パワーレーザーを用いた固体－プラズマ中間状態の研究

米田 仁紀

電気通信大学レーザー新世代研究センター (〒182-8585 調布市調布ヶ丘1-5-1)

Warm Dense Matter Research Works with High Power Lasers

Hitoki YONEDA

Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received October 18, 2012)

In this article, recent research works of warm dense matter are introduced. In the warm dense matter research, how to diagnose the condition is always discussed because there are several difficulties. Recently, there are many probe experiments with various probes produced by high power lasers. For example, the X-ray Thomson scattering is now strong tool for determining the electron temperature and density simultaneously. Beside it there are other potential methods to measure the parameters of the warm dense matter. They include the fast e-beam diffraction and photoelectron spectroscopy. Features of each probe measurement are briefly mentioned and the relation between unknown physics in warm dense matter and expected measured parameters from these new diagnostics are introduced.

Key Words: Warm dense matter, Strongly coupled plasma, Two fluid condition, Equation of state, Critical point

1. はじめに

固体密度程度で温度が数eV前後にある固体－プラズマ中間状態のことを、Warm Dense Matter(WDM)と呼ぶ。このWDM領域には、固体物理のモデルが外挿されても、プラズマ物理モデルが外挿されても大きく予想から外れることが多く、新しい物理を考えるいい土俵となっている。(この詳細な物理過程の特異性については参考文献1)を参照していただきたい。)この領域は、また、単に基礎科学的、物性物理学的な興味だけではなく、レーザー加工、レーザーピーニング、アーク放電の電極近傍、再突入宇宙船の熱緩和物質、核融合装置におけるダイバータ部など様々な応用に対しても関連がある。また、巨大惑星内の構造や自己磁場発生をモデリングする際の重要なパラメータ領域にもなっている。この物質状態は、いわゆる高エネルギー密度状態の中ではもっともエネルギー密度が低く、 $10^{10} \sim 10^{11}$ J/m³の領域にあることが多い。例えば $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ の大きさのWDM状態は、 $2 \sim 3$ mJ以下のエネルギー付与で可能になる。そのため、パワーレーザーの余裕あるパワーを使ってレーザーなどをイオンビーム²⁾、輻射に変換³⁾させ、固体ターゲットへのエネルギー付与のされかたなどで特徴を出している実験や、計測する側のプローブ(これもレーザーから白色化した広帯域光源、イオン

ビーム、電子ビーム、輻射など様々に変換している)を作るためにパワーレーザーを用いることが増えてきている。最近日本でも発振に成功したX線自由電子レーザーも、期待された通り新しいWDM研究の展開をみせている。わずかなエネルギーで作ったWDMを1 kmにもおよぶ加速器で作ったコヒーレントX線でも測定する科学的価値があるというメッセージであろう。本解説では、WDM領域の物理理解に向けた最近の実験研究を中心に、この領域の進展を紹介する。

2. Warm dense matter領域で今後解明が期待されている物理

WDM領域は、密度、温度パラメータ空間上では、固体物理学とプラズマ物理学が取り扱うパラメータの中間に位置している。WDM領域研究の大きな動機の一つに、この領域において固体物理学とプラズマ物理学双方の物理モデルを外挿しても説明できない事象が多く発生しているということがある。例えば、銅線を大電流で高速に加熱してプラズマ化する場合、固体物理学的には、電流を担っている自由電子のフォノンとの散乱が温度上昇とともに増加し、DC抵抗率が上昇する。一方、完全電離のプラズマの抵抗率モデルでは一般にスピッツァー抵抗が使われるが、これは、電子温度の $-3/2$ 乗に比例

して低下する。Fig. 1に衝突周波数の温度依存性を示しているが、これら2つのモデル中で定義される衝突周波数、平均自由行程を考えた場合、平均自由行程がイオン原子間よりも短くなるような値にWDM領域ではなってしまう。このため衝突周波数は頭打ちするようなモデルも考えられている⁴⁾が、実験では2~3桁もDC抵抗率が上昇することが観測されており、衝突周波数のモデルだけでは説明できていない。AC導電率についても光学プローブを中心に多くの測定が行われており、その異常性は観測されている¹⁾が、それを説明する物理モデルとなると完全には理解されてはいない。

また、状態方程式が支配する流体力学的なふるまいでは、WDMのある領域に入ると金属の膨張が止まることが干渉計測などで観測されている。これは気液2相流体領域における音速の急激な減少と考えられているが、ほとんどの金属においてその境界線、特にこの2相領域の最高温度の点である臨界点の理論予測は、非常に難しくなっている。これは、ミクロに見れば原子が固体状態からその秩序だった位置を変える液体状態の物質であっても、融点が高いために原子はもはや基底状態だけではなく、自由電子、束縛電子、イオン、中性原子とすべてを考慮しないとその物性を表記できなくなっているからである⁵⁾。

最近、これらWDM領域の物性を予測する方法として、量子力学的な分子動力学シミュレーション(Quantum Molecular Dynamic(QMD)simulation)が用いられるようになってきた⁶⁾。これは、最近の固体物理学研究で一般的に使用される密度汎関数理論(Density functional theory: DFT)において、それぞれの原子の波動関数を励起状態まで使えるようにしたもので、普通の分子動力学シミュレーションからみれば、高密度化による多体の問題をその内部エネルギー変化まで考慮した形で解いていることになる。このQMD計算により、一部の金属で観測

されていた固体からわずかに密度低下が起きた場合の導電率の数値に及ぶ減少は“計算”できるようになってきた⁶⁾。また、これを用いれば、WDM内部の原子、電子の位置、電子雲の状態も視覚的に把握することが可能である。大きな導電率の低下は一樣な系から非一樣性が増加した点でもあることがわかってきている。しかし、このように導電率の数値的な予測はできてきたが、まだ、その物理的な理解、理論を構築できるところまでは至っていない。特にミクロな系の性質がマクロなパラメータにどう関係がつけられていくかは、他の分野同様に大きな問題であるが、WDM領域で生じている特徴的な変化の詳細な原因は、まだ未解決部分が多い。さらに、温度、密度、圧力、AC導電率である光の波長領域での複素屈折率などは、電子-イオン間の相互作用に非常に影響を受け、実験的な計測の困難さもあって、モデルや数値の検証ができていない。原理的には上述したQMD計算により、ある温度密度の物質内の原子位置、速度の情報はえられるので、それらの相関をとることで、拡散係数、粘性率、導電率といったものも計算できる。しかし、計算の空間的な領域がQMD計算では小さく、一部を除きこれらの係数そのものを測定した実験データがないため、モデルの精度を確かめるところまではできていない。この意味でも、まだまだ観測と理論との詳細な比較が必要な研究領域になっている。

3. 実験的な困難さと解決方法

WDM研究での実験的な困難さは、急速な膨張過程を伴うことにある。エネルギー密度 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ J/m}^3$ ということは、圧力にして100万気圧程度に相当するからである。また、生成されたものが固体密度程度であることから、中を覗いて観測するためには、透過できるプローブ光が必要になる。ある領域においては自発光なども使われるが、元来あまり温度が高くない領域のために、発光強度はそれほど強くない。そのために、最近ではクリアな実験条件を得るために、次のようなものを測定対象にするようになってきた。

- (1) サブ100 fs秒の超短パルスレーザーによる固体加熱
- (2) レーザー生成イオンビーム、電子ビームによる固体加熱
- (3) X線自由電子レーザーを用いた固体加熱
- (4) レーザー生成衝撃波、圧力波加熱による生成
- (5) 初期密度をあらかじめ増減させた状態からの等容的な加熱

(1)は10 eV程度の固体プラズマを考えた場合、その表面の膨張は数百fsかかることからその間に観測を終わらせることで、一樣性を保とうという考えに基づいている。(2)はレーザーの固体密度での相互作用が臨界密度近傍になっていることを打開するために、吸収長の長いビームに変換してWDM状態を生成させることである。(3)はX線レーザーができる高い集光性能、高強度照射と、固体密度状態であっても数値程度であれば臨界周波数より高いために常に固体内で相互作用が起きるように

Fig. 1 Extrapolations of conductivity model from condensed matter model(left line) and plasma one (right line). The upper line of $(r_0/v_e)^{-1}$ shows the mean free path of electron is limited by atom distance in solid density condition.

する方法である。(4)は、WDM領域の中で高密度側の物性を調べる際に用いられる方法であるが、単純な単一衝撃波圧縮ではなくて、多段衝撃波にしたり、プラズマなどの圧力を用いて等エントロピーに近い状態で圧縮させ、衝撃波特性で決まってしまう温度密度以外の状態も観測できるようにした方法である。(5)は、超短パルスレーザー、X線などで加熱する際に、容積が変わらずに温度だけが上昇する方法をとるが、その初期状態を、フォーム状態にあるターゲットを用いることで、低密度化した状態を生成させる方法である。これとは逆に、プレ圧縮により高密度を狙うことも(4)の場合では行われている。

一方計測に対しては、

- (a) 高強度X線源によるX線非線形散乱
- (b) 光生成電子ビームによる回折
- (c) 高エネルギー光子により電子を真空準位にまで上げて直接観測

する方法などが新たに行われつつある。この中で(a)はWDM研究の観測上の大きな困難といわれた密度、温度を同時に観測する手法として行われるようになったX線のトムソン散乱、電子の運動量空間の情報を直接観測できる非線形コンプトン散乱などがあげられる。いずれも、より詳細で精度の高い観測データを得る努力がされてきている。次章で、それらの研究により明らかになってきた物性やその理解について紹介する。

4. 最近の研究

4.1 X線散乱実験

電子のトムソン散乱は、その周波数シフト量から多くの状態を観測することが可能である。ただし、散乱断面積が $\sigma_e = 6.6 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ と非常に小さいため、これまではレーザー核融合実験で使用する大型レーザーによる加熱X線を光源として、別のレーザーでWDM状態を作り観測する手法が最初に行われてきた³⁾。簡単に必要な光子数を見積もると、固体密度程度の $n_e = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ の電子密度を対象とした場合、観測空間分解能を $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$ と仮定すると散乱確率は $n_e \sigma_e L = 6 \times 10^{-5}$ となる。光源から観測対象までの立体角、観測対象から検出器までの立体角を考えた場合の検出効率を 10^{-4} 程度(1 mの距離で1 cm程度に相当)と考え、スペクトルを得るために必要な光子数をおよそ 10^5 と考えると、 10^{14} 個のX線光子が必要であり、それはkeVのX線では10 mJ程度になる。この数字の大きさが、大型装置でしか実現できなかった理由でもある。この状況は、観測するX線に強い指向性、単色性を持たせる、すなわち最近開発されてきたX線自由電子レーザーを用いれば、けた違いに小さくなる。立体角、単一スペクトル当たりの光子密度が増加することにより、10 μJ でもS/Nのよいスペクトルが期待できる⁷⁾。

この測定のもっとも大きな利点は、1つのスペクトル観測データで温度密度を決定できることである。具体的には散乱スペクトル要素は以下の式で与えられる⁸⁾。

$$S(k, \omega) = [f_i(k) + q(k)]^2 S_{ii}(k, \omega) + Z_f S_{ee}^0(k, \omega) + Z_c \int \tilde{S}_{ee}(k, \omega - \omega') S_s(k, \omega') d\omega' \quad (1)$$

ここで、右辺第1項は弾性散乱を、第2、第3項は非弾性散乱を示している。右辺第2項は、自由電子の散乱要素であり電子-電子の相関関数 $S_{ee}^0(k, \omega)$ と電荷数の積で表されている。(通常の光学領域の散乱は、この項による散乱を計測することが多い。)一方、これに対して、第3項は束縛された電子がプローブX線により自由電子状態までなるものであり、束縛自由遷移とイオンの運動を表す項との積を、様々な周波数で積分した形になっている。(散乱した ω の波が発生するには、入射のX線とイオンの初期速度、散乱角度により様々な場合がありうる。)最後に第1項は、束縛された電子による散乱であり、イオン-イオンの密度相関 $S_{ii}(k, \omega)$ で記述され、イオン内の電子 $f_i(k)$ とそれをシールドしている電子の効果 $q(k)$ 双方の和となっている。 Z_f は自由電子の Z_c は束縛電子の数を表し、 $S_{ii}(k, \omega)$ 、 $S_{ee}^0(k, \omega)$ 、 $\tilde{S}_{ee}(k, \omega - \omega')$ 、 $S_s(k, \omega)$ はそれぞれ、イオン-イオン相関関数、電子-電子相関関数、束縛電子(S_s)-自由電子(S_{ee})間の相関関数と呼ばれ、散乱能を表す係数になっている。

この式は、Fig. 2に示されてるように散乱X線には大きく分けて3つの周波数成分を含んでいることになる。それぞれは、入射の周波数に対して、第1の成分はエネルギーシフトがなく、第2、第3の成分は $h\nu/mc^2$ のコンプトン成分だけずれた点に現れる。後者の成分の中では、前者の成分と同様の狭い幅を持つものと、電子が感じるドップラー効果の広がりを持つものに分けられる。このようにスペクトル幅やシフト量において違った成分に分けられ、観測されたスペクトルから比較的良好な形で成分分離をさせることができる。温度密度の同時測定と、束縛状態にある電子の密度、電荷数までスペクトル形状を合わせることで決定できるのが大きな利点となっている。また、これらの成分は、Fig. 3に表されるようにWDM領域の電子の応答を決める3つの状態、すなわち、自由電子、束縛電子、部分的束縛-自由電子のそれぞれの成分になっている。もちろん、WDMではその対象と

Fig. 2 Spectrum of X-ray Thomson scattering from warm dense matter. There are one elastic component (with tightly bound electrons) and two inelastic component (with weakly bound electrons and free electrons).

Fig. 3 Idea of electron's state in warm dense matter.

なる密度が固体密度近傍であるために、内部の観測にはX線を使う必要がある。これもまたこの測定方法にとって大きなメリットである。

4.2 超短パルス電子回折

前章で取り扱ったように、X線散乱を測定することによって、主に自由電子、束縛電子の速度分布関数に対する情報を得ることができる。一方、物性を把握するうえでは、構造因子を測定することも重要な要素になっている。WDMでは、高速物性変化、および、空間的にパラメータが大きく変化することから、シングルショットでの観測が必要となり、十分な回折実験は行われていない。しかし、最近、超短パルスレーザーにより生成された電子を加速ギャップにより加速し、その電子ビームによる回折像をCCDなどの検出効率の高い2次元検出器で検出する手法が開発されている⁹⁾。また、電子ビーム生成後に、その空間電荷による空間広がりやを補正するために、シーケンスをつけて電荷量を上げる試みも行われている¹⁰⁾。Fig. 4にこの手法の概念図を示している。この方法を用いることで、結晶の秩序性が崩れ、結晶に付随したブラッグピークの強度が弱くなる様子や固体-液体相転移などを高い時間分解能で観測できるようになっている。例えば、Auの単結晶膜を 10^3 J/m^2 程度の吸収フルエンスで照射した場合、融点の3~4倍の温度まで固体が液化しない、いわゆる過加熱状態も観測されている⁹⁾。現状では、これらの計測は融点を越えた程度の計測にとどまっているが、加熱レーザー強度をあげることによって、WDM領域でも導電率モデルにおける秩序性の損失の及ぼす影響が定量的に明らかになってくるだろう。固体物理学の常識として、金属での良導性は原子の並びが

Fig. 4 Schematic drawing of ultra-fast electron beam diffraction system.

秩序よく並ぶことにより周期境界条件となり、伝導バンド構造ができ、この中で自由電子様電子が低い損失により移動することで高い導電率を示す。WDM条件になり、密度がほぼ固定されたまま物質の温度が融点、沸点以上になり、原子位置が変化しさらに秩序性を失うことがどう、導電率に影響するかは、直接的な観測は、これまでのところない。

4.3 時間-角度分解型光電子分光

固体金属のマクロな性質を議論するうえで、フェルミ面の形がどのように変化していくのかは、大きな情報となりうる。最近、時間-角度分解型光電子分光法(Time-and angle-resolved photoemission spectroscopy: trARPES)¹¹⁾が固体の超高速光応答性を測る研究の中で使われるようになってきている。Fig. 5に概念図を示している。この手法では、真空紫外光を用いることで伝導帯内の電子を仕事関数 Φ を超えた真空準位以上に直接励起させ、自由電子となった電子の運動エネルギーを飛行時間分解などの手法で観測する。電子は、低温ではフェルミ面でその密度が大きく減少するので、 $h\nu - \Phi$ のエネルギー以下の電子が多く観測されるが、その外に飛出した電子エネルギー分布 E_k は固体内のフェルミ面近傍の電子のエネルギー状態密度 $(E - E_F = E_k - (h\nu - \Phi))$ を与えることになる。あらかじめ近赤外レーザーにより伝導帯内の電子をフェルミ面より上に励起すれば、その励起成分とその緩和過程を含めて電子の状態密度を観測できる。これに角度分解情報を入れることで、運動量-エネルギー空間での電子構造を決定でき、例えば融点近傍で電子の状態密度関数がどのように変化するか、電荷密度波(Charge density wave)が駆動する金属-絶縁体遷移などが100 fs程度の時間分解能を持って観測されている¹¹⁾。この手法もまだ、温度の高いWDM領域の物性研究には使われていないが、ポンプ強度を増加することで電子状態密度の詳細な変化を得ることが可能であろう。

4.4 光プローブの困難性

WDM状態は、高い密度を持っており光学的には不透明な状態であることが多い。そのために、光学波長の計測では、その遮断密度近傍の表皮効果部分の情報を測定していることになる。もちろん、プローブ光を短波長化してより内部を測定することは可能であるが、その場合は、自由電子的な電子成分が測定しづらくなり、むしろ

Fig. 5 Method of laser heated Fermi-level information with IR laser pump and VUV probe lasers.

原子分極率が測定対象となってしまう。WDM研究では、例えば導電率の大きな変化など電子の局在化は大きな観測対象のひとつとなっているために、光学波長領域で広帯域な複素誘電特性の同定が重要である。

固体を初期状態としてWDMを生成させた場合、表面は、その音速に応じて膨張しているの、時間が経過するにつれてバルク状態から離れた密度の低い成分を通し、しかもパラメータが大きく変わっているものを計測することになる。したがって、この場合、データから物性値への同定が難しくなる。この表面膨張成分が可視～近赤外光のプロープ計測で無視できなくなる時間は、Morikami¹²⁾らにより10 eV前後の加熱で評価されているが、およそ数百fsとなっている。この困難さを緩和する手法としては、より短時間でWDMを生成させ、計測時間も短くすることが考えられる。この場合、密度変化は初期状態の密度を変えて対応することが提案されている。

一方、温度計測等では発光計測が利用されることがある。上述のように、表面に薄い層ができてしまうと計測上注意が必要になる。厄介なのは、その表面にできた物質の物性値もWDM領域であるため、予測できない場合があることだ。例えば、通常の輻射温度計測を考えた場合、外部からの輻射観測では、その観測波長で見た場合の光学長(Optical Density: OD)が1程度の部分の温度が観測されることになる。当然透明に近い物質、すなわち誘電性をもって共鳴周波数がプロープ波長にはない場合は、表面に膨張した成分はODが小さく問題とならない。一方、共鳴周波数に近い場合と金属性が保たれている場合には、ODが非常に大きくなる。例えば、Alは、自由電子性が固体状態からかなり高温まで保たれていると考えられているが、もし、自由電子モデルであるDrude法則の減衰係数が保たれると考えた場合、断熱膨張の厚みが $c_s \tau = 10$ nm程度(断熱膨張の場合、密度分布は $\exp[-x/c_s t]$ の関数となる。ここで c_s は音速、 t は開始からの時刻であり、 $c_s t$ の特性長を持った膨張と言える。)の場合でも、主な観測対象となるOD=1の点は17 nmの点にあり、バルク温度の数分の1の温度を計測してしまうことになる。一方、水銀のように、膨張した際に金属-非金属転移を起こしている場合には、10 nmの膨張でもOD=1の点は5 nmの地点にあり、温度低下は10%程度になる。Fig. 6にはAl, Hgの場合について、密度分布 $\rho(x)$ (点線)と消衰係数 $k(x)$ の空間分布形状の違いを図示している。このように、WDM領域では、その物性定数が予測や外挿に反して大きく変化することがあるが、それ自体が、測定上の制限にもなりうるということがわかる。このような困難さがあるにも関わらず、光学測定は広い波長領域の計測からフォノン、電子分極率、原子分極率などの計測が可能になり、なおかつサブ100 fsの分解能で調べられるために有用性が高い。このため、この光学厚みの不確かさによる影響などを低減するためにサブ100 fsで超広帯域のプロープ計測が重要になってきている。ガスの非線形を利用した超広帯域光発生にもパワーレーザーが必要で、今後高調波を含む真空紫外領域まで

Fig. 6 Opacity and density profile for Al and Hg surface. Adiabatic expansion model is assumed for both cases. Even though density profiles $\rho(x)$ have similarity but the opacity profiles are very different because of the variety of AC conductivity condition in warm dense matter phase. In Al case, after 2.5 ps from the onset of expansion from 2 eV solid surface, the measured radiation for temperature measurement is from $x = 18$ nm far from the initial surface. In Hg case, the observed radiation is come from $x = -7$ nm.

発展した計測もWDMの物性を明らかにすることに使われていくであろう。

5. まとめ

WDM領域の特異な物性を理解するために、多くの新しいアイデアを取り込んだ様々な実験研究が進んできている。中でもとりわけ、パワーレーザーの強度を利用して、様々なプロープ計測を可能にしたり、比較的大きなWDM領域を生成させることで測定のしやすさやS/Nの高い計測を可能にする努力が払われている。前述したように、WDM領域の生成にはそれほど大きなパワー密度は必要なく、むしろその計測手法にパワーレーザーの特性を活かし、精度の高い研究が多くなってきているように思う。究極的には、あるミクロな空間の電子温度、電子密度、構造係数、速度分布関数、電子エネルギー単位状態などが決定できることができれば、WDM領域に入ると起きる急激なマクロパラメータの変化の理由を明らかにすることができる。しかし、様々な手法が提案されているものの、WDM領域での物理理解の進展まではまだ至っていない。より新しいアイデアを入れた今後の研究発展が期待される。

参考文献

- 1) Warm dense matter 物性に関しては日本語での解説が以下などにある。米田 仁紀, プラズマ・核融合学会誌 **81** (2005) 172.
- 2) P. K. Patel, A. J. Mackinnon, M. H. Key, T. E. Cowan, M. E. Foord, M. Allen, D. F. Price, H. Ruhl, P. T. Springer, and R. Stephens: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 125004.
- 3) S. H. Glenzer *et al.*: Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 175002.
- 4) K. Eidmann, J. Meyer-ter-Vehn, and T. Schlegel: Phys. Rev. E **62** (2000) 1202.
- 5) H. Kitamura: Predicting the gas-liquid transition of mercury from interatomic many-body interaction, J. Phys.: Conf. Ser. **98** (2008) 052010.
- 6) M. P. Desjarlais, J. D. Kress, and L. A. Collins: Phys. Rev. E **66** (2002) 025401(R).
- 7) R. W. Lee, H. A. Baldis, R. C. Cauble, O. L. Landen, J. S. Wark, A. Ng, S. J. Rose, C. Lewis, D. Riley, J.-C. Gauthier, *et al.*: Laser and Particle Beams **20** (2002) 527.
- 8) J. Chihara: J. Phys. F: Met. Phys. **17** (1987) 295.
- 9) Ralph Ernstorfer *et al.*: Science **323** (2009) 1033.
- 10) S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, T. Nishoji, K. Otani, and S. Sakabe: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 215004.
- 11) F. Schmitt, P. S. Kirchmann, U. Bovensiepen, R. G. Moore, L. Rettig, M. Krenz, J.-H. Chu, N. Ru, L. Perfetti, D. H. Lu, *et al.*: Science **321** (2008) 1649.
- 12) H. Morikami, H. Yoneda, K. Ueda, and R. M. More: Phys. Rev. E. **70** (2004) 035401.

レーザーワード

ウォーム デンス マター (warm dense matter: WDM)

固体物理学が対象とする領域と、プラズマ物理学が対象とする領域との間にある、温度1 eV~100 eV、密度が固体密度の 10^{-3} ~10倍程度のパラメータ領域を示すことが多い。温度密度で領域が規定されているわけではなく、むしろ個々の原子が電子励起もしくはイオン化状態にありながら、固体のように比較的長い距離の相互作用を有している系と定義されることが多い。様々な分野や

応用において、固体をレーザーでアブレーションさせたり、細線に大電流を流して高速放電させた場合に、固体表面に近い部分で現れる。この領域では、金属-非金属転移に近い現象が起きたり、音速の急激な減少などにより膨張形状が大きく変化することがあり、物理的な興味だけでなく、新しい加工方法など、その利用に関しても興味を持たれている。(米田 仁紀)