QCD と原子核物理学

国広　悌二 (京都大学 基礎物理学研究所)

1　序；原子核物理学からハドロン多体系の物理学へ

原子核物理学、より広く、サブアトミック物理学は、原子よりも下の階層の物質の物理学であり、天体核物理学や旧来の素粒子物理学も含んでいる。それは自由空間での核子-核子散乱や重陽子のデータから引き出された核力に基づく核子多体系の物理学と理解されている。核力とは、 陽子間に働くクーロン斥力に打ち勝って原子核を結合させている力であり、20 世紀開始ごろに人類がはじめて出くわした「強い相互作用 (***the*** **strong interaction**)」である。言うまでもなく、場の理論に基くその最初の基礎理論が湯川の中間子論である。「強い相互作用」は電磁力、「弱い相互作用」そして重力とともに自然界における４つの基本相互作用を構成している。

核力の特性はその強いスピン双極子相互作用 (通常、テンソル力と呼ばれる) と短距離斥力にある。核子はフェルミオンであり、その多体系においてはパウリの排他律 (パウリ原理) が作用する。これはハミルトニアンを書き下しただけでは表現されないフェルミオン多体系特有の「新しい質」を生み出す。よく知られた例として、フェルミ面の存在により超伝 (流) 導が可能となる。強いテンソル力は 1 パイ中間子交換力を主な起源とし、核物質の結合エネルギーと密度の飽和性の主要な原因となっている： これが原子核の安定な存在の根拠を与えている。飽和性の実現に対して、パウリ原理がもたらすテンソル力の 2 次のポテンシャルエネルギーの密度依存性が本質的である。この飽和性の実現可能性と密接に関連して、テンソル力とパウリ原理は軽い原子核におけるアルファクラスター構造の実現に対しても本質的な役割を果たしている [1]。原子核物理学は核子多体系を作ることによる「新しい質」の発見を目指す物理学の一分野である、と言える。

核子はデルタ粒子など他の重粒子や中間子などと同様「強い相互作用」をする粒子、ハドロンである。ハドロンはクォーク (と反クォーク) の結合状態である。ハドロンを構成する力は「量子色力学 (**QCD**)」と呼ばれるゲージ理論である。ゲージ場を量子化した粒子はグルオンと呼ばれる。QCD のラグランジアンはクォーク場とグルオン場で書かれている。１９７０年代に入って、核力を含む「強い相互作用」の基本理論として量子色力学 (QCD) が確立した後では、サブアトミック物理学の自然な発展方向として、核力の代わりに QCD に基くハドロン多体系の物理学が措定されることになった [2]。

このとき、ハドロンの世界における原子核という物質の存在形態のユニークさを確認しておくことは有意義である。原子核はハドロン系の唯一の安定な結合状態にある多体系である。この安定性の根拠は上でも指摘した結合エネルギーと密度の飽和性にある：核物質は比較的ゆるく結合した低密度 $0.17\mathrm{fm}^{-3} \equiv \rho_0$ のフェルミ液体である。このときの平均核子間隔 ($\bar{r} \sim 1.8\mathrm{fm}$) は核子間の斥力芯の長さだけでなく 1 パイ中間子交換力のレインジ (約 1.4 fm) よりも長い。パイ中間子交換力がテンソル力を生むのはパイ中間子が擬スカラー粒子のためである。パイ中間子の質量が他のハドロンに比較して格段に小さいことを反映して原子核物質が飽和する密度は ρ_0 と低くなる。パイ中間子が軽い擬スカラー粒子であるのは (QCD の持つ) カイラル対称性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーンボソンだからである。

このことは原子核の存在 (すなわち、われわれの存在) およびその性質が QCD の基本的性質の一つであるカイラル対称性の反映であることを示唆している。より一般に、QCD に基くハドロン多体系物理が措定される場合、単に核子がハドロンに、核力が QCD に置き換えられること以上のまったく新しい要素が付け加わるのである：それはこれまで不変とされていた真空の相転移の問題が係

わるようになるためであり、それは物質とは何かという古来問われてきた基本的な問題と関わっている。

2　真空と物質；相互規定性

物質とは何か？　この問いに対する２０世紀の物理学（場の量子論）の答えは、次のようなものである。物質とは量子場の励起状態のことである。実際、$|0\rangle$ を真空の状態ベクトルとすると、$|0\rangle$ は次式で定義される：

$$a_\alpha|0\rangle = 0 \Longleftrightarrow |0\rangle = \text{真空}. \tag{1}$$

ここで、a_α は粒子（物質）の消滅演算子である。この式は、粒子描像が決まって初めて真空が定義できること、また逆に、真空の定義を通して粒子描像が定まる、すなわち、何が物質として観測されるかが定まることを表している。つまり、物質と真空は相互規定的であり、現代の物質の理論は必然的に真空の理論にもなっている。何が物質かということは真空を決めることと等価である。

そして、重大なことは環境の変化により真空の性質が変化し得る。真空の変化が物質の性質に本質的な影響を与えるのは「対称性の自発的破れ」がある場合である。超伝導や 原子核の変形がその例である。たとえば、超伝導の場合は $\langle\psi_\uparrow\psi_\downarrow\rangle$ がオーダーパラメーターであり、ゲージ対称性が自発的に破れていることを示している；

$$\begin{array}{ccc} \langle\psi_\uparrow\psi_\downarrow\rangle = 0. & \Longleftrightarrow & \langle\psi_\uparrow\psi_\downarrow\rangle \neq 0. \\ \text{normal} & \Longleftrightarrow & \text{super} \end{array}$$

以上のことは QCD も例外ではない。環境の変化に伴う QCD 真空の変化およびそれに伴うその変更された真空上での素励起としてのハドロンの性質の変化を探る問題は現在多くの研究者の興味の的になっている [2]。

3　QCD; クォーク、グルオン　v.s. ハドロン

QCD の（古典的）ラグランジアンは次のように与えられる；

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{cl} &= \bar{q}(i\gamma^\mu D_\mu - \boldsymbol{m})q - \frac{1}{4}F^a_{\mu\nu}F^{\mu\nu}_a, \\ D_\mu &= \partial_\mu - igt^a A^a_\mu, \quad F^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + gf_{abc}A^b_\mu A^c\nu, \end{aligned} \tag{2}$$

$q = ^t(u, d, s, c, b, t)$, $\boldsymbol{m} = \mathrm{diag}(m_u, m_d, m_s, ...)$ はクォークの質量である。

クォークやグルオンが見えるような高分解能での QCD は基本的に摂動論の世界であり、漸近自由性が成り立っている。そのことは、次のくり込み群方程式においてベータ関数 $\beta(g)$ が負になっていることを意味する；

$$\mu\frac{d}{d\mu}g(\mu) = \beta(g), \tag{3}$$

ここに、$\beta(g) = -\frac{9}{16\pi^2}g^3 - \frac{64}{(4\pi)^4}g^5 + \cdots$

漸近自由性は、クォークやグルオンが見えるような高分解能での QCD の性質である。そこは基本的に摂動論の世界である。ところが、低い分解能で見ると、クォークやグルオンの代りにその結

合状態、すなわち、ハドロンが「素励起」として立ち現れ、その世界は摂動論では記述できない様々の特徴を持っている。QCD に基づいてその物理的機構を説明することは、ハドロン物理学の基本的課題である。それらの特徴は以下のようである：

1. クォークとグルオンの閉じ込め。クォークとグルオンは単体では取り出せない。また、実現しているハドロンはすべてカラー $SU(3)$ の 1 重項である。

2. 軽いクォークに対しては近似的だがよく成立しているカイラル対称性が力学的に破れている（自発的に破れている）。すなわち、クォークのスカラー密度の真空期待値 $\langle\bar{q}q\rangle$ が 0 ではない：$\langle\bar{u}u\rangle \simeq \langle\bar{d}d\rangle \simeq (-250\mathrm{MeV})^3$, $\langle\bar{s}s\rangle \simeq (-530\mathrm{MeV})^3$. このため、軽い擬スカラーの中間子 $\pi^{\pm,0}(140)$, $K^{\pm}(500)$, $K^0(500)$, $\bar{K}^0(500)$, $\eta(550)$ が近似的な南部-ゴールドストーンモードとして 8 重項をなしている。ここで括弧の中の数字は MeV 単位での質量。また、低エネルギーでのその相互作用はいわゆる「低エネルギー定理」によりよく支配されている。

その他、ハドロンの世界ではアイソスピン保存則の成立、フレーバー $SU(3)$ 対称性の破れは存在するが摂動で取り扱える範囲であること、ハドロンの弱崩壊における $\Delta I = 1/2$ 則、ベクタードミナンス等を挙げることができる。また、安定なハドロン多体系としての原子核の存在自体も説明を要する問題である。

4 環境の変化と素励起としてのハドロンの変化

高温のハドロン物質ではカイラル対称性が回復することが、格子 **QCD** を用いた数値シミュレーションで示されている。また、高密度の核物質でもカイラル対称性が部分的に回復することが QCD の低エネルギー定理やいくつかの模型計算で示唆されている。直感的には、**Feynman-Hellman** の定理を用いて理解することが可能である。さらに、ストレンジネスを持った粒子の注入が地上で高密度核物質（ハドロン物質）を作る手段として用いることができることが最近、赤石と山崎によって指摘されている [3]。

カイラル対称性の反映している他の核現象はないだろうか？その他の QCD の基本的性質はどのように原子核レベルの物質の階層の性質や現象に結びついているだろうか？自由空間で検証されるハドロンの特性は原子核のようなハドロン多体系の中で変更されてはいないだろうか？密度（バリオン密度、ストレンジネス密度）、温度そして電場/磁場のような外場等で特徴づけられる様々な環境下で、ハドロンの性質は変化しないであろうか？

最近、これらの問題に関連した実験が行われ、興味深いデータが得られ注目を浴びている：たとえば、CHAOS グループの実験、パイ中間子原子核や K 中間子原子核の実験がある [2]。

5 まとめ

サブアトミック物理学としての原子核物理学は核子多体系の物理から ハドロン多体系の物理へと自然な展開を遂げつつある。核力をその一部とする「強い相互作用」の基礎理論は QCD というゲージ理論である。われわれの真空は摂動的なものとはまったく異なっており、「相転移」を経たものである。我々の世界は QCD 真空の相転移後の世界であり、ある種の「超伝導」状態になっている。真空の変化はその上の素励起としての粒子描像の変化を伴う。環境（温度、密度、電場、磁場、多フレーバー、等）の変化による QCD 真空の変化 は素励起としての素粒子（ハドロン）の変

化を引き起こすであろう。最近、そのような観点での理論の予想とそれらと整合的ないくつかの実験が出始めている。

6　斉藤さんのこと

この研究集会で西川さんの話から斉藤さんが晩年、電場による QCD 真空の変化に興味を持っておられたことを知りました。院生のときに斉藤さんの OCM の論文 [4] やプログレスのサプリメントに出た総合報告 [5] を読んで、その洗練された美しさに感動しました。私は「いつかこのような研究をしてみたい。」という強いあこがれを持ちました。それはフランスの C. Bloch の論文を髣髴とさせるものでした。斉藤さんは日本の C. Bloch だったと思います。

参考文献

[1] 玉垣良三,「核物質の諸様相」, (「科学 」vol. 46, No.1、特集: 量子力学 50 年 (1976 年),p.10;
江沢 洋、恒藤 敏彦編「量子物理学の展望 上」 p.241, (岩波書店、1977 年);
坂東 弘治,「原子核における核力 · 飽和性 · 分子的構造」、基研２０周年シンポジュウムの記録, 31 (1973).

[2] ここでの話を敷衍したものは、国広 悌二「ハドロン物質のカイラル相転移」,「数理科学」, 2001 年 3 月号特集「 物質とは何か」, p. 22.
より最近の文献は、T. Hatsuda and T. Kunihiro, nucl-th/0112027 からたどることができる。
また、次も参照 ; Proceedings of YITP-RCNP workshop on “Chiral Restoration in Nuclear Medium” to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl. (2003).

[3] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. **C 65**, 044005 (2002).

[4] S. Saito, Prog. Theor. Phys. **41** (1969), 705.

[5] K. Ikeda, R. Tamagaki, S. Saito, H. Horiuchi, A. Tohsaki-Suzuki and M. Kamimura, Prog. Theor. Phys. Suppl. No.62 (1977).