

クォーク模型による現実的ハイペロン - 核子
相互作用を用いたハイパー核の研究

(研究課題番号 12640265)

平成 12 年度 ~ 平成 14 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 藤原 義和
(京都大学大学院理学研究科講師)

京 都 大 学 図 書



9810057368

附 属 図 書 館

クォーク模型による現実的ハイペロン - 核子
相互作用を用いたハイパー核の研究

(研究課題番号 12640265)

平成 12 年度 ~ 平成 14 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 藤原 義和
(京都大学大学院理学研究科講師)

はしがき

この研究は、平成 12 年度から平成 14 年度の三年間にわたる文部省科学研究費補助金（基盤研究 (C) (2)、研究課題番号 12640265）を得て行われた。ここに報告するその間の研究成果は、次の研究者との共同研究や議論に負うところが多い。これらの諸氏に謝意を表したい。（身分は平成 15 年 3 月現在。）

藤田 匡 気象庁職員

研究組織

研究代表者：	藤原 義和	（京都大学大学院理学研究科 講師）
研究分担者：	今井 憲一	（京都大学大学院理学研究科 教授）
研究分担者：	鈴木 宜之	（新潟大学理学部 教授）
研究分担者：	河野 通郎	（九州歯科大学歯学部 教授）
研究協力者：	宮川 和也	（岡山理科大学理学部 教授）
研究協力者：	仲本 朝基	（鈴鹿工業高等専門学校 講師）
研究協力者：	根村 英克	（KEK 日本学術振興会特別研究員）

研究経費

平成 12 年度	1,700 千円
平成 13 年度	700 千円
平成 14 年度	1,000 千円
計	3,400 千円

研究成果

QCD 理論に基づけば、核子間力 (以後、核力、或いは NN 相互作用と呼ぶ) やハイペロン-核子 (YN) 相互作用、更にはハイペロン-ハイペロン (YY) 相互作用は、内在するクォークとグルオンの複雑な非摂動論的動力学的結果として生じた強い相互作用のハドロンレベルでの多様な現象の発露であり、それはバリオンや中間子のクォーク構造をはじめ、グルオン交換によるクォーク間相互作用やクォークがフェルミオンであることに起因する反対称化による多体効果を直接反映していると期待される。これらは本来 QCD の第一原理から理解されるべきものではあるが、ハドロン物理学のかかわる低エネルギー領域では QCD のもつ非摂動論的様相が強く出現することにより、その実現は今のところ不可能に近い。そこで、80 年代には非相対論的クォーク模型をはじめとする QCD の特徴を具現した低エネルギー有効模型による研究が、特に核力について精力的に行われた。そこでは、従来の中間子交換模型による核力の記述においては純粋に現象論であった斥力芯の起源や、クォーク模型と中間子交換ポテンシャルの関係について重要な知見が数多く得られた。90 年代に入って、ハイペロンを含む原子核であるハイパー核や、 H -ダイバリオン、ストレンジ物質等、ストレンジネス自由度を含む量子多体系の多様な存在形態への関心が急速に高まった。理論面でも、クォーク模型による核力での成果をストレンジネスを含んだ系にまで拡張する試みがいくつかなされたが、それらは、中心力斥力の効果や、スピン軌道力の効果、更には Δ を始めとするバリオン 10 重項間の相互作用の概要、また、後述する H 粒子の存在に関する理論的分析等、断片的であり、ストレンジネスを含む二体バリオン間相互作用全般に対する総合的理解を得るためには、甚だしく不十分であった。こうした状況の背景には、現在のところ核子-核子散乱実験に匹敵するようなハイペロン-核子散乱実験やハイペロン-ハイペロン散乱実験は実現不可能であり、これらの相互作用を知るためにはハイペロンを含む原子核であるハイパー核の実験データに頼らざるを得ない現実がある。60-70 年代のバブルチェーンバー内の飛跡をとらえた低エネルギー YN 散乱データは、量的にも非常に限られており、しかも大きな誤差棒を持っている。近年、シンチレーティング・ファイバー・ターゲットを用いた新しい YN 散乱実験が高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われ、新しく中間エネルギー領域での YN 散乱断面積の値や、ハイペロンの散乱偏極量が測られつつある。また、ハイブリッド・エマルジョン法によるダブル・ストレンジネス核の探索実験が KEK やブルックヘブン国立研究所

(BNL) で行われ (BNL-AGS E929)、後述するように大きな成果が得られている。理論面では、核力の 1 中間子交換模型 (OBEP) を拡張した Nijmegen 模型や Jülich ポテンシャルが提出されたが、これらにも実験データの絶対的不足による大きな不定性が存在する。ハイパー核の束縛エネルギーも YN 相互作用に密接に関わるが、今のところまだ明確な成果が得られていない。

こうした現状を打破すべく、我々は、今期を含めて過去 3 期に渡り、 YN 、 YY 相互作用の理解をめざす、実験、理論双方の面での総合的な研究計画を実施してきた。我々の基本的な考え方は、 YN 、 YY 相互作用等、核力を含む基本的バリオン間相互作用は、強い相互作用に対するクォーク・グルオン描像に基づいて、統一的、かつ整合的に記述されてこそ意味があるという立場である。例えば、クォーク模型では、核子やハイペロンとともにスピン・フレイバー SU_6 超多重項の 56 次元表現に属するバリオン 8 重項 (B_8) のメンバーである。従って、核力と YN 相互作用の研究は YY 相互作用や H -ダイバリオンを含むより一般的な $B_8 B_8$ 相互作用のフレイバー依存性を明らかにすることと位置付けられる。実際、相互作用の近距離をクォーク自由度の動力学として記述し、中間領域の引力や遠距離部分で重要なパイ中間子交換効果を取り込んだクォーク共鳴群模型による核力の記述は、幾多の改良ののち、現在、現象論的 1 中間子交換模型 (OBEP) に劣らない精度に達しており、今期の研究では三核子系の束縛状態については、実験との比較において OBEP を凌ぐ結果が得られている。この模型の枠内では、 YN 相互作用や YY 相互作用はフレイバー自由度の単なる拡張として自然に得られ、豊富な核力の実験データと少数の YN 散乱データ、及び、近年新しく発見されたダブル Λ -ハイパー核である ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ (長良イベント) をすべて同時に再現する模型は fss2 と呼ばれる我々のクォーク模型相互作用以外には無い。その意味で fss2 は十分現実的クォーク模型バリオン間相互作用と呼びうる模型である。この模型は、更にいまだ実験データの全く存在しない、ストレンジネス $S = -3, -4$ の系である、 ΞN 相互作用や $\Xi\Xi$ 相互作用に対しても、対称性に裏付けされた信頼のおける相互作用を提供している。

実際には理論面での進展と実験面での進展は常に位相が揃うわけではなく、理論面では容易に達成することが可能であっても、実験的には難しい場合は多いにありうる。今期は、長い間囑望されて来た、 YN 、 YY 相互作用の理解に役立つハイパー核のデータが長い準備期間の後、堰を切って大量に出始めた時期であるといえる。今期の実験的成果は、数年後に実験が始まる 50 GeV 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) でのストレンジネス実験にとって必要欠くべからざる第一歩となるであろう。

理論面での将来の課題は、既に得られている現実的クォーク模型バリオン間相互作用 fss2 を用いて軽いハイパー核の Faddeev 計算や Brueckner 理論に基づく詳細な G -行列計算を行う事である。その結果をハイパー核や YN 相互作用の新しい実験データと比較検討することにより、より正確な YN 相互作用や YY 相互作用の理解を得ると同時に、 Λ , Σ , Ξ 粒子の一体ポテンシャルや有限核における ΛN - ΣN 結合、 $\Lambda\Lambda$ - ΞN - $\Sigma\Sigma$ 結合の振舞いを詳しく調べる。特に、数年後に実験が可能になる J-PARC 計画に備えて、理論サイドから予言できる相互作用とハイパー核データの相互関連をできる限り詳細に調べつくす。既に得られている fss2 の予言するバリオン間相互作用の散乱断面積やスピン偏極量については、web 上で公開する等、実験サイドからも使いやすいホームページ作りを心がけるつもりである。

以下に、これまで 3 期に及ぶ研究計画の成果の簡単なまとめと、今期の具体的な成果を各項目ごとに述べる。

1. 一般研究 (C) 「クォーク模型によるハイペロン-核子相互作用の研究」(平成 4 - 6 年度)

WKB-RGM 法を用いて核力とハイペロン-核子相互作用の中心力とスピン軌道力を検討し、パウリ原理の効果と中心力引力のフレイバー依存性との相関を明らかにした。また、Nijmegen model-F に基づく有効中間子交換ポテンシャルを導入し、核力とハイペロン-核子相互作用を同時に記述するクォーク模型である RGM-F を完成した。

2. 一般研究 (C) - 基盤研究 (C) 「クォーク模型によるハイペロン-核子相互作用の記述とその実験的検証」(平成 7 - 9 年度)

スカラー及び擬スカラー中間子 9 重項の交換からなる有効中間子交換ポテンシャルのスピン・フレイバー因子を計算し、現在 FSS と RGM-H と呼んでいる二つの新しい模型を完成した。二つの模型の違いは、アイソスピン $I = 1/2$ チャンネルにおける ΛN - ΣN 結合の様相 (特に P 波) にあり、それには $\Sigma N(I = 1/2)$ チャンネルにおける中心力引力の強さが関係している。また、KEK で新しく得られた中間エネルギー領域における Σ^+p , 及び、 Σ^-p 散乱断面積は、クォーク模型の結果と合致していることが示された。古い模型である RGM-F については、ストレンジネス $S = -2$ であるハイペロン-ハイペロン相互作用の中心力を WKB-RGM 法の枠内で検討し、さらに、非中心力まで含めた $\Lambda\Lambda$ - ΞN - $\Sigma\Sigma$ チャンネル結合共鳴群模型

を完成した。これにより、現実的なクォーク模型による H 粒子の結合エネルギー (RGM-F では -20 MeV の束縛状態が存在するが、FSS 以後の新しい模型では束縛状態としては存在しない) と Ξ^-p 散乱断面積がはじめて得られた。

3. 基盤研究 (C) 「クォーク模型による現実的ハイペロン-核子相互作用を用いたハイパー核の研究」 (平成 12 - 14 年度)

この今期研究計画では、FSS と RGM-H にベクトル中間子交換からなる有効中間子交換ポテンシャル、及び、高いエネルギー領域で重要となる運動量依存項を補って、核力を 800 MeV 領域まで再現する新しい模型 fss2 が完成した。これには、クォーク共鳴群模型を高いエネルギーまで精度よく解くことができる、運動量表示での Lippmann-Schwinger 方程式による解法の開発が大きく貢献している。この方法は同時に、クォーク交換積分核の G -行列や T -行列の計算を可能にし、核物質中でのバリオン間相互作用や一粒子ポテンシャルの Brueckner 理論による検討や Faddeev 方程式による少数バリオン系の計算が可能となった。fss2 はその優れたスピン・フレイバー対称性を用いて、すぐさま、すべてのバリオン 8 重項 (B_8) 間の相互作用にまで拡張され、実験データが全くないストレンジネス $S = -3, -4$ の領域でも核力と同じ精度で位相差や散乱断面積、スピン偏極量が議論できるようになると同時に、少なくとも理論面では B_8B_8 相互作用の全貌が明らかになった。更に、 2 体の RGM kernel を用いた 3 体クラスター方程式の定式化が完成し、Faddeev 方程式との関係も完全に明らかになった。具体的には fss2 や FSS の T -行列を使った、 ^3H の Faddeev 計算が行われ、クォーク模型ポテンシャルの大きな特徴である核力の短距離部分の積分交換核による記述により、重陽子の D -state probability を十分大きく保ったままで、実験値に近い 3 核子束縛状態の結合エネルギーが再現される事が明らかになった。また、 2α RGM kernel を直接用いた $^9_\Lambda\text{Be}$ の Faddeev 計算や、fss2、FSS の T -matrix を用いた $^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ の Faddeev 計算が行われ、fss2 は「長良イベント」の示す $\Lambda\Lambda$ 相互作用の引力の強さを正しく再現することが示された。これらの例は、fss2 や FSS を直接用いた少数バリオン系の Faddeev 計算が十分信頼できることを示しており、現在 hypertriton $^3_\Lambda\text{H}$ の Faddeev 計算への取組が進んでいる。

[今期の具体的な成果]

1. 現実的クォーク模型バリオン間相互作用 fss2 の完成

従来の有効中間子交換ポテンシャル (EMEP) をベクトル中間子まで含む一般的な OBEP の項にまで拡張した NN と YN の新しいモデル fss2 を完成した。このモデルは、強すぎる一パイ中間子交換テンソル力を弱める効果としてベクトル中間子の QLS 項を強く利かせていること、及び、スカラー中間子とベクトル中間子の運動量依存項が入っている点が特徴的である。これにより、 NN については位相差解析との合いが大きく改善し、OBEP に匹敵する精度となった。 YN の現存する実験データとの合いも改善した。また、新しく導入された運動量依存項に関連して、高い運動量領域での G -行列計算で一粒子ポテンシャルが FSS の様にもう一回大きく引力的になるという問題点は解消した。

今期の最大の発展は、「ハイペロンを含む核子多体系のなかで、クォーク RGM から得られたバリオン間相互作用をどの様に使うか」という点で一つの解答が得られた事である。その詳細は 2) に譲るが、まず、バリオン間相互作用の RGM に現れる交換積分核 (quark exchange kernel) を直接用いた G -行列方程式を詳細に分析し、その 2 次的成果として、RGM 方程式で Pauli 原理を損なうことなく実験の threshold energy や二体バリオン系の換算質量を正確に扱える様にする手法を開発した。この手法を fss2 に適用して、i) 正確な threshold energy と Coulomb force を取り込んだ particle basis での計算と、これによる Λp 、 Λn charge symmetry breaking (CSB) の微視的分析、および、ii) NN 、 YN の G -行列と一体スピン軌道力の再計算、を行った。まず、i) については、

- np - pp の有効距離パラメータ等における荷電独立性の破れ (CIB) は、pion Coulomb correction で約半分まで解決する。残りは、 pp 、 nn 系に対しては $f_1^S \times 0.9949$ を用いる事で補正している。
- Λp 、 Λn の荷電対称性の破れ (CSB) は、方向としては良いが、Nijmegen model の様な大きな効果は Coulomb、threshold 補正からは出ない事が確かめられた。
- inelastic $\Sigma^- p$ capture ratio at rest (in flight) は、 $r_R = 0.442$ ($r_F = 0.419$) で、実験値 $r_R = 0.33 \pm 0.05$, 0.474 ± 0.016 , 0.465 ± 0.011 ($r_F = 0.47 \pm 0.03$) より多少小さめである。我々のモデルでは、 $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ 全散乱断面積が多少大きめである事が原因である。
- $\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^- p$ 、 $\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^0 n$ 、 $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ 散乱の低エネルギー全散乱断面積については、藤田の簡単な井戸型ポテンシャルによる Coulomb と threshold 補正

に対する見積りが十分正確であることが確かめられた。

また、ii) については、fss2 による $U_B(k_1 = 0)$ の結果は、 $\rho = \rho_0$ ($k_F = 1.35 \text{ fm}^{-1}$) の対称核物質に対して FSS の値から次のように変わった。(FSS $\rightarrow$ fss2)

NN: QTQ で $-80 \rightarrow -81 \text{ MeV}$ 、continuous choice で $-90 \rightarrow -89 \text{ MeV}$ 。nuclear saturation curve は QTQ、continuous choice とともに Bonn B ポテンシャルの結果に近い結果を与える。

Λ N: QTQ で $-43 \rightarrow -45 \text{ MeV}$ 、continuous choice で $-46 \rightarrow -48 \text{ MeV}$ 。一方、 Λ ハイパー核の実験データからは -30 MeV であり、我々の結果は、多少深い値を与えている。

Σ N: QTQ で $16 \rightarrow 8 \text{ MeV}$ 。(imaginary part は $-5 \rightarrow -3 \text{ MeV}$ 。) continuous choice で $18 \rightarrow 7 \text{ MeV}$ 。(imaginary part は $-19 \rightarrow -14 \text{ MeV}$ 。)

FSS からの多少のずれはあるものの、fss2 の結果は定性的にはこれまでの結果とほぼ同じである。最近、 G -行列に基づく有限核の一粒子ポテンシャルの計算が Thomas-Fermi 近似を用いて行われ、我々の Λ N 相互作用は、 Λ ハイパー核の実験データと比較して引力すぎるということはない、ということが確認された。

fss2 では、スカラー中間子からくる LS 成分がかなり利いているために、 $(3q)$ クラスタのひろがりパラメータが $b \sim 0.56 \text{ fm}$ とかなり小さくなっており、Fermi-Breit 相互作用からの LS 力が hinder されている。その結果、 Λ の一体 ℓ_s 力における LS と $LS^{(-)}$ の打消しが十分起こらず、Scheerbaum factor S_Λ は FSS の時程小さくはない。fss2 における G -行列計算の結果は、 $S_N \sim -42 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^5$ 、 Λ 及び Σ 粒子のそれは、 $S_\Lambda/S_N \sim 1/4$ 、 $S_\Sigma/S_N \sim 1/2$ である。

次に、これまでのクォーク模型による核子間力とハイペロン-核子相互作用の研究を拡張して、一般のバリオン 8 重項 (B_8) のすべてのバリオンに関して、それらの間の相互作用に対する模型を完成した。これらは、近年研究が進んでいるストレンジネス $S = -2$ の領域のみならず、今だ実験が難しい $S = -3, -4$ の領域のバリオン間相互作用をも完全に含むものである。それにより、理論面では $B_8 B_8$ 相互作用の全貌が明らかになるとともに、多様な核物質のほとんどすべての場合について、飽和性の研究やハイペロンの混在、一粒子ポテンシャルの検討等が可能になった。

まず、これまで NN, YN, YY で個別に計算していた spin-flavor factor を sub-routine 化し、Maple 数式処理プログラムの活用により、すべての必要な係数が解析

的な表式として表示されるようになった。今のところ、isospin 表示の係数だけであるが、これにより、すべての $B_8 B_8$ 系の spin-flavor factor が coupling term を含めて、たちどころに計算できるようになった。これまでのプログラムに組み込むことによって、新しい模型 fss2 のみならず FSS についても、任意の $B_8 B_8$ 系の位相差と散乱断面積、スピン偏極量が完全なチャンネル結合のもとで計算できる。fssG というこのコンピュータプログラムは、将来的には、web 上での公開を考えている。

これらの模型では、パラメータは NN , YN の実験データを合わせる様に既に決められているので、 $S = -2, -3, -4$ の結果は全てその模型の prediction である。詳しい分析はまだ完全には終わっていないが、FSS と fss2 は定量的にはかなり違っている事が明らかになった。しかし、その様な差が出るメカニズムは完全にたどっていく事が出来、結局は、まだ明らかになっていない幾つかの YN 相互作用の不定性に起因している。 $\Sigma N(I = 1/2)$ 3S 中心力の強さ、反対称 LS 力の強さ等、更なる実験的情報が絶対に必要である。これらの事を加味すると、クォーク模型による $B_8 B_8$ 相互作用の特徴は、定性的には fss2 も FSS も同じであるということが明らかになる。すなわち、Hamiltonian の近似的 SU_3 スカラー性と spin-flavor SU_6 自由度におけるクォークパウリ原理の重要な役割、パイ中間子の効果の変化とフレーバー対称性の破れの効果等である。

我々がもっともらしいと考えている fss2 による prediction として顕著なものは

1. $B_8 B_8$ 系には deuteron 以外 bound state はない。(H particle は $\Lambda\Lambda$ threshold 以下には bound state として存在しない。)
2. $\Xi\Xi$ 弾性散乱の散乱断面積は NN 程大きくはない。
3. ΞN 相互作用も ΣN 相互作用と同様、顕著なアイソスピン依存性を持つ。従って、粒子チャンネルにおけるチャンネル結合効果は、 $S = -2$ でも非常に重要である。
4. $\Xi^-\Sigma^-$ ($\Xi\Sigma(I = 3/2)$) 相互作用はかなり引力的である。

等である。とくに、近年注目されている $\Lambda\Lambda$ 相互作用はこれまで言われていた程引力的でなく、位相差の持ち上がりは、高々 20° 程度である。これは、近年相次いで発見された、「出町柳イベント」、「長良イベント」という double Λ hyper 核の示す $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の値、 1.01 ± 0.20 MeV (${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ の値) と consistent である。

fss2 による Ξ 粒子の一粒粒子ポテンシャル $U_\Xi(0)$ の結果は、 $\rho = \rho_0$ ($k_F = 1.35 \text{ fm}^{-1}$) の対称核物質に対して約 -10 MeV 程度であり、通常信じられている値 -14 MeV

より多少小さい。しかし、これは $\Lambda\Lambda$, ΞN , $\Sigma\Lambda$, $\Sigma\Sigma$ full coupled channel の計算であり、これまでこのような計算例は存在しない。中性子物質、 Λ 物質等における計算も進んでいるが、あまりにも多くの場合が可能のため、現在その整理に時間がかかっている。中性子物質における Σ^- の一粒子ポテンシャルは、 $\Sigma N(I = 3/2) {}^3S_1$ 状態における Pauli 原理の効果により強い斥力となっている。また、中性子物質の gap energy や Λ ハイペロン超流動の可能性についても検討した。「長良イベント」に consistent な模型 fss2 については、 1S_0 状態の $\Lambda\Lambda$ 相互作用の引力が弱いことから、 Λ ハイペロン超流動の可能性はまず無い事が結論された。

次に、ストレンジネス $S = -2$ 系の相互作用については、FSS と fss2 を用いて、アイソスピン $I = 1$ 状態で可能な $\Sigma\Lambda$ channel との channel coupling まで正しく考慮した ΞN 散乱断面積を検討した。最近、玉川、福田たちによって得られた BNL-AGS E906 実験と consistent な結果が得られた。この channel coupling の特徴は、 $I = 0$ 状態と違って、one-gluon exchange interaction と EMEP の寄与が同じ符号で働く事である。その結果、 ΞN single channel で Pauli 原理の効果から大きく斥力的であった S 波の相互作用が、ほとんどゼロ (1S_0)、あるいは、顕著な cusp 構造を持ち (3S_1)、中間エネルギー領域における Ξ^-n 全散乱断面積に大きな影響を与える。このことは、 $\Sigma\Lambda$ channel を考慮していないこれまでの計算による結果は全て再考を要する事を示している。

2. 2 体 RGM kernel を用いた 3 体クラスター方程式と、それと完全に同値な Faddeev 方程式の定式化の完成

fss2 を初めとするクォーク模型ポテンシャルはすべて非局所で、RGM 方程式特有のエネルギー依存性を持っている。更に、いくつかの 2 バリオン状態ではクォークレベルでのパウリ禁止状態が存在し、それらをバリオン多体系の中でどのように扱うかは、前もって考えておく必要がある。今期の研究計画で、これらのすべての点で大きな進展が見られた。すなわち、2 体相対運動に Pauli forbidden state がある場合の、2 体クラスター RGM kernel を用いた 3 体クラスター方程式と、それに完全に equivalent な Faddeev 方程式が確立した。結論として得られた 3 体クラスター方程式は、堀内の意味での対直交条件 — pairwise orthogonality condition — を備えた 3 体直交条件模型と同じ構造をしているが、RGM kernel 固有の Pauli allowed space におけるエネルギー依存性を self-consistent に扱う事が大変重要である。この直交性のおかげで、この 3 体クラスター方程式は、RGM kernel から導かれる T -matrix の

singular part を除いたもの (RGM T -matrix と名づけた) を使った Faddeev 方程式と完全に同値である。このことは、 $3d'$ 系と 3α 系の双方について数値的に確かめられた。6 ~ 7 MeV 程度以上の結合エネルギーを持つ場合には、この 3 体方程式を並進不変な調和振動子函数を用いて変分法で解いた結果と、Faddeev formalism による結果は、1 keV の精度で完全に一致している。Faddeev formalism を用いて、 3α 系の励起 0_2^+ 状態の計算も行ったが、そこでは 2α 部分系のエネルギー期待値についての self-consistency と基底状態との直交性を同時に扱う事が重要である。他の角運動量状態の計算も Faddeev formalism では可能である。ここで確立した 2 体 RGM kernel を直接用いた三体 Faddeev 方程式の定式化は、以下のように様々な系に適用され、いずれも興味深い結果が得られている。

1) fss2, FSS の NN 相互作用を用いた ^3H の Faddeev 計算と、 ^3H , ^3He の charge rms radius の検討

この課題は、元来 hypertriton の Faddeev 計算のための準備計算であったが、予想に反して大きな問題提起となった。すなわち、deuteron の D -state probability を減らすことなく ($P_D \sim 5.5\%$)、大きな ^3H の結合エネルギー ($E(^3\text{H}) = -8.519$ MeV (fss2), -8.394 MeV (FSS)) を得る事が出来た。ここに、実験値: -8.48 MeV である。核力の charge dependence の効果 190 keV を考えると、まだ 150 keV 不足している。しかし、CD-Bonn や AV18 等、従来の realistic potential が 500 keV - 1 MeV、underbind する事を考えると、大きな進歩である。3 体力の考察が現在大きな曲がり角に来ていることを考えると、2 体力の off-shell effect や non-locality 等、2 体力自体をもう一度考え直す必要がある。クォーク模型 NN 相互作用自身の課題としては、 α 粒子への適用、散乱問題 (特に、breakup process) への適用が必要である。charge rms radius の計算には多大な努力を必要としたが、OBEP 程度には実験を再現している。しかし、実験データの解析上の問題もあり、理論と実験の間に不一致が存在するのか、しないのか、今後更につめた議論が必要である。

2) $2\alpha\Lambda$ 模型による $^9_\Lambda\text{Be}$ の Faddeev 計算

この計算の主な目的は、i) 2 クラスター RGM kernel を用いた 3 体 Faddeev formalism で、2 同種粒子系の場合の典型例、ii) 信頼出来る $\Lambda\alpha$ 相互作用 (T -matrix) の作成、iii) 現在の YN 相互作用は $^9_\Lambda\text{Be}$ 等のハイパー核を正しく記述できるか? という 3 点である。 2α 間には 2α RGM kernel を直接用い (Minnesota 3-range force,

$u = 0.9469$, $v = 0.257 \text{ fm}^{-2}$)、 $\Lambda\alpha$ 間には種々の ΛN ポテンシャルを $(0s)^4 \alpha$ で folding したものをを用いる。現在のところ、中心力だけからなる有効 ΛN ポテンシャルを用いているために ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ の励起 $5/2^+$ 状態と $3/2^+$ 状態は縮退している。(軌道角運動量 $L = 2$ の状態である。) この有効 ΛN ポテンシャルとしては、肥山によって用いられた Nijmegen potential と Jülich potential の G -行列計算に基づくもの (NS, ND, DF, JA, JB) 以外に、新しく Sparenberg-Baye (SB) potential と呼んでいるものを使用する。これは、fss2 による我々のクォーク模型 ΛN 相互作用を supersymmetric transformation によって局所化し、それを 2 range の Gaussian 関数で近似したもので、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の overbinding problem を避けるために 3S 状態の引力部分を約 10% (0.8923 倍) 弱めてある。今のところ、 1S と 3S 状態だけで odd 状態のポテンシャルはなく、pure Serber force である。部分波は $l_{\alpha\alpha} = 6$ まで含まれており、クーロンは $R_C = 14 \text{ fm}$ の cut-off クーロンで、計算精度は 1-2 keV である。(3 α の場合と同様、cut-off Coulomb の取り扱いが大きな問題となる。)

SB potential による Faddeev 計算の結果は、基底状態 0^+ 状態については約 200 keV overbound し、基底 0^+ 状態と 2^+ 状態の間隔は約 100 keV ほど不足する。NS, ND, NF, JA, JB を用いた場合の肥山による結果との比較は、約 70 - 90 keV 彼らのエネルギーの方が低く出ている。肥山達の論文 (Prog. Theor. Phys. 97 (1997) 881) の Appendix に与えられている $\Lambda\alpha$ folding potential は、実は重心の取り扱いが不正確で exchange term には小さな間違いがある。これが上記の差の原因であることも考えられるが、我々はこの差はむしろ 2α 部分の RGM と OCM の違いであり、一般に OCM の方が引力的に出る事によるものと考えている。ここで用いられた ΛN 相互作用を引力の強さが強い順に並べると

$$\begin{aligned} \text{ND} (-7.483) &> \text{NF} (-6.906) > \text{SB} (-6.837) > \text{NS} (-6.742) > \text{JA} (-6.677) \\ &> \text{JB} (-6.474) \end{aligned}$$

となる。実験値は $-6.62 \pm 0.04 \text{ MeV}$ であるから、それは JA と JB の間にあることが分かる。勿論、これは Jülich potential が正しいことを意味するのではない。 s -殻 Λ ハイパー核、特に ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ のエネルギースペクトルの分析を通じて、Jülich potential のスピン・スピン項は完全に実験とは矛盾することが知られている。 2^+ 状態の励起エネルギーは 2.91 - 2.94 MeV で、最近得られたハイパー核 γ 線分光学による実験値 3.04 MeV と比較すると 100 - 130 keV 小さすぎる。実験精度が $\pm 40 \text{ keV}$ 以下であるから、これは有意な差である。クォーク模型相互作用の予言するスピン・

軌道力により、 $5/2^+ - 3/2^+$ の ls splitting が正しく再現されるかということが目下の最大の課題である。

3) $2\Lambda\alpha$ 模型による ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ (長良イベント) の Faddeev 計算

簡単な 3-range Gauss の $\Lambda\Lambda$ ポテンシャル (肥山ポテンシャル) を使ったエネルギー計算結果は、肥山による結果と 60 - 80 keV の精度で一致している。我々の計算では、Faddeev 方程式に取り込まれる部分波の増大により、odd の ΛN potential の傾向 (例えば、Nijmegen hard-core model-D の P -波は引力) がはっきり見えている。これらのポテンシャル模型では、 S -波以外の寄与は 50 keV 以下と小さい。fss2 の $S = -2$, $I = 0$ 相互作用 T -matrix を用いた計算では、 $\Lambda\alpha$ 間に SB を用いた時の、 $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の値は、 $\Lambda\Lambda$ single channel で約 1 MeV、 $\Lambda\Lambda - \Xi N - \Sigma\Sigma$ full coupled channel で 1.41 MeV である。 ${}^3\text{H}$ で 2 channel (1S_0 , 3S_1) と 5 channel (1S_0 , 3S_1 , 3D_1) 計算の差が 0.36 - 0.38 MeV 程度である事を考慮すると、 $\Lambda\Lambda - \Xi N - \Sigma\Sigma$ full channel を入れた、coupled channel Faddeev の計算で、更に 0.5 MeV 程度のエネルギーの増大はありそうである。(実際は、 ΞN チャンネルの N の Pauli blocking effect でもっと小さいかもしれない。) ここで、詳細な G -行列計算に基づく α -粒子の Brueckner rearrangement effect として 1 MeV 程度の斥力を考慮すると、「長良イベント」の値 $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20$ MeV は正しく再現されと考えられる。

3. 新しいハイパー核データの出現

今期研究計画の特徴は、特に YN 相互作用や YY 相互作用の理解に重要な意味を持つ多くの新しいハイパー核データが次々に得られ始めたことである。まず、高効率 Ge 検出器システム Hyperball の完成により、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ や ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ の励起状態からの γ 線が測定され (KEK-PS E419, BNL-AGS E930)、非常に高い精度で励起エネルギーを決定する事が可能になった。前者は、 ΛN 有効相互作用のスピン・スピン部分の情報を、後者と ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の正確なエネルギースペクトル (BNL-AGS E929) は、 Λ ハイペロンの一粒子スピン軌道力の情報を与える。特に、 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ の二つの励起状態は、それらを $5/2^+$, $3/2^+$ 状態と仮定して、 31 ± 2 keV と非常に小さな spin-orbit splitting を示しており、それはクォーク模型によって予見される、通常の LS 力と $LS^{(-)}$ 力の相殺という Λ ハイペロンの一粒子スピン軌道力に対する描像と完全に一致している。また、 YN 散乱実験の面では、中間エネルギー領域における Σ^+p 散乱 (KEK-PS E251) や Σ^-p 散乱 (KEK-PS E289) の弾性散乱断面積が測られ、それらはいずれも誤差の

範囲内で理論的予想と合致している。更に、アイソスピン $I = 3/2$ チャンネルの強いスピン軌道力を検討するために、偏極 Σ^+p 弾性散乱の asymmetry が測定された。(KEK-PS E452) その結果は、FSS や fss2 の予見するところと reasonable な一致を与えている。 (K^-, K^+) 反応によるダブルハイパー核の実験 (BNL-AGS E906) では、かなりの数の ${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ が生成された形跡が見られる。また、この実験では、中間エネルギー領域における ΞN 散乱断面積が初めて得られた。 Ξ^-p , Ξ^-n 散乱断面積の比の決定には、まだ多くの解析上の不定性があるが、将来実験精度が進めば、クォーク模型の予見する ΞN 散乱断面積との詳細な比較が可能である。Si ターゲットを用いた (π^-, K^+) 反応による Σ -nucleus potential の分析では、大きな quasi-free scattering による散乱断面積の増大を説明するためには、中心部分の高さが 150 MeV と非常に強い斥力が必要であるという結果が得られている。実験データの解析に使われた仮定が単純過ぎるという問題点もあるが、この実験結果は、10 - 20 MeV という FSS 及び fss を使った G -行列計算により得られる Σ ハイペロンの一粒子ポテンシャルの斥力的性質と定性的には合致している。Thomas-Fermi 近似を用いた有限核における座標表示での一粒子ポテンシャルの深さは fss2 で約 40 MeV である。ハイブリッド・エマルジョン法によるダブル・ストレンジネス核の探索 (KEK-PS E373) では、 (K^-, K^+) 反応によりダイヤモンド標的内で Ξ^- 粒子を発生させ、エマルジョン直前においた Scintillating-MicroFiber-Bundle 検出器によってダブル Λ ハイパー核生成のイベントをさがす。全自動飛跡解析システムの開発により、実験データの解析が大幅に進み、現在 30 % 近いデータの解析が修了している。今回、「出町柳イベント」と呼ばれる ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ と「長良イベント」と呼ばれる ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ の二つのダブル Λ ハイパー核が新しく発見された。この中で、後者の「長良イベント」は、中性子生成の過程を含んでいないことと α 粒子に低い励起状態が存在しないということにより、ほとんどユニークにその生成と崩壊の過程が同定された。ここから導かれる、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用の強さの目安を与える $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の値は $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20$ MeV と決まり、従来信じられて来た値 -4.3 MeV は、正しくないということがほぼ確実になった。従来の実験データは、一番初期の Prowse のデータを除き、いずれも、励起状態を含む生成、崩壊過程を考えることにより、「長良イベント」と矛盾なく理解できる。 $\Lambda\Lambda$ 相互作用を記述する種々の模型があるが、Nijmegen soft-core potential NSC97 は全て引力が弱すぎ、新しい模型 ESC00 は引力が強過ぎる。現在のところ fss2 だけがこの強さの $\Lambda\Lambda$ 相互作用を再現する。2 番目、3 番目の「長良イベント」が早く見つかることを期待したい。

研究発表

(1) 原著論文

1. M. Kohno, Y. Fujiwara, T. Fujita, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Hyperon Single-Particle Potentials Calculated from SU_6 Quark-Model Baryon-Baryon Interactions
Nucl. Phys. **A674** (2000), pp. 229 - 245.
2. Y. Fujiwara, M. Kohno, T. Fujita, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Single-Particle Spin-Orbit Strengths of the Nucleon and Hyperons by SU_6 Quark-Model
Nucl. Phys. **A674** (2000), pp. 493 - 514.
3. Y. Fujiwara, M. Kohno, T. Fujita, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Lippmann-Schwinger Resonating-Group Formalism for NN and YN Interactions in an SU_6 Quark Model
Prog. Theor. Phys. **103** (2000), pp. 755 - 794.
4. H. Nemura, Y. Suzuki, Y. Fujiwara and C. Nakamoto
Study of Light Λ - and $\Lambda\Lambda$ -Hypernuclei with the Stochastic Variational Method and Effective ΛN Potentials
Prog. Theor. Phys. **103** (2000), pp. 929 - 958.
5. Y. Fujiwara, M. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
 G -Matrix Equation in the Quark-Model Resonating-Group Method for Baryon-Baryon Interaction
Prog. Theor. Phys. **104** (2000), pp. 1025 - 1040.
6. Y. Fujiwara, M. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Interactions between Octet Baryons in the SU_6 Quark Model
Phys. Rev. C **64** (2001), 054001-1:6.
7. Y. Fujiwara, T. Fujita, M. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Resonating-Group Study of Baryon-Baryon Interactions for the Complete Baryon

Octet: NN Interaction

Phys. Rev. C **65** (2002), 014002-1:24.

8. Y. Fujiwara, H. Nemura, Y. Suzuki, K. Miyagawa and M. Kohno
Three-Cluster Equation Using Two-Cluster RGM Kernel
Prog. Theor. Phys. **107** (2002), 745 - 757.
9. Y. Fujiwara, Y. Suzuki, K. Miyagawa, M. Kohno and H. Nemura
Redundant Components in the 3α Faddeev Equation Using 2α RGM Kernel
Prog. Theor. Phys. **107** (2002), 993 - 1000.
10. Y. Fujiwara, K. Miyagawa, M. Kohno, Y. Suzuki and H. Nemura
Triton Binding Energy Calculated from the SU_6 Quark-Model Nucleon-Nucleon Interaction
Phys. Rev. C **66** (2002), 021001-1:5 (R).
11. M. Kohno, Y. Fujiwara and Y. Akaishi
Brueckner Rearrangement Effects in ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ and ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$
submitted to Phys. Rev. C (2003) (R).
12. H. Nemura, Y. Akaishi and Y. Suzuki
Ab Initio Approach to s -Shell Hypernuclei ${}^3_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ and ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ with a Realistic ΛN - ΣN Interaction
Phys. Rev. Lett. **89** (2002), 142505-1:4.
13. H. Tamura et al.
Observation of a Spin-Flip $M1$ Transition in ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$
Phys. Rev. Lett. **84** (2000), 5963 - 5966.
14. K. Tanida et al.
Measurement of the $B(E2)$ of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ and Shrinkage of the Hypernuclear Size
Phys. Rev. Lett. **86** (2001), 1982 - 1985.
15. J. K. Ahn et al.
Production of ${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ Hypernuclei
Phys. Rev. Lett. **87** (2001), 132504-1:5.

16. H. Takahashi et al.
Observation of a ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$ Double Hypernucleus
Phys. Rev. Lett. **87** (2001), 212502-1:5.
17. H. Noumi et al.
Sigma-Nucleus Potential in $A = 28$
Phys. Rev. Lett. **89** (2002), 072301-1:4; **90** (2003), 049902-1:1 (E).

(2) 国際会議招待講演

1. Y. Fujiwara, T. Fujita, M. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
The Nucleon-Nucleon and Hyperon-Nucleon Interactions in the Quark Model
Proceedings of the 1st Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics
(APFB99), Tokyo, Japan, August 23 -28, 1999, ed. S. Oryu, M. Kamimura
and S. Ishikawa, Few-Body Systems Supplement **12** (2000), pp. 311 - 316.
2. Y. Fujiwara, M. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
A Realistic Description of Nucleon-Nucleon and Hyperon-Nucleon Interactions
in the SU_6 Quark Model
Proceedings of the Mini-Workshop on Few-Quark Problems, Bled, Slovenia,
July 8 - 15, 2000, *Bled workshop in Physics*, BLEJSKE DELAVNICE IZ
FIZIKE, LETNIK 1, ŠT. 1, Vol. 1, No. 1 (2000), pp. 29 - 33, DMFA -
ŽALOZNIŠTVO, Ljubljana, December 2000.
- 3 Y. Fujiwara, K. Kohno, C. Nakamoto and Y. Suzuki
Quark-Model Interaction for Complete Baryon Octet
*Proceedings of the International Symposium on Clustering Aspects of Quantum
Many-Body Systems, Post-Symposium of YKIS01*, ed. A. Ohnishi, N. Itagaki,
Y. Kanada-En'yo and K. Kato, (World Scientific, Singapore, 2002), pp. 57 -
64.
- 4 Y. Fujiwara, K. Kohno, Y. Suzuki, C. Nakamoto, K. Miyagawa and H. Nemura
Quark-Model Interactions for Complete Baryon Octet and Their Applications
to Few-Baryon Systems

Proceedings of the 2nd Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB02), Shanghai, P. R. China, 27 - 30 August, 2002.

- 5 Y. Fujiwara, K. Kohno, Y. Suzuki, C. Nakamoto, K. Miyagawa and H. Nemura
A Quark-Model NN Interaction and its Application to the Three-Nucleon and Nuclear-Matter Problems

Proceedings of The Kyudai-RCNP International Mini Symposium on Nuclear Many-Body and Medium Effects in Nuclear Interactions and Reactions (MEDIUM02), Kyushu, Japan, 25-26 October, 2002.

(3) 国際会議口頭発表

1. C. Nakamoto, Y. Fujiwara and Y. Suzuki

Dependence of the H -particle Mass on the Effective Meson-Exchange Potentials in a Quark Model

Proceedings of the International Symposium on Physics of Hadrons and Nuclei, Tokyo, Japan, 14 - 17 December, 1998, ed. Y. Akaishi, O Morimatsu, M. Oka and K. Shimizu, Nucl. Phys. **A670** (2000), pp. 315c - 318c.

2. M. Kohno, Y. Fujiwara, T. Fujita, C. Nakamoto and Y. Suzuki

Single-Particle Spin-Orbit Potentials of the Λ and Σ Hyperons Based on the Quark-Model G -Matrix

Proceedings of the International Symposium on Physics of Hadrons and Nuclei, Tokyo, Japan, 14 - 17 December, 1998, ed. Y. Akaishi, O Morimatsu, M. Oka and K. Shimizu, Nucl. Phys. **A670** (2000), pp. 319c - 322c.

3. T. Fujita, Y. Fujiwara, C. Nakamoto, Y. Suzuki and M. Kohno

Scattering Observables of the YN Interaction in the SU_6 Quark Model

Proceedings of the 1st Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB99), Tokyo, Japan, 23 -28 August, 1999, ed. S. Oryu, M. Kamimura and S. Ishikawa, Few-Body Systems Supplement **12** (2000), pp. 399 - 402.

4. M. Kohno, Y. Fujiwara, C. Nakamoto and Y. Suzuki

Nuclear Matter and Hypernuclear States Calculated with the new SU_6 Quark

Model Kyoto-Niigata Potential

Proceedings of the Mini-Workshop on Few-Quark Problems, Bled, Slovenia, July 8 - 15, 2000, *Bled Workshop in Physics*, BLEJSKE DELAVNICE IZ FIZIKE, LETNIK 1, ŠT. 1, Vol. 1, No. 1 (2000), pp. 46 - 48, DMFA - ŽALOZNIŠTVO, Ljubljana, December 2000.

5. M. Kohno, K. Suzuki, R. Okamoto and S. Nagata

Exact Treatment of the Pauli Operator in Nuclear Matter

Proceedings of the Mini-Workshop on Few-Quark Problems, Bled, Slovenia, July 8 - 15, 2000, *Bled Workshop in Physics*, BLEJSKE DELAVNICE IZ FIZIKE, LETNIK 1, ŠT. 1, Vol. 1, No. 1 (2000), pp. 49 - 51, DMFA - ŽALOZNIŠTVO, Ljubljana, December 2000.

6. C. Nakamoto, Y. Fujiwara and Y. Suzuki

ΞN Interaction in the SU_6 Quark Model

Proceedings of VII International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 23 - 27 October, 2000, Torino, Italy, Nucl. Phys. **A691** (2001), 238c - 241c.

7. Y. Fujiwara, K. Miyagawa, Y. Suzuki, M. Kohno and H. Nemura

Three-Nucleon Bound State in the SU_6 Quark Model for the Baryon-Baryon Interaction

Proceedings of XVI International Conference on Particles and Nuclei (PANIC02), 30 September - 4 October, 2002, Osaka, Japan.

(4) 日本物理学会での講演

1. 日本物理学会第 55 回年次大会講演、新潟大学 (2000.9.22 - 25)

RGM における G -行列方程式

藤原義和、河野通郎、仲本朝基、鈴木宜之

2. 日本物理学会第 56 回年次大会講演、中央大学多摩校舎 (2001.3.27 - 30)

クォーク模型による ΞN 相互作用

仲本朝基、鈴木宜之、藤原義和

3. 第 1 回日米物理学会合同核物理分科会、Hawaii 2001 (HAW01) (2001.10.17 - 20)
Hypernuclear Physics in the $S = -2$ Sector Based on the SU_6 Quark Model
Baryon-Baryon Interaction
河野通郎、藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之
4. 日本物理学会第 57 回年次大会講演、立命館琵琶湖・草津キャンパス (2002.3.24 - 27)
2 体 RGM kernel を用いた 3 体クラスター方程式
藤原義和、宮川和也、根村英克、鈴木宜之、河野通郎
5. 日本物理学会第 2002 年秋期大会講演、立教大学池袋キャンパス (2002.9.13 - 16)
クォーク模型 NN 相互作用による 3 核子系の束縛状態
藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之、根村英克
6. 日本物理学会第 2002 年秋期大会講演、立教大学池袋キャンパス (2002.9.13 - 16)
 SU_6 クォーク模型ハイペロン-核子相互作用のアイソスピン依存性と中性子物質中のハイペロンポテンシャル
河野通郎、藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之
7. 日本物理学会第 2002 年秋期大会講演、立教大学池袋キャンパス (2002.9.13 - 16)
軽いハイパー核におけるブリュックナーのリアレンジメントエネルギー
河野通郎、赤石義紀、藤原義和
8. 日本物理学会第 2002 年秋期大会講演、立教大学池袋キャンパス (2002.9.13 - 16)
WKB-RGM クォーク模型によるバリオン 8 重項間相互作用
仲本朝基、藤原義和、鈴木宜之、河野通郎
9. 日本物理学会第 58 回年次大会講演、東北大学河内キャンパス・東北学院大土樋キャンパス (2003.3.28 - 31)

2 α RGM kernel を用いた 2 α Λ 三体系の Faddeev 計算

藤原義和、河野通郎、宮川和也、鈴木宜之

10. 日本物理学会第 58 回年次大会講演、東北大学河内キャンパス・東北学院大土
樋キャンパス (2003.3.28 - 31)

半古典的 DWIA 法による (π^- , K^+) 包括反応スペクトルの記述

河野通郎、緒方一介、渡辺幸信、河合光路

(5) 研究会発表

1. 基研滞在型研究会「ハイペロン混合とストレンジネス多体系」(1999.8.2 - 7)

クォーク模型 G -行列による一粒子ポテンシャルの高運動量領域での振舞い

藤原義和、藤田匡、河野通郎、仲本朝基、鈴木宜之

「素粒子論研究」101 巻 5 号 (2000 年 8 月)、E8 - E48 頁

2. 基研滞在型研究会「ハイペロン混合とストレンジネス多体系」(1999.8.2 - 7)

新しいクォーク模型による YN 散乱観測量

藤田匡、藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之、河野通郎

「素粒子論研究」101 巻 5 号 (2000 年 8 月)、E49 - E80 頁

3. 基研滞在型研究会「ハイペロン混合とストレンジネス多体系」(1999.8.2 - 7)

Dependence of the $S = -2$ Baryon-Baryon Interactions on the Effective
Meson-Exchange Potentials in a Quark Model

C. Nakamoto, Y. Fujiwara and Y. Suzuki 「素粒子論研究」101 巻 5 号 (2000
年 8 月)、E103 - E107 頁

4. 京都大学 min-workshop 「 $S = -2$ を含む原子核の物理」(2001.6.9)

SU_6 クォーク模型によるバリオン 8 重項間のバリオン間相互作用

藤原義和

5. 京都大学 min-workshop 「 $S = -2$ を含む原子核の物理」(2001.6.9)

fss2 による $S = -2$ の G -matrix 計算

河野通郎

6. 基研研究会「ストレンジネス核物理最前線」(2001.12.25 - 27)

2 体 RGM kernel を用いた 3 体クラスター方程式

藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之、河野通郎

「素粒子論研究」 106 巻 2 号 (2002 年 11 月)、B22 - B25 頁

7. 基研研究会「ストレンジネス核物理最前線」(2001.12.25 - 27)

E964 ダブルハイパー核実験

今井憲一、田村裕和、仲澤和馬、E964 (BNL-AGS) 共同実験グループ

「素粒子論研究」 106 巻 2 号 (2002 年 11 月)、B32 - B34 頁

8. 基研研究会「ストレンジネス核物理最前線」(01.12.25 - 27) クォーク模型によるバリオン 8 重項間相互作用

仲本朝基、藤原義和、鈴木宜之、河野通郎

「素粒子論研究」 106 巻 2 号 (2002 年 11 月)、B49 - B51 頁

9. 基研研究会「ストレンジネス核物理最前線」(01.12.25 - 27) クォーク模型バリオン間相互作用によるストレンジネス核物質

河野通郎、藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之

「素粒子論研究」 106 巻 2 号 (2002 年 11 月)、B110 - B112 頁

10. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

クォーク模型 $B_8 B_8$ 相互作用と軽い Λ ハイパー核研究の課題

藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之、根村英克

11. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

$SU(6)$ クォーク模型 fss2 による ΛN 及び $\Lambda\Lambda$ 有効相互作用

河野通郎、藤原義和、仲本朝基、鈴木宜之

12. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

クォーク模型によるバリオン 8 重項間相互作用

仲本朝基、藤原義和、鈴木宜之、河野通郎

13. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

確率変分法によるストレンジネス少数系の研究

根村英克, 赤石義紀、鈴木宜之

14. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

ハイブリッド・エマルション法によるダブルストレンジネス核の研究 (根村英克 KEK-PS E373)

高橋仁 他

15. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

ダブルラムダハイパー核実験 (BNL-PS E964)

仲澤和馬 他

16. KEK 実験・理論合同研究会「ストレンジネス核物理の最近の展開」(02.3.15 - 17)

BNL におけるダブルラムダハイパー核の研究

福田共和 他

17. KEK 研究会「少数粒子系物理学の現状と今後の展望」(02.5.24 - 26)

クォーク模型バリオン間相互作用を用いた ${}^3\text{H}$ の Faddeev 計算

藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之、根村英克

18. KEK 研究会「少数粒子系物理学の現状と今後の展望」(02.5.24 - 26)

2 体 RGM kernel と 3 体 Faddeev 方程式

宮川和也、藤原義和

19. RCNP 研究会「核力と核物理」(02.7.24 - 26)

クォーク模型による中間エネルギー領域の核力と B_8B_8 相互作用

藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之、仲本朝基、根村英克

20. Mini-workshop on Strange Systems at Osaka E-C University, Neyagawa, Osaka (02.9.26)

Quark-Model Interactions for the Complete Baryon Octet and their Applications to Few-Baryon Systems

藤原義和、河野通郎、鈴木宜之、仲本朝基、宮川和也、根村英克

21. 斎藤栄氏追悼研究集会 (名古屋大学) (02.12.21)

OCM の不思議 — 2 体 RGM kernel を用いた 3 体クラスター Faddeev 方程式 —

藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之

22. 東大 CNS 研究会「少数系・不安定核における連続状態とその展望」(03.2.20 - 22)

三核子束縛状態における三体力の大きさ

藤原義和、宮川和也、河野通郎、鈴木宜之、仲本朝基、根村英克

(6) 学内紀要

1. 河野通郎

SU_6 クォーク模型バリオン間相互作用に基づく核物質中での有効相互作用
九州歯科大学紀要 (2003)