

1. 量子ビーム (超短パルス, 低速陽電子, 自由電子レーザー) の発生と応用



技術解説

田川 精一*, 奥田 修一**, 菅田 義英***

Generation and Application of Quantum Beams such as Ultra Short Pulses, Slow Positrons and Free Electron Lasers

最近の放射線科学の進展, 特に, 新しい放射線の発生と応用に関して多くの関心と期待がかけられている。平成7年度に改組になった大阪大学産業科学研究所(以下産研と略す)はこれらの新しい放射線を含むビーム応用を展開してゆくために量子ビーム科学研究部門を発足させ, 量子ビーム科学の研究を推進させてゆくことになった。産研附属放射線実験所(以下放射線実験所と略す)は2台のライナックを持ち, 量子

ビーム科学研究部門と協力して, 量子ビーム科学の研究を進めてゆく中核的な施設の役割を果たすことを目指している。

量子ビームという言葉は科学技術の分野で最近盛んに使用されるが一般には馴染みが薄いので簡単に説明する。狭い意味では電子, 陽電子, レーザーなどの波動性と粒子性を持つ量子のビームともとれるが, 実際には, 物質(原子, 分子)に量子レベルでの相互作用を誘起するビームという広い意味で, 現在, 使用されている。したがって, 放射線とかレーザーとかはすべて量子ビームと言える。量子ビームの中でも, 加速器を用いて発生する強力な極超短パルス, 低速陽電子ビーム, 自由電子レーザーなどの基礎研究や産業利用に将来大きな貢献が期待される先端的な量子ビームに特に強い関心と期待がかけられている。



* Seiichi TAGAWA
1945年4月8日生
1969年東京大学・工学部・原子力工学科卒業
現在, 大阪大学産業科学研究所,
量子ビーム科学研究部門,
(兼)産業科学研究所附属放射線
実験所, 教授(兼)放射線実験所所長, 工学博士,
放射線高分子化学, 量子ビーム物質科学,
量子分子工学
TEL 06-879-8500 FAX 06-876-3287
E-Mail tagawa@sanken.osaka-u.ac.jp

** Shuichi OKUDA
1952年1月14日生
1974年大阪大学・工学部・原子力工学科卒業
現在, 大阪大学産業科学研究所, 附属放射線
実験所, 助手, 工学博士, 自由電子レーザー,
中性子ラジオグラフィ
TEL 06-879-8511 FAX 06-875-4346

*** Yoshihide HONDA
1956年10月28日生
1988年大阪大学・工学部・電磁工学(博士課程)
卒業
現在, 大阪大学産業科学研究所, 附属放射線
実験所, 助手, 工学博士, 低速陽電子ビームの
発生と応用
TEL 06-879-8511 FAX 06-875-4346

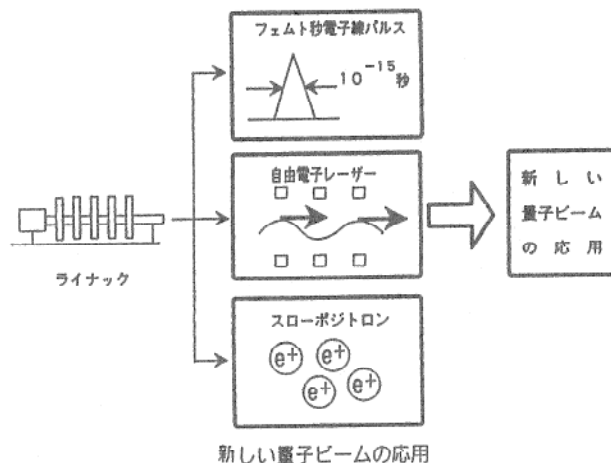


図1 大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所の加速器を用いた先端量子ビームの研究

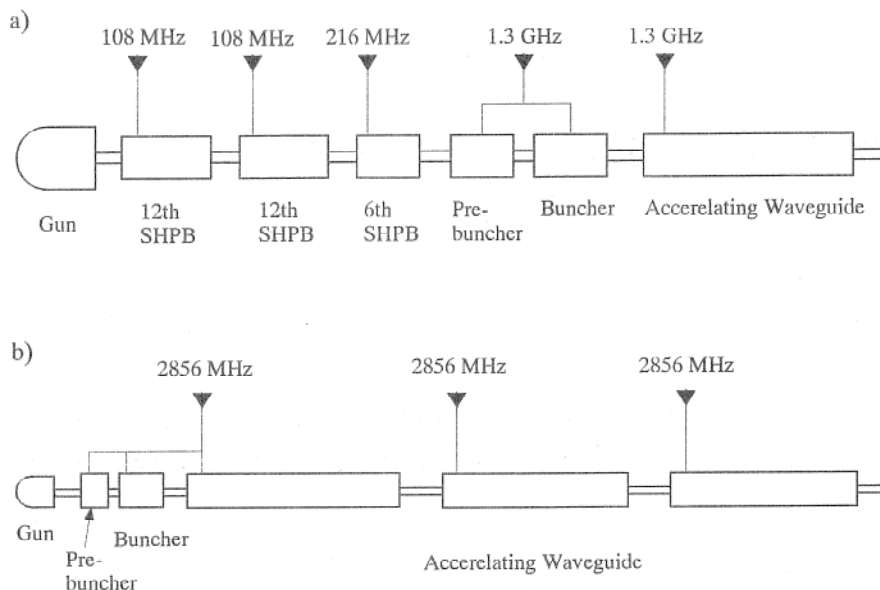


図2 (a) Lバンドおよび (b) Sバンドライナックの構成

個々の先端的な量子ビームに関する研究は欧米及び日本を中心に盛んであるが、また、種々の先端的な量子ビームに関する研究を主目的とする研究センターは設立されていない。放射線実験所は産研の量子ビーム科学研究部門と協力して、種々の先端的な量子ビームの総合的な研究を行っている。特に、図1に示すような加速器からの世界最強レベルの低速陽電子の発生、国内で最初のMW級の自由電子レーザーの発振、世界で最初の超短電子線パルスとフェムト秒レーザーとのマイクロ波同期とそれを応用した最先端のパルスラジオリシスシステムの製作が順調に進んでいる。ここでは放射線実験所が現在進めている将来大きな発展が期待される低速陽電子、自由電子レーザー、超短電子線パルス利用の概要を紹介する。

2. 電子ライナック

まず、先端量子ビームを発生する電子ライナックの説明を行う。現在、産研には電子ライナックが2台あり、加速のために供給するマイクロ波の周波数によってそれぞれLバンド、Sバンドライナックと呼ばれている。図2にこれらの構成を示す。

Lバンドライナック(周波数1300MHz)は最大エネルギーが38MeVで、1978年より運転されている全学共同利用装置である。多くの電子

を時間的に圧縮するために、3台のサブハーモニックプリバンチャー(SHPB)を備えている。この結果最大電荷量67nC(ナノクーロン)の単バンチビームが得られる。バンチの時間幅は約20ps(ピコ秒)で、パルスラジオリシスなど高速過渡現象の研究に用いられている。また2次ビームとしてのチェレンコフ光、遷移放射光、コヒーレント放射光、自由電子レーザーなどの放射光を発生させる研究が進められている。

Sバンドライナック(周波数2856MHz)は最大エネルギーが150MeVで、1989年に運転を開始した。3本の加速管と3組のマイクロ波源で構成されている。加速勾配が最大19.3MV/mと大きいことが特長で、比較的高い加速エネルギーに対してコンパクトな装置である。このビームを利用して、主として低速陽電子源の開発研究が進められている。

3. 量子ビームの発生と応用

3.1 自由電子レーザーの発生と応用

加速器からの高エネルギー電子を磁場で偏向して時に放射されるシンクロトロン放射光は、波長が広く分布しコヒーレントではない。この光にレーザーとしての特性を持たせるのが自由電子レーザー(Free-Electron Laser, FEL)である。FELは次世代の高輝度光源として広範な利用が期待され、開発研究が進められている。



図3 FEL装置の概念図

FELには特に質の良い電子ビームが必要で、高度な加速器技術の開発が研究の中心である。既に発振に成功している赤外のFELは、生物、医学、物性など広い研究分野への応用が注目され、アメリカ、ヨーロッパで6台程の利用装置が稼働している。また日本でも装置開発と利用の準備が行われている。

FELの原理と特徴について簡単に説明する。高速の電子ビームをウィグラーと呼ばれる周期磁場装置に入射すると、電子はこの中で蛇行運動をする(図3)。放射されるシンクロトロン放射光は、電子の周期運動の結果特定の波長の光になる。この波長は、電子のエネルギーとウィグラーの条件だけで決まる。さらにFELにおいては電子ビームと放射光との相互作用の結果、全体として位相がそろったコヒーレントな光が増幅される。このような放射過程から、FELには次のような優れた特性が期待される。

- (1) 波長が自由に選択できる。
- (2) 高い出力密度が得られる。
- (3) 高いエネルギー変換効率を得られる。

次に、産研のFEL実験装置について具体的に説明する。産研では、Lバンドライナックを用いた、赤外FELの発振実験を行っている。FEL用輸送系によって加速した電子ビームを光共振器へ導く。光共振器を構成する2枚の鏡の間隔は5.5mである。またFELの実験波長域は10～60 μm である。

この装置を用いて1994年に、波長32～40 μm で赤外FELの発振に成功した。またこのFELのピーク出力が1MWを越えることが確認された。

FELの特性と応用について簡単に説明する。短いパルスであることは、FELの大きな特徴の一つである。マイクロ波による加速装置では、電子ビームがマイクロ波と同じ周期で繰り返すマイクロパルス例になる。そしてFELもこの

構造を反映する。FELのマイクロパルスの幅は、ライナックの装置で一般に1～10psになる。

FELはウィグラーの種類によって直線偏光や円偏光になる。FELの基本特性と、利用する上での効果(基礎研究を対象とした)を表1に示す。レーザーメスなど医療への応用についての研究も進展している。また様々な産業分野での利用についても検討されているが、今後の課題も多い。

表1 基礎研究におけるFELの利用分野

FELの基本特性	利用上の効果
波長可変性[…軟X線～遠赤外線]	選択的励起とイオン化 分光分析への利用
高出力[MW～GW(ピーク出力)]	高密度励起 多光子吸収 SNの改善 空間分解能の改善
パルス特性[サブピコ秒～ナノ秒]	高速過渡現象の測定 2次反応の分離 中間体の励起
偏光性[直線偏光,円偏光] 高効率	偏光による選択的励起

FEL以外のレーザーでは開発が困難なのは、波長10～1000 μm の遠赤外とX線領域であるといわれる。既に多くの発振実験が行われている赤外域のFELでは高出力、高効率の実現に開発の重点が置かれ、原子力分野のプロジェクトや、生物、医学、物性などの基礎研究への利用の計画が進められている。また加速器を含めた装置の小型化も検討されている。

3.2 低速陽電子の発生と応用

陽電子は電子と電荷のみが反対の反粒子であり、物質中で電子と対消滅する。この時、511keVの γ 線をそれぞれ反対方向に放出する確率が高い。この性質から陽電子はこれまで工学や医学の分野において利用されてきている。医学で利用される陽電子トモグラフィーは、血液中に陽電子を放出する放射性同位元素(RI)をいれると、患部にこれが集中するため、ここで放出された陽電子が消滅する時の γ 線を測定することで患部の位置や形状を調べることができる手法である。陽電子のままで固体中に入った場合、陽電子は熱化・拡散し、この過程で電子密

度のより高いところに移動し消滅したり、電子と陽電子が束縛状態を作る水素原子様のポジトロニウムを形成し、より大きい空間に移動し消滅する。工学の分野でのこれまでの利用は主にこれらの消滅 γ 線を利用するもので、消滅時の陽電子のエネルギーがほとんど0であることから、消滅 γ 線の511keVからのエネルギーのずれや2本の γ 線の180度方向からの運動量のずれは消滅する相手の電子の状態を反映していることになる。これを利用することでたとえば金属のフェルミ面を正確に決定することができる。また消滅するまでの時間(寿命)を測定することで物質中での欠陥分布の評価を行ったり、自由空間分布(体積)の評価に関する研究も行われている。特に欠陥の検出感度は非常に高く、半導体を中心に精力的に研究が行われている。

このような研究で使用される陽電子源は、陽電子を放出する(β^+ 崩壊する)RIである。医学で用いるRIの場合、人体に直接入れるため、短寿命の核種でなければならず、この場合加速器がRI生成に利用される。一方、工学において利用されるRIは主として市販のものであり、そのため半減期も長い ^{22}Na などがよく用いられている。これまで物性研究に用いられるRIは、精々100mCi程度までの強さのものがよく利用されてきている。寿命測定には普通 β^+ 崩壊で発生した陽電子がそのまま使われているが、試料の深さ方向の欠陥分布を知るためには、陽電子のエネルギーを揃えること(単色化)が必要であり、この場合通常 $10^5/\text{s}$ 程度以下の陽電子量となっている。

陽電子には電子と消滅する性質に加えて、固体、特に金属に入った後拡散し、再び放出される性質がある。これは主として金属表面の電荷2重層によるもので、この性質を利用し、前述の単色化を行うことが可能である。またこのことは回折現象と密度に関係している。即ち、電子は固体表面から放出され難いのにに対し、陽電子は放出され易く、また放出された陽電子は2次電子と区別できる利点がある。このことは、電子ビームを用いる方法と同じ方法、たとえば低エネルギー電子回折、反射高エネルギー電子回折、電子顕微鏡などで、表面第1層以下の、

電子では得られない、あるいは得られ難い情報も陽電子を用いることで、得ることができることを示唆している。しかし、このような回折や散乱等の実験をする場合、市販のRIでは陽電子量が不十分である。

陽電子を多量に発生させる方法には加速器や、原子炉で β^+ 崩壊をするRIを生成し、これを用いる方法と、電子線加速器を用いて直接対生成を行い、このうちの陽電子だけを取り出す方法がある。我々はSバンド電子線型加速器(Sバンド電子ライナック)を用いて多量の陽電子を発生させる実験を行っている。Sバンド電子ライナックで低速・単色陽電子を発生させるには、通常高速電子(本研究における電子エネルギーは約100MeV)をコンバーターと呼ばれる重金属に照射し、ここで対生成を起こさせる。この後にモデレーターと呼ばれる金属箔を設置し、ここで再放出を利用し単色化を行う。またコンバーターで生ずる多量のX線はモデレーター内でも対生成を引き起こし、ここでも陽電子を発生させ、この陽電子もモデレーターから放出される。この方式で得られる低速陽電子量は $10^7 \sim 10^8/\text{s}$ と量が多い。我々はこれまでに陽電子生成に関してはコンピューターシミュレーションを行い幾何学的配置の最適化を行い、輸送効率の向上を行ってきた。現在得られている陽電子量は計測の都合上、電子ビーム電流を下げて実験を行っているため、 $10^7/\text{s}$ 程度の陽電子量となっているが、単純に陽電子量が電子の電流量に比較するとすると、Sバンド電子ライナックの通常の運転モードにおける電流量では $2 \times 10^8/\text{s}$ 程度の陽電子を得ることができると考えられる。今後様々な実験を行えるようにするため、Lバンド電子ライナックの運転を行っているときにも陽電子の実験が行えるように、ビームラインの延長をすると共に、再放出過程を利用した輝度強化によるビームのマイクロ化や寿命測定のためのパルス化等の研究も行っている。

3.3 超短電子線パルスの応用の新展開

超短電子線パルスのパルス特性はパルスラジオリシスの時間分解能、コヒーレント放射光の最短波長、自由電子レーザーのパルス特性利用などで大変重要な役割を演じる。ここでは最近、

我々が世界に先駆けて開発した超短電子線パルスの加速マイクロ波に同期したフェムト秒レーザーを再励起及び分析光とした新しいパルスラジオリシス技術について紹介する。この方式のピコ秒パルスラジオリシスの装置は従来我々が主導的な役割を果たしてきたピコ秒パルスラジオリシスの装置としても飛躍的に測定精度及び測定範囲が広がるため、放射線化学の初期過程の解明及び物質科学の研究に大きな貢献ができるものと思われる。また、この技術を延長するとフェムト秒電子線パルスとフェムト秒レーザーとの同期がフェムト秒の時間領域で自由にとれるようになり、フェムト秒パルスラジオリシスの実現も可能になり、高エネルギー放射線が誘起する現象がいよいよフェムト秒時間領域で測定できることになりそうである。

パルスラジオリシス法は非常に短い放射線パルスを物質に照射し、放射線照射によって生成した短寿命の反応中間体を種々の分光的方法で測定する研究手段である。放射線パルスとしてはイオンやX線も用いられるが、通常は電子線パルスが用いられる。分光手段としては主として光学吸収や発光が用いられるが、電気伝導度、ESR、光散乱など多くの手段が用いられている。現在、ピコ秒パルスラジオリシスは我々も含め、世界の数カ所で行われているが、時間分解能は数ピコ秒程度で、レーザーと比較すると劣っている。その主たる原因はレーザーパルスに比較して放射線パルスの短縮及び励起光と分析光(分析手段)との間の同期が大変難しいということにある。レーザーでは非線形効果によるパルスの短縮が容易で、かつ一つのレーザーパルスを分割して励起光と分析光をつくるので同期の問題がないが、放射線の場合には大きな問題である。電子線パルスの短縮は1パルス中の電荷を数ナノクーロン以上にしようすると大変難しくなるが、既にいろいろなフェムト秒電子線パルスは出ており、1ピコ秒を切れない同期の問題が最も大きな問題になりそうである。高エネルギーの電子線パルスに伴って発生するチェレンコフ光は電子線パルスに同期した白色

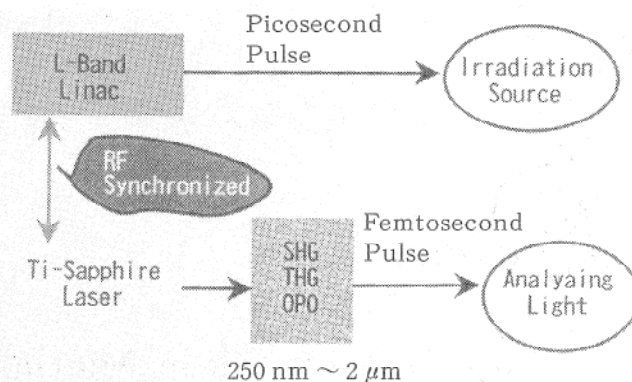


図4 マイクロ波同期したフェムト秒レーザーを用いた新しいピコ秒パルスラジオリシス

光パルスを出す。光の指向性と長波長側で光強度が弱い欠点がある。図4に示す今回、開発した方式では、超短電子線パルスの加速マイクロ波と同期した広い波長領域をカバーする指向性のよいフェムト秒レーザーパルス及びフェムト秒白色光を第2励起光もしくは分析光として用いるので上述の問題点は解決されることになる。今後、フェムト秒パルスラジオリシスにとっては電子線パルスと分析光パルスのパルス幅を短くすると同時に時間ジッターを如何に小さくするかということが重要な技術課題になっている。

4. ま と め

ここでは、大阪大学産業科学研究所の附属放射線実験所で行っている3つの先端的な量子ビームである低速陽電子、自由電子レーザー、超短電子線パルスの個々の研究について述べた。今後はこれらのビームの複合的な利用を展開してゆきたい。既に3.3で紹介したように超短電子線パルスとフェムト秒レーザーとの複合利用は開始しているが、同様に低速陽電子、自由電子レーザー、超短電子線パルス、フェムト秒レーザーの4つの先端量子ビームの複合利用計画も進行中である。今後はこれらの量子ビームと最先端の研究手段を組併せて、原子・分子レベルの制御も含む材料科学などの先端的な研究分野の開拓を行ってゆきたい。