

Kibble-Zurek Mechanism for the spontaneous Vortex Formation in Nb-Al/AlO_x/Nb Josephson Tunnel Junction: New Theory and Experiment

R. Monaco, J. Mygind, M. Aaroe, R. J. River, and V.P. Koshelets
cond-mat/0503707

宇宙はどのようにして始まり、どのような過程を経て現在の姿になったのであろうか。現在の宇宙論の定説となっているビッグバン理論によれば、エネルギースケールが高く、全ての力が統一されていた。その後、急激な宇宙膨張とともにエネルギースケールが下がるにつれて様々な相転移現象が起き、最終的には一つの力がヒッグスメカニズムにより4つの力(重力、強い力、弱い力、電磁力)になり、そのような過程でトポロジカル欠陥が生じたと考えられている。しかしながら、我々が観測できる範囲は光が直進できるようになった晴れ上がりと呼ばれる3°K宇宙背景輻射の時期までであり、トポロジカル欠陥が生じたと考えられている初期宇宙は観測できない状況にある。だが、これに関してKibble-Zurekは、初期宇宙の過程は宇宙の相転移現象とみなせ、固体物理系での相転移現象と対応させることができると主張している。そして、光速より速く情報は伝わらないという因果律の要請から宇宙の相転移の過程で生じたトポロジカル欠陥同士の距離が急冷時間に対して臨界指数1/4をもつと予言している(KZ mechanism)[1][2]。我々の宇宙の創生は、一度だけであるが数理的に同等であると考えられる物理系を持っていくことで実験室レベルで宇宙創生実験を行うことが可能となる。相転移とトポロジカル欠陥に注目した宇宙創生実験はこれまでに⁴He、³He、液晶、超伝導で行われてきており、その実験結果から初期宇宙を理解する試みが行われている。

本論文の研究目的は、KZ mechanismをリングジョセフソン接合を用いて、実験的に示すことである。ジョセフソン接合とは、2つの超伝導体の間に絶縁層があることで超伝導体の位相差だけジョセフソン電流が流れる接合のことである。また、リングジョセフソン接合において位相差を粒子とみなした時の運動はサイン・ゴルドン方程式で記述でき、接合内に渦糸(vortex)をトラップすることが可能となる(Fig.1)。用いたリングジョセフソン接合はNb-Al / AlO_x / Nb(円周500 μm、幅4 μm)である。また、接合の転移温度はT_c=8.95(K)である。常伝導状態(T>T_c)から超伝導状態(T<T_c)へ急冷時間を変化させ電圧測定を行った。接合の長さジョセフソン侵入長が同程度になっており、電圧測定により接合内にvortex1個が入ったかが分かる。急冷時間に対するvortexの生成確率をlog-logプロットした時の臨界指数が1/2となった(Fig.2)。筆者らは、ジョセフソン近接効果接合を考慮するとKZ mechanismの臨界指数1/4と一致したと主張している。このことから、リングジョセフソン接合が初期宇宙を追及する上で最適な系であると言える。一方、KZ mechanismは強力な予言ではあるが古典相転移での記述であり、量子揺らぎを含むインフレーション宇宙モデルを考える上では、量子相転移を含んだ議論が今後必要となるであろう。



Fig.1 vortexが接合にトラップされた模式図

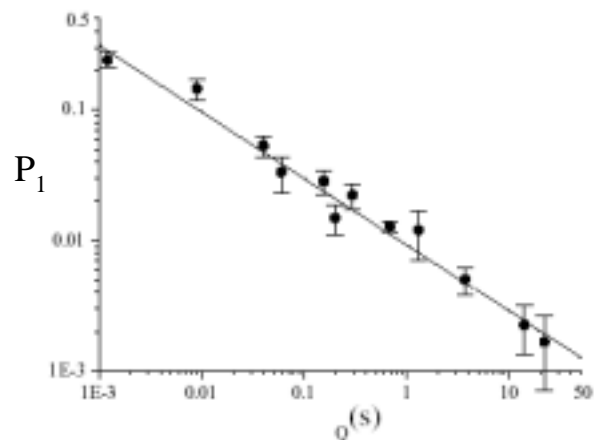


Fig.2 vortex生成確率 P_1 vs. 急冷時間 Q

[1]T.W.B.Kibble, J. Phys. A 9, 1387 (1976)

[2]W.H. Zurek Nature 317,505 (1985)