

JSPS組織的な若手研究者等海外派遣プログラム  
による海外渡航の成果報告

工学系研究科物理工学専攻  
特任講師 望月維人

滞在機関：ドイツ ケルン大学

滞在期間：平成24年1月17日-平成24年3月17日

2012年5月25日(金)

# ケルン大学物理学科



Achim Rosch



Markus Braden



Daniel Khomskii



私生活：アパート



自炊(滞在5日目)



自炊(1ヶ月後)

# 渡航先選定の理由:なぜケルン大学か？



Achim Rosch

- ・強相関電子系、臨界現象、冷却原子気体、トポロジカル絶縁体の理論
- ・最近では**スキルミオン**の理論研究の第一人者
- ・C.Pfleiderer(中性子散乱実験)と組んで怒涛のように成果を挙げている  
2009年以降、Science誌 2、Nature誌 2、NaturePhysics誌 1、PRL誌1 他



Markus Braden

- ・中性子散乱実験
- ・最近では**磁性強誘電体(マルチフェロイクス)**の研究で大きな成果
- ・ $\text{TbMnO}_3$ の**エレクトロマグノン**の励起モードの研究

Magnetic Excitations in **Multiferroic**  $\text{TbMnO}_3$ : Evidence for a Hybridized Soft Mode  
D. Senff, M. Braden, et al., PRL 98, 137206 (2007) など。



Daniel Khomskii

- ・強相関電子系物質における軌道自由度の理論研究の先駆者  
(Kugel-Khomskii模型を提唱)
- ・最近では**マルチフェロイクス**の理論研究の第一人者の一人
- ・秀逸なレビュー論文 J. Magn. Magn. Mater. (2006), Physics (2009) 他



私(望月維人)

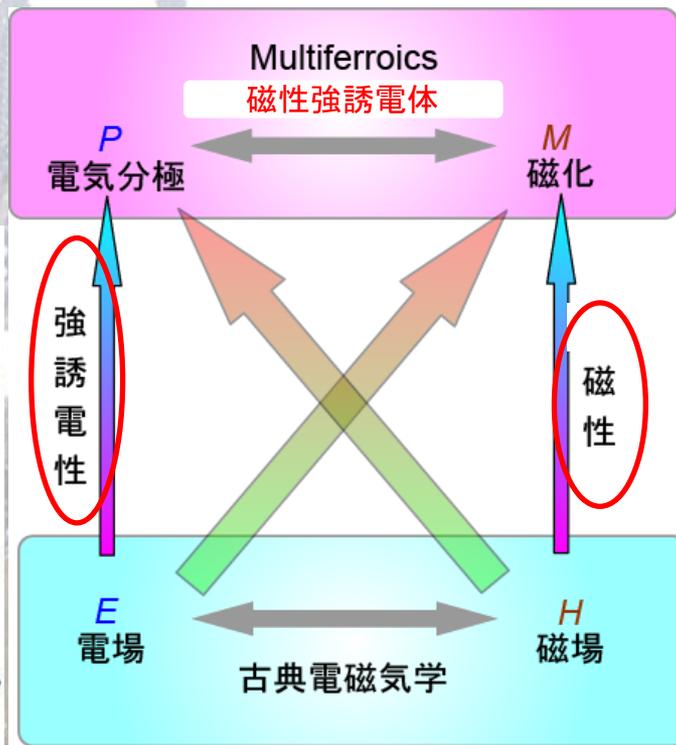
- ・2009年からマルチフェロイクスの交差相関現象やエレクトロマグノン励起の理論研究に取り組んでいる。
- ・昨年からスキルミオンの理論研究にも取り組んでいる。



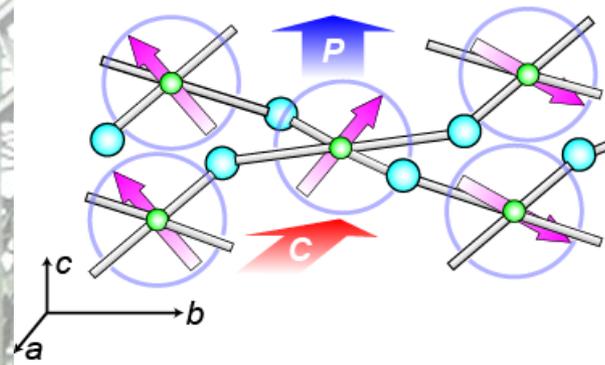


・2009年からマルチフェロイクスの交差相関現象  
やエレクトロマグノン励起の理論理論研究に取り組んでいる。

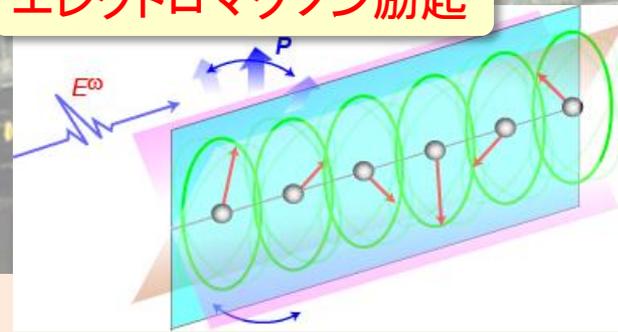
### マルチフェロイクスとは？



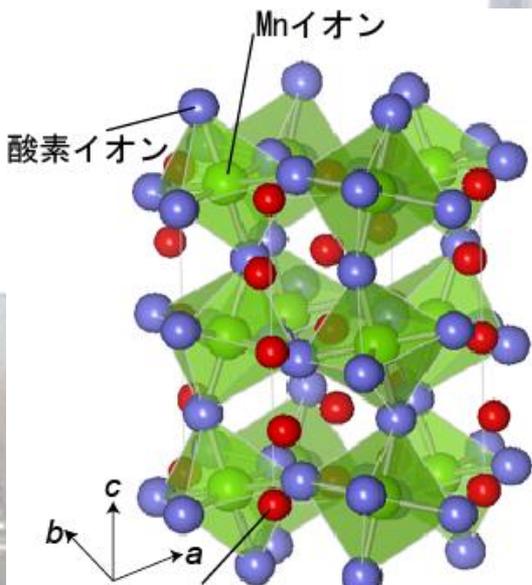
### スパイラル磁性強誘電体



### エレクトロマグノン励起



磁場による電気分極の制御  
電場によるスピンの制御が可能！



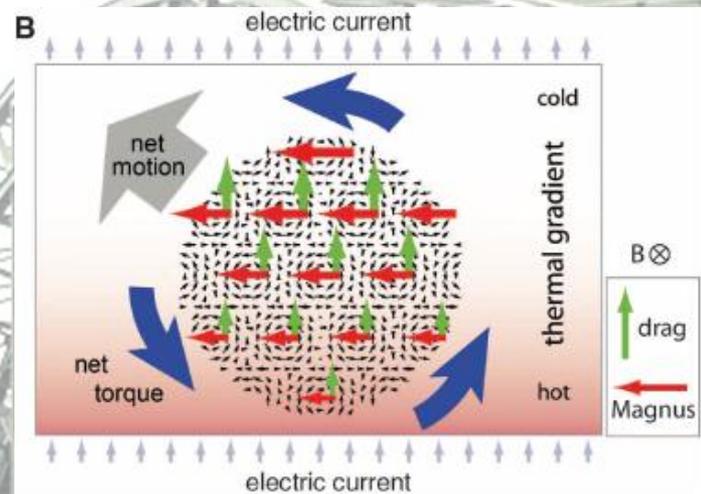
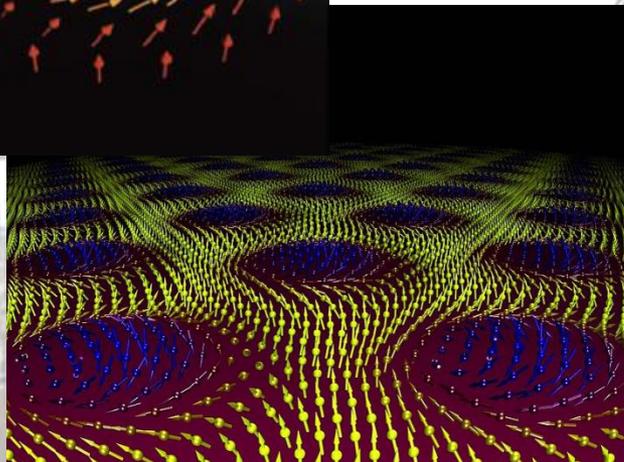
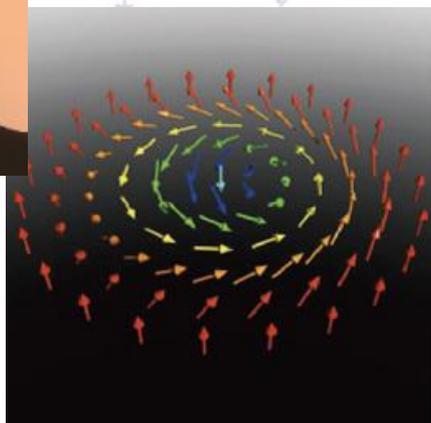
希土類イオン (Tbなど)

ペロフスカイト型Mn酸化物



・昨年から**スキルミオン**の理論研究にも取り組んでいる。

スキルミオンとは？



Jonietz, Pfleiderer, Rosch et al., Science (2010)

- ・小さいサイズ (10~100 nm)
- ・高い動作温度 (室温)
- ・低い閾値外場 ( $j=1 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>)

高密度データストレージデバイス  
への応用 (Skyrmionics)

理論はRoschグループと永長グループ(物工)が、  
実験はPfleidererグループ(Munche)と十倉グループ(物工)が世界を牽引している。

# 2009年からの論文リスト #1

PRL 10編 (筆頭著者5), PRB 2編(2), JSPS 2編(1), 解説記事2編(2), その他1編(1)

[1]`Spin-Wave Modes and Their Intense Excitation Effects in **Skyrmion** Crystals"  
**M. Mochizuki**, Phys. Rev. Lett. 108, 017601 (2012).

[2]`Origin of the Large Polarization in **Multiferroic**  $\text{YMnO}_3$  Thin Films Revealed by ..."  
H. Wadati, **M. Mochizuki**, et al., Phys. Rev. Lett. 108, 047203 (2012).

[3]`Hall Effect of Spin-Chirality Origin in a Triangular-Lattice Helimagnet  $\text{Fe}_{1.3}\text{Sb}$   
Y. Shiomi, **M. Mochizuki**, Y. Kaneko, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. 108, 056601 (2012).

[4]`Theory of spin-phonon coupling in **multiferroic** manganese perovskites  $\text{RMnO}_3$ "  
**M. Mochizuki**, N. Furukawa and N. Nagaosa, Phys. Rev. B 84, 144409-1-144409-14 (2011).

[5]`Magnetic Field Induced Dehybridization of the **Electromagnons** in **Multiferroic**  $\text{TbMnO}_3$ "  
P. Rovillain, **M. Mochizuki**, et al, Phys. Rev. Lett. 107, 027202-1-027202-4 (2011).

[6]`**マルチフェロイクス**における**エレクトロマグノン**励起"  
**望月維人**, 古川信夫, 永長直人, 日本物理学会誌第66巻第4号(2011年4月号) pp. 280-284.

[7]`**マルチフェロイック**希土類Mnペロフスカイトにおける電気磁気現象の理論"  
**望月維人**, 古川信夫, 永長直人, 固体物理 46, 55-73 (2011年2月号「解説」).

[8]`Numerical Simulation of Spin-Chirality Switching via Intense **Electromagnon** Excitations"  
**M. Mochizuki**, and N. Nagaosa, J. Phys.: Conf. Sers. 320, 012082-1-012082-6 (2011).

## 2009年からの論文リスト #2

[9] "Theory of Magnetic Switching of Ferroelectricity in Spiral Magnets"

**M. Mochizuki** and N. Furukawa, Phys. Rev. Lett. 105, 187601-1-187601-4 (2010).

[10] "Theoretically Predicted Picosecond Optical Switching of Spin Chirality in **Multiferroics**"

**M. Mochizuki** and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 105, 147202-1-147202-4 (2010).

[11] "Spin Model of Magnetostrictions in **Multiferroic** Mn Perovskites"

**M. Mochizuki**, N. Furukawa and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 105, 037205-1-037205-4 (2010).

[12] "Theory of **Electromagnons** in the **Multiferroic** Mn Perovskites: The Vital Role of Higher Harmonic Components of the Spiral Spin Order"

**M. Mochizuki**, N. Furukawa and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 104, 177206-1-177206-4 (2010).

[13] "Roles of Bond Alternation in Magnetic Phase Diagram of  $RMnO_3$ "

N. Furukawa and **M. Mochizuki**, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 033708-1-033708-4 (2010).

[14] "Novel **Multiferroic** State of  $Eu_{1-x}Y_xMnO_3$  in High Magnetic Fields"

M. Tokunaga, Y. Yamasaki, Y. Onose, **M. Mochizuki**, N. Furukawa and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. 103, 187202-1-187202-4 (2009).

[15] "Microscopic Model and Phase Diagrams of the **Multiferroic** Perovskite Manganites"

**M. Mochizuki** and N. Furukawa, Phys. Rev. B 80, 134416-1-134416-22 (2009).

[16] "Mechanism of Lattice-Distortion-Induced Electric-Polarization Flop in **Multiferroic** Perovskite Manganites"

**M. Mochizuki** and N. Furukawa, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 053704-1-053704-4 (2009).

[17] "Dynamics of **Multiferroic** Domain Wall in Spin-Cycloidal Ferroelectric  $DyMnO_3$ "

F. Kagawa, **M. Mochizuki**, et al., Phys. Rev. Lett. 102, 057604-1-057604-4 (2009).

# 目標

1. 研究成果の宣伝と人脈の形成
2. 自分が持っているスキルやこれまでの研究を発展させる形で共同研究を行う
3. まったく新しいテーマの共同研究を行う種を蒔いてくる

# 成果

## 共同研究

1. A. Rosch教授: スキルミオン結晶相のマイクロ波吸収非相反方向二色性
2. M. Braden教授: マルチフェロイック $TbMnO_3$ におけるカイラルマグノン励起
3. Lars Fritz博士: カイラル磁性体スピン模型の相図

## 招待セミナー講演

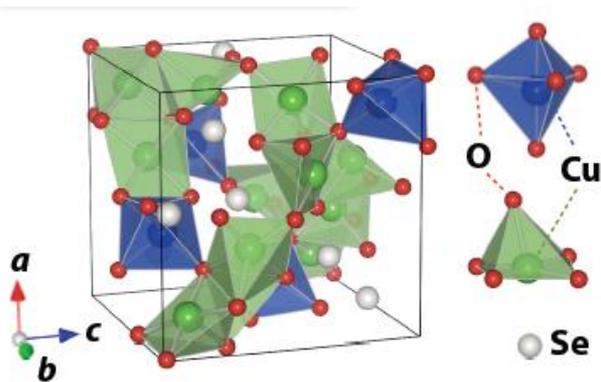
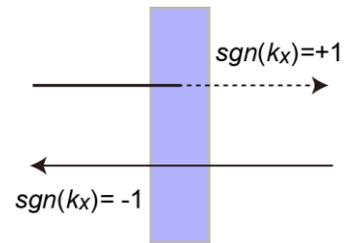
- ・ ケルン大学
- ・ ドレスデンライプニッツ固体物理学研究所 (Jeroen van den Brink教授)
- ・ ミュンヘン工科大学 (Christian Pfleiderer教授)
- ・ シュトゥットガルト Max-Planck研究所 (Walter Metzner教授, Bernhard Keimer教授)
- ・ アウグスブルク大学 (Alois Loidl教授)



共同研究

# Achim Rosch教授との共同研究

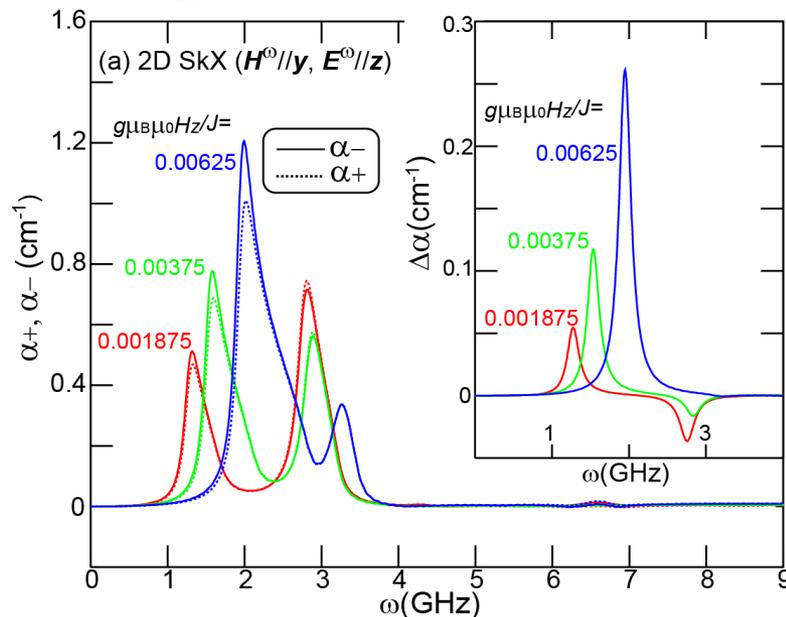
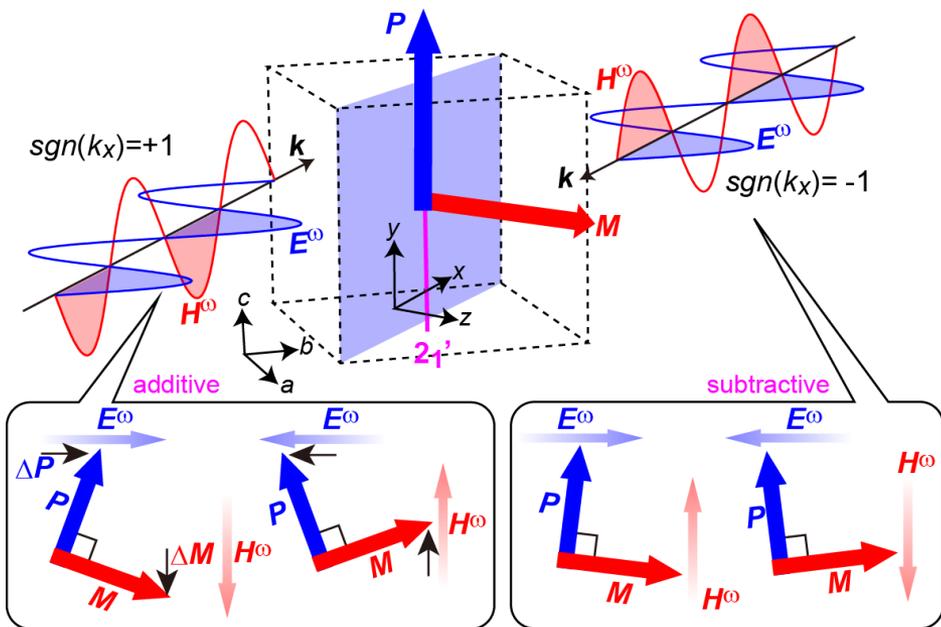
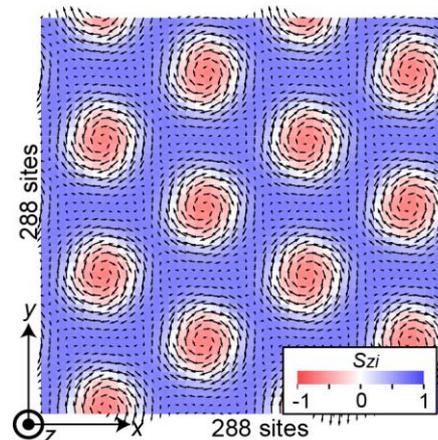
## スクリミオン結晶相のマイクロ波非相反方向二色性



**Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub>**

$$\mathcal{H}_0 = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \mathbf{S}_i \cdot (\mathbf{S}_{i+\hat{x}} + \mathbf{S}_{i+\hat{y}}) + D \sum_i (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+\hat{x}} \cdot \hat{x} + \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+\hat{y}} \cdot \hat{y}) - g\mu_B\mu_0 \mathbf{H} \cdot \sum_i \mathbf{S}_i$$

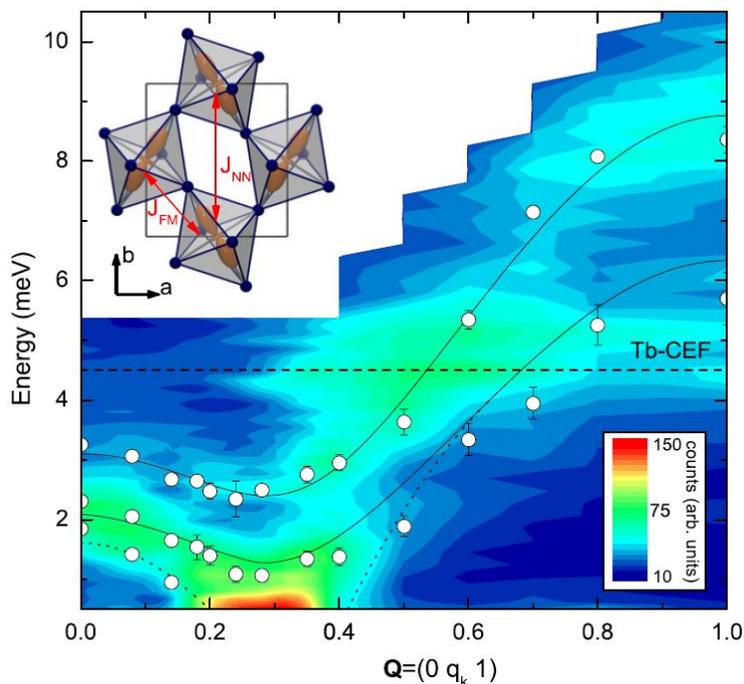
$$\frac{\partial \mathbf{S}_i}{\partial t} = -\mathbf{S}_i \times \mathbf{H}_i^{\text{eff}} + \frac{\alpha_G}{S} \mathbf{S}_i \times \frac{\partial \mathbf{S}_i}{\partial t}$$



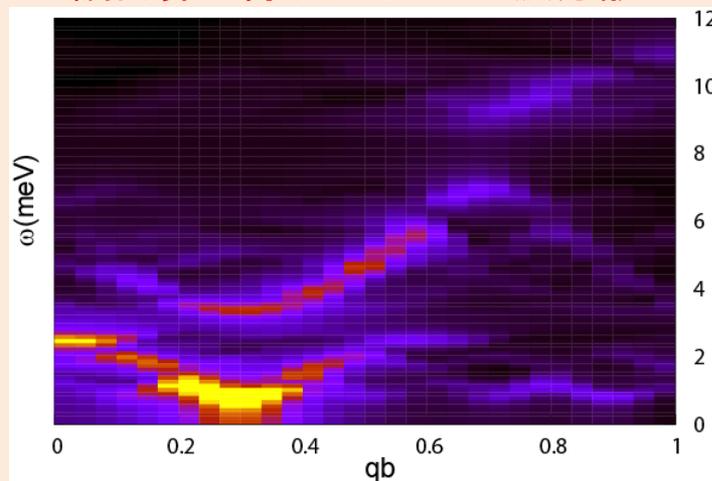
# Markus Braden教授との共同研究

## マルチフェロイック $\text{TbMnO}_3$ におけるカイラルマグノン励起

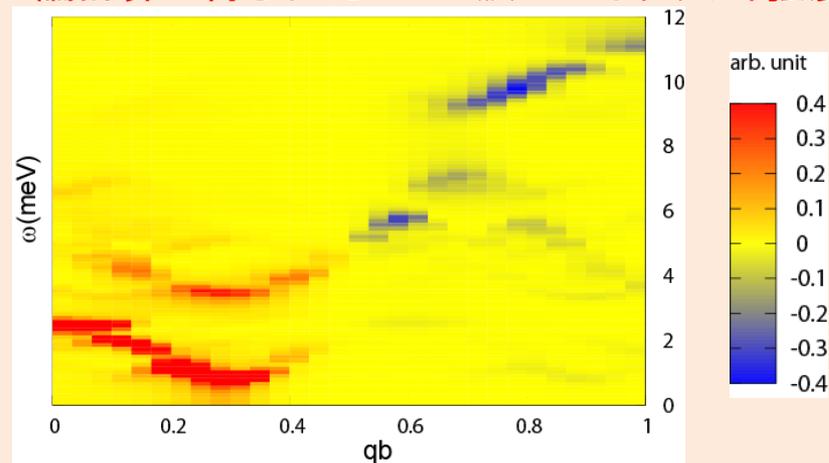
中性子散乱実験で得られた  
スピン波分散スペクトル



理論計算で得られたスピン波分散スペクトル



理論計算で得られたスピン波のカイラリティ強度



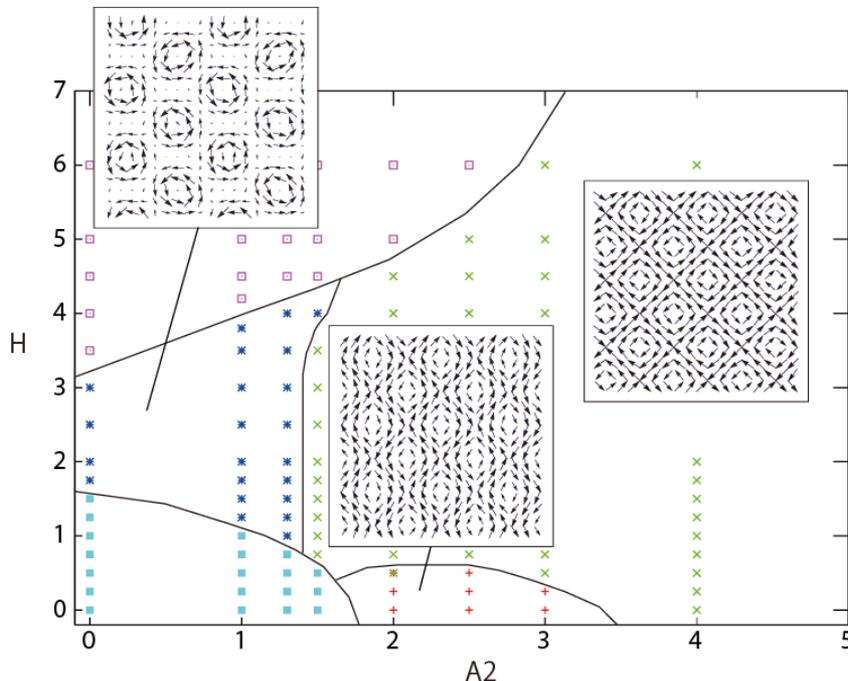
# Lars Fritz博士との共同研究

## カイラル磁性体を記述する古典スピン模型の相図

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & -J \sum_i \mathbf{S}_i \cdot (\mathbf{S}_{i+\hat{x}} + \mathbf{S}_{i+\hat{y}}) && \text{強磁性交換相互作用} \\ & + D \sum_i (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+\hat{x}} \cdot \hat{x} + \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_{i+\hat{y}} \cdot \hat{y}) && \text{DM相互作用} \\ & - H \cdot \sum_i \mathbf{S}_i && \text{ゼーマン相互作用} \\ & + A_1 \sum_i [(S_i^x)^4 + (S_i^y)^4 + (S_i^z)^4] && \text{磁気異方性1} \\ & - A_2 \sum_i (S_i^x S_{i+\hat{x}}^x + S_i^y S_{i+\hat{y}}^y) && \text{磁気異方性2} \end{aligned}$$

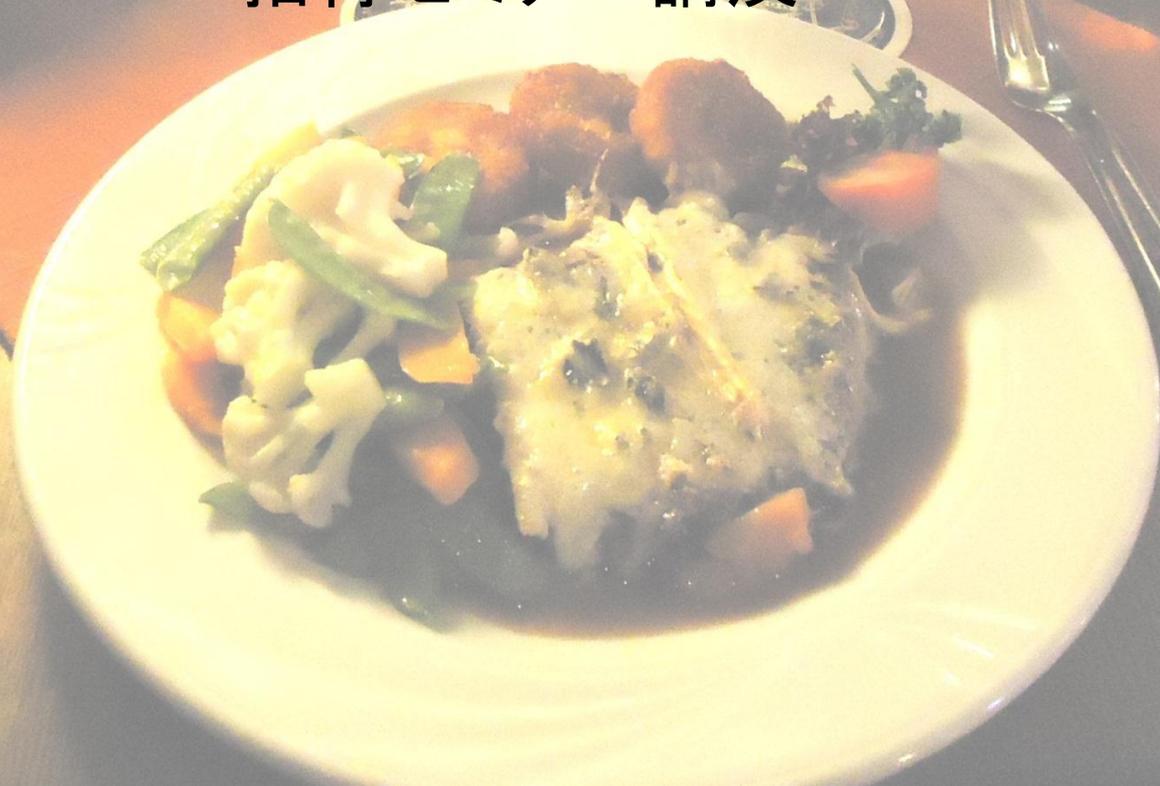
S. D. Yi *et al.*, PRB (2009)

- 18x18サイト、周期境界条件
- $D=\sqrt{6}$ ,  $A_1=0.5$
- 古典ベクトルスピン  $|\mathbf{S}_i|=1$
- レプリカ交換Monte-Carlo法



- レプリカ交換法のノウハウを教える
- simulated annealing法のノウハウを教わる

招待セミナー講演



# ドレスデン ライプニッツ固体物理研究所訪問 2月20日-21日

## Leibniz Institute for Solid State and Materials Research



セミナー講演:

“Theoretical study on the magnetoelectric phenomena in **multiferroic** Mn perovskites”



Jeroen van den Brink教授



Maria Daghofer博士

# ミュンヘン工科大学訪問

2月23日-24日



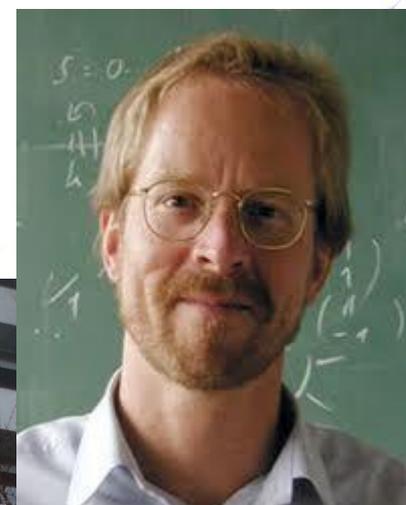
セミナー講演:

“Microwave-Active Dynamics  
of Skymion Crystal  
in Insulating Chiral Magnets”

Christian Pfeleiderer 教授

# Stuttgart Max-Planck研究所訪問

3月1日-3日



Walter Metzner教授



Bernhard Keimer教授

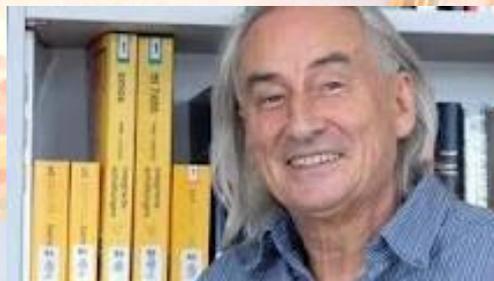


セミナー講演 (2回)

``Theoretical Study on the Magnetoelectric Phenomena in **Multiferroic** Mn Perovskites``

``Microwave-Active Dynamics of **Skyrmion** Crystal in Insulating Chiral Magnets``

# Augsburg大学訪問 3月4日-6日

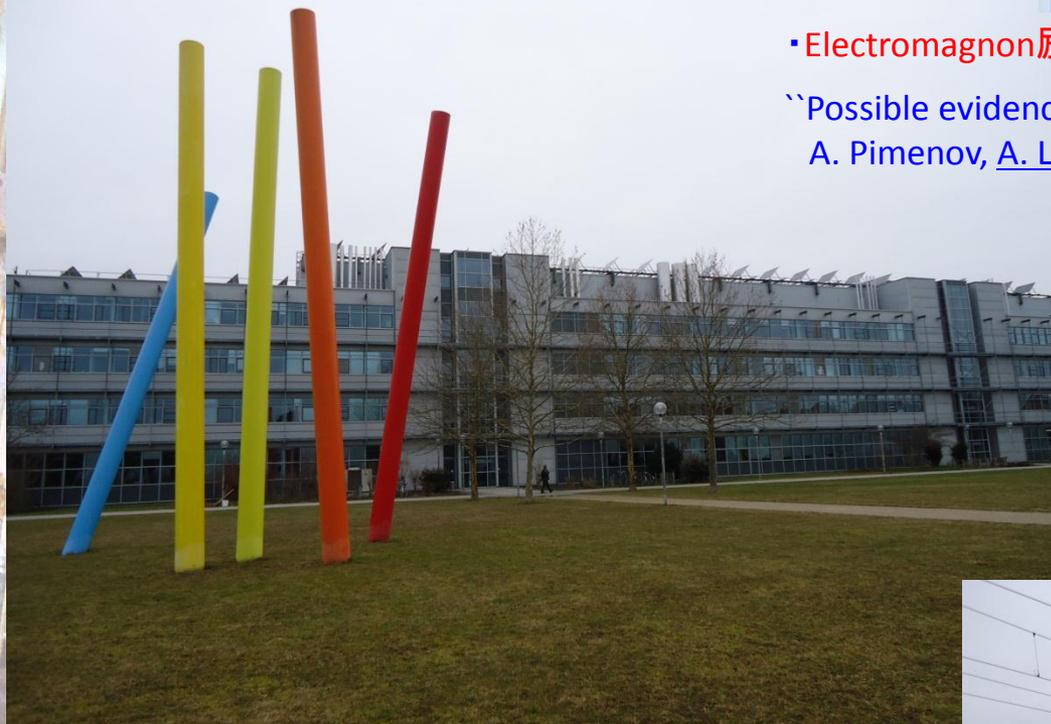


Alois Loidl教授

▪ Electromagnon 励起を世界で初めて観測！

“Possible evidence for electromagnons in multiferroic manganites”

A. Pimenov, A. Loidl et al., Nature Physics (2006)



セミナー講演:

“Theoretical study on the magnetoelectric phenomena in multiferroic Mn perovskites”

# 議論と交流

例: Stuttgart MPIを訪問した時のスケジュール

Timetable: Masahito Mochizuki

初日  
3月1日

## Thursday:

10:30 Arrival

10:30-12:00 Peter Horsch (5D11, Tel. 1550)

11:30-12:00 Yuki Yamase (5B14)

12:00 Lunch

13:00-14:00 Bernhard Keimer (6D6, Tel. 1650)

Afternoon:

14:30-15:00 Walter Metzner (1700)

15:00-15:30 Bernhard Keimer

15:30-16:15 Keimer group

16:30-17:15 Informal Seminar on Skyrmions (4D2) ← スキルミオンのセミナー講演

18:00-19:00 Peter Horsch

19:00 Dinner ← Metzner教授とHorsch博士との  
レストランディナー

## Friday:

Morning:

10:00-10:40 Fabien Trouselet (5D19)

11:00-12:00 Talk ← マルチフェロイクスのセミナー講演

12:00 Lunch

Afternoon:

13:00-13:30 Wen-Long You (7D21, 1757)

13:30-14:00 Nils Hasselmann (5C16, 1537)

14:00-14:30 Annunciata (5C14)

14:30-15:30 Manske (5D23)

15:30-16:30 Yamase (5D17)

16:30-17:00 Haverkort (6C6)

17:00-17:30 Schnyder (5B14)

17:30-18:00 Jackeli (7D11)

二日目  
3月2日



## まとめ

冒頭に掲げた三つの目標はほぼ達成できた！

1. 研究成果の宣伝と人脈の形成
2. 自分が持っているスキルやこれまでの研究を発展させる形で共同研究を行う
3. まったく新しいテーマの共同研究を行う種を蒔いてくる

## 謝辞

最後に、この貴重な機会を提供していただいたことを、**JSPS組織的な若手研究者等海外派遣プログラム**に心より感謝の意を表します。また、工学系研究科物理工学専攻の**市川昌和教授**と**永長直人教授**には、このような渡航の機会を与えていただいたことと、手厚い支援を頂いたことを感謝致します。また物理工学専攻教務の**嵯峨直樹氏**と**松永瑠美氏**に多くの支援とサポートを頂いたことを感謝致します。