

学位論文題名

Laboratory Test for The Early Universe:
Structural Effects of Hierarchy in Superconducting Networks

(実験室系での初期宇宙に関する研究：
超伝導ネットワークにおける階層構造効果)

学位論文内容の要旨

現在観測されている銀河—銀河団の宇宙大規模階層構造は、宇宙初期に生成された物質の密度ゆらぎが重力により成長したものと考えられている。そしてこの密度ゆらぎはインフレーション膨張を起こす場の量子ゆらぎが古典的な密度ゆらぎに転化したものと考えられているが、この量子-古典転移の詳細は未解明のままである。これに対する仮説の1つに「環境との相互作用によりデコヒーレンスが起る (デコヒーレンス問題)」というものがある。通常デコヒーレンス過程では、注目している部分系と外部環境が相互作用することで散逸が起り、系の量子性が失われると考える。しかし初期宇宙において環境となりうるものがわかっておらず、未だ決定論には至っていない。

我々はこの問題に対して、複雑性 (階層構造) に着目し、「階層構造が持つ性質、効果によってデコヒーレンスが起る」という仮説を立て研究を進めてきた。階層構造は社会、生物、地球など多種多様な系に存在することが知られており、先に述べたように我々の宇宙にも存在するので初期宇宙にもこのような構造が存在した可能性がある。加えて階層構造がある系で量子力学が成り立つかは未だ解明されていない。

この問題へのアプローチとしては、直接宇宙初期の光を観測するなどして実験的に確かめることが最も有効であるが、現在我々が観測できる光は、光が直進できるようになった宇宙の晴れ上がりと呼ばれる時期までである。よってインフレーション膨張のあったと考えられる初期宇宙の光は観測できず、この方法を実行することは非常に困難な状況である。そこで我々は宇宙における量子ゆらぎを固体物理系における超伝導の量子ゆらぎに対比させて実験することでこの問題の解決の糸口を探ってきた。超伝導を用いることでボルテックスの重ね合わせ状態などその量子性を利用することができる。また微細加工技術をえば、微小で複雑なネットワーク構造を容易に設計することができる。ネットワーク構造の効果は磁場を印加したときのボルテックス配置に現れる。本研究の目的は、超伝導ネットワークを用いて階層構造の持つ性質、効果を実験的に検証し、そしてその効果が量子-古典転移にどのような影響を及ぼすか考察することである。

本論文は全6章で構成されている。

第1章では、序論として本研究の背景と目的、独創的な点について述べた。

第2章では、ギンツブルグ-ランダウ理論を基礎にした超伝導ネットワーク理論について記述した。さらに実験結果を解釈する上で必要となる、重要な実験事例を紹介し、その特徴をまとめた。

また本研究で採用した階層ハニカム格子について記述した。これはスミージングという概念を含んだ階層構造であり、初期宇宙に対するモデルとして非常に有力である。

第3章では、カイラル p 波超伝導体である Sr_2RuO_4 について述べた。この超伝導体は内部自由度を持つので、s 波超伝導より高い対称性の $\text{SU}(2)$ の場を与えると考えられている。我々の宇宙は対称性の高い状態から進化してきたと考えられているので、初期宇宙の実験をする上で非常に重要である。

第4章では、電子ビームリソグラフィーによる微小な超伝導ネットワークの作製方法から Little-Parks 振動の測定方法までを述べた。超伝導体には鉛を用いた。超伝導細線は線幅 $0.2\ \mu\text{m}$ 、厚さ $0.1\ \mu\text{m}$ である。また比較実験として通常ハニカム格子も作製した。Little-Parks 振動とは微小な超伝導に磁場を印加したときに起こる干渉効果であり、その結果からネットワーク上のボルテックスの振る舞いを調べることができる。

第5章 5.1 節では、Little-Parks 振動の実験結果を記した。通常ハニカム格子ではディップの位置が充填率 $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して対称な Little-Parks 振動が得られた。またこの結果は過去に行われた実験を再現していることがわかった。一方で階層ハニカム格子の場合は $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して非対称な Little-Parks 振動が得られた。この結果は通常ハニカム格子では見られなかった振る舞いであり、代表的なフラクタル構造であるシェルピンスキーガasketにおける結果でも見られていない。よってこの非対称な振動が階層ハニカム格子特有のものであることを断定した。

5.2 節では、非対称な Little-Parks 振動を解釈するために、ネットワーク上でのボルテックス配置について考察した。まず通常ハニカム格子の場合、 $\Phi/\Phi_0 = 1/3$ でのボルテックス配置は六角形 3 つに 1 つの割合で、ベース構造と整合して配列している。そして $1/3$ と $2/3$ ではボルテックスのあるところとないところを入れ替えた関係にある。このことを“ボルテックス配置の双対性”があると言う。つまり $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して対称な Little-Parks 振動はこの双対性が保存されることを意味している。また Φ/Φ_0 が無理数の場合はベース構造と不整合な配列になっていると考えられる。一方で階層ハニカム格子の場合は、 $1/2$ に対して非対称な振動なのでこのボルテックス配置の双対性が破れていることを示している。そこで我々は非対称性をもたらすボルテックス配置として、ボルテックスが整合する領域と不整合な領域とが空間分布するモデルを提案した。このモデルに従うと、例えば $1/3$ における配置に双対操作を行っても、 $2/3$ の配置と双対になっていないことが説明できる。以上の考察により、階層ハニカム格子ではその構造効果によって、どんな磁場においても整合と不整合な領域が必ず混在し、空間的に分布することがわかった。また整合、不整合は超伝導の位相が決まる、決まらないに対応させることができるので、このモデルに従うと、ある系にこのような階層構造が存在すると、その階層構造効果によって位相が決まる領域と決まらない領域が自発的に分布すると言いかえることができる。そして位相の確定、不確定を古典、量子に対応させれば、初期宇宙における量子-古典転移に対して外部環境なしでも、構造効果によって古典領域ができる (デコヒーレンスが起こる) ことを示すことができる。

第6章では、本論文の研究結果を総括した。

以上、本研究は超伝導ネットワークを用いて階層構造効果を調べ、初期宇宙における量子-古典転移にどのような影響を及ぼすか考察することを目的とし、階層構造効果によって Little-Parks 振動が $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して非対称になることを発見した。さらにボルテックス配置の考察から、階層構造のある系では外部環境なしでも、構造効果によってデコヒーレンスが起こる可能性を示した。我々の研究結果は構造効果に着目した新しい宇宙観を固体物理学から提言できる可能性がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丹 田 聡

副 査 教 授 矢久保 考 介

副 査 教 授 Wright Oliver Bernard

学 位 論 文 題 名

Laboratory Test for The Early Universe: Structural Effects of Hierarchy in Superconducting Networks

(実験室系での初期宇宙に関する研究：

超伝導ネットワークにおける階層構造効果)

現在観測されている銀河—銀河団の宇宙大規模階層構造は、宇宙初期に生成された物質の密度ゆらぎが重力により成長したものと考えられている。そしてこの密度ゆらぎはインフレーション膨張を起こす場の量子ゆらぎが古典的な密度ゆらぎに転化したものと考えられているが、この量子-古典転移の詳細は未解明のままである。これに対する仮説の1つに「環境との相互作用によりデコヒーレンスが起る (デコヒーレンス問題)」というものがある。通常デコヒーレンス過程では、注目している部分系と外部環境が相互作用することで散逸が起り、系の量子性が失われると考える。しかし初期宇宙において環境となりうるものがわかっておらず、未だ決定論には至っていない。

我々はこの問題に対して、複雑性 (階層構造) に着目し、「階層構造が持つ性質、効果によってデコヒーレンスが起る」という仮説を立て研究を進めてきた。階層構造は社会、生物、地球など多種多様な系に存在することが知られており、先に述べたように我々の宇宙にも存在するので初期宇宙にもこのような構造が存在した可能性がある。加えて階層構造がある系で量子力学が成り立つかは未だ解明されていない。

この問題へのアプローチとしては、直接宇宙初期の光を観測するなどして実験的に確かめることが最も有効であるが、現在我々が観測できる光は、光が直進できるようになった宇宙の晴れ上がりと呼ばれる時期までである。よってインフレーション膨張のあったと考えられる初期宇宙の光は観測できず、この方法を実行することは非常に困難な状況である。そこで我々は宇宙における量子ゆらぎを固体物理系における超伝導の量子ゆらぎに対比させて実験することでこの問題の解決の糸口を探ってきた。超伝導を用いることでボルテックスの重ね合わせ状態などその量子性を利用することができる。また微細加工技術をえば、微小で複雑なネットワーク構造を容易に設計することができる。ネットワーク構造の効果は磁場を印加したときのボルテックス配置に現れる。本研究の目的は、超伝導ネットワークを用いて階層構造の持つ性質、効果を実験的に検証し、そしてその効果が量子-古典転移にどのような影響を及ぼすか考察することである。

本論文は全6章で構成されている。

第1章では、序論として本研究の背景と目的、独創的な点について述べた。

第2章では、ギンツブルグ-ランダウ理論を基礎にした超伝導ネットワーク理論について記述した。さらに実験結果を解釈する上で必要となる、重要な実験事例を紹介し、その特徴をまとめた。また本研究で採用した階層ハニカム格子について記述した。これはスムージングという概念を含んだ階層構造であり、初期宇宙に対するモデルとして非常に有力である。

第3章では、カイラル p 波超伝導体である Sr_2RuO_4 について述べた。この超伝導体は内部自由度を持つので、s 波超伝導より高い対称性の $\text{SU}(2)$ の場を与えられている。我々の宇宙は対称性の高い状態から進化してきたと考えられているので、初期宇宙の実験をする上で非常に重要である。

第4章では、電子ビームリソグラフィーによる微小な超伝導ネットワークの作製方法から Little-Parks 振動の測定方法までを述べた。超伝導体には鉛を用いた。超伝導細線は線幅 $0.2\ \mu\text{m}$ 、厚さ $0.1\ \mu\text{m}$ である。また比較実験として通常ハニカム格子も作製した。Little-Parks 振動とは微小な超伝導に磁場を印加したときに起こる干渉効果であり、その結果からネットワーク上のボルテックスの振る舞いを調べることができる。

第5章 5.1 節では、Little-Parks 振動の実験結果を記した。通常ハニカム格子ではディップの位置が充填率 $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して対称な Little-Parks 振動が得られた。またこの結果は過去に行われた実験を再現していることがわかった。一方で階層ハニカム格子の場合は $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して非対称な Little-Parks 振動が得られた。この結果は通常ハニカム格子では見られなかった振る舞いであり、代表的なフラクタル構造であるシェルピンスキーガasketにおける結果でも見られていない。よってこの非対称な振動が階層ハニカム格子特有のものであることを断定した。

5.2 節では、非対称な Little-Parks 振動を解釈するために、ネットワーク上でのボルテックス配置について考察した。まず通常ハニカム格子の場合、 $\Phi/\Phi_0 = 1/3$ でのボルテックス配置は六角形 3 つに 1 つの割合で、ベース構造と整合して配列している。そして $1/3$ と $2/3$ ではボルテックスのあるところとないところを入れ替えた関係にある。このことを“ボルテックス配置の双対性”があると言う。つまり $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して対称な Little-Parks 振動はこの双対性が保存されることを意味している。また Φ/Φ_0 が無理数の場合はベース構造と不整合な配列になっていると考えられる。一方で階層ハニカム格子の場合は、 $1/2$ に対して非対称な振動なのでこのボルテックス配置の双対性が破れていることを示している。そこで我々は非対称性をもたらすボルテックス配置として、ボルテックスが整合する領域と不整合な領域とが空間分布するモデルを提案した。このモデルに従うと、例えば $1/3$ における配置に双対操作を行っても、 $2/3$ の配置と双対になっていないことが説明できる。以上の考察により、階層ハニカム格子ではその構造効果によって、どんな磁場においても整合と不整合な領域が必ず混在し、空間的に分布することがわかった。また整合、不整合は超伝導の位相が決まる、決まらないに対応させることができるので、このモデルに従うと、ある系にこのような階層構造が存在すると、その階層構造効果によって位相が決まる領域と決まらない領域が自発的に分布すると言いかえることができる。そして位相の確定、不確定を古典、量子に対応させれば、初期宇宙における量子-古典転移に対して外部環境なしでも、構造効果によって古典領域ができる(デコヒーレンスが起る)ことを示すことができる。

第6章では、本論文の研究結果を総括した。

以上、本研究は超伝導ネットワークを用いて階層構造効果を調べ、初期宇宙における量子-古典転移にどのような影響を及ぼすか考察することを目的とし、階層構造効果によって Little-Parks 振動が $\Phi/\Phi_0 = 1/2$ に対して非対称になることを発見した。さらにボルテックス配置の考察から、階

層構造のある系では外部環境なしでも、構造効果によってデコヒーレンスが起こる可能性を示した。我々の研究結果は構造効果に着目した新しい宇宙観を固体物理学から提言できる可能性がある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。