



Tokyo Tech



高エネルギー加速器研究機構



山形大学



RIKEN

2021年2月25日

報道機関各位

東京工業大学
高エネルギー加速器研究機構
山形大学
理化学研究所

陽子の中の反物質が持つ大きな非対称性の発見

－反クォークの生成過程により物質の成り立ちを探る－

【要点】

- 陽子中の反物質である反クォークの存在量を、反クォークの運動量が大い領域で実験により測定した結果、反クォークのフレーバー対称性が大きく破れていることを発見した。
- 運動量が大い領域で、反ダウクォークは反アップクォークより 50%も多く陽子中に存在することがわかった。
- 陽子の基本的性質を決める仕組みを解明する手がかりとして期待される結果である。

【概要】

東京工業大学 理学院 物理学系の中野健一助教、柴田利明名誉教授（日本大学特任教授）、山形大学 学術研究院の宮地義之教授、理化学研究所 仁科加速器科学センターの後藤雄二前任研究員、高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所の澤田真也教授らは、陽子の内部において、**反クォーク**（用語 1）の運動量が大い領域でその**フレーバー対称性**（用語 2）が大きく破れていることを、陽子ビーム実験によって明らかにした。

陽子はあらゆる物質を形作る基本粒子の一つであるが、その内部は**クォーク・反クォーク・グルーオン**という素粒子（＝**パートン**、用語 1）の複合体になっている。陽子の質量・半径・スピンなどの基本的な性質は測定によって知られているが、そうした性質がパートンからどのように生じているかは未解明である。本研究では、米国フェルミ国立加速器研究所（FNAL）での日本・アメリカ合衆国・台湾の研究チームによる国際共同実験（**SeaQuest 実験**、用語 3）によって陽子の中の反クォークのフレーバー対称性を検証した。その結果、**反クォークの運動量**（用語 4）が大い領域では、反ダウクォークが反アップクォークより 50%も多く存在し、フレーバー対称性が破れていることを突き止めた。この結果は、陽子の中に、フレーバー対称性を大きく破るこれまでに明らかになっていない何らかの仕組みがあることの証拠である。

本成果は、英国時間 2021 年 2 月 24 日公開の学術誌「*Nature*」に掲載される。

●研究の背景

陽子はあらゆる物質を形作る基本的な粒子であるが、より小さな空間（＝短い時間）の尺度で観測すると、内部に構造が現れる。つまり、強い相互作用（用語 5）によってグルーオンの放射やクォーク・反クォークの対生成が起こり、クォーク・反クォーク・グルーオンという素粒子（＝パートン）の複合体になっている（図 1）。

陽子の質量・半径・スピンなどの基本的な性質は、測定によって知られているが、陽子の元となるパートンは半径がゼロで、質量もゼロまたはたいへん小さいため、そうした陽子の基本的な性質がパートンからどのように生じているかは未解明である。例えば、クォークと反クォークは、ヒッグス粒子が関与する仕組みによって質量を得るが、それは陽子の質量の約 1%に過ぎない。残りの質量を生み出しているものは、パートンを強い相互作用によって陽子に閉じ込めているエネルギーである。したがって、陽子のパートン構造の研究は、陽子の質量、ひいては全物質の質量の起源を解明することに繋がる。

特に陽子の中の反クォークは、物質中の反物質粒子であるため、クォーク・反クォークの対として短時間で生成し、消滅している。したがって、反クォークの存在量を測定することにより、陽子の中が短い時間で変化していく様子を捉えることができる。強い相互作用の重要な性質の一つとして、反クォークはフレーバー対称性を保つはずなので、陽子の中で反アップクォークと反ダウンクォークの存在量は等しいことが期待されていた。

しかし 1991 年に **NMC 実験**（用語 6）によって、このフレーバー対称性が破れていることが発見された。その後、この破れの大きさは、実験によって精密に測定されるとともに、理論モデルによっても検証されてきた。しかし反クォークの運動量が大きい領域においてフレーバー対称性が保たれるかどうかは、実験的にも理論的にも不明であった。

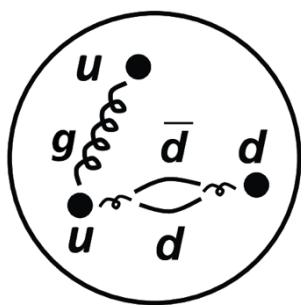


図 1：陽子のパートン構造。

2 個のアップクォーク (u) と 1 個のダウンクォーク (d) からグルーオン (g) の放射やクォーク・反クォークの対生成が起こり、クォーク・反クォーク・グルーオンの複合体になっている。

●研究の成果

本研究グループは、アメリカ合衆国のフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) において日本・アメリカ合衆国・台湾の研究者の国際共同実験（実験名称 **SeaQuest**）を実施した。この実験では、FNAL の高エネルギー・大強度の陽子ビームを液体水素と液体重水素（**重陽子**、用語 7）の標的に照射し、標的中の陽子と中性子で起こる**ドレル・ヤン反応**（用語 8）を測定した。その計数の比から、反アップクォークと反ダウンクォークの存在量の比（ $= \bar{d}/\bar{u}$ ）を抽出した。この \bar{d}/\bar{u} が 1 な

らば反アップクォークと反ダウンクォークの存在量がフレーバー対称であることを意味する。

この SeaQuest 実験では、反クォークの運動量の大きい領域まで \bar{d}/\bar{u} を測定した。その結果、運動量が大きい領域では反ダウンクォークが反アップクォークより 50% も多く存在しており、全測定領域において反クォークのフレーバー対称性が大きく破れていることがわかった。これは、陽子の中に、フレーバー対称性を大きく破るこれまでに明らかになっていない何らかの仕組みがあることの証拠である。

●今後の展開

反クォークの運動量が大きい領域での反アップクォークと反ダウンクォークの存在量の比 (\bar{d}/\bar{u}) は、これまで実験的にも理論的にも理解されていなかったが、本実験によって、幅広い運動量の領域におけるフレーバー対称性の破れが明らかとなった。理論的なモデルとしては、**中間子雲モデル** (用語 9) などが提唱されており、今回の成果によって、今後これらの理論モデルの定量的な検証が進むと期待される。

一方で、いくつかの理論モデルの予測では、運動量の大きい領域でフレーバー対称性の破れが小さくなっており、本実験結果を説明するには何らかの変更が必要であろう。陽子のパートン構造は実験、理論の両面において国内外で活発に研究されており、今後の研究では、それらを総合することで陽子の質量・半径・スピンなどの基本的性質が創発する仕組みを解明していく予定である。

●付記

本研究の実施に当たり、東京工業大学の物理学リーダーシッププログラム、グローバル COE ナノサイエンス・量子物理学プログラムなどの支援を受けた。また日本学術振興会の科学研究費補助金、同 二国間交流事業、同 頭脳循環を活性化する若手研究者等海外派遣プログラム、山形大学 総合スピン科学の創成プロジェクト、および山田科学振興財団研究援助の研究費助成を受けた。

【用語説明】

- (1) **クォーク・反クォーク・グルーオン = パートン** : クォークは物質を構成する素粒子であり、反クォークはその反粒子、そしてグルーオンは強い相互作用を媒介する素粒子である。これらの粒子は陽子の部分 (パート) を成しているため、パートンと呼ばれる。クォークにはアップ・ダウン・チャーム・ストレンジ・トップ・ボトムという 6 個の種類 (フレーバー) があるが、陽子の中に存在するクォークはほとんどがアップとダウンである。
- (2) **フレーバー対称性** : 強い相互作用は、クォークのフレーバーによらず等しく働くと考えられている。例えば、陽子の中でグルーオンからクォーク・反クォークが対生成する過程では、アップクォークの対とダウンクォークの対が

生成する確率は等しい。この性質をフレーバー対称性という。厳密には、アップクォークとダウンクォークで質量が違うので生成確率も異なってくるが、両者とも質量は小さいので、この影響は小さいと見積もられている。

- (3) **SeaQuest 実験**：陽子内部ではグルーオンからクォーク・反クォークの対生成が間断なく起こっていると考えられているが、そのクォーク・反クォークの様子は、海になぞらえて海クォークと呼ばれている。本実験名は、そのような反クォークを含む海 (Sea) を探索する (Quest) という意味がある。
- (4) **反クォーク (パートン) の運動量**：陽子の中のパートンは高速で運動しており、様々な大きさの運動量を持つ。陽子全体の運動量に対する比 = [パートンの運動量] / [陽子の運動量] を使って、パートンの状態を表す。この変数は、提唱者の名をとって「ブヨルケンのスケーリング変数」と呼ばれる。
- (5) **強い相互作用**：電磁相互作用・弱い相互作用・重力相互作用と並んで、自然界に存在する 4 種の基本相互作用の一つ。色荷を持つ素粒子、つまりクォークとグルーオンが強い相互作用をする。短い距離しか伝わらないが、電磁相互作用よりも強く、陽子の中のパートンの状態は強い相互作用の性質でほぼ決定付けられる。
- (6) **NMC 実験**：国際共同実験グループが、スイスの CERN (欧州合同原子核研究所) の高エネルギーミューオンビームを用いて行った実験。1991 年と 1994 年に発表された論文で、陽子の中の反クォークのフレーバー対称性の破れが報告された。柴田利明名誉教授は NMC 実験の論文の共著者の一人。
- (7) **重陽子**：重陽子は重水素の原子核で、陽子 1 個と中性子 1 個から構成されている。中性子の研究では、中性子単体はすぐに崩壊してしまい、標的として使えないため、重陽子が標的として使われる。
- (8) **ドレル・ヤン反応**：陽子と陽子 (より一般にはハドロンとハドロン) が衝突してミューオンと反ミューオンの対が生じる反応。電子と陽電子の対ができる場合もある。一方の陽子のクォークと他方の陽子の反クォークが対消滅し、電磁相互作用を介してミューオン対が生成する。反クォークが必ず反応に関与するので、陽子の中の反クォークを測定するのに適している。提唱者 2 人の名をとってドレル・ヤン反応と呼ばれる。ドレル・ヤン反応を用いて陽子中の反クォークのフレーバー対称性を調べる実験は 1990 年代から CERN (NA51 実験) と FNAL (E866 実験) で行われた。
- (9) **中間子雲モデル**：原子核の中では、核子同士が中間子を交換することによって結合力 (核力) が生じている。これと同様に、核子が単体で存在している場合 (つまり陽子) でも、核子が中間子を放出して自己吸収するという過程が起こり得る。この過程では、中間子が核子を取り巻く雲のように分布すると考えられるので、中間子雲モデルと呼ばれる。中間子はクォークと反クォークから構成されるので、中間子の発生量に伴って陽子における反クォークの存在量が変わる。

【論文情報】

掲載誌 : *Nature*

論文タイトル : The asymmetry of antimatter in the proton

著者 : J. Dove, B. Kerns, R. E. McClellan, S. Miyasaka, D. H. Morton, K. Nagai, S. Prasad, F. Sanftl, M. B. C. Scott, A. S. Tadepalli, C. A. Aidala, J. Arrington, C. Ayuso, C. L. Barker, C. N. Brown, W. C. Chang, A. Chen, D. C. Christian, B. P. Dannowitz, M. Daugherty, M. Diefenthaler, L. El Fassi, D. F. Geesaman, R. Gilman, Y. Goto, L. Guo, R. Guo, T. J. Hague, R. J. Holt, D. Isenhower, E. R. Kinney, N. Kitts, A. Klein, D. W. Kleinjan, Y. Kudo, C. Leung, P.-J. Lin, K. Liu, M. X. Liu, W. Lorenzon, N. C. R. Makins, M. Mesquita de Medeiros, P. L. McGaughey, Y. Miyachi, I. Mooney, K. Nakahara, K. Nakano, S. Nara, J.-C. Peng, A. J. Puckett, B. J. Ramson, P. E. Reimer, J. G. Rubin, S. Sawada, T. Sawada, T.-A. Shibata, D. Su, M. Teo, B. G. Tice, R. S. Towell, S. Uemura, S. Watson, S. G. Wang, A. B. Wickes, J. Wu, Z. Xi & Z. Ye

DOI : 10.1038/s41586-021-03282-z