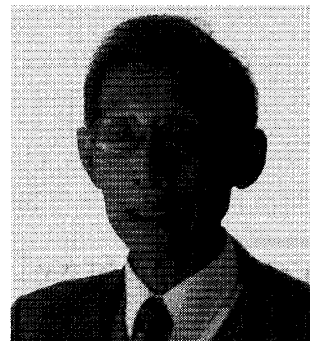


クォーク模型と核力

矢崎 紘一

今回、直接は国廣さんから、クォーク模型に基づく核力の話をしてほしいと言われお引き受けしました。その時は、私の不勉強だったのですが、この研究会の全貌を全く知らなかったのです。しかし、プログラムを見ますと、原子核分野の中では、ほんの僅かなところでやったことを取り上げてくださったようで、ありがたいのですが、やっぱりバランスは良くないかなという気がしています。もちろん、これでこの議論が終わるわけではなくて、特に私の話と関連する領域の原子核物理では、いわゆるハドロン物理と関係するような所は、また別にいろいろ議論していただく機会があるのではないかと思いますので、今日は多少バランスが悪いことを意識しながら少し狭い話題について短く話させていただきます。



クォーク模型と核力

基研研究会「学問の系譜」

2005年11月7日

東京大学 矢崎 紘一

1. 簡単な“歴史”
2. 核力の領域分け
3. 核子(バリオン)のクォーク模型
4. クォーク模型での2核子(2バリオン)系
5. その後の発展

[Slide 1]

[slide 1] 話は「クォーク模型と核力」ということで、本当に簡単な歴史と、核力に関するいわゆる武谷理論の領域分けの話、それから核子を含む baryon をクォーク模型でどのようにやるか、それを2核子系に拡張したらどういうことになって、それが核力とどう結びつくか、その後の最近までの発展ということをお話したいと思います。

[slide 2] 核力とクォーク模型に関連する歴史を簡単に振り返ってみますが、今日配っていただいたパンフレットにも、基研に関するものを含めて相当詳しく書いてあります。もちろん、出発点は1935年の湯川理論です。それが宇宙線での π の発見ということで確立して、核力理論の発展につながってきました。

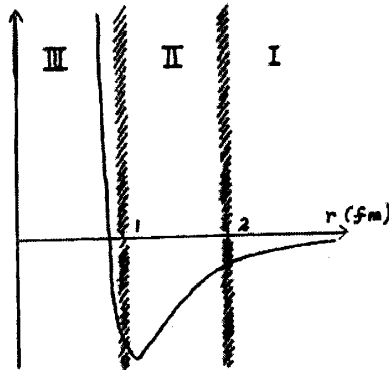
1. 簡単な“歴史”

	クォーク模型	核力
1935		中間子論(湯川)
1947		π の発見(Powell)
1951~		核力理論の発展
1953	ストレンジネス(中野・西島 Gell-Mann)	(武谷, 中村, 佐々木, 西田, 豊田, 大沼, 岩倉, 大槻, 玉垣, 豆)
1956	坂田模型(坂田)	
1961	8重説(Gell-Mann, Ne'eman)	
1962		現実的核力
1964	クォーク-7(Gell-Mann, Zweig)	(浜田, Johnston) NN散乱分析(星崎, ...)
1967~		現実的核力改良版 (玉垣, Reid,
1973	QCD(Gross, Politzer, Wilczek)	
1975~	ハドロン分光学への応用 (De Rújula, Georgi, Glashow Isgur, Karh, ... MIT bag, ...)	上田, Green, Paris, Nijmegen, Bonn-Jülich, ...)

[Slide 2]

クォーク模型に関しては、やはり1953年のストレンジネス、中野・西島・Gell-Mannというところから出発するのではないかと思います。その後、坂田模型があって、それに対立する格好でいわゆる eightfold way というものが出されました。そして、それをある意味で具体化した形でクォークモデルが、1964年に、Gell-MannとZweigによって提唱されました。このへんの事情を南部先生の前でお話しするのは恥ずかしいのですが、クォークはたぶん最初は、実在するかどうかすらよくわからなかったと思います。いろいろな自由度が付け加わって、1973年QCDが確立され、実体がある程度わかってきたのではないかと思います。その後、QCDと直接関連するかどうかは実はあまりはつきりしていないのですが、それをバックグラウンドとしたハドロン分光への応用が始まって、その流れが核力のクォーク模型にも繋がっているという感じです。

2. 核力の領域分け

I $r \geq 2\text{fm}$ 1π 交換主導II $2 \lesssim r \lesssim 1\text{fm}$ $2\pi(\rho)$ 交換
 $\rho, \omega, \dots$ III $r \lesssim 1\text{fm}$ 現象論(斥力)
 ω 交換(?)
Pomeron(?)

核子に内部構造があることが明らかになった段階で
領域 III にそれが反映されると考えるのは自然。

[Slide 3]

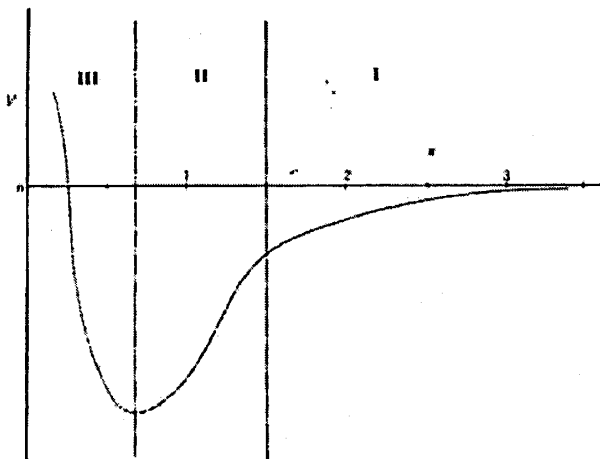


Fig. 1. Three Regions of Nuclear Potential.*

Region I. *Classical region*, $r \leq 1.5\lambda_\pi$, (λ_π is the pion Compton wave length) where the one-pion-exchange potential dominates and the quantitative behavior of the potential has been established.

Region II. *Dynamical region*, $0.7\lambda_\pi \leq r < 1.5\lambda_\pi$, where the two-pion-exchange potential competes with and exceeds the one-pion-exchange potential. The recoil effect is also appreciable in this region. The qualitative behavior, however, has been clarified.

Region III. *Phenomenological region*, $r \leq 0.7\lambda_\pi$, where exist so many complicated effects, e.g., the relativistic effect, the isobar effect, the effect of new particles, etc., that at present we may have no means but some phenomenological treatment to fit with experiments.

* λ_π is the inter-nucleon distance in the unit of the pion Compton wave length, $\lambda_\pi \approx 1.4 \times 10^{-13} \text{ cm}$ (see p. 35).

[Slide 4]

一方、核力に関しては、中間子理論が武谷グループ（わかった範囲でお名前を挙げさせて頂きましたが、入るべき方ではない方もいらっしゃるかもしれません。）によって発展させられました。それを背景として現実的な核力の研究が始まりました。浜田・Johnston がたぶん最初だったと思いますが、日本のなかでは星崎さんたちの NN 散乱の詳しい分析、それからさらに改良版の現実的な核力の研究が、玉垣・Reid というところから始まってずっと最近の Paris, Nijmegen, Bonn-Julich, ... ポテンシャルというところにつながっているのではないかと思います。これが、大変簡単ですが、クォーク模型による核力というものを考え始めたところまでの歴史です。

これ (slide3) はよくご存知の核力の領域分けで、これに関係する仕事は、1955 年から 56 年の Supplement に日本の核力グループの研究成果の集大成としてまとめられています。これは第 3 冊目です。これ (slide4) が武谷先生の論文に出ている領域分けで、数は pion の Compton 波長を単位としていますので、ちょうどこのあたりが 1 fm で、このへんが 2 fm というように I、II、III という領域分けをしています。I の領域は Classical region、II が Dynamical region、それから III が Phenomenological region と呼ばれています。I は one pion exchange で確立されている、II はなんとか two pion exchange とか、あるいは少し重い中間子の交換で記述できそうである、III はわからないから現象論的に扱おうというのがその頃の考え方だったのです。もし、核子に内部構造があるということがはっきりすれば、その段階では第 III 領域にその内部構造が反映されるだろうというのは、非常に当然な考え方だったのではないかと思います。

3. 核子(バリオン)のクォーク模型

クォーク

スピン $1/2$ $SU(2)$
 香り u, d, s 近似的 $SU(3)$ } $\rightarrow$ 近似的 $SU(6)$
 c r, g, b $SU(3)$ ゲージ化 $\rightarrow$ QCD

バリオン (クォーク 3 体系)

色 $SU(3)$ 1 重項

スピン・香り $SU(6)$ 56 重項 スピン 香り
 $1/2$ [8] N, Λ, Σ, Ξ
 $3/2$ [10] $\Delta, \Sigma^*, \Xi^*, \Omega^*$

軌道 $(0s)^3$

[Slide 5]

[slide 5] これはバリオンのクォーク模型です。クォークというのは、スピン、香り、色という自由度を持っていて、特に色の自由はゲージ化されて QCD になりました。baryon を簡単にクォーク 3 体系と考えると、色に関しては $SU(3)$ の singlet、対称性としては完全反対称の状態、それに spin・flavor と軌道がともに完全に対称の状態が、一番低いバリオンの状態として実現されるであろうということで、それがスピン $1/2$ の baryon octet とスピン $3/2$ の baryon decuplet を非常にうまく説明している。特にクォーク模型のもとになった eight-fold-way が Ω^- を予言して、それが見つかったということで Gell-Mann にノーベル賞が与えられました。

4. クォーク模型での 2 核子 (2 バリオン) 系

・対称性の考察 Neudatchin-Smirnov-玉垣
 (P.T.P. 58 (1977) 1072)

クォーク 6 体系

色 $SU(3)$ 1 重項 スピン・香り $SU(6)$

軌道

L 奇 偶 奇 偶

Pauli 禁止状態 あり あり なし なし

領域 III の斥力はクォークに対する Pauli 原理
 だけでは説明できない。

クォーク間相互作用によるダイナミクスが必要

S 波での強い斥力を生むためには、スピン・香り 状態
 での強い斥力が必要 $\rightarrow (\pi, \pi)(\sigma, \sigma) \rightarrow \Delta-N$ 質量差

[Slide 6]

[slide 6] クォーク模型での 2 核子系ですが、これはごちゃごちゃ書きましたのであまり詳しく見ていただく必要はないのですけれども、先ほど、クラスター模型のところでも見てきた、いわゆる対称性に関する考察です。先鞭を切ったのは Neudatchin・Smirnov・玉垣の仕事で、クォーク 6 体系と考えたときの 2 核子系を対称性で分類することによって、原子核同士、例えば $\alpha\alpha$ 散乱で Pauli principle の影響というのが非常にはっきり見えていたものが、それがクォーク模型ではどうかということを考えています。クォークの場合には特に色という自由度があつて、そのためにクォーク 6 体系にしても Pauli 原理がそれほど強くは効いていない、いわゆるパウリ禁止状態があるような対称性の状態だけでなく、ないような対称性の状態もあつて、結論としては領域 III の斥力というのは、クォークに対する Pauli 原理だけでは説明できないの

です。クォーク間の相互作用による dynamics が必要で、特にどういうものと関連するかというと、baryon の spectroscopy で 3-3 resonance いわゆる Δ と nucleon の質量差を出すような力というのが、ちょうど第 III 領域の斥力を出すのに都合がよさそうだということが解ってきました。

[slide 7] 対称性だけでははっきりしないので、ある程度 dynamical な計算も必要だろうということになりました。全部を挙げてあるわけではありませんけれども、いわゆる 2 中心殻模型で Liberman、一方 DeTar の方は MIT bag 模型を使った計算なのですけれども、そういうものが 1977 年から 78 年位に出されて、中心付近で 350 から 450 MeV ぐらいの斥力が出せるのではないかと期待されていました。

・動力学的計算

2 中心模型 Liberman (P.R. D16 (1977) 1542)
DeTar (P.R. D17 (1978) 323)
350~450 MeV の斥力

共鳴群の方法(RGM)

相互作用核の計算 Warke-Shanker (P.R. C21 (1980) 2643)
土岐 (Z. Phys. A294 (1980) 173)

散乱振幅の計算 Ribeiro (Z. Phys. C5 (1980) 27)
岡・矢崎 (P.L. 90B (1980) 41)

NN 短距離斥力は Pauli 原理と π - π 間相互作用の
協力効果として説明できる。

閉じ込め力の寄与は小さい。

バリオン間の短距離力は 組み合わせに依存し、斥力な
り場合もある。→ ダイバリオン共鳴の可能性

[Slide 7]

5. その後の発展

・ π - π 描像を含む現実的核力

領域 I, II は中間子論, 領域 III は π - π 模型

東京 (岡, 清水, 竹内, ...)

京都・新潟 (藤原, 仲本, 鈴木, ...)

Tübingen (Fäppler, 清水, ...)

NN 散乱の位相差を再現, 少数核子系核物質へ応用

$Y(\Lambda, \Sigma, \Xi)N, YY$ 相互作用へ拡張, ハイパー核へ応用。

・構成 π - π とカイラル対称性の自発的破れ

南部・Jona-Lasinio (NJL) 模型の π - π 版

初田, 国広, ...

構成 π - π の質量, π - π と π, σ の結合

・中間子論との整合性

π - π 交換と中間子交換は加法的か?

π - π と π - π 束縛状態
と 2 の中間子

$\times + \times \times + \times \times \times + \dots$

核力

$\begin{array}{|c|} \hline \times \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \times \times \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \times \times \times \\ \hline \end{array} + \dots$

π - π 交換

中間子交換

[Slide 8]

さらに、日本で発達してきたクラスター模型の方法を直接適用して、もう少し定量的に見てみようとした試みがいくつかあって、いわゆる resonating group の方法で、interaction kernel の計算を Warke-Shanker とか土岐さんが出されたのですが、散乱問題まで解いてみたというのは、Ribeiro というオックスフォードにいてポルトガルに帰ってからやった人と、それから岡・矢崎です。散乱問題を解くことによって、ある程度定量的にクォーク間の力が第 III 領域の核力にどう反映されるかということがわかってきました。第 III 領域の斥力は Pauli 原理とクォーク間相互作用の協力効果として説明できるということと、その当時少なくともわかっている程度のクォーク間の閉じ込め力というのは、nucleon-nucleon 相互作用への寄与は小さいということがわかりました。もう一つは、nucleon-nucleon だけではなくて少し広げた baryon 間の相互作用として見たときには、短距離領域が普遍的に斥力というわけではなくて、状態によっては斥力がないような場合もある。それが di-baryon 共鳴というものにつながる可能性があるのではないかとということが解りました。

[slide 8] その後の発展ですけれども、第 III 領域をクォーク模型で扱うとすれば、あとの第 I、第 II 領域というのをできるだけ中間子論で詰めていって、いわゆる現実的な核力に対応するものを作ろうという試みは当然なされています。岡さん、清水さん、竹内さんを中心とする東京グループと、藤原さん、仲本さん、鈴木さんたちの京都・新潟グループ、それから、清水さんも入っているのですが、Faessler が率いる Tuebingen のグループが、このことについて努力しています。特に京都・新潟グループは現在でも盛んに研究を進めていて、NN 散乱の位相差を再現することは当然なのですが、それを少数核子系だとか核物質へも応用してみて、クォーク描像に基づく核力というのがどのぐらい原子核のいろいろな性質を説明するかということも研究されています。それから hyperon と核子、あるいは hyperon 同士の相互作用にも拡張されて、hyper 核の研究にも応用が進められています。

その後、1980年代の終わりの方から現代に至るまでですけれども、考え方の上ですが、1つは、クォーク模型の基本になっている constituent quark と chiral 対称性の自発的破れに関する南部先生たちの idea をクォークに応用した初田さん、国廣さんの仕事があつて、それが constituent quark の質量の起源をある程度ははっきりさせたということと、それからクォークが meson と couple する場合には、いわゆる南部-Goldstone メソンとしての pion や、sigma のような meson と couple させるという考え方が自然に入ってきたのです。

それをもう少し進めて、クォーク模型に基づく描像と、中間子論との整合性に関しては、ある程度考え方がはっきりしてきたのではないかと思います。クォーク模型による第 III 領域の部分と中間子交換の部分は単に足していいのかというのが一つ問題になったと思います。メソンを quark anti-quark の束縛状態として記述できるとすれば、Slide8にあるグラフをそのまま核子系へ持ち込むことによって、Slide8で「クォーク交換」とある部分がいわゆるクォーク模型で記述できるような項で、それに続く「中間子交換」とある部分が meson の propagator で記述できるような部分という考え方をすることで、クォーク描像に基づく部分と中間子の交換で表される部分というのを矛盾なく足し上げることができるのではないかとというのがこの後の発展として考えられているものです。

これが、私の用意した話です。最初に申し上げましたように、大変狭い領域の話だったのですけれども、これで終わらせていただきます。

討論

国廣：質問等ありましたらどうぞ。

坂東：最後の話の、クォークが direct に交換するのと中間子の部分が加法的か？ と question mark がついているのですが、結局どのように切り分けるということですか。

矢崎：答えはこの部分です。こちらの部分を中間子の交換、あるいは中間子の propagator というふうに考えれば足し上げてよいというのが一応の答えです。

坂東：それは理論的に言えることですか。

矢崎：それは言えます。中間子をつくるような簡単な相互作用の模型を作ってやると、一応これでクォーク交換の部分と中間子交換の部分を separate できます。

国廣：私としましては、岡・矢崎の計算をしようと思ったときの、その心理的な動機みたいなものを知りたいと思っているのですが。

矢崎：だいたい、あまりそういうことを話すのが得意ではないのですけど。

国廣：差し支えないところまででも。

矢崎：いいんです。別に何か、話にくいことがある訳では決してないのですけれども。ただ、だいたいの感じとして、クォーク模型が baryon の spectroscopy の特徴をうまく再現するということがある程度わかってきたことと、その核力の第 III 領域というのがある意味で謎であったということで、その部分をクォーク模型で記述しようというのが、多分、一応自然ではないかと思うのです。ただ、先程言いましたように、同じようなことをいろいろな人が同時に考えるものだということも非常にはっきり解りました。ちょうどその 1980 年ごろに、同じようなことをいろいろな所のグループが一斉に考えたというのがある意味で面白い現象だなと思っています。

国廣：当時の東大の素粒子の方との交流とか、ほかの分野の方との交流はありましたか。

矢崎：先ほど、駒場が僻地・辺境の地という話があつたのですけれども、私は本郷にいたので本郷は辺境の地とは言えないと思うんですが、この話に関しては、もちろんいくつか刺激を受けましたけれども、直接、これに関して相談をしたということはありません。実はその頃いらした方、山口先生、西島先生、宮沢先生、猪木先生、それから若いほうでも、江口さんがいらっしゃいましたので、当然議論すべきだったかもしれませんが。ただ、議論したら、きっとこんなことはやめろと言われたかもしれないと思っています。