

レーザー核融合から新しい宇宙物理学の誕生へ

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
高部英明

【本原稿は、立花 隆 プログラムコーディネーター、自然科学研究機構
監修「科学者が語る科学最前線＝宇宙の核融合・地上の核融合＝」、ク
バプロ出版、2008年3月刊行、2300円

<http://www.kuba.co.jp/syoseki/detail.php?no=3236>

の高部の元原稿である。】

【原稿は07年3月21日東京で開催された自然科学研究機構市民シンポ
ジウム

<http://sci.gr.jp/project/nins03/>

の高部の講演を音興した原稿に手を加えたものである】

はじめに

私は、核融合研究をベースに新しい宇宙物理の研究を提唱しています。提唱に至る歴史的、科学政策的な背景を説明して、皆さんのご支持を得たいと考えています。

私が勤めている大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの建物内部に図1の激光XII号大型レーザー装置があります。これは、第二次オイルショックのころレーザー核融合を明日にでも実現してほしいという国民の負託をうけて建設されたもので、八六年には核融合中性子、十兆個発生に成功しました。当時は核融合で頭の中が一杯で、胸躍る日々であったことを昨日のことのよう覚えています。

そんな20年前の1987年に16万光年というすぐ近くで図2のように超新星爆発が観察されました。この爆発でニュートリノ（小柴先生のノーベル賞）以外に、もう一つ大きな発見がありました。それは、超新星は球状に爆発しないという観測結果です。対流、乱流状態で、ぐちゃぐちゃになって爆発しました。超新星理論が専門の東大の野本さんから電話がかかってきて、「たいへんだ。宇宙で神様が四百年ぶりに実験をした。結果はこれまでやっていた球対称理論では説明できない。高部さん一緒に研究しませんか」。これが今日の話の出発点になったのです。

共同研究を通して私たちが行き着いたのは、宇宙物理理論を地上でチェックする方法がなかったが、核融合用レーザーを使って高温高密度の極限状態を実現して検証しようということでした。それをうけ、92年から93年ころに『実験室宇宙物理学』という概念を提唱しましたが、提唱しても世の中はなかなか動いてくれません。ところが、その話を米国リバモア研のレミントンが聞きつけて、すぐ米国で実験を実施し、九六年に実験室宇宙物理国際会議を開催しました。その点で米国は素晴らしい国です。米国が動きだすと日本も

少し動き出すという流れで、日本でもようやく実験が始まりました。

それでも日本で実験を続けることが難しかったので、中国のザン（現在、上海交通大学学長）と共同研究することにしました。その当時は、ITER論争があり、また国立大学法人化の時代です。その流れのなかで、私どものセンターは2004年に「レーザー核融合研究センター」から「レーザーエネルギー学研究センター」へ名称変更しました。その意味するところは後で説明しますが、その後06年4月からは全国共同利用研究施設として、どこの大学の人であろうと、民間人であろうと一緒に研究できるようになりました。そして、超新星爆発から二十年たった2007年に、悲願の「レーザー宇宙物理学」プロジェクトを文科省の支援を得てスタートできたのです。

レーザーの発明とレーザー核融合

たくさんのレーザーを増幅して強力なエネルギーの塊にし、図3のように、直径五ミリの重水素、三重水素からなる核融合燃料に四方八方から照射・爆縮させて核融合エネルギーを取り出すのがレーザー核融合の原理です。球状のターゲットにレーザーを照射すると、ロケット効果によって核融合燃料が中心に加速され、中心で瞬時に核融合反応が起こります。レーザーが照射されると表面が超高温になって一千万気圧が発生し、その圧力で衝撃波ができます。この衝撃波でさらに圧縮・加熱します。それがシナリオどおり球対称にいけば、中心で高密度、高温のプラズマができます。そこで、瞬時に核融合反応が起これば良く、それを繰り返せばエネルギーが取り出せるという単純な発想です。これがレーザー核融合です。

このレーザー核融合は、レーザーの発明をうけてはじめて提唱された概念です。レーザーは、ヘリオトロンが発明されたその二年後の1960年にメイマンによって発明されました。当初は数センチの小さな光線でした。アインシュタインの誘導放射という概念を使って発振することができたのです。

ちなみに、実際のレーザーの原理を考えたのはメイマンではなく、アメリカのタウンズとロシア2人で、彼ら3人が1964年にノーベル物理学賞を受賞しました。タウンズはMITの副学長を務めていましたが、学長職がいやになってバークレーに移り宇宙物理を始めました。そして、宇宙で自然に発生しているメーザーを初めて発見したという変わった経歴をもっています。一方のバズフは旧ソ連でレーザー核融合の研究を開始しました。

技術はすごい速さで進展します。レーザーも図4のように急速な技術革新がありました。60年に史上初のレーザー発振があり、『ニューヨークタイムズ』などでも大々的に取り上げられたことは有名です。その後すぐ新たな技術が生まれ、短パルスでエネルギーピークが高いレーザーが得られ、Qスイッチやモードロック法なども開発されました。

レーザー核融合の発案

レーザーの発明直後にレーザー核融合を考えた人がいます。米国の水爆の父といわれるエドワード・テラーが設立したローレンス・リバモア研究所のキダーです。キダーはメイマンの友達でしたので、レーザーが発明されるとすぐにメイマンがいた東海岸の研究所に飛んで、「レーザーの出力を十万倍（当時は0.01ジュールしかなかった）の一キロジュールにできるか」と聞いたところ、メイマンは自信をもって「近い将来可能だ」と答えました。十万倍といたらみんな怖じ気づきますが、それが可能だと予言できるのは素晴らしいと思います。それならレーザー核融合は実現すると確信したキダーによって、リバモア研でレーザー核融合の研究が始まりました。

一方、当時は冷戦時代で、ソ連でも独立に研究が進められていました。ソ連の水爆の父といわれているアンドレ・サハロフの著書『サハロフ回想録』の上巻243ページ(中央公論社、2002)に、彼がレーザー核融合をソ連で最初に提案したと書いています。それを裏付ける論文もあります。2002年に第三回サハロフ国際物理会議に招待されたとき、レーザー核融合の研究をしているコチェマソフがそれを再現しました。アリザマス16という、いわゆる地図にない町にある核兵器研究所で、アメリカでレーザーが発明されたことを聞いて、サハロフはコロキウムを開きました。図5のように、卵のような形状の回転楕円体のなかに多数のレーザーを一つの焦点に置き、レーザーを全方向に照射して、回転楕円体のもう一つの焦点においた核融合燃料球を加熱すると、爆縮して核融合が起こるといふ考えを発表しました。

ところで、皆さんは水爆の構造をご存知でしょうか。図6は、たまたまジョン・F・ケネディ空港で買った1995年の『US News』に載っていた概念図です。水爆の繭状の容器は重たくて飛び散らないようにするため劣化ウランで作られています。プルトニウム爆弾（原爆）で発生する強いX線を容器の壁で反射させて、サハロフの原理と同じように水素爆弾にあてて爆縮し、核爆発させるわけです。原爆が数キロトンの爆発だとすると、その千倍の爆発エネルギーが発生します。この水爆の原理をレーザー核融合に適用したのがサハロフの最初の講演でした。

現在のレーザー核融合研究

レーザーが生まれて47年が経ちました。阪大の激光XII号には12本のビームがあり、一本のビームの直径は30cmです。

現在世界で最大のレーザーは、ニューヨーク州のナイアガラの滝の近くのロチェスター大学にあります。60本、30キロジュールのレーザーがターゲット表面にあたるようになって

ています。現在建設中の巨大レーザーは、米国点火装置（N I F）レーザーです。図7にその構造を示します。192本のビームを上下から金のカプセルに照射し、水爆と同じようにレーザーのエネルギーをX線に変換してそのX線で核融合燃料を爆縮します。ミニチュアの水爆を作る装置です。この建物全体は東京ドームと同じほどの大きさがあり、そのなかに直径が14mある球状の真空容器が設置されています（図の下の写真）。一本のビームのサイズは40cm×40cmで正方形です。こんな大口径のレーザーが四本ずつまとまって合計192本、真空容器の中心に集光されるように設計されています。

最初、3cmほどしかなかったレーザーが、47年たって、N I Fほどになったわけです。なぜここまで技術が進歩したかは、あとで触れます。

参考までに、ローレンス・リバモア研究所は一マイル(約1.6km)四方を塙に囲まれています。そこでは核兵器関連の研究を行っています。日本からいった研究者などは、塙の外に設置されているトレーラーのなかで研究しています。この大きなリバモア研究所のなかで一番大きな装置がN I Fで、総額で四千億円と聞いています。

米国におけるレーザー核融合研究の背景

米国は国防計画の一環としてレーザー核融合研究を推進しています。アメリカのエネルギー省(DOE)は「科学を基礎とした核兵器の維持管理」に年額二十億ドルを計上しています。一九九六年に包括的核実験禁止条約(C T B T)が国連で採択された結果、地下核実験によって核兵器の性能を試験し維持することができなくなりました。そのため、原爆部分は未臨界実験で性能を調べ、水爆部分はレーザー核融合で核燃焼を実験室で行う。こうして集めたデータで計算コードが正しいか検証し改良しながら、劣化した核兵器の性能を正しくはじきだすようにしています。そのため、アメリカはコンピュータ科学を国防研究の要と位置づけています。その研究戦略を示したのが図8です。米国が威信をかけて世界一のコンピュータを作りたがるのはこのような理由があるからです。

日本の『地球シミュレータ』に負けたといっっては湯水のごとく資金をだして世界一を奪還しました。その理由は、国防の要がコンピュータであるためです。地下核実験なしで、コンピュータ上で維持管理するためには、核兵器の計算コードの改良、検証が不可欠であるため未臨界実験・レーザー核融合となるのです。

このような米国に代表される現実の世界のなかで、レーザー核融合に携わってきた私どもは、どのような判断を迫られているのでしょうか。それは、核保有国において核兵器研究がいまだに莫大な資金で進められている現実を直視することです。それを政治と切り離して考えることはできません。本シンポジウムの冒頭で、立花さんが、「科学者が語る科学の最前線」と趣旨説明されました。しかし、科学者は科学だけを考える「研究屋」であってははいけません。世界の動きのなかで自分の研究戦略を随時考えていくことが求められま

す。このことは、オッペンハイマーの「過ちを繰り返すな」という言葉に象徴されます。彼は原爆を開発しましたが、使ったのは政治家でした。この時点で研究者の発言は無効でした。それを繰り返してはいけません。われわれ研究者自身が考えなくてはなりません。

今、世の中に大きな動きがでています。キッシンジャーやシュルツ達が一月四日号の『ウォール・ストリート・ジャーナル』という、保守系で冷戦のなかでアメリカの核装備などを支持してきた雑誌に、「核兵器がない世の中を作ろう」という記事を掲載しました。タカ派の政権のブレーンであった彼らが、このような時代を作ろうとしています。彼らは核兵器全廃論について真面目に考えています。私も真面目に考えています。これは個人的な意見ですが、一万年続く高度文明が存在し、レーザー核融合エネルギーがそれを支えている未来像を描けるためには、その前に核兵器廃絶が不可欠です。

レーザー核融合に必要な条件

レーザー核融合の科学的な課題は、点火・核燃焼の科学的実証です。これはTNT火薬百万トン（メガトン）級の水爆ではすでに実証されていますが、それは制御不可能です。燃料密度を固体の一万倍に圧縮すると、核融合で発生するエネルギーは密度の二乗に反比例するため、TNT火薬で十キログラムほどの核融合エネルギーとなります。十キログラムだと、ある程度の厚さのコンクリート壁でエネルギーを捕えて熱に変換することができるのです。

ただし、レーザーで固体密度の一万倍に圧縮することは、太陽の中心より高密度にしなければなりません。太陽中心より一桁以上高い密度と、太陽中心より高い温度を一ミリ以下の空間で実現すれば、エネルギーがでてきます。これに関して、NIFが1.8メガジュールのレーザーを実現しようとしています。実際に核融合炉に必要なのは四メガジュールですから、レーザー核融合炉に必要なレーザーのエネルギーはほぼ実現しているのです。

問題は、もう一つの技術的課題です。高繰り返しの大出力レーザーが不可欠です。NIFは一時間に一回しかレーザーを撃てません。これでも核兵器の研究には十分ですが、核融合の平和利用に要求されるのは一秒間に十回です。この間に一万倍のイノベーションが求められます。

また、電気からレーザーのエネルギーへの高い変換効率が要求されます。NIFは電気エネルギーの0.1パーセント程度しかレーザーのエネルギーに変換できていません。平和利用しようと思えば効率が重要です。実際は十パーセントの効率が重要です。効率百倍向上というイノベーションも求められています。

日本のレーザー核融合エネルギー研究の課題

私どもが何をしなければいけないか、おのずとみえてきます。つまり、日本のレーザー核融合エネルギー研究に求められていることは、NIFのように192本ものビームのレーザーで点火燃焼の実証をするわけではありません。NIFの一ビームよりもっと高繰り返しで高効率の大型レーザーを開発することです。そのビーム四～五本程度で、斬新な科学研究を推進することです。それがひいては、核融合研究の裾野を広げることになります。斬新な科学の具体例として実験室宇宙物理研究があります。

私のセンターは全国共同利用施設として、図9のように新しい理念のもとに昨年から再出発することになりました。これまで核融合エネルギーを目指していた研究センターが、もっと応用や基礎物理もやっぺいこう、そのなかで地球、惑星、宇宙物理をプロジェクト的に推進していこうという方向に変わりました。それも国際拠点として推進して、新しい学術を生みだしていこうと、パラダイムを180度、転回したのです。将来的には、レーザーを使った核物理、素粒子物理研究も考えています。

実験室宇宙物理学とは

超新星爆発とレーザー核融合ではエネルギースケールの桁がまったく違います。先ほど山田さんから相似性という話がありましたが、これも相似の世界の話です。エネルギーを十万倍にすることぐらいできますから、一億倍の世界と物理が同じなら比較しようじゃないかと発想すればよいわけです。レーザー核融合の時間空間を百兆倍して、それをコンピュータ上でつなげて超新星爆発をシミュレーションします。また、宇宙のコードをレーザー実験と比較し、改良・検証し、予期しなかった新しい発見をして、将来的には宇宙で起こっている現象を予言することも考えています。

超新星爆発は球対称ではなく、不均一に爆発することが観測結果からわかりました。われわれのレーザー核融合実験でも不均一にしか爆縮しません。これらを物理学会誌の表紙で図10のように象徴的に示しました。ちょっと専門的ですが、レーザー核融合の爆発性能の低下と超新星の観測の球対称理論とのずれという共通点が接点でした。超新星が爆発してから、このようなことを真剣に議論する中で、実験室宇宙物理ということになったのです。九五年の春ごろに前述のレミントンと会ったとき、彼が「What are you doing these days?」と聞いてきましたので、「アフターファイブに実験室宇宙物理を研究しているんだ」と話すと、「What is it?」と返してきました。彼がすごいのは、私の説明を理解し、帰国してすぐに自分たちのレーザーを使って超新星爆発の模擬実験を行ったことです。図11左は超新星のシミュレーション結果です。非常に小さな空間に宇宙の壮大な現象を模擬する実験を米国はすぐ行い（図11の右）、すぐにその可能性を見抜いて国際会議を開くという行動力の素晴らしさ。私も委員として一緒に会議の運営をしてきています。

その後、私どもは超新星残骸との関係や、超新星爆発の不均一、ジェットの実験、光電離プラズマの研究、さらに桜井さんから話があったように太陽のリコネクションの模擬実験などを進めてきました。現在、私どものセンターでプロジェクトとして進めているのは、次のような課題です。すなわち、ブラックホールの周りに降着円盤があり、そこから図 12 のイメージのように強い X 線が出ています。その X 線によって星の表面が光電離しています。レーザーを金のカプセルに照射して X 線に変換し、これを降着円盤からの X 線に見立て、プラズマを加熱して、そのプラズマからの透過や放射光をみて、星の表面の原子状態を研究する実験と理論を中国と共同で進めています。

さらに、超新星が爆発して、何百年、何千年たった残骸がたくさん見つかっています。それらは超新星残骸と呼ばれその典型的な観測写真を図 13 に示します。超新星残骸を研究することで、私たちの体を作っている元素の起源がわかるのです。このような壮大な爆発現象を百ジュールというエネルギー単位で再現できるのが図 14 に示したレーザー爆風波です。その一千万倍のエネルギーになれば、一トンの TNT 火薬による爆風波になります。さらに大きくなれば水爆の実験になります。さらにスケールが大きいものが超新星残骸です。レーザーによる爆発と、それによる加熱温度が超新星残骸の温度と同じであるという相似則を使って、超新星の爆風波の表面でどのように粒子が加速されるか、それが宇宙線の起源を説明できるかを、現在、イギリス、フランスと一緒に研究しています。

実験室宇宙物理の世界は広がる

こういう研究のアイデアを最初に大阪大学で発表して 15 年ほどたちました。米国リバモア研究所がすぐ実験をやり、その後、ロチェスター大学やヨーロッパでも実験がスタートし、昨年からは中国でも実験が始まりました。現時点では、アジア 2、米国 2、欧州 2 か所で大型レーザーを使った実験が推進されています。米国のレミントンとの協力も続けながら、今、中国のグループとも共同研究をしています。イギリス、フランスの研究グループと和気あいあい協力しながら、同時によき競争相手として共同研究を進めています。

中国には若手研究者が多く、シミュレーションが進んでいます。中国と毎年サマースクールを開催しており、現在、実験室宇宙物理の国際協力体制を草案しています。

このような経緯を私の経験からみると、米国と日本の科学政策は違うべきだと思います。米国物理学会誌ニュースの一月号に、「将来の国際的な経済競争優位性を維持するためにも国防科学研究費を増やすべきである」というイノベーション委員会の結論が記載されました。米国の物理関連研究開発(R&D)の予算をみると図 15 のように、五十パーセントが国防総省(DOD)の軍事研究費で、それに続くのが NIH、NASA、DOE です。さらに、全米科学財団(NSF)があります。核兵器関連はエネルギー省ですから、米国の物理関連予算の 7～8 割は軍事研究絡みであるという現実を認識することが重要です。

日本の科学技術政策のあり方

日本には軍事はありません。そのなかで、米国とどう科学技術開発で戦っていくか、どう国際競争力を維持していくか。一つの目安として、基礎と応用のコストを考えてみます。語弊があるかもしれませんが、理学は基礎に非常に重点をおくし、工学はそれをいかに応用するかでコストを大切にします。その両方に橋をかけるのが国の科学技術政策のあり方です(図 16)。米国の場合、基礎研究の成果をコスト度外視で応用するのは軍事研究です。N I F がまさにその代表です。それを経済力につないでゆきます。

日本はアメリカのまねをしてはだめです。もちろん、軍事研究を始めようなんて馬鹿なことをいうつもりはありません。当然、日本は違う方法をとるべきです。これは独断と偏見ですが、光科学の重要な技術に大強度レーザーがあります。この大強度レーザーの技術力を高めて、かつ、イノベーションを起こすことが重要です。そのなかで想像力をはたらかせます。ところが、日本の科学政策の弱点は、想像力の欠如にあります。想像力が何かから生まれるかをしっかり考えなくてはだめです。私は、実験室宇宙物理は基礎から応用を繋ぐ役割を日本で担っていくと思っています。

持続性のある人類の発展には核融合エネルギーの実現が長期に求められています。レーザー核融合の実用化には、技術的課題である高繰り返し・高効率のレーザー技術が優先します。そして、核兵器廃絶という人類の勇氣ある行動が不可欠です。軍事研究を放棄した我が国では、大型レーザー装置を用いた基礎科学の推進は国際的な科学・技術競争力維持に必要です。レーザー宇宙物理という新たな学術を、産業応用も視野に入れながら推進していくことが、世界の中で我が国独自の科学政策の一例となりうるのです。このような我が国独自の政策が世界の中で、宇宙物理を精密科学にしていく新しい道の発信となり、同時に、わが国の科学技術と核融合研究の発展に必要であると考えています。

立花 ありがとうございます。高部先生が語られた実験室宇宙物理は、九二～三年に最初のアイデアがだされて、アメリカが 95 年に実験するという展開があったわけです。九二～三年に日本で一番最初の短い論文を読んだ一人が僕です。そのとき、たまたま阪大のレーザー核融合研の外部委員をやっていて、その席上で高部さんが新しい研究計画としてその話をしたんです。すごく面白いと思い、是非やるべきだというような発言をしました。阪大の内部ではわりと冷たい目を向けられていました。阪大だけでなく国のその研究費がほとんどでないという状態でした。先ほどあったようにアメリカが先に実験を行って

しまい、日本の予算がついたのはついこのあいだです。ものすごい時間差があったわけです。ようやく発展したところなんです。なぜか日本というのはユニークなアイデアをだして、その研究をどんどんやろうと思ってもなかなか理解者が現れなくて、ずるずる遅れて、外国に先を越されるというようなことが、いろんな学問分野で繰り返されています。これもその一つだったと思います。しかし今は、実験室宇宙物理が新しい学問として立ち上がる時期になっているんですね。だから僕は目の前でまさに新しい学問の芽がでて、すぐには育たないけれども、ひねりながらやっと芽がでる、そのすべての過程をみました。そして、日本のサイエンスの政策はいろんな決定をもっているけれども、少なくとも今は新しい芽をちゃんとだしつつあるというところを一緒に喜んでいてという状態です。どうもありがとうございました。

高部英明紹介



大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・教授。大阪大学理学研究科物理学専攻および宇宙地球科学専攻協力講座・教授。工学博士。1975年大阪大学工学部電気工学科卒業。80年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。西独マックス・プランク・プラズマ物理研究所研究員、米国アリゾナ大学助手、大阪大学レーザー核融合研究センター助手、89年講師、91年助教授、97年より現職。

専門はプラズマ物理学、計算科学、宇宙物理学。現在は実験室と宇宙のプラズマ物理を統合することに関心をもつ。

2000年フェローの称号（米国物理学会）、03年エドワード・テラー・メダル受賞（米国原子力学会）、06年名誉教授の称号（中国国家天文台）。

著書に『さまざまなプラズマ』（岩波書店/2004）などがある。

現在、アジア太平洋物理学会連合理事（<http://www.aapps.org/>）、SSH（スーパー・サイエンス・スクール）運営指導委員長（岡山県立玉島高校）など

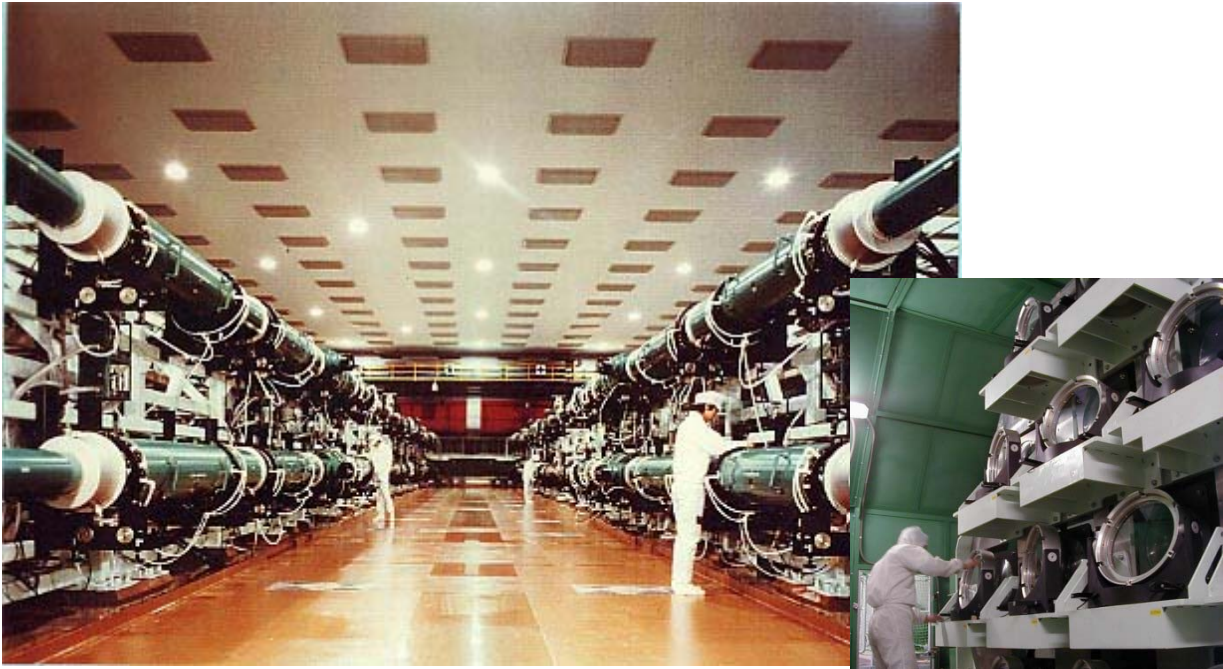


図1： 大阪大学の激光XII号大型レーザー装置の増幅器部分。4本のレーザー増幅パイプが見える。右下は、直径30センチのレーザーの反射鏡。

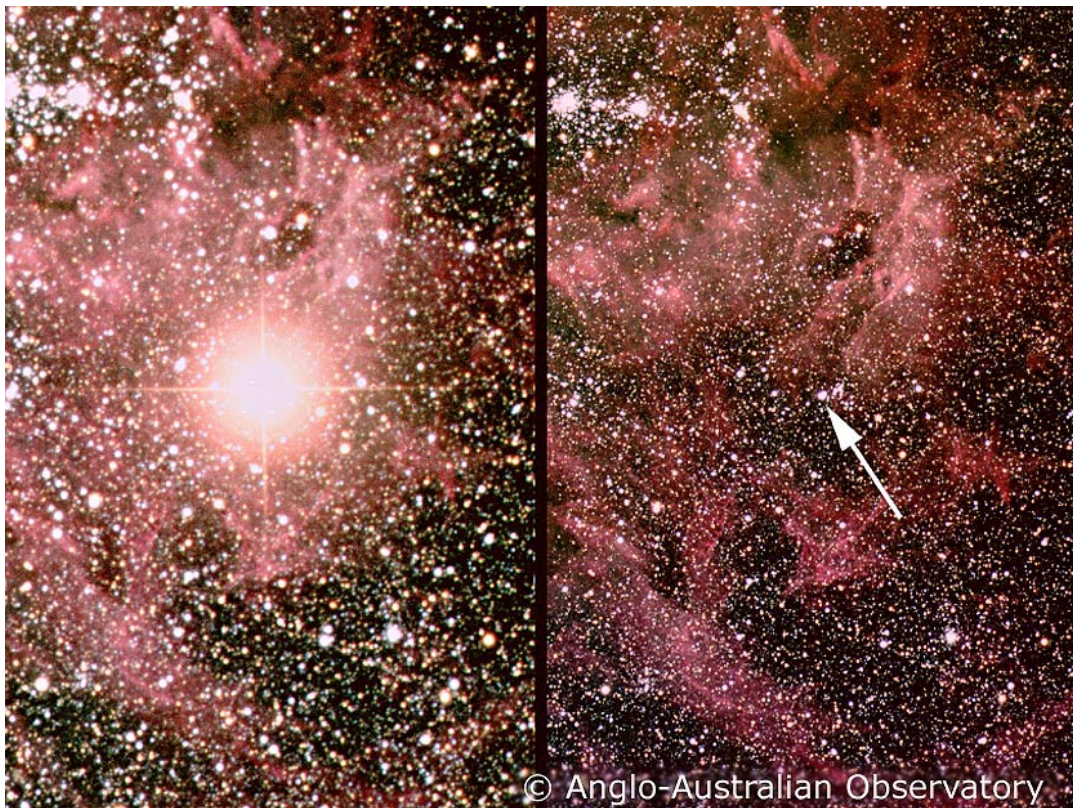


図2： 20年前の87年2月23日に400年ぶりに裸眼で見える超新星爆発が南半球で観測された。その爆発前(右)と爆発後(左)の光学写真(アングロ・オーストラリア天文台提供)。

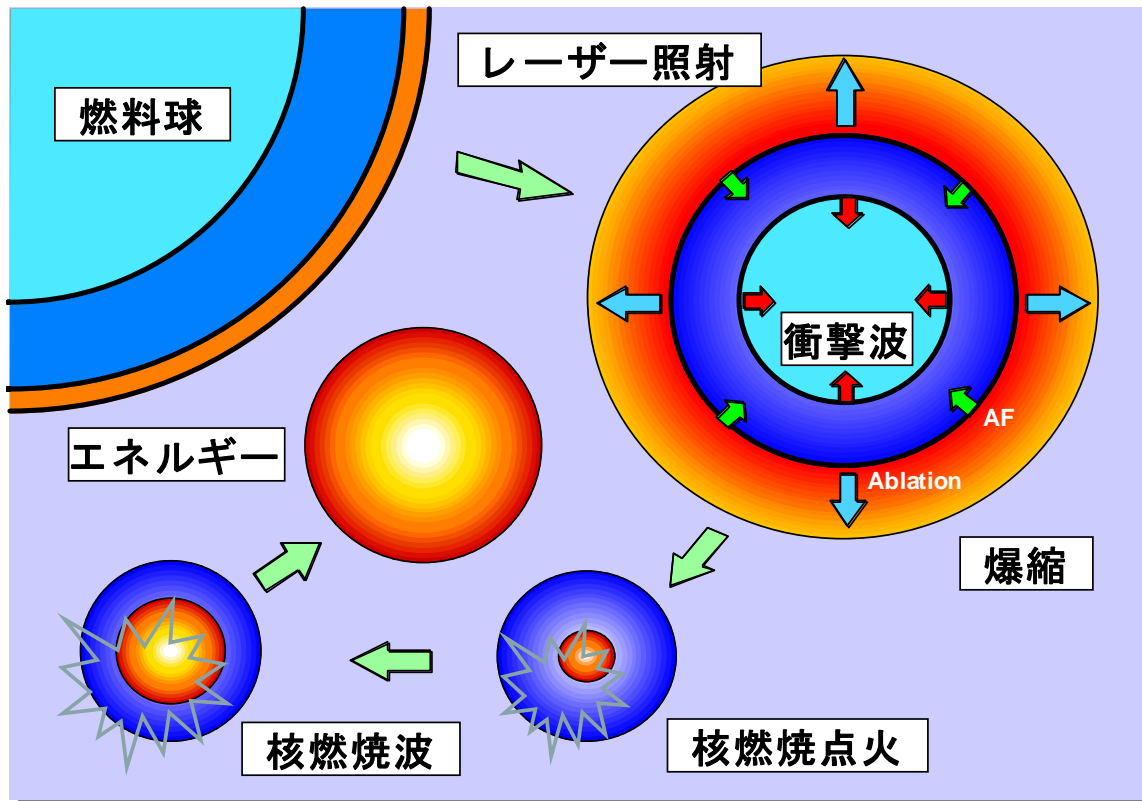


図3: レーザー核融合の物理シナリオ。直径5mm程度の核融合燃料球に四方八方から球対称にレーザーを照射し、レーザーで加熱された表面で発生する数千万気圧の圧力で、燃料球を衝撃波で爆縮し、中心部に五千万度の核融合点火部を形成し、そこで発生した核燃焼波で一気に核融合反応を起こしてエネルギーを放出させる。

高出力・短パルスレーザーの歩み		
●レーザーの概念	Shawlow & Towns	1958年
●史上初のレーザー発振	Maiman 〔Nature,187, 493 (1960)〕	1960年 (6月)
●ガラスレーザー	Snitzer	1961年
●Qスイッチ	Hellwarth & McClung (ピークパワー: 300kW パルス幅: 120ns)	1962年
●モードロック法 (ガラスレーザー)	De Maria, Stetser, Heynau	1966年
●単一パルス選択	Kachen, Steinmetz, Kysilka (ピークパワー: 50GW パルス幅: 1ns)	1968年

図4: レーザーの概念の提唱から10年間に、レーザーの実現、レーザーの高強度、短パルス化が急速に進展した。急速な技術革新がレーザー核融合の技術的基盤となった。

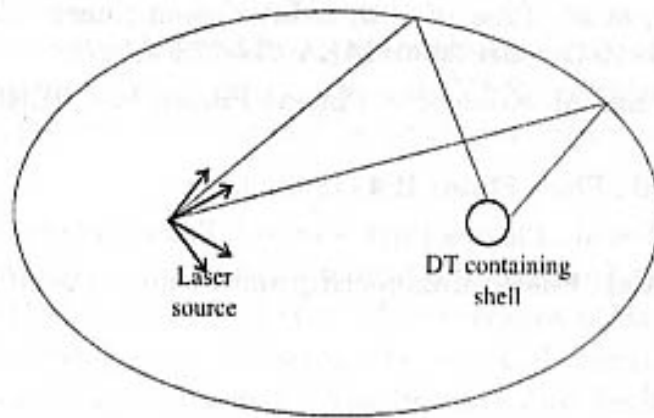


図5: 旧ソ連の水爆の父サハロフがレーザーの出現を聞き、発表したレーザー核融合方式の概念図。回転楕円体の一方の焦点からレーザーを全方向に放出し、内壁で反射されたレーザーはもう一方の焦点に置かれた核融合燃料の表面に均一に照射される。(図中の英文は以下のように置き換える)Laser source(レーザー) DT containing shell(核融合燃料球)

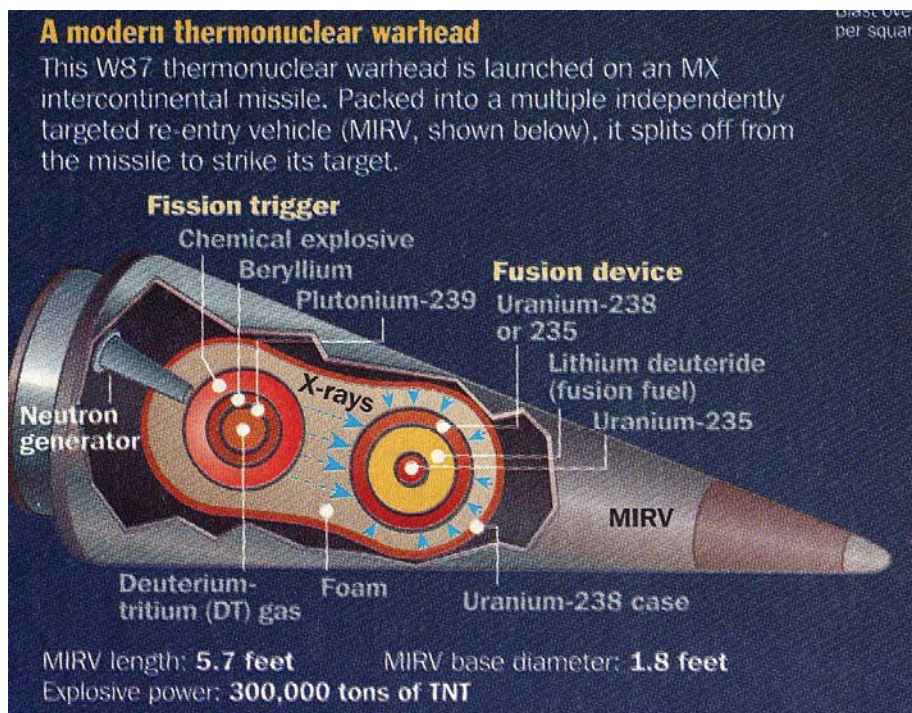


図6: 爆発規模300キロトンと近代的水爆の内部構造概念図。左側の「プライマリー」と呼ばれるプルトニウム型原爆を高性能爆薬で爆縮し、爆発させる。その際に発生する大量の強いX線を劣化ウラン製の繭状容器内に閉じこめ、右側の「セカンダリー」と呼ばれる水爆燃料を爆縮し、一挙に爆発エネルギーを原爆の千倍程度に高める。(USA Newsより転載)。 図中英文の必要箇所のみ以下のように和訳して記載: Fission trigger(原爆部分) Chemical explosive(高性能爆薬) Beryllium(ベリリウム) Plutonium239(プルトニウム239) Neutron generator(中性子発生装置) Deuterium Tritium(DT) gas(核融合ガス: 中性子発生用) Foam(発泡スチロール) X-rays(X線) Uranium238(劣化ウラン) Uranium235(高濃縮ウラン燃料: 水爆点火用) Lithium deuteride(fusion fuel)(重水素化リチウム: 核融合燃料) Uranium 238 or 235(ウラン)

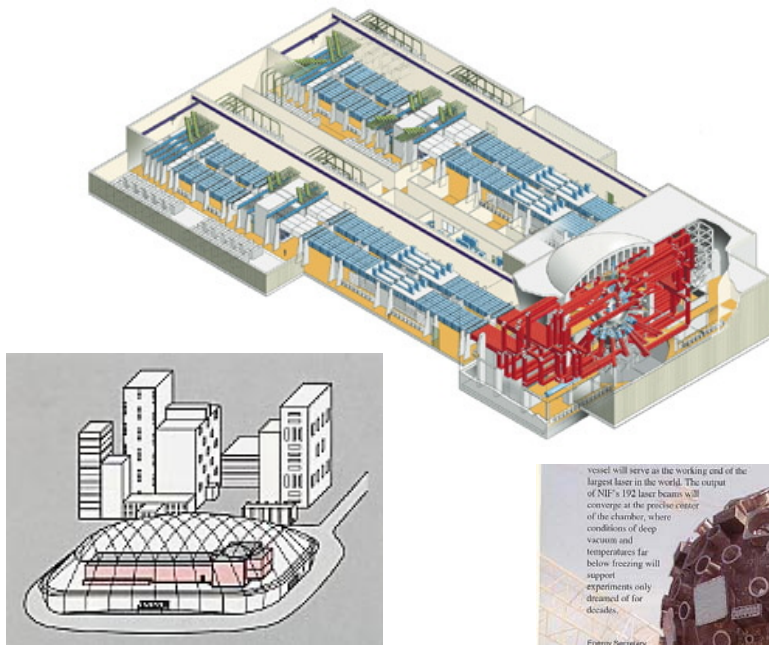


図7： 米国レーザー核融合点火装置 (NIF)の全体構造図(上)。192本のレーザーが集まる直径14mの核融合反応真空容器(右下の写真でその大きさがわかる)。左は、NIF装置と東京ドームの大きさ比較。

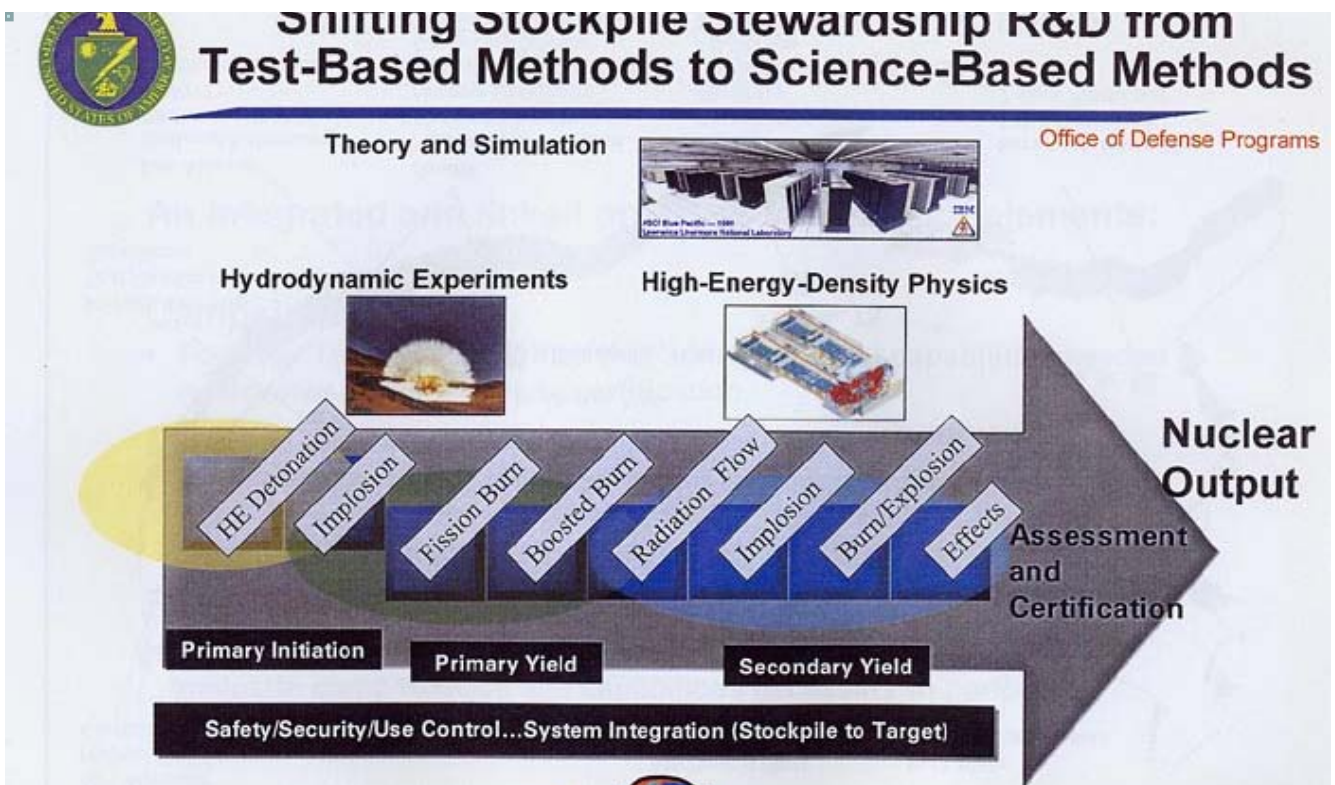
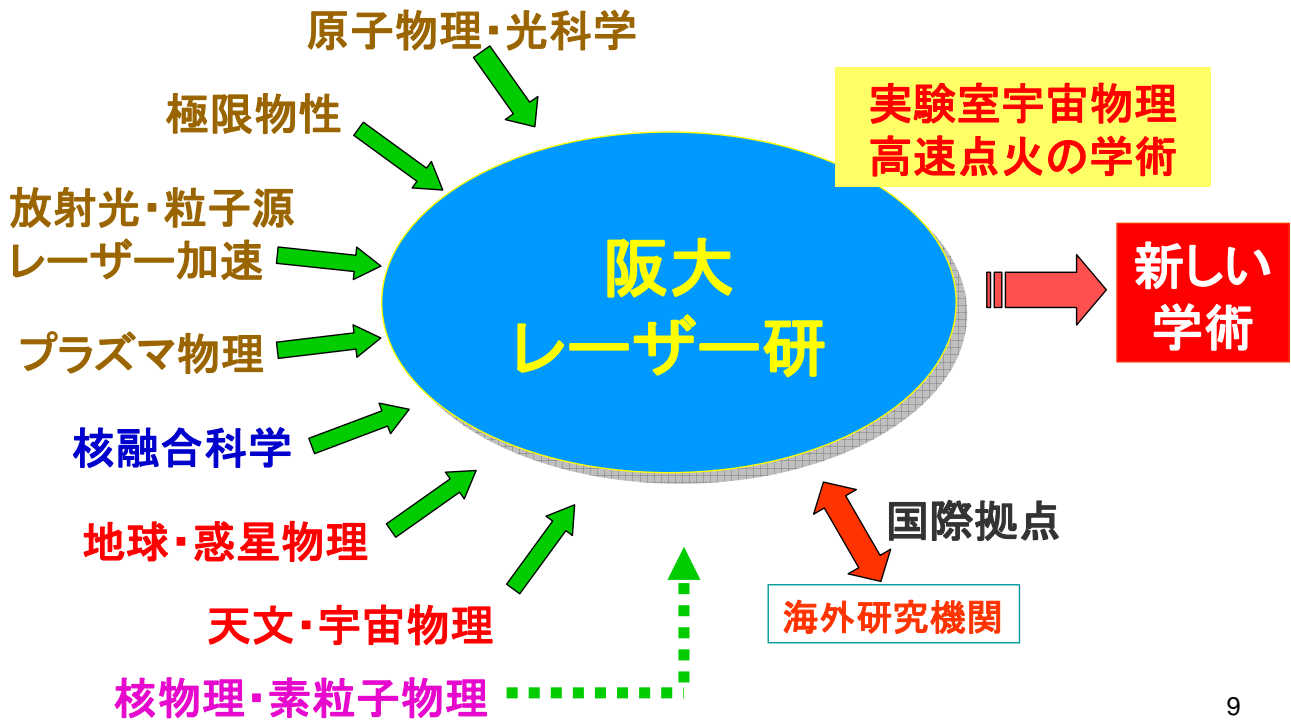


図8： 米国の「科学を基礎とした核兵器の維持管理」の戦略図。未臨界実験でプルトニウム原爆(プライマリー)の性能実験を行い、レーザー核融合で水爆燃焼(セカンダリー)の物理を研究する。それらの実験データは理論・シミュレーションが正しいか確認・検証するために利用される。核兵器容器の経年変化による劣化などは材料や化学の研究を並行して必要とする。(図中の英文は以下のように日本語にする) Theory Simulation(理論・シミュレーション) Hydrodynamic Experiment(未臨界実験) High-Energy-Density Physics(レーザー核融合) HE detonation(高性能爆薬) Implosion(爆縮) Fission burn(核分裂燃焼) Boosted burn(X線発生) Radiation flow(X線輸送) Implosion(爆縮) Burn/Explosion(核融合燃焼/爆発) Effects(性能) Assessment and Certificate(爆発性能確保・保証) Nuclear output(核爆発出力) Primary initiation(プライマリー駆動) Primary yield(プライマリーからのエネルギー) Secondary yield(セカンダリー爆発力)



9

図9: 阪大レーザー研の全国共同利用センターとしての研究展開理念。高出力・高強度のレーザー技術をベースに、そこから展開される原子物理から従来の核融合科学、宇宙物理までを基礎から応用まで全国の英知を結集し、『学術融合型』という21世紀型の科学研究を展開していく。それを支える柱として実験室宇宙物理と核融合科学をプロジェクトとして推進していく。(日本学術会議資料より)。



図10: 大きさにして1兆倍も違う超新星爆発(上左の爆発の図)とレーザー核融合爆縮(右と下の図)はコンピュータの中では同じ方程式を解いて得られる。爆発か爆縮かの違いで、その中で一番重要な現象は同じ物理が支配している。(日本物理学会月刊誌の表紙より)。

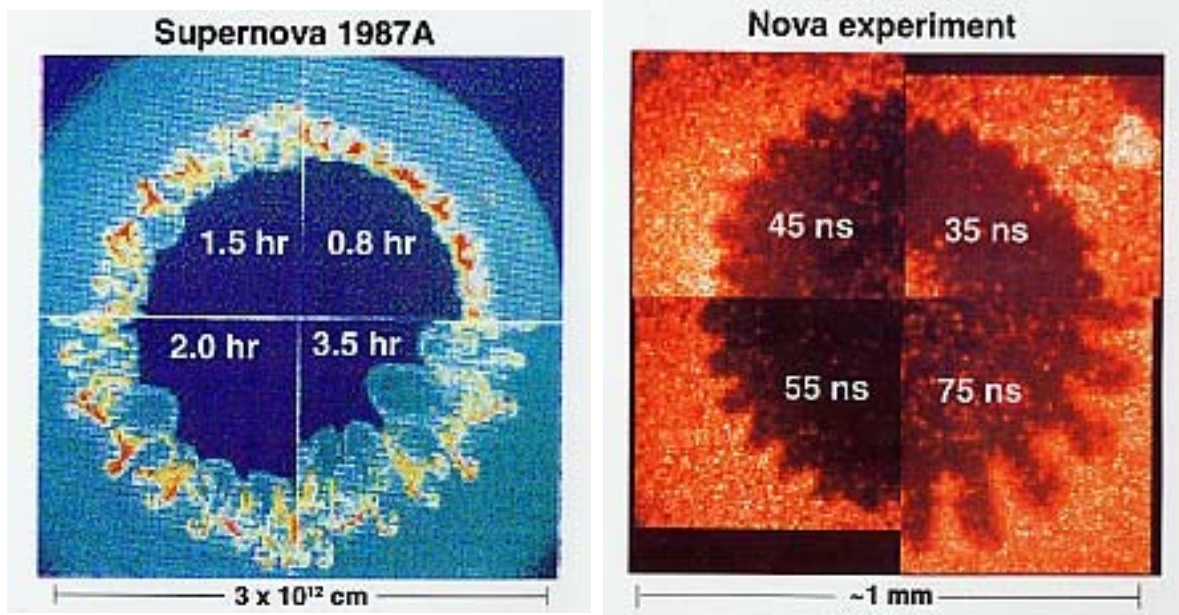


図11: 超新星爆発は「実験」できないが、核融合レーザーを用いることで爆発の模擬実験をすることができる。左は超新星爆発のシミュレーション結果。現象は時間(hr)単位で起こる。右は模擬実験の結果。現象は10億分の一秒(ns)単位で起こる。これら进行比较することで新たな事実が判明する。

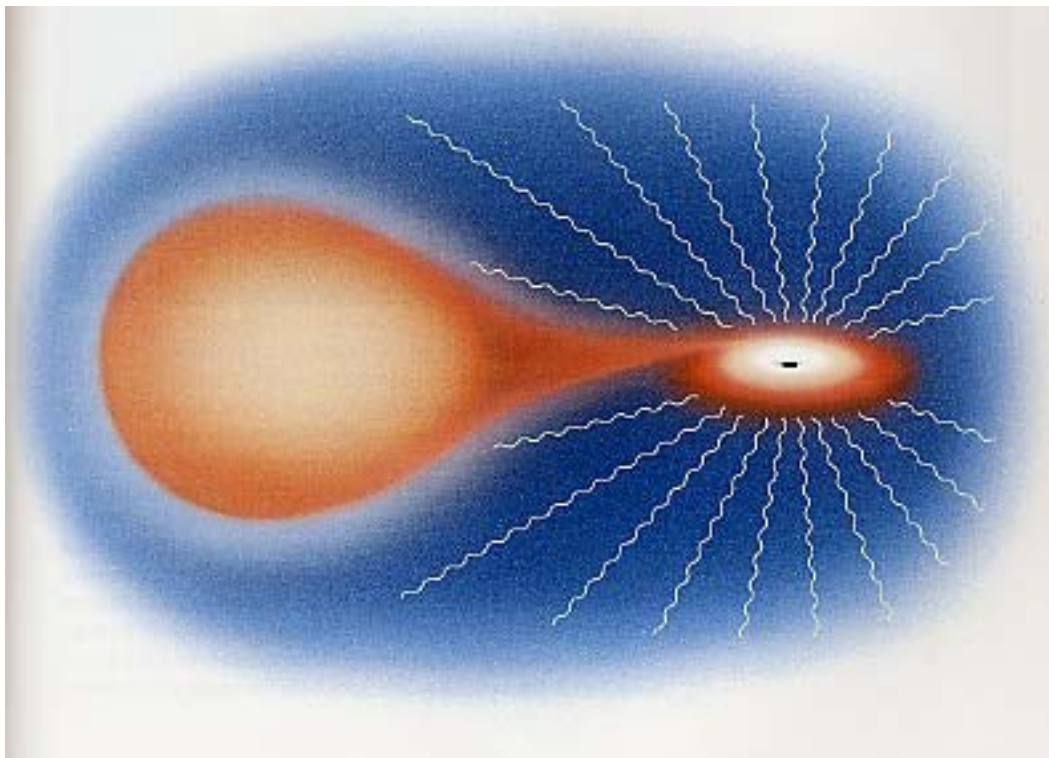


図12: 2つの星が重力相互作用している。片方がブラックホールなどコンパクト天体の場合、隣の星の表面物質をはぎ取り、その重力エネルギーは降着円盤内でX線のエネルギーに変換されて隣の星を電離する。光電離現象は宇宙のさまざまなところで観測されている。

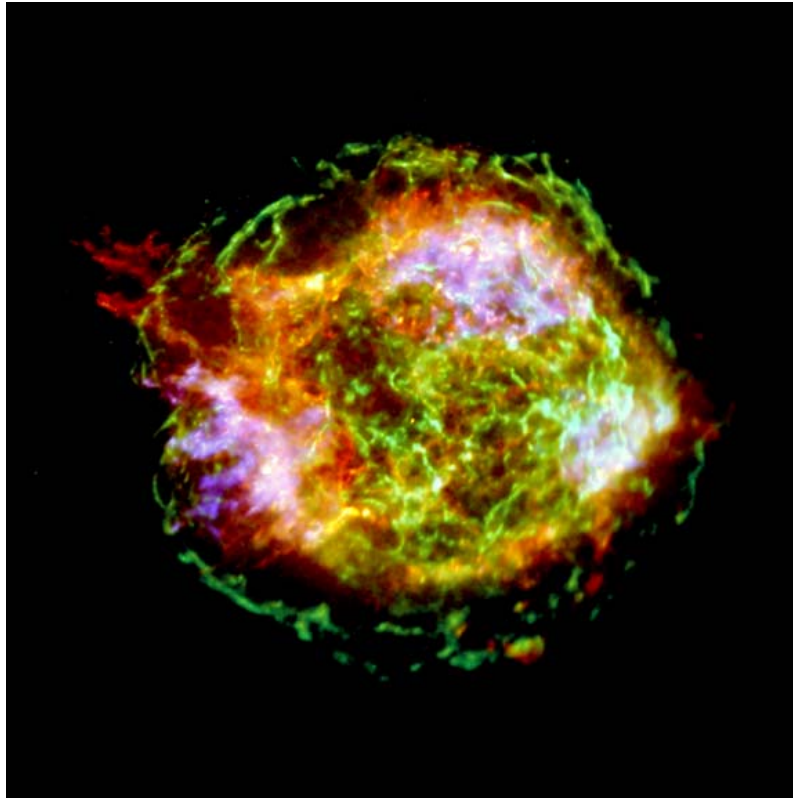


図13: 超新星残骸カシオペアAの観測イメージ。300年前に爆発した超新星の残骸。直径10光年。球状の爆風波が宇宙空間を広がっていく。

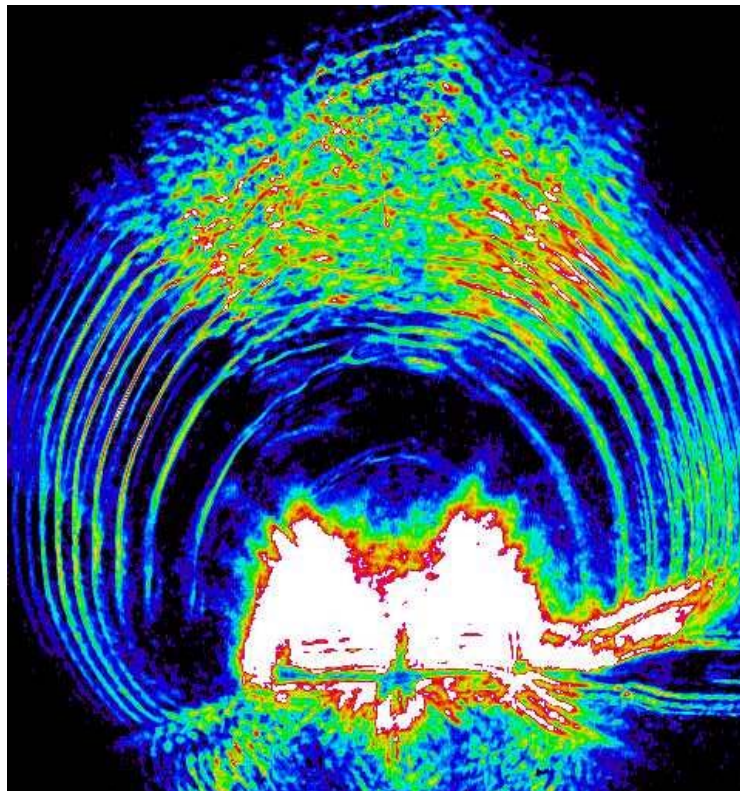


図14: 高強度レーザーを固体表面に上方より照射した際にできた爆風波の多重コマドリ写真。

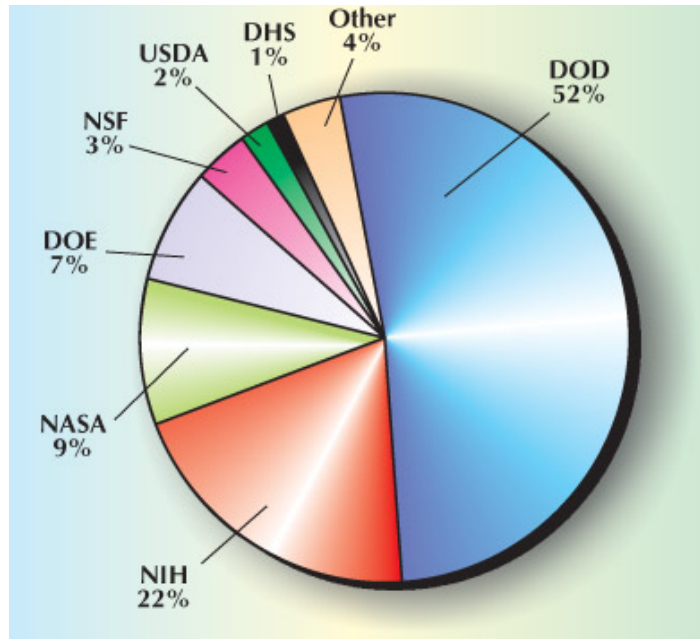


図15: 米国の物理関連R&Dの各省の年間予算の割合。国防総省(DOD)予算が際だつ。2005年会計年度の予算。(米国「Physics Today」誌より)。

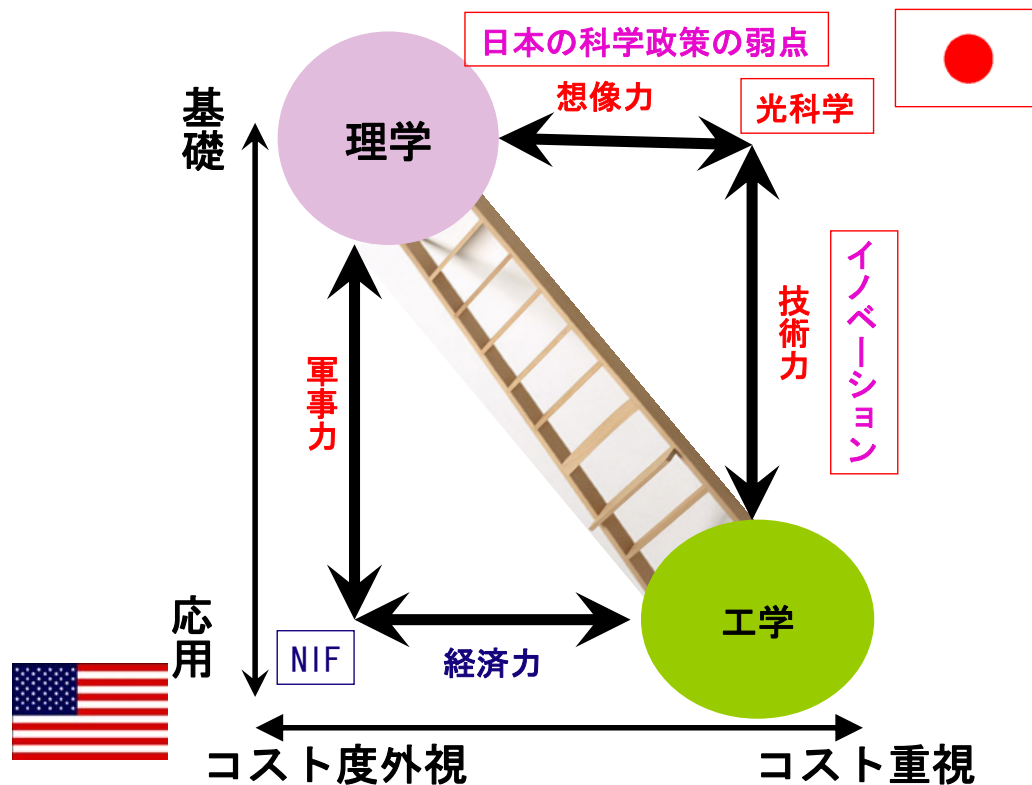


図16: 理学と工学研究を連続的につなげるにより、その国の科学技術の国際競争力を維持することができる。米国では軍事研究がその架け橋として重要な役割を担っており、その象徴がNIFである。軍事研究を是としない科学技術立国の我が国においては、米国と異なる架け橋が国家の科学技術政策として求められる。「光科学」としての大型レーザー技術とそれによる科学。そこには基礎科学と応用研究を両立させる想像的戦略が求められる。

高部の講演に何連して聴講者から書面で質問がありました。6件の質問に関して答えてお答えしました。
(尚、本にはこの一部しか掲載されていません)

質問 1:

アメリカの国防の要がコンピュータであり、地下核実験よりコンピュータで管理とのお話でありましたが、そこからどう Wall Street Journal の核兵器のない世の中を作ろうじゃないか、という考え方に転換していったのかが分かりませんでした。アメリカの軍事力中心の国策にはやはり変化がないのでしょうか。アメリカが平和力によって動くようになれば？この世界はもっとよくなる気がします。日本の科学者の方々に期待します。

回答 1:

講演を聴いてくださりありがとうございます。勘違いをされているので私の主張を書きます。米国は冷戦が終結した今でも、核兵器技術に関しては世界の最先端の能力を維持しておく、というのが国防方針です。クリントン政権もブッシュ政権も同じ方針です。ですから、現在も軍事技術をハイテクなどの技術科学研究と位置づけて予算を潤沢に与えています。コスト度外視で基礎科学を軍事に応用し、その後、コストを削減し民生用の経済力に結びつける戦略です。これは、米国だけでなく、日本以外の先進国はほとんど同じことをしています。敗戦国のドイツもそうです。日本だけが例外です。憲法9条があるからです。

Wall Street Journal のことは、上の話の延長ではありません。上のような平和にとって「負の連鎖」の国際経済競争を軍事に頼らないパラダイムに移行させようというのが、キッシンジャーなど、上の論理で冷戦を勝ち取った識者の21世紀への驚くべき提案なのです。キッシンジャー達の考えが変わったのであり、米国が変わったわけではない。たぶん、いかに彼らが影響力があると言っても、世界から核兵器をなくす。それも、米国が先頭を切って宣言するのは、99%難しいと思います。なぜなら、イラク戦争でもわかるように、戦争をすることで大きな収益を上げる軍事産業が政府を支援しているし、ブッシュ大統領も、軍事産業の株が高騰し、大もうけをしているのです。このような、軍事複合体を解体することは、米国の産業構造を大きく変えることであり、次の大統領でも不可能でしょう。

米国の産業構造が変わり、軍事技術に科学技術が依存しなくなるには、日本が「軍事に頼らずとも世界の科学技術を先導できる」という基礎科学と民需技術を「新しい方法論」でシームレスに繋ぐ「独創的な科学政策」を生み出し、実践して、世界に示すことが唯一の方法です。それがどの様な方法か私は考えているところです。(高部)

質問 2

レーザー核融合で航空機、ミサイルに搭乗可能な水爆が開発される可能性はありますか？ P.S. 日本は経済、科学の分野では常に米国の後塵（No.2）でなければ摩擦が起こる。（残念ですが！）

回答2:

すでに、核兵器は軽量化されており、航空機、ミサイル搭載は冷戦時代から実戦配備されていました。冷戦時代の象徴である米国「パーシングミサイル」、ソ連「SS20」の核弾頭はワシントンの有名なスミソニアン宇宙航空博物館 <http://www.nasm.si.edu/> 入り口の左に堂々と展示しています。先端の核兵器部分は小さなものです。レーザーなど使わなくても既に存在しています。

「日本は経済・科学で米国の後塵」というのは、日本人の能力が劣るからでなく、日本の科学技術や経済の国の政策が時代遅れであることが大きな原因です。例えば科学技術に関する大学の研究者への予算などの審査過程は「予算消化」が主になって、「いかにユニークで将来性のある研究に予算を付けるか」という観点がありません。そんな不満を私は「中央公論」の2005年5月号に「科学審査制度の改善こそ我が国の急務だ」と題して、日本の審査制度の遅れに危機感を表明しました。米国だけでなく、中国に比べても遅れています。

なぜそうなのか、と考えると、現況は「財務省」の優越性に大きな原因があると最近考えています。文科省は制度を新しいものにしたいとも、「財務省」がウンと言わないと、欧米並みの制度が作れない。財務省は「財務省にとって分かり易い予算の使い方」に固執し、かつ、大学の先生に配分された研究費も「1円まで3月31日までに使い切れ」と「単年度会計」という財務省にとって整理しやすい方法を、明治維新以来要求している。財務省改革なくして「地方分権」などありませんよ。（高部）

質問3:

- (1) レーザー核融合が平和のためにどのように利用できますか。
- (2) 軍事との関連が切り離せない研究（アメリカ）は、平和のために必要ですか。

回答3:

(1) レーザー核融合は大規模レーザーの研究を急速に進展させました。その結果、かつて考えられないような「実験室で宇宙の爆発現象など研究しよう」という基礎科学が生まれようとしています。この意味で、次世代の優秀な若者を引きつける研究分野を生んでいるので、それは平和への貢献だと思います。しかし、レーザー核融合で核燃焼を行うのは「両刃の剣」です。講演でいいましたようにレーザー核融合の研究の順番を、より平和を意識した計画にすべきです。

(2) 私は最近、「科学は人間を幸福にするのか？」と科学者としてあるまじき疑問を抱いたりします。科学には生活を豊かで便利にするという「正」の面は多々ありますが、同時に、大気汚染、地球温暖化、軍事技術の高度化など「負」の面も否定できません。科学をありがたいものと単純に礼賛していた 20 世紀から、「持続性ある社会」という 21 世紀の方向は、必ずしも「科学技術」＝「生活を便利にしてくれる、ありがたいもの」という単純な構造に懐疑的となってきました。「調和ある成長」。あのスモッグで国中が覆われた中国。淡水の 90%が汚染された中国。これを救う技術は軍事技術ではありません。軍事技術に投資している米国も石炭発電で炭酸ガスを多量に地球にまき散らし、世界中の人たちが将来被害を受ける可能性がある。軍事研究費を温暖化防止に使えば、米国は世界から尊敬される国になるでしょう。しかしここでも、産業界と政治が結びついてそれを難しくしている。イラク戦争で米国は世界から孤立しました。日本がアジアとの接近など外交の独自性を出していくなど、世界が米国にももの申す構造が生まれれば、少しは米国も「平和のためのできる行動」を考えざるを得ないかもしれない。それでもイスラエル・アラブの問題は 1000 年続くかもしれませんね。（高部）

質問 4:

効率を考えると、半導体レーザーは良いが、大きいエネルギーを作るのにどうにかして使えないのでしょうか？また話は別ですが、宇宙でレーザー発振は起こっているのでしょうか。

回答 4:

半導体レーザーで大型レーザーを励起する方法を長年研究しています。原理的に可能ですが、大きな問題はコストです。現状ではあまりに高価で使えない。

宇宙でレーザー発振は起こっています。参考までに私が書いた記事をダウンロードしてください。「宇宙に於ける X 線レーザーの可能性」という題目で、素人向けに書いています。

http://jasosx.ils.uec.ac.jp/JSPF/JSPF_TEXT/jspf2001/jspf2001_05/jspf2001_05-441.pdf

宇宙レーザーについては参考までに、実際に宇宙で星風の膨張で冷却し、同時に近傍の冷たい星間ガスで冷却されたプラズマ中に反転分布ができ、宇宙でレーザー現象が見られるという研究を行っているグループが活動しており、観測もされています。英語の HP ですが、上の私の記事を読んで興味を持ったなら、以下も覗いてみてください。（高部）

<http://laserstars.org/amateur/WolfRayet.html>

質問 5:

光はベクトル粒子なので、逆方向に衝突させると運動量成分を失い、ロスが大きい方法ではないだろうか。

回答 5:

光は伝搬方向に運動量を運びます。ですから、燃料球に当てて光が反射するだけでも、表面には「ひかりの圧力（光圧）」が発生し、光が反射した反作用で表面は内向きに押されます。質問は少し勘違いなさっているように見受けられました。（高部）

質問 6:

私は素朴に核兵器完全廃棄は可及的早い実現を希求する。高部さんの論理をお教え願いたい。そして科学者、技術者、知識人は反対運動を起こすべきではないか。Wall Street Journal 投稿者とも協力してお考えをお聞かせ願いたい。

回答 6:

私も講演で主張しましたように「核兵器廃絶、早期廃絶」に大賛成です。世界の政治の世界は、大国には核を持ち続けるそれなりの論理がある。私の理解では

米国：世界は未だ不安定である。いつ何時、核武装したテロリストやテロ国家が米国の国防を脅かすかもしれない。だから、その仮想敵に対応できるだけの高い技術と核の数が必要である。

中国：以前、福岡の中国領事館のHPに公式声明が掲載されていました。「なぜ、中国が核兵器を持つか」。その理由は「世界に核兵器を持つ国がある以上、核攻撃への防衛として核兵器を持つのが中国国民を守る正義である」のように書いていました。中国は「世界中で核兵器をなくそうというなら、応じて良い」のような論調でした。

人類の歴史とは裏返せば戦争の歴史ですね。米国のリバモア研究所の親友にイラク戦争が始まった時、冗談半分に「いいか、俺は調べたんだ。第2次世界大戦後、米国は20年おきにどこかで戦争をして、通常兵器の在庫一掃セールをしている。たぶん性能試験も兼ねて、軍事産業は兵器を使いたがっている。今度もそうだ」と言ってやった。そしたら、その米国の友人が「おまえは間違えている」という。「いや、間違いじゃない」というと。彼は「米国は20年ごとでなく、10年ごとに戦争を世界のどこかでしている」と。具体的に戦争や紛争の名前も挙げてくれました。

私は科学者として、核兵器に反対です。だから、反対運動を起こす、となるかという、そうはならない。私の研究講演等の中で、関係するときは主張します。しかし、私が反対運動をして、世界を変えることができますか。私は、自分の行動範囲で世界平和に貢献しています。今は、アジア・オセアニアの20カ国の物理学会が加盟するアジア太平洋物理学会連合(AAPPS)という組織(総会員数、約8万人)の活性化に忙しい(日本物理学会選出の理事です)。詳しくはHP <http://www.aapps.org/> をご覧下さい。科学者が政治家のまねをしても本来の力を発揮できません。可能なのは湯川秀樹など知名度の高い方に限られます。科学者は科学者同士で人的交流を図り、科学者が「私たちは平和な社会で国際協力をしたいのだ」と大声を上げるのが、私の反戦運動です。現在、中国、韓国、台湾などを中心にAAPPSの物理学者の輪を広げています。詳しくは <http://homepage2.nifty.com/AkiTakabe/OtherActivities/keisai/burutigakkai05.08.AAPPS.pdf> を読んでください。これが私の世界平和、アジア連合設立への第一歩ということです。(高部)