

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	筒井 翔一朗
論文題目	Parametric instabilities of the Yang-Mills field and far-from-equilibrium dynamics of overpopulated bosons		
(論文内容の要旨)			
<p>本学位論文は、高エネルギー重イオン衝突における熱化過程に関わる二つの問題 — ヤン・ミルズ場のパラメトリック不安定性とボース・アインシュタイン凝縮体生成の可能性 — について研究した成果をまとめたものである。</p> <p>高エネルギー重イオン衝突では、非常に早い段階で局所熱平衡に達して流体力学的記述が有効になることが知られている。ヤン・ミルズ場の不安定性は初期段階において急速な粒子生成を引き起こすと期待され、早い熱化を説明する機構として有望である。また粒子が大量に供給された過占有系では高温であってもボース・アインシュタイン凝縮が起こる可能性があり、近年大きな興味を集めている。</p> <p>学位論文前半では、重イオン衝突を理想化したモデルとして一様な背景カラー磁場が存在する非膨張系における量子揺らぎの安定性が議論されている。この背景カラー磁場はヤン・ミルズ場の非線形な相互作用によって生成され、ヤコビの楕円関数を用いて表される周期関数になる。この周期的背景場が様々な運動量の揺らぎと共鳴を起こし、パラメトリック不安定性を示すことが本論文で指摘された。多重スケール解析とフロケ理論に基づいて、量子ゆらぎの増幅率が運動量空間においてバンド構造を作ることが示され、数值的・解析的にその構造が決定されている。特に、背景磁場のスケールに比べて小さな運動量をもつ量子ゆらぎが強い不安定性を示すことが明らかにされた。</p> <p>次に、上述の研究を一次元方向に膨張する系に一般化した議論が行われている。共形座標を導入することにより、膨張系の解析は非膨張系の安定性解析に近似的に帰着できる。膨張系では量子ゆらぎの有効運動量が時間に依存し、特に縦運動量は時間とともに減少する。このため現実の重イオン衝突においても、縦運動量のみをもつゆらぎは強いパラメトリック不安定性を起こすことが示唆された。</p> <p>学位論文後半では、大量の粒子が供給された過占有系の非平衡時間発展が、$O(N)$ 対称性をもつスカラー場の理論を用いて議論されている。重イオン衝突のような高温の系であっても系の過占有性によってボース・アインシュタイン凝縮体が生成し得ることが、on-shellの散乱過程を記述するボルツマン方程式等を用いて議論されてきた。学位論文では粒子分布の時間発展を、量子論的な輸送理論であるカダノフ・ベーム方程式を用いて解析している。その結果、粒子分布は有限の化学ポテンシャルをもつボース・アインシュタイン分布でよく表されること、過占有の場合には化学ポテンシャルが時間とともに粒子の質量に限りなく近づき、ゼロ運動量粒子の数が急速に増大することが示された。また、低運動量粒子の数が一定の量に達すると、三つの低運動量粒子が一つに結合するoff-shell過程によって、ゼロ運動量粒子の数が減少に転じることも示されている。すなわち、ゼロ運動量の粒子数は顕著な増大を示すものの、ボース・アインシュタイン凝縮体の生成は抑制されることが明らかにされている。これらの現象は、ボソン系であれば普遍的に起きると期待され、重イオン衝突でも発生することが示唆されている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位論文は、高エネルギー重イオン衝突における早い熱化の問題に、グルーオン場(ヤン・ミルズ場)の不安定性と過占有状態からの粒子系の非平衡時間発展の2つの観点から取り組んだ成果をまとめたものである。

近年、高エネルギー重イオン衝突による高エネルギー密度物質の研究が活発に行われている。大きな原子核同士を質量エネルギーの100~3000倍のエネルギーで衝突させることにより、核子やハドロンに閉じ込められていたクォークとグルーオンが解放されたクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)が生成される。QGPは新しい物質の形態として、また初期宇宙で存在していた物質としてその性質に興味を持たれる。一方、重イオン衝突での動的性質としての謎も多く残っている。例えば、局所熱平衡が仮定される流体力学の成功は非常に早い時間で熱化、すなわち運動エネルギーから熱エネルギーへの変換が起こっていることを示すが、必要とされる熱化時間は摂動論的な計算結果よりも数倍短く、未だに理解が得られていない。この早い熱化問題を解く有力な機構の一つが場の不安定性による急速な粒子生成であり、また粒子系の非平衡時間発展の理解も不可欠である。

学位申請者は学位論文の前半で、重イオン衝突の初期に一樣な背景カラー磁場が存在する場合にパラメトリック不安定性が現れ得ることを示した。高エネルギー反応の初期にはグルーオン場が期待値をもつ古典場による記述が有効であることが知られている。グルーオンの非線形項から一樣磁場を作る場の配位は時間について周期関数となり、様々な運動量の揺らぎを増幅するパラメトリック不安定性を引き起こす。パラメトリック不安定性の存在は先行研究において数値シミュレーションにより示唆されていたが、学位申請者は多重スケール解析とフロケ理論に基づく線形解析により不安定性の存在とそのバンド構造を明らかにし、更に膨張系においても座標変換により同じ不安定性が現れることを明確に示した。低運動量の揺らぎの増幅率は非常に大きく、重イオン衝突初期において急速な粒子生成が起こることを示唆する結果である。

学位論文の後半では、ボーズ粒子が大量に生成された過占有系の非平衡時間発展を量子場の理論に基づいて分析している。粒子数が十分に多く、かつ保存される場合には、重イオン衝突のような高温の系でもボース・アインシュタイン凝縮体が生成され得ることが、古典的な輸送理論に基づいて議論されている。学位申請者は量子論的な輸送理論であるカダノフ・ベイム方程式を用いてスカラー場理論における粒子分布の時間発展を分析した。結果として、過占有初期条件の場合にはゼロ運動量の粒子が急激に増大し、化学ポテンシャルが質量にほぼ等しくなる近似的なボース・アインシュタイン凝縮体が生成されるが、その後量子論効果による粒子数非保存過程によって緩やかに真の平衡状態に近づくことが示された。こうした描像は他のボソン系でも成り立つと期待され、重イオン衝突初期における平衡化の理解を進めたと判断できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2017 年 1 月 18 日以降