

12. カイラル摂動論と中間子凝縮

富澤 宏之

カイラル摂動論の方法を用いて、 π 中間子凝縮およびK中間子凝縮について調べ、その臨界密度を計算した。ここで扱った中間子凝縮は、従来考えられていた π 中間子凝縮とは異なる発現機構によるものである。

〔S波相互作用による中間子凝縮の可能性〕

高密度核物質において、巨視的な数の π 中間子（以後 π と略記）が同一の量子状態に現れる現象が π 凝縮である。 π が発生するためには、 π のエネルギーを充分下げようとする引力的な相互作用が必要である。そのため、従来は核子Nと π のP波相互作用の引力効果に起因する π 凝縮が考えられてきた。¹⁾ところが最近、Kaplan & Nelson²⁾およびBrown, Kubodera & Rho³⁾によってK凝縮の可能性が示唆された。Kaplan達が考えたのは、対称核物質（同数の陽子と中性子からなる系）における K^+K^- 対の運動量零のモードへの凝縮であるが、その発現機構は従来の π 凝縮とは異なり、NとKのS波の相互作用に起因するものである。今、ハミルトニアンが $H = H_0 + \varepsilon H'$ の様にカイラル対称な部分 H_0 と、陽に破っている部分 $\varepsilon H'$ から成っているとすると、 H_0 からは斥力的なS波相互作用が生じ、 $\varepsilon H'$ からは引力的なS波相互作用が生じる。Kに対しては、 $\varepsilon H'$ が大きいので、引力が斥力を上まわることが期待される。

当研究では、Kaplan達が扱っていない中性子物質（中性子星など）内でのK凝縮について調べ、また同様の機構による π 凝縮の可能性を調べた。

〔有効ラグランジアンに基づくカイラル摂動論〕

前述のように、S波相互作用に起因する中間子凝縮を考えているので、S波相互作用に関する知識が必要になってくる。中間子凝縮のような全く未知の問題に対しては実験に裏付けされた知識に基づいて調べていくのが本来の行き方であろう。しかし、特にKに関しては、その4元運動量 P_μ が、 $P_\mu = 0$ である附近のふるまいは全くわかっていない。（ $P_\mu \cong 0$ のKが実験でつくれない）そこで、 π やKなどの軽い中間子の低エネルギー領域のふるまいを支配しているカイラル対称性に注目する。すなわち、 π やKを、カイラル対称性がNambu-Goldstone流に実現した際に現れるNambu-Goldstoneボソンと見なすわけである。しかも、カイラル対称性を破る項 $\varepsilon H'$ の寄与が本質的であるので、この項の形を決めなければならない。

（QCDのレベルでは、カイラル対称性を破るのは、クォークの質量項である）これらのことを実際に行うには、カイラル有効ラグランジアンを用いると見通しがよい。これは、カイラル対称極限のみならず、種々の考察から、対称性を破る項の形を決めることができる。^{4), 5)}詳細については修士論文（本論文）を参照されたい。ただ、この方法が、中間子凝縮に限らず、低エネルギー領域のハドロン物理の重要な手法と成り得ることは付記しておきたい。⁵⁾

〔計算結果〕

凝縮の臨界密度を、前述のラグランジアンを用いて、以下のような方法で計算した。中間子の凝縮が既に起きているとし、核子内での中間子場の運動方程式を求める。核子場は平均場近似し、核子の密度を導入しておく。運動方程式より分散関係を導き、中間子場の振動数が零（→ソフトモード）となるような核子密度をもって臨界密度とする。

結果を、 ρ_0 （原子核の標準密度： $\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ ）の何倍という形で示す。Kaplan&Nelsonの結果（*）も併せて示した。

	対称核物質	中性子物質
$K^+ K^-$	3.8 (*)	3.6
$K^0 \bar{K}^0$	3.8	4.3
$\pi^+ \pi^-$	2.6	凝縮なし
π^0	2.4	2.4

中性子物質内での $\pi^+ \pi^-$ 凝縮は、起こらないという結果が得られたが、これは、 π の場合、 $\varepsilon H'$ の影響が小さく、S波が斥力的になるためであり、予想された結果である。（ H_0 から生じるS波の斥力が寄与しない場合には、 π は凝縮するという結果になっている。）

今回調べた中間子凝縮は多体問題としては最も簡単に扱った段階であり、現実的扱いでどうなるかは今後の問題である。ただし、K凝縮については、 $\varepsilon H'$ の影響が大きいため、現実的な扱いでもその効果が生き残ると期待されている。³⁾中間子凝縮は、もし起こるとすれば、中性子星の物理等に重大な影響を及ぼす。⁶⁾特に、K凝縮は、ストレンジクォーク物質との関連が興味深い。

〔参考文献〕

- 1) . A. B. Migdal, Rev. Mod. Phys. 50, 107(1978)
- 2) . D. B. Kaplan and A. E. Nelson, Phys. Lett. B175, 57(1986)
- 3) . G. E. Brown, K. Kubodera and M. Rho, Phys. Lett. B192, 273(1987)
- 4) . A. Manohar and H. Georgi, Nucl. Phys. B234, 189(1984)
- 5) . J. Gasser and H. Leutwyler, Ann. Phys. 158, 142(1984)
- 6) . G. E. Brown, K. Kubodera, D. Page and P. Pizzochero,
to be published in Phys. Rev. D