

二核子系における異常共鳴の研究*

永田純一

広島大学大学院生物圏科学研究科

Study of an exotic resonance in proton-proton system

Junichi NAGATA

Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 739, Japan

要 旨

1949年、E. Fermi と C. D. Anderson による核子と中間子の散乱実験において、共鳴現象として Δ 粒子 ($J^P = \frac{3}{2}^+$, $M = 1232\text{MeV}$) が発見された。それ以降、たくさんの共鳴粒子が見い出され、素粒子と呼ばれる粒子の数が増大し、その“elementary”という概念に疑問が持たれるにいたった。これら共鳴粒子はバリオン族とメソン族に大別され、ハドロンと総称されている。核子と中間子の共鳴状態はバリオン、中間子と中間子の共鳴状態はメソンと呼ばれる。

その後の研究により、現在では物質を構成する最も基本的な粒子は、クォークとレプトン及びゲージ粒子と呼ばれるものであることが判ってきた。そして、これらの粒子間の相互作用は、重力相互作用、強い相互作用、弱い相互作用と電磁相互作用の4種類あることが知られており、ゲージ理論として統一されつつある。

ハドロンはクォークの複合状態であるとするクォーク模型が、実験的に検証されてきている。陽子と中性子の電荷の違いを導く為には、2種類のクォークが必要であり、これからアップ・クォーク (u) とダウン・クォーク (d) の存在が推論された。 Λ 粒子や K 中間子などの奇妙な粒子と呼ばれるハドロンの存在から、ストレンジ・クォーク (s) がなくてはならない。その他に、様々の傍証からチャーム・クォーク (c)、ボトム・クォーク (b)、トップ・クォーク (t) の存在が確かめられるに至った。このようなクォークの複合状態としてハドロンの質量公式が導かれる。

さて、これまで自然界において確認されているハドロンは全て、バリオン数 (B) とよばれる内部量子数が0か1のものであった。バリオン数が1のものがバリオンであり、0のものがメソンである。バリオンは3個のクォークの複合系、メソンはクォーク1個と反クォーク1個の複合系として説明されることから、クォークのバリオン数はいずれも $1/3$ となる。しかるに、バリオン数が0と1以外は許されないとする禁止則は見い出されていない。6個のクォークの複合系である $B = 2$ のバリオン (異常共鳴またはダイバリオンと呼ばれる) が存在する可能性がある。ダイバリオ

ンの存在の是非は、ハドロンのクォーク模型による描像及びクォーク・グルオンの力学である量子色力学の完成の為に重要な問題である。また、存在する場合、そのスピンとパリティの決定が課題となる。本研究の目的と方法は後に二つの研究テーマについて具体的に詳述するが、ダイバリオンの存在の是非の検証と、存在する場合のスピン・パリティの決定が、二つの研究テーマに共通する目的である。その柱となる方法は、概略次の手順に基づく。先ず低エネルギーにおいて伝統的な共鳴解析法である位相差分析法を中間エネルギー領域の解析に拡張し、解析プログラムを作成する。開発したソフト・ウェアを用いて、中間エネルギー領域の陽子-陽子散乱の実験データの解析を進める。

次に実験の現状とこれまでの分析状況であるが、

- (1) 1978年に ANL において、陽子の入射運動量 $P_L = 1.26$ と $1.46 \text{ GeV}/c$ において、 pp (陽子-陽子) 弾性散乱の縦方向偏極全断面積差 $\Delta \sigma_L = \sigma(\uparrow\uparrow) - \sigma(\uparrow\downarrow)$ と横方向偏極全断面積差 $\Delta \sigma_T = \sigma(\uparrow\downarrow) - \sigma(\uparrow\uparrow)$ の観測結果が発表された(1)。これらの実験データのエネルギー依存性に、幅が100MeV 程度の共鳴的な構造が見い出された。これを契機として、このエネルギー領域における pp 弾性散乱、 $pp - \pi^+ d$ 反応のデータの位相差分析 (Phase Shift Analysis: PSA) が進められた。PSA によって決定された軌道角運動量 ℓ の S 行列の複素平面上へのプロットは、アーガンドダイアグラムと呼ばれる。このダイアグラムがエネルギー上昇と共に反時計回りの振る舞いを示すことが、スピン ℓ の共鳴の存在の必要条件である。 1D_2 と 3F_3 の部分波振幅のアーガンドダイアグラムに反時計回りの振る舞いが見出され、共鳴状態 (ダイバリオン) の存在の可能性が指摘された(2)。このアーガンドダイアグラムの反時計回りの振る舞いに対して、 π 、 Δ 粒子生成の影響の検討、 πNN あるいは $N\Delta$ 相互作用による解釈、三つのチャンネルに対する K -行列同時解析等様々なモデル解析も行われている。

1980年代に入り SIN において、 $T_L = 447, 473, 497, 517, 539, 560, 579 \text{ MeV}$ で pp 弾性散乱に於いて完全実験を目指して、double-spin, triple-spin correlation parameters の測定実験がなされた(3)。さらに1990年代に入り LAMPF に於いて、 $T_L = 735 \text{ MeV}$ の pp 散乱でこの SIN と同種の実験が行われた(3)。その結果、 $T_L = 447 - 580 \text{ MeV}$ と 735 MeV のエネルギー領域では、 pp 散乱の散乱振幅が精度良く決定できる可能性が生まれ、幾つかの試みが為されている。また、 $T_L = 834, 874, 934, 995, 1095, 1295, 1596, 1796, 2096, 2396, 2696 \text{ MeV}$ で SATURNE において同種の実験が行われている(3)。

- (2) 近年、 $^3\text{He}(p, d)X$ 反応におけるミッシングマス・スペクトルと analyzing power (A_y) のエネルギー従属性に、幅が10MeV 程度の狭い幅の構造が見い出された。さらに、高エネルギー物理学研究所 (KEK) において陽子-陽子散乱の偏極実験が行われ、実験室系での散乱角 68° での pp 弾性散乱の Analyzing power が、陽子の入射エネルギー $T_L = 491 - 2000 \text{ MeV}$ の領域で極めて正確に (これまでの測定誤差の10%の誤差) 測定された(4)。その結果、 $\sqrt{s} = 2.16$ と 2.19 GeV 辺りに10MeV 程度の幅の狭幅構造が報告された。これらのエネルギー点は、 $^3\text{He}(p, d)X$ 反応で見いだされた狭幅構造のエネルギー点と一致する。もしこの構造が共鳴 (狭幅共鳴) を示すものであれば、このような狭い幅は、崩壊幅が100MeV 程度の強い相互作用からは生じ得ず、量子色力学の現れではないかと注目されている。
- (3) 二核子系における散乱実験は世界中の加速器を用いて行われ、特に pp 散乱に関しては膨大な実験データが提供されているが、中性子ビーム生成の困難さから np (中性子-陽子) 散乱実験のデータは未だ不十分といえる。 np 散乱を解析する場合、アイソスピン0と1の振幅が含まれるため、荷電独立性からアイソスピン1の散乱振幅に pp 散乱の解析から得た振幅を用い、

アイソスピン0の散乱振幅を求めることになる。この為、 pp 散乱の信頼性の高い散乱振幅の導出が強く求められる。最近、星崎等により、 np 散乱の位相差分析の結果、 $T_L = 630\text{MeV}$ 辺りに幅 25MeV の 1P_1 -ダイバリオン共鳴の存在の可能性が示唆された。この共鳴は $\sigma_T^{I=0}$ にピークを示し、 $\Delta\sigma_T$ にディップバンプ構造を示す。 pp 散乱における 1D_2 -、 3F_3 -ダイバリオンの探索の為ばかりでなく、狭幅共鳴に対するより詳細な検討、さらには np 散乱におけるアイソスピン $I=0$ 振幅の解の一意性を高める為にも、 $T_L = 500-1090\text{MeV}$ 領域における $I=1$ 振幅の決定が非常に重要であり、SINとLAMPF、SATURNEで行われた実験によってそのことが可能な状況となってきた。

本研究では、この分野の研究の以上の状況を踏まえて次の二つのテーマについて分析を遂行し、陽子-陽子散乱振幅を決定して、ダイバリオンの存在を検証し、その共鳴パラメータの決定をより確かなものとするを行った。以下に、研究のテーマごとに用いた方法を示す。

- (i) 先述の実験と分析の現状(2)に基づき、KEKにおいて測定された狭幅構造を、二核子系における共鳴により生み出されたものと仮定し、 pp 弾性散乱、 π^+d 弾性散乱、及び $pp-\pi^+d$ 反応の3チャンネルで解析を行う。その結果として、いずれのチャンネルの実験値とも矛盾の無い狭幅共鳴のスピン・パリティと共鳴パラメータの決定を行う。
- (ii) 実験と分析の現状(1)に基づき、 $T_L = 500, 530, 560, 580, 630, 735, 800, 830, 870, 930, 990, 1090\text{MeV}$ において、SIN、LAMPF、SATURNE及び、KEKで測定された新しいデータを含めた pp 散乱のエネルギー独立なPSA (single energy phase-shift analysis)を行う。これによってこのエネルギー領域で散乱振幅を決定し、ダイバリオンの情報を抽出する。

本研究の成果は、次の通りである。

- テーマ(i)について

$\sqrt{s} = 2.16\text{GeV}$ 辺りの構造は、 3F_3 あるいは 3H_5 のスピン・パリティの狭幅共鳴として説明できる。 $\sqrt{s} = 2.19\text{GeV}$ 辺りの構造は、 1G_4 、 3P_1 、 3F_4 あるいは 3H_5 状態の狭幅共鳴として導かれることを示した。そして、それぞれについて共鳴パラメータを決定した。これは狭い幅のダイバリオンの存在の可能性の初めての示唆であり、併せて確認の為の実験の提案を行った。

- テーマ(ii)について

$T_L = 500, 530, 560, 580, 630, 735, 800\text{MeV}$ ではほぼ一意的に散乱振幅を決定することができた。 $T_L = \geq 800\text{MeV}$ の領域では、 $d\sigma/d\Omega$ とPolarizationの $\theta_c = 20-40^\circ$ での実験データがほとんど存在せず、 800MeV 以下の領域ほどの解の安定性は得られなかった。また、 1D_2 、 3P_2 、 3F_3 、 1G_4 、 3H_5 の部分波が反時計回りの振る舞いを示すことが明らかとなった。さらに、これらの部分波についてBreit-Wigner共鳴公式により、その共鳴質量、崩壊幅、弾性散乱を1とし、非弾性散乱が生じる度合いを1からのずれで表わす。ただし、弾性率 ≤ 1)を決定した。PSAを行ったエネルギー領域は、 1D_2 、 3F_3 状態のアーガンドダイアグラムが反時計回りを示すエネルギー領域であるばかりでなく、星崎によって存在の可能性が示唆された np チャンネルの 1P_1 ダイバリオンの共鳴領域でもあり、本研究によって決定された $I=1$ 振幅を用いて、実験と分析の現状(3)に記した課題について、今後、分析を進め、これによって np チャンネルのダイバリオンの探索が可能となった。

本研究において、中間エネルギー領域における pp 弾性散乱の振幅の決定精度を高め、既知のダイバリオンの共鳴パラメータの決定を行うと共に、新しいダイバリオンの存在の可能性を示唆できた。加えて、この成果は、今後の np 弾性散乱の研究の礎となるものである。

本論文は、以下の既に発表した論文を総括したものである。そのリストを記す。

[1] J. Nagata, M. Matsuda, N. Hiroshige and T. Ueda

“Analysis of $pp - pp$, $\pi d - \pi d$ and $pp - \pi d$ concerning narrow structure in $pp - Ay$ data at $\sqrt{s} \sim 2.16\text{GeV}$ ”

Physical Review C, Volume 45, April 1992, pp. 1432-1443.

[2] J. Nagata, H. Yoshino, M. Matsuda, N. Hiroshige and T. Ueda

“Two-Pole Analysis of Narrow Structures in KEK $pp - Ay$, related with $pp - pp$, $\pi d - \pi d$ and $pp - \pi d$ observables”

Modern Physics Letters A, Vol. 7, No. 38, 1992, pp. 3575-3581.

[3] J. Nagata, H. Yoshino and M. Matsuda

“Phase Shift Analyses of pp Elastic Scattering between 500 and 800MeV”

Progress of Theoretical Physics, Volume 93, Number 6, June 1995, pp. 1059-1066.

研究所呼称の略語

ANL: Argonne National Laboratory

KEK: 高エネルギー物理学研究所

SIN: Schweizerisches Institut für Nuklearforschung

LAMPF: Clinton P. Anderson Meson Physics Facility

SATURNE: Saclay にある加速器のニックネーム

参 考 文 献

- (1) I. P. Auer *et al.*, Phys. Lett. **67B**, 113 (1977).
- (2) N. Hoshizaki, Prog. Theor. Phys. **60**, 1796 (1978); M. Akemoto *et al.*, Prog. Theor. Phys. **67**, 554 (1982); R. A. Arndt *et al.*, Phys. Rev. **D35**, 128 (1987); J. Bystricky *et al.*, J. Phys. **48**, 199 (1987).
- (3) E. Aprile *et al.*, Phys. Rev. **D27**, 2600 (1983); E. Aprile *et al.*, Phys. Rev. **D34**, 2566 (1986); M. W. McNaughton *et al.*, Phys. Rev. **C41**, 2809 (1990); C. D. Lac *et al.*, Nucl. Phys. **B315**, 269 (1989).
- (4) H. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. **C42**, R483 (1990).