

添付資料：

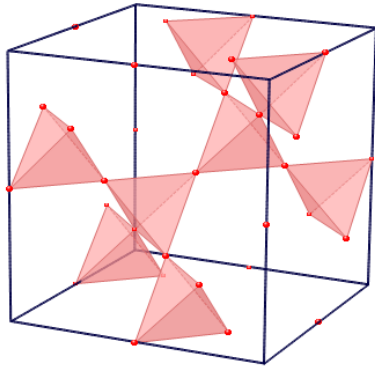


図1. パイロクロア構造。

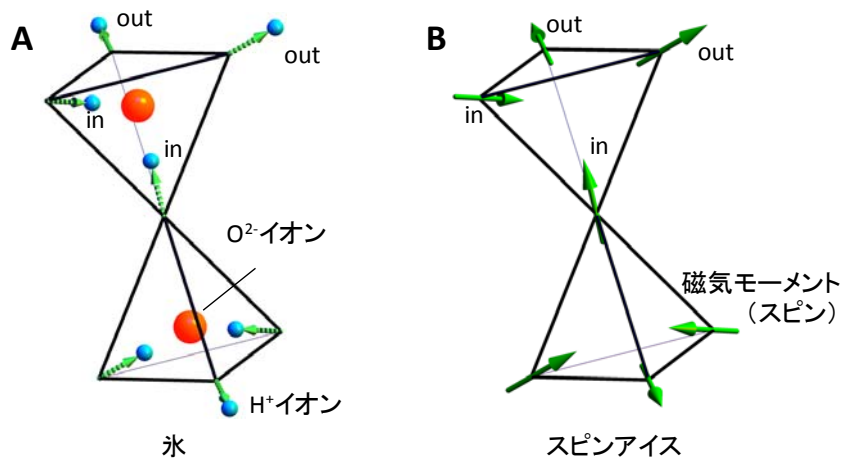


図2. (A) 氷 (アイス) と (B) スピンアイスの図。氷におけるプロトン変位とスピンアイスにおける磁気モーメントは1対1に対応しており、ともに2-in 2-outのアイスルールを満たす。

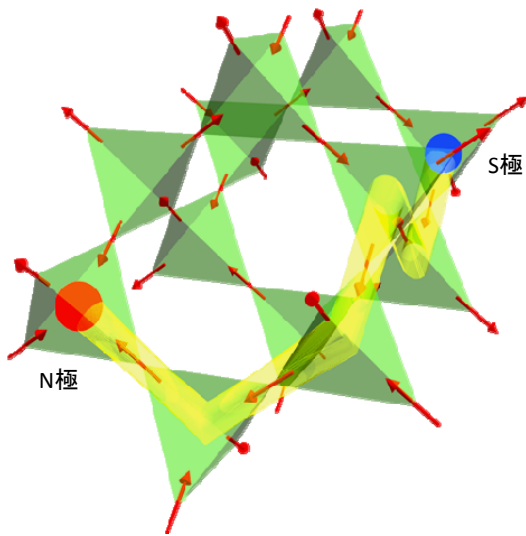


図3. スピンアイスにおける磁気モノポール。熱ゆらぎの効果によるスピンフリップによって生成されたモノポールペアが独立に運動し、磁気モノポールとして振る舞う。

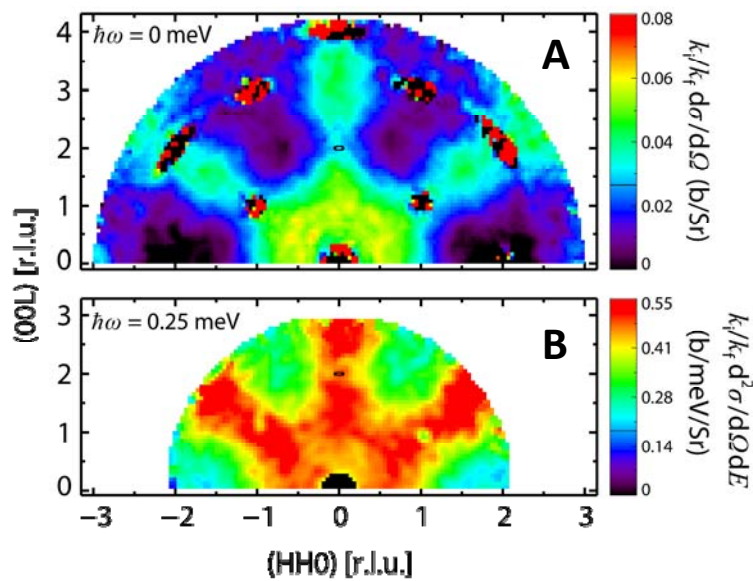


図4. 絶対零度近傍（約マイナス273度）における (A) 弾性中性子散乱および (B) 非弾性中性子散乱の波数空間強度マップ。弾性散乱マップの(002)や(111)で見られる特徴的パターンはピンチポイントと呼ばれており、 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ においてアイスルールが存在する証拠を与える。一方、非弾性散乱マップではピンチポイントが消失しており、励起状態においてアイスルールが破れ、磁気モノポールが出現していることを示している。こうした非弾性散乱成分は量子揺らぎを持たない従来型スピンアイスでは存在せず、 $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ が量子揺らぎを持つ新しいスピンアイスであることを直接的に示している。