

# 放射光メスバウアー時間領域干渉計法が明らかにする 原子・分子のナノ-マイクロ秒ダイナミクス



齋藤真器名

東北大学大学院理学研究科  
makina.saito.d6@tohoku.ac.jp



山口 毅

名古屋大学大学院工学研究科  
yamaguchi.tsuyoshi@material.  
nagoya-u.ac.jp



長尾道弘

Department of Materials  
Science and Engineering,  
University of Maryland  
mnagao@umd.edu

凝縮系中における原子・分子の並進運動は、拡散係数などの物質輸送特性はもちろん、系の粘弾性特性や破壊力学特性など様々なマクロ物性や機能の微視的起源となっている。したがって、物質特性や機能を制御する上で、微視的な構造や運動を理解することは必要不可欠である。

一口に原子・分子スケールの運動といってもその微視的描像の理解は困難である。測定対象中の運動の特徴的時間（または振動数）スケールは、例えばNMRや誘電緩和分光法などにより比較的広い時間（振動数）領域で決定することができる。しかし、これらの方法では通常どのようなサイズ（空間スケール）の運動が起きているのか直接知ることは難しい。

一方、サブnm程度の波長をもつ電子・中性子・X線などを用いた**散乱（回折）実験**を行うことで測定対象中の微視的な構造情報を得ることができる。さらに、**非弾性・準弾性散乱実験**を行うことで、対象中の定常的な微視的ダイナミクスの観測が可能となる。

右図に**既存の微視的ダイナミクス測定法**がカバーする時間・空間領域を示す。この図中には従来法では観測できない領域（破線で囲まれていない領域）がある。この事実、人類がいまだに身近にある物質中の運動の全貌、すなわち物質特性の微視的起源を知る実験的手段を有していないことを示している。

近年、放射光により生成された14 keVの単色メスバウアーガンマ線を用いて時間領域干渉計を構築することで、準弾性散乱実験が本格的に可能となってきた。通常の

干渉計はビーム経路を空間的に2方向に分岐するが、時間領域干渉計はガンマ線の経路を時間-空間方向に分岐し、再度経路を重ねあわせてガンマ線の干渉パターンを観測するユニークな干渉計である。時間領域干渉計を散乱実験に組み込むことで、同一の散乱経路を異なった時間に通過したガンマ線の干渉パターンを得ることが可能となり、散乱試料中の微視的構造の時間変化を干渉パターンの変化として精密に観測することができる。

右図に示すように、時間領域干渉計を用いることで、原子・分子レベルの空間スケールに対応する波数 $q$ 領域において、ナノ-マイクロ秒スケールの時間領域で準弾性散乱実験が可能となってきた。この時間・空間スケールでは、過冷却液体、ガラス、ソフトマターなど様々な系において原子・分子の運動が起こっているが、測定の困難さからその微視的描像はよく分かっていなかった。

これまで、時間領域干渉計により深く過冷却した液体、メソスケールの構造を有する高級アルコール、脂質膜などの様々な系において新しい微視的ダイナミクスの知見が得られ、それによる物質特性の微視的理解が可能となってきている。

さらに現在核モノクロ法とよばれるメスバウアーガンマ線を用いた新しい準弾性散乱測定法が開発されている。これらの新しい測定系と既存の測定系による相補的な研究によって、今後さらに広い時間・空間スケールにおけるダイナミクス測定が可能となり、様々なマクロ物性や機能の微視的起源が解明できると期待される。

## 用語解説

### 散乱（回折）実験：

本稿における散乱（回折）実験は、試料の微視的な構造情報を得るために、プローブ粒子を試料に照射し散乱強度の散乱角依存性を測定する実験である。散乱角は試料中で交換される運動量の大きさ $h\mathbf{q}$ に対応づけられ、散乱（回折）実験によって測定対象中の $\sim 2\pi/q$ の空間スケールの構造情報が得られる。ここで $h$ は換算プランク定数、 $q$ は波数の次元をもつ散乱ベクトルの大きさである。

### 非弾性・準弾性散乱実験：

散乱実験を行う際に、プローブ粒子の運動量の変化だけでなく振動数の変化 $\omega$ （またはそれと同等な量）を調べる実験である。大雑把に言えば測定対象中の $\sim 2\pi/\omega$ の時間スケールの運動の情報を得ることができる。

### 既存の微視的ダイナミクス測定法：

非弾性X線散乱、非弾性中性子散乱、中性子スピンエコー、X線光子相関法等の手法が広く微視的ダイナミクス測定に用いられている。それぞれの手法がカバーする時間・空間領域を下図に示す。これら既存の手法群がカバーする領域は破線で囲まれた領域である。

