

## 多孔体中でのヘリウム量子結晶の雪崩的成長と冪乗則

地震や雪山の雪崩のように間欠的に進行する現象は、日常生活においても多く経験できる。これは多数の要素が複雑に相互作用する系において、しばしば見られる振る舞いである。では量子力学が系の運動を支配する物質においても、同様の現象が見られるであろうか。極低温で存在するヘリウムに乱れを導入することにより、この問題にアプローチできる。多孔質物質中で進行するヘリウムの結晶化が調べられ、雪崩的振る舞いが見られたのである。

液体ヘリウムを絶対温度 2 K 以下に冷却すると粘性の無い超流動状態になる。この液体を 25 気圧まで加圧するとヘリウム結晶が生成する。量子力学的性質は原子レベルの微視的世界でのみ現れるのが普通であるが、ヘリウムにおいては超流動や量子トンネル効果など、量子効果が巨視的スケールで現れるという著しい特徴がある。このため超流動ヘリウムやヘリウム結晶は量子液体・量子結晶と呼ばれている。

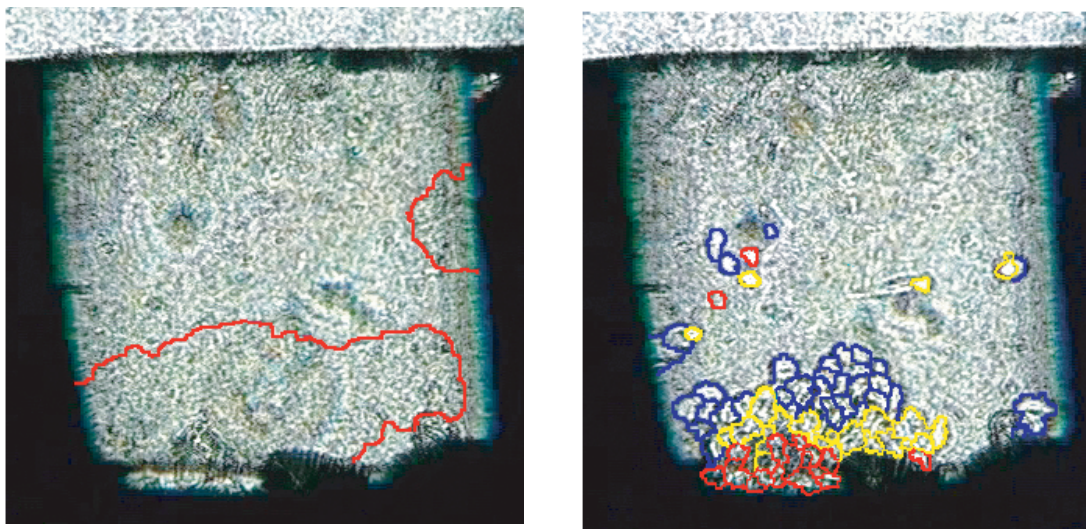


図 1. エアロジェル中で超流動液体から成長するヘリウム結晶。高温で滑らかに進行する結晶表面（左）と低温で雪崩的に核生成する結晶群（右）。曲線は結晶-超流動液体界面の輪郭を表す。左図の赤線は、結晶化開始から 300 秒後の界面を示す。右図の赤、黄、青線は、それぞれ 52、74、106 秒以前に生成した結晶界面を示す。

最近、東京工業大学の野村竜司と奥田雄一らの実験グループは、エアロジェルと呼ばれる多孔質物質中でのヘリウム量子結晶が、極低温で間欠的・雪崩的に成長することを見出した。またこの雪崩的成長が巨視的量子トンネル効果による核生成であり、核生成した結晶のサイズ分布が冪乗則に従うことを明らかにした。冪的サイズ分布は、砂山の雪崩や地震などにおける自己組織化臨界性として知られる動的現象であるが、量子性が顕著に現れた相転移現象での観測は無い。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2011 年 12 月号に掲載された。

エアロジェルとはナノメートルほどの大きさのシリカ微粒子が、スポンジ状に繋がった多孔質物質であり、98%以上の大きな空孔率を持つことが可能な透明物質である。透明であるため、中で進行する結晶化を可視化できる。シリカ微粒子表面をヘリウム結晶が濡らさない

ため、エアロジェル中での結晶成長は、微細で不規則なエネルギー障壁を越えて進行することになる。0.6 K より高温では、結晶成長は滑らかに進行した。成長速度は温度の低下とともに指数関数的に遅くなり (activation type)、結晶表面が熱揺らぎによってエネルギー障壁を越えることを意味した。0.6 K 以下の低温では成長様式が一変し、結晶はエアロジェル中のいたるところで雪崩的に核生成した。この変化は乱れと熱揺らぎの競合による動的転移と考えられる。成長速度の温度依存性は弱く、低温で一定値に飽和することから、エネルギー障壁を巨視的トンネル効果で越える量子核生成による成長であることが示された。さらに核生成した結晶のサイズを測定したところ、小さな結晶ほど多く生成し、その分布は冪乗則に従った。

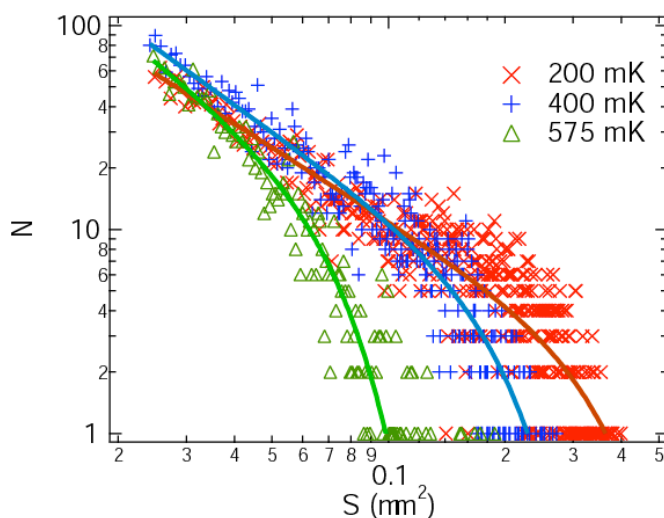


図 2. エアロジェル中で量子核生成するヘリウム結晶のサイズ分布。S は核生成した結晶の射影面積で、N はその面積をもつ結晶が生じた回数。

冪分布は不規則性を内在する様々な動的システムで現れるが、量子効果が動力学を支配する極低温におけるヘリウムの一次相転移においても観測される普遍的現象であることが示された。一方で、温度を上げて動的転移点に近づくに従い、冪乗則に乗る領域が狭まるなどの奇妙な振る舞いも観測された。結晶化に伴う散逸は、温度の上昇とともに急激に大きくなることが知られている。古典系での系統的な実験が困難な散逸の影響を、量子系で明らかに出来たとすると興味深いのが、現時点でその関係は明らかでない。核生成確率の直接測定や空孔率依存性などの多面的な実験の継続によって、動的転移や分布の温度依存性の素性を解明することが望まれる。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No.12, p. 123601

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/043701> (11月16日公開済)

<情報提供：野村竜司（東京工業大学大学院理工学研究科）

奥田雄一（東京工業大学大学院理工学研究科）>