シンクロトロン軌道放射線の利用[†]

佐々木 泰三

東京大学教養学部基礎科学科

153 東京都目黒区駒場3-8-1

Key Words: electron accelerator, synchrotron radiation, vacuum ultraviolet, X-ray, photoionization, spectroscopy, diffraction, radiation effect, wiggler

1. はじめに¹⁾

シンクロトロン（軌道）放射〔synchrotron (orbital) radiation, 略称 SOR〕は高エネルギー電子加速器，たとえば電子（陽電子）ストレージ・リングの円軌道で発生する光で，そのスペクトルは電子が軌道を巡回する基本周波数からX線領域におよび，真空紫外（波長185～1 nm, 略称 VUV）・X線（波長1～0.01 nm）領域で実用的連続光源として表1のような分野で最近10年余の間に世界各国で盛に用いられるようになった。

SORの発生装置は加速器であって，人工光源の従来の常識からはきわめて異常にみえる。図1の写真は現在田無の東大原子核研究所で光源として運転されているSOR-RINGで，軌道の平均直径5.5 m，定常運転エネルギー0.38 GeVの電子ストレージ・リングである。この装置は東大物性研軌道放射物性研究施設に属し，6名の専任スタッフの手で運転され，年間延120名の利用者が30余のテーマで実験している²⁾。この装置はどちらかといえば小型のもので，のちに述べるように，光源用加速器の主力はすでに1桁上の3 GeV級の装置に移っている。このような巨大装置を用いる研究は，設備にも運転にも多くの費用と労力を要するばかりでなく，測定装置に光源をとりつけるという目的支配型の実験スタイルから，集中的に設備・管理された光源に測定装置を付設するという手段優先型の研究スタイルへの転換をもたらし，個々の研究者にとっては仕事と生活，研究と教育の分離が生じやす

表1 シンクロトロン放射の利用法と応用分野

実験方法	情 報	応 用 分 野
分光学	エネルギー準位	物理学
吸収・反射	状態密度	物性
発光・電子放出	エネルギー移動	プラズマ
EXAFS	励起，緩和	天体・地球
光電子分光学	化学変化	化学
UPS・XPS	化学結合・解離過程	化学分析
オージェ電子	構造	生物学
イオン分光学		生理学
質量分析	分子・結晶・非晶体	医学・農学
発光	液体・溶液	機械工業
X線回折	生体高分子	金属工業
動的測定	熱振動	電気工業
トポグラフィ	結晶成長	材料技術
X線弾性散乱	格子欠陥・転位	酸化
散漫散乱		腐食
小角散乱	相転位	化学工業
X線非弾性散乱	ドメイン構造	触媒
コンプトン，ラマン	生体組織	エレクトロニクス
X線光学	筋肉・膜等	微小回路素子
リソグラフィ	メスバウア効果	エネルギー開発
ミクロスコピー	放射線効果	環境
照射・生物検定		

く，苦勞が多い。それにもかかわらず，加速器からの光——SOR——にますます多くの研究者がひきつけられ，光源専用加速器の建設に多くの努力が払われ，SORは現代科学技術に大きなインパクトを与えつつある。その理由をあえて一言でいえば，「物質」の束縛をはなれることによって，人類ははじめて電磁波の全スペクトルで tunable な人工光源を手にしたということ，さらに，それによって放射線と物質の相互作用

[†] Application of Synchrotron Radiation. Taizo SASAKI: Department of Pure and Applied Sciences, College of General Education, University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153.

図1 東大物性研 0.4GeV 光源用加速器 SOR-RING

が最もつよい VUV-X 線の全域ではじめてその相互作用の全貌を見る可能性ができた、ということであろう。表1からおわかりいただけるように、SORの応用はいまやあまりにも広い範囲にわたるので、限られた紙数でそれを概観することは非常にむずかしい。以下では SOR の特徴について簡単な説明をしたのち、放射線効果に関連のある分光学の最近の動向を中心に、いくつかの話題を紹介するが、よりくわしくは文献(1)とその巻末のリストを利用していただきたい。

2. シンクロトロン放射の性質¹⁾²⁾

一般的に定義すれば SOR は「速度に直交する加速度 ($\vec{a} \perp \vec{v}$) のもとで運動する荷電粒子の放射」である。荷電粒子の速度 $|\vec{v}| = v$, 光速 c , $v/c = \beta$ とすると, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} = E/m_0c^2$ で定義される量 γ は静止質量 m_0 の粒子の全エネルギー E を静止エネルギー m_0c^2 で規格化したものである。速度に平行な加速度 ($\vec{a} \parallel \vec{v}$) のもとでの発光は $\perp$ の場合にくらべて $1/\gamma^2$ であって, $\gamma \gg 1$ (たとえば $E \geq 0.1 \text{ GeV}$ の電子) の場合は無視できる。また放射のつよさは γ^4 に比例するので, 同じ E の値に対して異なる粒子の発光のつよさは m_0^{-4} に比例する。したがって陽子は同じエネルギーの電子の 10^{-13} 倍しか光らない。

加速器の磁場 $B(\text{kG})$ のなかで半径 $\rho(\text{m})$ の円軌道を描くエネルギー $E(\text{GeV}) = B\rho/33.35$ の電子について計算すると, 軌道の1周ごとに1個の電子が放射によって失うエネルギー $\delta E(\text{keV})$ は

$$\delta E = 4\pi e^2 \gamma^4 / 3\rho \quad (1)$$

となる。これを電流 $I(\text{ampere})$ の電子が放出するパワー (kW) であらわすと

$$P = 88.5 \times \frac{IE^4}{\rho} \quad (2)$$

である。

図2 SOR-RING および Photon Factory の SOR スペクトル

この放射のスペクトルを物性研の SOR-RING と, 現在筑波の高エネルギー研で建設中のフォトン・ファクトリーの 2.5 GeV リングについて示すと図2のようになる。図の横軸はフォトン・エネルギー (eV) で, 波長 (Å) に換算するには $\lambda(\text{Å}) = 12398/\hbar\omega(\text{eV})$ の関係を用いる。縦軸は 1 mA の電子ビームが毎秒軌道の円弧上 1 mrad に放出するフォトン数を, それぞれのフォトン・エネルギーの 10^{-2} のバンド幅に対して目盛っている。SOR-RING に対しては入射エネルギー 0.3 GeV, 運転エネルギー 0.38 GeV の場合, PF リングについては 2.5 GeV の偏向磁場と, 直線部に設置される 60 kG のウイグラー磁場に対して求めている。このスペクトルの低エネルギー側はゆるやかな傾斜で, E によってあまりかわらないが, 高エネルギー側は鋭く落ち込み, E によって著しく変化する。この2つの領域を分ける特性エネルギー $\hbar\omega_c$ は

$$\hbar\omega_c = \frac{3}{2} \frac{\hbar c \gamma^3}{\rho} \quad (3)$$

で与えられ, γ^3 に比例する。スペクトルの形を与える関数は第2種変形ベッセル関数 $K_{5/3}$ を用いて

$$G_n(y) = y^n \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta, \quad y = \frac{\omega}{\omega_c} \quad (4)$$

の形で与えられ, 図2は $n=1$ の場合である*。

円運動をする高エネルギー電子 ($\beta \approx 1$) の放射スペクトルが広帯域の連続スペクトルになるのは相対論的效果であって, 電子の座標系でみると双極子放射をしているもの³⁾が, 実験室系では前方に γ^{-1} の角度をもつ円錐のなかに放出されるためである。観測者は電子がほとんど光速で長さ L の軌道を一周する周期 L/c の

* 式(4)で $n=0$ は単位フォトン・エネルギーあたりの光子数, G_2 は単位波長あたりの光子数, G_3 は単位波長あたりのパワーの式になる。

うち $1/2\pi\gamma$ のきわめて短いパルス $\Delta t' \equiv \rho/c\gamma$ の間だけ光を見る。 t' は電子の固有時間なので、実験室系では γ^{-2} に短縮し、 $\Delta t = (\rho/c)\gamma^{-3}$ だけ光が見える。この逆数が式(3)で与えた特性周波数 ω_e に対応し、このパルスにふくまれる高調波の限界の目安を与えている。SOR-RING の例でいえば $L/c = 58 \text{ nsec}$, $1/2\pi\gamma = 2 \times 10^{-4}$ だから、個々の電子の放射のパルス幅は約 12 psec である。このように鋭い指向性が SOR の一つの特徴であって、この平行度は実用的なレーザーのそれに匹敵する。加速器の軌道の切線方向で光を見ると、軌道の方位角 θ のある範囲からの光が見えるので、水平面内では角度依存性をしらべることはむずかしいが、垂直方向の偏角 ϕ については強度（パワー）は

$$P(\lambda, \phi) = \frac{27}{32\pi^3} \frac{e^2 c y^4 \gamma^6 \xi^2}{\rho^2} \cdot \left[K_{2/3}(\xi) + \left(\frac{\gamma\phi}{\xi} \right)^2 K_{1/3}(\xi) \right] \quad (5)$$

ただし、

$$\xi = 1 + (\gamma\phi)^2, \quad \xi = \frac{y}{2} \xi^{3/2}$$

で与えられ、これは測定可能である。この式のなかの $K_{2/3}$, $K_{1/3}$ はいずれも第2種変型ベッセル関数で、それぞれ軌道面に平行、および垂直な偏光成分をあらわす。図3は SOR-RING の場合を例にとって2つの波長、5 nm と 20 nm での角度分布と偏光特性を示したものである。一般に短波長へいくほど指向性はつくくなる。偏光特性で著しい点は軌道に平行な面上 ($\phi = 0$) で $K_{1/3}$ の係数がゼロになり、軌道面に平行な電気ベクトルをもった直線偏光がえられることである。この点は偏光子を使うことができない VUV や X 線の領域できわめて重要である。ただし、実際の加速器と測定系の組みあわせで、「軌道面に平行」という条件は完全に成り立つことがないので、偏光特性の利益は若干引きされる。

以上の理論的結果は1940年代に高エネルギー電子加速器の設計者たちが放射による電子のエネルギー損失とその軌道形成への影響をしらべるために計算したもので、基本的な公式は Schwinger, Sokolov ら米ソの指導的な理論家によって導かれた。1950年代になってコーネル大学の Tomboulion, モスクワ大学の Kulikov ら、1960年代に NBS の Madden, DESY の Hanel らがスペクトル・角度分布・偏光特性などをしらべ、古典電気力学の一つの帰結としての SOR の理

図3 SOR-RING (0.4 GeV)における SOR の角度分布と偏光特性²⁾, || 軌道面に平行な成分, ⊥ 垂直成分

論は実験精度の範囲内ですべて成立つと考えられている。

実用的な立場で光源としての SOR の重要性をまとめてみるとつぎのようになる。

- 1) 真空紫外・X線領域で、従来実用的な光源がとびとびにしかなかった $\hbar\omega = 10 \sim 10^5 \text{ eV}$ の範囲を全部カバーするなめらかな連続スペクトルである。
- 2) 強度がきわめて大きい。
- 3) 平行度が高い。
- 4) 偏光度が高い。
- 5) 特性が理論的にわかっており、制御できる。
- 6) パルスのに発光する。
- 7) 光源が高真空中で動作しており、測定系を汚染しない。

以上の1)～5)はすでに述べたことであるが、5の点は実用上きわめて大きな意義をもっている。すでに世界各国の政府機関が黒体放射でカバーできない短波長領域の放射標準として SOR を利用する研究をすすめており、一部はすでに実用化している。

6)の点は円形加速器の加速方式によって生ずる利点で、SOR 自体とは関係がない。加速器のなかで電子はとびとびのバンチ（集団）をなしており、この集団の発光をわれわれはパルスのに観測する。たとえば

SOR-RING では通常7個のバンチが軌道をまわっているが、そのうち1個だけを残して他を消すと、58 nsec の周期で1 nsec 幅のパルスを観測でき、これを用いて励起した原子・分子の緩和過程を58 nsec 以下の時定数まで観測することができる。

3. SOR の利用³⁾

真空紫外、とくにフォトン・エネルギー $h\nu \geq 10\text{eV}$ の極紫外から軟X線の領域は電磁放射と物質の相互作用が、凝集状態のいかんにかかわらず最もつよい領域である。10 eV というのは価電子の電離のしきい値の目安で、10 keV では遷移金属までの元素ではすべての内殻吸収がおわって、物質は放射線に対してふたたび透明になる。放射線効果の研究はしたがっておもにこの領域で物質の励起・電離の断面積、始状態・終状態ごとの部分断面積を知ることからはじまる。

励起状態にある原子の系は、そのエネルギーを蛍光・電子放出・解離・格子欠陥生成・熱運動、また多くの場合、その組み合わせや連鎖の形で放出する。これらのエネルギー移動の定量的測定と解析によって、われわれは放射線効果の理解に到達する。

放射線の透過力がつよく、測定の容易なX線領域は別として、一次過程の断面積の知識は1960年代にはほぼ25 eV まで得られるようになった。この領域はおもに価電子のみが関与する過程であって、スペクトルは凝集状態に支配される。しかし、放射の全領域を通じて一次過程・二次過程の断面積の知識がえられるようになったのは1960年代後半以後、SOR の利用がはじまってからのことである。以下の各節で、SOR による原子・分子・固体の分光学的研究の現状を、代表的な例をあげて概観したのち、SOR 利用の有望な分野と

されている構造研究、パタン再生などの話題にふれ、放射線研究への応用についても簡単に紹介する。

3.1 原子分光学⁴⁾⁵⁾

振動子強度の約半分が束縛状態に配分される水素原子を唯一の例外として、一般に光と物質の相互作用の圧倒的部分は電離連続帯でおこる。この10年で光電離の研究には飛躍的な進歩があり、それに伴って原子物理学そのものも大きな変貌をとげつつある。一言でいうならば、原子内の電子相関について多くの実験データが集積されつつあり、これは理論にも新しい課題をなげかけている。

図4はXeの吸収断面積(係数)を価電子吸収帯から1 keV までの範囲で示したもので、おもに NBS (米)と DESY (独)の実験結果である。65~70 eV の構造は $4d \rightarrow np$ 遷移で点線が気体、実線が固体を示す。凝集状態の差はおもにこの部分に集中し、全体の様子はほとんど相によらない。ここには nf へのリドベルク系列がまったくあらわれず、 $4d \rightarrow \epsilon f$ の電離連続帯は100 eV 付近に山をもつ大きな吸収帯をつくる。この特徴は遠心力項から生ずるポテンシャル壁によって、低エネルギーの f 終状態が内殻領域からしめ出される効果であるが、スペクトルの満足すべき定量的な理論はまだえられていない。このような内殻光電離には多くの場合、内殻の空孔と終状態電子の相互作用や、遷移に直接関与しない他の殻の電子との相関の効果などがあって、価電子の固有状態を求めるのに有効であった一電子波動関数が役に立たない場合が多い。

吸収・光電離実験の標的としての中性原子(単原子気体)を得ることは一般に困難で、原子の実験は希ガ

図4 Xeの吸収スペクトル³⁾。実線：固相，点線および記号○△■等：気相

図5 Ne の光電離断面積と部分断面積⁶⁾

スに集中し、ついで金属がよく研究されている。図5はNeの吸収の全断面積と、多重過程をふくむ部分断面積である⁶⁾。この図の結果は全部が実験でえられたものではなく、断片的なデータを理論でつないだものである。希ガスについては最近 Daresbury 研究所(英)で全断面積の値がまとめられ、公表されている⁷⁾。

ふたたび図5の Ne にもどると、 (ϵ, n) (ϵ, ϵ) で示される多重過程の部分断面積が無視できない大きさをもっていることがわかる。 (ϵ, n) は1価イオンの励起状態、 (ϵ, ϵ) は2価イオンの生成を示す。このなかには shake up, shake off などとよばれる緩和過程で生じた効果もはいつているが、電子相関によって1段階で生ずる多重過程もしばしばふくまれる。これらの多重効果の断面積だけでなく、般ごとの部分断面積やその分岐比 (branching ratio)、光電子の角度分布等は電子相関の影響をつよくうけるので、波動関数、あるいは断面積計算法のきびしいチェックになる。英・仏を中心に米・独・日の各 SOR 施設から報告される実験がいまのところ先行し、理論がたちおけているのが現状である。

光励起に伴う Auger 効果で、光電離のしきい値付近で光電子と Auger 電子の相関によって生ずる衝突後相互作用 (post-collision interaction, PCI) も緩和過程を知る重要な手がかりである。図6は Ar の 2p 電離のしきい値 (L_2 : 250.8 eV, L_3 : 248.6 eV) 付近で生ずる Auger 電子のスペクトルである。相関の効果は Auger 電子のエネルギーが増し、プロファイルが

図6 ArLMM オーギュ・スペクトル⁸⁾

非対称になることで評価でき、これは光電子のエネルギーが低いほど、また Auger 遷移の時定数 τ が小さいほど著しい。この現象から Auger, あるいは Coster-Kronig 効果など、 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 秒といった短い緩和時間の測定が可能である⁸⁾。

3.2 分子分光学⁹⁾

1960年代に He の Hopfield 連続帯 (60~100 nm) を利用する吸収・蛍光の測定、He 共鳴線 (58.4 nm, 30.4 nm) や特性 X 線を用いる光電子分光学によって分子分光学には多くの進展があった。1970年代、SOR 利用によって光源の制限が除かれて以来、分子分光学は一段と飛躍し、光化学の実験手段はきわめて豊富多彩となった。光吸収、蛍光とその励起スペクトル、光電子・光イオン分光法、イオンや解離生成物の蛍光、質量分析、これらの過程の時相関・角度相関等の測定によって、光化学実験は励起から緩和の最終段階までのすべての過程と分岐のしかたを追求する「完全実験」へ進もうとしている。

図7は同時測定ではないが、Orsay (仏) の 0.5 GeV リング ACO を用いてえられた3つの実験で、 H_2 の前解離状態の波長域をしらべたものである。(a)は82~84 nm の H_2 の吸収スペクトル、(b)は解離した水素原子の Lyman α 線、(c)は可視部で観測した分子の蛍光の励起スペクトルである。この図は振動回転準位のどれが蛍光によって緩和し、どれが解離を生ずるかを鮮かに示している¹⁰⁾。

図8は CF_3Cl の吸収スペクトルと各種イオンの生

図7 H_2 の前解離領域の原子蛍光と分子蛍光の励起スペクトル¹⁰⁾ 図8 CF_3Cl の吸収と光イオン・スペクトル⁹⁾

成スペクトルを比較したもので、Freiburg のグループが DESY で系統的におこなっている実験の一部である。

分子の内殻吸収は分子に特有のポテンシャル壁の形成によって、価電子吸収とまったく様相を異にする場合が少なくない。図9は SF_6 の $SL_{2,3}$ 吸収帯で、上

の図は下の図Bの領域を拡大したもので、分子の周辺に分布するリドベルク軌道への遷移であるが、これはきわめてよく、壁のなかに局在した終状態がつよい共鳴A, C, Dを生ずると対照的である。

N_2 , NO , CO などの2原子分子の N, C, O の K 吸収にも内殻励起に特有の異常につよい共鳴型吸収がスペクトルを支配し、これは束縛状態と連続状態の両方でおこる。これは分子の形によって終状態の量子数 l の大きな成分が内殻領域でつよくなる効果で、shape resonance (形の共鳴) とよばれている。図10は Stanford で測定された N_2 の K

吸収スペクトル (~ 400 eV) で、ピークAとKがそれにあたる。囲みの中は核研で12年前にえられた高分解スペクトルで、よわいリドベルク系列が同定されたが、ピークAは写真測光のため飽和している。

図9 SF_6 の $SL_{2,3}$ 吸収スペクトル⁹⁾

図10 N_2 のNK吸収スペクトル⁹⁾3・3 固体分光学¹¹⁾

SOR による固体分光学は日本のグループが先駆的
にはじめた分野で、その後10数年間に世界各国で多くの
成果が積みかさねられ、主要な研究対象について、
ふつうの吸収・反射スペクトルの測定は一応出そろった
感がある。固体分光学の最大の課題は電子のエネルギー
帯構造の決定にあり、これは1960年代にはすでに
他の光源を用いてかなり進んでいた。SOR による固
体分光を固体研究の主力におし上げたのは光電子分光
技術の最近の発展である。吸収(反射)スペクトルが
一定の光子・エネルギーで可能なすべての始状態
と終状態の組みあわせから成り立っているのに対し
て、光電子スペクトルは電子のエネルギーと角度分布
という終状態の、したがってまた始状態の微分的情報
を担っている。電子エネルギーを指定する分析器のポ
テンシャルと光子・エネルギーを同期して走査する
CIS (constant initial-state spectrum), また電子エ
ネルギーを固定して光子・エネルギーを走査する
CFS (constant final-state spectrum) 等の新技術は SOR
以外では考えられないもので、バンド構造の決定には
有力な手段である。

SOR による光電子分光技術は最近急速に高度化し、
超高真空中で方位を指定した完全単結晶の清浄劈開面
からの角度分解光電子スペクトルを、広範囲の光子
・エネルギーについて測定する、というのが、今日
の標準技術となっている。図11はこのような測定の一
例で、層状構造をもつ半導体 GaSe の角度分解光電子
スペクトルの測定例である¹²⁾。

光電子分光のもう一つの重要な応用は表面の研究で
ある。図12は Ni 単結晶の (100) 表面に吸着した CO
の光電子スペクトルの一例で、SOR の偏りを利用し

て結晶の方位と光電子の方向とを変えて測定している。図の2つのピーク
 4σ と $P(1\pi+5\sigma)$ とが吸着CO分子による光電子で、金属表面の場におかれた
分子軌道の計算を用いて解析した結
果、CO 分子は Ni (100) 表面にCを
下にして立って吸着することがわかっ
ている¹³⁾。このような研究は今後の発
展の可能性が大きいと期待されてお
り、触媒・酸化・腐食等の研究への応
用に注目している化学工業・航空機工
業のメーカーもある。

図11 GaSe の角度分解光電子スペクトル¹²⁾3・4 構造解析¹⁴⁾

1974年に Hamburg と Stanford で 4 GeV 級のスト
レージ・リングが動きはじめ、SOR の利用は従来の
紫外・軟X線領域からX線に拡大した。それと同時に
X線分光・X線結晶学の分野に多くの新しい技術・

図12 Ni(100)面に吸着したCOの光電子スペクトル¹³⁾

手法と、それに見合う新しい課題が生まれ、SOR利用の重心はしだいに高エネルギー領域に移りつつある。

X線発生装置は軟X線領域とちがって従来から高度に発達しており、わが国で高い完成度に達している回転対陰極方式のものは強度も大きい。しかし、SORはこれとくらべても桁違いの強さをもつうえ、波長選択性、指向性、偏光性の点でもはるかにすぐれている。とくに波長選択性に関していえば、特定元素の内殻吸収端にあわせて回折像をとると、異常散乱効果によって像のコントラストを増し、たとえば生体高分子中の重元素(Fe, Cu, Zn, Mn等)はもとより、P, Sのような軽元素の位相をきめる可能性があり、すでにタンパク質の構造決定にSORを用いた例が報告されている。

またSOR・X線の強度を利用した時間分解回折像によって、筋肉・生体膜等の生体組織の運動であるとか、結晶成長過程、生体高分子内の反応(たとえばヘモグロビンと一酸化炭素)等の動的観察などが可能で、この方向を旨とした研究と技術開発がすでに各国ではじまっている。格子欠陥・転位・磁区構造などの観察のためのX線回折トポグラフィの研究もはじまっており、かなりの数の報告がある。

物質の構造決定に関して、この5年間に急速な発展をとげた新技術に「EXAFS」がある。これは extended

X-ray absorption fine structure の略で、内殻吸収端から1 keV程度に及ぶ広域にあらわれる吸収スペクトルのうねりである。これは光電離の終状態が近傍原子の散乱によって修正される効果で、近傍原子の種類と配列とを反映する。図13(a)はやや古い¹⁴⁾が、単結晶と無定形GeのK吸収に生ずるEXAFSのちがいを示しており、このようなうねりはもちろん自由原子の光電離ではまったく見られないものである。この変調成分をとり出してフーリエ変換すると(b)のように近傍原子の平均空間分布がえられる。この方法による原子間距離や構造の決定には理論的に未解決の問題が残っており、X線・電子線の回折からきめられた値とくらべてやや精度がおちるが、物によってはすでに他の構造解析法と比肩するところまでできている。この方法のすぐれている点は、回折法では明瞭なパターンが得られない不規則物質とか、溶液・表面・不純物・生体高分子中の金属原子の配位などに適用できる点である¹⁵⁾。

図13 (a) 単結晶および無定形 Ge の EXAFS¹⁴⁾
(b) EXAFS をフーリエ変換したもの

3・5 図形複製 (Lithography and Microscopy)¹⁷⁾

SOR の高い平行度が有効に利用される分野にX線リソグラフィとX線顕微鏡法がある。この技術の直接で、きわめて重要な課題の一つは超 LSI の製作で、 μm 以下の図形の転写に回折ボケも半影によるボケも小さい SOR-X線の利用が注目されている。1974年に IBM の専門家が Hamburg に行き、DESY でリソグラフィの作成に成功し、大きな反響をよんだ。その後X線リソグラフィの技術開発は世界各国で試みられており、日本でも阪大の難波研究室が精力的に実験をつづけている。図14は同グループが核研でつくったリソグラフィの一例で、Si 基板の上に幅 $0.2\mu\text{m}$ 高さ $2.2\mu\text{m}$ の金の長い板が約 $0.7\mu\text{m}$ の周期で並んでいる芸術的作品である¹⁸⁾。

同じ技術は回折格子・フレネルゾーン等の光学素子の製作や生体組織のパターン転写にも利用できる。図15は密着X線写真法でえられたカエルの網膜色素の表皮構造のレプリカを約 2nm の分解能をもつ走査電子顕微鏡で見たもので、 10nm 程度のメラニン粒子が識別できる¹⁷⁾。

図14 X線リソグラフィによる金の格子¹⁸⁾

図15 X線顕微鏡写真の例¹⁷⁾

3・6 放射線効果¹⁸⁾

わが国では東大教養・伊藤（隆）を中心とするグループが物性研 SOR-RING の完成後いち早く放射線生物学の実験に着手し、すでに1977年、78年に MgF_2 窓（遮断波長 115nm ）の VUV 領域で広帯域の照射実験を実施した。使った試料は t-RNA, リゾチーム, Sendai virus, phage T1, 枯草菌, イースト, 大麦細胞核, マウス細胞等多岐にわたるが、各種フィルターを用い、非乾燥状態の実験もふくめ、失活と突然変異株の検出等を試みた。このグループは80年以後もひきつづき、より短波長の領域もふくめた単色照射の実験を予定している。79年5月東京で開かれた第6回放射線国際会議では、SOR を用いた放射線効果の研究にとくに1分科会が割り当てられ、報告者の大部分は伊藤グループであったが、SORの利用はDNAの修復不能な破壊機構の解明に重要な役割を果たすであろう、という展望も語られ、わが国の研究は大いに注目をあつめた。

4. SOR 利用の現状と展望

わが国で SOR 利用研究がはじまったのは田無にある原子核研究所に 0.75GeV （のちに 1.3GeV ）の電子シンクロトロン（ES）が完成した1962年で、翌年にはユーザー団体 INS-SOR が結成され、今日までおもに分光学的研究で多くの成果をあげてきた。1971～1974年には核研の支援を得てユーザーの手で 0.3GeV （現在 0.4GeV ）の光源専用リング SOR-RING が建設され、現在は物性研が ES 付設ビームラインをふくめ、田無の全 SOR 施設を管理運営している。リング付設

のビームラインは4本で、近く増設の予定もある。リングは380MeV で定常運転しており、0.4A 以上の蓄積電流を記録したが、日常は0.3~0.15A で実験している。実験申込は年2回物性研で受付けている。

一方筑波の高エネルギー研究所付設の放射光実験施設（通称 Photon Factory）では2.5GeV の線型加速器と、これを入射器とする2.5GeV の光源専用リングを建設中で、昭和56年度完成を目ざしている。この施設はSOR-X 線の利用をめざす結晶学・生物物理学・分光学の研究者が中心になって準備をすすめ、53年度に建設を開始したものである。

このほか分子研・電総研その他でも新規 SOR 施設の計画があるが、その見通しはまだ明らかでない。

現在活動しているおもな国外の施設は、米3(3), ソ3(5), 独2(4), 仏1(1), 伊1(1)となっており、建設中のものは米2(3), 独1(1), 英1(1)で、80~82年に完成が見込まれている。()内は加速器数である。このほか計画としては EC, 中国, オランダ, カナダ, スカンジナビア3国などが準備中である。これらの新施設が一せいに活動を開始する80年代には SOR 利用活動の規模は飛躍的に大きくなるであろう。

紙数はすでに超過しているが、これに言及せずには展望は完結しないのでさいごに一言つけ加えておきたい。それは Wiggler または Undulator とよばれる古い電磁波発生法のリバイバルである。短周期で極性の交代する磁場（あるいは電場）のなかで高エネルギー電子を走らせると、狭帯域で、その分だけ強度の増大した SOR を発生する。運動を一つの面内に束縛する場合を横型（1次元）ウィグラー、らせん軌道をとるものをヘリカル・ウィグラーとよび、前者は直線偏光、後者は円偏光を出す、どちらも軸上で観測すればほぼ単色光がえられ、しかもチューナブルである。ウィグラー磁石は線型加速器の射出ビームを利用して、ストレージリングの直線部に取り付けても光源として利用できる。このデバイスの延長線上には free electron laser¹⁹⁾、すなわち、SOR を利用するレーザー発振の可能性があり、すでに4 μ m の赤外領域で発振が確認されている。80年代後半はおそらくウィグラー技術の進歩によって放射線の科学と技術は新しい世代にはいり、現在のわれわれが予想もしない自然の奥深い世界が展開するのではなかろうか。

文 献

- 1) 日本物理学会編：物理学論文選集 204, シンクロトロン放射とその利用, 1979年3月
- 2) 東京大学物性研究所編：軌道放射物性研究施設利用者ハンドブック, 昭和54年2月
- 3) C. Kunz, ed.: Synchrotron Radiation, Techniques and Application, Springer-Verlag, Berlin, pp. 442 (1979)
- 4) J. A. R. Samson: Atomic Photoionization, in Hdb. Phys., 31 (1980), ed. W. Mehlhorn, Springer, Berlin
- 5) K. Codling, in Ref. 3, p. 231-68
- 6) F. Wuilleumier and M. O. Krause: *Phys. Rev.*, **A10**, 242 (1974)
- 7) J. B. West and G. V. Marr: *Proc. Roy. Soc., London*, **A349**, 397 (1976)
- 8) H. Hanashiro, et al.: to be published in *J. Phys. B. Letters*
- 9) E. E. Koch and B. Sonntag: in Ref. 3, p. 269-355
- 10) P. M. Guyon: in Trends in Physics, 1978, p. 489-506 Adam Hilger Ltd, Bristol (1979)
- 11) E. E. Koch, C. Kunz and B. Sonntag: *Physics Reports*, **28 C**, 154 (1977)
- 12) Y. Petroff: *J. de phys.*, **39**, C4, 149 (1978)
- 13) N. V. Smith: *ibid.*, **39**, C4, 161 (1978)
- 14) A. M. Glazer, in Trends in Physics, 1978, p. 515-21
- 15) R. G. Shulman, P. Eisenberger, and B. M. Kincaid: *Ann. Rev. Biophys. Bioeng.*, 559-78 (1978)
- 16) T. Nishimura, et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **17**, Suppl. 17-1, p. 13 (1978)
- 17) W. Gudat: *Nucl. Instr. Method*, **152**, 279 (1978)
- 18) 伊藤隆編：シンクロトロン軌道放射光による放射線生物学の研究 pp. 108 (1979)
- 19) 近藤淳：ウィグラー及び自由電子レーザー，電総研調査報告，第200号，pp. 60 (1979)