

量子工学研究の展望と期待

(東大・工) 中沢 正治

1. 量子工学とは?

量子とは核放射線, 加速された粒子, 素粒子などの総称で, 具体的には光量子 (レーザー, シンクロトロン放射光 SOR, X線, γ 線, …), 荷電粒子 (電子線, イオンビーム, プラズマ, 原子・分子線, …), 素粒子 (中性子, ポジトロン, ミュオン, …) 等を意味するものとして用いています。従って量子工学とは, これらの量子を工学的に利用するための技術体系ということになります。

量子工学という言葉は, もっと広い意味に使うこともでき, 物質の量子的構造や量子効果を工学的に活用する学問, 例えば量子物性工学, 量子エレクトロニクスなどを含む意味にもなりますが, この場合, 前者を「量子ビーム工学」, 後者を「量子効果工学」などと呼んで区別することにします。

従来, 放射線を応用する分野, ラジオアイソトープの理工学, 医学, 農学, 生化学等への応用に対し, 量子工学はその発展段階になりますが次の2つの点で大きな区別があります。1つは, 加速器技術の進展により, 多種類かつ高品質の量子ビームを人為的に発生して利用できるようになったこと, もう1つは, この量子ビームの応用が, 従来 of 分析, 診断的利用から更に進んでマイクロ加工とか同位体分離プロセスへの利用など工学的道具としての応用にまで進んでいること, であります。この2点が現在, 量子工学としての技術的体系化が現実的に必要になってきた理由でもあります。

量子工学自身は, 従来 of 学問分野の再編成としての側面ももっています。具体的には,

① 基礎分野として

量子反応工学………放射線物理, 放射線化学, 原子衝突論, 核反応論, 中性子物理, X線工学, 量子エレクトロニクス等

量子発生計測工学…加速器工学, イオン源工学, 放射線源工学, レーザー工学, プラズマ工学, 放射線計測, 放射線安全工学等

② 応用分野として

量子ビームによる分析・診断工学, 材料工学, プロセス工学, エネルギー工学, 医学利用などをあげることができよう。これらの学問の基礎として量子力学, 電磁気学, 物性論, コンピュータ応用などがあることは言うまでもないことであります。

この量子工学英文名称は, Quantum Engineering, 略してQEというのが標準的です。私見ですが, これをQUEEN (女王の工学) とか, あるいはQuantum Technology を略し

て、Q-Tec.(究極の工学?旧工学ではない。)と呼んではどうかとの提案をしているところであります。

この量子ビーム工学の研究分野、あるいは応用分野を量子ビームの種類および、応用分野毎にマトリックス的に表現したのが表1の一覧表です。この表により、具体的な工学的応用分野の全体像が見渡せるのですが、この表の中でも特に応用上、重要な項目をトピックス的にピックアップすると下記の通りであります。

- ・自由電子レーザーの開発研究
- ・放射光の装置開発研究、測定系開発研究、分析応用、リソグラフィでの応用など
- ・イオンビームを用いた元素分析・構造解析
- ・ポジトロン、ミュオンを用いた物性解析
- ・レーザーを用いた同位体分離やウラン濃縮などのプロセス応用

2. 量子ビームを用いた分析・解析・診断技術

放射能物質や放射線の物性分析や診断への応用は原理的に適し易い分野であり、従来極めて広範囲に利用されてきましたが、量子ビームの場合は更に目的に適した形で利用できるので分析・解析・診断への応用はもっと広く、しかも革新的技術として利用され始めているところです。

この応用を①元素分析、②構造解析(ラジオグラフィを含む)の形でまとめると次のようになります。まず元素分析への利用方法は、量子ビームを試料に入射させ、二次的に放出される量子を解析することにより元素同定を行なうので、この元素分析手法の特徴は入射させる量子ビームの種類と二次的に放出される量子ビームにより決められます。このような観点から元素分析手法をまとめたものが表2です。二次量子ビームとしては、特性エックス線を用いる方法は極めて多いこと、最近是一次量子ビームとして荷電イオンビームを用いる分析法が多いことなどが特徴です。この意味で、最も代表的なものはPIXE法(Particle Induced X-ray Emission 法)であり、いわゆる中性子の放射化分析法よりも高感度になっています。

次に量子ビームを用いた構造解析をパターンイメージング手法と考え、その原理的な方法を考察すると3つの型に分類されます。1つはマイクロ解析像型で、量子の波動的性質を用いて結晶構造の回折像を求めるものであり、2つ目はマクロ透過像型で量子の粒子的性質を用いて透過像を求めるものです。また、3つ目は二次量子イメージング型というもので、入射粒子をマイクロビーム化によって細く絞って、スキャンニング照射し、二次的に放出される量子を計測して物体イメージを求めるものです。これらの3種類のイメージング原理を実際に用いる量子ビームごとに具体例をまとめると表3のようになります。殆どの方法が、このマトリックス表現により整理されてしまうことが分ります。この量子イメージング法の現状における技術レベルをテレビ画像に例えるとまだまだやっとな白黒の静止画像がとれる程度の段階です。今後、線源強度、放射線イメージングセンサー、大量画像情報処理システムの開発によりカラーテレビの動画像が取れるようになることを期待したいと思います。

3. シンクロトロン軌道放射光の発生と利用

高速荷電粒子、例えば電子線が運動方向に減速される時放出する光は、制動エックス線と呼ばれ、それに対し、運動方向を円形軌道とするような速度変化を与えた時に接線方向に放出される光がシンクロトロン軌道放射光（略してSORまたは、SR）と呼ばれています。このSORは、極めて大強度の光源である点に特徴があり、物性分析、生体解析、マイクロ加工等に用いられています。

物性分析の例としてEXAFS（Extended X-ray Absorption Fine Structure）について説明します。これは、図1に示したように、光電吸収の断面積曲線が吸収端エネルギーより高エネルギー側で本来スムーズなカーブになるはずのところ、SORできちんと計ってみると吸収断面積に振動的構造が表れるというものです。この振動はクローニッチ構造と呼ばれ、吸収元素の周辺の電子配置の効果であり、逆にこのデータを用いて局所的な電子構造を求めようとするのがEXAFSなのです。図1にクロムのK吸収端付近の吸収断面積が化合物になることによつてどの程度変化するかを示しました。

なお、SOR用の電子蓄積リングを用いてレーザーコンプトン散乱という面白い実験が試みられているので紹介します。この実験配置では電子線とレーザー光が正面衝突するようになっています。普通、ガンマ線と自由電子との散乱をコンプトン散乱と呼び、ガンマ線がそのエネルギーを失う過程として知られていますが、この実験の場合には電子線のエネルギーが200～600MeV、レーザー光が数eVなので散乱により電子線のエネルギーがレーザー光に移行し、レーザー光が1～10MeVの電磁波（しかも方向を定めれば単色エネルギー）になります。つまりレーザーコンプトン散乱により0.7～10MeVの単色のガンマ線を作ることができるのです。この実験は電総研にて試みられています。このようなことが、可能になったのは、電子蓄積リングにより電子を数百mAまでグルグルまわして保持できるようになったことと、レーザー光という高密度の光を使用できるようになったためであります。いずれも量子ビームを高い強度で発生できるようになったためであり、まさに典型的な量子工学的手法の利用例であると言えます。

4. 量子ニュートロニクス研究の提案

中性子は量子ビームの一つですので、もっとその特徴を出した使い方をしてみてはどうかというのが「量子ニュートロニクス研究」を提案している最大の動機です。普通に中性子と物質の反応を考えても、それ程変わったことは起きませんので、この量子ニュートロニクス研究では、特殊物質と中性子の反応を考えてみることにしています。例えば反応の相手物質をプラズマとかイオンビームにしてみます。プラズマの温度上昇とともに中性子の反応断面積は図2のように変化していき、散乱断面積も吸収断面積も $1/v$ になってしまいます。特に散乱断面積は値がかなり大きくなるので、物質をプラズマ化することにより、中性子との反応性を増加できるという性質を示すことになります。

プラズマと中性子の反応ということで補足しますと、レーザー慣性核融合のペレット内（直

径0.1～1 mm程)で発生した高速中性子は、爆縮により高密度化したペレット中に閉じ込められ外部に放出され難くなるという面白い現象が予想されています。しかも、上述の通り物質がプラズマ化すると中性子との反応性が更に増加しますから、中性子の反応性を高める方法としてレーザー爆縮ペレットを用いるというのは面白いアイデアだと思われます。

イオンビームと中性子の反応を考えてみることも大変面白いと思います。つまり、イオンビームと中性子の反応はその相対速度によって反応断面積が変化しますから、例えばウランのイオンビームを共鳴反応エネルギーとかしき反応値以上に加速して熱中性子場に導入することにより、ウランと中性子の反応性を制御することが可能になります。もし、この方式が原子炉の計測とか制御レベルにまで応用できる程強力になれば、イオンビームによる原子炉計測とか炉制御あるいはU-238のイオンビーム燃料という話に発展するので大変興味があります。

また、イオンビームやプラズマ以外に、物質のスピンをそろえて中性子との反応性を制御するとか、超結晶性物質を用いて中性子のストリーミング(一種のチャンネルリング)などを検討してみることも興味ある話題かと思えます。スピン整列に関しては、He-3ガスをレーザービームによりスピン整列させ、実効吸収断面積を変化させてはどうか、もし可能ならレーザービームによりHe-3型の制御棒をコントロールできるのではないかとの話が、先の核データ国際会議(1988年5月、水戸)でも話題になったところです。

いずれにしろ、中性子と新しい物質(イオンビーム、プラズマ、スピン整列物質、超結晶等)との反応を考えてみると、新しいフェイズが展開されるのではないかと思って、このような分野を量子ニュートロニクス研究と呼んで進めてみてはどうであろうかというのが本節の提案の趣旨であります。

5. まとめ

量子工学の概要、特に量子ビームを用いた分析・解析・診断技術とか、シンクロトロン軌道放射光(SOR)の利用、更には提案段階であるが量子ニュートロニクス研究の可能性や期待について説明してきました。今後、このQ-テクにより、原子力工学自身、特に中性子工学の再活性化について何らかのヒントが得られれば、幸いであると思っています。

表 1 量子ビーム工学の応用分野

量子ビーム		装置工学研究	分析・診断分野への応用	材料・物性応用 (微細加工, 機能性材料等)	プロセス工学応用 (同位体分離等)	その他, 医学 エネルギー応用等
光 量 子	レーザー 放射光 エックス線	自由電子レーザー, 新型レーザー, 強力化 コンパクト化, アンジュレータ, 計測系開発 強力線源の開発	レーザー応用計測一般 ホログラフィー, 分光 マイクロ構造解析 (干渉回析, 生体高分子) マイクロ, マクロ構造解析 (結晶回析, ラジオグラフィ ー, CT)	エキシマ・レーザーリソグ ラフィ (~0.3 μm) レーザー記録材料 フォト・リソグラフィ (~1 μm) X線リソグラフィ (~0.1 μm)	レーザー・プロセス レーザー同位体分離 (ウラン濃縮等) LSI製造 照射利用 (高分子, グラフト加工, 食品)	Fusion 医学診断 環境保全利用 排煙, 廃水, 汚泥の処理
	ガンマ線	—	非破壊検査	—	照射利用の他, トレーサ, 密度計, レベル計など	
	イオンビーム 電子線 プラズマ	安定なイオン源開 発, 重イオン加速器 高品質ビーム発生 法 プラズマ生成, 閉じ込め技術, 診断技術	元素分析 (PIXE, RBS) ラジオグラフィ 電子顕微鏡 元素分析, 表面分析 —	イオンビーム微細加工 (リソグラフィ) エッチング 電子線リソグラフィ 機能性高分子 プラズマ・プロセッシング CVD法, a-siH エッチング等	イオン注入 RI製造 照射利用 (コーティング他) 電子ビーム加工, 滅菌 放電加工, 洗浄, 溶接, 切断	医学診断, 治療 Fusion 強力X線源 Fusion ロケット推進
素 粒 子 他	中性子 ポジトロン ミュオン他	強力中性子源開発 (炉, Spallation, 14MeV) Slow e ⁺ 線源開発 Slow μ 源開発	マイクロ・マクロ構造解析 (回析, ラジオグラフィ) 放射化分析 物性測定 (格子欠陥他) ポジトロンCT 物性測定 (μ-SR)	核変換ドーピング 超伝導材開発? ? —	RI製造, 水分計 核変換による滅菌処理 ? —	Fusion 医学診断 ミュオン触媒核 融合

表 2 量子ビームによる微量元素分析法

検出量子 入射量子	自己反射/吸収量子	特性エックス線 (ガンマ線)	光電子/オージェ電子	イオン/中性子
放射光 レーザー	分光吸収・反射 蛍光分光	蛍光エックス線分析	紫外光電子分光 (UPS) 光電子顕微鏡	光イオン分光 (レーザーマイクロプローブ) (質量分析法)
エックス線 (ガンマ線)		蛍光エックス線分光	X線光電子分光法 (XPS)	—
電子線	電子エネルギー損失分光法	EPXA	オージェ電子分光法	—
イオンビーム	ラザフォード後方散乱法 (RBS) 反跳粒子検出法 (ERDA)	PIXE 核反応法 SCANIR	イオン中和分光法	核反応分析法 SIMS イオンマイクロプローブ 質量分析法
中性子	吸収法	(二次ガンマ線分析) (放射線分析法)	—	核反応法

PIXE=Particle Induced X-ray Emission (粒子励起X線放出)

EPXA=Electron Probe X-ray Analyzer (電子入射X線分析)

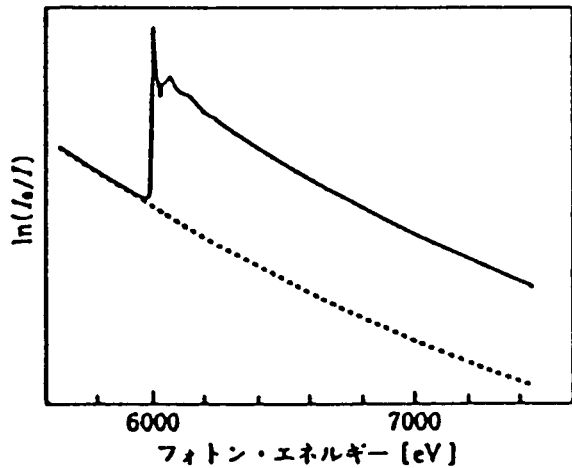
SIMS=Secondary Ion Mass-Spectroscopy (二次イオン質量分析)

SCANIR=Surface Composition by analysis of Neutral and Ion Impact Radiation (粒子線衝撃光放射分析法)

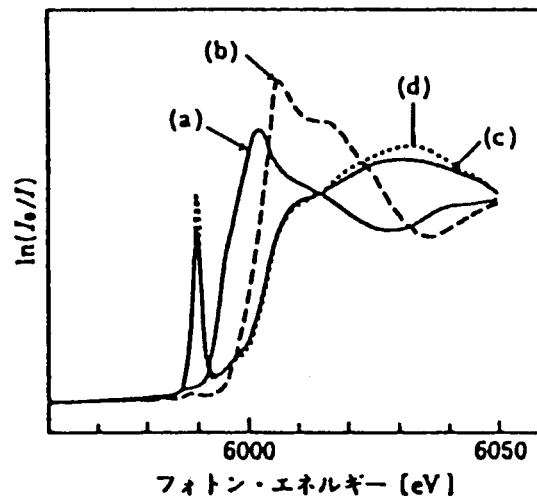
表 3 量子イメージング法の分類

放射線源	マイクロ 回析像	(マクロ) 透過像	二次粒子 イメージング型	線源と測定器
X線 (γ 線)	結晶回析・散乱	X線写真 X線CT	蛍光X線分析 (マイクロビーム方式)	X線管, フィルム X線TV RI X線用PSD
シンクロトロン放射光 (SOR光)	小角散乱法, トポグラフィ	X線テレビ X線CT	蛍光X線分析 (マイクロビーム方式)	SOR X線用PSD 輝尽性フィルム
電子線	電子顕微鏡	β -ラジオグラフィ (オートラジオグラフィ)	X線マイクロ アナライザ	静電 蛍光板 加速器 etc
荷電粒子	—	ラジオグラフィ	PIXE (マイクロビーム方式)	加速器 Ge(Li) 測定器
中性子	中性子回析 中性子小角散乱法	ラジオグラフィ, CT, テレビ (熱, 共鳴, 速)	二次 γ 線分析	原子炉 中性子用PSD 加速器 SSTR
ポジトロン	陽電子顕微鏡	—	ポジトロンCT	RI 加速器 シンチレーター

注) CT=Computer Tomography (計算機による断層撮影法)
 SOR=Synchrotron Orbital Radiation (放射光)
 PSD=Position Sensitive Detector (位置敏感型検出器)
 SSTR=Solid State Track Recorder (固体飛跡検出器)



① K吸収端近辺の振動効果
(クロニッチ構造)



② CrのK吸収端構造の分子形による変化
(a) H_2SO_4 中のCr(II)
(b) $\text{Cr}(\text{ClO}_4)_3$
(c) HClO_4 中の XlaCr_2O_7

図1 EXAFSの説明図

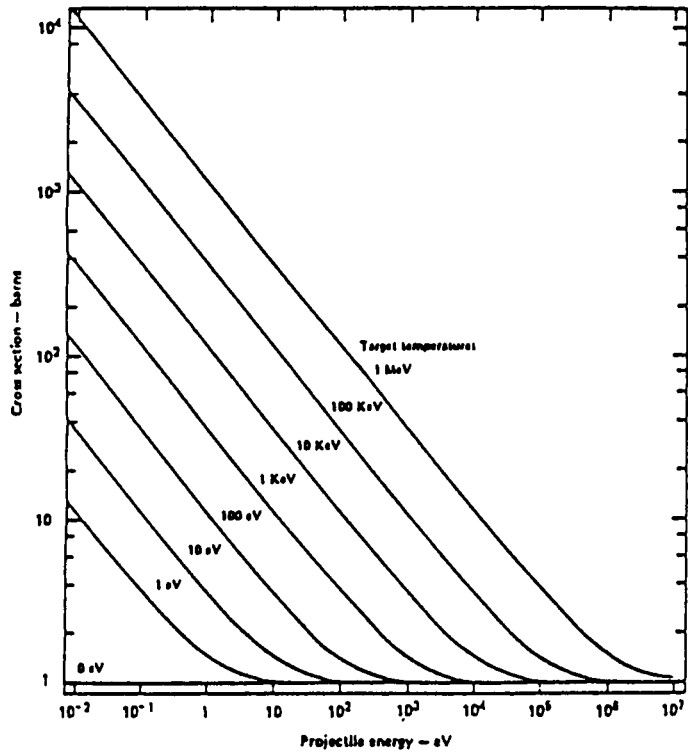


FIGURE 9. Doppler broadening of an initially constant cross section to temperatures from 1 eV to 1 MeV (KT).

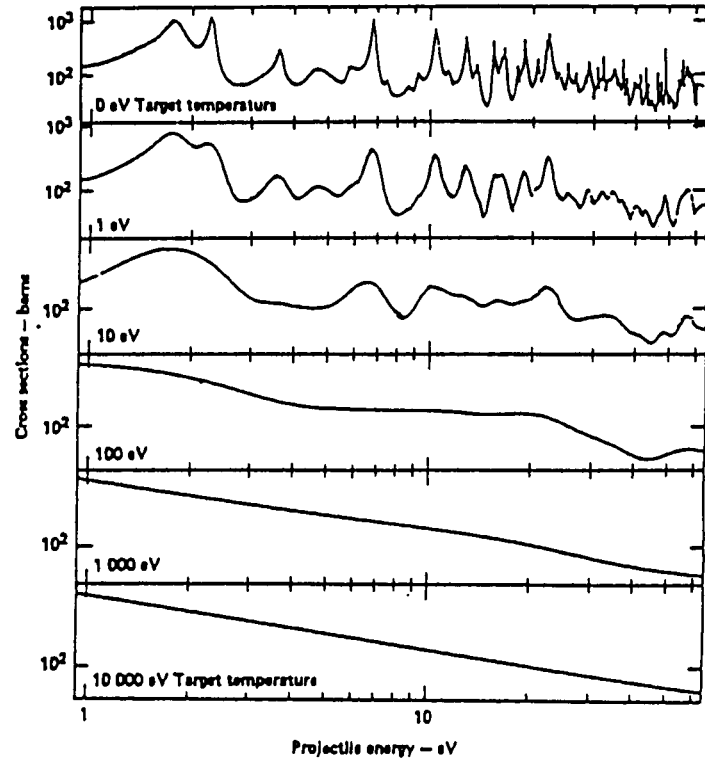


FIGURE 15. Doppler broadening of the ^{235}U neutron total cross section to stellar or CTR-core temperatures (KT = 1 eV to 10 keV; $T \approx 1.2 \times 10^4$ to 1.2×10^6 K).

図2 高温プラズマ物質と中性子の反応断面積の例
 (左) 散乱断面積, 但し常温で $\sigma(E) = 1.0$ としてある。
 (右) U-235の全断面積