工学研究科修士課程修了）が CERN へ派遣されることになり、現地での研究体制が充実した。道上は、偏極標的の偏極度解析、水素標的の運転に関わった後、 ϕ 生成の 2 重スピン非対称度解析を行った。この CERN 常駐チームに加え、宮崎大学の松田、長谷川、中部大学の堀川、KEK の石元および山形大学の岩田が CERN に出張し、COMPASS 偏極標的のランコーディネータを務めた。

一方、山形大学では、偏極ターゲット実験室を整備し、偏極標的に関する基礎開発を行うとともに、バーチャル研究所「総合スピン科学研究所」を立ち上げ、学内での共同研究の活性化を進めた。また、2008年にはCERNとの間に研究協力協定を締結した。2009年には、核子スピン研究プロジェクトが山形大学の学内COE（YU-COE）として重点的に支援を受けることが決まり、3000万円の戦略的研究経費が支給された。同年、山形において「環太平洋高エネルギースピン物理学国際会議」を開催し、これまでのCOMPASSでの成果をまとめるとともに、核子スピン構造に関する将来計画について議論をする機会とした。

[特別推進研究]

研究組織

研究代表者 岩田 高広 (山形大学理学部・教授)

研究分担者

平成 18 年度 吉田 浩司 (山形大学学術情報基盤センター・准教授)
松田 達郎 (宮崎大学工学部・准教授)
堀川 直顕 (中部大学工学部・教授)
鈴木 肇 (中部大学工学部・准教授)

平成 19 年度 吉田 浩司 (山形大学学術情報基盤センター・准教授)
松田 達郎 (宮崎大学工学部・准教授)
鈴木 肇 (中部大学工学部・准教授)

平成 20 年度 吉田 浩司 (山形大学学術情報基盤センター・准教授)
松田 達郎 (宮崎大学工学部・准教授)

平成 21 年度 吉田 浩司 (山形大学学術情報基盤センター・准教授)
松田 達郎 (宮崎大学工学部・准教授)

研究協力者

堂下典弘 (山形大学理学部・助教)
近藤 薫 (山形大学理学部・助教)
石元 茂 (KEK 素粒子原子核研究所講師)
道上琢磨 (山形県高校教諭)
長谷川武男 (宮崎大学工学部名誉教授)

研究経費 (直接経費)

平成 18 年度 44,200,000 円

平成 19 年度 55,000,000 円 + 2,000,000 円 (追加配分)

平成 20 年度 21,900,000 円 + 3,500,000 円 (追加配分)

平成 21 年度 17,300,000 円

合計 143,900,000 円

目 次

[研究の概要]

1. COMPASS 実験の成果の概要
2. COMPASS 実験将来計画の準備
3. 偏極標的の開発
4. 謝辞

[研究のまとめ]

1. 核子のスピン構造研究の状況
2. COMPASS 実験の成果の詳細
 - 2-1. Inclusive-DIS スピン非対称度
 - 2-2. グルーオン偏極
 - 2-3. 横偏極効果
 - 2-4. 偏極パートン分布のフレーバー分離
 - 2-5. ϕ 中間子生成の非対称度
3. 日本グループ分担部分の状況と成果
 - 3-1. 偏極ターゲット
 - 3-2. 水素ターゲット
4. その他の活動
 - 4-1. 環太平洋高エネルギースピン物理学シンポジウム
 - 4-2. CERNとの研究協力協定
 - 4-3. 山形大学ヨーロッパサテライト

4-4. 総合スピ科学研究所

5. その他の関連研究経費

6. 国際会議等での発表

6.1 国際会議等

6.2 日本物理学会

7. 発表論文リスト

8. 論文集

9. 参考資料

[研究の概要]

1. COMPASS 実験の成果の概要

COMPASS は CERN の SPS (Super-Proton-Synchrotron) が供給するミュオンビームと世界最大の偏極標的を用いた散乱実験を主に行い、核子スピンに関わる謎の解明を進めてきた (ミュオンプログラム)。また、共通の検出装置を利用して、水素標的に陽子やパイ中間子ビームを入射して、グルーボールなどハドロンの特殊な存在形態を探るハドロンプログラムも実施している。本科研費は、ミュオンプログラムを支援するものであるため、本報告書では、ハドロンプログラムに関しては、限定的な記述にとどめ、ミュオンプログラムに焦点をあてる。

COMPASS は、旧来のレプトンビームによる深部非弾性散乱実験とは異なり、散乱ミュオンとハドロンを同時測定可能な検出器系を用いて、これまでスピン非対称度が得られていない過程に対する測定をその特長としている。その粒子検出システムは、2つの電磁石を用いた2段のスペクトロメータ構成で、前段で主に大きな角度に生成されたハドロンを、後段で散乱された高エネルギーのミュオンを捉える。粒子識別のための RICH 検出器、鉄とコンクリートからなるミュオンフィルターによるミュオン検出機能などを備えている。また、高い強度のビームを扱うために、ビーム領域の高速トラックとしてシンチレーション・ファイバー・トラック、Micromegas、GEMなどを組み込んでいる。また、電磁カロリメータとハドロンカロリメータが組み込まれている。特にハドロンカロリメータは、DIS イベントのトリガーとして用いられた。

2002年から偏極重陽子標的 (6LiD) を用いてデータ収集を開始し、2003、2004年と継続してデータを蓄積した。通常、80%のビームタイムを縦偏極標的、20%を横偏極標的でのデータ収集に割り当てている。200

5年には、データ収集を休み、RICH や偏極標的用電磁石など種々のアップグレードを行った。RICH の光検出器の一部は、MWPC からマルチアノード PMT に変更され、K 中間子の検出効率が 10 倍以上向上した。新たに導入された偏極標的用超伝導電磁石は、日本グループが主導的に建設に関わったもので、これまで使用してきた SMC 超伝導電磁石に比べ、口径が約 3 倍に拡大され、アクセプタンスは飛躍的に増加した。その後、2006年に偏極重陽子標的、2007年には偏極陽子標的 (NH3) を用いてデータ収集を行った。ここで、いったん偏極標的での実験は終了し、2008年、2009年は、ハドロンビームを用いたハ

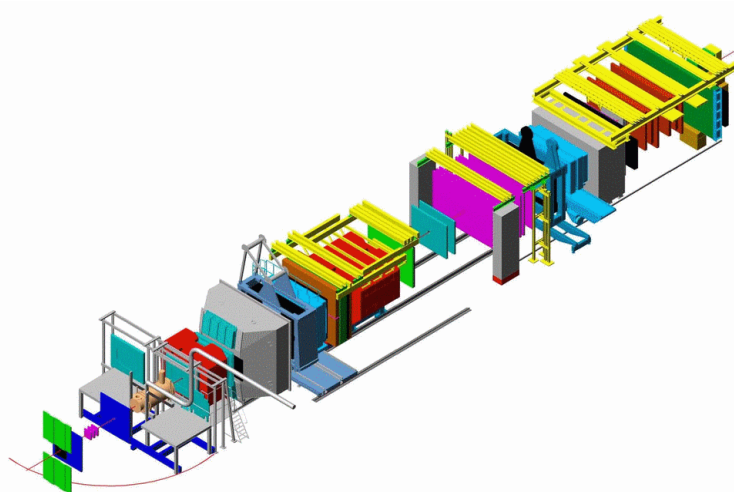


図 1-1 COMPASS ミュオンプログラムのセットアップ

ドロンプログラムのためのデータ収集や将来計画に関するテスト実験を行った。この間に、2007年以前に蓄積されたデータの解析が精力的に進められた。

COMPASS 実験の成果は、縦偏極標的を用いた測定で得られるクォークのヘリシティ分布やグルーオン偏極と、横偏極標的を用いた Siverts 非対称度や Transversity など横偏極効果に関するものに大別される。

はじめに、縦偏極標的での成果について記す。

1. クォークのヘリシティ構造

散乱ミューオンと仮想光子にたたかれて生成されたハドロンを同時計測する Semi-Inclusive-DIS (SIDIS) のスピン非対称度を調べることで、クォークのヘリシティ分布をフレーバー分離して調べることができる。COMPASS では重陽子、陽子に対して π^+, π^-, K^+, K^- 生成の SIDIS の非対称度、 A_1^h ($h = \pi^+, \pi^-, K^+, K^-$) を測定した。これらの非対称度は、リーディングオーダーでは、クォークのヘリシティ分布 $\Delta q(x, Q^2) = q^+(x, Q^2) - q^-(x, Q^2)$ 、破砕関数 $D_q^h(z, Q^2)$ を用いて表すことができる。ここで、 $q = u, d, \bar{u}, \bar{d}, s(\bar{s})$ を考える。他の実験から求められた破砕関数を用い、既知の非偏極クォーク分布関数を用いると、非対称度データからそれぞれのヘリシティ分布を得ることができる。この結果、シークォークのヘリシティ分布はほぼ0であることが示された。これは、 g_1 に対するグローバルフィットから求められた値とよく一致しているが、グローバルフィットが負の値を与える strange-sea 分布だけは、食い違いを示しており、今後の課題となる。

2. グルーオン偏極

COMPASS では、核子スピンを担う最有力候補としてグルーオンのスピン寄与に焦点を当て、グルーオンの偏極度の測定に努力を傾注してきた。グルーオン偏極度は、仮想光子とグルーオンが融合し、クォーク対を作るプロセス

(PGF=Photon-Gluon-Fusion) に対するスピン非対称度から決定される。PGF の素過程の Analyzing Power は、摂動論的 QCD (pQCD) により計算できるので、スピン非対称度を実験で求めることで、グルーオン偏極度を抽出することができる。COMPASS では PGF の同定に2つの方法を用いる。1つは、オープンチャームと呼ばれる方法で、 D^0 などのチャーム中間子を捕らえる。これは PGF によりチャームペアが生成され、チャーム中間子と反チャーム中間子にフラグメントする場合に相当する。摂動論的 QCD の計算で要求されるハードスケールはチャームクォークの質量によって保証される。オープンチャーム生成は、PGF が支配的だと知られているので、物理的なバックグラウンドの少ないクリーンなチャンネルである。しかし、チャームの生成確率は低いため、統計的には不利なチャンネルでもある。もう一つの方法は、high-Pt ハドロンと呼ばれるもので、大きな Pt を持つ異なる電荷のハドロンが逆方向に生成されたイベントを選択する。ハードスケールは、大きな Pt によって保証される。この場合、統計的には有利だが、Inclusive-DIS や QCD-COMPTON の物理的な背景事象が避けられないため、

それらの非対称度を考慮して解析を行わなければならない。

現在までに、2002年から2004年のデータに対しての high-Pt チャネルの解析と、2002年から2006年までのオープンチャームチャネルの解析が行われている。High-Pt チャネルでは、ハードスケール $\langle \mu^2 \rangle = 3\text{GeV}^2$ で、 $x_g = 0.1$ 付近において、 $Q^2 > 1\text{GeV}$ のデータではグルーオン偏極度は $\Delta G/G = 0.08 \pm 0.10 \pm 0.05$ 、 $Q^2 < 1\text{GeV}$ に対して $\Delta G/G = 0.016 \pm 0.058 \pm 0.055$ という結果が得られている。どちらも誤差を考慮すると、0と矛盾しない値である。少なくとも $x_g = 0.1$ においてグルーオン偏極度は非常に小さいという結論になる。

また、オープンチャームチャネルでは、D0 および D* イベントの解析によって、 $x_g = 0.1$ 付近で、 $\Delta G/G = -0.39 \pm 0.24(\text{stat.})$ という結果が得られている。このときのハードスケールは、 $\langle \mu^2 \rangle = 13\text{GeV}^2$ という大きな値である。オープンチャームの場合は精度が良いとは言えないが、こちらのグルーオン偏極度も誤差の範囲で0と矛盾しない。

さらに私たちは、グルーオンスピン寄与を推定するために、DIS データに対して QCD 解析を試みた。COMPASS では、グルーオン偏極度測定の精度を上げるため、長期間のデータ収集を続けてきた。結果として、 x の小さな領域の DIS のデータは、SMC 実験の実に5倍以上の統計量で蓄積された。そして、このデータを含めたワールドデータに対して QCD の DGLAP 方程式を利用したグローバル解析を行ったところ、グルーオンヘリシティ分布は2つの可能性に絞られた。この分布を x_g の全領域で積分したグルーオンスピン寄与の 1st-moment は、アノマリーの議論から予想されたほど大きい値ではなく、 $\Delta G = \int_0^1 dx \Delta G(x) = -0.3 \sim +0.3$ と、かなり小さいと推定される。これは、RHIC-SPIN のデータとも矛盾しない。

ここで、核子スピンに関するヘリシティ和則、 $\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G + \langle L_z \rangle$ を思い出すと、 $1 = \Delta \Sigma + 2\Delta G + 2\langle L_z \rangle$ となり、クォークスピン寄与については $\Delta \Sigma \approx 0.3$ と確定しているので、 $0.35 \approx \Delta G + \langle L_z \rangle$ となる。仮に、 $\Delta G = +0.3$ だとすると、 $\langle L_z \rangle = 0.05$ であり、 $\Delta G = -0.3$ ならば、 $\langle L_z \rangle = 0.75$ となる。前者の場合はクォークスピン以外の寄与のほとんどがグルーオンスピンからであり、核子スピンに対するグルーオンスピン寄与は、圧倒的になる。ところが、後者の場合グルーオンスピンよりも軌道回転寄与が逆方向に大きく、結果として核子スピンに対しては軌道回転寄与が支配的となる。結局、グルーオンスピン寄与に対する包囲網は、かなり狭められてきたが、核子のスピン構造に関しておおざっぱなイメージを与えるまでには至っていない。今後、さらなく精度向上の努力が必要である。

2. 偏極構造関数 g_1 と Bjorken 和則の検証

COMPASS はグルーオン偏極度測定のために十分な統計量の SIDIS データの収集を目的として計画されたものだが、結果的に Inclusive-DIS の極めて高統計のデータが収集された。その統計量は SMC 実験を大幅に上回り、陽子標的 (20

07年) に対して92.5M イベント、重陽子標的(2002, 2003, 2004, 2006年) に対して合計で135.1M イベントであった。これは $Q^2 > 1\text{GeV}^2$ 、 $0.004 < x < 0.7$ の領域での統計量である。これらを用いて、陽子と中性子にそれぞれに関する対する偏極構造関数 g_1^p と g_1^n が x と Q^2 の関数として求められた。これに対して QCD の NLO 解析を行うことで、 $g_1^{NS}(x, Q^2) = g_1^p(x, Q^2) - g_1^n(x, Q^2)$ が得られた。ここで、 g_1^{NS} の第 1st-moment $\Gamma_1^{NS}(Q^2) = \int_0^1 g_1^{NS}(x, Q^2) dx$ は Bjorken の和則によって $\Gamma_1^{NS}(Q^2) = \frac{1}{6} \frac{g_A}{g_V} C_1^{NS}(Q^2)$ と与えられる。 $C_1^{NS}(Q^2)$ は pQCD によって厳密に与えられ、 $(\alpha_s/\pi)^2$ の項まで考慮すると、その値は $Q^2 = 3\text{GeV}^2$ において 0.89007 となる。これから、我々の測定値 Γ_1^{NS} を用いて $g_A/g_V = 1.29 \pm 0.05(\text{stat.})$ が得られる。これは、中性子のベータ崩壊から得られた値である $g_A/g_V = 1.2601 \pm 0.0025$ [PRD54,1996] とよく一致しており、Bjorken の和則が 4% の精度で検証されたことになる。

3. ϕ 中間子生成の非対称度

我々 COMPASS 日本グループは、偏極標的などのハードウェアだけでなく、物理データの解析にも貢献した。中でも仮想光子と偏極核子の散乱での ϕ 中間子生成 ($\mu^{\uparrow} + N^{\uparrow} \rightarrow \mu' + \phi + N$) の縦方向 2 重スピン非対称度の測定において、中心的な役割を果たしている。この物理量は、核子中の $\bar{s}s$ 成分の量に敏感であると考えられる。しかしながら、このプロセスの反応断面積は非常に小さく、十分な統計を得るのが困難であった。これまで HERMES などが測定を試みているが、統計が十分でなく、広い運動学的変数領域に渡ってのデータは存在しない。我々は、2002、2003、2004 及び、2006 年の偏極重陽子に対するデータと 2007 年の偏極陽子に対するデータを用いてこのチャンネルの物理解析を行い、広い運動学的領域での有意な統計精度を持つ初めての結果を得た。現在のところ、COMPASS のエネルギー領域において非対称度との $\bar{s}s$ 成分の量を結びつける具体的な理論が存在せず、実験結果から $\bar{s}s$ 成分の量を抽出することはできないが、我々の系統的なデータは、具体的なモデル計算を促す一助となると期待している。

次に、横偏極標的を用いて得られた成果について記す。

1. Siverson 非対称度

クォークの軌道回転も核子スピンを発現させるメカニズムの 1 つとして重要視されてきている。COMPASS では横偏極した核子標的からの中間子生成における Siverson 非対称度からクォークの軌道回転寄与にアプローチしてきた。この非対称度は、核子スピンの方向とクォークの横方向運動量の相関を示し、軌道回転の有無の指標となる。いわゆる、横方向依存分布関数 (TMD-PDF=Transverse

Momentum Dependent Parton Distribution Function) の一つである。COMPASS では、Sivers 非対称度測定を重陽子標的、陽子標的に対して行ってきた。

重陽子に対する Sivers 非対称度は、測定誤差を考慮すると 0 となるが、これは u-quark と d-quark の Sivers 非対称度が逆符号で相殺している解釈も成り立つ。一方、HERMES 実験において陽子に対して 0 でない Sivers 対称度が観測されているが、COMPASS の測定では、陽子に対しても 0 と矛盾しない結果となった。ただし、HERMES と COMPASS のカバーする運動学的領域は大きく違うこと、COMPASS の統計精度が十分でないことに注意する必要がある。結局、Sivers 非対称度の有無についてコンセンサスが確定できていないのが、現状である。

2. Transversity

COMPASS ではクォークの Transversity の研究も精力的に行ってきた。従来の実験は、ビーム方向に偏極した核子中で、やはりビーム方向に偏極したクォークの確率分布を調べるものであり、ヘリシティ分布の測定が主であった。

Transversity は、ビームに対して垂直方向に偏極（横偏極）した核子中での横偏極したクォークの確率分布と解釈される。この量は、COMPASS 実験や HERMES 実験において初めて研究されるようになった。Transversity は、摂動論的 QCD の最低次近似（ツイスト 2）においてクォークを記述する際、非偏極クォーク分布、ヘリシティ分布と同様に重要な量である。COMPASS では横偏極標的からの中間子生成における方位角分布を調べ、Transversity に関連する Collins 非対称度を求める。Collins 非対称度は、Transversity と Collins 破砕関数の積として与えられるが、未知であったため、Transversity を抽出することができなかった。ところが、Belle 実験において Collins 破砕関数が調べられたことで、Transversity 抽出が可能となった。実際に、HERMES の陽子に対する Collins 非対称度、COMPASS の重陽子に対する Collins 非対称度を総合的解析が Anselmino らによって行われ、u-quark, d-quark それぞれに対する Transversity が初めて明らかになった。

2. COMPASS の将来計画の準備

これまでの研究から、核子スピンを説明するのに、クォーク、グルーオンのスピンだけでは不十分である可能性が明らかになりつつある。つまり、クォークの軌道回転をも含めた描象が必要となる。このような観点から研究を進めるには、クォークが担う軌道角運動量に関して動的、空間的に解明することが求められる。このために、COMPASS では、偏極ドレル・ヤンプログラムと GPD プログラムの 2 つを 2011 年以降に行うことを計画しており、それらの準備を行ってきた。

偏極ドレル・ヤンプログラムでは、図の 2-1 に示すようなドレル・ヤン (DY) 過程を通してクォークの軌道運動に関わる横運動量依存 (TMD) パートン分布関数や

Transversity にアプローチする。TMD 分布関数には、シバース分布関数、ボーア・

ムルダー分布関数などが知られている。我々は、中間

子などのハドロン生成を伴う DIS 過程 (SI-DIS) での

横方向スピン非対称度から、シバース分布関数による

効果を調べてきた。しかしながら、実験から得られる

スピン非対称度は、TMD パートン分布関数とハドロン

破碎関数を掛け合わせたものとして現れてくる。ここ

で、ハドロン破碎関数は、直接測定ができないため、

他の実験からのデータを利用するしかないため、得ら

れる分布関数の精度に限界がある。一方、ハドロン化

が関与しない DY 反応では、より直接的に TMD 分布関数にアプローチできる。COMPASS

では、パイ中間子を偏極核子に入射し、DY 反応

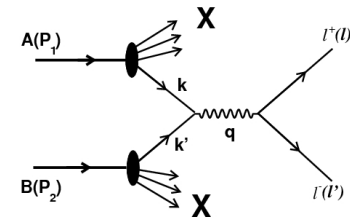
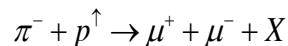


図 2-1

DY 反応のダイアグラム

では、パイ中間子を偏極核子に入射し、DY 反応



のスピン依存性 (核子スピンに対するレプトン対の方位角分布) を調べ、シバース分布

関数 $f_{1T,DY}^\perp$ を抽出する。これは、偏極 DY 反応の研究として、世界初めての試みとなる。場

の理論でのシバース分布関数は、ゲージリンクオペレータを含む非局所的な相関を含んでおり、カラーゲージ不変性を要求すると、シバース分布関数には反応依存性が現れる。

Collins[PLB, 532(2002)43]による普遍的な議論から、SIDIS 反応と DY 反応のシバース関

数は逆符号になり、 $f_{1T,SIDIS}^\perp = -f_{1T,DY}^\perp$ という興味深い予言が示されている。COMPASS では、DY

過程での偏極陽子、偏極重陽子に対してシバース非対称度観測を行い、この予言の正否を

確認する。また、同じ測定データから核子の Transversity と π 中間子に対するボーア・ムールダー分布関数の情報も同時に得られる。

偏極 DY プログラムでは、これまでの COMPASS のスピンプログラムに利用してきたミュオン粒子ではなく π 中間子ビームを使用する。このため、反応数の増加と 2 次粒子の大量生成が、偏極標的の温度を上昇させ偏極度の低下を招く恐れがある。我々は、シミュレーションによりビーム強度と標的温度の関数を求めた上で、実際に 2007 年に偏極標的に π 中間子ビームを照射し、温度上昇を観測した。これによって、本実験において偏極標的の性能を十分に発揮できることが確認された。

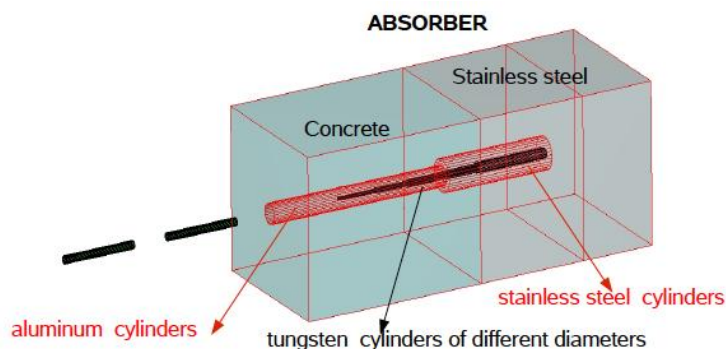


図 2-2 : プロトタイプのアブソーバー

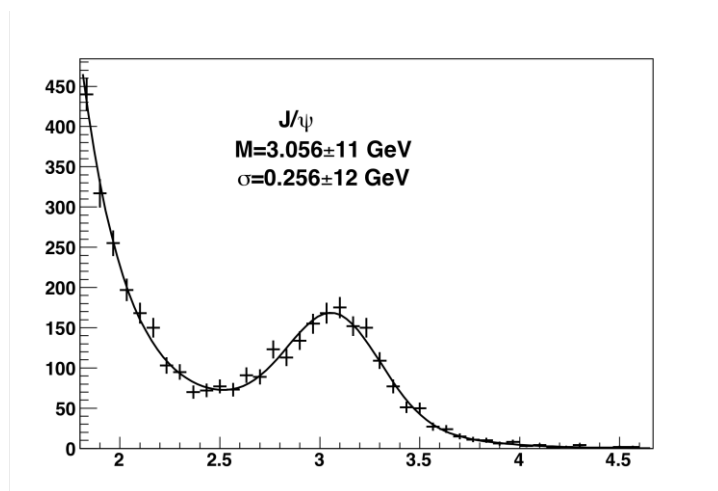


図 2-3 : 生成ミュオン対不変質量分布。横軸は質量[GeV²], 縦軸はイベント数。1 日分のデータ

集により 250k 個期待されている。

GPD プログラムでは、一般化されたパートン分布 (GPDs) を探求する。GPD は、比較的新しい概念だが、核子の形状因子やパートン分布関数に関係づけることができ、パートンの x と横方向の位置の相関を与えるような重要な物理量だと認識されている。これは、核子に対するトモグラフィーの手段として核子構造の新たな探求手段として注目されている。そして、GPDs は、深部仮想コンプトン散乱 (DVCS) : $\mu p \rightarrow \mu' p \gamma$ の断面積と関係づけられる

さらに 2009 年にはポリエチレンを用いたダミーターゲットと、長さ約 2m のハドロンアブソーバーを用いて本実験で予定している強度とほぼ同じ 1.5×10^7 pions/s のスペクトロメーターの検出能力検証などの目的で 5 日間のデータ収集を行った。このアブソーバーは、生成されるミュオン粒子だけを通過させビームを含めバックグラウンドとなるハドロン粒子を吸収させるためビーム軸にアルミニウムとタンゲステン、その周りをコンクリートとステンレススチールを用いたものである。そして、データを解析した結果、ミュオン対の不変質量分布に明瞭な J/ψ 信号が観測された (図 2-3)。 J/ψ は DY 過程に対するバックグラウンドであるが、この信号を用いてスペクトロメーターやトリガーの性能評価を行っている。DY イベントは、 4GeV^2 以上の質量領域で 2 年間のデータ収

ので、実験的にアプローチが可能である。しかしながら、DVCS の断面積はかなり小さい。そのため、できるだけ長い水素標的をもちいてルミノシティの向上を図る。COMPASS で 2.5m の液体水素標的を製作することになっている。また、反跳ミュー粒子、陽子、そして放出される光子をすべて捉える必要がある。反跳陽子のは、運動量が 280MeV/c 程度と低いが、それでも検出可能な陽子検出器として標的の周りに 2 層のシンチレーターを設置し、飛行時間測定により運動量を決定する。DVCS で生成される光子や反跳陽子を損なわないため液体水素標的の真空ジャケットに 1mm 厚のカーボンファイバー強化プラスチックを用いる。現在、プロトタイプを製作し、真空強度テストを 2010 年の夏までに行い、2010 年冬に CERN に持ち込んで最終テストを行う予定である。また、液体水素の密度は、温度に依存するため 2.5m にわたって温度の均一性が重要になる。そのため、冷却能力の高い新たな冷凍機を製作するべく CERN、フランスの Saclay と協議している。また、2009 年には GPD プログラムのテスト実験を、偏極ミュー粒子ビームと 40cm 長の液体水素標的とそれらを囲う反跳陽子検出器を用いて、バックグラウンドのベーテ・ハイトラ（BH）過程の散乱断面積の測定や、検出器の効率などを調べるために 2 週間行った。

2009 年に LoI を提出し、CERN 当局にはこれら二つのプログラムに興味を示していただいた。それを受け、正式なプロポーザルを 2010 年 6 月に提出すべく準備を進めている。

3. 偏極標的の開発

主静磁場によってゼーマン分裂した原子核スピンのエネルギー準位において、スピン数の占有分布が、熱平衡時における分布に比べて極端に偏っていることを、「偏極している」という。COMPASS 実験では、スピン偏極した原子核標的を実現するために、動的核偏極法 (DNP : Dynamic Nuclear Polarization) を用いている。動的核偏極法は、1958 年に Abragam によって提案され、1960 年に Borghini によって実現された。以後、固体偏極標的製造技術として原子核・高エネルギー物理学実験にしばしば用いられている。この方法は、標的体積にわたって均一度の高い (200ppm) 高磁場と 50 mK 程度の低温を必要とする難しさがあるものの、現在のところ、大型で偏極度が高く均一な固体偏極標的を実現する唯一の手段である。

スピン 1/2 を持つ原子核における動的核偏極の原理を、図 3-1 によって示す。COMPASS 偏極標的での条件、50 mK の低温、2.5 T の静磁場下で、電子スピンはボルツマン分布にしたがってほぼ 100% の偏極度が得られるが、磁気モーメントの大きさの違いにより、陽子では同条件で 5%、重陽子では 1% しか偏極しない。ここで、 $|b\rangle|c\rangle$ 状態間のエネルギーギャップ W_- に相当する周波数のマイクロ波を照射することにより、遷移 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ を起こし、 $|c\rangle \rightarrow |a\rangle$ への速い緩和によりスピン正偏極を実現する。このように電子と核スピンの相互作用を通して、原子核のスピンの向きを揃える。また同様にして、 $|a\rangle|d\rangle$ 状態間のエネルギーギャップ W_+ に相当する周波数のマイクロ波を照射することにより、逆向きのスピン負偏極を得ることもできる。照射するマイクロ波の周波数を W_- , W_+ のうちから

選ぶことにより、選択的にスピンの方向を揃えることができる。

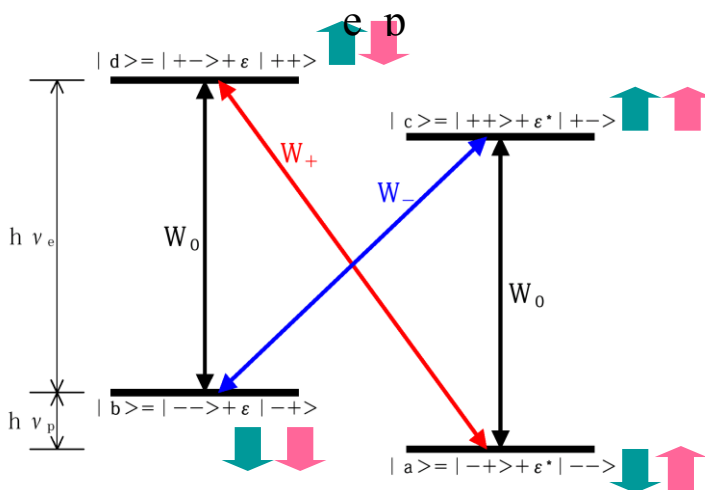


図 3-1

DNP に必要な条件は、低温、高磁場、マイクロ波、物質中の不対電子が適切な濃度で存在すること、適切な緩和時間を持ち偏極の保持が可能であること、などである。ある物質が偏極する

かどうかは、電子スピン共鳴スペクトルによる標的物質のスピン環境の分析が研究されており、偏極可能な新物質の探索に役立っている。

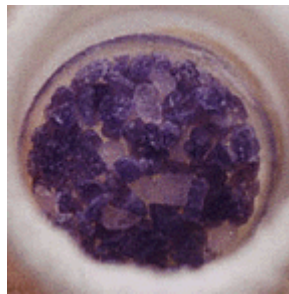
COMPASS 実験では、相互作用の小さいミュオンビームとの反応を効率よく調べる必要があり、標的セルの総長 120 cm、総容積約 1000 cm³ の、世界で最も大型の固体偏極標的を用いて、約半年間続く実験期間中、核子標的スピンを均一かつ高い偏極度で保持しなければならない。COMPASS 偏極標的では、50 mK 程度の低温、2.5 T の静磁場、その磁場での電子スピン反転におよそ相当するエネルギーのマイクロ波 (70 GHz) を用いて、動的核偏極法により、陽子、あるいは重陽子のスピン偏極を励起し、核子スピン偏極を実現する。そのため、細長い標的セルを取り囲むようにして、希釈冷凍機、マイクロ波キャビティ、超伝導電磁石が複雑に組み合わさった構造となる。

実験は、ミュオンビームのスピンと核子標的のスピンが平行および反平行のときの反応断面積の非対称度を測定するのであるが、各々反対方向に偏極させた標的セルをビーム軸方向に直列に配置することにより、スピン平行、反平行の両条件での測定が同時にでき、測定器側の検出効率の時間変動によって生じる偽非対称度を抑えることができる。この際、ビーム上流側の標的セルの方が下流側のセルに比べて検出可能な粒子射出角度 (アクセプタンス) が小さいので、このために生ずる偽非対称度を相殺するべく、一定時間間隔で各セルの標的核子スピン偏極方向を同時に反転する機構が必要となる。ビーム軸方向の磁場をつくる電磁石と鉛直方向磁場をつくる電磁石を同時に用いて、合成磁場の方向を回転し逆向きにすることにより、磁場消失による偏極度の損失を回避し、すべての偏極核子のスピン方向を一度に反転することができる (磁場によるスピン反転とよぶ)。COMPASS 実験では、2.5 T のソレノイド型超伝導マグネットと、0.6 T のダイポール型超伝導マグネットの組み合わせによって、この性能を実現している。

動的偏極法による偏極励起時には、ビーム軸方向の 2.5 T の磁場を用いるが、緩和時間が十分に長い偏極標的物質であれば、最高偏極度到達後、マイクロ波照射を止め、磁場を下げ (~0.6 T) ても、偏極状態を凍結できる。これをフローズンスピンモードと呼んでいる。そのため、ビーム軸方向にスピン偏極した核子だけでなく、0.6 T の鉛直方向磁場を使って、凍結したスピンを回転させ、ビームと直交する方向の偏極状態を保持した transverse-核子標的を用いる実験も可能となる。

標的の偏極度は、陽子標的で 85 % 程度、重陽子標的で 40 % 程度は最低限必要であり、少なくとも数日のうちには実験可能となるよう、できるだけすばや

く偏極度を上げられること、鉛直方向磁場(0.6 T)を用いて偏極を一週間程度保持できること、などが要求される。このため、偏極標的物質は慎重に選定され、最適な調製がなされなければならない。



偏極標的物質

左：重陽子標的物質、
電子照射した ${}^6\text{LiD}$

右：陽子標的物質、
電子照射した NH_3

COMPASS 実験では、2001年のコミッション・ランのために重陽子化リチウム(${}^6\text{LiD}$)による重陽子標的を建設して以来、2002年から2004年までの間、ミュオンプログラムでその重陽子標的装置を使い続けた後、2006年に大掛かりな偏極標的のアップグレードを行った。また、2007年には、標的をアンモニアに替えて、陽子標的を用いた実験を行った。2006年および2007年の活動については、[実験のまとめ]3-1節に詳しく述べる。

4 謝辞

この特別推進研究は、2006年度から2009年度までの4年間にわたって実施され、多くの貴重な研究成果を得て無事終了することができました。この間、多くの方々にご支援・ご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

山形大学関係では、仙道富士郎前学長、鬼武一夫前理事、本木正光前監事、山崎淳一郎前研究プロジェクト戦略室教授氏、高橋政雄元総務部課長氏、および、現在の山形大学の首脳部である、結城章夫学長、河田純夫理事、小山清人理事、元理学部事務長三浦正昭氏（現小白川事務部長）、前理学部事務ユニット長斎藤洋男氏（現小白川事務部総括・人事ユニット長）、石井滋理学部事務ユニット長、加藤静吾前理学部長、櫻井敬久現理学部長の各位にたいへんにお世話になりました。仙道富士郎前学長、三浦正昭氏には、プロジェクトの立ち上げ時期に「戦略的研究プロジェクト任期付き教員支援」のご配慮をいただき、山形大学の CERN 常駐チームの基礎を作ることができました。鬼武一夫前理事には、偏極ターゲット実験室の建設時に大変お世話になりました。本木正光元監事、高橋政雄元総務部課長には、山形県高校教諭の道上琢磨氏を3年間にわたって CERN に派遣する際に大変お世話になりました。小山清人理事には研究協定締結のために CERN までご同行いただいた他、研究上の様々なアドバイスやご配慮をいただきました。結城章夫学長、河田純夫理事には「戦略的研究経費」のご配慮をいただき、多くのご支援をいただきました。

地域教育文化学部技術専門職員高橋貞幸氏には、偏極標的建設に関連する技術的なアドバイスおよび実際に部品の製作をしていただきました。

山形大学理学部および物理教室のスタッフの皆様には、絶えまないご支援をいただき、深く感謝しております。特に、膨大な事務を処理していただいた大学本部会計環境ユニットの皆様、理学部事務ユニットの皆様には、ここに厚く御礼申し上げます。

宮寫和男日本学術振興会審議役には、研究推進において困難な問題が生ずる度に相談にのっていただき、その都度適切な助言をいただきました。有り難うございました。

中部大学吉厚夫総長には、研究推進全般にわたってご理解とご支援をいただきました。

有馬朗人日本科学技術振興財団会長（山形大学経営協議会委員）には、研究推進のための支援と核子スピンの問題に関して核物理の専門家としての貴重で興味深い専門的なアドバイスをいただきましたことに感謝しております。

山形大学理学部の蜂谷緑事務補佐員には、3年半にわたり私たちの研究のサポートをしていただき、大変感謝しています。

本研究は、国際共同研究として取り組んでいる課題であり、主にはスイス・ジュネーブにある CERN での粒子衝突実験を実行するものです。この実験で日本グループが担当するスピン偏極標的は、ドイツ・ボッフム大学との共同研究が重要な役割を

果たしています。ここで、この間 COMPASS 共同研究グループのスポークスパーソンとして私たちの研究推進にも多大な貢献をされた Gerhard Mallot (CERN)、Alain Magnon (Saclay) 両博士、および、ドイツ・ボッフム大学の Werner Meyer 教授に心からの感謝を捧げたいと思います。

最後に、本研究課題を採択していただき、ご助言と励ましを賜りました審査員の皆様、研究の実施に当たってご助力いただいた文部科学省研究振興局学術助成課および日本学術振興会研究事業部の皆様に厚くお礼申し上げます。

[研究のまとめ]

1. 核子のスピン構造研究の状況

核子スピンの起源を探る試みは、米国で始まり、1980年代の CERN で EMC 実験に引き継がれた。EMC が「クォークスピン寄与がほとんどない」というクォークモデルの常識に反する衝撃的な結果を発表して以来、「スピン・クライシス」という言葉が喧伝され、研究が活発に行われた。その後、CERN での SMC 実験、DESY での HERMES 実験や SLAC における一連の偏極深部非弾性散乱実験により、「核子スピンに対するクォークスピン寄与は、約 30%」が確認された。そして、何が残りのスピンを担っているか？ が次の疑問となった。QCD 描像で、核子スピンは、(1)クォークスピン、(2)グルーオンスピン、(3)クォークとグルーオンの回転運動から合成される。

すなわち、

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + \langle L_z \rangle_{\text{orbital}}$$

(1)は小さいことが確認され、(3)は核子には考えにくいと思われ、グルーオンスピン寄与の研究が焦点となった。

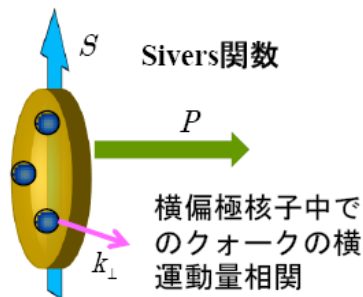
我々の COMPASS 実験では、様々な方法でグルーオン偏極度の測定を行ってきた。直接測定では、high-Pt ハドロンチャンネルにおいて、世界最高精度のデータを得た。また、オープンチャームチャンネルは、世界初のユニークなデータを提供した。間接測定では、これまでの最大の統計量の Inclusive-DIS データから解を核子スピン構造に関する解を2つに絞り込むことに成功した。これらによって、グルーオンスピン寄与は、比較的小さいことが明らかになってきた。少なくとも、 $x_g=0.1$ の付近において、グルーオン偏極度は0と矛盾しないことが分かった。実験前には、 $\Delta G=4\sim 5$ という非常に大きな寄与も予想されたが、これは最近の実験結果によって否定された。

BNL の RHIC-SPIN 実験でも、偏極陽子の衝突実験が継続されており、中性パイ中間子生成やジェット生成での2重スピン非対称度測定から、グルーオンスピン寄与の推定の努力が続けられている。高エネルギー偏極陽子コライダーを用いた RHIC-SPIN 実験では、NLO レベルでの摂動 QCD を有効に利用して、素過程の断面積や非対称度の計算を基にしてグルーオン偏極寄与の推定が行われている。RHIC-SPIN の結果も、固定標的実験の結果と矛盾せず、比較的小さなグルーオンスピン寄与を示している。しかしながら、いずれの実験でもグルーオン偏極に関する測定精度は十分ではなく、核子スピンに対するグルーオンスピンの役割を、クォークスピン寄与に対して確定することはできていない。グルーオンスピン寄与の符合さえも決まっていないのが、現状である。この点は、今後の COMPASS と RHIC-SPIN の課題となっている。

一方、ドイツの HERMES グループは、偏極陽子標的を用いた中間子生成の角分布の標的スピンの依存性を調べ、「 π^+ に対して Sivers 非対称度が0では無い」ことを初めて見出し

た。これが、事実ならば、Sivers 非対称度は、核子スピンとクォークの横方向運動との相関を示す Sivers 関数に関係するため、クォークの軌道回転の存在を示唆することになる。

一方、私たちの COMPSSS では偏極重陽子に対して測定を行い、「重陽子（陽子+中性



子) に対する Sivers 非対称度は 0 である」ことを明らかにした。これは陽子と中性子で、効果が相殺されていると解釈され、u-quark と d-quark が逆向きに回転していると考えれば、軌道回転の存在とも矛盾しない。ところが、COMPASS において 2007 年に陽子偏極標的を用いて予備的な測定を行ったところ、図 1-1 のように Sivers 非対称度は誤差の範囲で 0 と矛盾しない値となり、HERMES で見いだされたような非対称度を確認することはできなかつ

た。しかし、この測定の統計精度は、HERMES のそれに達していないので、必ずしも HERMES の結果を否定するものではない。

COMPASS において、さらにデータ収集を続け、統計精度を上げ、結果を確認することが急務となっている。

HERMES, COMPASS, RICH-SPIN などの実験が興味深い結果を提供する一方、理論面でも重要な進展があった。その一つとして、QCD を基礎とした J_i の和則

[J. Phys. G24, (1998), 1181] が挙げられる。この和則は、「クォークの全角運動量と一般化パートン分布 (GPD) を関係づける」ものである。そして、GPD の情報は深部仮想コンプトン散乱 (DVCS) を調べられるので、これを用いて軌道角運動量へのアプローチが実験的に

可能になった。すでに、低いエネルギー領域だが、HERMES や JLAB など DVCS の先駆的なデータが得られ、興味深い結果を示している。今後は、JLAB での DVCS の高精度実験が予定され、COMPASS でも 100GeV 以上のミュオンビームを用いて DVCD の研究を計画し、準備を進めている。

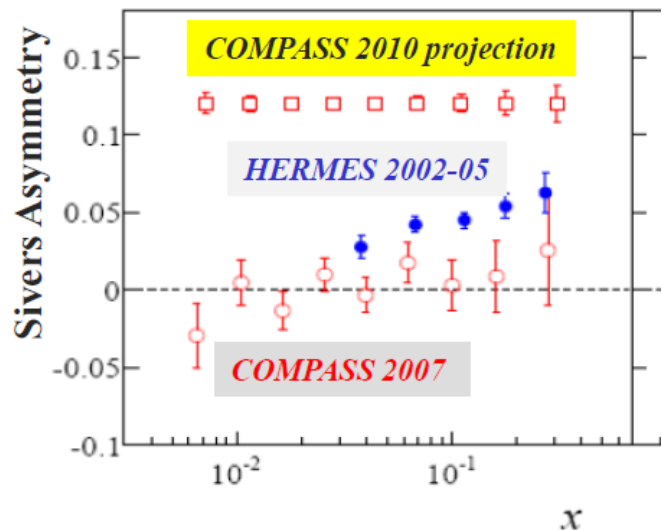


図 1-1 HERMES と COMPASS による陽子に対する Sivers 非対称度。

また、クォークの軌道回転寄与については、格子 QCD や QCD の有効理論が図 1-2 に示したように興味深い予言を与えている。 $Q^2=4\text{GeV}^2$ において格子 QCD (LHPC) は、 $L(u)=-0.13, L(d)=+0.2$,

若松らの χ QS model は
 $L(u)=-0.19, L(d)=+0.25$ を、トーマ
 スらの Cloudy Bag model は、
 $L(u)=0, L(d)=+0.1$ を予言している。
 χ QS model や Cloudy Bag model
 は、軌道回転寄与の Q^2 与依存性も
 併せて予言している。

最近、クォークの軌道回転
 寄与との関連で、クォークの横運
 動量依存パートン分布関数

(TMD-PDF) が注目されている。前
 述の Sivers 関数 f_{1T}^\perp は TMD-PDF の
 中で最も有名な PDF であり、クォ
 ークの軌道回転寄与のとの関連で
 重視されている。そして、Sivers
 関数は、理論的にも興味深い性質を持つことが示されている。すなわち、場の理論での Sivers
 関数は、ゲージリンクオペレータを含む非局所的な相関を含んでおり、カラーゲージ不変性
 を要求すると、Sivers 関数には反応依存性が現れる。Collins (PLB, 532(2002)43) による
 普遍的な議論から、Semi-Inclusive 反応と Drell-Yan 反応に対して Sivers 関数は逆符号に
 なり、 $f_{1T,DIS}^\perp = -f_{1T,DY}^\perp$ という予言が与えられている。

さて、Sivers 関数や Boer-Mulder 関数は、Drell-Yan 反応においても調べる事ができる。
 Drell-Yan 反応では、入射ハドロン中のクォーク (または反クォーク) と標的ハドロン (核
 子) 中の反クォーク (またはクォーク) が融合し、レプトン対ができる。純粋な電磁過程の
 ため、クォーク分布を仮定すれば QED によって厳密な計算ができるため、クォーク分布を抽出
 するには、理想的な反応である。

現在、FNAL の 120GeV 1 次陽子ビームを用いた Drell-Yan 実験 (E906) の準備が進められて
 いる。この実験は、Drell-Yan 過程に対する本格的な高統計実験であり、従来の実験の 50
 倍の Drell-Yan イベントを収集し、陽子中のクォークに対する
 Boer-Mulder 関数の抽出を行う。

COMPASS では、パイ中間子を偏極陽子に入射し、
 $\pi^-(\vec{q}) + p^\uparrow(q) \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ のスピン依存性 (核子スピンに対する
 レプトン対の方角分布) を調べ、Sivers 関数 $f_{1T,DY}^\perp$ や
 Boer-Mulder 関数 h_1^\perp を調べる計画を持っており、実験準備を進
 んでいる。

これまでに述べたような、グルーオン偏極や軌道回転寄与などクォークスピン以外の寄与

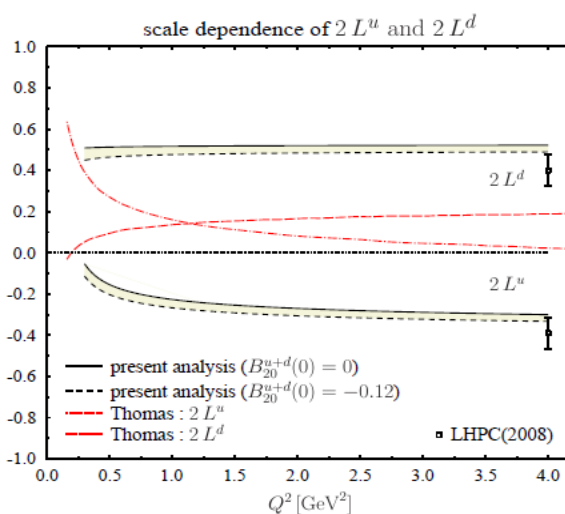
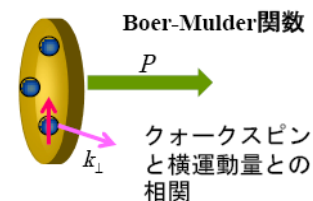


図 1 - 2

χ QS model、Cloudy Bag model によるスケ
 ール依存性、格子 QCD による予 (arXiv:0910.5271)



を調べる研究に加え、クォークの偏極分布を詳細に調べる研究も精力的に進められている。

HERMES や COMPASS では、散乱レプトンに加えて、ハドロンを同時計測し Semi-Inclusive-DIS (SIDIS) をとらえ、その縦方向のスピンの非対称度を調べることで、クォークのヘリシティ分布をフレーバー分離が行われている。これらの試みは、破碎関数の不定性のため難しい解析になるが、偏極陽子、偏極重陽子に対する様々なハドロンの SIDIS データを総合的に解析することで、明確な結果が得られてきている。これまでにはっきりしたことは、u-quark、d-quark およびそれらの反クォークのヘリシティ分布は、本質的に Inclusive-DIS データに対して QCDC 解析を行って得られた結果と一致し、u-quark は正偏極、d-quark は負偏極を示し、 \bar{u}, \bar{d} は偏極していない。これに対して、Inclusive-DIS の解析では小さな負偏極を与える s-quark の分布は、SIDIS データの解析ではほとんど偏極していないように見えており、strange-sea の偏極についてはコンセンサスが得られていない。

さらに、HERMES や COMPASS では、クォークの Transversity の研究も精力的に行なわれている。核子の構造を摂動 QCD の演算子積展開によって記述する場合、その近似の最低次（ツイスト 2）レベルでは、クォークの非偏極分布、ヘリシティ分布そして Transversity が関与する。この中で、Transversity については、ほとんど情報が得られなかったが、HERMES や COMPASS による横偏極標的に対する SIDIS の生成ハドロンの方角依存性の非対称度、すなわち Collins 非対称度から、情報が得られるようになってきた (図 1-3)。ところが、Collins 非対称度は、Transversity と Collins 破碎関数の積で与えられるため、Collins 破碎関数が知られていないため、Transversity を抽出することができなかった。ところが、Belle グループが電子陽電子消滅からのハドロン生成の角分布から Collins 破碎関数を実験的に与えることに成功した。そして、今日では、これらの実験データを総合的に解析し、u-quark と d-quark に対する Transversity が明らかになってきた (図 1-3)。

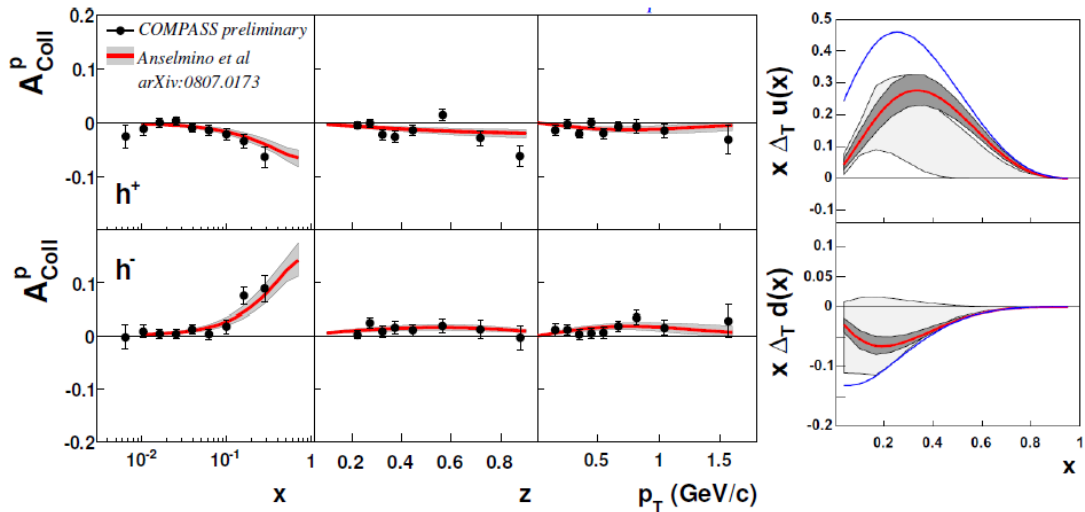


図 1-3 COM-PASS で得られた陽

子に対する Collins 非対称度 (左のグラフ) と、Anselmino らの総合解析によって推定された u-quark および d-quark の Transversity (右図の赤線)。

Transversity については、1つのハドロンを捕らえる SIDIS だけでなく、2つのハドロンの干渉によって現れるスピン非対称度や、ラムダの偏極度によっても情報が与えられる。COMPASS ではこれらの測定も着実に進められている。

2-1. Inclusive-DIS スピン非対称度

本来 COMPASS は、散乱されたミューオンと生成されたハドロンを同時計測し、SI-DIS イベントに対するスピン非対称度を測定する目的で企画された実験であるが、同時に従来の散乱ミューオンだけを捉えることで、図 2-1-1 のような

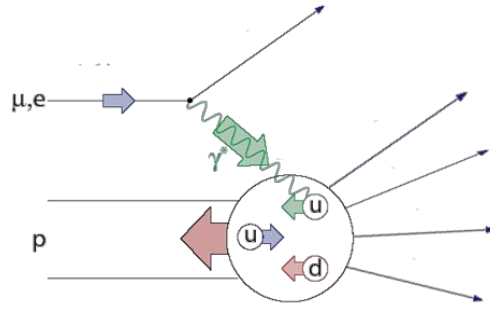


図 2-1-1 Inclusive-DIS イベント

Inclusive-DIS に対する非対称度を高い統計精度で計測することができる。この非対称度から、核子に対する偏極構造関数 $g_1(x)$ が得られる。クォーク・パートンモデルで $g_1(x)$ はクォークおよび反クォークのヘリシティ分布： $\Delta q_f(x) = q^+(x) - q^-(x)$ を用いて、

$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_f e_f^2 \Delta q_f(x)$ と表される。さらに、 $g_1(x)$ の 1st moment： $\Gamma_1 = \int_0^1 dx g_1(x)$ は、

陽子に関する u-quark、d-quark および s-quark のヘリシティ分布関数の 1st moment： $\Delta u = \int_0^1 dx (\Delta u(x) + \Delta \bar{u}(x))$ 、 $\Delta d = \int_0^1 dx (\Delta d(x) + \Delta \bar{d}(x))$ および $\Delta s = \int_0^1 dx (\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x))$

を用いて、陽子に対して、 $\Gamma_1^p = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{9} \Delta u + \frac{1}{9} \Delta d + \frac{1}{9} \Delta s \right)$ と表すことができる。この右辺をアクシャルカレントの行列要素 $a_3 = \Delta u - \Delta d$ 、 $a_8 = \Delta u + \Delta d - 3\Delta s$ 、および

$a_0 = \Delta u + \Delta d + \Delta s$ を用いて整理すると、 $\Gamma_1^p = \frac{1}{12} a_3 + \frac{1}{36} \sqrt{3} a_8 + \frac{1}{9} a_0$ と書き換えることができる。ここで、 a_3 は中性子のベータ崩壊から $a_3 = \frac{g_A}{g_V}$ と与えられ、 a_8 はハイペロン

の弱崩壊から求められているので、1st moment の測定によって、 a_0 を決めることができる。この a_0 は、 \overline{MS} スキームでは、核子スピンに対するすべてのクォークスピンの寄与 $\Delta \Sigma$ を表す。また、 a_0 が決まれば、既知の a_3 と a_8 を使って、 Δu 、 Δd 、 Δs をそれぞれもとめることもできる。

中性子に対しては、アイソスピン対称性を要求し、u と d を入れ替えると、

$\Gamma_1^n = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{9} \Delta d + \frac{1}{9} \Delta u + \frac{1}{9} \Delta s \right)$ および

$\Gamma_1^n = -\frac{1}{12} a_3 + \frac{1}{36} \sqrt{3} a_8 + \frac{1}{9} a_0$ が得られる。

また、重陽子の $g_1(x)$ は、陽子や中性子の $g_1(x)$ と、

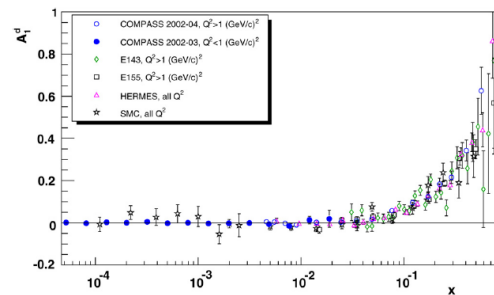
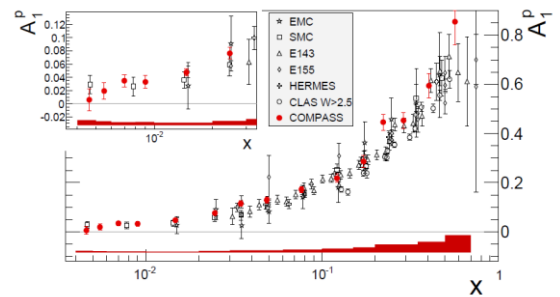


図 2-1-2 陽子と重陽子に対する $A_1(x)$

$2g_1^d(x)/(1-1.5\omega_D) = g_1^p(x) + g_1^n(x)$ のように関係している。ただし、 $\omega_D = 0.058$ は重陽子の D 状態の割合である。さらに、陽子と中性子の 1st moment の差は、 $Q^2 \rightarrow \infty$ では

$$\text{Bjorken 和則により } \Gamma_1^p - \Gamma_1^n = \frac{1}{6} \left| \frac{g_A}{g_V} \right| \text{ と}$$

与えられる。また、任意の Q^2 での関係は、摂動 QCD から厳密に導かれる。さて、これまでに COMPASS では陽子 (2007) および重陽子 (2002, 03, 04, 06) の Inclusive-DIS データを蓄積し、陽子および重陽子に対する非対称度 A_1 を明らかにした (図 2-1-2)。 A_1 を用いて偏極構造関数は、

$$g_1 = (F_2/2x(1+R))A_1 \text{ のように表される。}$$

ここで、 F_2 は非偏極構造関数、 R は縦偏極と横偏極の光子の吸収断面積の比

$R = \sigma_L/\sigma_T$ であり、過去の実験で与えられている。図 2-1-2 に COMPASS において得られた $g_1(x)$ を示す。COMPASS では、

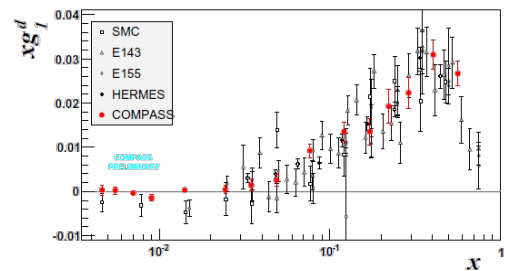
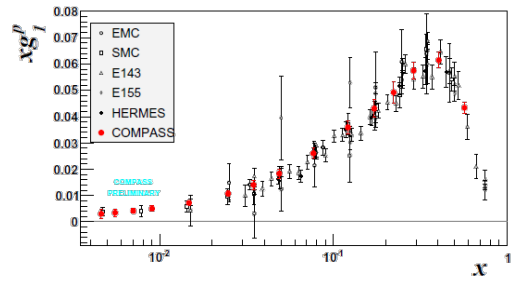


図 2-1-3 陽子と重陽子に対する $g_1(x)$

過去の実験 (SMC) と比べて x の小さな領域において飛躍的に精度が向上していることが分かる。これらのデータのうち、2002、03、04 年に得られた $g_1^d(x)$ とその時点で得られている他のグループ $g_1(x)$ データを含めて、QCD の発展方程式を用いて Q^2 依存性に注目して解析を行った [PLB 647(2007)8]。これから a_0 や s-quark のスピン寄与、グルーオンスピン寄与などが求められた。

$Q^2 \rightarrow \infty$ では、 $a_0(Q^2 \rightarrow \infty) = 0.33 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst.})$ 、

$(\Delta s + \Delta \bar{s}) = -0.08 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst.})$ と求められた。ここで、クォークスピン寄与が小さいことが再確認され、s-quark のスピン寄与は小さいが核子スピンとは逆向きに偏極していることが示された。また、グルーオンスピン寄与については、同程度に確からしい 2 つの解 ($\Delta G > 0$ 解と $\Delta G < 0$ 解) が得られた。これらからグルーオン偏極度を求めると、図 2-1-4 のようになった。どちらの解でも、 $\Delta G(x)$ の 1st

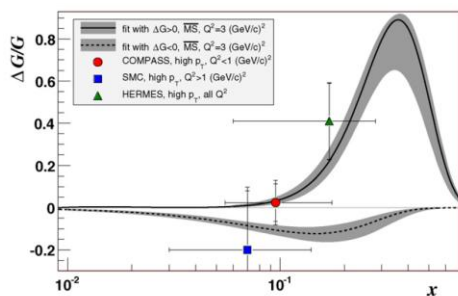


図 2-1-4

Inclusive-DIS データの QCD 解析から得られたグルーオン偏極度 (帯状の曲線)。

moment は、 $\left| \int_0^1 dx \Delta G(x) \right| = 0.2 - 0.3$ 程度で、グルーオンスピン寄与は異常に大きいわけではない。また、得られたグルーオン偏極度は、直接測定の結果とも矛盾しない。

次に Bjorken 和則について調べるために、

$g_1^p(x)$ と $g_1^d(x)$ から $g_1^{NS}(x) = g_1^p(x) - g_1^n(x)$ を考えると、これは $g_1^d(x)$ を用いて

$$g_1^{NS}(x) = 2 \left[g_1^p(x) - g_1^d(x) / (1 - 1.5\omega_D) \right]$$

と表すことができる。この 1st moment : $\Gamma_1^{NS} = \int_0^1 dx g_1^{NS}(x)$ は Bjorken 和則の左辺に対応する。図 2-1-5 は COMPASS のデータを $Q^2 = 3\text{GeV}^2$ まで発展させて求めた $g_1^{NS}(x)$ の振る舞いと、始点 $x = 1$ から $x = 0$ へ向けたランニング積分 $\int_x^1 dx g_1^{NS}(x)$ を示す。積分の極限值は、 $Q^2 = 3\text{GeV}^2$ での Bjorken 和則の予言と、統計誤差の 1 標準偏差以内で一致している。これは、摂動 QCD が見事に成り立っている一つの証拠と考えることができる。

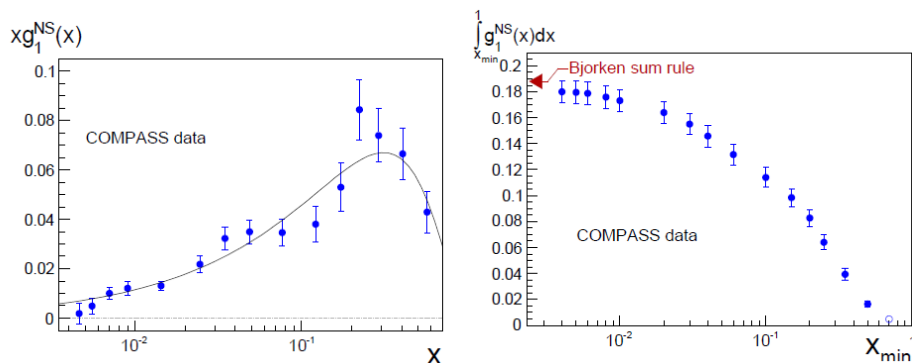


図 2-1-5 $xg_1^{NS}(x)$ と $\int_x^1 dx g_1^{NS}(x)$ 。ただし、 $Q^2 = 3\text{GeV}^2$ に発展させた値。

2-2. グルーオン偏極

電子やミュオンなどの荷電レプトンビームを用いて核子の構造を調べる散乱実験において、電氣的に中性のグルーオンを直接プローブすることはできない。そこで、COMPASS では、グルーオンが2次的に関与する、光子グルーオン融合 (PGF=Photon-Gluon-Fusion) のイベントを選択し、そのスピン非対称度を測定することで、グルーオン偏極を調べるようにする。

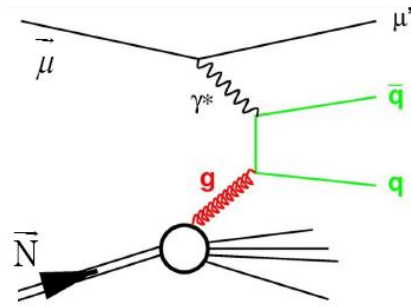


図 2-2-1 PGF の反応ダイアグラム

PGF はミュオンからの仮想光子が核子中のグルーオンと融合し、クォークと反クォークのペアが生成される反応である。

この時、仮想光子が関与する結合はイベント毎に QED によってあたえられる。また、グルーオンとクォークの結合は、十分なハードスケールを持つ場合には、摂動 QCD によって、記述することができる。ソフトパートである核子内のグルーオンの状態は、分布関数で表現されるが、反応全体は、分布関数とハードパートの積で表されるという、いわゆるファクトリゼーションが成立しているため、PGF のスピン非対称度を測定することで、ソフトパートであるグルーオン偏極にアプローチすることができる。

COMPASS では実験的に PGF を捕捉するため、2つの方法を採用している。1つはオープンチャーム法、もう一つは high-Pt ハドロン法である。

オープンチャームは、生成されるクォークペアがチャームペアの場合で、終状態にチャームハドロンと反チャームハドロンが生成される場合である。この方法では、摂動 QCD のためのハードスケールはチャームクォークの質量によって自動的に保障される。このチャンネルは、ほとんど PGF を起源とするため、物理的なバックグラウンドが少なく、理想であるが、チャーム生成の確率は小さく、統計的には厳しい方法である。できるだけ、統計

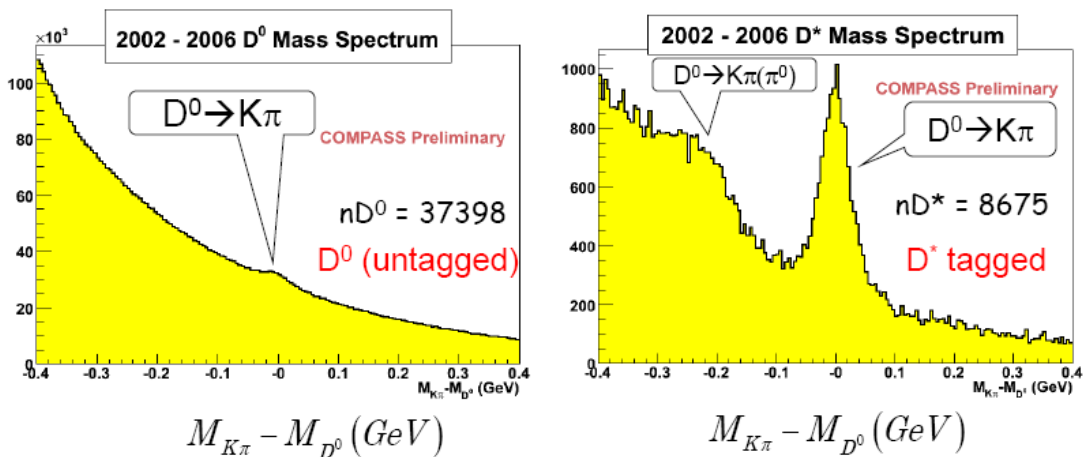


図 2-2-2 $K\pi$ の不変質量 (左)。 D^* 標識した場合 (右)。

を損なわないために、2つのチャームハドロンのうち、どちらか一方を検出する。具体的には、 D^0 中間子（または反 D^0 中間子）の崩壊（分岐比 4%）を荷電 $K\pi$ モードで捕捉する。この時、 K 中間子は RICH 検出器で確認されるが、検出可能範囲は、運動量が $9\text{GeV}/c$ から $30\text{GeV}/c$ に限られる。 $30\text{GeV}/c$ 以上では、パイ中間子との判別が不可能となる。一方、 $9\text{GeV}/c$ 以下の K 中間子（Sub-threshold K ）はチェレンコフ光を出さない。ところが、パイ中間子や電子ならば $9\text{GeV}/c$ 以下でも確実に確認される。したがって、パイ中間子や電子として認識されなかった粒子を、 K 中間子と見なすことができる。これを、Sub-threshold K イベントと称して解析に用いる。ところで、チャームハドロンは比較的長寿命であることを利用して 1 次バーテックス（生成）と 2 次バーテックス（崩壊）を確認して行われることが一般的だが、大型偏極標的を用いる COMPASS の場合、バーテックスに対する位置分解能は十分ではないので、この方法を採用できない。結局 $K\pi$ の不変質量分布だけを利用する他ない。しかし、偶然の組み合わせによる $K\pi$ が D^0 中間子に近い不変質量となるバックグラウンドが多く、わずかに D^0 のピークが観測される程度である（図 2-2-2 の左の図）。ここで、 D^0 の半数近くは、 $D^{*+} \rightarrow D^0 + \pi^+$ 経路で生成されるので、 D^{*+} の崩壊に伴って生ずる運動量の小さな π を捉えてやると、親の D^* を標識化でき、 D^0 に対するバックグラウンドを減らし、普遍質量分布において D^0 ピークより明瞭に認識できるようになる（図 2-2-2 の右の図）。また、 D^* 標識化を行った場合には、 $K\pi$ 不変質量分布に $D^0 \rightarrow K + \pi^+ + \pi^0$ から生ずる構造が現れている（“ π^0 -bump”）

。さて、最終的なグルーオン偏極度の抽出には、Analyzing Power が必要なるが、それは LO-QCD をベースにしたモンテカルロ（AROMA）によって推定する。この時、運動学的な量をすべて実験で捕捉していれば、イベント毎に完全な Analyzing Power が決定できるが、実際には 1 つのチャームハドロンのみを検出しているため、推定に不定性が出てしまう。この不定性を減らすために、完全なモンテカルロイベントによって、訓練した Neural Network システムを用いる。このシステムは、実験で得られた不十分な情報を基に、最適な Analyzing Power を与えるものである。様々な運動学的な条件をもつイベントに対するモンテカルロと Neural Network が与える結果はよい相関を持つことが分かっている。結局、表 2-2-1

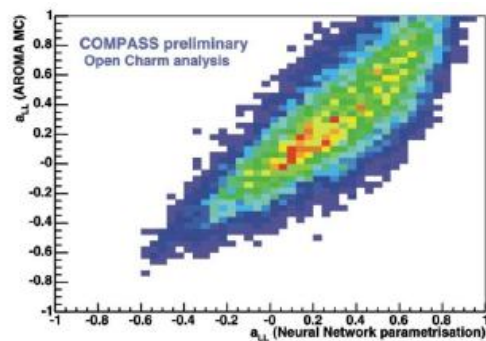


図 2-2-3
モンテカルロと Neural Network による Analyzing Power の相関

D^0 (untagged)	$\Delta G/G = -0.421 \pm 0.424(stat)$
D^* tagged	$\Delta G/G = -0.541 \pm 0.343(stat)$
$D^0 + D^*$ tagged	$\Delta G/G = -0.49 \pm 0.27(stat) \pm 0.11(sys)$
π^0 -bump	$\Delta G/G = -0.150 \pm 0.633(stat)$
Sub-threshold K	$\Delta G/G = 0.574 \pm 1.024(stat)$
All channels	$\Delta G/G = -0.39 \pm 0.24(stat)$

表 2-2-1 2002, 03, 04, 06 年の重陽子偏極標的ランでのグルーオン偏極度

に示すように D*標識化を行わないチャンネル (D⁰ (untagged))、D*標識化を行なった D⁰ → Kπチャンネル (D* tagged) および D⁰ → K⁻π⁺π⁰チャンネル (π⁰-bump) 及び、Sub-threshold K イベントでの D*標識化を行なった D⁰ → Kπチャンネル (Sub threshold K) の 4 つのチャンネルを用いてグルーオン偏極度 ΔG/G が $\langle x_g \rangle = 0.11$ において抽出された。これらのうち、

D⁰+D* tagged の結果はすでに出版されており [PLB 676 (2009) 31-38]、オープンチャーム法での初めてのグルーオン偏極度導出としてユニークな結果となる。オープンチャームでのグルーオン偏極度は負の値を示しているが、まだ統計誤差がかなり大きいので、ΔG/G = 0 と矛盾しない。

次に、high-Pt ハドロン法でのグルーオン偏極度の導出について述べる。High-Pt ハドロン法では、u、d、s などの軽いクォークの対生成を想定し、逆電荷を持つ 2 つのハドロンが逆方向に生成されるイベントを抽出する。この時、2 つのハドロンに対して大きな Pt を要求することによって、摂動 QCD 解析に必要なハードスケールを保障する。この方法は、オープンチャームに比べ統計的な優位性を持つが、さまざまな物理的バックグラウンドが問題となる。従って、実験で得られるスピン非対称度は、

$$A_{||} = R_{PGF} \times a_{LL}^{PGF} \times \frac{\Delta G}{G} + A_{Bkg}$$

のように表され、PGF の生成確率 (R_{PGF}) や Analyzing Power (a_{LL}^{PGF}) 及び、バックグラウンドの非対称度への寄与を LO-QCD をベースにしたモンテカルロで推定し、ΔG/G を抽出する。ところで、バックグラウンドは運動学的な領域ごとにかなり様相が違ってくる。

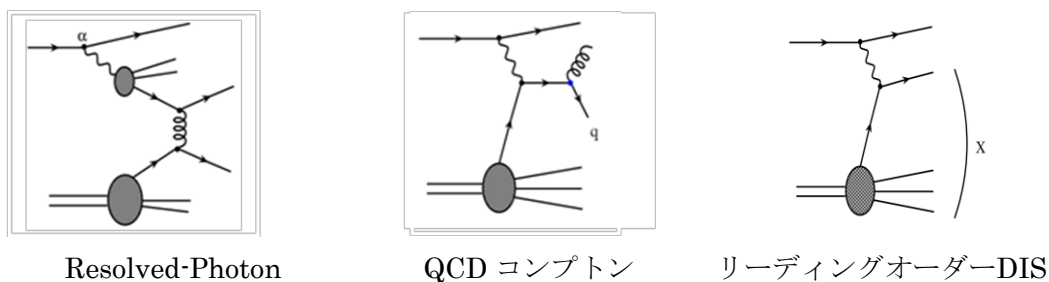


図 2-2-4 high-Pt ハドロン法で問題となる物理的バックグラウンド

たと

えば、小さな Q² では、Resolved-photon のバックグラウンドが支配的になり、大きな Q² では QCD コンプトンやリーディングオーダーDIS が効いてくる。そこで、解析は、データを Q² < 1 GeV² 領域と Q² > 1 GeV² 領域に分けて行われた。

Q² < 1 GeV² 領域では、豊富なイベントのため統計的には有利だが、図 2-2-5 に示すように、50% 近い Resolved-Photon のバックグラウンドに注意して解析を進めなければならない。それでも、photon のパートン分布の偏極依存性は十分に分かっていないので、ある程度の不定性が残ってくる。これは、系統誤差に繰り込んでしまった。結局、2002、03 データを用いた解析では、 $x_g = 0.095_{-0.04}^{+0.08}$ 、QCD のハードスケール $\mu^2 = 3\text{GeV}^2$ において、 $\Delta G/G = 0.024 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.057(\text{sys})$ という結果が得られ、出版されている (PLB

633(2006)25)。さらに、2002、03、04 データを用いた結果は、 $\Delta G/G = 0.016 \pm 0.058(stat) \pm 0.055(sys)$ となっている。これは、 $x_g = 0.1$ においてグルーオン偏極度は0と矛盾しないことを示している結果である。

一方、high- Q^2 領域 ($Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$) では、LO-QCDをベースにしたLEPTOモンテカルロを利用して解析を行った。2002、03、04 データを用いた結果は、

$$\langle x_g \rangle = 0.085 \text{ (range: } 0.055 < x_g < 0.123), \mu^2 = 3\text{GeV}^2 \text{ に}$$

おいて、 $\Delta G/G = 0.08 \pm 0.10(stat) \pm 0.05(sys)$ となり、こちらもグルーオン偏極度が0と矛盾しない。 $\Delta G/G$ について、

これまでのCOMPASSの結果と他の実験グループの結果をまとめると図2-2-6のようになる。COMPASSのhigh-Ptハドロンの結果は、これまでで最も高い精度でグルーオン偏極度を決めている。図中の2種類の点線は、COMPASSグループがInclusive-DISのワールドデータをQCDの発展方程式を用いてフィットして $\mu^2 = 3\text{GeV}^2$ に対して得た解である。どちらの解も同程度に確からしいが、上の点線は $\Delta G > 0$ に相当し、 ΔG の1st-moment、つまりグルーオンスピン寄与は、

$\int_0^1 dx \Delta G(x) = +0.26$ となる。一方、下の点線は $\Delta G < 0$ で、 $\int_0^1 dx \Delta G(x) = -0.31$ となる。COMPASSのhigh-Ptハドロンの結果は、 $\Delta G > 0$ の解に一致するが、 $\Delta G < 0$ の解を排除できるほどではなく、いまのところどちらの解の可能性もある。従って、現在のところ、グルーオンスピン寄与は、-0.3から+0.3程度に絞り込まれてきたと言ってよい。この結果は、他のDIS実験の結果やRHIC-SPINの結果とも矛盾しない。

COMPASSでは、オープンチャームでの解析を2002, 03, 04, 06の偏極重陽子データに対して実施し、high-Ptハドロンの解析を2002, 03, 04の偏極重陽子データに対して実施した。さらに、オープンチャームには、2007年の偏極陽子標的データを加え、統計精度を若干向上させることができる。また、high-Ptハドロンの場合は、2006の偏極重陽子データと2007年の偏極陽子データを加えることで、大幅な統計精度の向上が期待される。

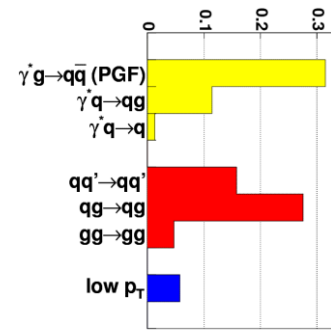


図2-2-5 $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ 領域でのバックグラウンド (PYTHIAモンテカルロ)

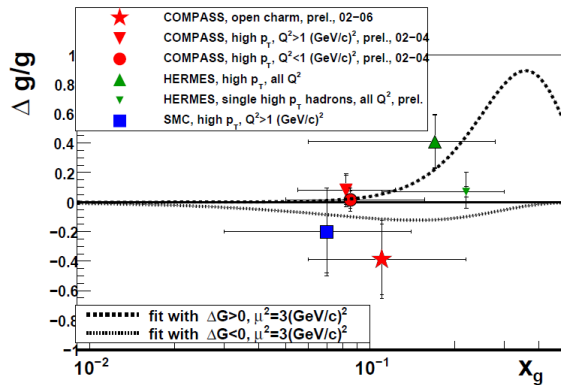
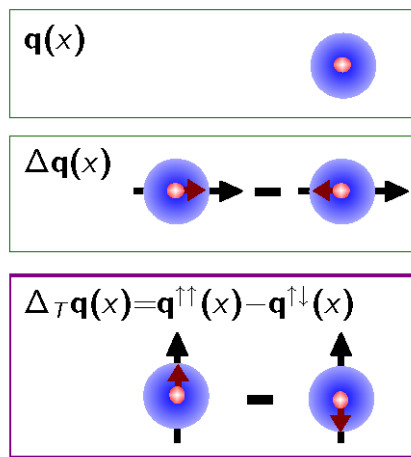


図2-2-6 グルーオン偏極度の測定結果

2-3. 横偏極効果

高エネルギーハドロン物理学における横スピン偏極効果の重要性は、pN相互作用で生成された Λ 粒子が予想外に大きな横スピン偏極を示したことにより、1976年に最初に示唆された。そして、トランスバーシティとよばれるクォークの横スピン分布関数 $\Delta Tq(x)$ の意義が1990年代におおいに注目をあつめ、ドレルヤンプロセスを通じた測定法や、偏極DISによる測定法が考案された。多くの実験グループがトランスバーシティ測定を計画しており、COMPASS以外にDESYのHERMES、BNLのRHICが、実際に測定を行っている。横偏極陽子標的で最初に結果を出版したのがHERMES実験で、横偏極重陽子標的で最初に結果を出したのがCOMPASS実験である。



摂動論的QCDの最低次近似（ツイスト2）においてクォークを記述する際、非偏極クォーク分布 $q(x)$ 、ヘリシティ分布 $\Delta q(x)$ と同様に、トランスバーシティは重要な量である。

トランスバーシティはカイラリティが奇であり、別のカイラル奇な関数との積でしか測定されない。ここに二つの解析方法がある。

<シングル・ハドロン解析>

終状態に一つのハドロンを要求するセミインクルーシブな深部非弾性散乱において、横偏極標的からの中間子生成における方位角分布を調べて求められる非対称度がトランスバーシティとCollins破砕関数（横偏極クォークがハドロン化するのを記述する関数のスピン依存部分）との積となっている。これをCollins非対称度という。

<ダブル・ハドロン解析>

終状態に二つのハドロンを要求し、測定される非対称度は、トランスバーシティと二つのハドロンの干渉破砕関数の積として測定される。

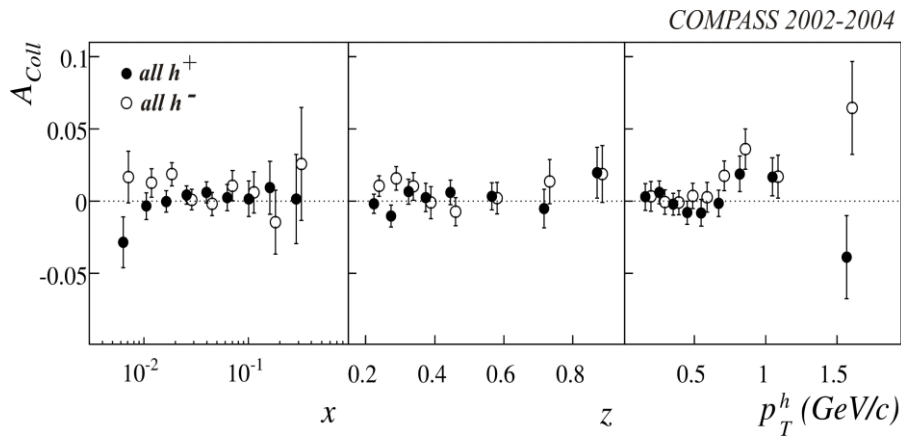


図 2-3-1

2002-04の偏極重陽子標的ランで得られた Collins 非対称度。

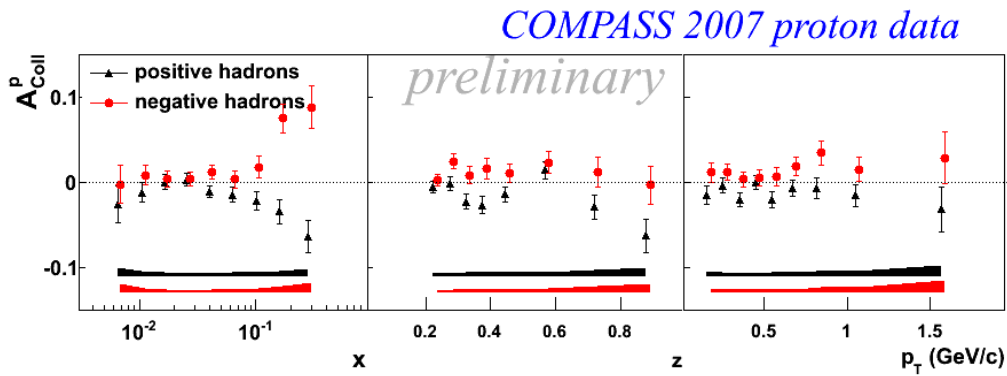


図 2-3-2

Collins 非対称度。2007年に偏極陽子標的に対して得られたデータの一部。

COMPASS 実験は、2002年から2004年までと2006年の計5カ年を、偏極重陽子標的を用いた実験にあて、2007年を偏極陽子標的を用いた実験にあてた。その結果、シングル・ハドロン解析では、重陽子標的でのイベントが 15×10^6 個、陽子標的でのイベントが 29×10^6 個あり、図 2-3-1 に示すように重陽子標的では非対称度はゼロ、図 2-3-2 に示すように陽子標的では、Anselmino et al. の予言どおり、また、HERMES の結果とも一致して有意にゼロではないことが分かった。ダブル・ハドロン解析では、重陽子標的でのイベントが 6.1×10^6 個、陽子標的でのイベントが 11×10^6 個あり、図 2-3-3 に示すように重陽子標的では非対称度ゼロ、陽子標的では、バレンスクォーク領域でおおきな非対称度を得、HERMES が測定したものより強いシグナルが測定された。

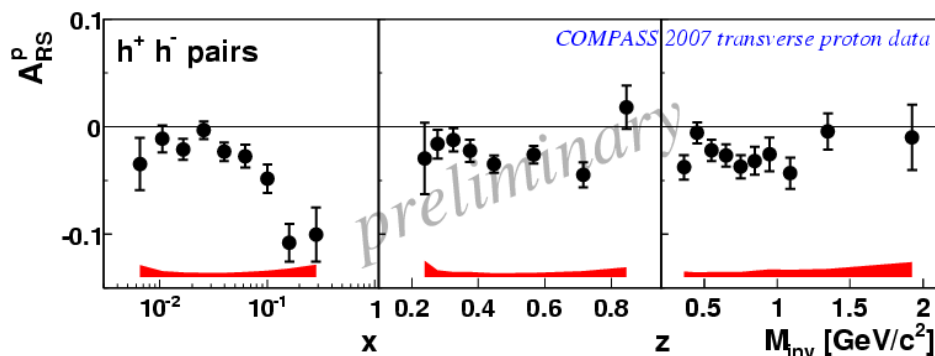


図 2-3-3 ダブル・ハドロン解析で得られた横方向非対称度。2007 年に偏極陽子標的に対して得られたデータの一部。

一方、Sivers によって提案されたのは、pp 散乱で観測される横スピン効果を理由付けるメカニズムで、横スピン偏極した核子におけるレプトン非弾性散乱のセミインクルーシブ測定のスピン非対称度にもあらわれる。これは、クォークの横方向運動量と核子の横方向スピン偏極ベクトルを関連付け、核子内クォークの軌道核運動量の有無の指標となる量である。

2004 年までのデータで、COMPASS の Sivers 非対称度はほぼゼロであることがわかっていたが、2006 年の新しいデータを加えて、さらに良い精度でゼロであることが確認された。最初、これは u-クォーク と d-クォーク の Sivers 非対称度が逆符号で相殺が行っているという解釈もなされたが、現在もなお、なぜ重陽子がこのような小さな Sivers 非対称度をもつのか明らかでない。2007 年の陽子標的を使った Sivers 非対称度の測定でも、図 2-3-5 に示すようにゼロとの結果がでており、HERMES 実験が陽子標的でゼロでない観測をしていることとは一致していない。

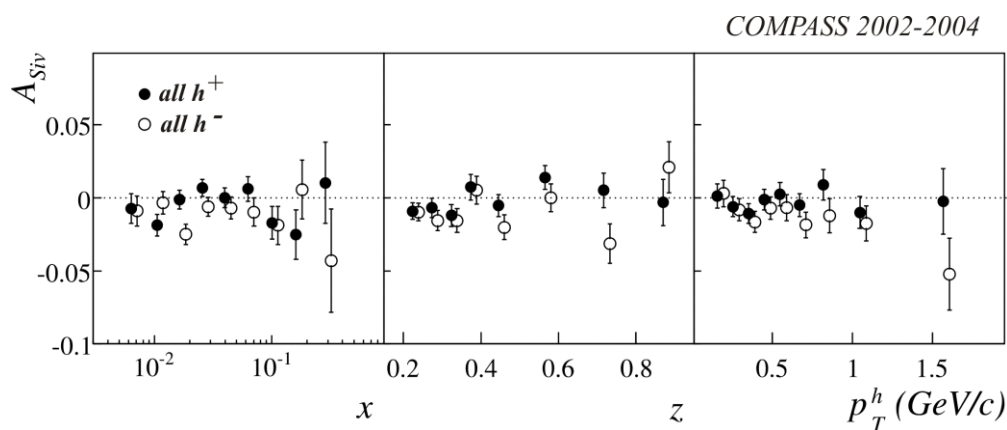


図 2-3-4 2002, 03, 04 の偏極重陽子標的ランで得られた Sivers 非対称度。

COMPASS 2007 proton data (part)

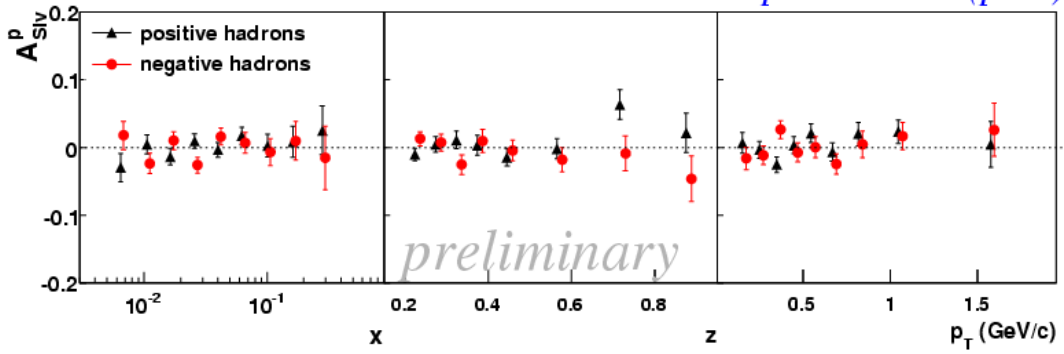


図 2-3-5

シングル・ハドロン解析で得られた Sivers 非対称度。2007 年に偏極陽子標的に対して得られたデータの一部。

さらに、COMPASS では、生成されるハドロンの認識を行った場合の Collins 非対称度と Sivers 非対称度を偏極重陽子標的に対して得ている。図 3-2-6 および図 2-3-7 に示すように π^+ 、 K^+ 、 K_s に関する Collins 非対称度と Sivers 非対称度は、ともに 0 と矛盾しない結果を与えている。

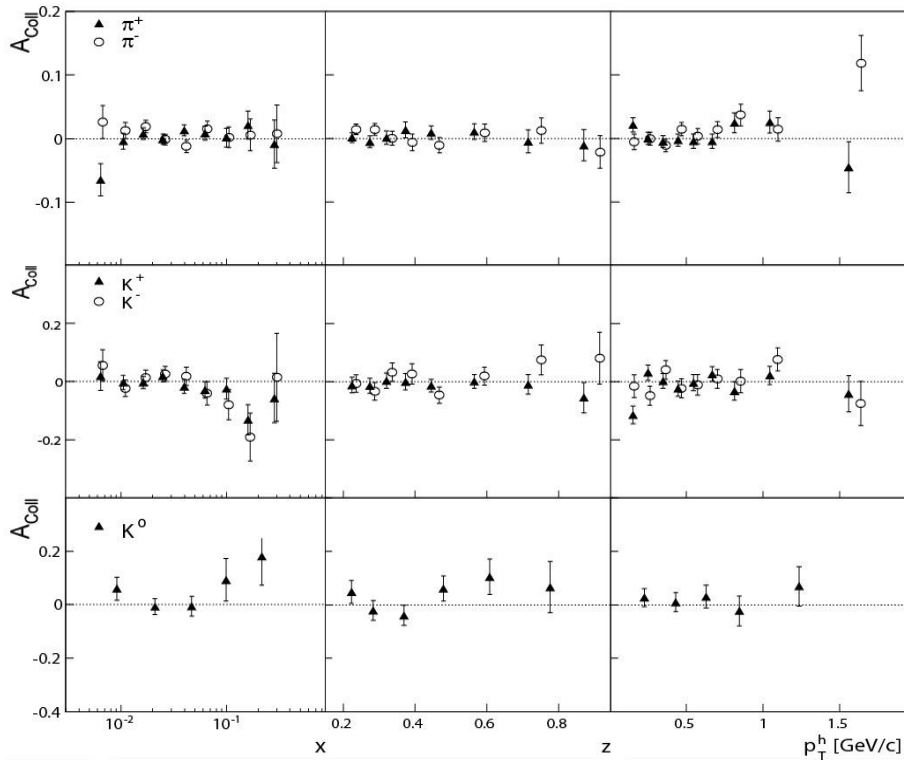


図 2-3-6

ハドロン認識の Collins 非対称度。(2002-04 偏極重陽子データ)。

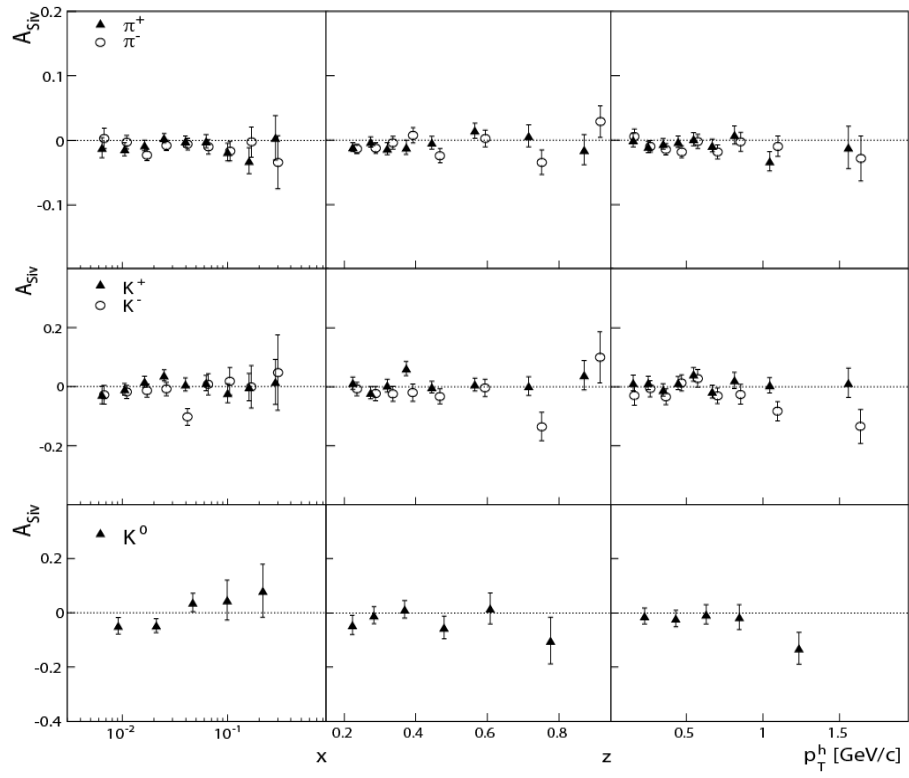


図 2-3-7

ハドロンの Sivers 非対称度。(2002-04 偏極重陽子データ)。

2-4. ヘリシティ分布のフレーバー分離

散乱ミュオンと仮想光子によって叩かれたクォークからハドロンにフラグメントする Semi-Inclusive-DIS (SIDIS) 過程に対して、factorization が証明されており、QCD の Leading Order において、スピン非対称度はパートン分布と破砕関数の積として以下のように表される。

$$A_1^h = \frac{\sum_q e_q^2 \Delta q(x, Q^2) D_q^h(z, Q^2)}{\sum_q e_q^2 q(x, Q^2) D_q^h(z, Q^2)}$$

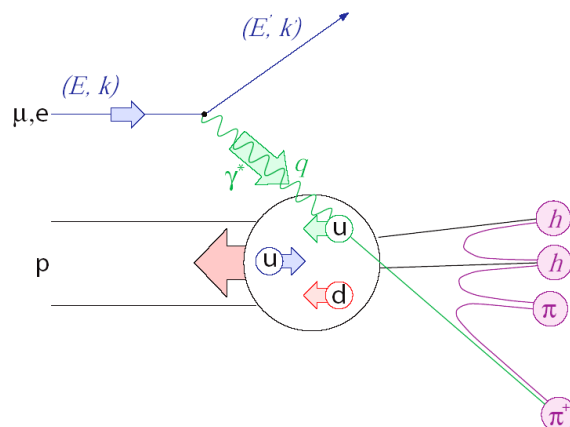


図 2-4-1 Semi-Inclusive-DIS イベント

ここで、 D_q^h はクォーク q がハドロン h にフラグメントする確率を表す破砕関数である。 z は仮想光子とハドロンのエネルギー比 $z = E_h/\nu$ を表し、 $q = u, d, \bar{u}, \bar{d}, s(\bar{s})$ に対して和を取る。 A_1^h から既知の

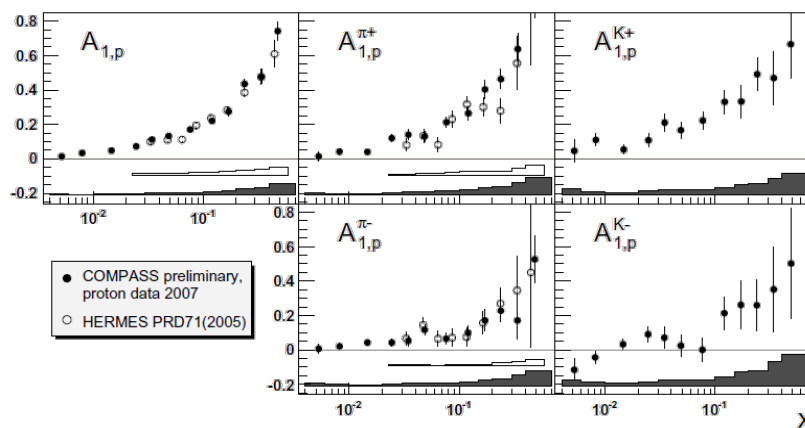


図 2-4-2

陽子に対する SIDIS のスピン非対称度のスピン非対称度。

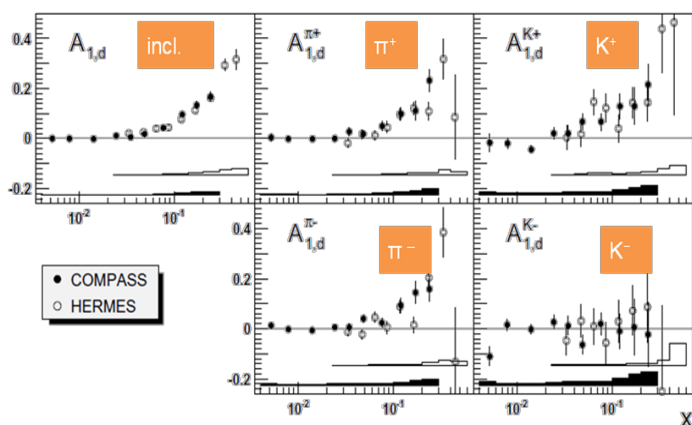


図 2-4-3

重陽子に対する SIDIS のスピン非対称度（および Inclusive-DIS のスピン非対称度）

破砕関数、非偏極パートン分布 $q(x, Q^2)$ を基に、 Δq を推定することができる。

COMPASS では、陽子、重陽子標的に
 対して SIDIS のスピン非対称度、
 $A_1^h(h = \pi^\pm, K^\pm)$ を測定した (図 2-4-2 及び図 2-4-3)。これらのデータから、図 2-4-4 に示すように
 $\Delta u, \Delta d, \Delta \bar{u}, \Delta \bar{d}, \Delta s (= \Delta \bar{s})$ を求めた。その
 結果、すべてのシークォークのヘリシティ分布は 0 に近い小さな値であり、
 シークォークはほとんど偏極していない。また、 $\Delta u, \Delta d, \Delta \bar{u}, \Delta \bar{d}$ は、
 g_1 に対するグローバルフィットの値
 と良い一致を示している。 Δs では、グ
 ローバルフィットでは負になるが、
 SIDIS はほぼ 0 であり、食い違いが現
 れている。ただし、 Δs の抽出では、破
 砕関数の選び方によって違いが出る

ことが分かっており、今後、破砕関数がアップデートされることで、食い違いが解消される
 かもしれない。

ところで、この解析では light-flavor-sea のヘリシティに関するフレーバー非対称、す
 なわち $\Delta \bar{u} - \Delta \bar{d}$ の情報も得られてい
 る。非偏極分布、すなわち \bar{u} と \bar{d} の分
 布に非対称があることは、よく知られ
 ているが、ヘリシティ分布について、
 どうなっているか、興味を持たれてい
 る。この解析での結果は、図 2-4-5
 のように、ほとんど非対称がないこ
 とを示している。

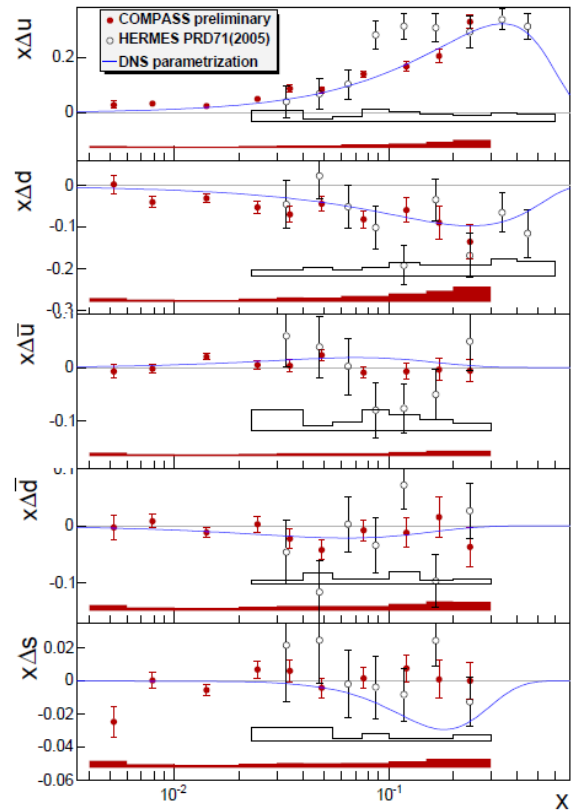


図 2-4-4 ヘリシティ分布のフレーバー分離

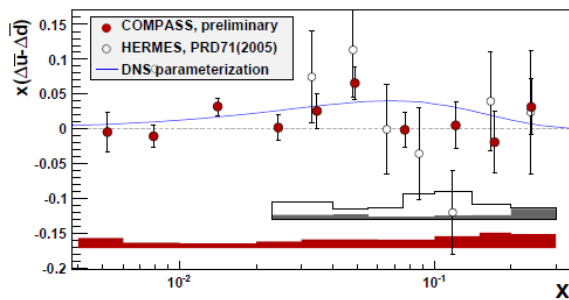


図 2-4-5 Light-quark-sea のフレーバー非対称。

2-5. ϕ 中間子生成の非対称度

我々日本グループでは実験で収集したデータの解析にも寄与している。中でも仮想光子と偏極核子の特定散乱における ϕ 中間子生成の非対称度の測定 (Measurement of double spin asymmetry in exclusive phi vector meson production) においては中心的な役割を果たしている。

ϕ 中間子は ρ 中間子に比べ反応断面積が非常に小さく十分な統計を得るのが困難である。これまで HERMES などが ϕ 中間子生成の非対称度を測定しているが、統計が十分でないため広い運動学的変数領域に渡ってのデータはこれまでほぼ存在していない。

COMPASS では 2002 年から 2007 年までミュオンビームを用いたミュオンプログラムが行われた。そこで 2002、2003、2004 そして 2006 年の 4 年間は偏極 ${}^6\text{LiD}$ ターゲットを用いて収集したデータ、そして 2007 年は偏極 NH_3 ターゲットを用いて収集した十分な統計量を持つデータを保持している。日本グループではこのデータを解析し ϕ 中間子生成の非対称度の測定を行った。

現在のところ核子を構成するバレンスクォーク、シークォークの中でストレンジクォークの核子内の存在比はわかっていない。相対論的調和振動子クォークモデル (Relativistic Harmonic Oscillator Quark Model: RHOQM) を用いた計算では、存在比の上限は 3~5% 程度であろうと言われている。この存在比を明らかにするために ϕ 中間子は理想的なプローブになるであろうと考えられている。なぜなら ϕ 中間子はストレンジ・反ストレンジクォークで構成されているからである。

以下に考えられている ϕ 中間子生成におけるプロセスを上げる。

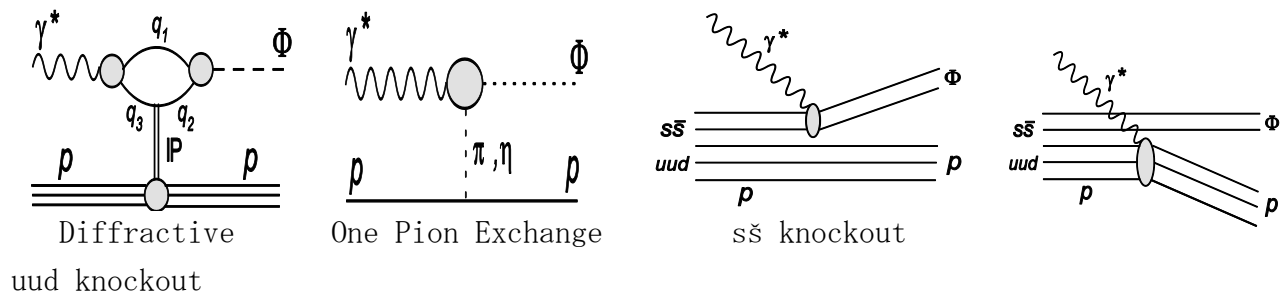


図 2-5-1 ϕ 中間子生成におけるプロセス

初めに ϕ 中間子生成において支配的なプロセスである diffractive production である。これは仮想光子がクォーク・反クォーク対に変動する際に核子と Pomeron をやり取りし ϕ 中間子が生成される。そして光子がパイ粒子などをやりとりして ϕ 中間子が生成される One Pion Exchange (OPE) である。しかし核子内にストレンジクォークが存在し OZI rule が敗れているプロセスと考えられる knockout プロセスに、今回の解析では焦点を当てる。これは仮想光子が陽子内のバレンスクォーク uud、又はシークォーク内のストレンジ・反ストレンジクォーク対をたたき出し ϕ 中間子が生成されるというプロセスである。

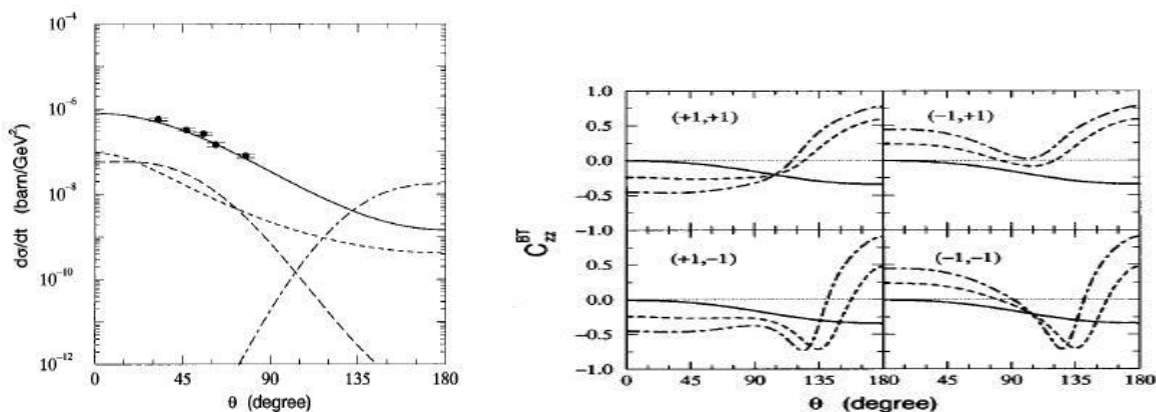


図 2—5—2. 各プロセスにおける反応断面積と非対称度の予測

上図(Phys. Rev. C 58, 2429 (1998) より抜粋)は仮想光子の進行方向に対する生成中間子の散乱角度に対する反応断面積と期待される非対称度を表している。左図は diffractive(実線)、OPE(点線)、 $s\bar{s}$ (破線)、そして uud knockout (1 点鎖線) プロセスの反応断面積の予測である。反応断面積測定では uud knockout プロセスを除いた他のプロセスでは同様の傾向を持っているため、それぞれのプロセスを分離することは難しい。さらに COMPASS のミュオンプログラムでは反跳陽子検出器 (RPD) が装備されていないため、後方散乱されたイベントは exclusivity を断定するのが難しくなる。実験データが不足しているため、この後方散乱領域での非対称度の予測の信頼度も高いとは言えない。しかし ϕ 中間子生成における非対称度は核子内のストレンジ存在比に非常に敏感で、前方散乱されたイベントでも非常に大きな非対称が観測できると考えられている。上図右の各ラインは核子内にストレンジクォークが 0% (実線)、0.25% (破線)、1.0% (1 点鎖線) 存在していると仮定した際に観測されるであろう非対称度である。

そこで我々の解析の目的は $\gamma^* + N \rightarrow \phi + N$ の非対称度を $\mu + N \rightarrow \mu + \phi + N$ 反応を通してスタディすることにある。 ϕ 中間子は $\phi \rightarrow K^+ K^-$ の崩壊過程の分岐比が 49.2% と最も大きい。崩壊粒子を同定する検出器 Ring Imaging Cherenkov detector (RICH) での同定条件を厳しくし、 ϕ 中間子の崩壊によって生成された K 粒子のイベントのみを選択し再構築した。また仮想光子が原子核でなく、原子核内の核子と相互作用する incoherent イベントを選択するために仮想光子の進行方向に対する横運動量 P_t^2 の小さなイベントを取り除いた。そして最重要である Exclusivity の決定は、反跳陽子を検出していないため Missing Energy を用いて行った。その際、最大限バックグラウンドイベントを抑えるため、非常に厳しいカットを用いた。この手法の場合ある程度の統計を失うことになるが、不透明なバックグラウンドイベントから生じる非対称度を抑えることができる。主に考えられるバックグラウンドとしては、散乱の際に標的核子が励起して発生するデルタ粒子や N^* 粒子イベント、そして Semi-Inclusive イベントである。こうした厳しいイベントの選択にもかかわらず、最終的に COMPASS のデータを用いて約 15 万 (${}^6\text{LiD}$ データ)、約 5 万 (NH_3 データ) のかなり高統計の ϕ 中間子イベントが抜粋に成功した。

非対称度はデータを収集した偏極ターゲットの違い (${}^6\text{LiD}$ と NH_3) を考慮し二つに分けてまとめ、 Q^2 、 x_{bj} 、そして P_t^2 などの運動学的変数の依存性を確かめる。 ${}^6\text{LiD}$ で収集したデータは 4 年分あるので非常に小さい統計誤差で精密に決定できるが、その一方 NH_3 で収集したデータは 1 年分しか存在しないので比較的統計誤差が大きくなってしまう。COMPASS では再び偏極 NH_3 ターゲットを用いてデータ収集を行う計画があるので将来的にはさらなる統計データが期待できる。非対称度決定にあたり最も大きな難関としてバックグラウンドイベントによる非対称度がある。複雑かつ巨大な偏極ターゲットシステムを取り囲み反跳陽子を検出するための検出器の開発には、新たな発想と技術を必要とし実現にはまだしばらく時間がかかるであろうと思われる。そのため現在高エネルギー領域では Exclusivity の妥当性に不安を抱えている現実は避けられない。このような困難な状況の中で我々の非対称度の解析の結果が固まりつつある。

核子内のストレンジを観測するためにはもっと低い光子のエネルギーを用いた方が良いという意見もある。実際 COMPASS ではより高エネルギー領域に焦点を当てているために、我々のもつデータは平均 60 GeV 程度のエネルギーをもつ光子のものである。これにより非対称度が抑制されている可能性がある。しかしこれほど広い運動学変数領域において十分な統計をもつ ϕ 中間子を用いた非対称度データは過去にほぼ存在しない。そのため我々の得る結果が今後様々な理論の構築に役立つことは明らかであると期待できる。

3. 日本グループ分担部分の状況と成果

3-1. 偏極ターゲット

核スピン偏極標的は COMASS 実験ミュオンプログラムで最も重要な装置のひとつである。COMPASS 実験で用いる核スピン偏極標的装置の概略を図 3-1-1 に示す。ビームは図の左方から入射する。標的セル (①②③) を囲むように、2.5 T ソレノイド 0.6 T ダイポール複合超伝導電磁石 (④)、その内側に動的核偏極法を行うために照射するマイクロ波のキャビティが配置されている。標的セルは、 ^3He - ^4He 型希釈冷凍機に接続されており、⑤より導入され⑥よりポンプにより吸い出される ^3He の循環によって、50 mK 程度の低温になる。標的のスピン偏極度は、セルに取り付けられている 10 個のピックアップコイルにより、核磁気共鳴法によって測定される。

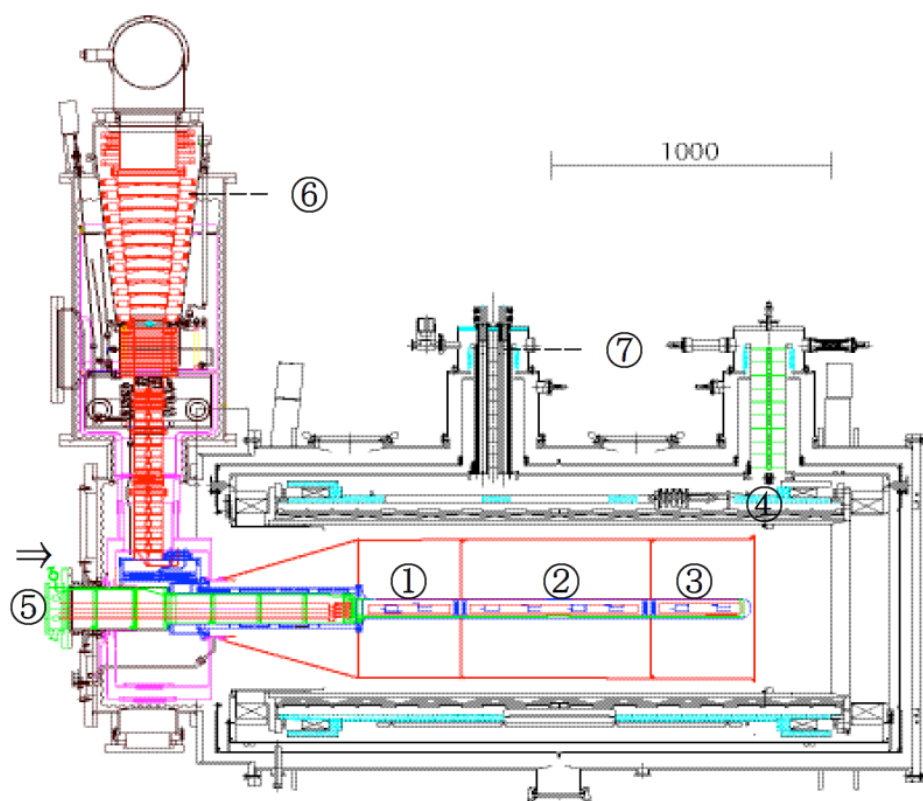


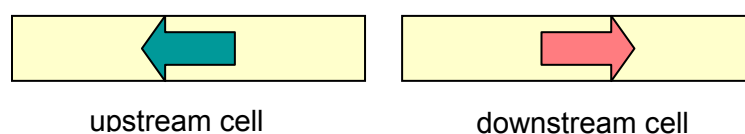
図 3-1-1 COMPASS 偏極標的装置

CERN に常駐する偏極標的チームの人員は 6 人、このうち日本からの派遣人員は 3 人で、2006 年の装置の大幅なアップグレード、2007 年の陽子偏極標的のセットアップ及び運転、性能評価にあたってきた。

<2006 年の活動>

COMPASS 実験は、SMC 実験で使われた超伝導電磁石を 2004 年まで再利用してきた。これは、実験計画段階で提案されていた COMPASS 実験用磁石より小さく、反応後生成する粒子の検出可能な最大射出角度（アクセプタンス）を 69 mrad に制限するものであった。2006 年度には、計画通りの開口角 180 mrad の超伝導磁石を設置し、実験効率を向上させた。この変更に伴って、磁石のすぐ内側に設置するマイクロ波のキャビティもサイズ変更のため、作り直す必要があった。そこで、標的セルを 2 セルから 3 セルに増やし、セルの位置によるアクセプタンスの差異に起因した系統誤差を抑えることが提案され、マイクロ波キャビティは 3 つの室から成る構造となった。

2002 - 2004 年



2006 , 2007年

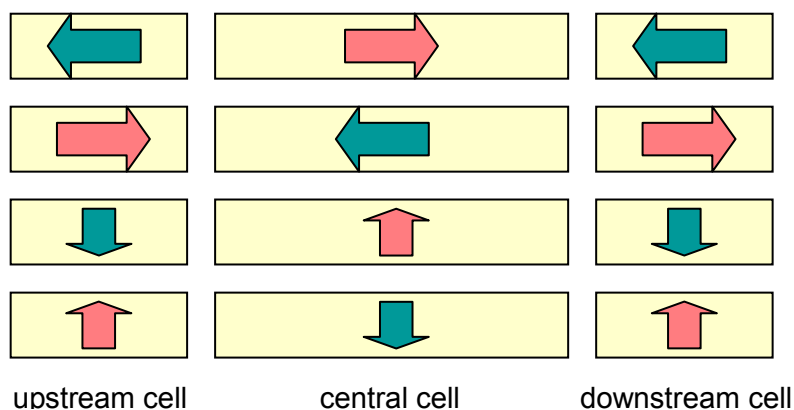


図 3-1-2 偏極標的セルでのスピン偏極の方向

図 3-1-2 のように、最上流のセルと最下流のセル内の標的物質核は、同じ向きに偏極させるため、一つのマイクロ波発振器から二つのキャビティへ分波し照射した。

以上のような装置の改良、再構築の後、2004 年に使用した標的物質を偏極させてみた結果、最高到達偏極度、動的偏極を行うのにかかる時間等、旧電磁石で得られた偏極標的としての性能を全く損なうことなく、アクセプタンスの拡大に成功した。また、一年間のランを通して、安定的に装置を運転させることができた。



新たな超伝導電磁石を実験ホール内にインストールしている様子

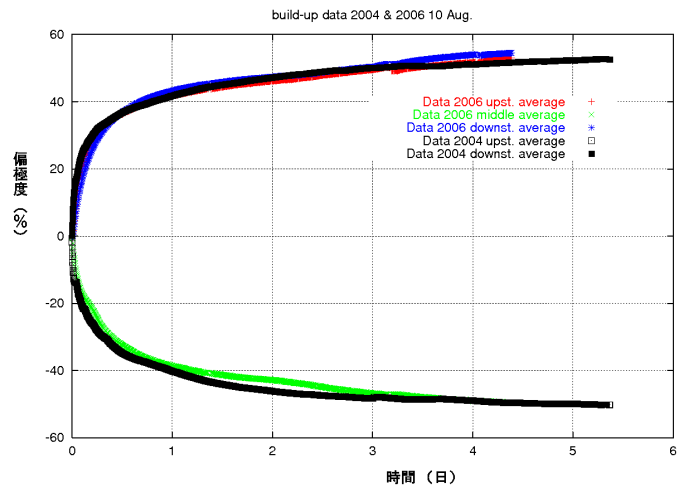


図 3-1-3 2004年と2006年の偏極性能較

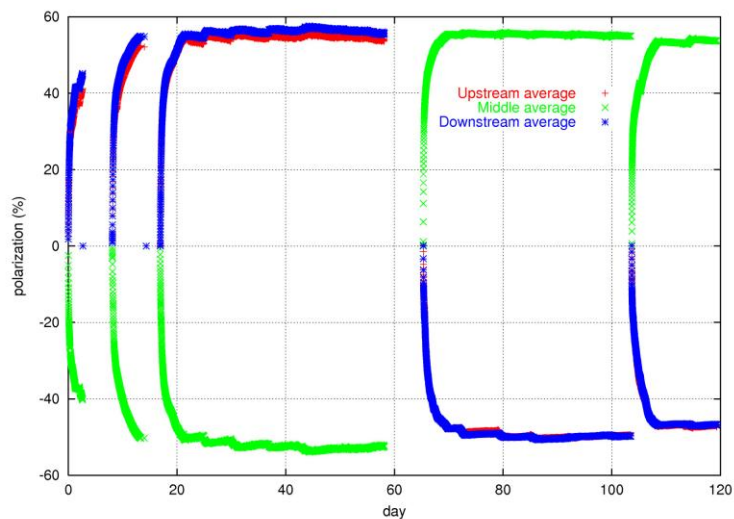


図 3-1-4 1年間のランを通した偏極標的運転の記録

<2007年の活動>

2007年は、2006年に設置した新しいマグネットを引き続き使い、標的を ${}^6\text{LiD}$ 重陽子標的から、アンモニア陽子標的に替えて実験を行った。このため、陽子のスピン偏極度を測定する際、標的セル周りなど標的物質外に存在する偏極しない陽子からのバックグラウンド信号が問題となった。複数の手法による解析が行われ、バックグラウンド信号の強度測定による正確な較正の結果、最終的に信頼できる測定が可能となった。到達した最高偏極度は、正偏極、負偏極ともに90%を超え、十分な性能が得られた。また、ビームと直交する方向に

偏極した標的で実験を行うトランスバース・ランは 1000 時間を越え、0.6 T のダイポール磁石で偏極保持をする性能も要求されたが、トランスバース状態で約 1 週間の偏極度保持が可能であったため、再偏極による時間の損失を抑えることが出来た。

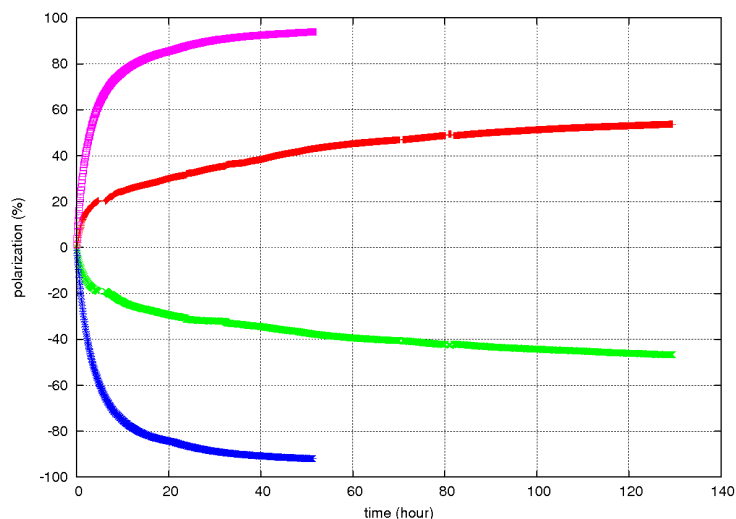


図 3-1-5 アンモニア偏極標的と ${}^6\text{LiD}$ 偏極標的の偏極度成長曲線

	標的物質	最高偏極度 +	最高偏極度 -	アクセプタンス
2002	${}^6\text{LiD}$	56 %	-52 %	69 mrad
2003		56 %	-50 %	
2004		56 %	-51 %	
2006		56 %	-52 %	
2007	NH_3	93 %	-95 %	120 mrad

表 3-1-1 COMPASS 実験での偏極標的の比較

<2008 年、2009 年の活動>

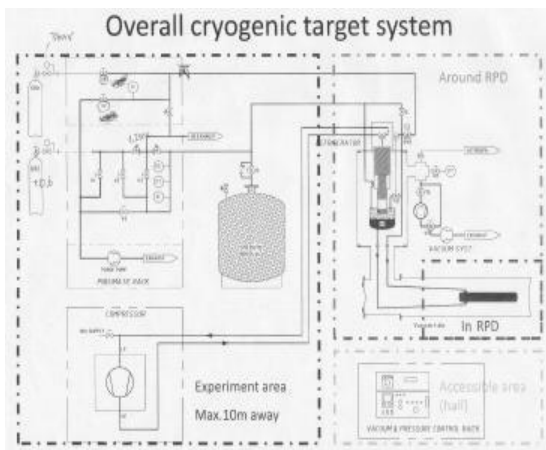
2008 年、2009 年は、ハドロンビームと液体水素標的を使った実験プログラムであったため、偏極標的装置はビームラインから撤収した。その間、2010 年の偏極標的ランの再開に向けてアップグレードの準備を行った。まず、あたらしいハイパワーのマイクロ波発振管、およびその電源を購入し動作試験を行い、さらにハイパワーに対応したアッテニューエーターの開発を行った。これにより、最上流お

よび最下流のセルに照射するマイクロ波の分波がよりよいバランスになる。また、希釈冷凍機の予冷システムである 4He の減圧冷却のためのポンプシステムの新調を行った。偏極度測定のための **NMR** のエレクトロニクスをハイスピード化した。

3-2 水素ターゲット

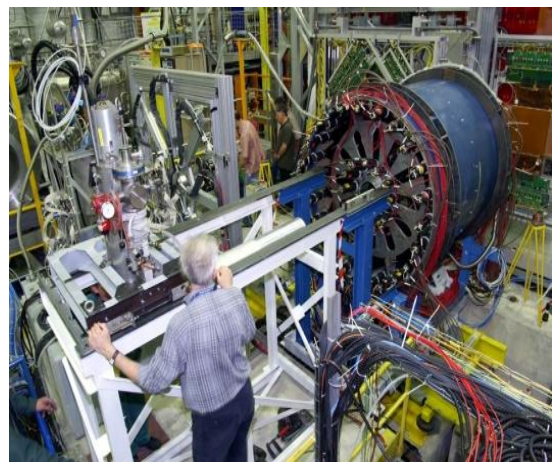
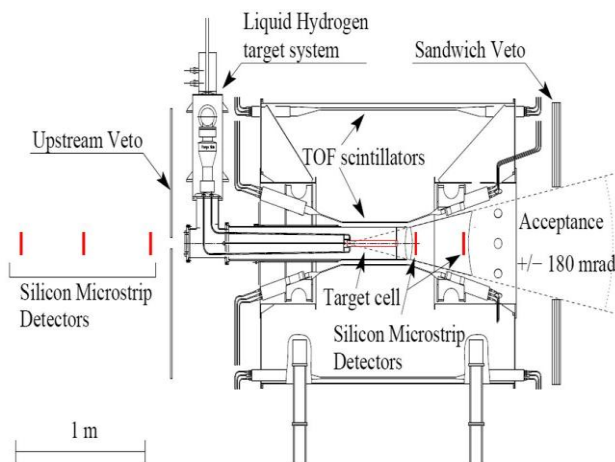
2008年初春から2009年の秋までCOMPASSではハドロンプログラムが実施された。このプログラムではパイ粒子ビームと水素ターゲットが使用された。そこで我々COMPASS日本グループは水素ターゲットシステムの管理、運営、改善のために大きく貢献した。

システム自体はCERNでの他実験で以前使用されてものをCERN職員の協力を得てテスト・再構築して再使用した。850Lの水素ガスタンクに接続されたターゲットセルを冷却機内に設置し、 ^4He 圧縮機で7時間程度かけて冷却し水素を凝縮させ溜めるというシンプルなシステムである。ターゲットセルは長さ40cm、直径3.5cm、厚さ $250\mu\text{m}$ の円柱状でありマイラー製である。実験前後にはリークチェックや水素のリーク量の見積もりを入念に行い、システムがもつ性能を最大限に引き出す努力を行った。



水素は可燃性があり、多くのエレクトロニクスに囲まれた実験棟内での使用には危険を伴う。実験中は水素の圧力・温度そして断熱真空などを24時間モニターし、水素ターゲットが安全且つ安定に使用できるように日本グループが責任を持って管理・運営を行った。

図3-2-1 水素ターゲットシステム



また現状維持での管理・運営だけに留まらず、水素ターゲットシステムの性能向上を目指した努力も行った。現システムでのターゲットセルを包囲する真空ジャケットはアル

ミニウム製である。水素ターゲットは実験中には反跳陽子を検出するために使われる検出器(Recoil Proton Detector:RPD)内にすっぽりと包囲される形で設置される。すなわちビームにより散乱された陽子は RPD に検出される前に真空ジャケットを通過していくことになる。この真空ジャケットの通過による反跳陽子のエネルギー損失を最小化してやれば、RPD で捕らえることのできるイベント数が増加できる。

この目的のために日本グループはアルミニウムに変わる新素材を用い、より物質量の小さい真空ジャケットの企画・開発・構築を行った。新素材としてはアルミニウムより密度の小さい Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) を選定した。COMPASS の水素ターゲットをすっぽりと覆うために長さ 50cm、直径 37cm、厚さ 1.0mm の新しい真空ジャケットを製作した。これにより RPD が検出可能な反跳陽子の運動量移行閾値を約 10%程度向上させることが期待できる。

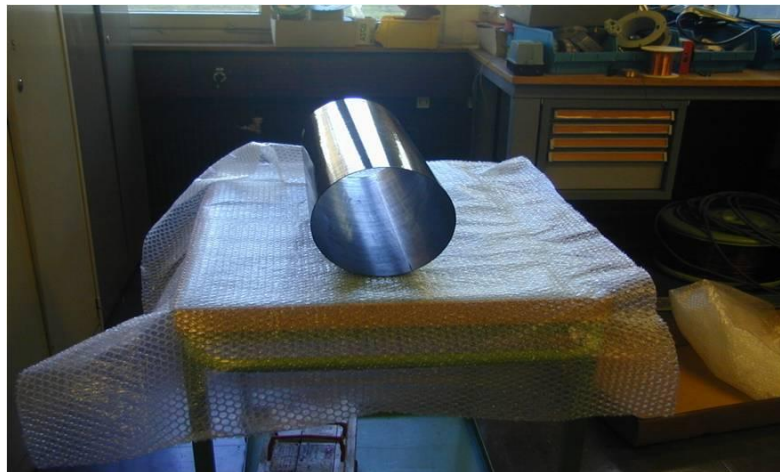


図 3-2-2 開発・作成した CFRP 製の水素ターゲット用真空ジャケット

この真空ジャケットの開発は 2007 年度終わり頃から始まり完成するまでに時間を要したため、2008・2009 年のハドロンプログラムでは使用されなかった。しかし COMPASS では 2012 年以降に GPD の実験が計画されており、長さ 2.0m の水素ターゲットが使用される予定になっている。今回のハドロンプログラムで使用されたターゲットの長さに比べ非常に長いため、多数のイベントが期待できる。それを約 10%も向上させることができるアイデアと技術を実現した日本グループによる今回の試みは、今後の実験において極めて多大な貢献をすることになるであろう。

4. その他の活動

4-1. 環太平洋高エネルギースピ物理学シンポジウム

2009年9月15日-18日に山形市の遊学館で第7回環太平洋高エネルギースピ物理学シンポジウムを主催した。この国際シンポジウムは、2年に1度行われており、核子スピ構造について理論的、実験的に議論が行われている。近年では特にQCDを通して得られる核子内部の2次元、3次元的空间分布、運動量分布が注目されており、今回は国内外より約50名が参加し、理論から9（招待講演5）、実験から19（招待講演5）の発表のもと活発な議論がなされた。また、このシンポジウムでは、国内外の若手研究者の参加を積極的にサポートしており、活気あふれるシンポジウムとなった。なお、今回のシンポジウムは、山形大学、東工大、理研仁科センターの後援、井上財団と山形コンベンションビュエーロの協力も得て行われた。

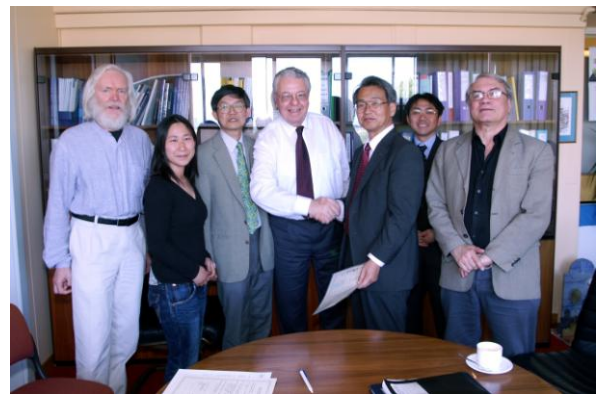


4-2. CERN との研究協力協定

スイスのジュネーブで、1949年に設立されたCERNは、世界でも有数の高エネルギー粒子加速器群を有する素粒子原子核研究機関として、世界でも中心的な存在で、これまでに、複数のノーベル物理学賞が得ています。また、WWW (World Wide Web) の発祥の地としても、よく知られています。最近ではLHC (Large Hadron Collider) と呼ばれる世界最高エネルギーの衝突型陽子加速器を建設し、素粒子物理学をリードしている先端的な研究機関です。このCERNにおいて、12カ国の国際共同研究として素粒子の微細構造を調べるCOMPASSが行われており、山形大学を中心とした日本グループが研究に貢献してきました。今後、さらに研究の進展をはかり、山形大学とCERNの間の学術交流を促進するために、包括的な研究協力協定を締結することになりました。



山形大学において協定に署名する結城章夫学長、岩田高広（後列左）、小山清人理事（後列右）



CERNでの調印式後の記念写真。左から John Ellis 博士 (CERN)、近藤薫 (山形大学)、岩田高広 (山形大学)、Robert Aymar CERN 総研究所長、小山清人理事、門叶冬樹准教授 (山形大学)、Alain Magnon 博士 (COMPASS スポンサー、SACLAY, CEA/DAPNIA)

この協定の締結には、CERNの関係者に大変お世話になり、感謝しています。長年の共同研究者であった元主任研究員で non-member-state 担当委員会委員の Tapio Niinikosky 博士には、CERNと窓口としてお骨折りいただきました。また、同委員長である John Ellis 博士が CERN 首脳部と交渉していただいた経緯があります。2008年5月29日に結城山形大学長による協定書へのサインの後、6月20日には、小山清人理事（国際担当）、岩田高広らがCERNを訪問し、Robert Aymar 総研究所長、John Ellis 博士ら関係者立ち会いの下、調印式が行われました。この協定により、山形大学教員2名が常駐しているCERN内のオフィスを窓口として、本学研究者・学生の国際共同研究への参加、学術情報の交換などCERNとの学術交流が活発になることが期待されます。

4-3. 山形大学ヨーロッパサテライト

山形大学ヨーロッパサテライトは、ヨーロッパ諸国と山形大学の国際交流を推進するための拠点として、山形大学から COMPASS 実験のために CERN へ派遣している常駐人員およびそのオフィスを利用するかたちで、2008 年に設置された。ジュネーブはヨーロッパの地理的中心で国連ヨーロッパ本部をはじめ、数多くの国際機関を擁する国際都市でもあり、学生が国際性を養うための研修地として最適な場所の 1 つである。

この組織は、現在のところ

1. 山形大学とヨーロッパの諸大学・研究所間の国際交流
 2. ヨーロッパにおける学生と大学職員の研修，教育支援
 3. CERN 見学者へのガイド
- を主な活動としている。

<学部生海外研修実績>

CERN 見学(LHC ATLAS, ALICE, AD, CCC 等)、
国連ヨーロッパ本部見学(会議場、国連図書館等)

2009 年 一名

2010年 一名

<CERN 訪問受け入れ>

2008 年 7 件 山形大学、日本大学短期大学部、文部科学省研究開発局原子力計画課、核融合科学研究経営企画課、中部大学、茨城県職員、日本学術振興会研究助成課

2009 年 3 件 文部科学省大臣官房審議官、文部科学省研究振興局基礎基盤研究課、高エネルギー加速器研究機構、日本学術振興会研究助成課

4-4. 総合スピ科学研究所

本研究所は、山形大学のバーチャル研究所として設立されました。これは、スピをキーワードとして関連する研究者を結集し、学際的なネットワークを活用し、スピを用いた新たな応用研究を進展させるとともに、スピの起源を探るなどの基礎研究を推進することを目的としたものです。平成19年12月に主に山形大学の理学部、工学部の研究者10名によって設立され、その後、農学部の教員も参加し、現在15名が活動に加わっています。これまでに、国際シンポジウム、講演会の開催、概算要求の提出、スピ関連基盤設備導入などの活動を行ってきました。この特別推進研究では、非常に重要な研究手段となっている偏極ターゲットの開発には、電子スピ共鳴、核磁気共鳴など素粒子スピに関連する様々な技術が必要になります。私たちはこの総合スピ科学研究所のネットワークによって、部局や専門分野を超えてスピを扱う研究者との交流を図ることによって得た異分野の情報入手し、それを偏極ターゲットの開発に活かして来ました。その成果の一つとして、平成21年度に理学部に「高分解能電子スピ共鳴装置」と「フーリエ変換型核磁気共鳴装置」を導入される運びになりました。これらの装置を用いて、偏極ターゲットの基礎開発がさらにすすめられることが期待されます。また、今後は、この研究所を核にして専任教員5名、兼任教員10名程度からなる全学共同利用の研究組織である「総合スピ科学センター」の設立をめざし概算要求を行っています。

総合スピ科学研究所の構成 (2010.3月)			
氏名	部局・学科・講座等	専門分野	備考
岩田高広	理学部・物理学科	核子スピ構造	研究所長
郡司修一	理学部・物理学科	高エネルギー天文学	
宮地義之	理学部・物理学科	高エネルギー物理学	
北浦守	理学部・物理学科	蛍光体科学	
大西彰正	理学部・物理学科	光誘起欠陥生成	
亀田恭男	理学部・物質生命化学科	有機合成化学	
伊藤廣記	理学部・物質生命化学科	有機合成化学	
栗山恭直	理学部・物質生命化学科	複雑系物質学	
崎山博史	理学部・物質生命化学科	錯体化学	
吉田浩司	基盤教育院	高エネルギー物理学	
高橋 豊	工学部・電気電子工学科	半導体工学	
稲葉信幸	工学部・電気電子工学科	磁性デバイス	
我妻忠雄	農学部・生物資源学科	植物栄養学・土壌学	
五十嵐喜治	農学部・生物資源学科	食品・栄養学	
西澤 隆	農学部・生物資源学科	野菜生産学	

5. その他の関連研究経費

- ・財団法人 山田科学振興財団 (研究援助金)
平成 17 年度—平成 18 年度 2,000,000 円
- ・高エネルギー加速器研究機構 (大学等連携支援事業)
平成 18 年度 3,500,000 円
- ・日本学術振興会 (科学研究補助金・基盤研究 C)
「COMPASS 実験によるハドロン構造とエキゾチックハドロンの研究」
平成 18-19 年度 松田達郎 (宮崎大学・准教授) 3,400,000 円 (直接経費)
- ・日本学術振興会 (二国間交流事業共同研究)
平成 19 年度—平成 20 年度 2,500,000 円/年
- ・文部科学省大学教育の国際化加速プログラム (海外先進教育研究実践支援)
平成 20 年度 堂下 典弘 (山形大学・助教) 2,904,000 円
平成 20 年度 近藤 薫 (山形大学・助教) 2,914,000 円
- ・日本学術振興会 (科学研究補助金・基盤研究 C)
「コンパススペクトロメータによるドレル・ヤン反応測定のための偏極標的の改造」
平成 20-21 年度 堀川直顕 (中部大学大学・教授) 3,000,000 円 (直接経費)
- ・文部科学省 (科学研究補助金・若手研究 B)
「大強度ハドロンビーム対応型偏極陽子標的の開発」
平成 21 年度 堂下 典弘 (山形大学・助教) 1,600,000 円 (直接経費)
- ・山形大学 (戦略的研究プロジェクト任期付教員支援)
平成 19 年度—平成 20 年度 近藤 薫 (山形大学・助教) 5,000,000 円/年
- ・山形大学 (YU 海外研究グローイングアッププログラム)
平成 21 年度 近藤 薫 (山形大学・助教) 3,000,000 円
- ・山形大学 (YU-COE : 戦略的研究経費)
平成 21 年度 30,000,000 円

6. 国際会議等での発表

6-1. 国際会議、国際ワークショップ等での発表

- [1] Joint Meeting of The PAC Region Particle Physics Communities
Oct.30–Nov.3, 2006, Sheraton Waikiki Hotel, Hawaii
Takahiro Iwata: “*Upgrade of the polarized target and the spectrometer of COMPASS*”
Kaori Kondo: “*Measurement of $\Delta G/G$ to study gluon spin contribution*”
- [2] 3rd Meeting Polarized Nucleon Targets for Europe, in the 6th European Framework Program, 2-4 February 2006, Rech Germany
Norihito Doshita: “*Heat input into the target material*”
- [3] The 6th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics
July. 30–Aug. 2, 2007, University of British Columbia, Canada
Takahiro Iwata: “*Results for Transverse Spin Physics at COMPASS*”
Norihito Doshita: “*Measurement of the Gluon Polarization at COMPASS*”
- [4] International Workshop on Polarized Sources, Target & Polarimetry
Sep. 10–14, 2007, Brookhaven National Laboratory, New York
Norihito Doshita: “*COMPASS Target*”
Hideaki Uematsu: “*Dynamic Nuclear Polarization of Liquid He-3 with Zeolite*”
- [5] 国際シンポジウム「偏極標的とその応用」
2008年2月29日–3月1日、月岡ホテル、上山市
Norihito Doshita: “*Polarized Target for COMPASS Drell-Yan program*”
Kota Toyama: “*Development of Polarization proton target that used copolymerization Polymer*”
Akira Tanaka: “*DNP for Polarizing liquid He3*”
- [6] 59th RIBF Nuclear Physics Seminar
2008年4月8日、理化学研究所、和光市
Takahiro Iwata: “*COMPASS Drell-Yan Program*”
- [7] Symmetries and Spin (Spin-Praha-2008)
July. 20–26, 2008, Charles University, Prague
Norihito Doshita: “*Past and future of the COMPASS polarized target*”
- [8] 第7回環太平洋高エネルギースピソ物理学国際会議
2009年9月15日–9月18日、遊学館、山形市
Norihito Doshita: “*Polarized Drell-Yan measurement at COMPASS*”

- [9] The 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the APS and JPS
Oct.13–17, 2009, Hilton Waikoloa Village, Hawaii
Takahiro Iwata:
“Measurements of the Gluon Polarization in the Nucleon at COMPASS”
Tatsuro Matsuda:
“Quark helicity distributions from DIS and SIDIS at COMPASS”
Norihito Doshita:
“Tranaverstiy results and polarized Drell-Yan measurement at COMPASS”
- [10] KEK 理論センター研究会 「High-energy hadron physics with hadron beams」
2010年1月6日–1月8日、KEK, つくば市
Norihito Doshita: “*Future Drell-Yan program of the COMPASS collaboration*”
- [11] New Frontiers in QCD - Kyoto, Japan, January 18 - March 19, 2010
Takahiro Iwata: “Hadron spectroscopy at COMPASS – exotic states at COMPASS” (invited)

6-2. 日本物理学会講演

- [1] Upgrade of the polarized target and the spectrometer of COMPASS— Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities
2006年10月31日, シェラトンワイキキホテル (ハワイ)
報告者: 岩田 高広
堀川直顕、近藤 薫、長谷川 武夫、石元 茂、松田 達郎、堂下 典弘
堀川 壮介、COMPASS 国際共同研究グループ

- [2] Measurements for Transversity with a Transversely Polarized Target— Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities
2006年10月31日, シェラトンワイキキホテル (ハワイ)
報告者: 松田 達郎
堀川直顕、近藤 薫、長谷川 武夫、石元 茂、堂下 典弘、岩田 高広
堀川 壮介、COMPASS 国際共同研究グループ

- [3] COMPASS での偏極ドレクセル測定計画
2007年3月25日, 首都大学東京南大沢キャンパス
報告者: 岩田 高広
堀川 壮介、堀川 直顕、近藤 薫、長谷川 武夫、石元 茂、松田 達郎、堂下 典弘、COMPASS 国際共同研究グループ

- [4] COMPASS でのグルーオンスピン寄与の研究 II —high Pt ハドロンペア事象での $\Delta G/G$ 測定—
2007年3月25日, 首都大学東京南大沢キャンパス
報告者: 松田 達郎
長谷川 武夫、岩田 高広、近藤 薫、堂下 典弘、堀川 直顕、石元 茂、堀川 壮介、COMPASS 国際共同研究グループ

- [5] アップグレードされた COMPASS 偏極ターゲットと物理データへのインパクト
2007年3月25日, 首都大学東京南大沢キャンパス
報告者: 近藤 薫
岩田 高広、堀川 壮介、堀川 直顕、長谷川 武夫、石元 茂、松田 達郎、堂下 典弘、COMPASS 国際共同研究グループ

- [6] COMPASS でのグルーオンスピン寄与の研究 I —オープンチャート事象での $\Delta G/G$ 測定
2007年3月25日, 首都大学東京南大沢キャンパス
報告者: 堀川 直顕
岩田 高広、堀川 壮介、近藤 薫、長谷川 武夫、石元 茂、松田 達郎、堂下 典弘、COMPASS 国際共同研究グループ

- [7] ^3He 偏極標的のためのゼオライト中での液体 ^3He の能動核偏極の研究
2007年9月24日, 北海道大学札幌キャンパス
報告者: 田中 昂
- [8] COMPASS 偏極 Drell-Yan 実験のビームテスト
2008年3月26日, 近畿大学本部キャンパス
報告者: 堂下 典弘
石元 茂、岩田 高広、近藤 薫、長谷川 武夫、堀川 直顕、松田 達郎、
道上 琢磨、吉田 浩司、COMPASS 国際共同研究グループ
- [9] 横偏極した偏極標的を用いた COMPASS の最近の結果
2008年3月26日, 近畿大学本部キャンパス
報告者: 松田 達郎
長谷川 武夫、岩田 高広、近藤 薫、堂下 典弘、道上 琢磨、堀川 直顕、
石元 茂、堀川 壮介、COMPASS 国際共同研究グループ
- [10] 縦偏極した偏極標的を用いた COMPASS の最近の結果
2008年3月26日, 近畿大学本部キャンパス
報告者: 岩田 高広
堂下 典弘、近藤 薫、道上 琢磨、堀川 直顕、堀川 壮介、長谷川 武夫、
松田 達郎、石元 茂、COMPASS 国際共同研究グループ
- [11] ^3He 偏極標的のためのゼオライト中での液体 ^3He の能動核偏極の研究
2008年3月23日, 近畿大学本部キャンパス
報告者: 植松 秀章
岩田 高広、加藤 静吾、吉田 浩司、田島 靖久、栗山 恭直、道上 琢磨、
宍戸 智浩、田中 昂、外山 幸太、大泉 智
- [12] 横偏極標的を用いた COMPASS 実験の最近の結果
2008年9月23日, 山形大学小白川キャンパス
報告者: 松田 達郎
長谷川 武夫、岩田 高広、近藤 薫、堂下 典弘、道上 琢磨、堀川 直顕、
石元 茂、堀川 壮介、吉田 浩司、COMPASS 国際共同研究グループ
- [13] 縦偏極した偏極標的を用いた COMPASS の最近の結果
2008年9月23日, 山形大学小白川キャンパス
報告者: 堂下 典弘
石元 茂、岩田 高広、近藤 薫、長谷川 武夫、堀川 壮介、堀川 直顕、
松田 達郎、道上 琢磨、吉田 浩司
- [14] COMPASS 偏極標的 2002-2007
2008年9月23日, 山形大学小白川キャンパス
報告者: 近藤 薫
石元 茂、岩田 高広、堂下 典弘、長谷川 武夫、堀川 直顕、松田 達郎、
道上 琢磨、COMPASS 国際共同研究グループ

- [15] COMPASS 実験におけるアンモニア標的の核偏極度解析
2008年9月23日, 山形大学小白川キャンパス
報告者: 道上 琢磨
岩田 高広、堂下 典弘、近藤 薫、堀川 直顕、長谷川 武夫、松田 達郎
石元 茂、COMPASS 国際共同研究グループ
- [16] The 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the APS and JPS
Oct.13-17, 2009, Hilton Waikoloa Village, Hawaii
報告者: 岩田 高広、松田 達郎、堂下典弘、国際共同研究グループ
- [17] COMPASS によるおける陽子に対する偏極構造関数 g_{1p} の測定
2010年3月22日, 岡山大学津島キャンパス
報告者: 松田 達郎
岩田 高広、堂下 典弘、近藤 薫、堀川 直顕、長谷川 武夫、松田 達郎
石元 茂、COMPASS 国際共同研究グループ
- [18] COMPASS での偏極ドレル・ヤン測定のためのビームテストの結果
2010年3月22日, 岡山大学津島キャンパス
報告者: 堂下 典弘、
岩田 高広、堂下 典弘、近藤 薫、堀川 直顕、長谷川 武夫、松田 達郎
石元 茂、COMPASS 国際共同研究グループ
- [19] 2010/2011 ランのための COMPASS 偏極標的のアップグレード
2010年3月22日, 岡山大学津島キャンパス
報告者: 近藤 薫
岩田 高広、堂下 典弘、近藤 薫、堀川 直顕、長谷川 武夫、松田 達郎
石元 茂、COMPASS 国際共同研究グループ
- [20] COMPASS 偏極標的マイクロ波系のための高出力対応 E バンド可変減衰器の開発
2010年3月23日, 岡山大学津島キャンパス
報告者: 松田 洋樹
岩田 高広、堂下 典弘、近藤 薫、堀川 直顕、長谷川 武夫、松田 達郎
石元 茂、松田 洋樹、COMPASS 偏極ターゲットチーム

7. 論文リスト

7. 発表論文

(NC : 2010年3月時の SPIRES での引用回数)

(物理データ関連 : 2006 以後に出版された査読付き論文のみ)

- [1] **Gluon polarization in the nucleon from quasi-real photoproduction of high- $p(T)$ hadron pairs.** NC=72
Phys.Lett.B633:25-32,2006.
By COMPASS Collaboration, E.S.Ageev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi, T.Toeda and other COMPASS Collaboration members.
- [2] **The Deuteron Spin-dependent Structure Function $g_1(d)$ and its First Moment.** NC=78
Phys.Lett.B647:8-17,2007.
By COMPASS Collaboration, V.Yu.Alexakhin, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda and other COMPASS Collaboration members
- [3] **A New measurement of the Collins and Sivers asymmetries on a transversely polarised deuteron target.** NC=96
Nucl.Phys.B765:31-70,2007.
By COMPASS Collaboration, E.S.Ageev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Toeda and other COMPASS Collaboration members
- [4] **The COMPASS experiment at CERN** NC=48
Nucl.Instrum.Meth.A577:455-518,2007
By COMPASS Collaboration, P.Abbon, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi, T.Toeda and other COMPASS Collaboration members
- [5] **Spin asymmetry $A_1(d)$ and the spin-dependent structure function $g_1(d)$ of the deuteron at low values of x and Q^{*2} .** NC=24
Phys.Lett.B647:330-340,2007.
By COMPASS Collaboration, V.Yu.Alexakhin, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi and other COMPASS Collaboration members

- [6] **Double spin asymmetry in exclusive ρ^0 muoproduction at COMPASS**
Eur.Phys.J.C255-265,2007
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi and other COMPASS Collaboration members
- [7] **The Polarised Valence Quark Distribution from semi-inclusive DIS.** NC=24
Phys.Lett.B660:458-465,2008.
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda and other COMPASS Collaboration members.
- [8] **Collins and Sivers asymmetries for pions and kaons in muon-deuteron DIS.**
Phys.Lett.B673:127-135,2009
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda and other COMPASS Collaboration members.
- [9] **Flavour Separation of Helicity Distributions from Deep Inelastic Muon-Deuteron Scattering.** NC=4
Phys.Lett.B680:217-224,2009.
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.
- [10] **Measurement of the Longitudinal Spin Transfer to Lambda and Anti-Lambda Hyperons in Polarised Muon DIS.** NC=3
Eur.Phys.J.C64:171-179,2009.
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.
- [11] **Gluon Polarisation in the Nucleon and Longitudinal Spin Asymmetries from Open Charm Muoproduction** NC= 5
Phys.Lett.B676:31-38,2009.
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.
- [12] **Observation of a $J^{PC} = 1^{-+}$ exotic resonance in diffractive dissociation of 190 GeV/c π^- into $\pi^-\pi^+\pi^+$**
CERN-PH-EP/2009-018, hep-ex/0910.5842,
Submitted to Phys.Rev.Lett.
 By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.

- [13] **The spin-dependent structure function of the proton g_1^p and a test of the Bjorken Sum Rule**
CERN-PH-EP/2010-001, hep-ex/1001.4654, submitted to Phys.Lett.B
By COMPASS Collaboration, M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.

(実験技術関連)

- [1] **First results of the large COMPASS Li-6_D polarized target.**
Nucl.Instrum.Meth.A498:101-111,2003.
J. Ball, Guenter Baum, P. Berglund, I. Daito, N. Doshita, F. Gautheron, S. Goertz, J. Harmsen, T. Hasegawa, J. Heckmann, N. Horikawa, T. Iwata, Yu. Kiselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, J.M. Le Goff, A. Magnon, A. Meier, W. Meyer, E. Radtke, G. Reicherz, N. Takabayashi
- [2] **Polarization measurement in the COMPASS polarized target.**
Nucl.Instrum.Meth.A526:70-75,2004
K. Kondo, J. Ball, G. Baum, P. Berglund, N. Doshita, F. Gautheron, S. Goertz, T. Hasegawa, N. Horikawa, S. Ishimoto, T. Iwata, Y. Kiselev, J. Koivuniemi, J.M. LeGoff, A. Magnon, T. Matsuda, W. Meyer, G. Reicherz
- [3] **Performance of the COMPASS polarized target dilution refrigerator.**
Nucl.Instrum.Meth.A526:138-143,2004
N. Doshita, J. Ball, G. Baum, M. Finger, F. Gautheron, S. Goertz, T. Hasegawa, N. Horikawa, S. Ishimoto, T. Iwata, Y. Kiselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, T.Matsuda, W. Meyer, S. Neliba, G. Reicherz
- [4] **The COMPASS polarized target.**
Czech.J.Phys.55:A367-A374,2005
N. Doshita, J. Ball, G. Baum, M. Finger, F. Gautheron, S. Goertz, T. Hasegawa, N. Horikawa, S. Ishimoto, T. Iwata, Y. Kiselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, T.Matsuda, W. Meyer, S. Neliba, G. Reicherz
- [5] **On the large COMPASS polarized deuteron target.**
Czech.J.Phys.56:F295-F305,2006.
J. Ball, J.M. Le Goff, A. Magnon, C. Marchand, G. Baum, F. Gautheron, N. Doshita, S. Goertz, J. Heckmann, C. Hess, Yu. Kiselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, W. Meyer, G. Reicherz, M. Finger, T. Hasegawa, T. Matsuda, N.Horikawa, S.Ishimoto, T. Iwata, A. Srnka.
- [6] **The COMPASS polarized target in 2006 and 2007.**
AIP Conf.Proc.980:307-311,2008.
N. Doshita, J. Ball, G. Baum, F. Gautheron, S. Goertz, T. Hasegawa, J. Heckmann, Ch. Hess, N. Horikawa, S. Ishimoto, T. Iwata, Y.Kisselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, A. Magnon, C. Marchand, T. Matsuda, W. Meyer, T. Michigami, E. Radtke, G. Reicherz

9. 參考資料



国際共同研究でも重要な役割を果たす
微小世界のナゾ解明に瞳を
輝かせる物理学者

●専門分野は高エネルギー物理学。COMPASS国際共同研究の日本グループメンバーとして諸活動にも参加

岩田 高広 教授

物質の最小単位である陽子や中性子の内部構造を解明するという、極小にして壮大な研究に取り組んでいるのは理学部の岩田先生。物質の究極構造を解明するために、原子核を構成する陽子や中性子よりさらに微小な粒子クォークとグルーオンの自転(スピン)のメカニズムを研究しています。それは国際的な研究テーマでもあり、世界12カ国がスイス・ジュネーブに全長50mにも及ぶ巨大な実験装置を設置して共同研究に取り組んでいるほどです(COMPASS国際共同研究)。岩田先生は、その日本グループの代表メンバーとして度々ジュネーブでの実験にも参加しています。その実験や研究の結果が、すぐに何かの役に立つ、何かが変わるという種類のものではなく、誰も知り得なかったことを真っ先に知りたいという知識欲こそが物理学者の原動力。そして、100年後に誰かの役に立つかもしれないというロマンでもあります。

理学部

Science

極微の回転の謎を探る

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。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働きをしています。そして、微小な回転を突き詰めてゆくと、物質の最小単位である陽子などの素粒子の自転(スピン)にまで行き着きます。

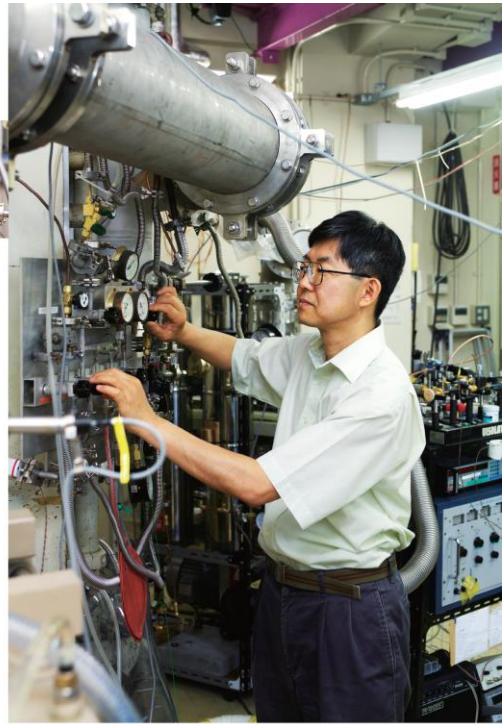
“スピン”とは？

陽子や電子はあたかもコマのように自転す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。鉄が磁石になるのは、電子のスピンの働きによります。陽子のスピンが作る小磁石は病院でMRIと呼ばれる診断に活用されています。素粒子のスピンは生活の中で活用されています。



spin

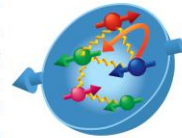
quark



物質の究極構造の秘密に迫る。
極微の世界をのぞいてみよう！

陽子スピンの謎

陽子は更に微小な基本粒子クォークが結びついてできています。しかし、陽子のスピンの何によってできているのかは、まだわかっていません。この陽子のスピン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。この研究では、陽子のスピンのクォークなどのスピンの説明できるかどうか、を調べるものです。



COMPASS 国際共同研究

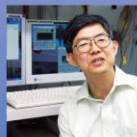
私たちは、陽子スピンの謎を探るため、COMPASSと呼ばれる国際共同研究グループを組織して、研究を行っています。COMPASSには12カ国から200名を超える研究者が参加しています。山形大学は日本グループの代表研究機関としてCOMPASSに参加しています。この研究は、ジュネーブ(スイス)の大型粒子加速器を用いて行われています。

研究の要、大型偏極標的

この研究には、高度な技術が必要な“大型偏極標的”が欠かせません。これは、陽子のスピンの方向をそろえた特殊なターゲットのことで、世界的にもユニークな実験装置です。山形大学のグループは、この技術をもつ世界有数のグループとして、国際共同研究の中で重要な役割を担っています。

【本研究についての問い合わせ先】
tiwata@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

Professor



物理学科
高エネルギー物理学
教授
岩田 高広

YAMAGATA UNIVERSITY

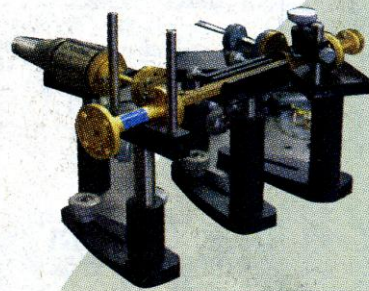
山形大学

物

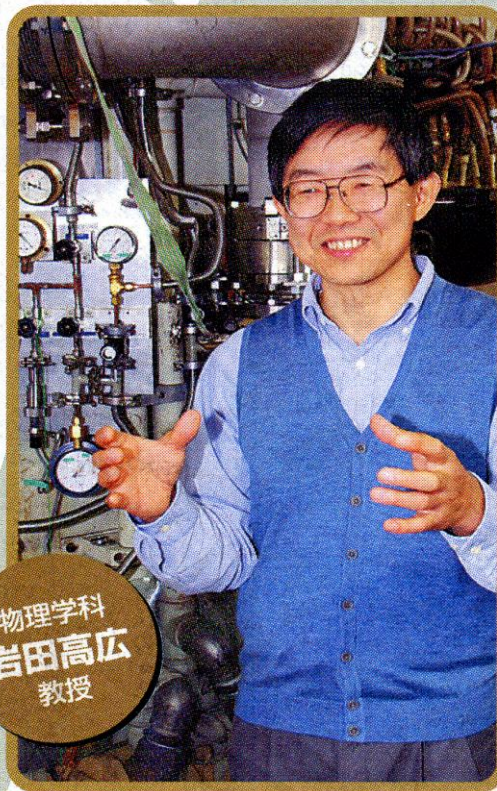
質を構成する原子は電子と原子核に分けることができます。電子は基本粒子ですが、原子核は陽子と中性子から成り立っています。陽子や中性子は、自転に当たる「スピン」という性質を持っています。この性質は、人間の日常生活に役立てられており、医療用の磁気共鳴断層撮影(MRI)は陽子のスピンを利用したものです。ところが、何によってスピンのもとらされるのか、まだよく分かっていません。

陽子などの素粒子は、基本粒子「クォーク」からできています。クォークにもスピンがあるので、陽子のスピンはクォークスピンが原因だと考えられてきました。ところが、最近クォークスピンの寄与が小さいことが明らかになってきました。では、陽子スピンはいったい何によるのでしょうか？

素粒子理論によると、クォークを陽子内に閉じ込める「グルーオン」という粒子が存在します。この粒子もやはりスピンを持っています。そこで、特にグルーオンのスピンの役割に注目し、陽子スピンの起源を探る実験に取り組んでいます。COMPASSと呼ばれる国際共同実験として、ジュネーブの欧州原子核研究所(CERN)で行われているもので、山形大学は「偏極ターゲット」の技術を持って実験に参加しています。この技術は実験に不可欠で、重要な役割を担っているのです。



極微の世界の回転陽子スピンの起源を探る



物理学科
岩田高広
教授

理 学 部

ハストティーチャー



生物学科

半澤直人 教授

「遺伝子から見た生物の進化」は、まずDNAの実物を見せ、台所でできる簡単な精製法を紹介します。その上で、遺伝子の突然変異で起こる病気や生物の進化について、ビデオを使ってやさしく解説していきます。

山大理学部助教授らの素粒子研究

文科省の「特別推進研究」に

物質の最も小さい単位の素粒子がどのように回転しているのかを解明するため、山形大理学部の岩田高広助教授らに取り組み始めている研究が、文科省の「特別推進研究」に採択され、科学研究費補助金として今年度から1年間で計約1億3000万円が支給されることになった。同大の教員が代表を務める研究が特別推進研究に選ばれるのは初めて。

4年間で1億3000万円補助

岩田助教授は、同分野に所属している素粒子のクォークや中子などの構成要素の相互作用を調べる。クォークや中子などの構成要素は、クォークと中子からできている。クォーク同士はグルーオンという別の粒子によって結び、グルーオンが回

転しているため、電子や中性子も回転していると考えられる。岩田助教授は、クォークと中子、グルーオンからできている素粒子の構造を詳しく調べる。この研究は、物質の構造の究極的な解明に重要な役割を果たす。岩田助教授は、この研究に採択されたが、大部分は東京大、京都大、東北大などが研究している。また、山形大も運営資金の学費減額費から、研究経費の補助として今年度、50万円が支払われる。

岩田助教授は「地球は自然が、自然がどのような構造をしているか調べるための重要な研究。成果が物理学の様々な分野で生かされれば」と話している。

山大の「核子の構造研究」

文科省「特別推進研究」に

山形大理学部(山形市小白川町1丁目)の岩田高広助教授らのグループが進める核子の構造に関する研究が、文科省の「特別推進研究」に採択された。この研究は、06年度科学研究費補助金制度の「特別推進研究」に選ばれ、補助金の交付が内定した。今年度

からの4年間で計1億3000万円が交付される見通し。岩田助教授らのグループの研究テーマは「大型偏極ターゲットを用いたクォークの構造的研究」。クォークは、原子核を構成する核子(陽子と中性子)と呼ばれる粒子の構造を調べ

る。自転する核子の中には、自然界を構成する基本粒子(クォーク)が3個あり、いずれも自転している。これまで、クォークの自転の影響で核子も自転していると考えられていたが、クォーク以外の要因がある可能性も出てきた。今回の研究では、核子の自転を引き起こしている要因を明らかにする。

核子の構造は、宇宙や原子核物理などの学問の基礎となる。解明されれば、他の学問に大きな影響を与えるという。岩田助教授は「地球な研究だが、とても重要な研究だ」と思う」と話

す。7月中旬に、補助金交付が正式に決まる。今年度は4420万円が交付される予定。

朝日新聞 2006年6月16日 朝刊

読売新聞 2006年6月20日 朝刊

山形大・岩田助教授らの原子核研究

「特別推進研究」に採択

文科省が助成 同大から初

山形大理学部の岩田高広助教授らが進めている原子核の研究が、文科省科学研究費補助金(科研費)の「特別推進研究」に採択された。特別推進研究は、国際的に高い評価を得ており、特に優れた成果が見込まれる研究に対して助成するもので、同大からの採択は初めて。東北地区では東北大(二十五件)に次いで二番目。岩田助教授らのグループは二〇〇九年度までの四力年間で、計一億三千三百万円の助成を受ける。

研究課題は「大型偏極ターゲットを用いたクォーク・グルーオンの構造的研究」。岩田助教授が研究代表者となり、吉田浩司同大助教授、松田達郎宮崎大助教授、堀川直嗣中部大教授らが参加している。研究目的は、すべての物質を構成する原子核の核子(陽子と中性子)がなぜ右回りに自転しているかの解明。従来は、核子をつくる三つの粒子(クォーク)もそれぞれ自転しているためと考えられていたが、それ以外の影響もあることがこれまでに分かっている。岩田助教授は、クォーク同士を結び、グルーオンという別の粒子(クォーク)に結び、核子の構造を調べる。この研究は、物質の構造の究極的な解明に重要な役割を果たす。岩田助教授は、この研究に採択されたが、大部分は東京大、京都大、東北大などが研究している。また、山形大も運営資金の学費減額費から、研究経費の補助として今年度、50万円が支払われる。

岩田助教授は「地球は自然が、自然がどのような構造をしているか調べるための重要な研究。成果が物理学の様々な分野で生かされれば」と話している。

山形新聞 2006年6月22日 朝刊

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POLARIZED TARGET AND ITS APPLICATIONS

29(Fri)Feb. - 1(Sat) March 2008



===GroupPhoto===

International Symposium on polarized target and its applications

29(Fri) Feb. -1(Sat) March 2008

symposium site: Tukioka Hotel at Kaminoyama, 10 min. walk from the JR Kaminoyama station

TENTATIVE PROGRAM (revised on 25 Feb., *:NOT CONFIRMED)

29(Fri) Feb.

13:30-18:30 (Cordinators: N.Doshita / Y.Kuriyama)

Wellcome address & introduction, T.Iwata, Yamagata Univ.(5 min.)

Spin and Spin-offs- from particle physics to medical applications, W.Meyer, Bochum Univ. Germany (30 min.)

Status of the polarization facilities at Mainz, A.Thomas, Mainz Univ., Germany (25 min.)

MRI with hyperpolarized contrast agents, G.Reicherz, Bochum Univ. Germany (25 min.)

Feasibility of Spin Physics at J-PARC, H.Sato, KEK (25 min.)

Hyperpolarized MRI with polarized He3 gas, M.Tanaka, Kobe-Tokai(30 min.)

Break (20 min.)

Development of DNP for liquid He3, A.Tanaka, Yamagata Univ. (25 min.)

Effects of Electron-Electron Interaction on the Transport

in Spintronic Devices, Y.Takahashi, Yamagata Univ. (20 min.)

Damping constants of ferromagnetic thin films measured by employing

ferromagnetic resonance (FMR) analysis, N.Inaba, Yamagata Univ. (20 min.)

Recent developments of ESR imaging (review) H.Hirata, Yamagata Univ. (30 min.)

== Group Photo ==

19:00-21:00 Reception Party

21:00-23:00 evening sessions/ meeting of the general spin science institute

1(Sat) March

9:30-12:30 (Cordinators: T.Hasegawa/ G.Reicherz)

Pulsed NMR in Target Material Research, C.Hess, Bochum Univ., Germany, (25 min.)

Development of polarized polymer targets with EPM, K.Toyama, Yamagata Univ. (25 min.)

He3/4 ratio from sound velocity measurement, T.Takahashi/K.Kumada, Yamagata Univ. (25 min.)

DNP and SANS study of crystalline and non-crystalline polyethylene in JAEA, T.Kumada, JAEA (20 min.)

break(20 min.)

Development of polarized polymer targets, L.Wang, Donghua Univ., China(PRC) (25 min.),

Polarized target for J-PARC, S.Ishimoto, KEK (25 min.)

Status of the COMPASS Polarized target and future prospects *, N.Doshita, Yamagata Univ. (20 min.)

Polarized Fusion, N.Horikawa, Chubu University, (20 min.)

internal communications

Concluding remarks, T.Iwata

12:30 end of the symposium

supported by Institute for General Spin Science of Yamagata University

Organizing committee

T.Iwata, Yamagata University (Faculty of Science), Chair

N.Doshita, Yamagata University (Faculty of Science), Scientific secretary

K.Kondo, Yamagata University (Faculty of Science)

H.Yoshida, Yamagata University (Faculty of Science/Networking & Computing Service Center)

Sponsored by Yamagata University

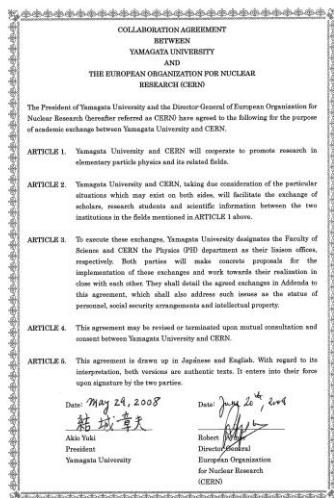
欧州原子核研究機構（CERN）と共同研究に関する協定を締結

スイスのジュネーブにあるCERNにおいて、従来より12カ国の共同研究としてCOMPASS（Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy）が行われており、本学理学部の岩田高広教授は、その日本グループの代表メンバーとして参加していました。

この度、CERNと山形大学は、両機関の学術交流の促進のため、共同研究に関する協定を締結しました。

5月29日に結城山形大学長による協定書へのサインの後、6月20日には、小山副学長（国際担当）がCERNを訪問し、関係者立ち会いの下、調印式が行われました。

この協定により、本学教員が常駐しているCERN内のオフィスを窓口として、本学研究者・学生の国際共同研究への参加、学術情報の交換などCERNとの学術交流が活発になることが期待されます。



学生に世界最高峰の環境を
世界的な素粒子研究機関と協定
 山大
 学生たちに、世界最高峰の環境で素粒子について学んでもらおうと、山形大学は6月、世界的な素粒子の研究機関である欧州合同原子核研究所（CERN）と協定を締結した。国内の大学では、東京大、名古屋大に続き3番目の。岩田高広教授（実験物理学）は「ノーベル賞受賞者と一緒に研究できるあのがれの場」
 機関。何人ものノーベル物理学賞受賞者を輩出している。岩田教授が98年からCERNで素粒子の共同研究に参加している縁で実現した。【林奈緒美】

山大、欧州研究機関と協定

スイスのCERN

CERNは1954年設立の世界最大規模の素粒子物理学研究機関。ノーベル賞研究者を輩出した。巨大粒子加速器LHCを建設した。気候実験施設（MIRX）が開発され、CERNで知られる。日本はCERNでドイツ・フランスで生じる超伝導超伝導「磁気浮上式車」が研究され、中性子のスピン（自転）や中性子の詳細な構造を研究して、98年から参加している。山形大学はCERNの研究者を招き、講演会も予定。山形大の教員が、CERNの代表として、共同研究の協定が結ばれ、今後、山形大の共同研究で発生する宇宙線の共同研

学生派遣 素粒子を共同研究

山形大は、スイス・ジュネーブの欧州合同原子核研究機関（CERN）と共同研究の協定を締結したと発表した。学生派遣を通じて、世界的機関のノウハウを吸収し、国際交流や幅広い分野での活用が期待される素粒子の研究に携わることが、最先端の研究を進める狙いだ。

研究にも力を入れている。岩田教授は「最先端の研究は、新しい分野への研究。研究の期待するところは、研究もつなぐと期待する。大きな分野への研究。」

「欧州核機構」と共同研究の協定
山形大
山形大は一日までに、スイス・ジュネーブにある素粒子原子核研究機関「欧州原子核研究機構」（CERN）と共同研究の協定を結んだ。

CERNは世界の素粒子原子核研究の中心的存在で、複数のノーベル物理学賞受賞者を輩出している。プロジェクトの一つとして、十二カ国が参加して素粒子の微細な構造を調べる研究が進められており、山形大理学部物理学科の岩田高広教授が日本グループの代表メンバーとして研究に携わってきた。現在は教員二人がCERNに常駐しており、学術交流をさらに進めるため協定を締結した。具体的には、教員や学生の国際共同研究への参加や、CERNの研究者を大学に招いての講義などが計画されている。CERNとの研究協定は東大なども結んでいるが、地方の大学では珍しいという。岩田教授は「ジュネーブはCERN以外にも多くの国際機関があり、学生の研修の場としては有意義な場所。教員面でも成果が期待できる」と話している。

読売新聞 2008年7月3日 朝刊

河北新報 2008年7月2日 朝刊

山形大 欧州原子核機関と研究協定

山形大学（山形市）は、素粒子研究に山形大の研究者が、地方の国立大城章夫学長は欧州合同研究や学生らがスムーズに学では珍しい。原子核研究機関CERNに参画できるようにする。CERNは日独伊伊N、ジュネーブと共同。CERNとの協定。十二カ国総勢二百三十人による国際プロジェクトとして陽子や中性子の研究協力協定を締結し、加えて研究機関（茨城）として陽子や中性子の研究協力協定を締結している。県（山形市）などが結ん スピン（自転）の起源を

探るCOMPASS計画を推進中。日本は中核ターゲット技術に取り組み中。山形大理学部イマール所長がサイン。山形大では、学術情報交換などCERNとの交流が活発になる。期待される。大統一理論や宇宙物理学の研究にも寄与するとみられている。

山形大と欧州原子核機構 共同研究協定を締結

山形大は一日、世界最大規模の素粒子原子核研究機関と協定を結ぶのは初めて。スウェーデンのジュネーブ郊外にある同機構は、一九五四年（昭和二十九）年に設立した素粒子共同研究に関する協定を締結したことを明らかにした。同

研究所。欧州二十カ国が出資し、常駐させている。運営しており、世界有数の高エネルギー粒子加速器など多くの粒子加速器を保有しているほか、最近では直径十メートルの粒子加速器を建設し、ロバート・アイマール機研究者が集まり、物質の構造や自然の原理を究明するため山形大理学部のグループはCERNで、素粒子のスピン（自転）に関する国際共同研究に取り組んでいる。この共同研究は八年に始まり、十二カ国が参加。同大はその本グループの代表研究機関の役割を果たしており、現在、同大の教員二人をCERNに派遣している。岩田教授は、九月にはCERNの研究者を呼び、講演してもらった。ジュネーブにある国際機関が多いジュネーブにあるので、文科系で交流のメリツトはあるのではないか」と話している。

山形新聞 2008年7月2日 朝刊

日本経済新聞 2008年7月1日 朝刊

山形大学 講演会

タイトル： CERN, a European High-Energy
Physics Laboratory for the World



講演者： Dr. Gerhard MALLOT
(CERN senior physicist)

日時： 2008年9月24日(水)

16:45-18:15

場所： 理学部1号館1階 第11番教室
(理学部玄関の奥)

ジュネーブのレマン湖近くにあるヨーロッパ原子核研究機構(CERN)は、多くの粒子加速器群を有する最先端の素粒子原子核物理学のための研究所です。現在、史上最大の衝突型陽子加速器LHCの建設が最終段階を迎えています。また、反物質(反水素)の生成、WWWの発祥の地としても知られています。

山形大学とCERNは本年6月に研究協力協定を締結しました。本講演では、CERNの使命や施設、研究全般について、簡単な紹介をしていただきます。専門外の皆様にも分かるような話しをお願いしてありますので、お気軽にお聞きください。

問い合わせ先： 理学部 岩田高広(4762)

CERN研究者
山形大で講演会
交流事業の第一弾
山形大学(山形市、結
城章夫学長)は二十四日

夕、世界有数の素粒子研究機関である欧州原子核研究機構(CERN、スイス・ジュネーブ)の上席研究員、ゲルハルト・マロット博士(ドイツ)を招き、講演会を開いた。同大とCERNは今夏に共同研究協力協定を締結しており、講演会は交流事業の第一弾。
マロット博士はCERNの設立目的や施設概要、研究活動などについて英語で紹介した。CERNは今月十日に世界最大の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を稼働したが、トラブルで停止に追い込まれ話題になった。

日本経済新聞 2008年9月25日 朝刊

新入生歓迎・講演会

2008年ノーベル賞によせて クォークの世界への招待

— 小林益川理論から素粒子物理学の最前線へ —

2008年は、南部陽一郎，小林誠，益川俊英先生がノーベル物理学賞を受賞し，下村脩先生がノーベル化学賞を受賞され，日本の科学界にとっては大変喜ばしい記念すべき年になりました。

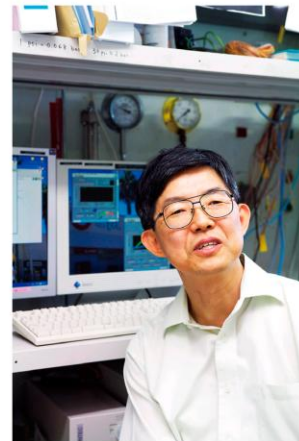
小林，益川先生の後輩にあたる岩田高広先生（理学部物理学科教授）に，2008年ノーベル賞の意義をお話していただくとともに，先生が学んだ当時の名古屋大学の学生の勉強のようすや意気込みをお話いただきます。これから山形大学で学ぶ学生の皆さんの参考にしていただきたいと思います。

日時：4月21日(火曜日)
17:00～18:00

場所：教養教育1号館1階
113教室

講演：理学部教授：
岩田 高広 先生

主催：日本科学者会議山形支部



岩田 高広 先生

第7回環太平洋高エネルギースピ物理学国際会議

<http://www.quark.kj.yamagata-u.ac.jp/pacific-spin09/>

The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics

September 15 - 18, 2009

@Yu-gaku Kan, 遊学館 Yamagata, JAPAN

Supported by Yamagata University, RIKEN Nishina Center and Tokyo Institute of Technology

Spin and fundamental symmetries
Spin in hard QCD processes
Nucleon spin problem
Structure functions of the nucleon and nuclei
Polarized parton distributions and fragmentation functions
Transversity and Collins effect
Transverse momentum dependent distribution functions
Higher twist effects
Generalized Parton Distributions
Recent progress of spin experiments:
COMPASS, HERMES, JLab, RHIC and many others
Structure functions on the lattice and effective QCD models
Future experiments and facilities
New idea and methods



Local Organizing Committee :
Norihito Doshita (Yamagata),
Yur Goto (RIKEN Nishina Center),
Takahiro Iwata (Yamagata, Chair),
Kaori Kondo (Yamagata),
Shunzo Kumano (KEK),
Yoshiyuki Miyachi (Tokyo Tech),
Yasuhiro Tajima (Yamagata),
Hiroshi Y. Yoshida (Yamagata)

International Organizers :
Leslie C. Bianz (BNL),
Hirotoshi Enyo (RIKEN Nishina Center),
Takahiro Iwata (Yamagata),
Andreas Schäfer (Regensburg),
Toshi-Aki Shibata (Tokyo Tech)

International Advisors :
Hai-Yang Cheng (Inst. Phys., Academia Sinica, Taipei),
Rodney Crewther (Adelaide),
Naoki Horikawa (Chubu U.),
Kenichi Imai (Kyoto),
Robert L. Jaffe (MIT),
Woojung Kim (Kyungpook U.),
Bo-Qiang Ma (Beijing),
Toshiyuki Mori (Kobe),
Anthony W. Thomas (JLab)



The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics

Pacific-Spin 2009



- 1st circulation
- Registration
- Important Dates
- Program
- Invited Talk
- Participants
- Financial support
- Social Events
- Photo Album

- Map, Google MAP
- Accommodation
- Transportation
- Yamagata (tourist information)

- Yu-Gaku Kan
- Yamagata University
- Tokyo Tech
- RIKEN Nishina Center
- Yamagata

- Committees
- Pacific-Spin 2007
- Pacific-Spin 2005
- Pacific-Spin 2003
- Pacific-Spin 2001
- Pacific-Spin 1999



Spin is one of the basic properties of elementary particles. The discoveries concerning spin often triggered physicists to open a new chapter of physics. The spin structure of the nucleon, namely how the nucleon spin is distributed on its quarks and gluons, is one of the interesting challenges of QCD. Today QCD allows to extract an ever more detailed picture of the internal structure of hadrons, including two and three dimensional position and/or momentum distributions and quark-gluon correlations. Spin degrees of freedom and angular distributions allow to separate such effects and thus are vital for these successes.

The various aspects of the QCD process form the main topic of the symposium. The aim of the symposium is to enhance communications among physicists from Circum-Pan-Pacific region and from other regions. Supporting presentations of young physicists is another feature of this symposium. The symposium basically consists of all plenary sessions. The idea is that all participants share the same discussions and deepen the common understanding of current problems and the future prospects for high energy spin physics.

Date: September 15 - 18, 2009

Site: Yu-gaku Kan, Yamagata 遊学館 (ゆうがくかん)

We are much obliged to Inoue zaidan and Yamagata convention bureau for supporting this symposium.

The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, Sept. 15th - 18th, 2009, at Yamagata, Japan

平成21年度 コンベンション開催報告 (後期)

第7回 環太平洋高エネルギースピ物理学国際会議

【期日】平成21年9月15日(火)~18日(金)
【会場】山形県生涯学習センター「遊学館」
【人数】54名 (国外15名 8か国)
【主催】岩田 高広 同 国際会議日本組織委員会 代表
(山形大学理学部物理学科クォーク核物理学グループ教授)



岩田 高広
(同国際会議日本組織委員会 代表)

クォークなどの素粒子の自転にあたるスピンについての研究成果を議論した国際会議です。1996年に神戸を皮切りに、和光、北京、シアトル、東京、バンクーバーとほぼ2年毎に開催され、山形で7回目です。通訳無しの英語だけの国際会議ですが、参加者が活発に交流し、今後の共同研究も期待されます。パンフレットでは、山形舞子の踊りが外国人参加者の目を釘付けにしました。次回はオーストラリアでの開催が計画されています。

エダマメ研究会第8回研究集会 (寒河江大会) 並びに秘伝えだまめサミット in さがえ西村山

【期日】平成21年10月2日(金)・3日(土)
【会場】さがえ西村山農業協同組合・本所など
【人数】約500名(県外約100人)
【主催】秘伝えだまめサミット in さがえ西村山実行委員会 実行委員長 今田 正夫 (さがえ西村山農業協同組合代表理事組合長)

全国の主産地を会場に毎年開催されている「エダマメ研究会」と「全国えだまめサミット」を、寒河江市及び河北町を主会場として開催。河北町西里地区での収穫風景や新設されたアグリランド農産加工センターで「ぬた」加工状況視察を行いました。続くサミットでは、野菜スイーツ・パティシエの柿沢安耶さんを講師として、「秘伝豆」の特徴や加工利用などについて講演が行われ、参加された「エダマメ研究会」会員や市民ら約500人が熱心に聴き入っていました。



プログラム

Panpacific-Spin-2009, Program		V8(Sep./10)		time of the talk (including 5min. discussion)
15.Sep.(Tue)				
8:50		bus departure from Hotel Castle		
9:00	Registration			
9:50	Opening			
10:10	Session-1	60	T.Iwata Chair: M.Wakamatsu 35 Yuji Koike 25 Kazuhiro Tanaka	Nucleon spin structure based on pQCD Theoretical update of twist-3 single-spin asymmetry in semi-inclusive DIS
11:10 C.B.				
11:40	Session-2	60	Chair: T.Matsuda 30 Kensuke Okada 30 Achim Hillenbrand	PHENIX overview Overview of HERMES experiment
12:40 lunch				
14:40	Session-3	75	Chair: D.Crabb 35 StephanePlatchkov 40 Seonho Choi	COMPASS overview Overview of spin physics at J-Lab
15:55 C.B.				
16:25	Session-4	50	Chair: N.Horikawa 25 Yoshiyuki Miyachi 25 Armine Rostomyan	Deeply Virtual Compton Scattering measured at HERMES Exclusive-meson production at HERMES
17:15 E.of.Session				
16.Sep.(Wed.)				
9:00		bus departure from Hotel Castle		
9:30	Session-5	60	Chair: T.Morii 35 Dennis Sivers 25 Francesca Giordano	Spin-orbit dynamics TMD measurements at HERMES
10:30 C.B.				
11:00	Session-6	60	Chair: Y.Miyachi 35 Yoshitaka Hatta 25 Norihiro Doshita	Polarized DIS and the AdS/CFT correspondence Polarized Drell-Yan measurement at COMPASS
12:00 E.of.Session				
13:30 Excursion				
18:30 Banquet				
21:00 end of Banquet				
17.Sep.(Thur.)				
9:00		bus departure from Hotel Castle		
9:30	Session-7	75	Chair: Kumano 35 Masashi Wakamatsu 40 A.W.Thomas	Nucleon spin structure from Chiral Quark Soliton Model Spin and orbital angular momentum of partons in the proton.
10:45 C.B.				
11:15	Session-8	90	Chair: Y.Goto 30 Takeshi Yamazaki 35 Ting-Hua Chang 25 Toshi-Aki Shibata	Nucleon structure functions from N _f =2+1 dynamical domain wall fermions Drell-Yan process and flavor asymmetry of u and d sea quarks Recent progress in cross section measurements of neutrino-nucleon neutral current elastic scattering
12:45 lunch				
14:25	Session-9	75	Chair: K.Kondo 25 Sergey Baranov 25 Masanori Hirai 25 Abhay Deshpande	Gluon polarization in the Durham Pomeron Impact of DIS and collider data on determination of the polarized gluon distribution Delta_G measurements in PHENIX
15:40 C.B.				
16:10	Session-10	90	Chair: T.Matsuda 30 Konrad KLIMASZEWSKI 40 James Sowinski 20 Discussion	COMPASS Delta_G/G Probing the Spin Structure of the Proton at STAR.
17:40 E.o.Session				
18.Sep.(Fri.)				
8:50		bus departure from Hotel Castle		
9:20	Session-11	80	Chair:N.Doshita 25 Maki Kurosawa 25 Katsuro Nakamura 30 Shinya Sawada	Overview of PHENIX Detector upgrades Current Status of Muon Trigger UpgradeProject for W Boson Physics at RHIC PHENIX New hadron facilities at J-PARC
10:40 C.B.				
11:10	Session-12	85	Chair: G.Reicherz 25 Donald Crabb 30 Tsuneo Kageya 30 Abhay Deshpande	Radiation damage and recovery in polarized ammonia targets Spin-Physics Experiments with Frozen-Spin Polarized Solid HD Overview of the EIC project
12:35 Closing				
12:50 E.o.Symposium				

