

高強度場科学のすすめ

中島一久

総合研究大学院大学助教授光科学専攻／高エネルギー加速器研究機構助教授

最近、高強度場科学という新しい研究分野が急成長してきた。

この分野の主役が「高強度レーザー」で、その強度は飛躍的に進歩し、まったく新しい領域の科学分野を創造しつつある。

X線の発生装置、粒子加速器への応用のみならず、化学や物理学の新たな展開を促している。

さらに、素粒子や宇宙物理の地上実験などもその視野に入ってきた。この分野でいま、どのような研究が始まりつつあるかを紹介する。

高強度場科学は、まだ未成熟な分野であり、同時に夢あふれるサイエンスである。実際、欧米で活発に行われている高強度場科学の会議では、既成分野にとられない広い専門領域から研究者を集め、新しい分野の発展の可能性を議論し、その方向性を見出そうとしている。

このような幅広い視点で高強度場科学の諸分野を開拓するような会議は、日本では行われていなかった。そこで私たちは、第7回総研大国際シンポジウムのテーマとして「超高強度場相互作用の科学」を提案し、幸いなことに採択された。

シンポジウムは2002年3月13日から15日まで葉山キャンパスで行われた。同時に、例年行われている湘南レクチャーも「高強度場科学入門」として国際シンポジウムに先立って2日間行われた。さらに、一般講演会は、最終日に東京渋谷のクロスタワーホールを会場にして実施され、大成功をおさめることができた。

高強度場科学とは何か

高強度場科学とは何か。専門外の人々にはちょっとわかりにくいかもしれない。高電場、高磁場、あるいは高重力場

といった言葉は、すでに物理学でおなじみである。高電場なら数百万ボルト、高磁場なら数百テスラなどといったように、それらを表す単位も広く知られている。では、こうしたものと高強度場はどう違うのか。

実は、ここで言う「高強度場」は、非常に強度の高いレーザー光が照射された環境のことを言っている。例えば、現在すでに出力が 10×10^{12} ワット(10テラワット=10TW)級のレーザーが市販されており、実験室に入る程度まで小型化された高強度レーザーも、簡単に手に入るようになった。このようなレーザーを固体やガスに照射すると、そこに生まれる環境は、電場の強度でいえば数千億ボルト/cm、磁場でいえば数万テスラ、光が及ぼす光圧は数百億バールという、一種の極限状態に近くなる。このような環境を私たちは「高強度場」あるいは「超高強度場」と呼んでいるのである。

レーザーの出力(仕事率、ワット)とは、1秒当たりのエネルギー量のことである。したがって、増幅によってエネルギー量を高めれば大きな値になるのはもちろんのこと、短パルス化によって単位時間(分母の数字)の値を小さくすれば、これまたピークの出力は大きな値になる。実際、この両面での努力がなされ、テラワット、ペタワット(PW= 10^{15} ワット)というオーダーのレーザー出力が可能になってきたのである。

では、「高強度場科学」は何を追い求めているのか。これは、先ごろ開催された総研大国際シンポジウムの一般講演会のサブタイトル「レーザーで探る物質と

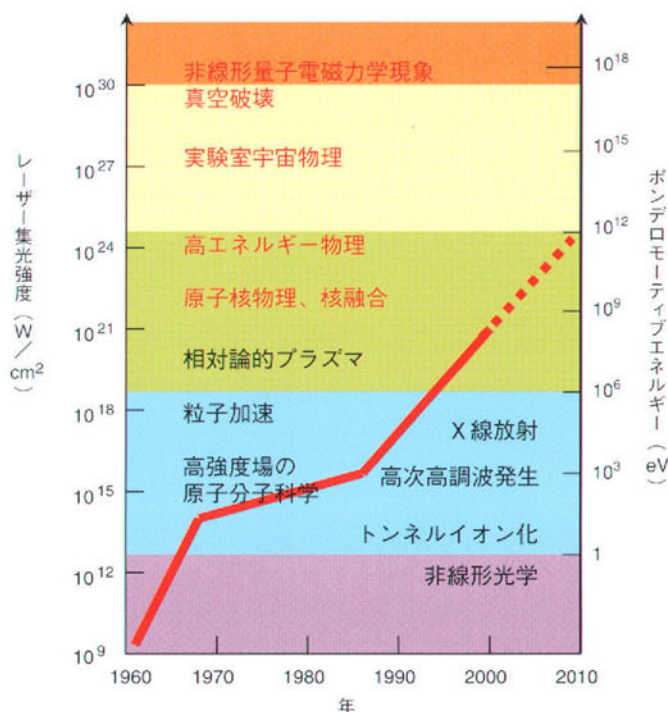


図1 レーザー集光強度の発展と高強度場科学の展開。右の座標軸は、波長 $1 \mu\text{m}$ のレーザー場が粒子に与えることができる運動エネルギー(ボンデロモーティブエネルギー)を示す。

宇宙の根源」が端的に表現している。すなわち、このようなきわめて高強度の場を使って、物質の構造や仕組みをさぐり、それに基づいた新しい技術や方法論を展開するとともに、究極的には、地上の実験室に宇宙初期の高密度・高エネルギーの状況を実際に作り出そうというのである。すなわち、宇宙の根源的な謎を解き明かすためである。

ただしここで断っておかなければいけないのは、このように非常に高強度の環境ではあるが、従来の常識に反して、それは非常に小規模の実験装置で実現できるということである。核融合、加速器、宇宙といった巨大科学とは正反対に、高強度場科学は、小規模ながらそれらに匹敵する極限状況を生み出すことができる。基礎科学の最も重要な役割は、新たな原理を探ることにあるが、まさにその最適な研究手段が手に入ったと言ってよい。

高強度レーザーの驚くべき進歩

1960年にレーザーが誕生して以来、その集光強度は飛躍的に増強されてきた。このレーザー強度の増加は、いくつかの短パルス化技術の発明によるものである。とくに最近の10年間の実に1万倍近い急上昇は、ミシガン大学のG.モウロウ教授のチャープパルス増幅法（CPA法）の発明が大きく貢献している。

この方法は、超短パルスをまず時間的に引き延ばして増幅し、そのあと再び圧縮して高ピーク出力を得る、というものである。超短パルスをそのまま増幅すると、レーザー増幅媒質中で非線形光学効果が生じたり、媒質が損傷されることがあるが、チャープパルス増幅法であれば、こうした問題を回避することができる。その結果、エネルギー蓄積密度の高い固体媒質の使用が可能になった。

こうして、ピーク出力がテラワットのレンジへと飛躍するとともに、最近では「T³（Tキューブ）レーザー」の名前で親しまれているような小型装置も登場したのである。すでにふれたように、10TWクラスのレーザーは市販される時代になり、開発研究レベルでは1PWも実現し

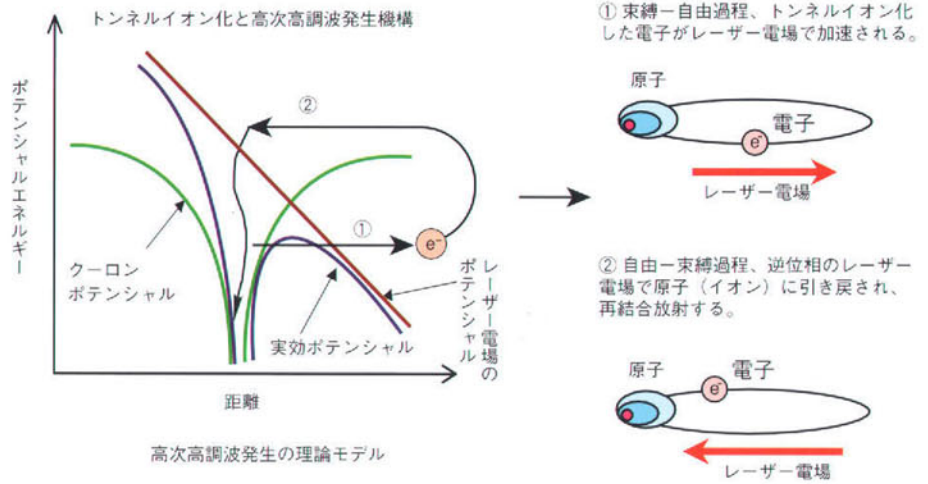


図2 レーザー高強度場下の原子のイオン化過程と高次高調波発生

ている。

ちなみに、このピーク出力1PWは、全世界の発電所の電力量をはるかに超える大きさである。しかし数10fs（フェムト秒=10⁻¹⁵秒）、すなわち10兆から100兆分の1秒間のパルス時間幅まで圧縮されているので、パルス1個当たりのエネルギーはただか10ジュール程度にすぎない。つまり、このエネルギーでは、やかんの湯をわかすこともできないのである。ある意味で省エネ型の研究ツールであって、大学での研究に最適である。

原子分子の高強度場科学

水素原子が電子を束縛しているクーロン電場は約5 GV/cm、イオン化ポテンシャルは13.6 eVである。また、波長1 μmのレーザーの場合、1光子のもつエネルギーは1eVである。したがって、レーザー光を照射して水素原子をイオン化させるには、多光子の吸収、つまり水素原子にいくつもの光子を吸収させて起こすことになる。このようなイオン化は高次の摂動項で起こるので、イオン化率はきわめて小さい。

ところが、集光強度が増加して、レーザー電場強度が原子のクーロン電場に近づいていくと、束縛電子に作用する重畳

された電場は、原子のクーロンポテンシャル障壁を著しく変形させる。つまり水素原子の周囲の環境自体を変えてしまうので、イオン化がしやすくなる。このようなイオン化の機構は、「トンネルイオン化」と呼ばれ、図1に示すように、高強度場科学が、古典的な非線形光学から離れ、独自の分野を形成する出発点となっている。

すでにこの領域の研究は「高強度場化学」と名づけられ、高強度光子場と原子や分子やクラスター（分子の集合体）との相互作用を扱う研究が展開されている。例えば分子の解離、分子構造のダイナミクスとプロセスの制御、光電場イオン化、クーロン爆発といった興味ある現象の研究がされている。日本でも化学界を中心にかなりの研究者がおり、例えば総研大機能分子科学専攻（分子研）の中村宏樹教授たちは、レーザーによって分子化学プロセスを制御する研究を進めている。ロシア一般物理学研究所（IGP）で高強度場レーザー物理の研究を推進しているM.フェドロフ教授によれば、レーザー場で逆にイオン化を抑制し、原子を安定化する方法も検討されているという。原子や分子過程のレーザー位相制御も盛んになってきた。

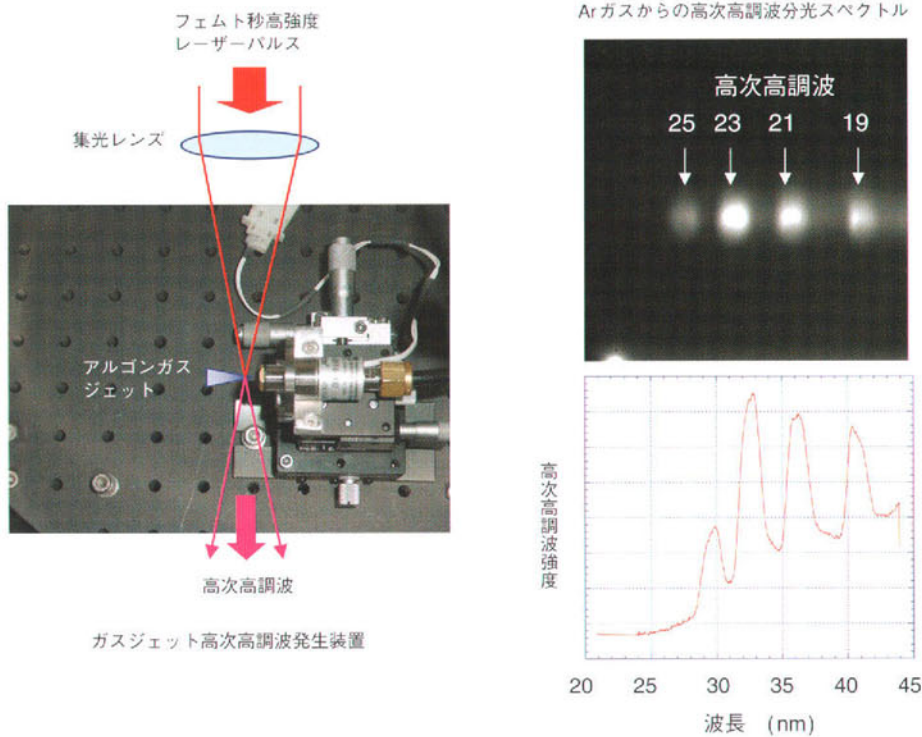


図3 高次高調波発生ガスジェット実験装置（左）とArガスからの高次高調波スペクトル（右）

ミクロの放射光源

応用の展開がとくに期待されているのは、高強度場を用いたX線発生である。自由電子からの古典力学的な光の放射機構は、加速度運動によって生じ、その強度は加速度に比例する。実際、加速器を用いた放射光源（シンクロトロン放射光）では、光速近くまで加速した電子を円運動させ、放射光を発生させている。一方、レーザーは位相のそろった振動をする電磁場なので、これが電子を振動させ、加速度運動を起し、光を放射することは容易に想像できる。

高強度レーザーによる放射光の発生機構（図2）は、トンネルイオン化で原子のクーロンポテンシャルを脱した電子が、レーザー場の位相反転で再び原子核に引き戻され、再結合する際に光を放つ、というものである。この際に発生する高次高調波は、まさに“原子サイズのシンクロトロン放射光”と言える。しかも、光源の大きさが原子サイズであるから、位相がきれいにそろった（すなわちコヒーレント

な）短波長光源になる。

高次高調波軟X線光源は、超短パルス高強度レーザー光を、ガスジェットまたはガスセル内に集光するだけという簡便な装置で作ることができ、私たちも、総研大光科学専攻の研究室で100フェムト秒のチタンサファイアレーザーを用いて発生させることに成功している（図3）。

他のグループの実験では、325次波長2.5 nmの軟X線まで発生させたという報告があり、理論的には、数フェムト秒の超短パルスレーザーを用いれば、さらに短波長領域の硬いX線まで発生可能と予測されている。この高次高調波の高輝度化の研究では、世界的に見ても理化学研究所の緑川克美博士たちのグループが優れた成果をあげている。理研では、レーザーと原子相互作用の位相整合の制御によって、アルゴンガスからの30nm領域の高次高調波発生で、高い輝度を実現している。この値は、Spring-8など第3世代の大型放射光源の、実に100万倍にもあたるというから驚きである。

将来のX線源として期待されているの

は、コヒーレントな短波長光源である。これを実現する加速器型の放射光源として、自由電子レーザーが脚光を浴びており、数々の大計画がある。しかし、この“第4世代”の装置はまだX線領域の発振には到っておらず、実現には困難な問題も多いとされる。

それに引き換え、高次高調波発生、レーザープラズマX線光源やレーザートムソン（コンプトン）散乱X線光源——私はこれらを「レーザー放射光源」と呼んでいる——は、装置自体がコンパクトであり、しかもX線強度が現在の大型放射光源に匹敵するという優れた特徴を備えている。実際、超短パルス性や超高速同期性能を生かし、結晶構造の超高速ダイナミクスを明らかにした時間分解X線回折実験などが行われており、従来の放射光源では不可能な実験に数多く成功している。

私たちは、コンパクトなレーザープラズマX線源の応用として、これを光源とする軟X線顕微鏡を開発している（総研大共同研究費による）。X線顕微鏡は、光学顕微鏡と電子顕微鏡のちょうど中間の分解能をもっており、厚い物質の透視像や生体生物像が得られるという特徴がある。従来は、主としてシンクロトロン放射光源を用いて研究開発が行われてきたが、私たちの光源は、直径3cmの金属標的に数10mJのレーザーパルスを集光するだけで発生できる（図4）。発生するX線のスペクトルは、極紫外から硬X線までかなり幅広いが、光学系が13.5nmで設計されているので、この波長でイメージング（画像化）をしている。これは700MeVぐらゐの電子シンクロトロンの放射光に相当する。

今後の魅力的な目標は、さらに短波長化して生体観察に理想とされる波長領域（「水の窓」と呼ばれる2~4 nm領域）のX線顕微鏡を実現することだが、これについても、基本的に、X線源を大型化するという改造の必要はなく、結像光学系をこの波長に調整すればよい。

最近、東海大学の伊藤敦博士によっていただいた生物細胞の試料が観察できたので、X線CCDカメラによる撮像写真を

示した。もしこれと同じ装置をシンクロトロン放射光源で実現しようとするれば、1.5GeVぐらゐの電子加速器を新たに光源用として建設しなければならないだろう。現在の加速器技術では、それは100m規模の大きな装置になってしまう。

マイクロの加速器

He原子のイオン化エネルギーは24.6eVで、 1×10^{15} W/cm²以上の光強度で、束縛電子はクーロンポテンシャル障壁を乗り越えてイオン化する。さらに高い強度では、原子核の束縛を離れた電子は再びもとに戻ることはなく、完全に電離したプラズマになる。つまり、高強度レーザーパルスが中性ヘリウムガス中に通すと、そのパルスフロント(進行パルスの前面)で、プラズマを生成しながらガスを進むことになる。

プラズマは電子とイオンに分かれた気体である。軽い電子はレーザー電磁場(横波)によって重いイオンより容易に加速されるので、次ページ図5に示したような機構で、レーザーパルスはプラズマ電子流体の波動を引き起こす。このレーザーパルスが進行した後に残るプラズマ電荷振動が誘起した電場は、「レーザーウェーク場」と言われている。この言葉は、静水面を進むボートが残す航跡(ウェーク)に由来している。粒子加速器では、短い電子パンチが加速管やビームパイプの中を光速で進行するとき、ウェーク場という物理現象が誘起されるが、レーザーウェーク場もこれと同じ法則に従って起こる。

レーザー強度が 1×10^{18} W/cm²以上になると、電子の運動速度は光速に近くなる。このような状況では、電子は相対論的効果を受け、その重さが見かけ上大きくなるとともに、電子に働くレーザー磁場の力が無視できなくなる。この力は、ローレンツの法則から生じる力であり、電子の運動方向と磁場の向きの両方に垂直な方向に作用し、結局、レーザーパルスが伝播する方向に加速度を生む。この結果、電子の運動を支配するローレンツ方程式は非線形となって、ウェーク場も

もはや正弦波ではなくなり、極端に高い強度(これを相対論的強度と呼んでいる)では、ウェークはソリトン(孤立波)ようになる。

高強度レーザー電磁場とプラズマのような多体荷電粒子系の相互作用を扱う粒子コード(Particle-In-Cellコード)が計算機物理の世界では発達しており、極度に非定常非線形な大容量の3次元問題もスーパーコンピュータの力で解くことができるようになった。

図5には、日本原子力研究所のJ.コガ博士による2次元PICコードを用いた相対論的強度領域でのウェーク励起の計算機シミュレーションの結果も示した。レーザーパルスの超高強度場でプラズマ電子が加速され、数マイクロンの大きさの電子密度のキャビティ(空洞領域)が形成される。このキャビティの中は正電荷のイオン

が詰まっているので、パルスフロントで加速された高密度電子層とイオン層の間に超高強度静電場が発生する。この静電場は、6TeV/m以上に達し、レーザーパルスとともにほぼ光速でプラズマ中を伝播するので、1mmで数GeVの高エネルギー粒子加速機構となる。

通常使用されている電子ライナック(線形加速器)では、この加速勾配は10MeV/m程度であり、将来計画中のリニアコライダーでも100MeV/mを超えることはないから、これは驚異的な加速電界である。

実験的にも、高強度レーザーウェーク場は、ポンププローブ法という手法を用いて、そのプラズマ振動をフェムト秒の時間分解能で計測する技術が開発されている。図6はこの方法で測定されたウェ

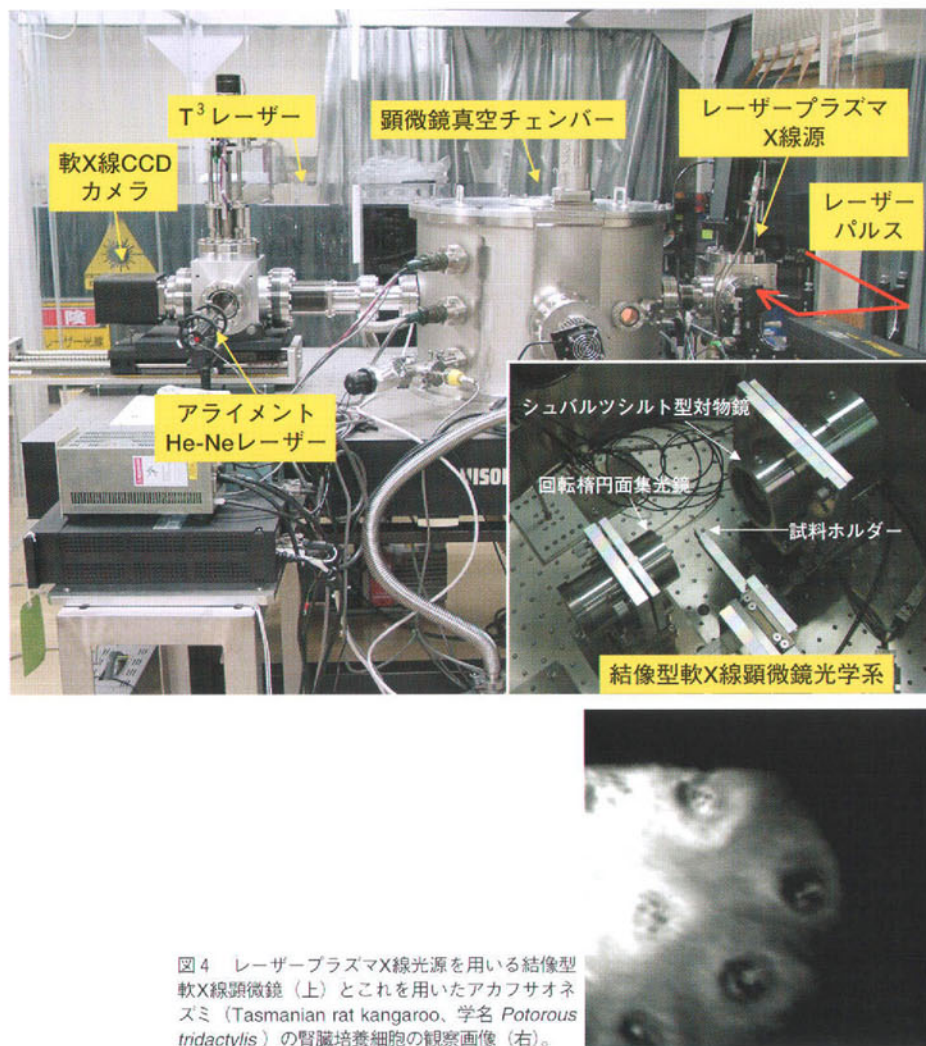


図4 レーザープラズマX線光源を用いる結像型軟X線顕微鏡(上)とこれを用いたアカフサオネズミ(Tasmanian rat kangaroo, 学名 *Potorous tridactylis*)の腎臓培養細胞の観察画像(右)。

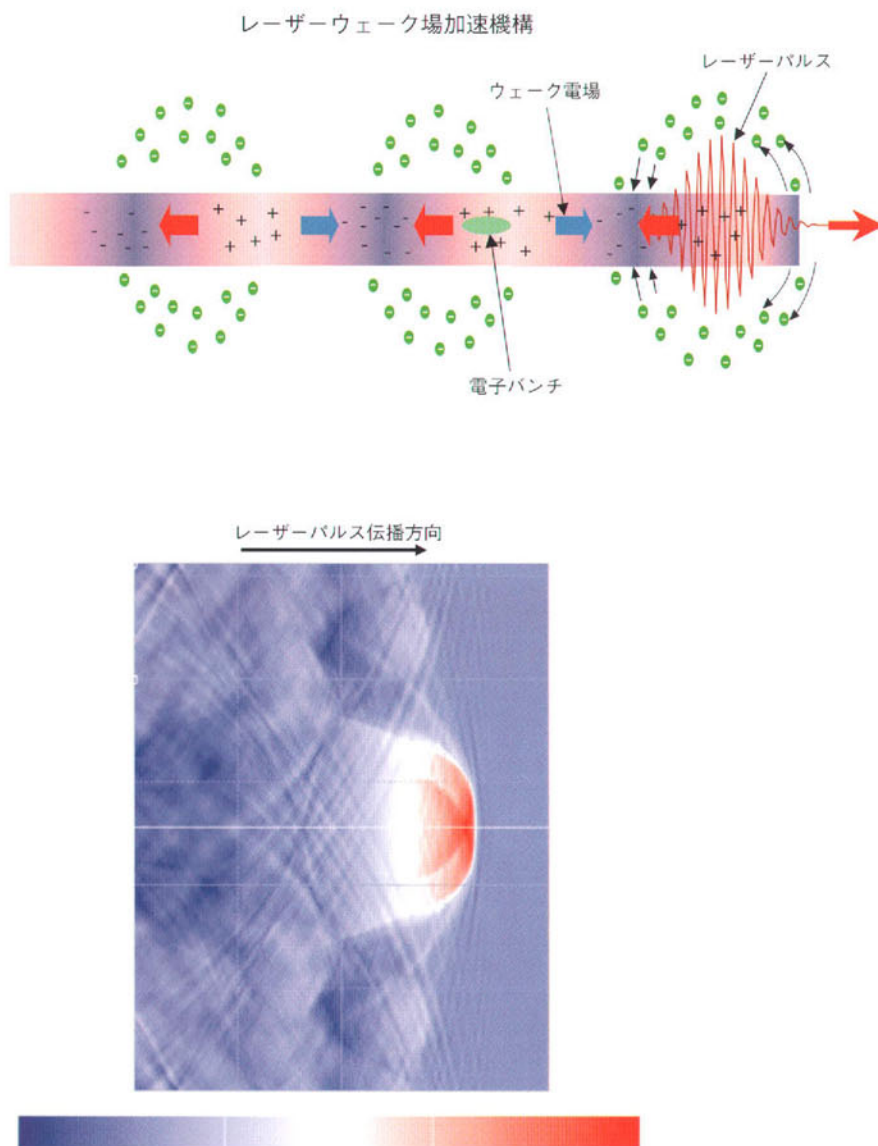


図5 レーザーウェーク場加速機構(上)と相対論的強度のレーザーパルスとプラズマとの相互作用で発生するソリタリーウェーク場。ピーク強度は6.5TeV/mに達する。(下)

ーク場の時間変化を示したもので、最大加速電場は、およそ20GeV/mに達している。この結果は、小瀧秀行博士(現、日本原子力研究所)が先導研光科学専攻在学中に博士論文研究として行った実験で得られたもので、レーザープラズマ相互作用で発生する高エネルギー電子ビームの加速がレーザーウェーク場でのミクロな粒子加速機構によることを明らかにした。

核物理研究への展開

高強度場のもつ粒子加速機構は、新し

い加速器への夢だけにとどまらず、核融合反応や原子核物理研究への応用も、急ピッチで進んでいる。大阪大学の三間國興教授によれば、慣性核融合の研究において、超高温高密度に圧縮された燃料を、超高強度レーザーパルスで加速した電子ビームで局所的にイオン加熱し、核融合反応の点火をする技術(高遠点火の技術)が、阪大で実証されたという。これにより、点火に必要な駆動エネルギーを減らし、エネルギー発生率を劇的に高めることができる。加速器科学とともにビッグサイ

エンスの雄とされる核融合研究でも、高強度場科学の手法は、建設コストを著しく少なくする道をひらきつつある。

また、核融合科学研究所のR. モア教授によると、超高強度レーザー場で直接イオンを加速すれば、核融合反応が起これるといふ。実際、このような核融合反応は、小型のテーブルトップレーザーを用いてローレンスリバモア研究所で実証され、話題になった。このレーザー励起核融合は、まだエネルギーを取り出すにはほど遠い段階にあるが、パルス中性子ビームをテーブルトップで生成する方法として注目されている。

加速器を用いない原子核物理の新しい手法も登場しつつある。グラスゴー大学のK. レディングム教授は、超高強度レーザーと固体物質との相互作用で起こる光核反応と陽子発生、その応用として放射性同位元素を生成する核変換の実験を進めている。これらの現象は、相対論的なレーザープラズマ相互作用による電子やイオンのミクロな粒子加速機構が基礎になっており、まさに、従来の概念でいう加速器を用いない原子核物理と言える。

素粒子・宇宙物理研究への展開

原子核物理の世界で始まっている新たな試みは、過去10年間に1万倍になったレーザー強度の増加の勢いからして、いずれは、物質や宇宙のより根源的な構造や性質を調べる素粒子物理学や宇宙物理学の研究にも波及するはずである。

高強度場科学の最前線では、レーザー強度は、今後10年間に $1 \times 10^{21} \text{W/cm}^2$ から $1 \times 10^{24} \text{W/cm}^2$ に達するだろうと予想されている。現在ある100TWのテーブルトップレーザーでも $1 \times 10^{21} \text{W/cm}^2$ の強度が発生できるが、これでも、電場強度で1 TV/cm(1兆ボルト/cm)、磁場強度は3ギガガウス(30億ガウス)、電磁場が及ぼす光圧は300ギガバール(3000億バール)に達する。このような超高強度場は、自然界では、恒星の中心部やブラックホールの近くでしか存在しない。すなわち、レーザーの超高強度場とビームやプラズマとの相互作用によって、天体や宇宙の特

殊な現象を実験室で再現できる可能性が見えてきたといっても過言ではない。

このような超高強度場領域では、レーザー場の加速によって電子に与えられる運動エネルギーは、GeVからTeVになる。粒子加速機構を工夫すればPeVのオーダーも可能かもしれない。このような超高強度場のもつエネルギーは、1兆度以上に物質を加熱し、原子核の核子を加熱して、クォークをグルーオンの束縛から解放し、クォークグルーオンプラズマを生成できるかも知れない。

これは、ビッグバン以来の宇宙創生の歴史に迫るということでもある。もちろん現在の超大型加速器（米国ブルックヘブン国立研究所のRHICや、欧州原子核研究機構CERNで建設中のLHC）でも、このような実験を始めているか、計画中である。しかし、加速器ビームの衝突による加熱では、ピンポイントでしか起こらない確率的事象にすぎず、何年間もデータを蓄積する必要がある。これに比べ、超高強度場を用いれば、粒子の間を媒介する力(場)を直接コントロールすることによって、容易に反応を促進できる可能性がある。ただし、これは、原子レベルの高強度場相互作用からの単純な類推に過ぎないことを断っておく。

宇宙物理の最近のトピックスであるガンマ線バーストでも、何らかの形で宇宙線が加速されている。宇宙線の加速機構や宇宙放射光の発生機構は、レーザープラズマ加速機構やX線発生機構と似たものがあり、超高強度場科学を高エネルギー宇宙物理の分野に広げていくためのヒントを与えてくれる。実際、阪大の高部

英明教授やSLACのP. チェン博士は、レーザーや粒子ビームを用いた実験室天文学という野心的な研究を進めている。

チェン博士によれば、磁場の関与しないプラズマウェーク場加速機構が、 10^{20} eVという最高エネルギー宇宙線の加速機構ではないかという。また、近未来には、ホーキングがいうブラックホールからの量子放射を、一般相対論の等価原理に従って検証できるようになるだろう、と語っている。

アラバマ大学の高橋義幸教授によると、宇宙のかなたで起こっているガンマ

線バーストは、地上で実現できる最高強度の10桁近く高い放射強度 10^{30} W/cm²で起こっており、そのような超々高強度場では、真空の破壊が起こり、電子陽電子が対発生するシュヴィンガー場が実現しているという。そこでは数々の非線形量子電磁力学現象が起こっているはずであり、まさに宇宙は超高強度場科学の宝庫であるということになる。

本稿は、平成11年～13年に行われた総研大共同研究「高強度場相互作用の物理とその応用」の成果と、それに基づく国際シンポジウムによる。

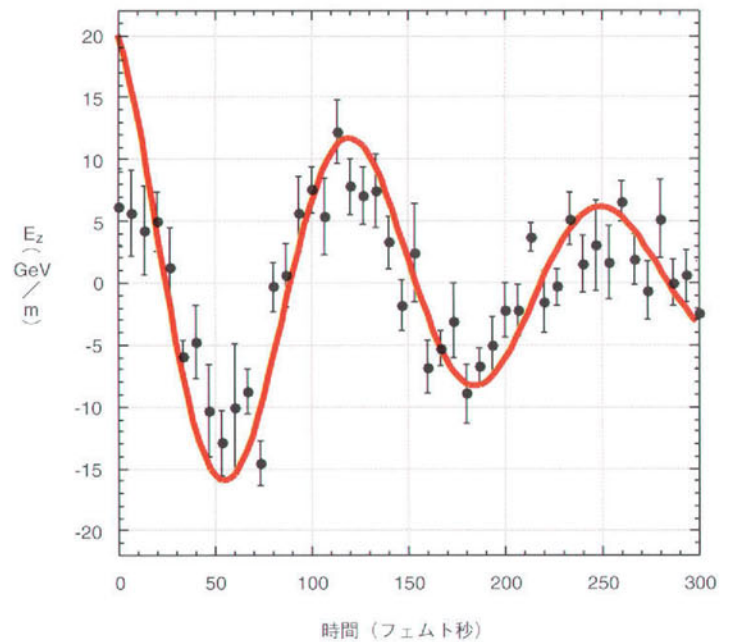


図6 ポンププローブ周波数領域干渉計によるレーザーウェーク場の測定



中島一久（なかじま・かずひさ）
専門は高エネルギー物理、ビーム物理。東京大学大学院理学系研究科卒業後、コーネル大学研究員を経て、高エネルギー加速器研究機構助手、助教授。平成11年4月より先端科学研究科光専攻兼任。日本原子力研究所光量子科学研究センターのレーザー加速研究グループリーダーも兼務。