

論文内容の要旨

論文題目: Restoration of Chiral Symmetry and Meson Spectra at Finite Temperature (有限温度におけるカイラル対称性の回復とメソンスペクトル)

氏名 日高義将

カイラル対称性の破れとその回復についての研究は、ハドロン物理における重要な課題の一つである。高温、高密度状態になるとハドロン相からクォークグルーオンプラズマ相やカラー超伝導相といった様々な相への相転移が起これと考えられている。BNLのRHICやこれから行われるCERNのLHCの衝突実験でも高温高密度状態が実現されるようになり、相転移の有無を実験的に確かめられるようになってきた。

相転移より下のハドロン相でもカイラル対称性の部分的回復により真空中とは異なるハドロンの振る舞いが観測されると予想される。そのカイラル対称性の回復のパターンについてはいくつかの提案がされている。一つ目はパイ中間子のカイラルパートナーはシグマ中間子であるという従来の標準的なシナリオであり、二つ目はパイ中間子のカイラルパートナーがロー中間子の縦波成分であるという Vector Manifestation (VM) と呼ばれるシナリオである。同様にパイ中間子のカイラルパートナーがロー中間子であるというシナリオとして Vector Realization (VR) と呼ばれるものもある。VMシナリオとVRシナリオの違いは、カイラル対称性が回復した時のパイ中間子の崩壊定数の違いである。VMシナリオでは回復した点では崩壊定数がゼロになり、VRシナリオでは有限にとどまる。ここで、 $SU(2)_L \times SU(2)_R \simeq O(4)$ のカイラル対称性を持つ場合を例にとる。この $SU(2)_L \times SU(2)_R \simeq O(4)$ 対称性とローレンツ対称性 $SO(3,1)$ の類似を用いると、この2種類の回復のシナリオは3つのパイ中間子と1つのシグマ中間子が4元ベクトルを形成しパートナーとなる線形シグマ模型的な描像 (標準シナリオ) と、3つのパイ中間子と3つのロー中間子 (の縦波成分) が電場と磁場の関係となりパートナーを組

む hidden local symmetry 模型に基づく描像 (VMシナリオまたは VR シナリオ) といえる。カイラル対称性が自発的に破れた真空では、粒子の質量の固有状態はカイラル対称性の既約表現とはなっていない。つまりパイ中間子はこの4元ベクトル成分 $((2, 2^*) \oplus (2^*, 2))$ と電場成分 $((3, 1) \oplus (1, 3))$ の混合状態と考えられる。カイラル対称性が回復した時、質量の固有状態は対称性の既約表現に属する。したがってパイ中間子は $(2, 2^*) \oplus (2^*, 2)$ または $(3, 1) \oplus (1, 3)$ のどちらかの表現に戻る。4元ベクトルの表現に戻れば標準シナリオ、電磁場煮対応するの表現に戻れば VM または VR シナリオが実現する。

我々は有限温度中でのカイラル対称性の回復の過程でこれらそれぞれのシナリオについてどのような特徴がスペクトルに見られるか研究した。これらを解析するために我々は二つの模型を用いた。標準シナリオについては線形シグマ模型、VM シナリオに対しては Hidden local symmetry 模型を用いた。

標準シナリオ的な描像では、パイ中間子とそのカイラルパートナーであるシグマ中間子が重要な役割を演じる。しかしシグマ中間子はパイ中間子に崩壊するためにゼロ温度の真空中では鋭いピークとして現れない。しかし、有限温度中ではシグマ中間子のスペクトルのピークが鋭く現れる可能性が指摘されている。なぜならカイラル対称性が回復するに従ってシグマ中間子とパイ中間子が縮退し、このため対称性が回復する過程でシグマ中間子の質量がパイ中間子の質量の2倍程度になる温度が存在する。その時パイ中間子への崩壊が抑制され、閾値付近におけるシグマ中間子のスペクトルは増大される。我々はこの現象に対して伝播関数のポールの振る舞いを有限温度で線形シグマ模型を用いて解析した。有限温度では単純な摂動展開は破綻しているため高次の項を再総和する必要がある。その再総和の手法として我々は Optimized perturbation theory (OPT) を用いた。ポールの振る舞いを解析することはスペクトルを各ポールからの寄与で分解でき、シグマ中間子のような幅の広い粒子もポールを用いてで同定することができるため有用である。我々はシグマチャンネルにスペクトルに特に影響する3つのポールがあることを発見した。1つ目はゼロ温度で幅の広いピークを作って観測される、いわゆるシグマ中間子に対応するポール (Pole II) である。またこの Pole II の複素共役の点に2つ目のポール (Pole II*) が存在する。これら2つのポールは S 行列のユニタリー性から必ずペアで現れる。3つ目はパイ中間子の(仮想的な)束縛状態に対応するポール (Pole I) である。Pole II の実部は、カイラル対称性の回復とともに減少し、そのスケールリングはシグマ凝縮の減少に比例する Brown-Rho スケールリング則を満たす。一方、Pole I に対応する状態は媒質中での誘導放射のために引力が強められ、ある温度よりも上では束縛状態を形成することがわかった。また、この束縛状態が現れる過程で閾値付近のスペクトルの増大が起こる事も示した。高温でカイラル対称性が回復したときにパイ中間子と縮退する状態に対応するのはこのポールである。ゼロ温度で幅広いピークを作るポールが高温で対称性が回復したシグマ中間子の状態に対応するポールと異なるのは大変興味深い結果である。つまり低温では Pole II が、高温では Pole I が物理的に観測されるシグマ中間子に対応すると言う事が出来る。この2つの物理的状态が入れ替わる現象は Pole II に対応したシグマ

中間子の状態とパイ中間子の2粒子状態の準位交差として理解できる。また、ポールが2つあるという事実は、ある温度ではスペクトルに2つのピークが現れることを意味する。したがってこの現象が実験でも観測されるかもしれない。

さらに我々は1ループレベルを超えた効果を取り入れる計算も行なった。有限温度では熱浴中の粒子との散乱によりあらゆる領域でスペクトルは存在するがこの効果は2ループ以上の計算によってはじめて取り入れられる。特にシグマ中間子から崩壊したパイ中間子が熱浴中の粒子と散乱することによる効果(我々はこの効果をパイ中間子の熱的幅の効果と呼ぶ)はある温度でシグマ中間子のスペクトル関数に見られる鋭いピークを弱めると予想される。この効果を取り入れるために我々はシグマ中間子の自己エネルギーの計算に複素数にしたパイ中間子の質量を用いた。質量を複素数にする事によって有効的にパイ中間子の熱的幅の効果を取り入れることが出来る。この計算によってシグマ中間子のスペクトルの閾値付近の増大は抑えられた。しかしポールが2つあることは変わらず、2つのピークがスペクトルに見られることは変わらないという結果を得た。また、直接的に実験に反映するシグマ中間子の光子への崩壊率の計算を熱的幅の効果を入れて行なった。熱的幅を入れないときに比べて熱的幅を入れた場合は閾値付近のスペクトルの増大は抑えられた。スペクトル関数に見られたもう一つのピークはボーズ分布関数によって高エネルギー側が抑制されるためこの過程では直接見ることが出来なかった。

我々はもう一方のVMシナリオ的な描像であるHLSモデルを用いた1ループレベルでのスペクトルの解析も行なった。スペクトル関数を計算するのに我々はOPTを用いて1ループレベルの T^2 のオーダーの再総和を行なった。この結果、パイ中間子の崩壊定数とロー中間子の崩壊定数にあたる量が同じ温度でゼロになることを示した。再総和を行なわなければこの温度は一致しない。またVMの実現は回復した点での崩壊定数の比が $a = 1$ になることを意味する。しかし我々の結果は崩壊定数の比は $a = 1$ にはならず $a \approx 2.8$ になった(真空中では $a \approx 2$)。ロー中間子のスペクトルについては低温では、ピーク的位置はそれほど変化せず、主に幅が広がる結果を得た。これは媒質中では誘導放射によりロー中間子が真空の場合より不安定になるためである。高温側では、カイラル対称性の回復に伴いローメソンのスペクトルのピーク的位置は低エネルギー側に移動した。さらに臨界温度に近づくと原点の閾値付近のスペクトルの増大も見られた。崩壊定数とロー中間子のスペクトルのピークの低エネルギー側へのシフトはVMシナリオ的な結果だが、崩壊定数の比の振る舞いが異なる。我々の結果はVMとは異なった振る舞いとなった。我々の結果とVMシナリオとの違いはベクタードミナンスからのずれに反映するであろう。

我々の研究はカイラル対称性の回復の過程におけるシナリオの違いによってメソンのスペクトルにどのような特徴が見られるかなるか調べたものであり、現実がどちらのシナリオになるべきかはこの解析からはわからない。それを解析するためには両方のシナリオを内包するモデルを構築し解析する必要があるがこれは今後の課題である。