

スピニアイス中の 疑似モノポール

固体電子物性セミナー

M1 永田真己

スピンアイス物質で面白いこと

①幾何学的フラストレーション



残留エントロピーの存在

②エネルギー励起



擬似的なモノポール

フラストレーション磁性体としての スピンアイス物質

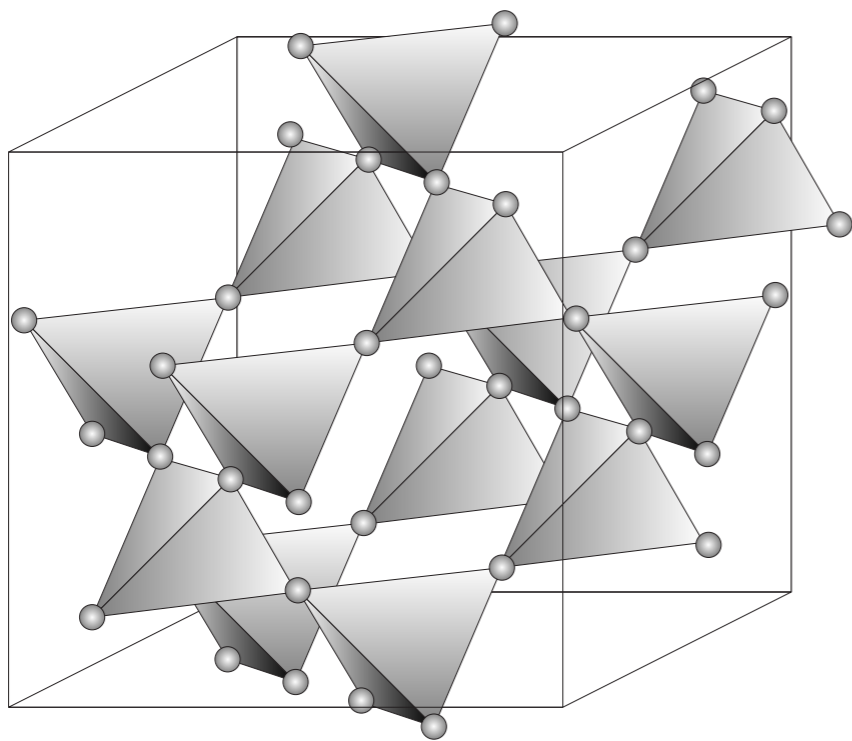
スピナイス物質とは何か？

ある温度領域、磁場領域でスピナイス相を実現する
パイロクロア結晶を持つ物質のこと

化学式はいずれも $A_2B_2O_7$

見つかっている物質： $Ho_2Ti_2O_7$, $Dy_2Ti_2O_7$

パイロクロア結晶構造とは

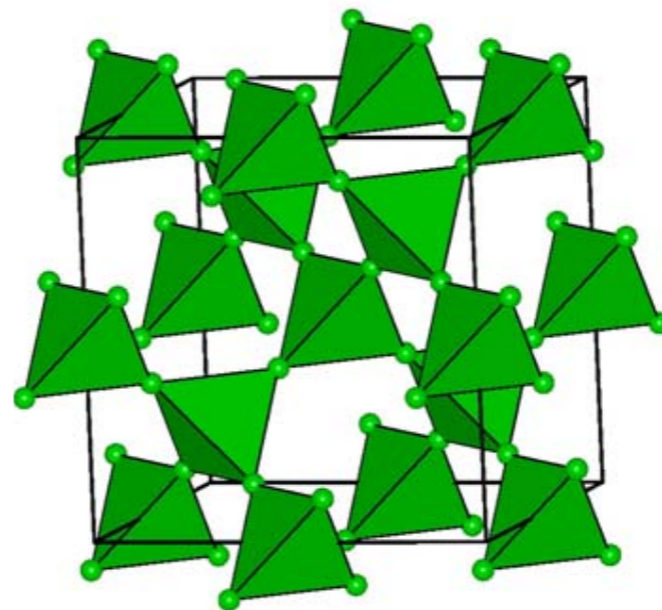


四面体が鎖状につながった構造

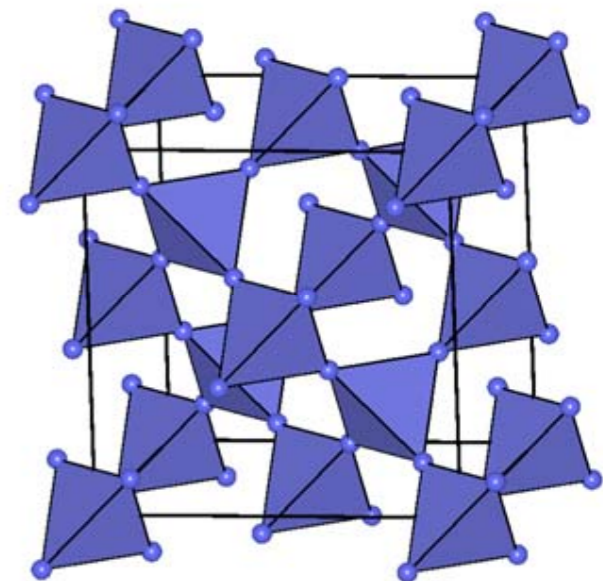
スピナイス物質では

A, Bともにパイロクロア結晶構造

A- Site

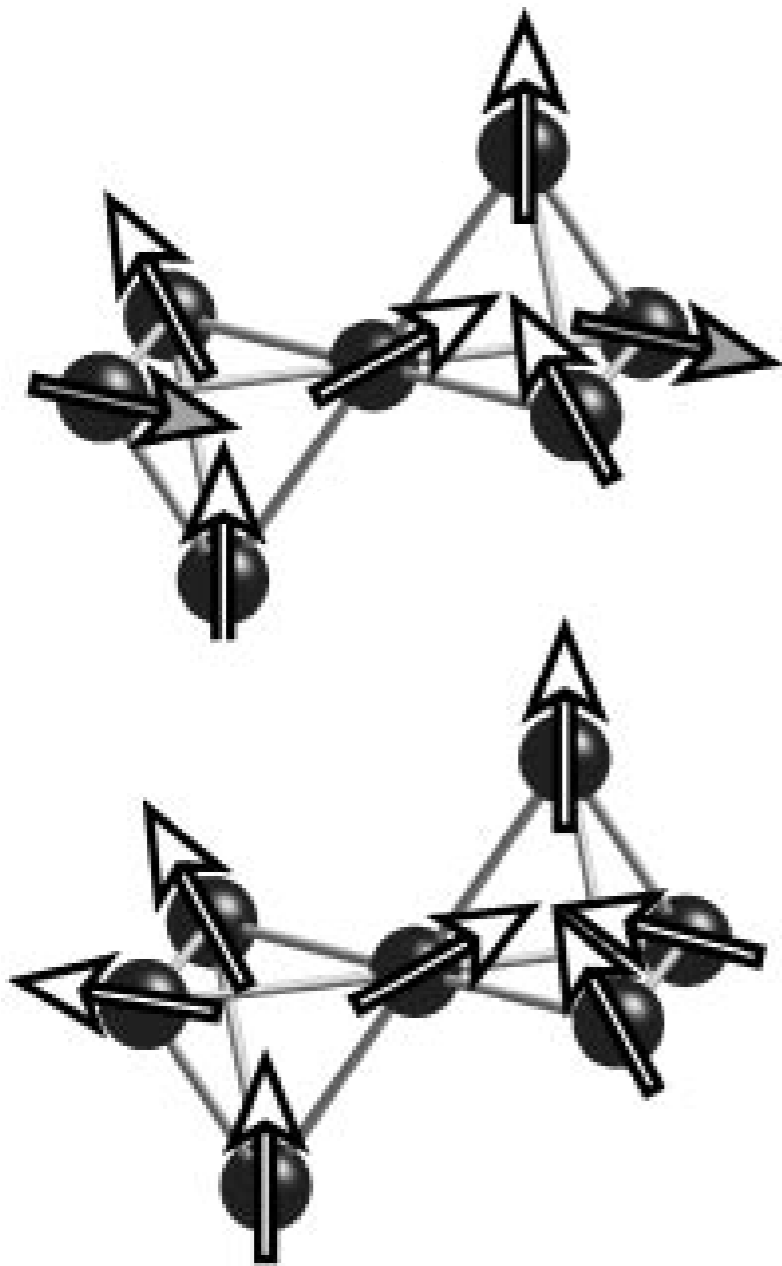


B- Site



結晶中でスピンのように振る舞うか？

Asiteのイオンが古典的なイジング模型のように振る舞う
($\text{Ho}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$)



●はAsiteのイオン ($\text{Ho}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$)

doubletの量子化方向は、
四面体の中心に向かう向き

Ho^{3+} は $|8, \pm 8\rangle$

Dy^{3+} は $|15/2, \pm 15/2\rangle$

のdoubletが基底状態で、
それぞれ最初の励起状態まで

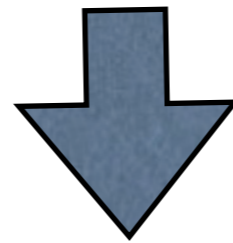
230K, 100K

結晶中でスピンのどのように振る舞うか？

スピン間相互作用
(最近接、ダイポール)

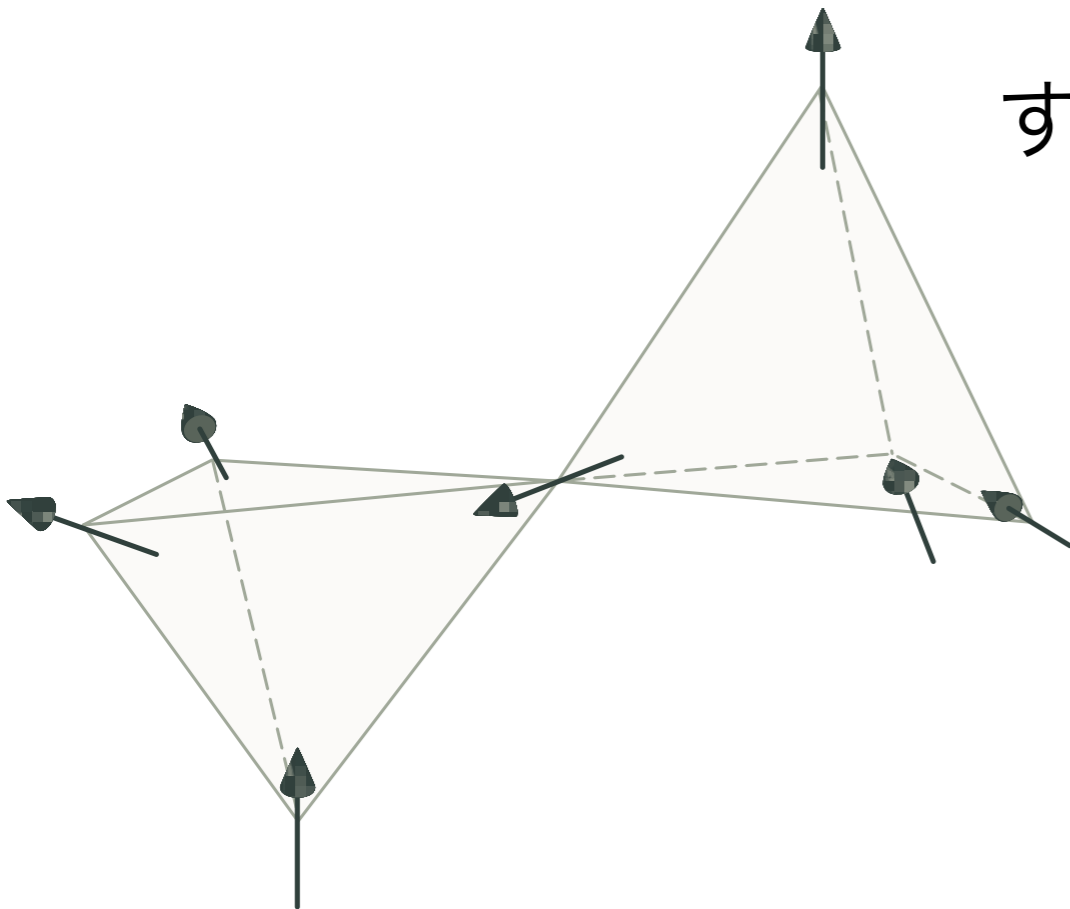
+

幾何的な構造

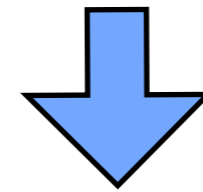


低温(50mK)まで長距離オーダーしない

基底状態(**two in two out**)が無数に存在



すべての四面体がtwo in two out を実現



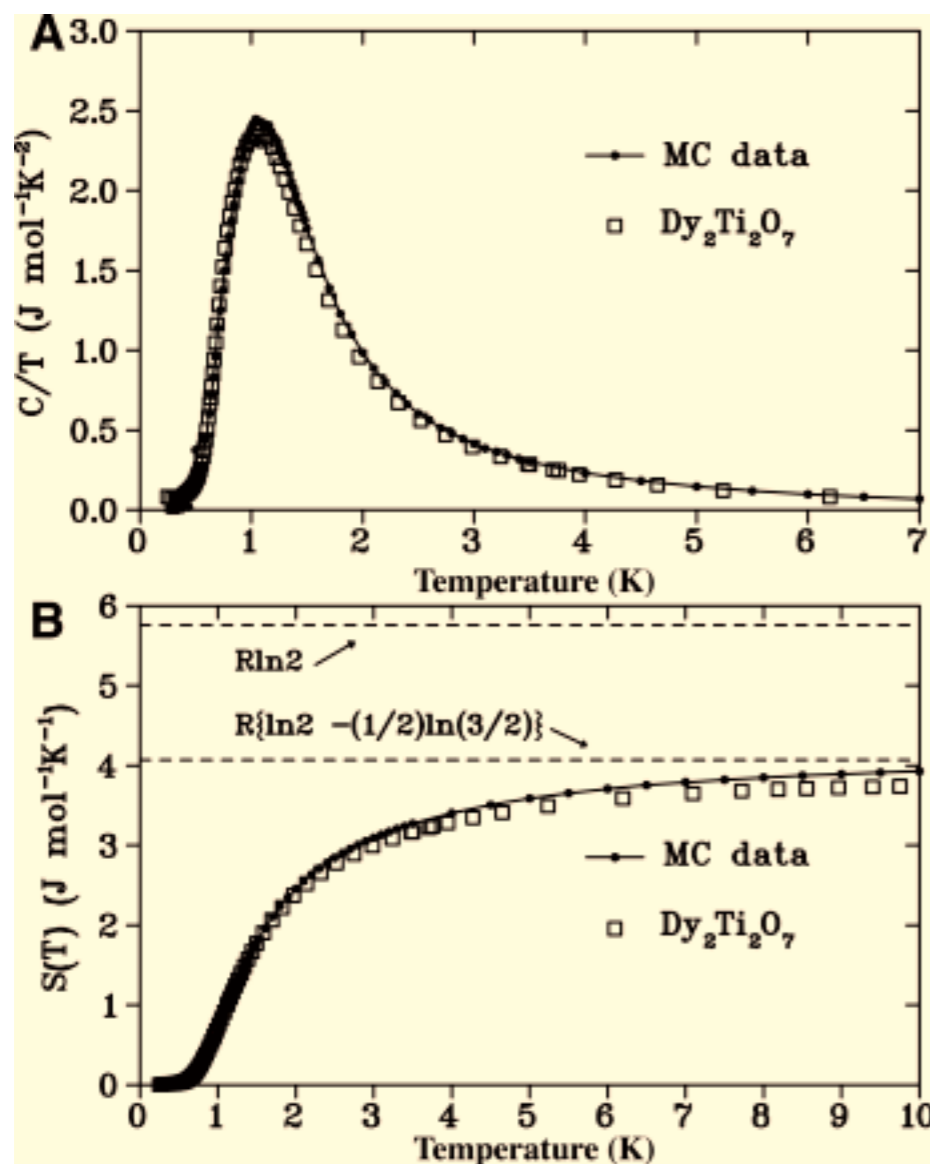
格子一つあたり残留エントロピー

$$\frac{1}{2} \ln \frac{3}{2} \quad (\text{L.Paulingにより計算})$$

残留エントロピーの実験的証拠

強磁場を縮退している系に印加
残留エントロピーを解放

$Dy_2Ti_2O_7$ の比熱とエントロピー



解放された残留エントロピー $\frac{1}{2} \ln \frac{3}{2}$

S.T.Bramwell Science **294**, 1495 (2001)

スピンアイス相とは何か

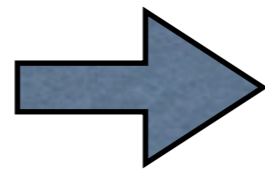
1. 基底状態はtwo in two out
2. 絶対零度でもオーダーせず
残留エントロピーが存在

このような磁気的な相のことを
スピンアイス相という

磁気モノポール系としてのスピンアイス

モノポールとは何か

PAM Diracが
初めて提唱

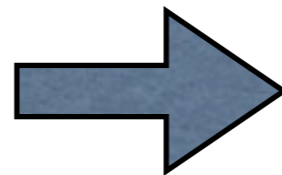


存在を仮定すると
必ず磁荷は量子化される

P.A.M.Dirac RSPA 0130(1931)
P.A.M.Dirac PR vol74,74(1948)

$$g = \frac{n\hbar c}{2e}$$

素粒子の大統一理論
(GUT)



モノポールの存在を要請
 $10^{16} GeV$ 程度の重さ

しかしスクイド、固体飛跡検出器等で観測する
試みは一度も成功していない

モノポールとは何か

C. Castelnovo, R. Moessner らによる提案

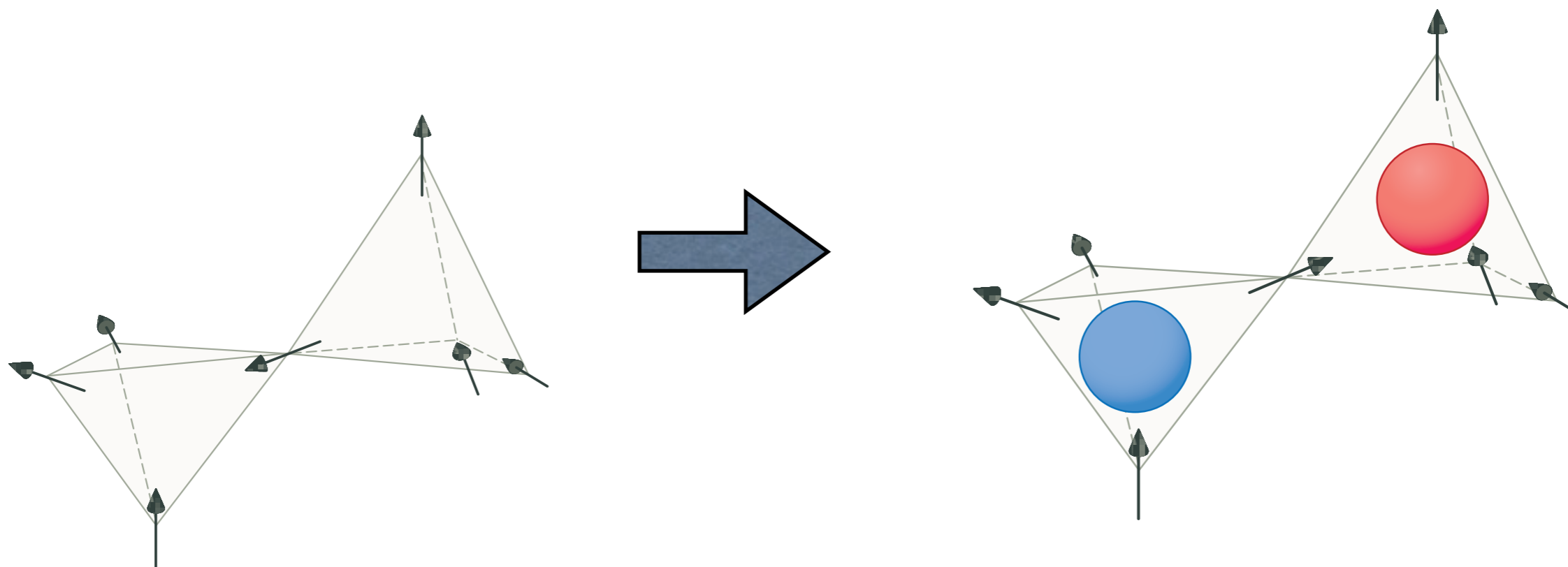
スピンアイス物質のエネルギー励起を
モノポール生成のアナロジーで理解できる

C.Castelnovo et al.
nature 451(2008)

スピンアイス物質を調べることで
モノポールの性質を調べることができる

なぜモノポールができるか直感的理解

1 : two in two out状態ですピンの反転

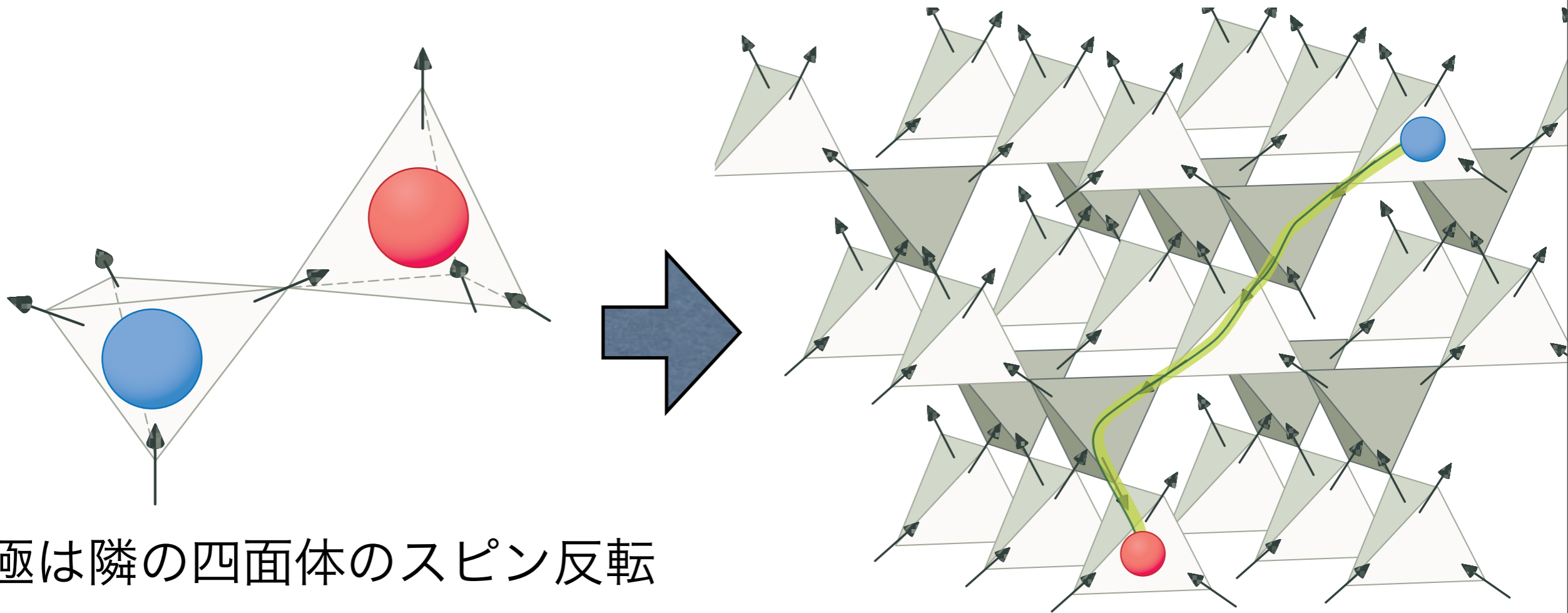


必要なエネルギーは4K程度

四面体の中心に隣り合った異なる
符号の磁石の極

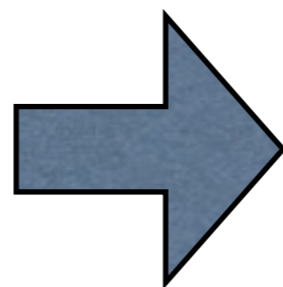
なぜモノポールができるか直感的理解

2：生成された極の自由な移動



磁極は隣の四面体のスピン反転
を利用して自由に移動
(必要なエネルギーは0)

結晶中を自由に
移動する磁極



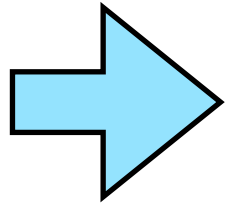
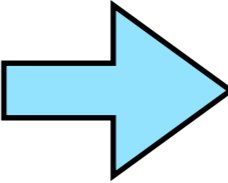
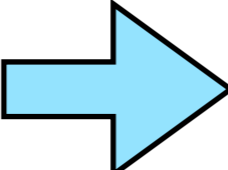
モノポール

どのような粒子をモノポールと言えるか

モノポールが満たすべき条件

- 1.モノポール同士がクーロン相互作用すること
(一番重要な特徴)
- 2.モノポールが空間を自由に移動すること
- 3.単独で存在しうること

スピンアイス中の疑似モノポールの性質

- 1.満たす  このセクションのメイン
- 2.だいたい満たす  サンプルサイズ、移動のエネルギー
- 3.満たさない  対でしか作れない

モノポール同士がクーロン相互作用すること

スピン間のダイポール相互作用

$$H = \frac{J}{3} \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j + D a^3 \sum_{(ij)} \left[\frac{\hat{e}_i \cdot \hat{e}_j}{|r_{ij}|^3} - \frac{3(\hat{e}_i \cdot r_{ij})(\hat{e}_j \cdot r_{ij})}{|r_{ij}|^5} \right] S_i S_j$$

希土類イオンはダイポール相互作用が大きい

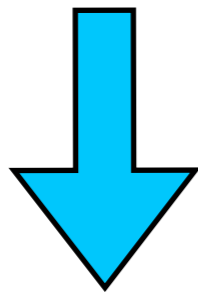
	Ho ₂ Ti ₂ O ₇	Dy ₂ Ti ₂ O ₇
J	-1.24K	-0.52K
D	2.35K	2.35K

最近接は強磁性的
ダイポールは反強磁性的

モノポール同士がクーロン相互作用すること

スピン間のダイポール相互作用

$$H = \frac{J}{3} \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j + Da^3 \sum_{(ij)} \left[\frac{\hat{e}_i \cdot \hat{e}_j}{|r_{ij}|^3} - \frac{3(\hat{e}_i \cdot r_{ij})(\hat{e}_j \cdot r_{ij})}{|r_{ij}|^5} \right] S_i S_j$$



dumbbell model

C.Castelnuovo et al.nature 451(2008)

モノポール間のクーロン相互作用が直接でる

μ_0 が自然に導出される

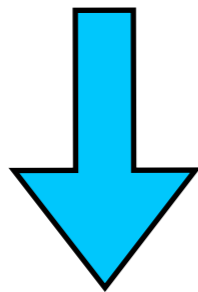
$$H = \sum_{\alpha, \beta} V(r_{\alpha\beta})$$

$$V(r_{\alpha\beta}) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q_\alpha Q_\beta}{r_{\alpha\beta}} & \alpha \neq \beta \\ \frac{1}{2} v_0 Q_\alpha^2 & \alpha = \beta \end{cases}$$

モノポール同士がクーロン相互作用すること

スピン間のダイポール相互作用

$$H = \frac{J}{3} \sum_{\langle ij \rangle} S_i S_j + D a^3 \sum_{(ij)} \left[\frac{\hat{e}_i \cdot \hat{e}_j}{|r_{ij}|^3} - \frac{3(\hat{e}_i \cdot r_{ij})(\hat{e}_j \cdot r_{ij})}{|r_{ij}|^5} \right] S_i S_j$$



dumbbell model

C.Castelnuovo et al.nature 451(2008)

モノポール間のクーロン相互作用が直接でる

$$H = \sum_{\alpha, \beta} V(r_{\alpha\beta})$$
$$V(r_{\alpha\beta}) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q_\alpha Q_\beta}{r_{\alpha\beta}} & \alpha \neq \beta \\ \frac{1}{2} v_0 Q_\alpha^2 & \alpha = \beta \end{cases}$$

クーロン相互作用は
ダイポール相互作用の
結果として生じる

モノポールの存在を言うために

スピンアイス相がモノポール系を実現していることを言うには
以下の二つのことを言わなければならない

スピン間のダイポール相互作用の存在

モノポール間のクーロン相互作用の存在

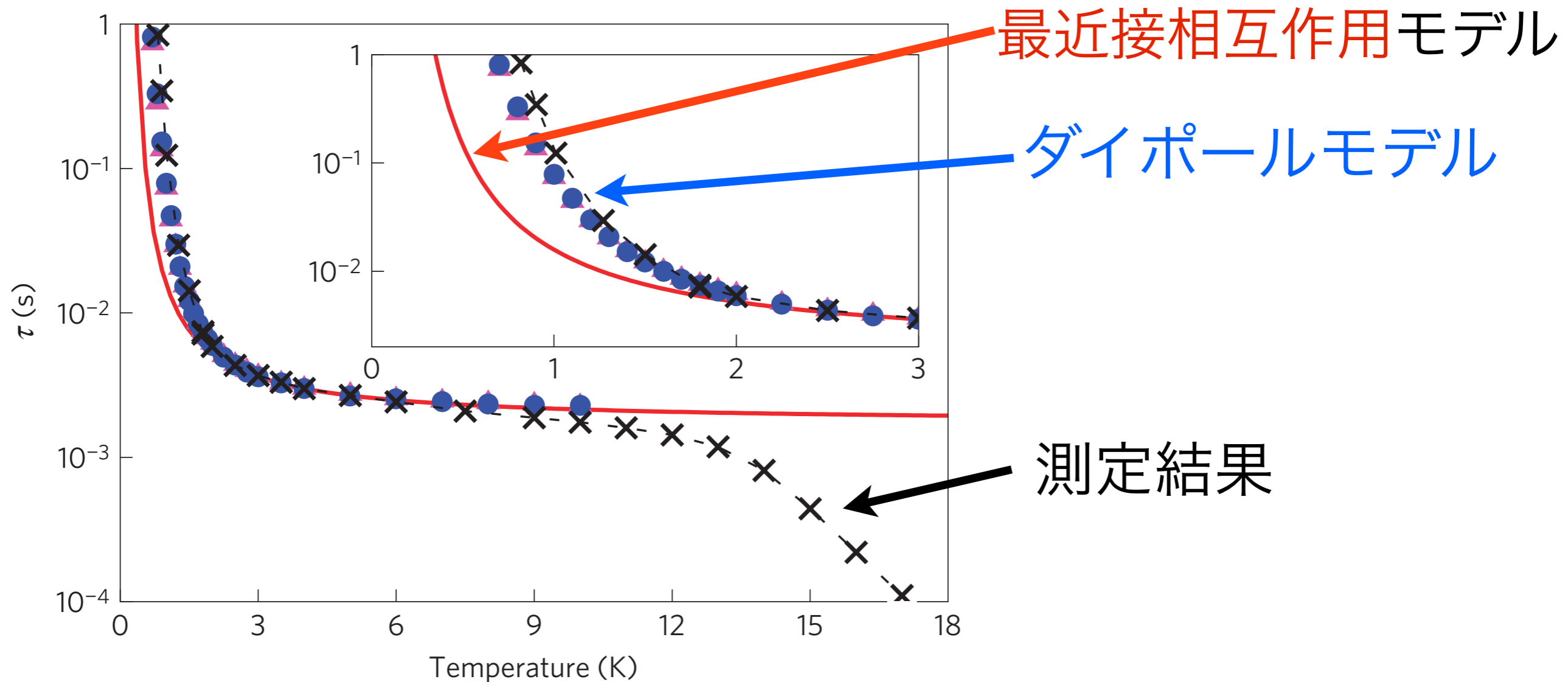
magnetic Coulomb Phaseの存在

モノポールがクーロン相互作用

しつつ自由に動く相のこと

緩和時間測定

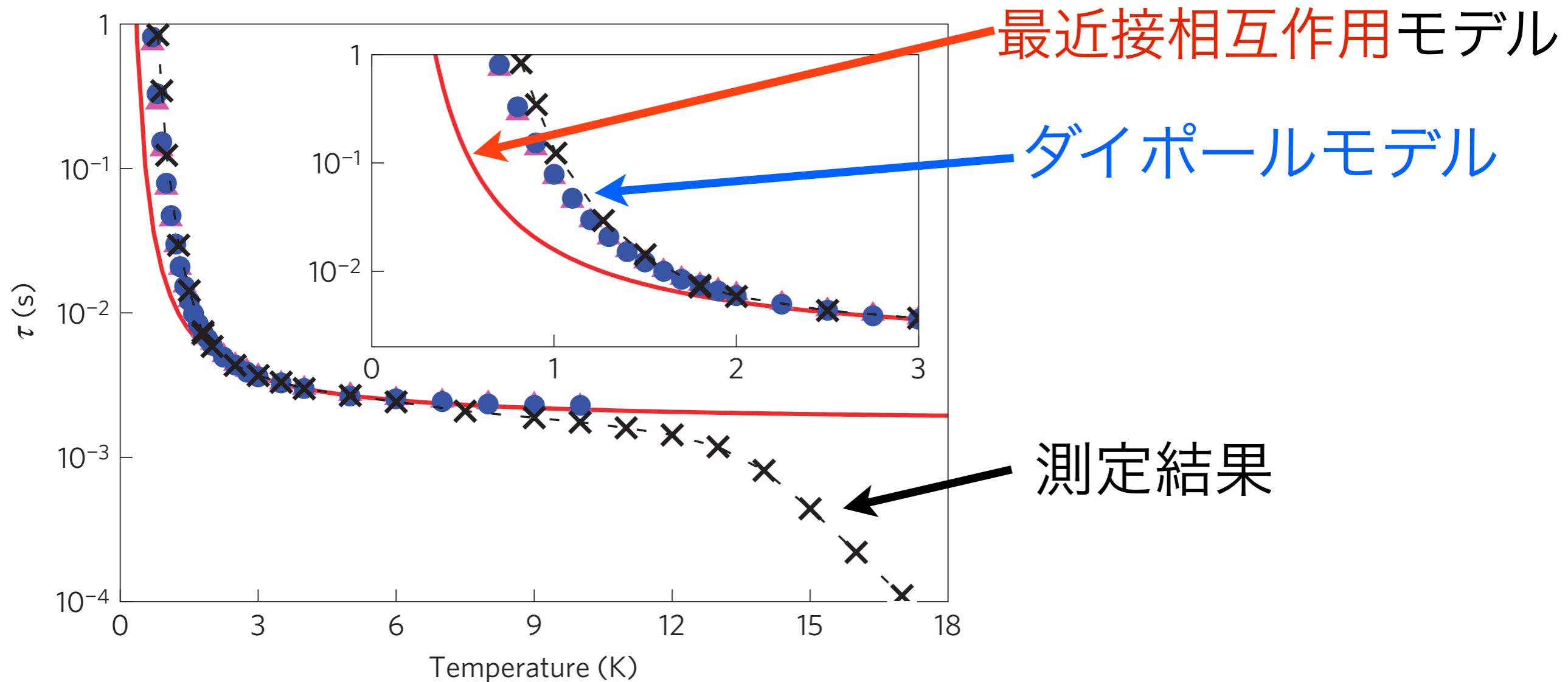
緩和時間からみるモノポールの存在



Dy₂Ti₂O₇のスピンスピン緩和時間
の温度依存性

J.C.D.Jaubert et al. nature phys (2009)

緩和時間からみるモノポールの存在



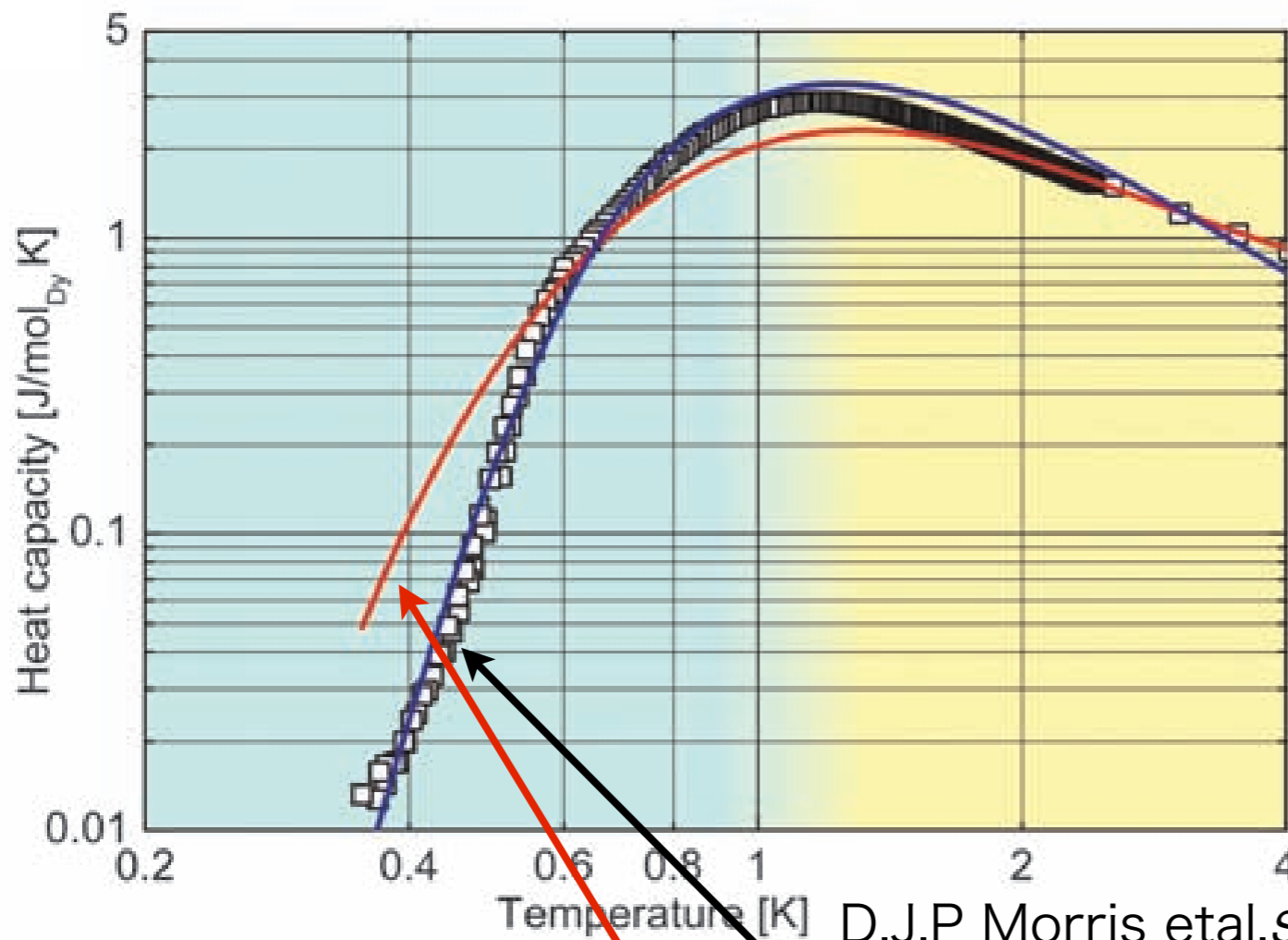
J.C.D.Jaubert et al. nature phys (2009)

ダイポール相互作用が存在

比熱測定

比熱測定からみるモノポールの存在

Dy₂Ti₂O₇の比熱測定結果



モノポールがクーロン相互作用するモデル
(クーロンガスのようなモデル)

最近接相互作用のみ考えたモデル

中性子散乱

中性子散乱からみるモノポールの存在

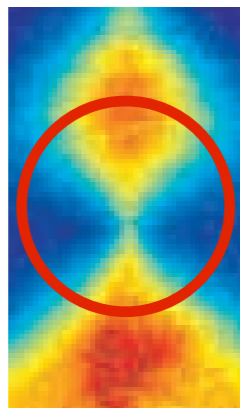
スピニアイス物質が
magnetic Coulomb
Phaseだった場合



スピンの相関距離は
スピン同士の距離のべきで落ちる
(密度の高いクーロンガスの場合、expで落ちる)

pinch point Intensityとして
中性子散乱の結果に現れる

例

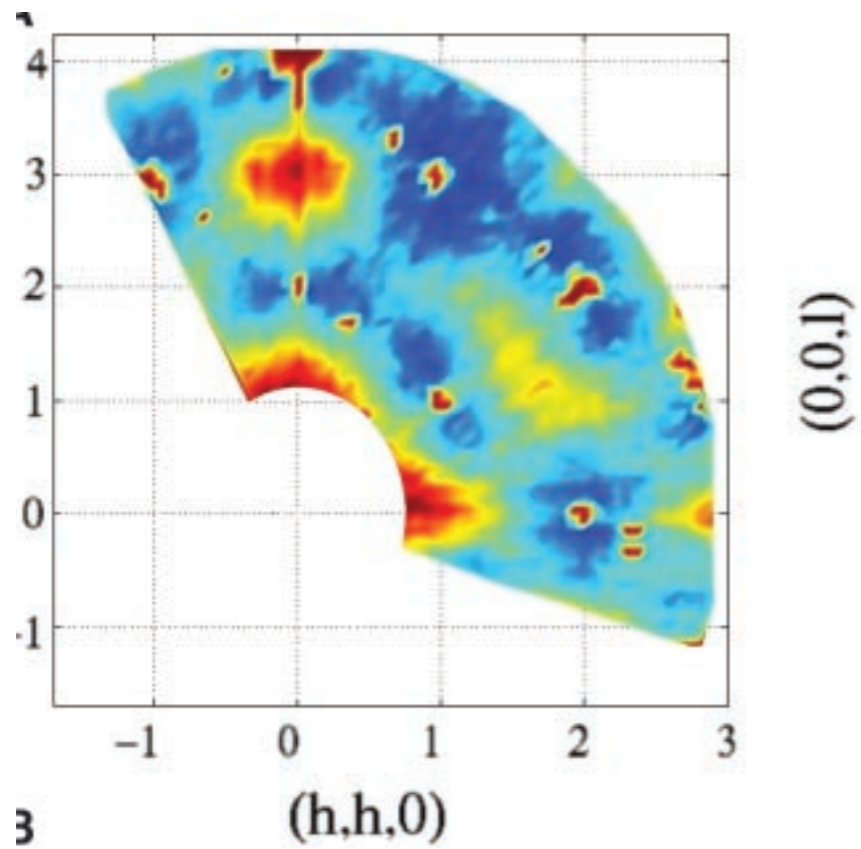


← pinch point

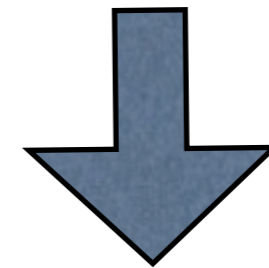
Intensity map

pinch point Intensityはその相が
magnetic Coulomb phase
であることの結果

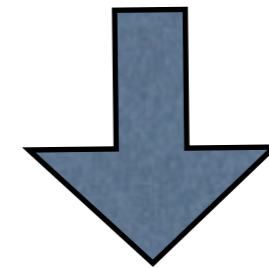
中性子散乱からみるモノポールの存在



過去のデータでは、pinch pointを
観測することはできなかった



中性子がどのスピンと相互作用する
か考えてなかったから

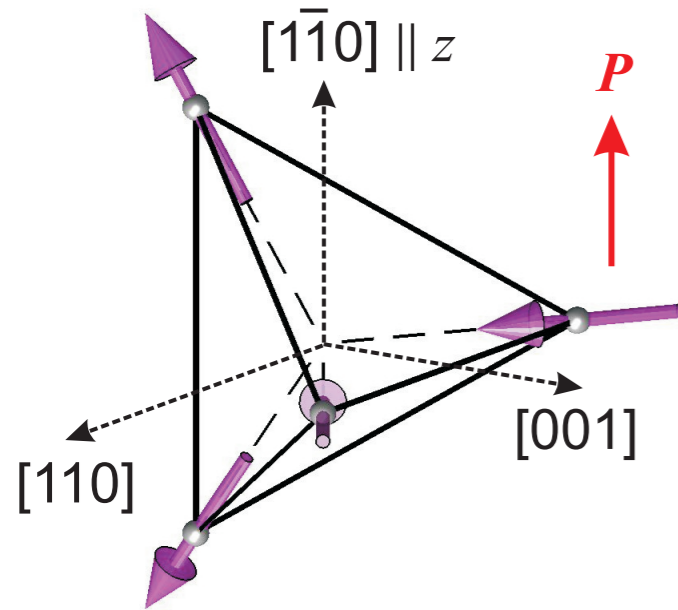


中性子のスピンの向きを制限して
サンプルに入射する

S.T.Bramwell Science **294**, 1495 (2001)

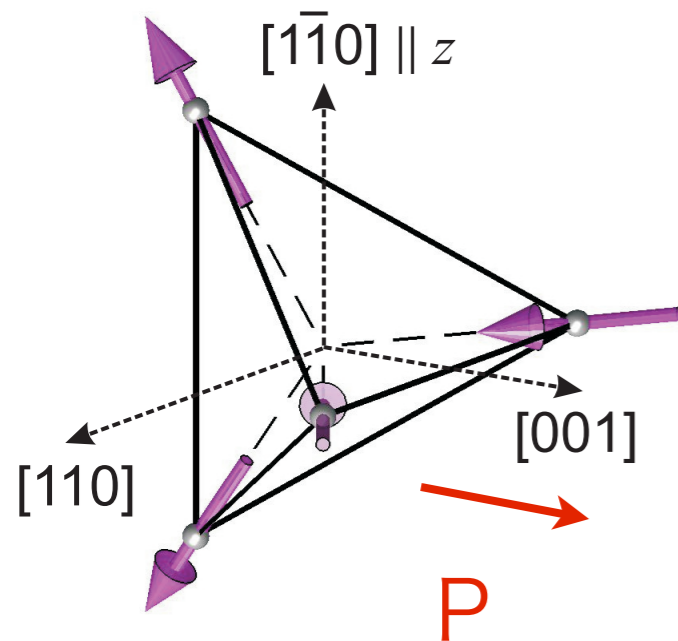
T=50mK付近の
中性子散乱の結果

中性子散乱からみるモノポールの存在



左図のようにスピンの向きが制限されていた場合
(non spin flipという)

相互作用するスピンは
4つの内、2つだけなので
すべてのスピンの状況を反映できない

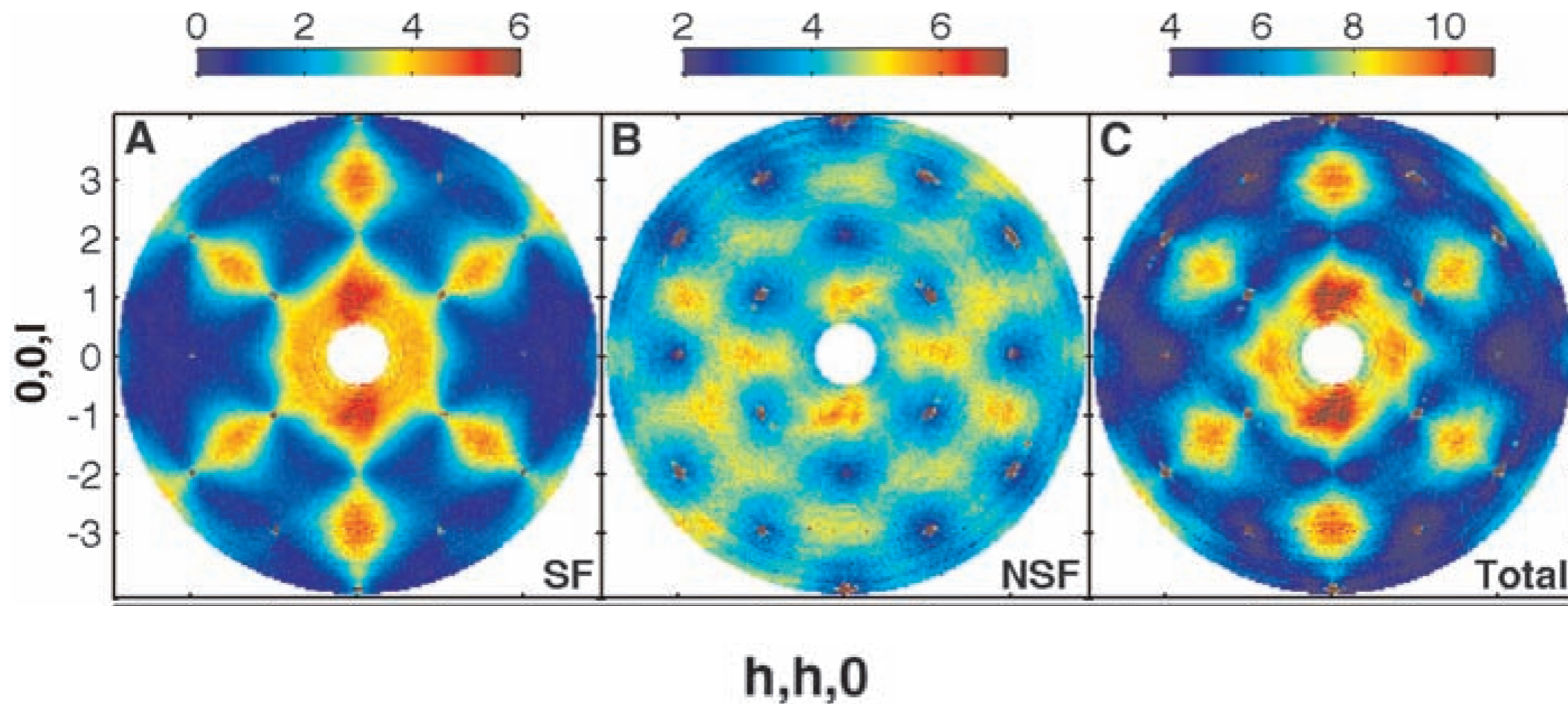


左図のようにスピンの向きが制限されていた場合
(spin flipという)

すべてのスピンと相互作用するので
スピンの状況を全体的に反映できる

中性子散乱からみるモノポールの存在

中性子のスピンの向きで分けて測定

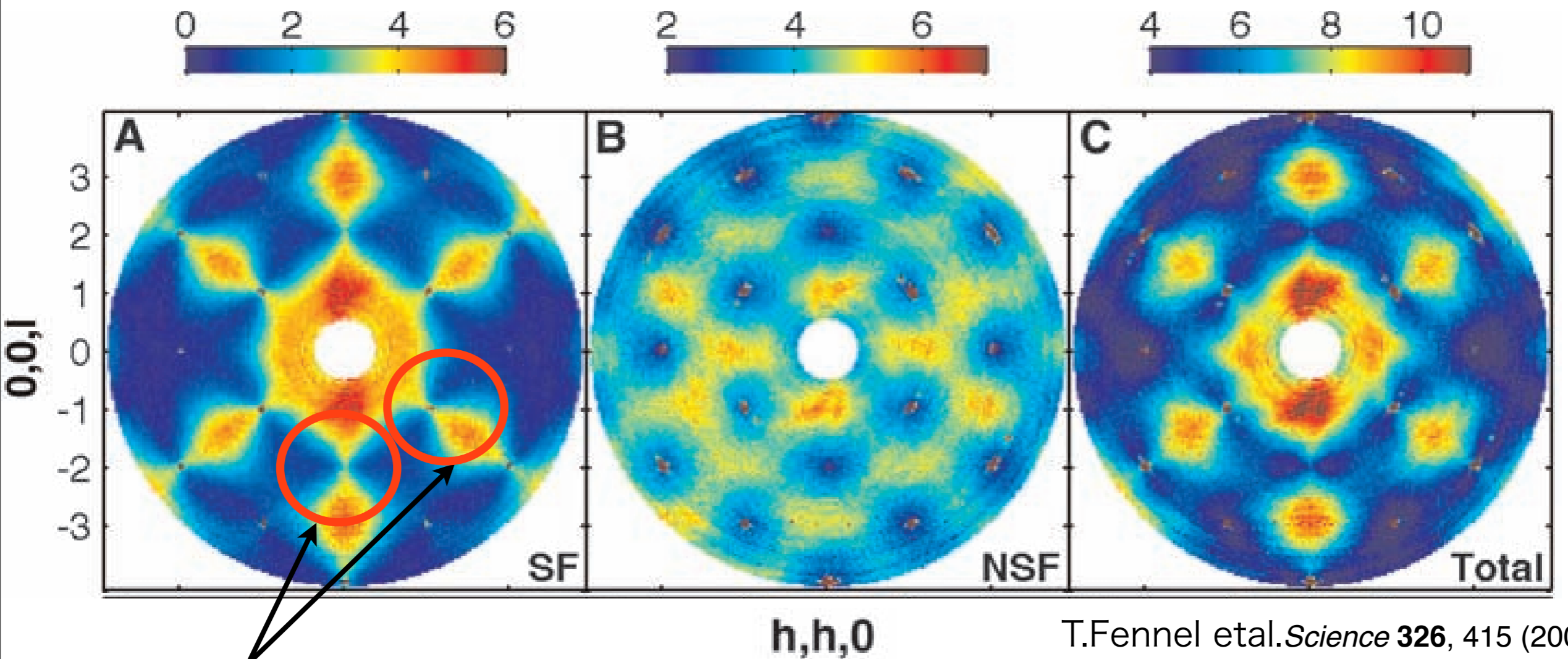


$\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の1.7Kにおける

中性子散乱の結果

T.Fennel et al. *Science* **326**, 415 (2009)

中性子散乱からみるモノポールの存在

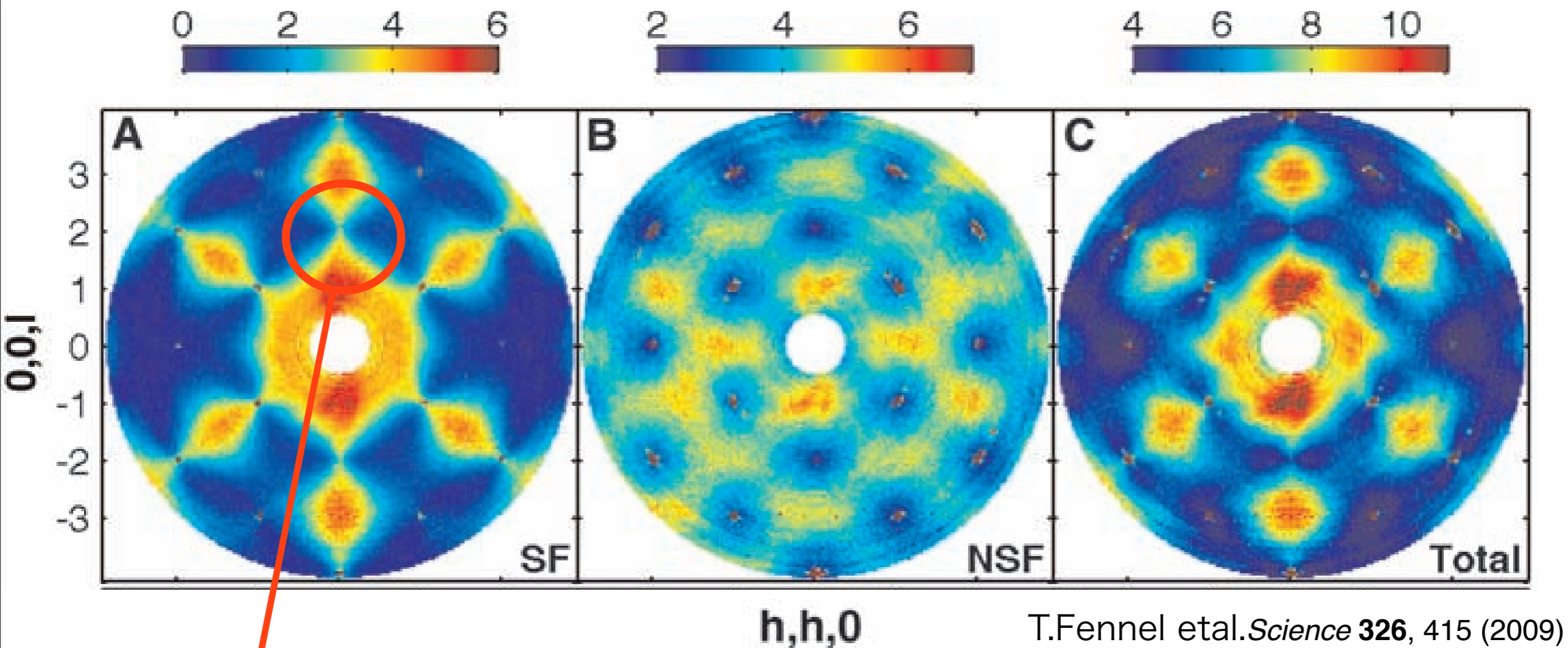


pinch pointを観測

➔ magnetic Coulomb Phase

モノポールというアナロジーが正しいという強い証拠

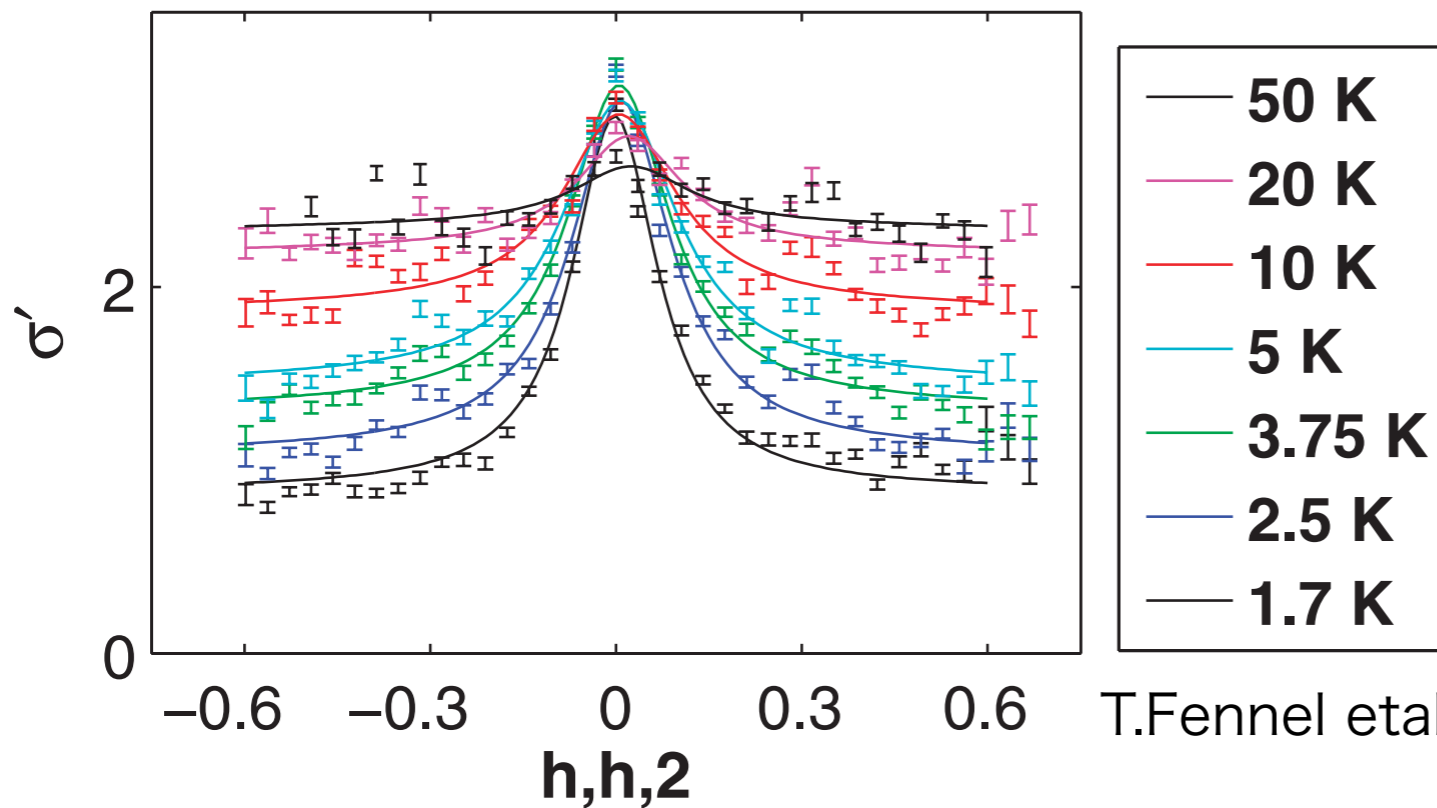
中性子散乱からみるモノポールの存在



pinch point 付近のIntensityを調べることで
スピン同士の間隔距離を調べられる

中性子散乱からみるモノポールの存在

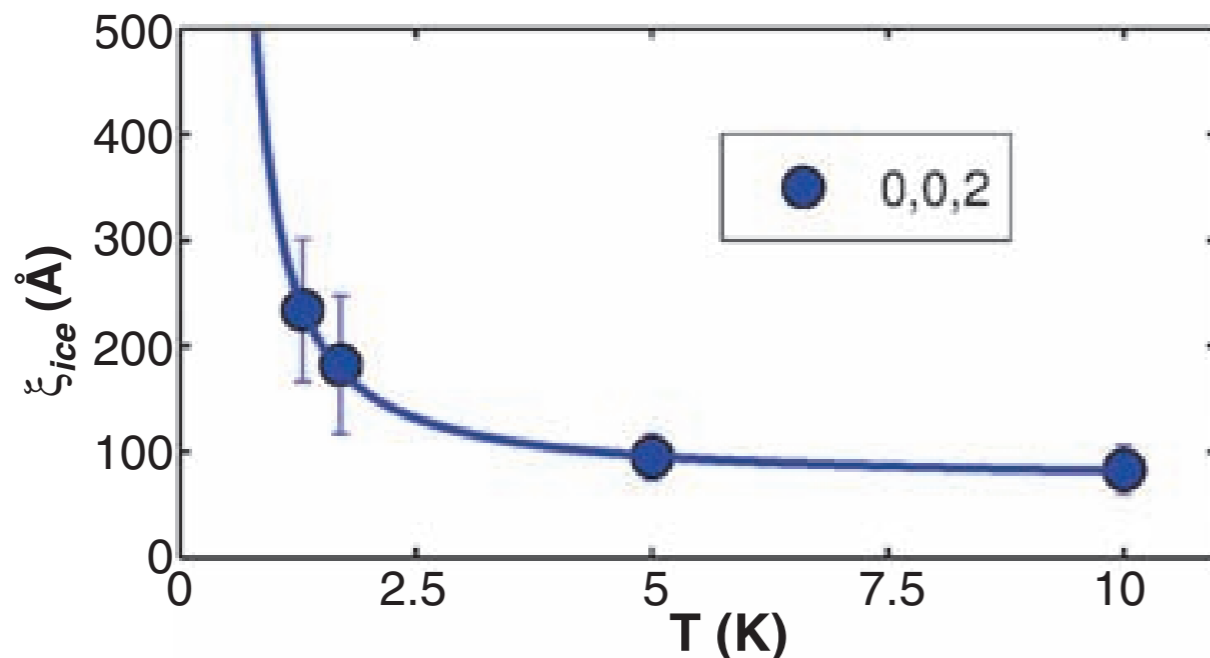
(0,0,2)付近のIntensity の温度変化



T.Fennel et al. *Science* **326**, 415 (2009)

スピン相関距離

スピン相関距離はおおよそモノポール同士の距離と見なすことができる



T.Fennel et al. *Science* **326**, 415 (2009)

モノポール間の距離が温度におおきく依存することがわかる