

論文の内容の要旨

論文題目

Response of Quantum Few-Body Systems to Time-Dependent External Fields (時間依存外場に対する少数量子多体系の応答)

氏名 町田 学

近年の実験技術の進歩により、例えば量子ドットや分子磁石といったナノスケールの量子系が作られている。このような有限の粒子で構成される量子系の非平衡状態の物理は、平衡状態の統計力学の完成度に比べて未知の領域である。本論文では少数量子多体系の時間依存外場に対する応答について研究する。このような量子系は離散準位をもつ。したがって、外場を掃引したときにある状態が別の準位にどのように遷移するかを調べるのが重要になる。

まず、よく知られているように微小な振幅の振動外場に対する応答は複素アドミッタンスとして計算することができる。たとえば振動磁場に対する電子スピンの応答は電子スピン共鳴 (ESR) と呼ばれ、磁性体の解析に用いられている。このような外場に線形な範囲での応答は久保公式として理論的にはすでに確立されている。しかしながら、実際の計算においてスピン演算子の相関関数を求めるには数値的な困難がある。我々は、その点に関して新しい方法を開発し、最近興味を集めている V15 の性質を議論した。

量子効果が顕著な役割をするのは有限の振幅をもつ振動外場がかかった場合である。そのような系では外場の変化に応じて系の波動関数が増減し、その位相の干渉などが重要な役割をする。この場合にはエネルギー準位を外場のパラメータの関数としてみて、エネルギー準位の構造を反映したダイナミクスが起こる。通常、対称性の異なる状態 (たとえば singlet と triplet) 間の遷移は起こらないので、対称性によってヒルベルト空間を分割して、ある既約空間に含まれる準位に着目することができる。このような部分空間では2つの準位が近づくときにいわゆる反発擬交差構造 (非交差) が現れ、そのような交差を通過するように外場をゆっくり掃引したときには、系の状態は掃引速度に応じて非断熱遷移を起こす。

我々は少数量子多体系の外場に対する応答を統一的に研究するために既約空間を代表してランダム行列のハミルトニアンを考える。ランダム行列に対応する準位構造を持つ系としては、原子核の他にも磁場中の水素原子、二酸化窒素などの分子、マイクロ波キャビテ

イ、量子ドット系などが実現されている。このような離散準位系での量子状態の変化は、一つの準位に沿った断熱変化と、準位間遷移をもたらす非断熱遷移により引き起こされる。一つの擬交差における状態の遷移はそこでのエネルギーギャップや外場の掃引速度の関数としてランダウ・ゼナー公式として与えられている。パラメータを一様に掃引した場合にこの考え方に基づいたウィルキンソンによる考察があるが、ここでは系にある振動数で正弦的に振動する外場がかかっている場合について研究する。このとき一つの擬交差を外場のパラメータが複数回通過するので波動関数の位相の干渉がおこり、一様に掃引した場合とは異なるダイナミクスが起こる。我々は基底状態から外場をかけていったときの系のエネルギー上昇について研究した。ランダム行列の状態密度が半円則にしたがうことに注意すると基底状態周辺では準位間隔が広く、非交差での非断熱遷移のみが起こる。状態がもっと上の準位まで広がると準位間隔が狭まり隣接準位外にも遷移するようになる。我々は、初期においては前者の機構を反映してエネルギー上昇率が振動数の $3/2$ 乗に比例すること、また一定の時間後には後者の機構を反映して振動数の 2 乗に比例することを見出した。

ここで基本的な役割をしている非交差での非断熱遷移は外場の掃引にともない多数出現する。したがって、この遷移に関わる種々の量の分布が大事になる。各々の非交差での遷移の仕方は外場の掃引速度以外に系の準位の構造、すなわち非交差におけるギャップの大きさや準位の傾きにも依存する。非交差点におけるこれらの量についてはすでに調べられ、その分布が知られている。また、遷移の頻度は隣り合う非交差間の距離に依存する。我々は準位の構造を与える新しい分布として、この非交差間の距離の分布について研究し、分布の立ち上がりが系の対称性に依ることをランダム行列を用いて見出した。具体的には、時間反転対称性がある場合には 2 乗で、ない場合には 3 乗で立ち上がる。さらに、いくつかの具体例について隣接非交差間隔の分布を求め、それがランダム行列理論から予想される分布に一致することを示し、非交差間の距離において系の対称性が重要であることを明らかにした。

さらに多数回の交差通過による波動関数の位相の干渉の効果として、外場を掃引し続けるとエネルギーの上昇は系の実効的な温度がある有限の値に相当するところで止まることを見出した。このエネルギーの飽和は動的局在とよばれ、一体の量子カオス系である結合回転子系などについては知られている。動的局在はパラメータを周期的に振ったときの状態の量子力学的な干渉の効果で起こる現象であり、我々はエネルギー期待値の表式をフロッケ演算子の固有状態で展開することによって、動的局在がおこってエネルギー期待値が飽和する値の外場の振動数に対する依存性を研究した。その結果、飽和値の振動数依存性は初期状態に含まれるフロッケ状態の数の振動数依存性から理解できることを明らかにした。このことから例えば、小さい振動数に対しては重要なフロッケ状態の数が少なく飽和エネルギーの値も小さいこと、逆に大きな振動数に対しては初期状態の中に多くのフロク

ケ状態が含まれ状態がエネルギースペクトルの広範囲に広がるために飽和エネルギーの値は大きくなることなどがわかる。さらに系の固有状態とフロッケ演算子の固有状態の関係を調べ、動的局在のマイクロな機構を考察した。

このように、複雑なエネルギー構造をもつ量子系が振動外場に対して示す応答をマイクロな遷移の機構から解析し、その特徴を明らかにした。特に、振動外場の系の駆動によって、系の実効温度の上昇が有限で止まることとその振動数依存性を明らかにし、この現象の量子散逸現象への効果を考察した。