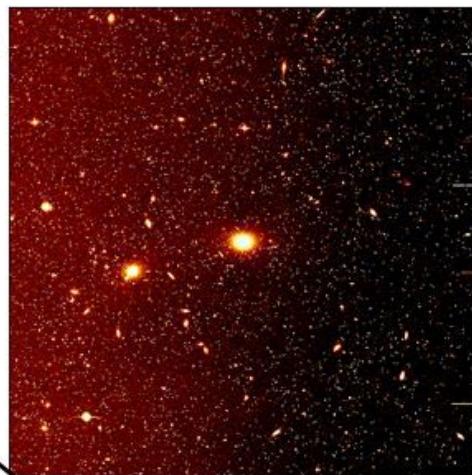
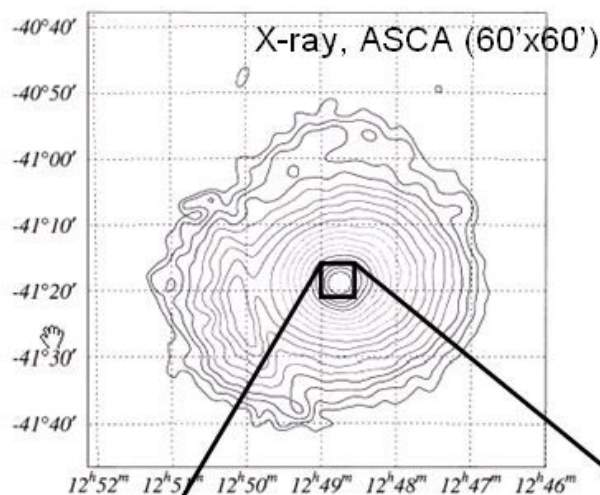


報告

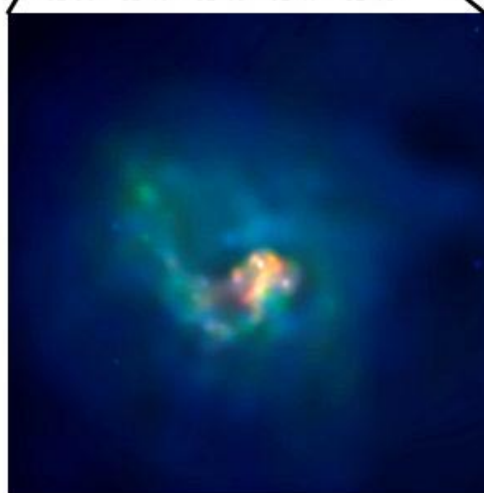
暗黒物質が熱を出す？

宇宙物理学教室 戸谷友則

暗黒物質の起源は宇宙論における最大の謎である。銀河の回転曲線などの観測から、その存在はもはや疑いのない事実として認められているが、暗黒物質が何なのかは、いまだ手がかりすらも得られていないのが実情である。暗黒物質は重力の源として、宇宙における豊かな階層構造の形成において決定的な役割を果たす。しかし、その影響は重力を通してのみであり、それ以外の形で暗黒物質が宇宙の物質進化に影響を与えるとは考えられていない。最近私は、この常識を捨て、暗黒物質が宇宙のバリオンガスを加熱するためのエネルギー源になっていると考えることで宇宙物理学上の問題を解決できる可能性があることを示した。そして、この考えが正しければ、長年我々を悩ませてきた暗黒物質の問題はついに数年のうちに解決するかも知れない。今回はこの場を借りてその新しいアイデアを紹介させて頂きたい。(詳しい内容は T. Totani 2004, Phys. Rev. Lett. 92, 191301 に掲載されている.)



Optical, DSS (60'x60')



The Centaurus Cluster

X-ray, Chandra (3'x3')

ケンタウルス座の銀河団の可視光と X 線のイメージ。中心部の冷却時間が短い、「クーリングフロー銀河団」のひとつ。中心部にはバブルのような構造が見えている。画像提供：国立天文台 (DSS), NASA/CXC/SAO (Chandra), AAS (ASCA)。

第6号の内容

1. 短報

暗黒物質が熱を出す？

2. 研究室紹介

統計物理学研究室

■発行■

京都大学 21COE 物理学の
多様性と普遍性の探求拠
点編集委員会
〒606-8502 京都市左京
区北白川追分町 京都大
学大学院理学研究科 物
理学教室内
TEL: 075-753-3758
FAX: 075-753-3886
e-mail:
21COE@scphys.kyoto-
u.ac.jp

近年注目されている宇宙物理学上の問題として、「銀河団のクーリングフロー問題」というものがある。銀河団とは数百から数千の銀河が密集した、重力的に束縛された系としては宇宙最大の天体である。その強い重力場によって引き寄せられた銀河間ガスは、重力エネルギーが転化した熱によって1億度もの高熱になり、X線で輝くことは良く知られている。多くの銀河団中心では、そのX線放射による冷却時間は銀河団の年齢（宇宙年齢と同程度でざっと100億年）よりずっと短いため、何も加熱源がなければ中心部のガスは冷却し、中心へ落ち込むクーリングフローとなるだろう。――これが銀河団分野で数十年に渡り「常識」とされたクーリングフロー学説である。そして、このクーリングフローを観測的に検証する努力が長く続けられたのだが、近年の最新X線観測によって明らかになったのは、皮肉にも、理論が予想するようなクーリングフローは存在しない、というものであった。（ただし、慣例として現在でも、中心部の冷却時間が短くクーリングフローの存在が「信じられていた」銀河団を「クーリングフロー銀河団」と呼んでいる。）

今や、銀河団の中心部にはクーリングフローを抑制するなんらかの加熱機構が必要であるということが世界的に認められ、様々な可能性が検討されている。超新星爆発のエネルギーでは足りない。活動銀河中心核は解放されるエネルギーとしては何とか足りそうであり、現在最もポピュラーな説であるが、具体的な加熱機構は全く不明である。その活動は一般に間欠的で、どの銀河団でもまんべんなくクーリングフローを止めるというのは難しく見える。周囲の冷えていないガスからの熱伝導は重要なプロセスだが、それでも問題を完全に解決することは難しいとされている。

ここで暗黒物質に話を戻そう。暗黒物質について様々な候補が提案されているが、その中でも最も可能性が高いと思われるのが超対称性粒子ニュートラリーノである。予想されている質量は0.1--10 TeV程度。ニュートラリーノは弱い相互作用しかないが、二つのニュートラリーノ同士が対消滅をしてガンマ線、陽電子、反陽子などを放出することができる。従って、我々の銀河中心などから対消滅起源のガンマ線などを探索するとい

う試みが行われてきた。銀河団中心でも暗黒物質の集中が起きており、対消滅がある程度起きているはずである。対消滅でできた高エネルギー粒子が銀河団ガスに対する熱や圧力の供給源となる可能性はないだろうか？

ニュートラリーノが暗黒物質となる場合、その対消滅断面積は宇宙論的議論から $\sigma_v \approx 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ と制限される。一方、標準的な暗黒物質ハローの密度プロファイル（中心部で $\rho \propto r^{-1}$ ）を仮定すると、対消滅により発生するエネルギー（ 10^{41} erg/s ）はクーリングフロー問題を解決するために必要な量（ 10^{45} erg/s ）に比べはるかに小さい。

しかし、中心部で冷却が起きるような銀河団の中心には常に巨大なcD銀河が存在していて、その中心には超巨大ブラックホールがあると考えられる。そのブラックホールの存在により、周辺の暗黒物質はより中心部に引き寄せられ、密度プロファイルが変わる。この変化したプロファイルが、ブラックホールが断熱的に成長した場合に適用できる単純な解析解になっているとすると、対消滅の頻度は中心に向かって発散するようになり、けた違いに高いエネルギーの解放が期待できる。簡単な評価により、この場合、解放エネルギーはちょうどクーリングフローに拮抗するぐらいのエネルギーが出ることが見いだされた。そして、対消滅で作られた電子陽電子対は比較的短い時間スケールで周囲のガスを加熱することでそのエネルギーを失う。

このシナリオは、銀河団中心に加熱源を与えるという意味で、活動銀河中心核によるものと似ている。しかし、ニュートラリーノ対消滅による加熱は、一度そういう状況になれば宇宙年齢程度の時間で比較的安定した加熱源となるところが活動銀河中心核に対する利点である。対消滅によるエネルギー解放がどこまで強くなるかは中心ブラックホールの成長の度合いで決まり、その成長はクーリングフローによるガス供給でコントロールされていると考えれば、ちょうどクーリン

グフローを抑制するところまで対消滅エネルギー量が上昇するというフィードバック機構が働く可能性がある。また、高エネルギー粒子によって銀河団中心部にバブルが形成されると期待されるが、実際にクーリングフロー銀河団の中心にはX線や電波でバブルが観測されることが多い。(通説ではこのバブルは活動銀河中心核からの宇宙線ということになっているが、では活動銀河中心核からどうやってそんな量の宇宙線を出すかについては全く不明である。ニュートラリーノならば解放されたエネルギーは直接、宇宙線に転換されるという利点がある。)

このシナリオが予言する、銀河団中心における対消滅からのガンマ線強度は次世代のガンマ線観測装置 (カンガルー望遠鏡やGLAST 衛星など) によって検出可能なものである。特に、ニュートラリーノ質量に対応したエネルギーのラインガンマ線が見え

れば暗黒物質起源の決定的な証拠となろう。対消滅ガンマ線の探索は主に天の川銀河中心などに対して行われてきたが、私のシナリオが正しければブラックホールによる密度プロファイルの変化の効果が極めて大きい。天の川銀河中心よりも銀河団からのガンマ線のほうが検出しやすいのではないかと考えている。

かつて、「太陽から出ているべきニュートラリーノが理論の予想どおりに観測されない」という太陽ニュートラリーノ問題は素粒子物理学上の一大ブレークスルーをもたらした。「銀河団ガスが理論の予想どおりに冷却してくれない」というクーリングフロー問題が、宇宙論、宇宙物理学と素粒子物理学にわたる新たなブレークスルーをもたらしてくれることを、いま私は夢見ている。

研究室紹介

統計物理学研究室

研究室スタッフ：

教授 小貫明、講師 山本量一、助手 北村光

広い意味での非平衡非線形物理学と物質に即した相転移理論を両輪としている。狭い問題設定は排除したい、だれもやってないことを広く多く手がけたいという欲望のもと頑張っている。以下のような問題が最近の研究対象である。

相転移ダイナミクス

相転移に伴う不均一構造のダイナミクスは多くの対象と研究があるがいまだに開拓の余地の大きい分野である。身近な例は流体の液体・気体への相分離や、棒状の分子から構成される液晶において分子配向のそろった状態の出現などがある。固体中では構造変化に伴う所謂メゾスケールのダイナミクスがいまだに手付かずの問題である。流体力学の分野では 沸騰や濡れ現象などの相転移が関与する流動現象は未知の側面が大きいし、液晶や超流動における渦や欠陥の関与する非線形流動現象は将来の魅力的分野である。このような現象の比較的単純な動的モデルに対しては深い理解が進んできたが、現実系で重要な多様な現象の理解は難しい。我々は特にメゾスケールで現れる現象を理解するため動的モデルの構築と解析の努力をしている。ここでは新しい効果の予言が重要と考えている。

我々は流体系・高分子系の仕事を多く手がけてきたが、同時に固体での相転移ダイナミクスにおいて「弾性的長距離相互作用」がメゾスケールで肝要であることを主張してきた。この相互作用の重要性は実験的にはほぼ自明であるが、従来の固体物理学者にはほとんど認識されていないとあえて挑戦的に申し上げたい。しかし我々の output が足りないと思い努力したい。またこの分野の専門書として小貫のものがある（“Phase Transition Dynamics”, Cambridge, 2002）。これは関連問題のレジメであり次のステップへの準備である。

ソフトマターの動力学

ソフトマターは、高分子、液晶、両親媒性分子、コロイド、蛋白質などのソフトな力学的性質を持つ物質群の総称であり、物理学・化学・生物学・材料科学の分野にまたがる学際的な性格をもつ重要な物質群として最近大きな注目を集めている。ソフトマターのソフトさの起源は、大きくてのろまな構成要素にある。実際、ソフトマター、生体などは、ほとんどの場合、このような大きくてのろまな分子（高分子・コロイド・DNA・蛋白質など）とすばしっこい分子（水など）の動的に非対称な成分からなる混合系として捉えることができる。柔らかいというのは、文字どおり弾性率が極めて小さいか零であるということとともに、選択された状態が本質的に不安定化しやすい相転移点近傍の状態であることにも由来する。このような柔らかい系は流動・弾性・塑性に対し敏感であり、大変形の結果、非平衡相転移が誘起されやすい。このためソフトマターは非線形非平衡状態研究の宝庫といえる。また電荷の相互作用と水分子などの著しい電氣的極性が相転移に重要な役割を果たしている。

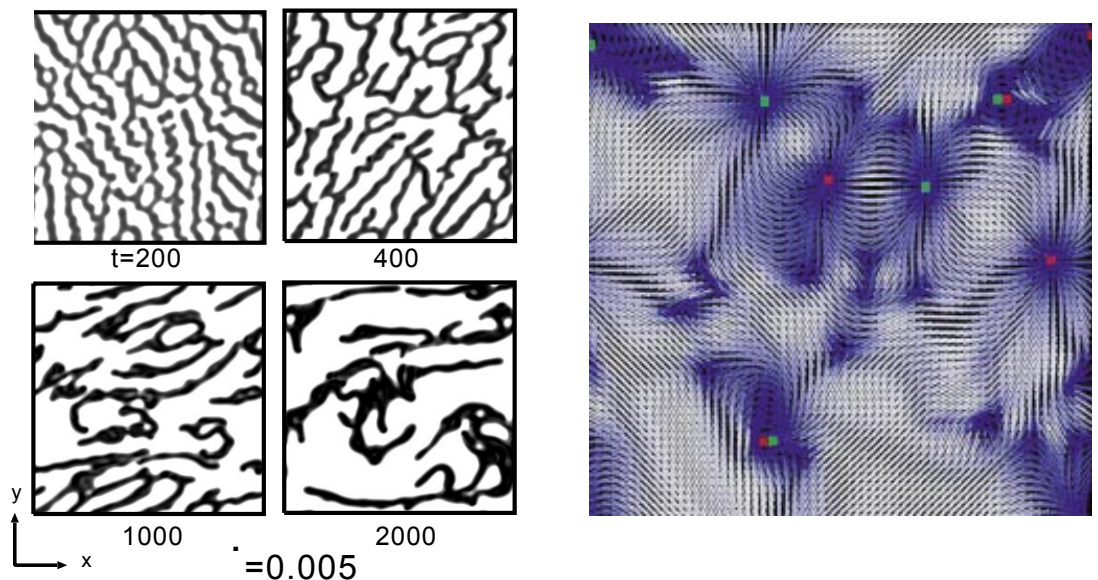


図1. Phase-separating polymer solution under weak shear flow (left). Ions in a liquid crystal (right).

ごく最近の我々の研究例を示す。図1左では粘っこい高分子が相分離している状態をわずかに流動させてみた。粘っこい領域（黒）は連結したゲルのようであり、流動によりちぎれていく。図1右では液晶にイオンをわずかに混入させており液晶分子の配向が長距離領域で乱れている有様を示す。液晶分子はイオンの近傍で強い

電場を感じている。同様に極性の高い水などを含む液体でも臨界点近傍では「臨界揺らぎ」がイオンにより大変形を受ける。即ち、物理化学で良く知られた「水和現象」が臨界点近傍では協同現象として重要になる。このような系では極めてわずかの電荷混入でも不均一な強い相関状態が実現されると思われる。ちなみに誘電体などの固体でも様々な相転移が関与するため、似たような不均一状態が実現される。

ガラス動力学

ガラス転移と呼ばれるこの液体⇔(amorphous) 固体変化に関してはこれまでに膨大な研究がなされているが、いまだその本質的なメカニズムについては解明されていない。このガラス転移現象の最も重要な特徴は、転移点近傍で動的な性質（構造緩和時間・粘性率など）が12桁以上もの劇的な変化を示すのに対し、静的な性質（圧力・体積・液体構造など）は僅かしか変化しないという点にある。このような動的性質の変化をもたらす原因を明らかにすることが、ガラス転移の本質を理解することとなる。最近我々は大規模な分子動力学シミュレーションを行い、「動的不均一性」という新しい概念を導入することにより過冷却・ガラス状物質の動的性質や非線形応答を理解しようと試みた。この動的不均一性は粒子の協同運動を反映した量である。図2では過冷却液体で長い時間間隔において見えてくる顕著に動いた粒子を取り出している。球の半径は動いた距離を表すようにした。低温であればあるほど活性化した領域と非活性化した領域の不均一性が増大していく。あたかも温度を下げると臨界点に接近するが如き際立った効果である。

ガラスは平衡状態から遠く離れた（誰も明確に特定したことの無い）乱れた状態にある。いかに小さい変形にたいしても非線形に応答するし、極めて遅い構造の緩和「aging」が昔から知られている。このような異常な動力学の研究は挑戦的であるが、古い問題でもあり新しい見方・概念がないと実りが無い。

固体の塑性変形機構

我々は臨界点近傍の流体や高分子などの複雑液体の流動状態を調べてきたが、固体状態の非線形変形機構の研究も始めている。図3右では2次元の結晶に大きなせん断変形を与えた場合の粒子変形を示す。大量の格子欠陥が現れ、塑性変形がメソスケールで局在化したshear bandと呼ばれる領域の成長がみられる。このように欠陥を大量発生させていくと結晶はamorphous固体に移り変わる野ではないかと考えられる。この点を考慮して我々は最近amorphous固体の動的モデルを構築してい

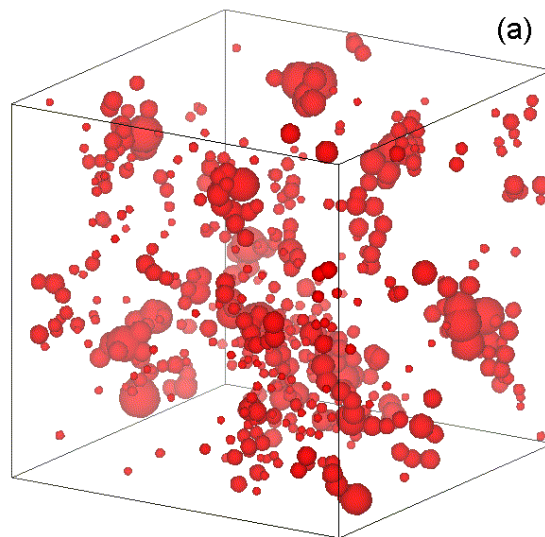


図 2. Dynamic heterogeneity in diffusion in a supercooled liquid.

る。そこでは「自由体積」と呼ばれる粒子密度と格子密度の差（局所的隙間）の遅い緩和がガラス的緩和の原因となると主張している。図3左ではこの自由体積が格子欠陥の周りに集まっていることを示す。弾性エネルギーの集中した欠陥領域に自由体積が増えるようにモデル設定をしている。また相転移と塑性変形の結合した問題は冶金学・金属材料学における中心的対象である。例えば繰り返し変形を与えた合金「刀」がなぜ強靱なのかといった問題と結びついている（加工硬化と呼ばれる効果）。

（物理第一教室 小貫 明）

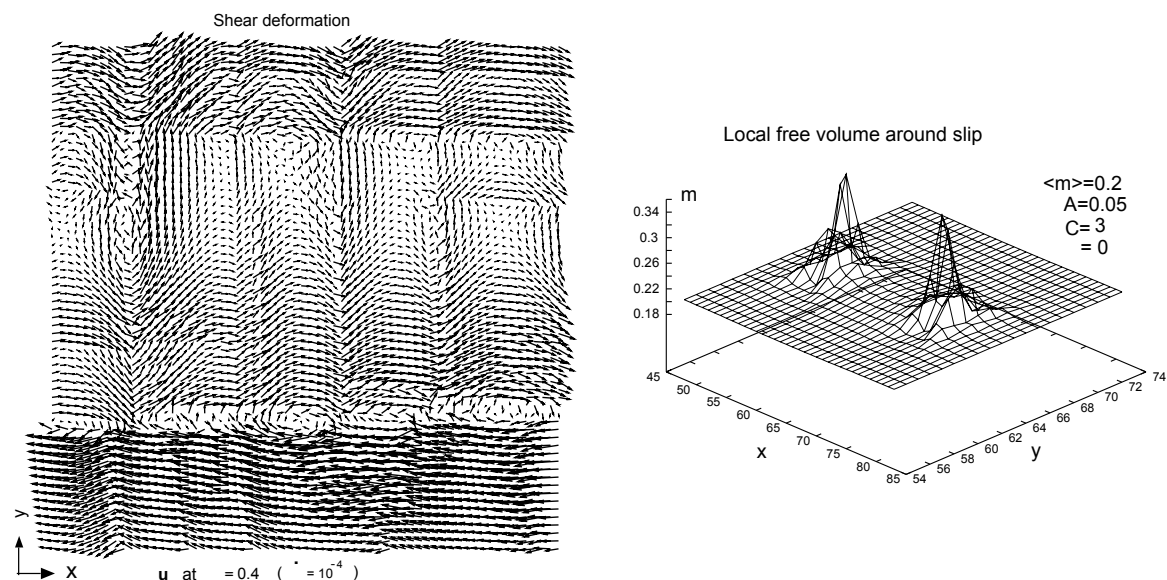


図3. Displacement in plastic deformation in a solid (left). Free-volume accumulation around defects (right).

編集後記

NEWSLETTER も今回で第6号、ちょうど半年分となりました。これを一区切りとして、一度プリントアウトしたものを冊子体として配布しようと考えています。皆さんこの機会に是非一度読んでみてください。

さて、今回もだいぶ出版が遅れているのがばれてしまいそうですが、アテネオリンピックも昨夜で終わってしまいました。連日のTV観戦で蓄積した寝不足を解消するのにまだしばらく時間がかかりそうです。日本選手は金16、銀9、銅12と、これまで最多だったロサンゼルス大会を越える多数のメダルを獲得しました。「参加することに意義がある」とはいえ、日本人選手がメダルを取るとやはり大いに盛り上がるものです。物理界限でも、一昨年、小柴先生のノーベル賞受章で大変盛り上がったのは記憶に新しいところです。やはり何よりの啓蒙活動は「メダル」の獲得と言うことなのでしょうか。私も、日本における科学の啓蒙活動にほんの少しでも貢献できるよう、もう一度気を引き締めて研究に精進しなくては、と思っています。

（編集委員 国友 浩）

■発行■
 京都大学 21COE 物理学の
 多様性と普遍性の探求拠点
 編集委員会
 〒606-8502 京都市左京区
 北白川追分町 京都大学
 大学院理学研究科 物理学
 教室内
 TEL: 075-753-3758
 FAX: 075-753-3886
 e-mail:
 21COE@scphys.kyoto-u.
 ac.jp

21COE 物理学の多様性と普遍性の探求拠点
 CDUP NEWS LETTER 編集委員会

柴田一成
 鶴 剛
 国友浩
 田中耕一郎（編集長）

shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp
 tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp
 kunitomo@yukawa.kyoto-u.ac.jp
 kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp

第6号
 平成16年9月20日発行