

論文内容の要旨

Mode coupling theory for the dynamic aspect
of the chiral phase transition

(カイラル相転移の動的側面に対するモード結合理論)

大西 一聡

近年、重い原子核を超高速に加速し衝突させる実験、重イオン衝突実験が盛んに行われている。その目的は高エネルギーに励起された物質の中に、クォークやグルオンが自由に飛び交うクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) を作ることである。格子 QCD 計算などの理論的な研究によれば、十分な高温状態においては、真空は相転移 (閉じ込め・非閉じ込め相転移、およびカイラル相転移) を起こし、QGP 相が実現すると示唆されている。従って、重イオン衝突実験においては相転移の理解が不可欠で、特に系は非平衡過程を経て時間発展するので、相転移の非平衡の (動的な) 振舞いが重要である。我々はカイラル相転移の動的な振舞いに以下注目したい。

カイラル相転移は 2 次相転移であるが、その動的ユニバーサリティクラスは Rajagopal & Wilczek によって初めて議論された。彼らは反強磁性体とカイラル相転移の遅い変数を比べることにより、両者は同じ動的ユニバーサリティクラスに属すると結論している (表 1 参照)。つまり反強磁性体の遅い変数は、非保存量の秩序変数である交代磁化、保存量の磁化、エネルギー、運動量であり、一方カイラル相転移のそれは非保存量の秩序変数のメソン場、保存量のカイラル電荷、エネルギー、運動量である。彼らは反強磁性体の運動学方程式を解析し、カイラル相転移に対する動的臨界指数 $z = d/2 = 3/2$ を得た。

これに対して近年、Boyanovsky & de Vega は場の理論を用いた微視的な計算によって、1 に近い動的臨界指数を得ている。これは Rajagopal & Wilczek の結果と明らかに矛盾し、従ってカイラル相転移の動的ユニバーサリティクラスは反強磁性とは違うことを示唆している。実際、両者の運動モードを見てみると、反強磁性体の秩序変数に対するモードは拡散

反強磁性		カイラル相転移	
交代磁化	N	メソン場	ϕ
磁化	M	カイラル電荷	Q
エネルギー	E	エネルギー	E
運動量	P^i	運動量	P^i

表 1: 反強磁性体とカイラル相転移

モードであるのに対して、カイラルの秩序変数のモードはメソンモード、つまり伝搬モードであり、両者異なっていることがわかる。そこで我々はカイラル相転移の動的振舞をモード結合理論を用い解析し直し、その運動学方程式を導くことを試みた。

まず $O(2)$ シグマ模型にモード結合理論を適用し、臨界点でどのような運動モードが現れるかを見る。秩序変数に対する伝搬モード、つまりメソンモードを出すためには、メソン場の正振動数解と負振動数解を独立に扱うことが重要であることを見出す。またエネルギーと運動量の縦成分が結合し、正常流体の第一音波に相当する伝搬モードが現れることを見る。つぎに $O(4)$ シグマ模型を考え、モード結合項を含めた運動学方程式を導く。得られた方程式の解析として、各モードの動的臨界指数を計算する。メソンモードに対する臨界指数は $z = 1 - \eta/2 \cong 0.98$ となることを見る。ここで η は静的な臨界指数である。これは反強磁性体よりも Boyanovsky & de Vega の結果に近いものである。またメソンモード以外のモードについても動的臨界指数を得る。その結果、各モードの臨界指数は皆異なることがわかる。Halperin & Hohenberg による動的スケーリング則によれば臨界指数は皆共通であると考えられるが、我々の結果はスケーリング則を破るものである。また、最も大きい臨界指数を持つモード、つまり最も遅いモードは運動量の横成分、 p^T モードであることがわかる。従って、系全体の緩和時間を決めるのはメソンモードなどではなく、 p^T モードの崩壊時間が決めることになる。数値計算を含めたより詳しい運動学方程式の解析は今後の課題である。

カイラル相転移		CEP	
メソン場	ϕ	シグマ場	σ
カイラル電荷	Q	バリオン数密度	ρ
エネルギー	E	エネルギー	E
運動量	P^i	運動量	P^i

表 2: カイラル相転移と CEP

我々はまた QCD 相図の温度・密度平面上にある臨界終点 (Critical End Point, CEP) についてモード結合理論の観点から言及する。CEP は現実世界においても厳密に 2 次相転移であり、特に注目を集めている。CEP においては、カイラル凝縮で書いた熱力学ポテンシャルが平坦になるためシグマメソンが零質量になると期待されている。従って重イオン衝突実験において系が CEP を通過すれば、シグマメソンが崩壊してできる光子対やレプトン対が多く観測されると期待される。

最近、NJL 模型などの計算によるとシグマメソンは CEP で零質量にならないという結果が報告されている。つまりシグマメソンモードは CEP でソフト化しないというものである。しかしながら我々は CEP とカイラル相転移の遅い変数を比べてみると、両者に類似性があることに気づく (表 2 参照)。この類似性から、カイラル相転移においてメソンモードがソフト化するのと同様に、CEP においてシグマモードはソフト化すると期待される。さらに一般論から考えて、秩序変数の揺らぎに対応した伝搬モードがソフト化しないというのはまず考えられない。NJL 模型の計算は揺らぎの効果が入っていないので、秩序変数以外のモードが臨界的な振舞いをしない、ということはまだ考えられる。しかし秩序変数のモードが臨界的にならないというのは、これは模型の致命的な欠陥だとみなされるべきである。CEP のモード結合理論による解析は今後の課題のひとつである。

最後に、核物質で起こる液相・気相相転移の臨界終点での粘性係数について考える。一般に臨界点では揺らぎの効果で輸送係数が発散することがあるが、液相・気相相転移では粘性係数が発散することが知られている。もし重イオン衝突実験において、核物質がこの臨界点を通過するとその大きな粘性係数のため、系の膨張は鈍くなると考えられる。これは系が臨界点に留まる時間が長くなることを意味する。一方、臨界点ではバリオン数密度に対応した ω^0 モードがソフト化すると期待される。これは ω チャンネルを通したレプトン対のソフト化につながる。系は臨界点に長く留まるため、このソフト化したレプトン対が測定される可能性は大きくなると期待される。これはすでに観測されている中間不変質量領域でのレプトン対の増大を説明するかもしれない。より定量的な計算は今後したいと考えている。