

平成29年8月3日
山形大学

陽子スピンの謎に挑む世界初の実験の結果を発表

山形大学のグループが参加するCOMPASS国際共同研究^(※1)グループは、陽子スピン（自転）の謎を解明するため、CERN（欧州原子核研究機構）^(※2)において大型偏極陽子ターゲット装置^(※3)を用いたドレルヤン反応^(※4)とよばれる反応をとらえる世界初の実験を2015年5月から11月にかけて実施した。これまで、ミュー粒子^(※5)反応で陽子内部においてクォークの軌道回転運動（公転にあたる）の存在を示唆するデータが得られていたが、理論との整合性や他の反応との関連を調べるのが求められていた。今回のこの実験データの解析により、クォークの軌道回転の存在を許す理論に矛盾しない結果が得られ、陽子スピンの起源の候補の1つである軌道回転の存在の可能性が高まった。

◆背景

原子核を構成する陽子はクォークと呼ばれる基本粒子が結合してできている。陽子のスピン（自転にあたる量）はクォークのスピン（自転）に起因すると考えられてきたが、最近の研究ではクォークスピンの役割が少ない（3割程度の寄与）ことが判明している。しかし、残りが何によるか、解明されていない。この謎の解明を目指し、山形大学のグループはCERNのCOMPASS国際共同研究プロジェクトに加わり、大型偏極陽子ターゲット装置の改造など、実験に貢献しながら、研究を行ってきた。2014年5月から準備を始め、2014年12月に予備的な測定、2015年5月から11月まで本格測定を行った。

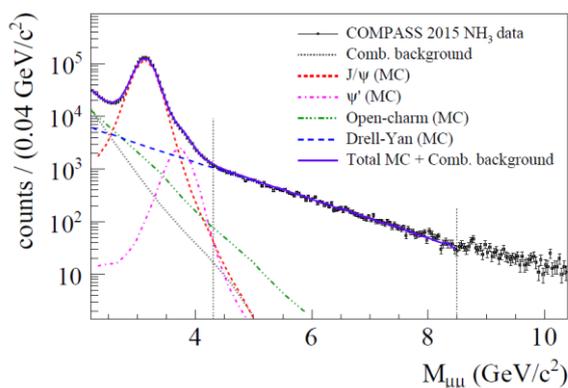
◆研究結果の概要

COMPASSではこれまでに高エネルギーのミュー粒子（160 ギガ電子ボルト）を、陽子スピンの方向をそろえた偏極ターゲットに衝突させ、 π 中間子^(※6)生成のスピン依存性を調べた。その結果、陽子内部でクォークの軌道回転運動（公転）の存在を示唆するデータを得ていた。これが正しいならば、従来のクォークモデルの常識を翻す知見となる。それを確定するためには、異なる反応でも理論との整合性を確認する必要があった。このために π 中間子（190 ギガ電子ボルトの π^- ）を入射し、ミュー粒子対が発生するドレルヤン反応をとらえ、スピン依存性を調べた。偏極ターゲットを用いたドレルヤン反応での測定はこれまでに例がなく、世界で初めての試みであった。理論上、上記の π 中間子生成反応とドレルヤン反応は関連しており、測定値（非対称度）にはある関係（非対称度が逆符合）が成立する。これを確認できれば、軌道回転運動の証拠となる。そして、今回の実験結果は、軌道回転の存在を許容するいくつかの理論的な予言と矛盾するものではなかった。これによって軌道回転の存在を補強するものとなった。この研究結果は物理学分野でのトップジャーナルであるPhysical Review Letters誌に掲載されることが決定している。

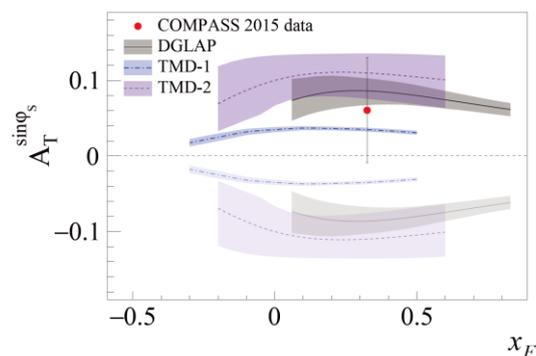
◆今後の研究の展開

本実験の結果を再確認し、さらに精度を向上するために2018年に同様の測定を行う。これによって理論との整合性をより精密に確認できると期待される。

（お問合せ先）
学術研究院（素粒子・原子核物理学）
教授 岩田 高広
電話023-628-4762
准教授 宮地義之
電話023-628-4551



ミュー粒子対 (μ^+ と μ^-) の質量分布。今回分析を行ったのは4.3から8.5 GeV/c^2 の領域(グラフ中で黒い点線で囲まれた質量領域)で、この領域ではドレルヤン反応が支配的だと考えられる。この場合、標的陽子中のクォークとビーム π 中間子中の反クォークが消滅した後、一旦光子になり、最終的に μ 粒子対になる現象を捉えている。ミュー粒子対が飛び出す方向などの振る舞いを調べることで、陽子中のクォークの運動を推測することができる。なお、3 GeV/c^2 付近の山はやはり標的陽子中のクォークとビーム π 中間子中の反クォークが消滅して生成される J/ψ (ジェー・プサイ粒子)と呼ばれる既知の粒子が μ 粒子に崩壊した現象を表わしている。



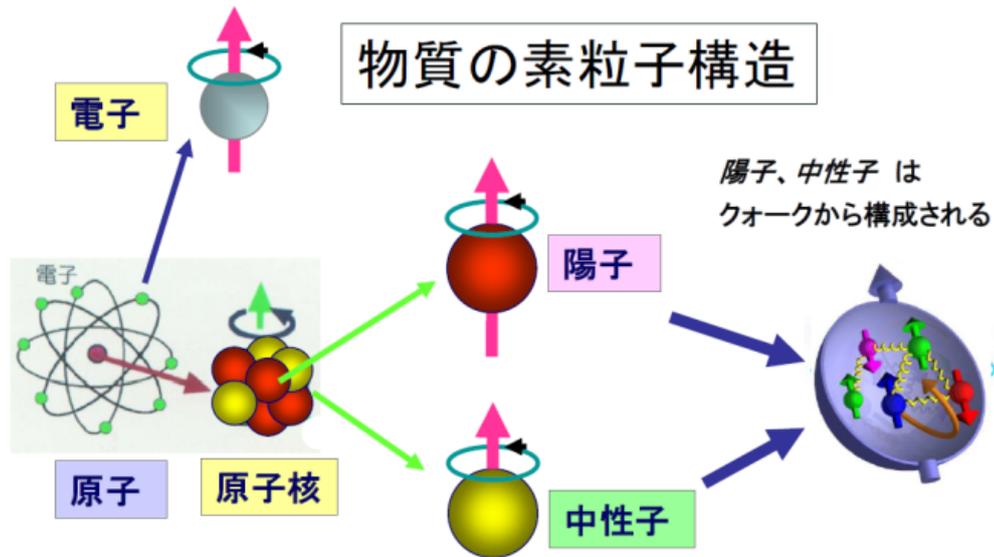
ドレルヤン反応での非対称度測定値(赤い丸)。曲線はクォークの軌道回転の存在を許容した場合の理論的な予想で、帯状の表示はその不定性を示している。理論的な取り扱いの違いによって異なる理論曲線が提案されている(DGLAP, TMD-1, TMD-2)。クォークの軌道回転が存在し、理論的整合性も保障される場合には正の非対称度が予想される。測定値は誤差の範囲内でこれらの予想と矛盾していない。今回のようにゼロでない測定値は陽子スピンの方向(自転軸)とミュー粒子対の生成方向が相関していることを示しており、結局、陽子中のクォークの運動が陽子スピンに関連することを意味している。このような場合、クォークが陽子のスピン軸の周りに軌道回転していると考えられる。一方、負の値を示す薄い曲線は正の非対称度の符合を反転した理論曲線を示すが、測定値との一致は良くない。

【※用語解説】

1. **COMPASS国際共同研究プロジェクト**：欧州、米国、アジアなど世界13カ国から200名以上の研究者が参加する国際共同研究。日本からは山形大学を代表研究機関として、宮崎大学、中部大学、高エネルギー加速器研究機構の研究者が参加している。なお、山形大学からは理学部担当の岩田高広教授、宮地義之准教授らのグループが参加している。
2. **CERN(欧州原子核研究機構)**：スイスのジュネーブにある素粒子、原子核の研究所。世界最大級の粒子加速器を用いて先端的な研究が行われている。山形大学はCERNとの研究協力協定に基づき、助教2名、大学院生(博士後期課程)1名をCERNに長期派遣している。
3. **偏極ターゲット装置**：原子核のスピンの方向をそろえた特殊なターゲット装置。陽子偏極ターゲットの場合、水素を含む物質(例えばアンモニア)中の水素核(陽子)のスピンをそろえている。COMPASSの偏極ターゲット装置は世界最大級の大きさを誇っている。
4. **ドレルヤン反応**：陽子や中間子の衝突によって主に正電荷と負電荷のミュー粒子(あるいは電子、陽電子)が対になって生成される素粒子反応。陽子内のクォークやその反粒子^(※7)である反クォークが消滅して、ミュー粒子対が作られる。陽子や中間子内部でのクォークや反クォークの状態を観測するのに適した反応と考えられている。
5. **ミュー粒子**：素粒子の標準模型で電子のグループに属する素粒子の一種。電子よりも重い、同様の性質を示す。

6. π 中間子：日本の湯川秀樹博士が中間子論において予言し、それが後に発見されたことでノーベル賞を受賞した、いわゆる湯川中間子のこと。クォークモデルではクォークと反クォークの結合状態だと理解されている。

7. 反粒子：一般的に素粒子にはその素粒子と質量などが全く等しいが、電荷が逆符号を持つ素粒子が存在し、それを反粒子と呼ぶ。同じ種類の素粒子とその反粒子が出会うと消滅し、別の素粒子が生成されることがある。



原子は電子と原子核でできており、原子核は陽子と中性子から成り立っている。陽子や中性子は複数のクォークが結合してできている。陽子などのスピンはクォークのスピンの寄与と考えられてきたが、クォークの軌道回転（公転）も寄与している可能性が指摘されている。