

論文審査の結果の要旨

氏名 増田 正孝

本論文では、2枚の金属極板間にはたらく力の距離依存性をねじれ秤を用いて精密に測定し、かつてない精度でカシミール力の検証および標準理論を越える未知の力の探査をおこなうことにより、これらの問題に対して新たな知見を得ている。

真空とはエネルギーの基底状態を意味するが、不確定性原理によって真空のエネルギー自体が揺らぎを持つ。この量子的な真空が境界条件に依存することから、巨視的な現象においてもこの真空揺らぎの効果が影響することになる。1948年にカシミールは巨視的な境界条件の元で、電磁場零点振動のエネルギーの欠損が生じ、それによって帯電していない物体間でも微小力が働くことを予言した。この中で2枚の完全導体からなる平行な平面間で、極板の間と外側の零点振動エネルギーの差を取ることで、導体間に働く力を定式化した。

近年、実験と共に実際の物質間にはたらくカシミール力の理論も進展してきた。実在する物質間のカシミール力は有限の導電率の効果、表面の面粗さによる効果、有限温度の効果の少なくとも3つの効果を考慮する必要がある。有限の導電率補正は金属の導電率が無限大ではないことに起因し、Lifshitz等によって定式化されている。

本検証実験では2枚の金の極板間に働く力を測定するために、 $6\mu\text{m}$ 付近から $0.3\mu\text{m}$ 刻みで極板を近づけていき、その時のねじれ秤の応答から極板間に働く力の変化量を測定した。ねじれ秤は力に対する感度が高いが、同時に地面振動などの外乱に対して弱いという欠点を持つ。実際、 10mHz から 1Hz の帯域では、地面振動の水平成分がねじれのノイズ振動に変換されていることが確かめられた。そこで、測定装置を地面振動が十分低い国立天文台江刺地球潮汐観測施設に設置して測定を行うことでこの問題を解決している。

一般的に2枚の金属極板は電氣的に導通させていても、導通に用いている異種金属の表面接触の影響で、接触電位差と呼ばれる電氣的なポテンシャルを持つ。カシミール力の影響の小さな遠距離で電気力の距離依存性の関数フィットを行うことによりその影響を解析的に引き算した。その結果、 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$ の範囲で、有限の導電率及び表面の凹凸による補正を用いたカシミール力の理論計算値と5%の精度で一致することが確かめた。

一方で有限温度による効果は極板からの黒体輻射による光子の密度に起因するが、この効果に関しては Bordag 等のグループと Bostrom 等のグループによって理論的に異なる値が主張されている。そこで尤度比検定を用いて、Bostrom 及び Bordag の有限温度による補正項モデルの検定を行った。系統誤差も含めた議論により、Bostrom のモデルが 3.5 以上の信頼度で棄却されることを確認した。Bordag のモデルに対しては測定データと矛盾はないことを確かめた。

さらに得られた測定データと理論との残差を元に、量子重力理論などが预言する未知の力への上限をつけた。未知の力のポテンシャルが湯川型であると仮定したとき、2 質点間に働く力を、結合定数 と未知の力の働く距離レンジ であらわすことができる。本論文では、 $0.4 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ の範囲内でのデータとカシミール力理論との残差値を用いて、 に対して 95%の信頼度で制限をつけた。この未知の力への制限として得られた上限値は $\approx 0.5 \mu\text{m}$ 付近で過去の実験と比較して最も厳しい上限となった。

以上のように本研究では、カシミール力の詳細な検証および標準理論を越える未知の力の探査という視点から新たな知見が得られている。これらは従来ない新たな知見であり、今後のカシミール力研究さらには量子重力の研究に大きく貢献する成果であるといえる。

なお本論文は共同研究として進められたが、論文提出者が主体となって実験、解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。