

非圧縮性粘性流体の数理解析

小園 英雄

東北大学大学院理学研究科数学専攻

本講ではナビエ・ストークス方程式の初期値問題

$$(N-S) \quad \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \nu \Delta u - \nabla p, & \operatorname{div} u = 0, & x \in \mathbb{R}^3, t > 0, \\ u(x, 0) = a(x) \end{cases}$$

の適切性について論じる．任意に初期値 a を与えたとき，(N-S) が時間大域的な滑らかな解 $\{u, p\}$ を持つか？という問題は，ミレニアムにおける数学7難題のひとつとして2000年にClay研究所によって提唱された．ここでは，Leray, Serrin, 藤田-加藤, 増田, 儀我-宮川らの関数解析的解法を紹介した後，講演者による実解析の手法を用いた解の一連の研究を解説する．

Leray は任意の $a \in L^2$ に対して， $u \in L^\infty(0, \infty; L^2)$ かつ $\nabla u \in L^2(0, T; L^2)$ なる時間大域的弱解 u を構成した．Serrin はこの弱解 u が $u \in L^s(0, \infty; L^r)$, $2/s + 3/r = 1$, $3 < r \leq \infty$ であれば一意のかつ変数 (x, t) について微分可能であることを示した．スケール不変な空間として最も重要な $r = 3$ ，すなわち $u \in L^\infty(0, T; L^3)$ なる弱解の一意性については，増田, 小園-Shor によって解決を見た．このクラスの弱解の正則性は，Leray によって提唱された後進自己相似解による爆発解の存在問題と密接な関係にある．Nečas-Ružička-Sverák, は定常的な方法で，実は後進自己相似解による爆発解は存在しないことを証明した．そこで， $L^\infty(0, T; L^3)$ に属する弱解の正則性がホットな話題となり，最近になって Iskauriaza-Seregin-Sverák により肯定的に解決された．

これらは，まず最初に関数空間を広く選んで弱解を構成し，その後解の一意正則性を考察するという偏微分方程式の近代的手法である．一方，グリーン関数や半群の理論を用いて直接滑らかな解を構成するという古典的手法が Ladyzhenskaya, Solonnikov, 藤田-加藤, 儀我-宮川等によって確立された．すなわち， $a \in L^r$, $3 \leq r \leq \infty$ に対して， $T > 0$ と $u \in C([0, T]; L^r)$ なる解（これを強解と呼ぶ）が一意的に存在することが証明された．Serrinの結果により，強解は実際には滑らかな関数である．これまでのところ， $T \propto 1/\|a\|_{L^r}^{2r/(r-3)}$ が得られているに過ぎず，一般に $T = \infty$ ととれるかどうかは未解決である．そこで，どのような条件があれば，この強解が時刻 T を越えて存在時間の延長が可能か？ということが問題となる．儀我は強解がSerrinのクラスに属すれば，延長可能であることを示した．すなわち， $u \in C([0, T]; L^r)$ なる解が， $2/s + 3/r = 1$, $3 < r \leq \infty$ なる r, s に対して条件 $\int_0^T \|u(t)\|_{L^r}^s dt < \infty$ を満たせば， $T' > T$ が存在して u は $C([0, T']; L^r)$ に属する解となる．一方，流体力学的な立場からは，渦度 $\omega = \operatorname{rot} u$ の挙動が流れを支配する．Beale-Kato-Majda は $\nu = 0$ (オイラー方程式) の場合も込めて， $\int_0^T \|\omega(t)\|_{L^\infty} dt < \infty$ であれば，解の延長が可能であることを示した．彼らの証明のキーは Brezis-Gallouet による対数型ソボレフ不等式に類似した不等式を用いることであった．Brezis-Gallouetの不等式は，臨界ソボレフ空間 $H^{n/r, r}(\mathbb{R}^n)$ が本質的な役割を果たすが，関数空間を BMO や斉次ベソフ空間 $\dot{B}_{\infty, \infty}^0(\mathbb{R}^n)$ まで拡張することが可能である：

$$\|f\|_{L^\infty} \leq C \left(1 + \|f\|_{\dot{B}_{\infty, \infty}^0} \log(e + \|f\|_{H^{s,p}}) \right), \quad s > n/p$$

更に， $u \cdot \nabla u \in \mathcal{H}^1$, $(\mathcal{H}^1)^* = BMO$ を用いると， $\int_0^T \|u(t)\|_{BMO}^2 dt < \infty$ ，または $\int_0^T \|\omega(t)\|_{BMO} dt < \infty$ なる条件下で延長可能であることが分かる．特に $\nu > 0$ の場合は，3次元渦度ベクトル $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ のうち2自由度 ω_1, ω_2 を束縛する条件 $\int_0^T \|\omega_i(t)\|_{BMO} dt < \infty$, $i = 1, 2$ のみで延長可能である．

アインシュタイン計量と安定性

板東 重稔

東北大学 大学院 理学研究科 数学専攻

アインシュタイン計量の存在問題は微分幾何学における最も重要な問題の一つである。

局所的に座標がはいる様な空間を多様体という。各点で接ベクトルの間に内積が定まっている多様体をリーマン多様体といい、その内積をリーマン計量と呼ぶ。そのような空間では長さや体積の概念を自然に定めることが出来る。

ユークリッド空間はそのような空間の代表的な例であり、この場合半径 r のボールの体積は n 次元の場合 $\omega_n r^n$ と表わされる。ここで $\omega_1 = 2, \omega_2 = \pi, \omega_3 = 4\pi/3, \dots$ 。

一般のリーマン多様体においては、点 p を中心とする半径 r のボールの体積 $V_p(r)$ は必ずしも $\omega_n r^n$ となるとは限らない。

r が小さいとき、ユークリッド空間との誤差 $(\omega_n r^n - V_p(r))/r^{n+2}$ はある関数 $S(p)$ で近似する事が出来る。この S をリーマン多様体のスカラー曲率と呼ぶ。

ボール全体ではなく、ある特定の方向 v 当りの体積の誤差を表わす量はリッチ曲率 $\text{Ric}(v)$ と呼ばれる。

リッチ曲率 $\text{Ric}(v)$ が v に依らず一定となるとき、リーマン多様体はアインシュタイン多様体と呼ばれ、そのリーマン計量はアインシュタイン計量と呼ばれる。

2次元の多様体には必ずアインシュタイン計量が入る事は古くから知られており、数学の様々な研究においてその事実はキーポイントとして重要な役割を担ってきた。

一方3次元以上の多様体には必ずしもアインシュタイン計量は入らない事も知られていた。近年、3次元多様体のアインシュタイン計量、あるいはアインシュタイン計量が停留点となるべきフロー：リッチフローの研究が飛躍的に進み、3次元幾何学の研究にブレークスルーが開かれた。

4次元以上では、座標変換が複素解析的に取れる空間：複素多様体上で特別なアインシュタイン計量：アインシュタイン・ケーラー計量の存在問題に大きな進展が見られる。

予想：

アインシュタイン・ケーラー計量の存在は複素多様体の「安定性」と同値。

現在のところ大きな進展はあるものの、予想にいう「安定性」とは何かはまだ十分に解明されるには至っていない。

以上は多様体のアインシュタイン計量の話であるが、アインシュタイン計量の概念は複素多様体上の正則ベクトル束の場合にも拡張され、アインシュタイン・エルミート計量の概念が定義されている。この場合はアインシュタイン・エルミート計量に対応する「安定性」は比較的良く理解されており、対応する予想の成立が知られている。

また、正則ベクトル束の退化と見なせる解析的连接層に対してもアインシュタイン・エルミート計量の概念および「安定性」の概念は拡張され、この場合も予想の成立が知られている。

Single-point condensation phenomena for a four-dimensional biharmonic semilinear problem

FUTOSHI TAKAHASHI (高橋太) ¹

We study the asymptotic behavior of least energy solutions to the following fourth order elliptic problem (E_p) :

$$(E_p) \begin{cases} \Delta^2 u = u^p & \text{in } \Omega, \\ u > 0 & \text{in } \Omega, \\ u|_{\partial\Omega} = \Delta u|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}$$

as p gets large, where Ω is a smooth bounded domain in \mathbf{R}^4 .

In our earlier work, we have shown that the least energy solutions remain bounded uniformly in p and they have one or two “peaks” away from the boundary.

In this talk, following the arguments in Adimurthi-Grossi and Lin-Wei, we will obtain more sharper estimates of the upper bound of the least energy solutions and prove that the least energy solutions must develop single-point spiky pattern, under the assumption that the domain is convex.

More precisely, we have

Theorem. *Assume Ω is a smooth bounded convex domain in \mathbf{R}^4 and u_p is the least energy solutions to (E_p) . Then we have*

$$1 \leq \liminf_{p \rightarrow \infty} \|u_p\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \limsup_{p \rightarrow \infty} \|u_p\|_{L^\infty(\Omega)} \leq \sqrt{e}.$$

Furthermore, set $w_p := u_p / (\int_\Omega u_p^p dx)$. Then for any sequence w_{p_n} of w_p with $p_n \rightarrow \infty$, there exists a subsequence such that the blow up set S of this subsequence satisfies $S = \{x_0\}$ (one point blow up) for $x_0 \in \Omega$, and

- (1) $f_{p_n}(x) := \frac{u_{p_n}^{p_n}(x)}{\int_\Omega u_{p_n}^{p_n} dx} \overset{*}{\rightharpoonup} \delta_{x_0}$ in the sense of Radon measures of Ω .
- (2) $w_{p_n} \rightarrow G_4(\cdot, x_0)$ in $C_{loc}^4(\overline{\Omega} \setminus \{x_0\})$ where $G_4(x, y)$ denotes the Green function of Δ^2 under the Navier boundary condition.
- (3) x_0 is a critical point of the Robin function $R_4(x) = H_4(x, x)$, where $H_4(x, y) := G_4(x, y) + \frac{1}{8\pi^2} \log|x - y|$ denotes the regular part of G_4 .

We conjecture that the blow up point x_0 may be a maximum point of the Robin function R_4 . This is a future work for us.

¹COE fellow, Mathematical Institute, Tohoku university

「対称性の視点によるソリトン方程式とパンルヴェ方程式」

菊地哲也 (Tetsuya KIKUCHI)

東北大学大学院理学研究科・数学専攻

KdV 方程式を典型例とする, 非線形偏微分方程式で記述されるソリトン方程式系と, パンルヴェ方程式を含む, 線形微分方程式のモノドロミー保存変形を記述する非線形常微分方程式系に対して, それぞれの系に対するアフィン・リー環, アフィン・ワイル群といった代数系で記述される対称性を実現する統一的な構成法 [1] について報告する.

パンルヴェ方程式というのは, 20 世紀初頭にフランスの数学者パンルヴェによって発見された, 6 種の非線形常微分方程式である. パンルヴェの研究の動機は新しい超越関数を見つけることであり, そのために「動く分岐点をもたない」という性質を持つ 2 階常微分方程式をすべてリストアップし, このうち楕円関数や線形微分方程式に帰着されない 6 種がパンルヴェの方程式である. この解析には, すでにコワレフスカヤがコマの運動に関して用いたものと共通した考え方が使われており, 今日パンルヴェ解析とよばれている. 彼はこの解析を n 体問題へも応用し, その後の研究の刺激となっている.

パンルヴェ方程式はもう一つ別の起源をもっている. それは線形微分方程式のモノドロミーの問題である. 線形微分方程式の係数があるパラメータ t に依存しているとき, そのモノドロミー行列も t ごとに定まるが, この状況でモノドロミーが一定になるための条件として t に関する微分方程式が成り立つ. この方程式ともとの線形微分方程式との両立条件としてパンルヴェの方程式とその一般化が得られるのである. この視点による研究は, 統計物理に現れる Ising 模型の相関関数のスケール極限がパンルヴェの方程式をみたすことを説明するための理論的な裏づけを与えている. その後もパンルヴェ方程式は数理物理学の様々な局面に登場しており, モノドロミーの問題が数理物理において極めて強力な武器であるということが実証された.

一方でさまざまなソリトン方程式を特殊化することによってパンルヴェ方程式が得られることも知られており, 逆散乱法で解ける非線形偏微分方程式とパンルヴェ解析とのあいだには関係があると信じられている. 本講演では, この対応関係を, 線形作用素の固有値を保存する変形 (ソリトン) とモノドロミーを保存する変形 (パンルヴェ) との対応としてとらえることにより, それぞれの系の可積分系としての代数的な対称性を統一的に理解できることを示す. この視点により, 方程式の q 差分化や量子化についても論ずることができる.

参考文献:

[1] Sabro Kakei, Tetsuya Kikuchi, “Affine Lie group approach to a derivative nonlinear Schrödinger equation and its similarity reduction” IMRN, volume 2004, issue 78, 4181-4209 (2004).

MOIRCS の開発と宇宙初期における銀河の集団化

市川 隆

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

現代宇宙論における最大の課題は、宇宙の諸階層（銀河、銀河団、超銀河団）がいつどのようにしてきたかを解明することである。膨張宇宙の中で宇宙暗黒物質（ダークマター）の密度揺らぎが成長し、その重力場にバリオン物質が引き寄せられる。その中で小さな銀河が生まれ、それらが合体して大きな銀河に成長する。銀河はお互いに引き寄せ合い、やがて銀河団、大規模構造へと成長していく。ダークマターの分布を直接観測することはできないが、その中で誕生した銀河の進化や分布を過去にさかのぼって研究することによって、ダークマターとの相関に重要な手がかりを与える。

これまですばる望遠鏡を用いた可視光での広視野の観測によって、宇宙初期における銀河の大規模な分布構造が明らかになってきた。可視光の観測は宇宙膨張によるドップラー効果によって、静止系での紫外線を見る。紫外線は銀河の内部で起きている比較的短命の星生成領域から放射されるため、可視光では星生成が一時的に活発な銀河を選択的に観測し、バイアスのかかった描像を与える。一方、赤外線で見える遠方の銀河は、静止系の可視光から近赤外線の描像を与える。可視光・赤外線は、銀河誕生以来、銀河内で生まれ、蓄積されてきた星からの輻射が主なものである。すなわち、赤外線での観測は銀河質量の大半を担う恒星質量の集団としての銀河を見ることを意味する。したがって、宇宙初期の銀河の構造や分布を赤外線で見ることによって、ダークマターの中で進化し、ダークマターとともに集団化した結果としての銀河団や大規模構造の進化を解明することが可能である。

そこで我々のグループでは近赤外線での観測を目的とした国立天文台すばる望遠鏡に搭載する装置「Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph (MOIRCS、モアックス)」を開発した。この装置は極めて高い空間分解能 ($0.114''$ / 画素) と 800 万画素の広い視野 ($4' \times 7'$) を持つ。今までのすばる望遠鏡の赤外線撮像装置の視野に比較して、8 倍もの視野であり、8m 以上の望遠鏡としては他に類のない格段に広い視野である。50 以上の天体を近赤外線で分光することも可能である。これは現在の 8m 以上の望遠鏡ではまだ実現されていない新しい機能である。本装置は今年の 9 月にすばる望遠鏡に取り付けての最初の観測が成功裏に行われ、世界最高性能の赤外線撮像装置であることを確認した。また、今年 1 月末の第 2 回試験観測では、もうひとつの機能である多天体分光の試験観測が行われる。

本発表では装置の概要と開発経過、機能試験観測の結果、さらには予備的な観測に基づく銀河の集団化に関する研究成果を紹介する。

宇宙における冷たい暗黒物質の構造

Structure of the Cold Dark Matter in the Universe

千葉 柁司 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻)

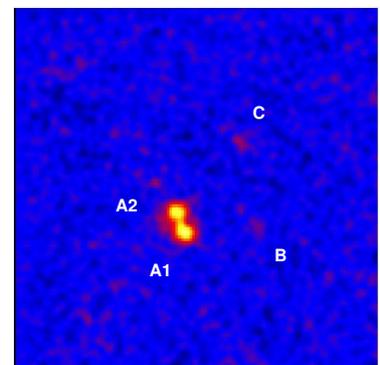
Masashi Chiba (Astronomy)

宇宙における物質の大半は、電磁波を放たない暗黒物質で占められていることが、様々な宇宙の観測からわかっている。さらに、その暗黒物質の候補として、冷たい暗黒物質と呼ばれるものが有力であり、これが電磁波を通して観測できる銀河の形成と進化、さらに銀河の動力学構造において、最も本質的な役割を担っていることがわかってきた。つまり、我々が電磁波を通して観測できるものは、宇宙において氷山の一角にすぎず、その一角の振る舞いが目に見えない大きな部分によって決定づけられるものである。

冷たい暗黒物質に基づく構造形成論によると、宇宙初期における密度揺らぎのパワースペクトラムは、小さな質量の揺らぎが最も大きいことから、そのような揺らぎが最初に成長し非線形になる。また、より大きな質量の揺らぎは、小さな質量揺らぎの合体・降着を伴いながら成長する。このように、冷たい暗黒物質において特有の重力不安定、すなわち小質量揺らぎの階層的な合体を経て、大質量スケールの構造が形成されると考えられている。実際、宇宙において観測される様々な大構造、すなわち、宇宙背景放射の揺らぎの分布、銀河や銀河団の空間分布といった、共動座標にして300万光年を超えるような空間スケールの構造は、冷たい暗黒物質から期待される構造と大変良く合致することが知られている。これが、冷たい暗黒物質が暗黒物質の最有力候補とされる所以である。

ところが、近年の大規模な重力多体系計算の発展に伴い、より小空間スケールにおける構造、すなわち一般の銀河に匹敵するするようなスケールにおいて、冷たい暗黒物質は観測と一見矛盾するような様子を示していることがわかってきた。最も重要な点は以下の2つである。(1)理論から期待される暗黒物質ハローの密度分布は、実際に観測される銀河のそれと違って、中心密度が発散するような振る舞いをする。(2)銀河質量程度のハローには数百以上の数の小質量ハローを伴う筈であるが、実際に観測されている伴銀河は高々数十個であり桁で合わない。このような天文観測の事実から、冷たい暗黒物質の標準理論を改訂する理論が登場したり、あるいは暗黒物質の中における銀河の形成と進化に関して大幅な改良を加えるものもあり、混沌とした状況になってきた。すなわち、小空間スケールにおける冷たい暗黒物質の振る舞いがまだ明確に理解されていないのである。

本講演では、こういった冷たい暗黒物質構造の研究に関する近年の動向を概観し、宇宙においてどのような形態で存在しているか、それは理論からの予測とどのように合致するか、あるいはどのような点で相違があるか、等に関して詳細に述べる。そして、銀河スケールにおける暗黒物質の問題に関して、重力レンズの原理を用いた新しい解析方法を吟味し開発を行なった。また、その重力レンズの方法に基づいてすばる望遠鏡を用いた観測を実施し、観測データの詳細な理論解析を行なうことによって、暗黒物質に関する新しい知見が得られたので報告する。さらに、冷たい暗黒物質に基づく銀河形成と進化の問題を考察し、今後の研究展望を述べる。



すばるによる重力レンズ像

「MOIRCS を用いた銀河進化の解明:ファーストライトを受けて」

大学院理学研究科天文学専攻 COE フェロー

田中 啓

宇宙の暗黒物質と銀河の進化

2003年、アメリカの人工衛星である WMAP による宇宙背景放射の正確な測定から、我々の住む宇宙の全エネルギー密度の約 73%がダークエネルギー、23%がダークマターという事実を明らかになった。我々はこの両者とも、それが一体何なのかを理解できずにいる。さらに、我々が理解しているごくわずかなバリオンによる構造である銀河・銀河団・大規模構造でさえ、それがどのように形成され進化をしてきたかについて、多くの解決すべき課題を残している。

我々はダークマターの起源や、ダークマターが支配する重力場の中での銀河や銀河団の質量アッセンブリ史、構造形成史、銀河の進化について、観測的立場から迫ろうと考えている。この分野で世界をリードするためには、世界最高レベルの観測装置が必要なのは言うまでも無い。我々は東北大学市川隆助教授を中心として、文部科学省国立天文台との協力のもと、日本が世界に誇る大口径望遠鏡である「すばる望遠鏡」の第二世代観測装置「すばる多天体近赤外撮像分光装置(通称 MOIRCS)」の開発を行ってきた。この装置は現在世界最大クラスの 8m 望遠鏡では初めての、近赤外域における多天体同時分光機能を有し、近赤外撮像装置としてもこれまでよりも 5~7 倍という広い視野を有する、画期的なサーベイ観測装置である(市川講演参照)。この装置は 2004 年 9 月末に初めて天体からの光を受ける「ファーストライト」を達成し、いよいよ本格的な観測が可能な段階に入りつつある。我々はまずこの装置を用いて、視野の広さとデータの深さにおいて人類がこれまでに得られた画像を大きく凌駕するデータを取得し、宇宙の形成後間もない時代に生まれた銀河の検出を目指していく予定である。

機能試験画像にみる、形成期における大質量銀河の姿

我々はこれまで、銀河団環境における大型銀河の進化を探るべく、宇宙が若くまだ銀河団銀河の進化が活発だった時代の銀河団メンバーについてのカラー解析を行ってきた。それをするために、1)宇宙が生まれて約 20%、40%の時代の銀河団を観測して、この時代に銀河団銀河の色特性が急激に変化している事を突き止めた。この意味を議論しながら、MOIRCS による超遠方の銀河団銀河の形成進化研究への展望を議論する。特に、ダークマターに満たされた宇宙における大規模構造進化のモデルと観測を比較し、ダークマターハローの集積史とそこでの銀河の進化のリンクを MOIRCS で探る事が重要である。さらに、銀河団環境による銀河団の重力レンズを利用した超遠方銀河の検出への展望や、実際にファーストライトの際に得られた画像の解析によって、より一般的な環境下における大質量銀河の進化を探るためのサンプル構築への試みについて紹介する予定である。

超新星起源プレソーラーグレインの Si 同位体比の再現

吉田 敬

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

プレソーラーグレインは始原的隕石に含まれる μm サイズのグレインで始原的隕石の全岩組成とは大きく異なる同位体組成を持つ。そのため、プレソーラーグレインは太陽系形成以前の星の元素合成の痕跡を持つと考えられている。そして、プレソーラーグレインはグレインの同位体比とさまざまな元素合成過程から得られる元素の同位体比を比べることで起源を推定されている。

^{28}Si の過剰を示すグレインの種類は ^{28}Si が超新星だけで多く作られることから超新星起源と推定されている。超新星起源グレインの Si 同位体比を定量的調べると約 80%の超新星起源グレインで太陽系元素組成を基準にした $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 比の値が $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 比の値よりも大きいことが得られている。しかし、これまでの超新星元素合成モデルからはこの傾向とは逆の傾向しか見られていない。そこで我々は星の質量や超新星爆発の種類を考慮してどのような超新星で超新星起源グレインに見られる Si 同位体比を再現できるかを調べた。

我々は恒星進化モデルとして 3.3, 4, 6, 8 太陽質量の He 星モデルを用いた。これは 13, 15, 20, 25 太陽質量の主系列星の水素層を考慮しないモデルに対応している。超新星爆発には標準的な超新星モデルと 8 太陽質量 He 星の極超新星モデルを用意した。このモデルを用いて星の進化と超新星爆発を数値的に追い、詳細な元素合成計算を行って超新星 ejecta の元素組成分布を求めた。さらに超新星 ejecta を元素組成の特徴を基に Ni, Si/S, O/Si, O/Ne, C/O or O/C, He/C, He/N 層の 7 層に分割し, Ni, Si/S, He/C, He/N の 4 層をさまざまな混合比で混合させ、個々のグレインが持つ Si 同位体比と超新星 ejecta 混合物の Si 同位体比の範囲を比較した。

その結果、大部分の超新星起源グレインが持つ $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 比が $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ よりも大きな値を示すという特徴は 3.3, 4 太陽質量 He 星の超新星モデルと 8 太陽質量 He 星極超新星モデルで再現された。 ^{28}Si の過剰は星の質量にかかわらず Si/S 層で得られた。一方、大きな $^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ 比という特徴は軽い超新星の Ni 層で得られた。これは軽い星の超新星の方が超新星爆発時の温度減少のタイムスケールが短く、爆発時の $^{28}\text{Si}(p,\gamma)^{29}\text{P}(\beta^+)^{29}\text{Si}(p,\gamma)^{30}\text{P}(\beta^+)^{30}\text{Si}$ という反応が ^{30}Si が十分作られる前に凍結されるからである。また、極超新星で得られる高エントロピー状態も ^{29}Si 生成に適していることもわかった。以上のことから超新星起源グレインに見られる Si 同位体比の特徴は主に軽い星の超新星 ejecta における Si/S 層と Ni 層の混合で説明することができた。なお、本研究では超新星ニュートリノによるニュートリノ破砕反応を考慮しているが、ニュートリノ破砕反応を考慮しない場合には Ni 層における ^{29}Si 生成は見られなかった。そのため、超新星起源グレインの Si 同位体比の特徴は超新星からニュートリノが放出される間接的な証拠であると考えられることもできる。

原子核物理学と天体物理学との融合

The Synergy Between Nuclear Physics and Astrophysics

A. Baha Balantekin

Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University

and

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison

Recent advances in cosmology and simultaneous technological developments in experimental instrumentation have enlarged the scope of astronomy from its traditional mode of optical observations of atomic and molecular physics-based phenomena, to a complementary mode of neutrino observations of nuclear and particle physics-based phenomena. This talk will attempt to illustrate the synergy between astrophysics and nuclear physics using the example of neutrino astrophysics. Neutrino astrophysics bridges several subfields of physics that traditionally have been separated. It is an interdisciplinary area where input from nuclear physics, particle physics, and astrophysics is needed. The properties of the neutrino has at long last yielded to an intensive experimental assault. Evidence for neutrino mass and oscillations are now seen in the solar-neutrino spectrum, in atmospheric neutrinos, and in the reactor and accelerator neutrino experiments. There are many profound astrophysical and cosmological implications of these recent results. In particular, the neutrino mass scale indicated at by these new data implies that neutrinos form a significant (though subdominant) fraction of the matter on very large scales. This is tantalizing, since it is in accord with at least some interpretations of the WMAP observations of anisotropy in the cosmic microwave background radiation. The recent neutrino oscillation data may also have significant implications for our picture of core-collapse supernovae. There has been steady progress in recent years in our understanding of supernovae. It was shown that neutral-current neutrino-nucleus scattering from abundant nuclei in supernovae can produce less abundant species such as B^{11} , F^{19} , Li^6 in significant amounts. Progress was made on explosion models both with prompt and delayed mechanisms, especially in understanding the role of convection. Neutrino re-heating of the shock was established as the most likely mechanism stabilizing the explosion. The expanding neutron-rich hot bubble formed between the neutrino-sphere and the shock wave is now considered to be a very plausible site for the r-process nucleosynthesis. In this talk theoretical nuclear physics research at Tohoku University in these areas will be discussed.

Hadronic CP violation from strangeness and constraints on CP phases

Ken-ichi Hikasa, Yasuhiro Shimizu, Takeo Moroi, Masahiro Yamaguchi

Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

The origin of CP violation in nature is a very important issue in particle physics since CP violation is indispensable for the baryon asymmetry in universe. In the standard model (SM), there are two CP violating parameters; the phase of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) matrix and the QCD theta (θ) parameter. The former induces CP violation in flavor violating process, such as CP violating K , B decays while the latter induces flavor conserving CP violation, such as neutron electric dipole moment (EDM). The experimental upper bound on the neutron EDM gives strong constraint on θ , ($|\theta| < 10^{-10}$). On the other hand, the recent measurements of CP asymmetry in B decays at Babar and Belle confirm that the phase of the CKM matrix is the dominant source of the CP violation in K and B decays. It is known that the phase of the CKM matrix is not enough to explain the baryon asymmetry in universe. Therefore, it is very important to search for new CP violating phases.

We consider hadronic CP violation induced by chromoelectric dipole moments (CEDMs) of light quarks and the QCD theta parameter ($\bar{\theta}$). We concentrate on the strange quark CEDM. We derive effective CP violating nucleon interactions induced by the CEDMs and $\bar{\theta}$ with the SU(3) chiral Lagrangian technique. From the effective interactions, we calculate the EDMs for the ^{199}Hg atom, neutron and deuteron. Using these results, it is possible to put constraints on the quark CEDMs from the experimental upper bounds on the EDMs of ^{199}Hg atom, neutron.

In order to demonstrate an implication of our results on the supersymmetric (SUSY) models, we calculate the gluino contributions to the quark CEDMs with the flavor violating mass insertion approximations. It is usually considered that the EDMs are sensitive to the flavor diagonal CP phases. However, when both left-handed and right-handed quark mixing exist, the CEDMs can be enhanced by the left-right squark mixings. Since the typical SUSY models have the left-handed squark mixing, the EDMs can give strong constraints on the flavor dependent SUSY phases. These constraints on the CP phases can give important implications to other SUSY phenomenology, including the B physics. As an example, we show that there is a strong correlation between the strange quark CEDM and the CP asymmetry in $B \rightarrow \phi K_s$ ($S_{\phi K_s}$). The current bounds on the strange quark CEDM from ^{199}Hg atomic and the neutron EDMs imply that the deviation of $S_{\phi K_s}$ from the SM should be strongly suppressed.

核物質中のハドロン・凝縮系中の原子核へ及ぼす媒質環境の効果

Medium effects; Hadrons in nuclear matter and Nuclei in condensed matter

J. Kasagi

Laboratory of Nuclear Science

Modification of properties of constituents in surrounding environments is one of the most interesting and important phenomena in physics. As the world shows layer structures, quark – hadron(meson/baryon) – nucleus – atom/molecule – liquid/solid - - -, the medium, in which the basic constituents of the layer interact to each other, is considered to play an important role for the modification. However, it is very hard to see clear effects of medium acting on its substructure. Recently, the role of media has been studied more deeply at various stages of layer structure. For example, in a nucleus which provides a matter environment with a finite baryonic density, reduction of nucleon and meson masses has been discussed in the framework of QCD as well as a possibility of partial deconfinement of quarks. Moreover, in condensed matter, nuclear reactions and/or nuclear decays are considered to be strongly modified by the existence of electrons in extreme conditions.

We have studied medium effects relating to nuclei; properties and behaviors of hadrons in nuclear matter, and, nuclear reactions and decays in condensed matter. We would like to discuss mainly the following subjects in my talk; properties of the $S_{11}(1535)$ nucleon resonance in nuclei, reaction rates of low-energy nuclear fusion reactions in condensed matter, and, modification of lifetime of ${}^7\text{Be}$ in C_{60} fullerene. Most of the experiments have carried out at the Laboratory of Nuclear Science. The results so far obtained have generally indicated that the medium effect is not small, but rather strong for specific conditions. The $S_{11}(1535)$ resonance appears with larger resonance width in nuclei than in isolated. Low-energy $\text{D}+\text{D}$ and $\text{Li}+\text{D}$ reactions are enhanced very strongly in some metals. The shortest lifetime of ${}^7\text{Be}$ ever reported has been deduced in C_{60} . We will discuss on these experiments in detail as well as future plans.

ニュートリノで調べる地球・太陽

Exploring the earth and the sun with neutrinos

井上邦雄

Kunio Inoue

東北大学大学院理学研究科附属ニュートリノ科学研究センター

Research Center for Neutrino Science, Graduate School of Science, Tohoku University

○我々の住む地球はどのように形成されたのだろうか？

○甚大な被害をもたらす地震や火山噴火はどのように駆動されるのだろうか？

○太陽風から生命を守っている地磁気はどうやって作られるのだろうか？

○生命を育む太陽のエネルギーはどのように生成されているのだろうか？

これらの基本的な問いには、科学の進歩によって高い確度で答えられるようになったものもあるし、未だに未解明なものもあります。地球や太陽は最も身近な天体ではありますが、あまり理解されていないことが多く残っています。解明を難しくしている主因として、地球や太陽内部の直接観測ができないということが挙げられます。詳細な震動学的研究によって、内部構造の解明が進んでいるとはいえ、太陽中心の核融合反応の状況や、マントルや核の運動を駆動すると考えられている放射性物質の分布まで観測できるわけではありません。

ニュートリノの発見は、この状況を大きく変えました。物質とほとんど反応しないニュートリノは核融合反応や放射性物質によって生成され、途中で吸収されることなく地上の観測装置に到達すると考えられます。しかし、ほとんど反応しないということは、同時に観測が困難であることも意味します。宇宙線の影響が小さい地下深くでの、巨大で低バックグラウンドの実験装置の開発は、初めて太陽ニュートリノの内の高エネルギー成分の観測を可能にしました。ニュートリノ天文学を創出したカミオカンデ実験がこれにあたります。しかし、問題はまだまだあります。カミオカンデで観測できたニュートリノは分岐比が小さく太陽模型の検証には不十分です。しかも、ニュートリノの伝搬が理解できていなかったため、観測量と発生量の関係づけが困難でした。

液体シンチレータを使いカミオカンデ跡地に建設されたカムランド実験は、原子炉ニュートリノの飛行中の振動パターンを観測し、ニュートリノの伝搬を解明することに成功しました。これで初めて観測量から発生量を計算することが可能となりました。極低バックグラウンドで低エネルギーまで観測可能なカムランドでは、地球内の放射性物質からくるニュートリノも観測することができます。ニュートリノによる地球内部の直接測定は、地球形成理論の検証に有効ですし、さらに発展させれば、最初の疑問も解決するかもしれません。また、さらなるバックグラウンドの低減によって、分岐比の大きい低エネルギー太陽ニュートリノの観測も可能になります。その低減に必要な純化装置の研究開発も順調に進んでおり、大きな成果が期待されています。

Hypernuclear γ -ray spectroscopy via the Hyperball2 array

T. Koike, Y. Fujii, O. Hashimoto, S. Kinoshita, Y. Ma, Y. Miura, S. Nakamura,
H. Tamura and M. Ukai

Department of Physics, Tohoku University

Atomic nuclei consist of a number of protons and neutrons. When one of the constituent nucleons is replaced by a hyperon, a hypernucleus is formed. Hyperons such as Λ and Σ are different types of particle from nucleons in that they have non-zero strangeness quantum number. The inclusion of strangeness in nuclear medium offers a unique laboratory for deepening our understanding of nuclear force not limited to nucleon-nucleon but extended to hyperon-nucleon and hyperon-hyperon interaction. Until recently, detailed structural investigations of hypernuclei had only been a dream due to the experimental challenge such studies pose. However, the high resolution γ -ray spectroscopy of hypernuclei became a reality with a development and construction of the germanium (Ge) detector array, Hyperball. Thus far, precise structures of several Λ hypernuclei have been identified from which strengths of spin-dependent interaction between a Λ and a nucleon are experimentally determined. A reduction in size of a bulk nuclear matter (core) in the hypernucleus ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ has also been observed experimentally confirming the glue like presence of a hyperon that is not affected by Pauli principle.

Based on the success of a series of Hyperball experiments, an upgrading of Hyperball has been undertaken. The new array, Hyperball2, houses six Clover-type detectors, which are segmented into four Ge crystals, plus 14 single-crystal Ge detectors. Each detector is surrounded by BGO scintillator counters for a reduction of backgrounds in γ -ray spectrum by vetoing contaminated events. The photo-peak detection efficiency of Hyperball2 is nearly doubled from that of the previous array. The first experiment with this array, in conjunction with Superconducting Kaon Spectrometer (SKS), is scheduled at the KEK beam facility to perform γ -ray spectroscopy of ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ and ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ using the (π^+, K^+) reaction on ${}^{12}\text{C}$ target. In this experiment, one of the main goals is to measure a lifetime of $7/2^+$ state in ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$, which is selectively produced via one proton emission decay of ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}(2^+)$. The measured lifetime, by means of Doppler shift attenuation method, determines the reduced transition probability of the ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}(7/2^+ \rightarrow 5/2^+)$ Λ -spin-flip M1 transition ($B(\text{M1}; 7/2^+ \rightarrow 5/2^+)$). Properties of a Λ particle in free space may change in nuclear matter and the magnetic moment is one of them. The measurement of the $B(\text{M1}; 7/2^+ \rightarrow 5/2^+)$ value will provide a quantitative account for the change of the magnetic moment of a Λ if at all.

More expansive and systematic studies of various hypernuclei via the γ -ray spectroscopy are planned in the future with high intensity beams provided by 50-GeV Proton Synchrotron at Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), currently under construction. The beams with an intensity ~ 10 to ~ 100 times of that achievable at the present will be available for the hypernuclear experiments. Thus a dramatic increase in counting rates of Ge detectors is anticipated and a much faster data-readout system for these detectors is being developed.

光電子および中性子分光の相補的利用による高温超伝導体の研究

Cooperative photoemission and neutron spectroscopy study of high-temperature superconductors

高橋 隆、山田和芳

Takashi Takahashi and Kazuyoshi Yamada

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University

We have performed cooperative photoemission and neutron scattering experiments on cuprate high- T_c superconductors to study the low-energy excitation responsible for and/or relevant to the mechanism of superconductivity.

We have experimentally determined the full energy dispersion and the coherence factors of the Bogoliubov quasiparticles in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Fig. 1) by angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES). The results show a good quantitative agreement with the prediction from the BCS theory. This proves the basic validity of the BCS theory in the wide meaning to describe the high- T_c superconductivity. We have experimentally identified two different bosonic modes in Bi-system high- T_c superconductors. One produces the “small” kink in the limited momentum region around the node, and another is related to the “large” kink which exists in a relatively wide momentum region with the stronger magnitude closer to the $(\pi, 0)$ point. The observed momentum and temperature dependence of the kinks as well as the impurity effect show that the large kink is of magnetic origin and closely related to the high- T_c superconductivity, while the small kink around the node has no direct correlation to the superconductivity.

We have also performed systematic neutron scattering experiments on both hole- and electron-doped high- T_c cuprates to search for the generic feature of spin excitations which could play an important role for the superconductivity. Particularly, in a wide momentum and energy space pulsed neutron scattering experiments revealed a new aspect. The observed spin excitation spectrum in the hole-doped $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($x \sim 1/8$) shows an interesting dispersion relation (Fig.2), which is similar to that of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$. The energy range at around 50meV approximately corresponds to the energy scale of so-called kink anomaly observed in ARPES measurement.

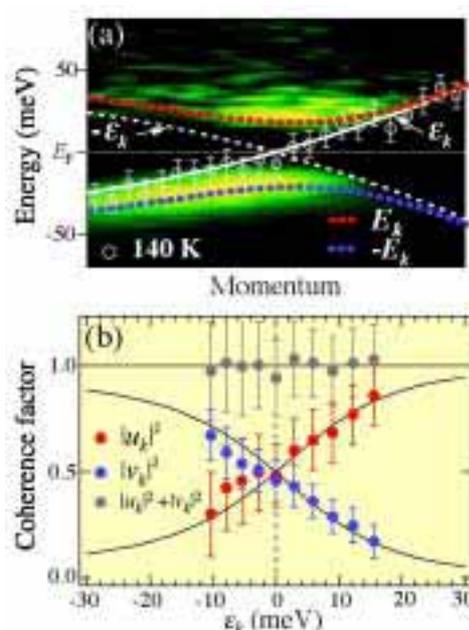


Fig. 1 (a) Band dispersion of Bogoliubov quasiparticles and (b) coherence factors determined by ARPES

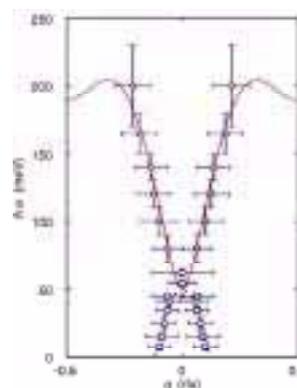


Fig. 2 Spin excitation spectrum in $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($x \sim 1/8$)

Quadrupolar ordering in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ skutterudite

A. Kiss and Y. Kuramoto

Department of Physics, Tohoku University, Sendai, 980-8578

Rare-earth filled skutterudite compounds are intensively studied in the last few years because of their diverse and complex behavior. $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ shows a metal-insulator phase transition at about 60K which is accompanied by also a structural transition. Skutterudite compounds with Nd or Eu show ferromagnetism, while exotic superconducting phases were found in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ discovering the first Pr-based heavy fermion superconductor.

We are particularly interested in the nature and main property of the ordered phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ skutterudite. This compound shows a non-magnetic phase transition at 6.5K which can be suppressed by external magnetic field. The crystal field level scheme of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ has not been determined yet experimentally, although the low-lying scheme is responsible for the low-temperature behavior, e.g. the possible orderings. The CEF splittings in the $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ and $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ are clearly known by neutron diffraction experiments. But the interpretation of the neutron scattering spectra of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ is not unambiguous: polycrystalline samples do not show clear peaks and the peaks appearing in the single crystalline samples spectra become clear only below the transition temperature. Thus, the question of the CEF scheme is left open. The most fascinating recent experimental finding on the $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ skutterudite is the appearance of a high-field phase very sharply located around the (111) magnetic field direction [1]. This result can be a key point in the identification of the low-energy level scheme and also the low-field ordered phase. Additionally, it was also found that the electrical resistivity shows an enhancement around the (111) field direction [2].

We found that only the $\Gamma_1-\Gamma_4^{(1)}$ low-lying scheme gives a level crossing point in the ground state uniquely for the (111) field direction which can be responsible for the appearance of the high-field phase. Accepting that the low-field phase is the antiferro-quadrupolar ordered phase of the Γ_3 moments, which is supported by experimentally, we examined this AFQ ordering model in the case of tetrahedral symmetry with the $\Gamma_1-\Gamma_4^{(1)}$ low energy scheme. We found that this model can lead to the appearance of the new high-field phase for $\mathbf{H} \parallel (111)$ in the case when the energy separation between the singlet and triplet states is small. With the introduction of ferro-type interactions between the dipoles and \mathcal{T}^β octupoles the measured phase boundary can be reproduced qualitatively. Changing the ferro-type interaction parameters, either two separated phases or continuous phase boundary can be obtained. We found parameter sets where the two phases have the same $\mathbf{q} = (1, 0, 0)$ ordering vector. We also found another set where the low-field phase has $\mathbf{q} = (1, 0, 0)$ while the high-field phase has $\mathbf{q} = 0$.

We calculated the electrical resistivity from the crystalline electric field states. With this very simple picture we can reproduce qualitatively the measured resistivity enhancement around the (111) field direction near the level crossing point at low temperatures.

References

- [1] T. Tayama et al., J. Phys. Soc. Japan **73**, 3258 (2004).
- [2] E. Kuramochi et al., Acta Physica Polonica B**34**, 1129 (2003).

Metal-Insulator Transition of Na_xWO_3 Studied by High-Resolution ARPES

S. Raj¹, D. Hashimoto¹, H. Matsui¹, S. Ray², D. D. Sarma², S. Souma¹, T. Sato¹,
S. Oishi³, W. H. McCarroll⁴, M. Greenblatt⁵, T. Takahashi¹

¹Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

²Solid State & Structural Chemistry Unit, Indian Institute of Science,
Bangalore 560012, India

³Faculty of Engineering, Shinshu University, Nagano 380-8553, Japan

⁴Department of Chemistry and Biochemistry, Rider University, NJ 08648, USA

⁵Department of Chemistry and Chemical Biology, The State University of New Jersey, NJ 08854, USA

The properties of tungsten-oxide based materials have created enormous interest in material science for a long time due to its various applications. It is possible to change the color of WO_3 by doping sodium metal, thus forming Na_xWO_3 bronze for all composition of x . Na_xWO_3 bronze exhibits very interesting electronic properties, especially a metal-insulator transition (MIT) as function of x . A high metallic conduction is obtained for higher x -compounds ($x \geq 0.3$), while the system undergoes MIT with decreasing x . In Na_xWO_3 , Na atom occupies the central position, while W shares the corner of the cubic quasi-perovskite structure forming WO_6 octahedron. Due to the octahedral crystal field, the W 5d band splits into 5d T_{2g} and e_g bands, and the Fermi level (E_F) lies just below the 5d T_{2g} band in WO_3 and the crystal becomes a band insulator, while in Na_xWO_3 the Na 3s electron goes to the W 5d T_{2g} band and the system becomes metallic for higher values of x ($x \geq 0.3$). For low concentration of x ($x \leq 0.3$) the crystal still shows insulating properties although the origin is now under debate. Hence the study of electronic structure of Na_xWO_3 has much interest from both technological and fundamental perspectives.

We have carried out angle-resolved photoemission (ARPES) measurements for both insulating ($x = 0.025$) and metallic ($x=0.58, 0.65, 0.7$ and 0.8) Na_xWO_3 . The band dispersion in insulating sample is studied with the variation of temperature and compared with its metallic counterpart. The random distribution of Na^+ ions in WO_3 lattice gives rise to a strong disorder effect, and as a consequence the Anderson localization occurs in the conduction band tail and the system undergoes MIT for low Na concentration ($x < 0.3$). Due to the localization the soft Coulomb gap arises and the density of state vanishes to zero exactly at E_F . The remnant Fermi surface mapped in insulating phase is found to be replica of real Fermi surface in metallic system. We found rigid band model is not appropriate in metallic Na_xWO_3 and this finding support the linear variation of magnetic susceptibility and specific heat with Na doping. We did not observe any signature of impurity band (level) near E_F region and hence, the possibility of development of Na induced impurity band (level), which causes localization at impurity band (level) tail leading to metal-to-insulator transition at low concentration, is ruled out. The spectral evolution of DOS at E_F in metallic region has a good agreement with the prediction for disorder metal and varies as a function of $(E - E_F)^{1/2}$. We observed electron-like FS at $\Gamma(X)$ point in metallic sample as predicted from band calculation and the FS gradually increases with increase in Na concentration in Na_xWO_3 due to W 5d T_{2g} band filling.

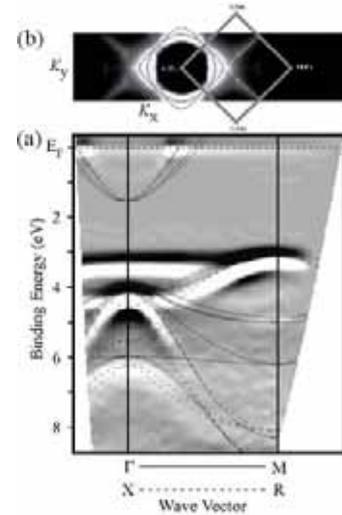


Fig.1 (a) Experimental valence band structure of $\text{Na}_{0.8}\text{WO}_3$ along with band calculation (b) Two dimensional intensity map of the intensity at E_F with the calculated Fermi surface.

遷移金属酸化物ナノクラスターの強相関電子効果の研究

吉良弘, 田村秀和, 安藤悠也, 高橋良, 小野寺貢, 村上洋一,

山崎誠志^A, 津田健二^B, 大山研二^C, 出口博之^D

東北大理, 静岡理工大^A, 東北大多元研^B, 東北大金研^C, 九州工大^D

原子が数~数十からなるナノクラスターにおいては、バルク結晶とは大きく異なる電子状態が実現する。この観点から、強相関電子系物質のナノクラスターの物性は非常に興味深い。近年、ゼオライトなどの細孔中で遷移金属酸化物などの結晶を成長させることにより、ナノサイズの大きさを持つ強相関電子系が作製できるようになってきた。本研究では、電子相関に強い制約が加えられたナノクラスターにおける物性を調べることを目的とし、MCM-41 内部のメソ孔に強相関電子系物質である LaMnO₃、SrTiO₃ のナノクラスターを作製、評価を行ってきた。

MCM-41 は SiO₂ の壁からなる内径約 30 の 1 次元チャンネルがヘキサゴナルに配列したシリカメソ多孔体である(図 1)。この MCM-41 のメソ孔に水溶液中で LaMnO₃ および SrTiO₃ の材料物質を導入し、乾燥後 700 で熱処理を行った。図 1 に作製した試料の粉末 X 線回折測定の結果を示す。材料物質の導入後、100 反射が大きく低下していることが確認された。これは MCM-41 内部に材料物質が取り込まれたことを示唆する。Mn 吸収端を用いた異常散乱実験の結果、MCM-41 のメソ孔内部に Mn が取り込まれていることを確認した。また、熱処理後も MCM-41 の構造が維持されていることが確認された。

図 2 に作製条件が異なる 3 種類の LaMnO₃ を導入した MCM-41(以下 LaMnO₃/MCM-41) の SQUID による磁化測定の結果を示す。バルクの LaMnO₃ は T_N=141K のスピンキャント磁性であるが、LaMnO₃/MCM-41 では作製条件に応じ T_C=75K、150K、260K の 3 種類の磁性が観測された。本研究では作製条件を変え複数の試料を合成したが、T_C=75K、150K、260K 以外に転移点を持つ試料は確認されていない。特にこれまで La、Mn、O からなる化合物で 260K に転移点を持つものは報告されておらず、非常に興味深い。

現在、この磁性は LaMnO₃ がナノ結晶になったことにより実現した特有の電子状態に起因するものと考えている。

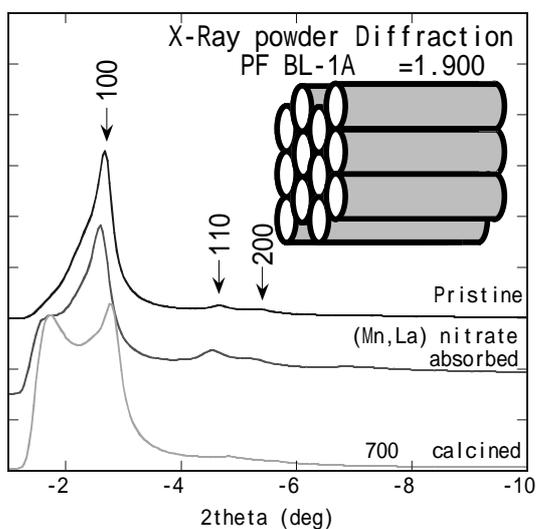


図 1 MCM-41 の模式図と粉末 X 線回折測定の結果

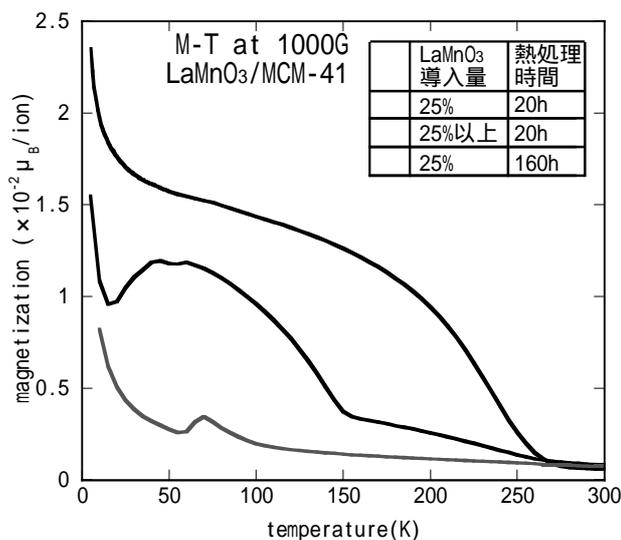


図 2 LaMnO₃ を内包した MCM-41 の磁化測定結果

Electronic multipole order in systems with orbital degrees of freedom

Yoshio Kuramoto

Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University

The dipole order of electrons has long been known as ferromagnetism and antiferromagnetism. The importance of higher electronic multipoles has recently been recognized, and now considered as a key element to understand strange phenomenon such as some phase transition where the order parameter has not been identified. Especially, ordering of octupole moments has been suggested by a number of experiments including rare-earth elements with strong spin-orbit interaction. However, the mechanism has not been identified to stabilize higher multipoles as compared with dipoles. Our research group takes the electronic multipole degrees of freedom strategically, and aims at clarifying the hierarchical dynamical structure of solids by close collaboration of experiment and theory. The followings are topics being studied.

Observation of multipole order by neutron and X-ray scatterings

By using the spectrometer of Tohoku University at JAERI Tokai, we have measured neutron scattering spectra of filled skutterudites, rare-earth borides and borocarbides, and transition metal oxides. Neutrons are suitable to determine crystal and magnetic structures. On the other hand, scattering of high-intensity X-rays, available at Tsukuba and SPring-8, is suitable to probe orbital or quadrupole order of electrons. Higher multipoles such as octupoles may be more easily detected by X-rays. We shall describe results obtained by these probes, and explain their significance.

Excitation spectrum in multipole ordered state

Multipole order should accompany characteristic dynamics in analogy with spin waves emerging in magnets. In Tb and Ho borocarbides, inelastic neutron scattering have revealed incommensurate nearly diffusive structures around the phase transition. We shall describe experimental results and possible mechanism to explain this behavior.

Interaction of multipoles with conduction electrons

Interaction of multipoles with conduction electrons may give rise to Kondo-like phenomena. In fact, some Pr skutterudites show evidence of Kondo effect as well as non-Fermi liquid behavior under magnetic field. Our theoretical members aim at clarifying many-body effects by microscopic methods with full use of analytic and numerical techniques.