

1. はじめに

ここでは、高エネルギー加速器のシンクロトロン放射光への応用として、(ii)シンクロトロン放射光用加速器に特有なくつかの加速器技術、(ii)シンクロトロン放射光の取り出し及び放射線安全上の問題点、(iii)シンクロトロン放射光用光学系及び光学素子、(iv)放射光利用研究を概観する。もとより、これらの広汎なテーマを十分に議論するだけの能力と余裕を持ち合わせてはいないので、かなり偏った観点からの講義となることをお許しいただきたい。

筆者の所属する放射光実験施設測定器研究系は、上述の(ii)(iv)をカバーしている。したがってどちらかといえば、加速器ユーザーに近い立場にある。この立場に立つと、利用できる光量は多ければ多い程良いわけで、自ら手を下せる対策として光学系(分光器、ミラー等)の改善、検出系の高感度化等に対する努力を行なっている。しかしながら、これらの努力の行きつく先は、やはり「もっと強い光源が欲しい」というところに落ちつく。

強力光源といっても、その内容は「何のために光を用いるか?」という立場によって異なる。たとえば、レーザーは紫外領域までの強力な光源であることは良く知られているが、レーザーが強力である理由は、指向性が極めて良く、したがって、狭い領域(実空間、エネルギー)で高い光子数が得られることによる。しかしながら、照射すべき対象の大きさがレーザービームサイズに比べてはるかに大きい場合には、この光源は全く無力となる。この場合にはむしろ、ハイパワーの無指向性光源の方が適しているかもしれない。言い換えれば、ユーザーが望んでいる「強力光源」とは、2つの極端な場合に分けると、「全立体角で積分した光量(flux)が高いこと」、もしくは、「単位立体角あたりの光量(輝度)が高いこと」になるであろう。前者の場合は照射実験等の比較的簡単な光学系で済ませられるようなシステムに当てはまる。ところが分光技術を駆使して複雑な光学系を使用する場合には、後者の輝度特性が重要であり、とくに真空紫外よりX線領域での分光技術は、この特性を考慮せずには成立しえない。この点で、シンクロトロン放射光の指向性の良さは、多くのこの分野での研究者にとって、必要不可欠なものとなってきたのである。シンクロトロン放射は、光とはほぼ同じ速度をもつ高エネルギー電子(陽電子)が磁界により円軌道を運動するとともに発生する光である1)

,2)。電子(陽電子)のエネルギーが充分高ければ、そのスペクトルは真空紫外からX線領域に及ぶ連続分布を示し、これらの波長域での汎用光源として必要不可欠な性能を多数備えた光源である。実際にユーザーの立場に立つと、シンクロトロン放射光が原理的に持っている

①実際に利用できる(検出系に取込める)光量が大きい。

②光強度が安定しており、その再現性が良い。

③偏光特性(直線、円)を有している。

④パルス光が得られる。

等の特長は、真空紫外からX線領域での理想的な汎用光源に近いものである。また、連続的な波長分布を持つことから、

⑤必要な波長の単色光を分光器等を用いて得ることができる。

ことも、シンクロトロン放射光の大きな特長の1つである。

2. シンクロトロン放射

ここでは、シンクロトロン放射に関する基本的な諸量を、厳密な導出には触れずに与える。スペクトルの形は、実際にシンクロトロン放射光を利用する上で重要であるばかりでなく、放射線安全上からも重要である。たとえば、ビームシャッタの材質、厚さ等のパラメータは、スペクトルの図をみてはじめて決定できる。また放射パワーは、光学系等の熱負荷を考える上で重要な量である。

本節で述べる諸公式の導出としては、文献^{1),2)}、ジャクソンの教科書³⁾、クリンスキーの解説⁴⁾等を参照されたい。

荷電粒子が加速されると電磁波を放出する。しかしながら、放射されるエネルギーは粒子が相対論的でない場合には非常に小さい。相対論的な粒子の記述には、全エネルギーと静止エネルギーの比、 γ 、を用いると便利である。

$$\gamma \equiv E/m_0c^2 \quad (2.1)$$

この時、運動量は

$$P = \gamma m_0 v \quad (2.2)$$

となる。ここでVは粒子の速度、 m_0 は粒子の静止質量、 c は光速である。粒子の運動は、ローレンツ方程式に従う。

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = e \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c} \right) \quad (2.3)$$

ここで、 \mathbf{E} は電場、 \mathbf{B} は磁場、 e は粒子の電荷である。放射光を取り出すためには、いろいろな理由から、(2.3)式の第2項を用いた、荷電粒子の運動方向と垂直な磁場による横加速が一般に用いられている。この磁場中を運動する荷電粒子が1周あたりに放出するエネルギーは

$$U_0 = 4 \pi e^2 r^4 / 3 \rho \quad (2.4)$$

で与えられる。ここで ρ は荷電粒子の軌道半径である。非常に高エネルギーでは、粒子の運動量は静止質量によらなくなり、したがって電子(または陽電子)と陽子は同程度の ρ を持つ。陽子の静止質量は、電子の約2000倍あるので、同じ運動エネルギーでは電子(または陽電子)からの放射は、陽子からの放射と較べて $2000^4 \sim 10^{13}$ 倍大きくなる。この理由で電子(または陽電子)がシンクロトロン放射光の源として用いられる。電子(または陽電子)では

$$r = 1957 E (\text{GeV}) \quad (2.5)$$

$$\rho (\text{m}) = \frac{33.35 E (\text{GeV})}{B (\text{KG})} \quad (2.6)$$

となり、(2.4)式は

$$U_0 (\text{KeV}) = 88.5 E^4 / \rho = 2.65 E^3 B \quad (2.4 a)$$

となる。したがってエネルギー E (GeV)、電流 I (mA)の電子(陽電子)ストレージリングから放出されるパワー、 P (KW)は、

$$P = 88.5 I E^4 / \rho = 2.65 E^3 I \quad (2.7)$$

で与えられる。

シンクロトロン放射光の滑らかで連続的なスペクトル分布と空間的な特性を記述するために、次式で定義される特性波長、 λ_c 、または特性振動数、 ω_c 、を用いると便利である。

$$\lambda_c \equiv 4 \pi \rho / 3 r^3 = 5.59 \rho / E^3 = 186 / BE^2 (\text{\AA}) \quad (2.8 a)$$

$$\omega_c \equiv 2 \pi c / \lambda_c = 3 c r^3 / 2 \rho \quad (2.8 b)$$

波長の関数としての放射パワー(1%バンド巾)は電子の方位角1mradあたり

$$P = 5.95 \times 10^{-8} (r^4 I / \rho) G_2 \quad (\text{erg/s}) \quad (2.9)$$

となる。図2-1に波長依存性のファクタ G_2 を示す。ここで

$$G_n \equiv \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^n \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta \quad (2.10)$$

であり、 $K_{5/3}$ は変形ベッセル関数である。このFig2-1パワースペクトルのピークは $\sim 2 \lambda_c / 3$ にあり、全パワーの半分が λ_c の波長長側には、半分が短波長側にある。

実際にシンクロトロン放射光を利用する立場からは、役に立つのはパワーよりも光子数である。これはパワーを光子のエネルギー hc/λ でわることによって得られ、

$$N = p \lambda / hc = 1.256 \times 10^{11} r I G_1 \\ \equiv r \mathcal{F}(\lambda / \lambda_c) \quad (2.11)$$

によって与えられる。図2-2に \mathcal{F} を示す。

シンクロトロン放射光は鋭い指向性を持っている。電子軌道上の各点から、軌道の接線方向を軸とする、頂角が < 1 mradの円錐内に放射される。電子が円軌道を周ると、垂直方向の拡がり < 1 mradのディスク状に放射されることになる。またシンクロトロン放射光は強く偏光している。軌道面内の放射では、光の電場ベクトルは軌道面内にあり、光が横波であるために、放射方向と垂直になっている。軌道面から ϕ 傾むいた面

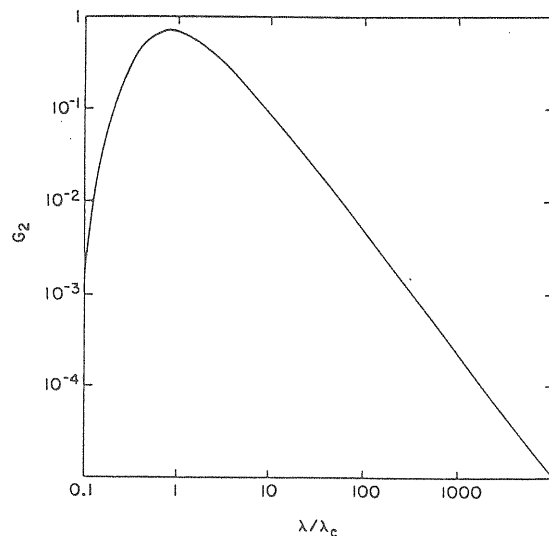


図2.1 放射パワーの式(2.9)にあらわれる。波長依存性のファクター、 G_2 。

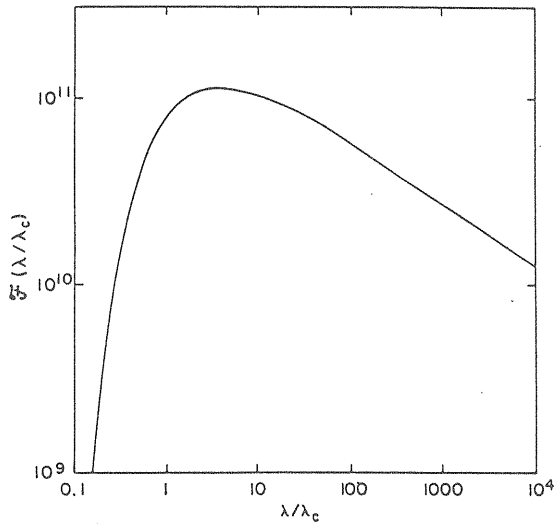


図2.2 式(2.11)で示される, 垂直方向の角度 ψ で積分した光子束, $N(\lambda/\lambda_c)$ 。

内に放出される光では, 上記の平行成分とともに, 垂直成分があらわれる。図2-3に, 平行成分と垂直成分を持つ光子束の傾角 ψ への依存性を示す。この図は, 軌道面内での

光子束 $(\frac{\partial N}{\partial \psi})_{\psi=0} d\psi$ で規格化されている。これは電流 I (A) に対して

$$\left[\frac{\partial N}{\partial \psi} \right]_{\psi=0} d\psi = 3.461 \times 10^7 I r^2 \cdot \frac{(\lambda_c/\lambda)^2 K_{2/3}^2(\lambda_c/2\lambda)}{\equiv r^2 I F(\lambda/\lambda_c, \psi=0)} \quad (2.12)$$

photons/(1%band巾, 秒, mrad²)

で与えられる。図2-4に関数Fを示す。図2-4の横軸は $\gamma\psi$ である。これはエネルギー γ の電子(陽電子)による放射に対する角度の自然単位が $1/\gamma$ であることを意味している。2.5GeVの電子に対しては, $\gamma \sim 5000$ であり, 波長 λ_c の光子の角度拡がり ~ 0.2 mradとなる。角度拡がりは波長と共に増大する。したがって波長が長くなるとともに, 軌道面内に放射される光子の割合は減少する。このために, 図2-4は長波長側で, 図2-2よりもはやく減少する。

図2-5に, λ/λ_c の関数としての, ψ に関して積分された水平偏光成分の割合を示す。軌道面を中心とする非常に小さな垂直発散角のみをとり込む場合には, 図2-3に示されたように, ほぼ100%水平偏光と考えて良い。

文 献

- (2-1) J.Schwinger : Phys. Rev., 75 (1942) 1912.
- (2-2) A.A.Sokolov and I.M.Ternov : Synchrotron

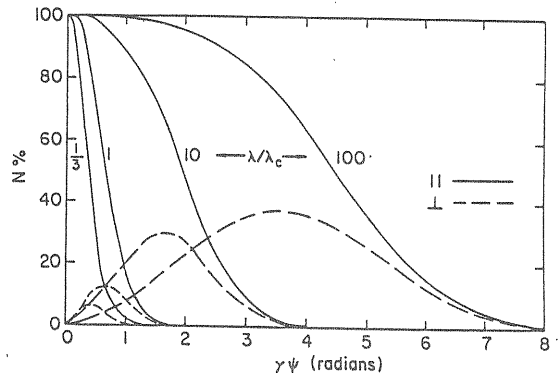


図2.3 光子束の水平偏光成分(実線)と垂直偏光成分(破線)の傾角 ψ への依存性。

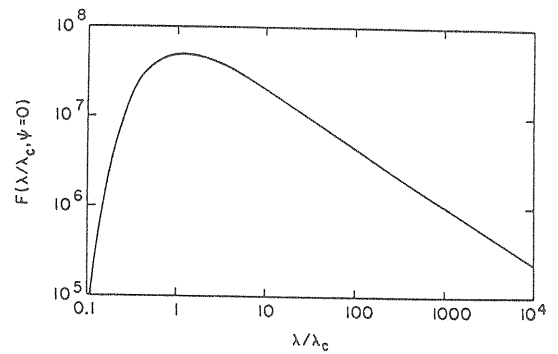


図2.4 軌道面($\psi=0$)での光子束, $F(\lambda/\lambda_c, \psi=0)$ (2.12式)。

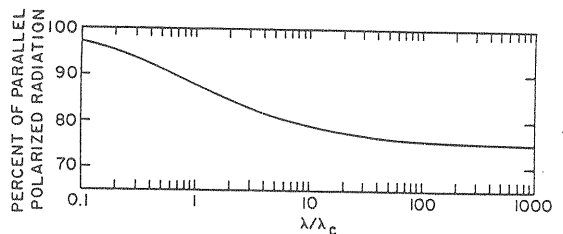


図2.5 λ/λ_c の関数としての, 水平偏光の割合。垂直方向の傾角 ψ で積分してある。

Radiation, Pergamon Press (1966).

- (2-3) J.D.Jackson : Classical Electrodynamics, Wiley (1975).
- (2-4) S.Krinsky, M.L.Perlman and R.E.Watson : Handbook on Synchrotron Radiation, Vol.1a.- North-Holland. PP.67-174.

3. 挿入光源

3.1 概要

挿入光源とは、多数の磁極で構成された特殊な放射光源で、ウィグラーあるいはアンジュレータと呼ばれるものである¹⁾⁻⁶⁾。この磁極の間に高エネルギー電子(陽電子)ビームを通過させると、磁界の周期に対応して蛇行運動し、輝度の高い放射光を発生させることができる。挿入光源(insertion device)の名称の由来は、電子(陽電子)蓄積リングの自由な直線部に挿入設置されることからきており、前節で述べた偏向部からの放射(円軌道放射)と比較して、多くの優れた特徴をもつ。そのひとつは、干渉効果によって指向性が鋭く、かつスペクトル中の狭い放射が得られることである。その結果、この光源の輝度は円軌道放射のそれと較べて $10^2 \sim 10^5$ 倍となる。また各種の偏光特性(直線⁴⁾、円³⁾、楕円⁷⁾)を持つ放射を発生することができるので、放射光利用実験の分野が大きく広がることが期待できる。現に、PFに於いてもBL-2、BL-13、BL-16、BL-19に挿入型光源が設置され真空紫外から軟X線領域の干渉性放射光が利用されている。

しかしながら、挿入型放射光源の特徴は、蓄積リング内の電子ビームの性質に著しく依存する^{8),10)}。例えば放射本来の指向性に比較して、電子ビームのそれが良好でない場合には、輝度はそれほど上がらない。挿入型放射光源の特性を十分に出すための理想的な電子ビームの性質は、ビーム径が無限小であること、ビームを形成している全ての電子が同一の方向に運動していることである。特に、アンジュレータの場合には、ビームの質の良否が放射の特性に関して決定的な影響を与える。

蓄積リングの電子ビームの性質は、ほとんどが加速

器設計に依存しているが、加速器技術が高エネルギー物理学の分野で発達したことから、現在稼働している光源専用リングの大部分は必ずしも放射光光源として最適化されたものとはいえず、むしろ低エミッタンス特性をあまり重視していない素粒子実験用リングの設計にならったものが多い。

しかしながら、現在計画が進められている次世代の放射光リング(ヨーロッパ連合のESRF、アメリカでのAPS等)では、アンジュレータ等の挿入光源を主力として計画されており、したがって低エミッタンス化を可能な限り追求し、挿入光源を多数配置可能な大型蓄積リングとなっている。

本節では、挿入光源の基本的な概念と加速器との関わりについて概説する。

3.2 挿入光源からの放射光

まず最初に、単一電子、または完全平行である電子ビームの放射について考えてみよう。

一般的な挿入光源の磁場(周期長： λ_0)は

$$\begin{aligned} \mathbf{B} = & -e_y B_{y0} \sin(2\pi z/\lambda_0) \\ & -e_x B_{x0} \cos(2\pi z/\lambda_0) \end{aligned} \quad (3.1)$$

で与えられる周期構造をもつ⁷⁾。ここで β_x 、 β_y 、 β_z は互いに直交する単位ベクトルであり、Zをビームの軸方向とする。(3.1)式の磁場は、磁場ベクトルが楕円柱内面に接しながら回転して進むものと理解できる。この磁場は、図3.1⁷⁾に示す磁石配列でつくることが可能である。このような周期磁場に高エネルギー電子($\gamma \gg 1$)が入射すると、ローレンツ方程式(2.3)より、電子は次式で示されるような運動をする。 β を電子の相対速度(= v/c)とすると

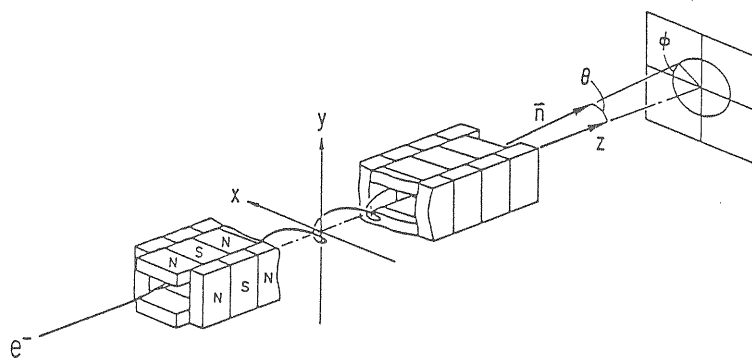


図3.1 一般的な挿入光源の例(Yamamoto, s. and Kitamura, H: J.J.A.P.)

$$\beta = (\beta/r) [\mathbf{e}_x K_y \cos(\omega_0 t') + \mathbf{e}_y K_x \sin(\omega_0 t') + \mathbf{e}_z \beta \left[1 - \frac{(K_x^2 + K_y^2)}{4r^2} + \frac{(K_x^2 - K_y^2) \cos(2\omega_0 t')}{4r^2} \right]] \quad (3.2)$$

$$\omega_0 = 2\pi c\beta \{1 - (K_x^2 + K_y^2)/4r^2\} / \lambda_0 \quad (3.3)$$

ここで

$$K_{x,y} = 0.934 B_{x_0,y_0} (T) \lambda_0 (\text{cm}) \quad (3.4)$$

は挿入光源の放射を特徴づける重要なパラメータである。一般的には、(3.2)は楕円柱表面を回転しながら進むような運動を表わすが、特別の場合として $K_x=0$ ではXZ平面内の蛇行運動(plane undulator), $K_y=K_x$ では螺旋運動(helical undulator)となる。

放射の性質を調べるためには、Lienard-Wiechertポテンシャル

$$\mathbf{A} = \frac{e}{R} \frac{\boldsymbol{\beta}}{1 - \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\beta}} \quad (3.5)$$

のフーリエ積分を実行すれば良い。上式に於て、Rは電子と観測点との距離、 \mathbf{n} はその方向を表す単位ベクトルである。

$$\mathbf{n} = \mathbf{e}_x \sin \theta \cos \phi + \mathbf{e}_y \sin \theta \sin \psi + \mathbf{e}_z \cos \theta \quad (3.6)$$

周期数Nの挿入光源の場合、この積分の結果は以下の放射パワースペクトル(k次高調波)となる⁷⁾。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P_k}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2 r^2 \xi^2}{c \pi^2} \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\left(\frac{\omega}{\omega_1} - k\right)^2} \\ &\times \left\{ |2S_0 r \theta \cos \phi - K_y (S_1 + S_{-1})|^2 \right. \\ &\left. + |2S_0 r \theta \sin \phi - K_x (S_1 - S_{-1})|^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで、

$$\xi = \frac{k}{1 + (r\theta)^2 + (K_x^2 + K_y^2)/2} \quad (3.8)$$

$$\omega_1 = \frac{2r^2\omega_0}{1 + (r\theta)^2 + (K_x^2 + K_y^2)/2} \quad (3.9)$$

$$S_q = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \exp\{i(k+2p+q)\delta\} J_{k+2p+q}(X) J_p(Y) \quad (3.10)$$

$$\tan \delta = (K_x/K_y) \tan \phi \quad (3.11)$$

$$X = 2\xi r \theta (K_y^2 \cos^2 \phi + K_x^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (3.12)$$

$$Y = \xi (K_x^2 - K_y^2)/4 \quad (3.13)$$

である。但し J_n は整数次のベッセル関数である。各高調波のスペクトルが最大値を示す波長は

$$\begin{aligned} \lambda_k &= \frac{C}{2\pi k \omega_1} \\ &= \frac{\lambda_0}{2k r^2} \left\{ 1 + (r\theta)^2 + \frac{(K_x^2 + K_y^2)}{2} \right\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

で与えられる。

挿入光源の放射の空間分布(角度分布)の広がり、ほぼ K_y/γ (X方向), K_x/γ (y方向)となるが、一般的にはZ軸方向($\theta=0$)で最大となる。また、挿入光源は円軌道の放射と異なり、発光点がZ軸に分布しているような深さ $N\lambda_0$ の光源であるから、 $\theta \neq 0$ の条件で観測すると実効的な光源の大きさが少なくとも $N\lambda_0\theta$ 程度まで増加することになり、実効的な輝度特性を損うことになる(図3-2)。したがって軸上にくる光を用いるのが挿入光源からの放射光の正しい使い方である。軸上強度は、(3.7)式より

$$\begin{aligned} \left. \frac{d^2 p_k}{d\omega d\Omega} \right|_{\theta=0} &= \frac{e^2 r^2 \xi^2}{c \pi^2} G_k(K_x, K_y) \\ &\frac{\sin^2\left(\frac{N\pi\omega}{\omega_1}\right)}{\left(\frac{\omega}{\omega_1} - k\right)^2} \end{aligned} \quad (3.15)$$

となる⁷⁾。ここで G_k はスペクトル関数であり

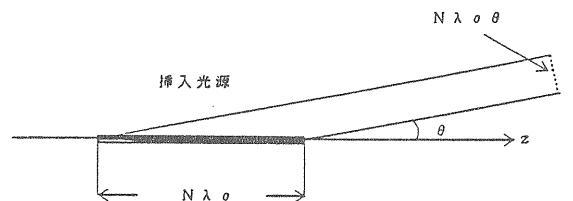


図3.2 軸外放射の観測

$$G_k(K_x, K_y) = \xi_0^2 \left[K_y^2 \left\{ J_{\frac{k-1}{2}}(Y_0) - J_{\frac{k+1}{2}}(Y_0) \right\}^2 + K_x^2 \left\{ J_{\frac{k-1}{2}}(Y_0) + J_{\frac{k+1}{2}}(Y_0) \right\}^2 \right] \quad (3.16)$$

$$\xi_0 = \frac{k}{1 + (K_x^2 + K_y^2)/2} \quad (3.17)$$

$$Y_0 = \xi_0 (K_x^2 - K_y^2)/4 \quad (3.18)$$

となる。このスペクトルは

$$\omega_k = k\omega_1 = \frac{4\pi cr^2 k}{\lambda_0} \left\{ 1 + \frac{K_x^2 + K_y^2}{2} \right\} \quad (3.19)$$

または、

$$\lambda_k = \frac{\lambda_0}{2kr^2} \left\{ 1 + \frac{K_x^2 + K_y^2}{2} \right\} \quad (3.20)$$

で極大となり、しかも奇数次高調波のみ値を持つ。偶数次高調波が値を持つのは軸外だけである。(3.19)、(3.20)からわかるように、光波長の選択は、 K_x 、 K_y の値(磁場強度)を調整することによって可能となる。 k 次高調波のピーク値は、

$$\left. \frac{d^2 P_k}{d\omega d\Omega} \right|_{\theta=0, \omega=k\omega_1} = 4.555 \times 10^7 r^2 N^2 G_k(K_x, K_y) \text{ photons/(s. mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ band width. amp)} \quad (3.21)$$

となる。上式の単位系は、ビーム電流1Aあたり $\Delta\omega/\omega=10^{-3}$ のバンド巾で、立体角1mrad²あたりに毎秒得られる光子数である。

この放射は、一般的には楕円偏光となり、その両軸の強度比は以下のように与えられる。

$$\chi = \left| \frac{E_{ky}}{E_{kx}} \right| = \frac{K_x \left| J_{\frac{k-1}{2}}(Y_0) + J_{\frac{k+1}{2}}(Y_0) \right|}{K_y \left| J_{\frac{k-1}{2}}(Y_0) - J_{\frac{k+1}{2}}(Y_0) \right|} \quad (3.22)$$

ここで $K_x=0$ の場合(plane undulator)を考えてみると、スペクトル関数は

$$G_R(0, K_y) = \left[\frac{k K_y}{1 + K_y^2/2} \left\{ J_{\frac{k-1}{2}}(Y_f) - J_{\frac{k+1}{2}}(Y_f) \right\} \right] Y_f = \frac{k K_y^2}{4(1 + K_y^2/2)} \quad (3.23)$$

となる。この場合には、 $X=0$ となるから直線偏光である。

一方、 $K=K_x=K_y$ の場合は、スペクトル関数は基本波($K=1$)に対してのみ値を持ち、

$$G_1(K, K) = \frac{2K^2}{(1 + K^2)^2} \quad (3.24)$$

となる。また $X=1$ となるから、完全な円偏光が得られる。

挿入光源の放射の高調波特性は、 K_x 、 K_y の値に依存する。図3-3にplane undulator($K_x=0$, $K_y=K$)の放射スペクトルの性質が K 値の大小によってどのように変わるかを示す。 $K \ll 1$ では基本波が顕著であるが、反対に、 $K \gg 1$ では高調波の列となり、この多線スペクトルの包絡線は、円軌道放射の重ね合わせとして理解できる。一般に $K < 1$ の場合をアンジュレータモード、 $K \gg 1$ ($K > 10$) の場合をウィグラーモードと呼んでいる。ウィグラーモードの放射強度は、円軌道放射のそれを極数倍することによって、近似的に求めることができ

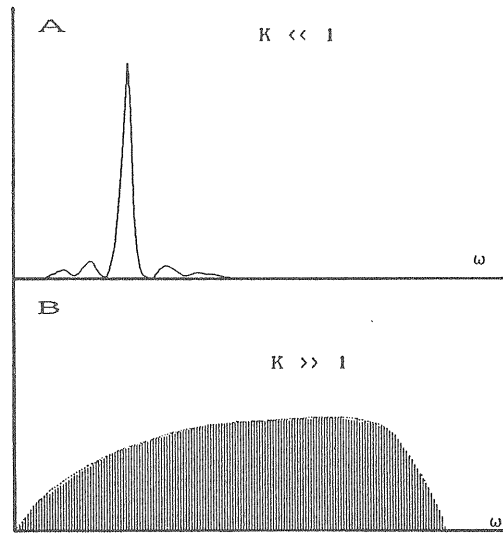


図3.3 挿入光源(plane undulator)のスペクトル。A: $K \ll 1$ の場合、B: $K \gg 1$ の場合。

る。

全立体角の放射される波長 λ_k の光子数は

$$\Phi = 1.431 \times 10^{14} \frac{NG_k}{k} \left\{ 1 + \frac{(K_x^2 + K_y^2)}{2} \right\}$$

(photons/s · 0.1% bw · amp) (3.25)

となり、また電子が挿入光源で失うエネルギー(放射損失)は

$$U = 1.652 \times 10^{-4} r^2 \{ B_{x_0}^2 + B_{y_0}^2 \} L \text{ (m)}$$

(ev) (3.26)

I(A)の電子ビームに対しては

$$P = 1.652 \times 10^{-4} r^2 \{ B_{x_0}^2 + B_{y_0}^2 \} L \text{ (m)} I \text{ (A)}$$

(watts) (3.27)

となる。(3.26), (3.27)で磁場の単位はTである。

文献

- (3-1) H.Motz, W.Thon and R.N.Whitehurst : J.Appl. Phys. **24** (1953) 826.
- (3-2) D.F.Alferov, Yu.A.Bashmakov and E.G.Bessonov : Sov. Phys. Tech. Phys. **48** (1974) 1336.
- (3-3) B.M.Kincaid : J. Appl. Phys. **48** (1977) 2684.
- (3-4) H.Kitamura : Jpn.J.Appl. Phys. **19** (1980) L185.
- (3-5) K.J.Kim : Nucl. Instr. and Meth. **A219** (1984) 425.
- (3-6) M.Moissev, M.Nikitin and N.Fedorev : Sov. Phys. J. **21** (1978) 332.
- (3-7) S.Yamamoto and H.Kitamura : Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1613.

4. シンクロトロン放射光の 取り出し

—フロントエンドの概略—

放射光の取り出しに関して、細かい議論を始める前に、現在のPFの概略図(図4.1, フォトンファクトリー, アクティビティレポート1987より収録)を示しておく。フォトンファクトリーのストレージリングには、B1~B28の28個の偏向電磁

石があり、B1, B4, B6~B12, B15, B17, B21の12個の偏向電磁石からの放射光と、B1-B2間の直線部に挿入されたアンジュレータ、B13-B14に挿入された垂直型超伝導ウィグラー、B15-B16間のマルチポールウィグラー/アンジュレータ等の挿入光源からの光が既に取り出されて実験に使用されている。この他に、B-3, B-18の2つの偏向電磁石からのビームの取り出しと、B27-B28間の直線部に挿入される円偏光アンジュレータ/ウィグラー、B12-B13間のマルチポールウィグラー/アンジュレータ、B18-B19間のリボルバー型アンジュレータからの放射光の取り出しが、現在計画中または、建設中である。

ストレージリングの偏向電磁石や、挿入光源で発生する放射光を実験室にとり出すにあたっては、(i)実験者の、主として放射線に対する安全と、(ii)加速器自体を、乱暴な実験者(ユーザーは常に乱暴であるという経験則があるらしい)から守るという、二つの面からの考慮が必要である。放射光を取り出す部分の、最も加速器に近いところを、フロントエンドと呼ぶが、その構造は、どの波長域の光を取り出すか、で全く異なるものとなっている。真空紫外から軸X線領域($h\nu < 3 \text{ KeV}$)の光を取り出す場合には、吸収のために窓を設けることはできない。したがって、ストレージリングから、実験装置までが真密的に一体となっている。この場合のフロントエンドの例を図4.2に示す。窓がないために、実験室側で起きた、主として真空のトラブルは、直接にストレージリングに及ぶことになる。このような事態からストレージリングを守り、他所で実験している人々や、加速器グループの人々に迷惑をかけないように、速断バルブ(FCV)、アコースティックディレイライン(ADL)等が設置されている。また、実験者の放射線被ばくをさけるために、ビームシャッターが設置されている。これらの前方にある水冷アブソーバは、シャッターや真空バルブを放射光照射による過熱から保護している。これらのコンポーネントは、全てインタロックシステムによってコントロールされており、不具合が起きると自動的に働くようになっている。フロントエンドの最上流側には、手動の真空バルブが設けられていて、フロントエンドの真空を破ることが、ストレージリングの真空を保ったままで行なうことが可能となっている。

X線領域($h\nu > 3 \text{ KeV}$)では、フロントエンドの後端に窓を設け、リング側と実験室側との真空を分離している。窓材としては、X線透過性に優れたベリリウ

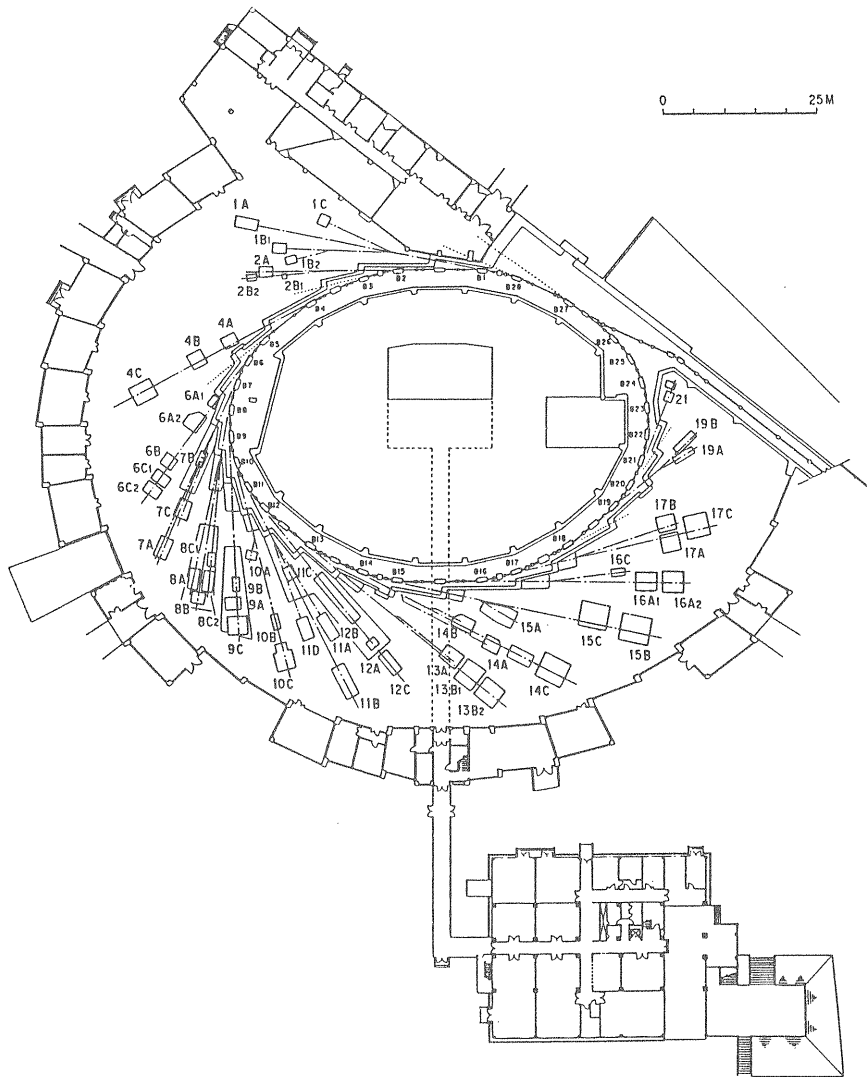


図4.1 フォトン・ファクトリーの概略

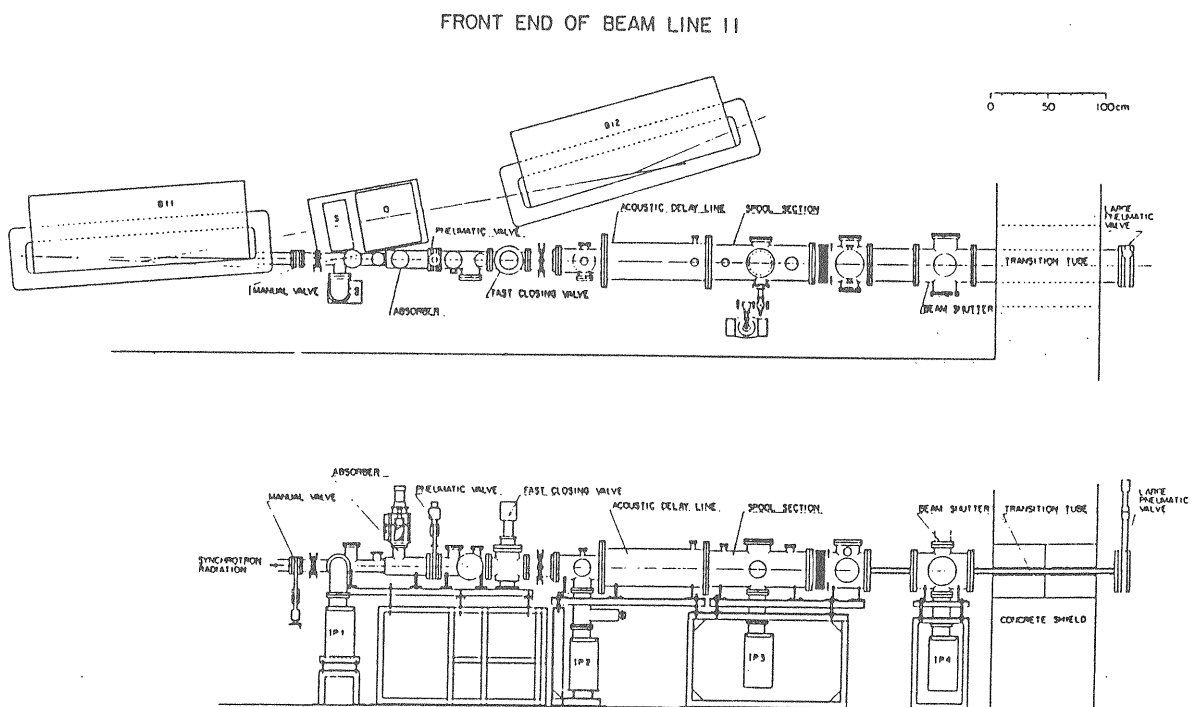


図4.2 放射光のフロントエンドの例(PF, BL-11)。

ムが用いられている。

加速器と実験室の間には、放射線しゃへい用の、約1m厚のシールド壁があり、そこを貫通しているトランジションチューブを通して放射光は実験室に導びかれる。このトランジションチューブの周囲は、鉛ブロックでしゃへいされている。

放射光は、偏向電磁石中の円弧軌道から扇状に出てくるが、各種のアーチャ、ダイアフラムにより、その全てが実験室にとり出されるのではなく、水平方向に30mradのビームが用いられている。これは、実験室側で実に3~4つに分割され、各々の実験ステーションに導びかれている。この分割された放射光の取り出し口を、分岐ビームラインと呼んでいるが、その各々に、各実験ステーションから開閉可能なシャッター、放射光の形状を制限するためのスリット等がとり付けられている。

実験室から、各分岐ビームラインのシャッター(ブランチビームラインシャッター、BBSと呼ばれる)を開閉する際にも、ビームラインの各コンポーネントの状態をチェックし、実験者に危険がない様にするためのインタロックシステムが設けられている。

5. シンクロトロン放射光での光学系及び光学素子

5.1 概要

ここでは、シンクロトロン放射光に用いられる光学系及び光学素子を、主としてX線領域に限って紹介する。ここで扱うX線とは、電磁波の短波長領域0.1Å^o~2Å^oを指すものとする。これよりも長い波長でも、しばしばX線という言葉が用いられることがあるが、そこでの光学系は、短波長領域での光学系とは、かなり異なっている。

X線といえども電磁波であるから、その光学系は、位相空間の6つの成分と電気ベクトルの振動方向(偏光状態)を想定するものでなければならない。一般には、波長(又はエネルギー)、バンド巾、角度発散、偏光面を想定することによって、X線光学系の性質は記述されると考えて良い。

逆に、ある一つの実験を考えた場合には、その実験に最適な光学系が、現在我々が持っている知識、資源で実現可能か否かは別問題として必ず存在する。現状でのX線光学系の用いられ方は、既存の光学系を便

宜的に用いる場合が圧倒的に多いが、最先端の実験を企画する場合には、既存のもの借用では事足りない場合も多い。

ここでは、上記の様な観点から、X線光学系の現状の一端を紹介するが、ユーザーの立場で考えれば

(a)常に実験に最適な光学系は何かを考える事

(b)その光学系を実現するための光学素子に関する知識を深める事

の2点は、どの様な場合についても有益であると思われる。ここでは、そのための必要最低限の方向付けを試みてみたい。

5.2 システムとしてのX線光学系

X線光学系を考える際には、単に指向性や単色性といった、5.1で挙げた光としてのX線の性質の制御のみでなく、X線源から試料位置まで、実験のために最適なX線束を危険なく持って来るという観点からも考える必要がある。すなわち、広義には、4.で簡単に触れた、シャッター系やインタロック系も光学系の一部と考えてよい。更に広義には、試料からの信号を検出する部分をも光学系の一部と考えてよい。

このような、システムとしてのX線光学系は、従来のX線源による実験では、無意識に用いられてきた傾向があるが、シンクロトロン放射光でのX線光学系の設計、製作にあたっては、かなり意識化して考える必要がある。

5.3 シンクロトロン放射光用X線光学系の現状

現在世界の各地で稼働しているシンクロトロン放射光施設で用いられているX線光学系は、ほとんど全てが

(a)結晶X線光学素子及び

(b)X線全反射ミラー

の組み合わせによって構成されている。この他にも、特殊な用途に

(a)X線用多層膜

(b)X線用フレネルゾーンプレート

等の開発が進められているが、安定した光学素子として用いられるようになるためには、今後更に技術的發展が必要であろう。したがって、これ以降では主として(a)、(b)に関して述べることにしたい。

5.3.1 結晶X線光学素子

結晶X線光学素子では、基本的にはBraggの回折条件

$$2d \sin \theta_B = \lambda \quad (5.1)$$

によってX線の単色化が行なわれる。ここで a は結晶格子面間隔 θ_B は格子面に対するX線の照射角、 λ は回折されるX線の波長である。

シンクロトロン放射光の場合の様に、白色X線が結晶に入射する場合には、高次反射によって、 λ/n (n は整数)の波長成分も1次反射と同じ方向に回折される。したがって、本当の意味での単色X線をつくるのには、いくつかの工夫が必要になってくる。

また実験室系で特性X線を用いる場合には、モノクロメータ結晶でのビーム出射位置は考えなくても良い(いつも同じ方向にビームが出てくる)が、シンクロトロン放射光を用いてエネルギー可変な分光器を構成する際には、1枚の結晶による分光器では、エネルギー毎にビームの出る方向が変わってしまう。そこでシンクロトロン放射光でのX線光学系では、Bragg反射を二回くりかえして用い、入射X線(白色SR光)と出射X線(単色X線)の方向が同じになる様な光学系が多用されている。この様なX線光学系は、慣用的に二結晶X線モノクロメータと呼ばれている。

5.3.2 X線全反射ミラー

X線領域の短波長電磁波に対して、物質の屈折率は1よりわずかに小さく、物質によって決まるある角度(臨界角と呼ばれる)よりも照射角が小さくなると、X線は全反射される。X線領域での物質の臨界角は、ほぼ数ミリラジアン程度であるが、

(1)X線のエネルギーが高い程、臨界角は小さくなる。

(2)重い物質程、臨界角は大きくなる。

という2つの点が光学系に関して重要である。(1)の性質から、5.3.1で指摘された高調波X線が、全反射ミラーと結晶分光器の組合わせで除去可能であることは容易にわかり、実際に世界各地のシンクロトロン放射光施設に於いてこの様なX線光学系が利用されている。

X線全反射ミラーは、全く幾何光学的な取り扱いで理解されるものであるが、表面の平面度、ラフネス等に関して非常に厳しい条件が要請される。例えば、平面度としては、He-Neレーザーの波長 λ に対して、数~数十分の λ 、ラフネスに関してはRMSラフネスで数オングストローム以下となることが理想的である。この様な鏡面が作製できる材料は限定されているが(例えば、溶触石英等)、全反射の臨界角が大きい方が扱

いやすいため、表面に重金属(プラチナ等)をコーティングしたミラーがよく用いられる。

紙数の関係がここでは詳しく述べられないが、結晶X線光学に関しての完全な理解のためには、完全結晶でのX線回折に関する理論(動力的X線回折理論)が必要である。興味のある方はいくつかの文献を挙げておくので参照されたい。¹⁻³⁾ 本文では動力的回折理論の結果を、なるべくセルフ・コンシステントに用いていくつもりであるが、一つ一つの結果が出てくる過程を追うことは、新しい概念を生み出すためにも意味があると考えられる。

5.4 X線光学素子設計、MDI及び評価

ここではX線光学素子としての結晶モノクロメータと全反射X線ミラーに関して材料の選択、設計、加工および評価方法を概観する。

5.4.1 結晶X線光学素子

実験室系では、X線の単色化のためにパイロティック・グラファイト(PG)、リシウムフロライド(LiF)の様な比較的モザイシティの大きな結晶も用いられているが、もともと平行性の高いシンクロトロン放射光では、これらの結晶はほとんど役に立たない。シンクロトロン放射光での分光結晶としては、より完全に近い半導体単結晶(シリコン、ゲルマニウム、インジウムアンチモン)が用いられている。

5.4.1(a) 平板結晶モノクロメータ

平板結晶モノクロメータ及びそれを2枚組合わせた二結晶モノクロメータは、単色でかつ比較的角分解能の良いX線ビームを得ることができる光学系として、シンクロトロン放射光施設では広く用いられているものの一つである。

この光学系の設計に於いては、まず相反する2つのパラメータ、分解能と強度、のどちらを選択するかを決める必要がある。分解能が問題となる場合には、なるべく結晶構造因子の小さい物質、反射面を選ぶ。強度が欲しい場合には、逆の選択が必要になる。分解能には、結晶の完全性も効いてくるので、実用的には、シリコン単結晶が現在のところ使用しうる唯一、最良の材料であろう。シリコン単結晶を用いる場合にはX線領域に吸収端が存在しないが、ゲルマニウム、ガリウム批素、インジウム、アンチモン等では吸収端によって、その高エネルギー側(短波長側)で分光効率が極端

に低下するので注意が必要である。

材料が決まったら、用いる反射面、結晶表面の結晶方位を決定して結晶を切断する。シリコン単結晶の場合であれば、結晶の引き上げ方向の面(大部分は(001)面もしくは(111)面)での切断であれば、結晶メーカーで $\pm 1^\circ$ 以内の精度で切断してくれる。更に精度が必要な場合や、引き上げ方向以外の面で切断したい場合には専門会社にたのむか(といっても殆んど存在しない)もしくは自分で切断するしかない。自分で切断する場合には、半導体用のダイヤモンド・カッターを用い、X線ディフラクトメータで結晶方位を確認しながらフィードバックをかける。この方法で慣れれば 0.1° 以内の精度での切断が可能である。ダイヤモンド・カッター以外にも、ダイヤモンドミルを用いて切断している例が外国にある。

ダイヤモンドカッターでの切断面は多結晶化しているので、ケミカルに取り除く必要がある。X線の反射する表面はいわゆる鏡面研磨を行なうことが通常行なわれている。これは半導体ウェーファの製造工程で行なわれるものと同様でよく、多数の専門会社が存在する。この工程で注意が必要なのは、X線の反射する表面以外の面、側面および裏面のダメージもケミカルエッチングによって除去しておかないと、歪みの影響が残ることである。私自身は、切断後一度エッチング液の中に入れて全体の加工歪層を除去した後、X線反射に使用する面とその裏面の両方を鏡面研磨(メカノ、ケミカルポリシング)する方法をとっている。

この様にして作製した平板結晶モノクロメータに使用する前に二結晶ロックンクカーブ測定や平面波X線トポグラフィ等の手法を用いて性能評価を行なう。

5.4.1(b) チャネルカットモノクロメータ

チャネルカットモノクロメータは単結晶ブロックに溝を入れて1つの結晶で2回(もしくはそれ以上)反射する様にしたものである。したがって5.4.1(a)の平板結晶モノクロメータを1ブロックの結晶で構成したものと考えれば良く、材料の選択等は平板結晶モノクロメータの場合と同様に考えれば良い。

チャネルカットモノクロメータでは、平板結晶による2結晶モノクロメータで必要であった結晶格子面の秒以下の角度精度での調整が必要なく、一軸回転でエネルギー調整が行ない得ることから、シンクロトロン放射光X線利用の初期の段階から広く用いられている。しかしながら、エネルギーを変えるとビーム位置が平行に移動するので、試料位置をそれに合わせて移

動してやる必要がある。

チャネルカットモノクロメータの製作は、使用する反射面、結晶表面の結晶方位を決定して、単結晶ロッドから必要なブロックを切り出す。そして反射面をX線ディフラクトメータによって正確に調整し、外周式のダイヤモンドカッターやダイヤモンドミルを用いて、底部を残して切り込みを入れる。その後、X線の入射部分と出射部分を整形して外形をつくる。スペクトロスコープに用いるチャネルカットモノクロメータの場合には、この段階で化学的にエッチングすればできあがりである。X線散乱測定用等に使用する場合には、反射面のあれによる寄生散乱を抑えるために、X線の反射する面(溝の内側)を研磨してからエッチングすることが必要となる。この場合の手順としては、外形切断後まず全体のエッチングを行ない、その後溝の内側を研磨して再エッチングを行なう。

チャネルカットモノクロメータの製作を依頼できる専門会社は殆んどないのが現状である。したがってある程度自作を覚悟しなければならない。しかし、外形切断のみならば依頼できる会社もいくつかある様である。

チャネルカットモノクロメータの評価は、平板結晶モノクロメータの場合と同様に、二結晶ロックンクカーブの測定や、平面波X線トポグラフィ等の手法を用いて行なう。

5.4.2 全反射X線ミラー

全反射X線ミラーは結晶光学素子とは異なり、実験室系での硬X線光学素子として用いられることは希である。しかし、シンクロトロン放射光のX線光学系では、高調波の除去や集光用光学系として広く用いられている。

全反射X線ミラーの材料としては、前述した様に高精度表面が作成できるものに限られる。寄生散乱は、X線波長と表面粗さの大小で決まると考えられるので、短波長領域用全反射ミラーに課せられる条件は、VUV、軟X線ミラーのそれよりもきびしくなる。

前に重金属を表面にコーティングして臨界角を大きくすることを述べたが、使用する波長、及び材料によっては吸収端にかかることがあるので、使用する波長、及び材料によっては吸収端にかかることがあるので、コーティング材料の選択には十分な注意が必要である。

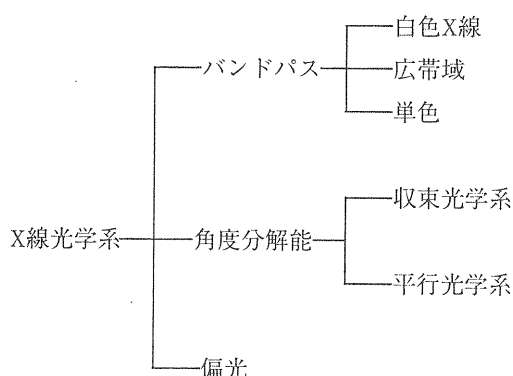
シンクロトロン放射光、特に高精度・高強度のインサージョン・デバイスからの光を受ける場合には、基

板とコーティング材料の熱膨張率のマッチングも考慮する必要が出てくる。もちろん、コーティングの相性の良い基板とコート材を組み合わせねばならないことは言うまでもない。

全反射ミラーの製作は、そのほとんどを光学メーカーに頼っているのが現状である。

5.5 X線光学系の設計

狭義でのX線光学系は、試料位置にどのようなX線ビームを持ってくるかを考えることから設計がはじまる。まずは必要とされるX線ビームを作成するのに、どのような光学素子の組み合わせが用いられるかを概観してみよう。下記のダイアグラムを念頭において説明する。



5.5.1 白色X線光学系

白色X線光学系は、Lane写真の撮影(結晶構造解析)、白色X線トポグラフィ、エネルギー分散型検出器を用いたX線回折/散乱実験に広く用いられる。光学系の中にエネルギー分散素子を持たない光学系である。シンクロトロン放射光は、元来白色のX線源であり、スリット系のみでも白色X線光学系を構成することができる。

しかしながら、白色X線を用いて時分割測定を行なう場合の様に高強度の入射線束を必要とする場合には、全反射X線ミラーによる白色X線での収束X線光学系が必要になってくる。この場合には、臨界角による高エネルギー側のカットオフが存在し、また窓材の吸収による低エネルギー側のカットオフが存在するので、厳密には超広帯域単色X線というべきであろうが、実用的には白色X線光学系として機能する。

全反射ミラーを用いる場合には、照射角を変化させると出射ビームの方向が変化し、試料位置を移動させる必要が出てくるが、普通には照射角一定で用いられ

る。

5.5.2 広帯域X線光学系

広帯域X線光学系は、X線微量蛍光分析の様に、鋭いエネルギー分布よりもむしろ高強度と明確なカットオフエネルギーが必要な場合に望ましいX線光学系である。光学素子としては、全反射ミラーの反射と透過を組み合わせる方法や、人工多層膜による回折X線を利用する方法等がある。

5.5.3 単色X線光学系

単色X線光学系は、X線回折、散乱実験で広く用いられているばかりでなく、EXAES等のX線スペクトロスコープにも必須な光学系であり、基本的には結晶X線光学素子を利用する。前述した様に1枚の結晶ではエネルギーを変えると、出射ビームの位置が変わるので、二枚の結晶を組み合わせた二結晶分光器が広く用いられているが、チャンネルカット方式では方向は変わらないが、位置は変化する。方向・位置ともエネルギーによって変わらない二結晶分光器がいくつか実用になっているが、これらの詳細は次章の図を見て頂くこととして、ここでは原理的なことのみを記述しておこう。出射ビーム位置の変化がなく、方向も変化しないためには、片方の結晶を移動させながら二結晶配置をとることが必要となる。このためには、全ての動作をコンピュータコントロールする方法や、メカニズム・リンクで必要な動作を行なう方法等が実用化されている。

平行ビームの光学系は、単に平板結晶によって実現できるが、単色でかつ収束ビームを作る光学系の設計を如何に行なうかというのが次の課題である。これには、湾曲結晶(1次元湾曲、2次元湾曲)、平板結晶と全反射収束ミラーとの組み合わせによるもの、1次元湾曲結晶とシリンドリカルミラーの組み合わせによるもの、サジタル・フォーカシング(次章の図を参照)を利用した1次元の集光、さらにその後ろにシリンドリカルミラーを置く2次元の集光等が実現されている。

5.5.4 収束X線光学系の設計上の注意

収束X線光学系での光源位置、収束光学素子位置および試料位置(焦点位置)の相互関係によってその性能が左右される。したがって、その設計に際しては、レイ・トレーシング等の方法を用いて、正確なパラメータを決定しておく必要がある。また、全反射ミラー等での収束に際しては、必ずしも設計形状が実現され

ているとは限らない(むしろ、常に設計値からずれていると考えた方がよい)ので、必ず補正用の調整機構が必要になってくる。

シンクロトロン放射光の垂直方向の集光には、曲率半径数百～数千メートルの曲面全反射ミラーが必要になり、この様な曲面を研磨によって作成することは、実際的ではない。したがって、平面あるいは、トロイダルミラーをメカニズムにわずかに曲げる手法が良く用いられている。

また、サジタルフォーカシングでの集光は、光源から光学素子までの距離と、光学素子から集光点までの距離が3：1である時に最も効率的に集光することが知られている。したがって、この場合には、光源点と集光点とを決めると、光学素子を置く場所は一意に決まってしまう。

5.5.5 偏光

偏光に関しては、結晶光学素子でBragg角が θ_B の時、 σ -偏光と π -偏光の回折効率が $1 : \cos^2 \theta_B$ となることだけを注意しておこう。したがって $\theta_B = 45^\circ$ のBragg反射は、直線偏光子として用いることが可能で

ある。

文献

- (5-1) 高良和武：X線結晶学，第9章(仁田勇編)，丸善，東京，p850
- (5-2) W.H. Zachariasen：Theory of X-ray Diffraction, Wiley, New York (1945)
- (5-3) R.W. James：Optical Principles of the Diffraction of X-rays, Bell and Sons, London (1950)

6. フォトン・ファクトリのX線ビームライン

ここでは、5.で述べたX線光学系や、X線光学素子が実際にどのように用いられているかを示すために、フォトン・ファクトリーでのいくつかの実験ステーションをとりあげて、ケーススタディを試みる。フォトン・ファクトリーのX線ビームラインと使用されている光学素子を、表6-1にまとめておく。

表6.1 フォトン・ファクトリーのX線ビームラインと光学系。

Branch Beam Line	Horizontal Acceptance Angle (mrad)	Typical Beam Size (H mm × V mm)	Photon Flux at Sample Position	Monochromator (Crystal)	Energy Resolution ($\Delta E/E \times 10^{-4}$)	Energy Range (keV)	Mirror	Line Vacuum (Gas)
BL-4A	6	50 × 4 (4 × 1)		Double Crystal Si (111) (Sagittal Focusing)	~ 2	4~20	None	Vacuum
BL-4B	4.5	50 × 5		Double Crystal Si (111)	~ 2	4~35	None	Vacuum
BL-4C	4	4 × 1		Double Crystal Si (111) Sagittal Focusing	~ 2	4~20	None	Vacuum
BL-6A ₁	0.1	10 × 3		Plane (111)	7.5	8~17		Vacuum
BL-6A ₂	4	2.5 × 1		Bent Si (111) ($\alpha = 0, 6.0^\circ, 7.8^\circ, 9.5^\circ, 11.4^\circ, 13.7^\circ, 16.5^\circ$)		5~25	Bent Plane Fused Quartz	Vacuum
BL-6B	4 (6 if required)			None		4~30		Vacuum
BL-6C ₁	0.5 (4 in future)	10 × 5		None		8~30		Vacuum
BL-6C ₂	0.5	5 × 5		Channel-Cut Si(111)	7.5	8~12		Vacuum
BL-7C	4	8 × 1	$4 \times 10^9/7 \text{ mm}^2$ (8 keV, 100 mA) 3×10^{10} (when focused)	Double Crystal Si (111) Sagittal Focusing	2	4~20 (4~13) when focused	None	Vacuum
BL-8C (Hitachi)	5	50 × 5	$2 \times 10^9/\text{m A} \cdot \text{mm}^2$ at 10 keV with Si (111)	Channel-Cut Si (200), Si (111), Si (400)	~ 2	5~40	None	Vacuum & He
BL-9C (NEC)	5	150 × 5		Double Crystal Si (111) Sagittal Focusing	~ 2	5~25	None	Vacuum
BL-10A	1	10 × 3		Si (111), Si (220) Ge (111), InSb (111) Quartz (100), PG (002) Curved Si (111) ($\alpha \sim 4^\circ, 8^\circ$)	50 ~ 5	5~25	None	Helium
BL-10B	2	8 × 1	$4 \times 10^9/7 \text{ mm}^2$ (10 keV, 100 mA) with Si (311)	Channel-Cut Si (311) Double Si (111) Double Si (220)	1	6~30 3.5~15 5.5~25	None	Vacuum
BL-10C	4	6 × 1.5	$\sim 10^{10}/9 \text{ mm}^2$ (8 keV, 100 mA)	Double Crystal Si (111) Fixed Beam Position	2	4~10	Bent Cylinder	Helium

BL-14A	1.28 (Vertical)	5 × 38		Double Si (111) Double Si (331) Double Si (553)	2	5.1~ 19.1 12.9~ 48 22.7~ 84.5	Bent Cylinder for Vertical Focusing, Pt-cated Fused Quartz	Vacuum (line) He (mono- chromator)
BL-14B	2.2	5 × 30		Double Si (111), Si (220), Si (311) Sagittal Focusing	2	5.2~ 57	None	Vacuum
BL-14C	1.3	10 × 40		Double Si (111)	2	5.5~ 43	None	Vacuum
BL-15A	2	2.6 × 1.3	8 × 10 ¹⁰ /6 m ² (8.0 keV, 150 mA)	Curved Ge (111) (α = 8.0°)	~ 10	5.6~ 12.4	Cylinder, Fused Quartz	Vacuum and He
BL-15B	0.14	5 × 5		None		3.5~ 34	None	Vacuum
BL-15C	2	60 × 6		None		4~ 35	None	Vacuum
BL-16X (under construction)	4	4 × 1		Double Crystal Si (111) Sagittal Focusing	~ 2	4~ 35	Currently None	Vacuum
BL-17C (Fujitsu)	1	20 × 5		None		~ 1	Quartz (plane)	Vacuum

6.1 BL-15

BL-15は、ストレージリングの偏向電磁石B15(図4.1参照)から出てくる放射光を用いるビームラインであり、三つの分岐ビームライン、A、B、Cに分割されている(図6.1)。ここでは、扇状に広がった26mradの放射光を、(A)4.5mrad、(B)2mrad、(C)6mradに分割して用いている。3つの分岐ビームラインの内、B、Cにはビームラインとしての光学系は、現在のところなく、白色の放射光が実験用ハッチまで導入され、ハッチ内で実験者が適当な光学系を用いて、実験に必要な光を切り出して利用する。ハッチとは、実験装置を囲う、鉄または、鉄と鉛板で作られた箱であり、散乱された放射を防ぐ役割をもっている。

分岐ラインAは、X線小角散乱用の実験ステーションであり、ストレージリングからの白色X線が、まず、湾曲X線ミラーによって垂直方向に収束され、さらに、湾曲結晶モノクロメータによって、水平方向に収束されて、ハッチ内に導入されている。結晶モノクロメータの後方は、実験装置全体が、モノクロメータ位置を

軸として回転できるようになっており、ある程度の波長可変性を持つ(図6.2)。

6.2 BL-10

BL-10も、BL-15と同様、三つの分岐ラインA、B、Cに分割されており(図6.3)それぞれ水平方向の発散角として(A)4.5mrad、(B)1mrad、(C)6mradを使っている。Aは、結晶構造解析用4回折計の専用ステーションであり、平板または湾曲結晶モノクロメータによって、白色放射光を単色化して用いている。ここでも、BL-15Aと同様、1枚の結晶で単色化を行っているので、波長を変えるとビーム位置が変動する。このために、回折計の入ったハッチ全体を平行移動架台の上ののせて、異なる波長が試料上にくるように移動している。Bは透過型EXAFSの専用ステーションであり、白色放射光を、主としてチャンネルカット結晶モノクロメータを用いて分光している。チャンネルカットモノクロメータでは、単色化されたX線の方向は、白色X線と変わらないが、波長によってビームの高さに変化する。これに追従するために、実験ハッチ内に、上

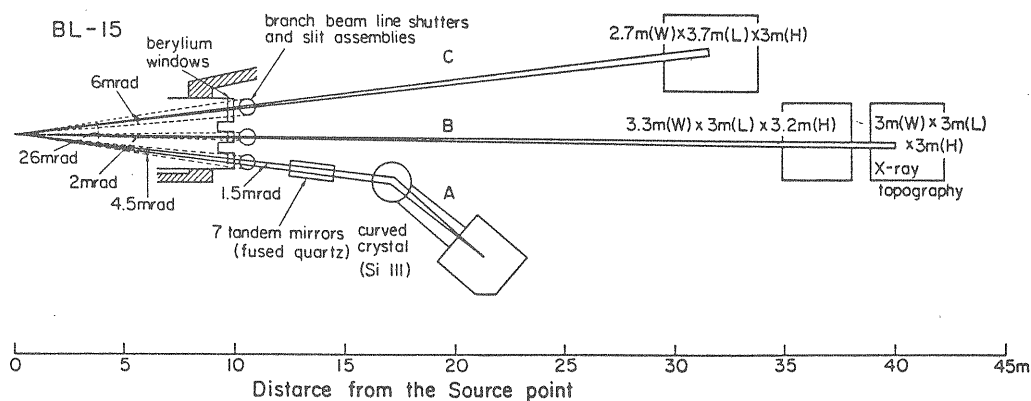


図6.1 BL-15のレイアウト

下方向に動く架台が設置され、実験装置はその上で組み立てられている。Cは、BL-15AAと同様に、垂直、水平の両側で収束機能を持つビームラインであるが、BL-15Aとは異なりまず二結晶分光器で単色X線にし、その後二重湾曲ミラーによって両方向の収束を行なう。ここでの二結晶モノクロメータは、第1結晶が、回転と同時に逆進運動を行なって、単色化されたビームの出射位置及び方向が波長に関わらず一定となる様になっている。したがって、試料位置を変えずに異なる波長での測定を行なうことが可能となっている(図6-4)。

6.3 BL-4

BL-4も、BL-15、BL-10と同様に偏向電磁石からの放射光を利用するビームラインであり、A(6mrad)、B(4.5mrad)、C(6mrad)の三分岐ラインに分割されている。ここでは、特に、BL-4Cで開発され、フォトン・ファクトリーの多くのビームライン(4A、6B、6C、7C、9C、13B、16Xに設置済、15C、ARビームラインでの建設中)の定位置出射型サジタルフォーカシング二結晶分光器について概説する。

サジタルフォーカシング二結晶分光器とは、図6-5

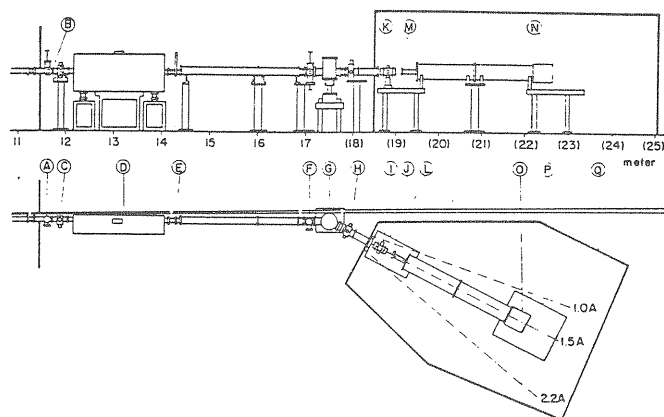


図6.2 BL-15Aのレイアウト。

A: 吸収板及び蛍光板, B: ベリリウム窓 (0.2mm厚), C: ミラースリット, D: ミラーチェンバー, E: ゲードバルブ, F: 蛍光板及びダイレクトビームストッパー, G: 分光結晶(チェンバー), H: 散乱防止スリット, I: 試料スリット, J: 試料台, K: カプトン窓(25 μ m厚), L: 試料, M及びN: カプトン窓, O: フィルムカセット用真空槽, P: 検出器台, Q: ハッチ

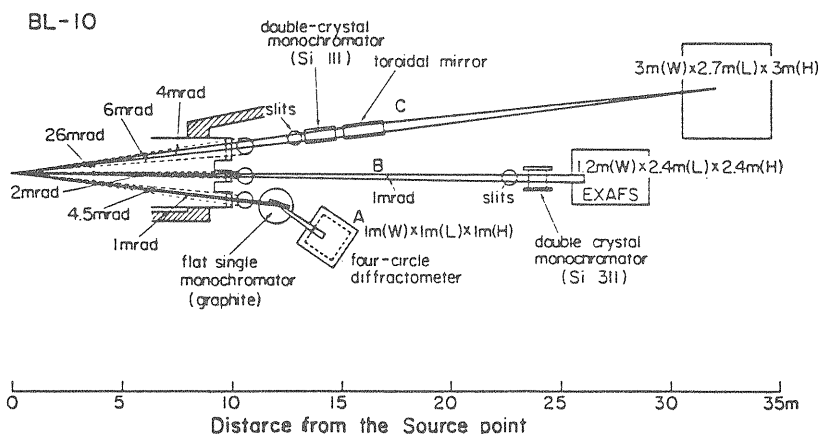


図6.3 BL-10のレイアウト

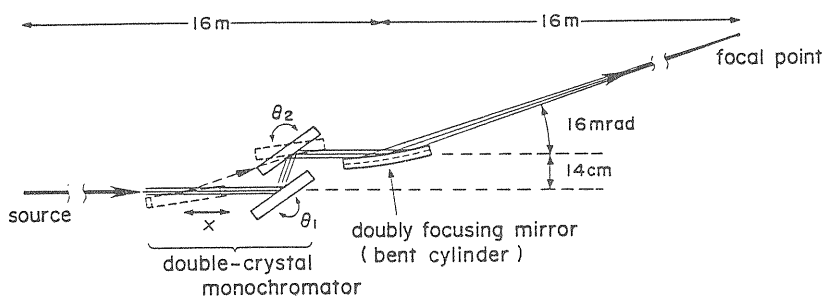


図6.4 BL-10Cでの光学系

に示すように、二結晶分光器の第2結晶を円筒形に湾曲させて、水平方向の集光を行なうものである。この結果、垂直方向の角度分解能を落とさずに、水平方向の収束が可能になる。この分光器では、単色化されたX線系の位置を一定に保つために、移動させている。

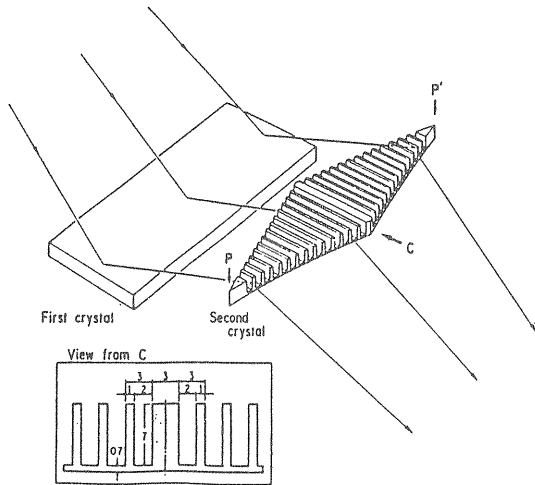


図6.5 サジタル・フォーカシング

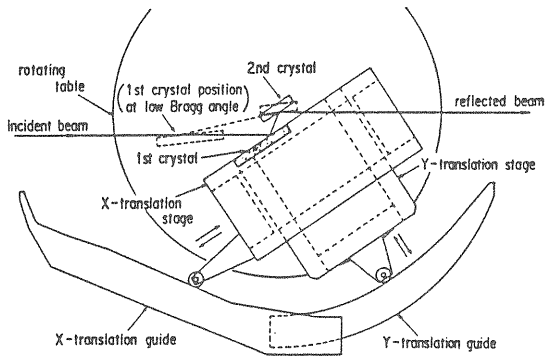


図6.6 メカニカル・カム方式の出射位置固定二結晶モノクロメータ

これは結晶の角度をかえる回転運動によって同時に並進運動が行なわれるので、制御が非常に簡単な構造になっている(図6-6)。

6.4 BL-16

今までに述べた、3つのビームラインが、偏向電磁石からの放射光を利用するビームラインであるのに対して、BL-16は挿入光源からの放射光を利用するためのビームラインである点異なる。BL-16は53極NdFe永久磁石を用いたマルチポールウグラー／アンジュレータを光源とするビームラインであり、この磁石は磁極間距離の調整により、最大1.47Tの磁場を発生することができる。したがって、フォトン・ファクトリーの偏向電磁石(0.99T)より磁場が強い分だけ、高エネルギー側のX線が発生させることができる。また磁極間距離を大きくし、弱磁場で用いると、アンジュレータとして動く。アンジュレータとしては、真空紫外領域の干渉性放射光が出てくるので、ビームラインは、X線用と真空紫外用の2つの機能が必要となる。そこで、図6-7に示されるように、ビームラインの最前部にミラーを設け、紫外光を用いる場合には、このミラーで水平に振って別のビームダクトに導く。X線用ビームラインは、直線方向を用いる。マルチポールウグラーとして用いる場合には、紫外用ミラーを抜き、X線ミラーで上にはねる。このX線ミラーは平板SiCを曲げて放物面を作るものであり、光源を焦点とするようにすれば、反射されたX線は、平行光源となる。リングの真空と、ビームラインの真空とを分割するベリリウム窓は、このミラーの後ろにあり、さらに後方に、分岐ビームラインシャッターがある。シャッター後方に、BL-4Cで用いられているものと同様な定位

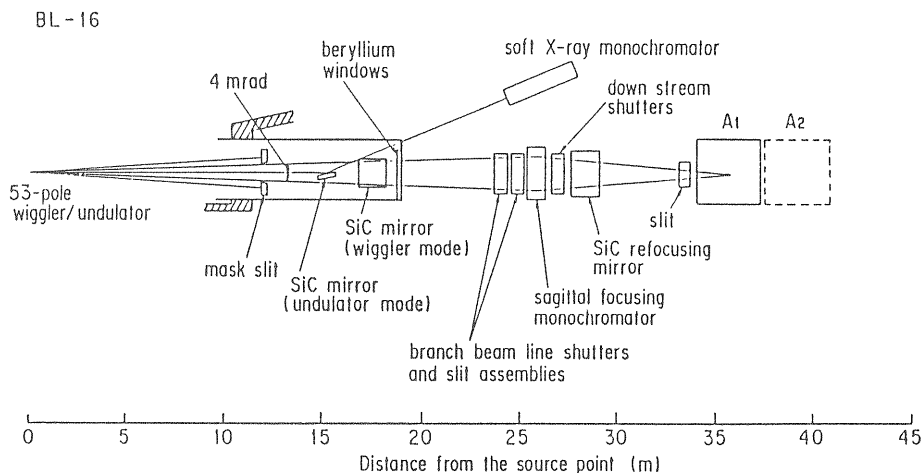


図6.7 BL-16(マルチポール・ウグラービームライン)のレイアウト

置出射型サジタルフォーカシングモノクロメータが置かれ、その後ろに、ダウンストリームシャッタが設けられている。これは、光学素子への熱負荷を変えずに、X線ビームのon/offを行なうためのものである。さらに、その後方に、リフォーカシングミラーをおいて、最初のミラーで平行化された垂直方向のビーム発散を、サンプル上に収束させる。すなわち、このビームラインでは、水平方向をサジタルフォーカシングにより、垂直方向を曲面ミラーにより収束させた二重集光光学系を採用している。

以上、4つのビームラインを紹介したが、詳細は、フォトンファクトリー・アクティビティレポートを参照されたい。

7. 放射光の利用

放射光利用研究は、物質と電磁波の相互作用が関与する、ほとんど全ての分野に及んでいる。これらには、物理学、化学、生物学、結晶学、鉱物学、医学、薬学、

地球科学、天文学等への幅広い応用が含まれており1人の人間がカバーしうる範囲を越えている。そのようなわけで、放射光の利用に関する話は、誰が話すかで、全くちがうものになってしまうのであるが、少なくとも、全体としてどのような利用研究が行なわれているかを知って頂くために、1987年のフォトンフロクトリー・アクティビティレポートから、ユーザーレポートの目次を表7-1に示しておこう。ここにみられるように、放射光利用での加速器の利用は、高エネルギー物理学でのそれと違って著しく「地方分権型」構造をもっている。

以前は(多分現在も)、放射光利用の形態を考える場合に、(1)電子状態に関する研究(真空紫外領域)と、(2)原子構造に関する研究(X線領域)に二分して議論する傾向があったが、フォトンファクトリーの運転開始以来6年を経た現在、この2つで割り切ってしまうには、余りに多くの展開がありすぎたと(少なくとも筆者には)思われる。ここでは、特に(2)の原子構造あるいはもっと広い意味での、物質の構造を探る方向での放射光利用研究に関して、独断と偏見に充ちた解説を試みたいと思う。

表7.1 Contents for Experimental Progress Reports

<u>Title</u>	<u>First Author</u>	<u>Proposal number</u>	<u>Page</u>
<u>BL-1A</u>			
Determination of Ca-As Bonding at the CaF ₂ /GaAs Interface	Yasuko YAMADA	87-Y003	112
Oxygen K-edge EXAFS Measurements on SiO ₂ Film	Satoshi MAEYAMA	87-Y003	113
Synchrotron Radiation Photoemission Spectroscopy of Ga-insulator Interfaces for GaAs Lateral Epitaxial Growth	Masaharu OSHIMA	87-Y003	114
Performance of a Grating/Crystal Monochromator Using a Multilayer Mirror-grating Combination	Satoshi MAEYAMA	87-Y003	115
Performance of a Grating/Crystal Monochromator in 50 eV - 900 eV	Tomoaki KAWAMURA	87-Y003	116
Performance of a Grating/Crystal Monochromator in 2.5 keV - 4 keV	Tomoaki KAWAMURA	87-Y003	117
<u>BL-1B</u>			
A New Soft-X-Ray Plate: Ag/Chalcogenide Film	Yasushi UTSUGI	87-Y003	118
Photon Stimulated Desorption in the Soft X-Ray Region	Toru MURASHITA	87-Y003	119

BL-1C

Synchrotron Radiation Excited Etching of Si and SiO₂ by Use of SF₆+O₂ Reaction Gases Tsuneo URISU 87-Y003 120

BL-2A

X-Ray Fluorescence Analysis of Third Period Elements Using Undulator Radiation Atsuo IIDA 86-138 121

BL-2B

Soft-X-Ray p.A Scattering by Light Element Solids Tadasu SUZUKI 86-068 122

Reflectivity Measurement of W/Be Multilayer Mirror for Soft X-Rays Yuichi UTSUMI 87-003 123

X-Ray Contact Microscopy of Human Chromosome Kunio SHINOHARA 86-023 124

A Preliminary Experiment of a Soft X-Ray Microscope Sadao AOKI 85-087 125

A Performance Test of a Soft X-Ray Microscope Yasushi KAGOSHIMA 87-103 126

BL-4A

Nuclear Magnetic Resonance Study of Irradiation Effects on Br-dCMP Caused by Soft-X-Rays around K Absorption Edge of Br Kaoru TAKAKURA 86-100 127

Strand Breaks in 5-Bromouracil-substituted DNA by 12.40 and 13.55 keV Photons Kotaro HIEDA 86-099 128

Induction of Chromosome Aberrations in Human Lymphocytes by Synchrotron-produced Monochromatic X-Rays Masao SASAKI 85-025 129

SR Micro Beam X-Ray Analysis Yohichi GOHSHI 87-058 130

Determination of the Composition of Mixed Chemical States by X-Ray Fluorescence Detection Using Chemical Shift of Absorption Edge Kenji SAKURAI 87-053 131

Chemical State Imaging by X-Ray Fluorescence Detection Using Chemical Shift of Absorption Edge Kenji SAKURAI 87-053 132

Analysis of Micro Constituents in Sea Water Using Monochromatized X-Rays from Synchrotron Radiation Masafumi ISHIKAWA 86-039 133

X-Ray Fluorescence (XRF) Analysis of Different Parts of a Single Strand of Hair Takao SUZUKI 87-057 134

Application of Synchrotron Radiation to Archaeological Objects (I) - Nondestructive X-Ray Fluorescence Spectroscopic Imaging of Artistic Patterns - Izumi NAKAI 87-056 135

Application of Synchrotron Radiation to Archaeological Objects (II) - SR X-Ray Fluorescence Analysis of Ancient Artifacts of Glass and Glaze - Akihiko MOCHIZUKI 87-056 136

Near Surface Analysis of GaAlAs Using Grazing Incidence X-Ray Fluorescence Atsuo IIDA 86-041 137

Grazing Incidence X-Ray Fluorescence Analysis of Layered Structure Atsuo IIDA 86-041 138

Photoacoustic Extended X-Ray Absorption Fine Structure (PA-EXAFS) Tsutomu MASUJIMA 86-020 139

Depth-profiling by Phase Analysis of Photoacoustic X-Ray Absorption Spectroscopy	Tsutomu MASUJIMA	86-020	140
<u>BL-4B</u>			
Fundamental Characteristics of New Powder Diffractometer	Ryosei UNO	87-061	141
X-Ray Powder Diffraction Study of the High-Tc Superconductors	Izumi NAKAI	85-148	142
Profile Analysis on the Basic of the Energy Dispersive Spectra at High Pressure and Temperature	Takamitsu YAMANAKA	87-062	143
Application of RDF Analysis Employing Anomalous X-Ray Scattering to Structural Studies of Binary $GeSe_{1-x}$ Glasses	Akihiko NUKUI	87-063	144
<u>BL-4C</u>			
X-Ray Study on Configurational Fibonacci Superlattices	Kousei KAMIGAKI	86-056	145
High Resolution Investigation of Rod-shaped Scattering from (111) Si Surface by Triple-axis Diffractometer	Nobuo KASHIWAGURA	86-051	146
A Be-cylinder Type High-pressure Apparatus for X-Ray Diffraction	Yasuhiko FUJII	85-082	147
A XANES Spectroscopy of Ni(II)-Fe(II) Hybrid Hemoglobins	Naoya SHIBAYAMA	87-065	148
Local Structure in Orthorhombic and Tetragonal $Ba_2YCu_3O_{7-x}$: The Role of Oxygen Vacancies in High T_c Superconductivity	Hiroyuki OYANAGI	87-003	149
Valence Study of Orthorhombic and Tetragonal $Ba_2YCu_3O_{7-x}$: The Role of Oxygen Vacancies in High T_c Superconductivity	Hiroyuki OYANAGI	87-003	150
Molecular Arrangement of Langmuir-blodgett Monolayers Studied by Surface-sensitive X-Ray Absorption Spectroscopy	Hiroyuki OYANAGI	87-065	151
Si/Ge/Si Monolayer Heterostructure on Si(100) Studied by Surface-sensitive EXAFS	Hiroyuki OYANAGI	87-065	152
Structural Studies of (Ga,In)(As,P) Alloys and $(InAs)_m(GaAs)_n$ Strained Layer Superlattices	Hiroyuki OYANAGI	87-065	153
Bond Length Relaxation Around Isoelectronic Dopants in InP Studied by Fluorescence- detected EXAFS	Hiroyuki OYANAGI	87-065	154
<u>BL-6A</u>			
Crystal Structure Analysis of ω -Amino Acid: Pyruvate Aminotransferase Preliminary Result from 2.3 Å Resolution Electron Density MAP	Nobuhisa WATANABE	85-022 87-028	155
High Resolution Data Collection of Streptomyces Erythraeus Trypsin Using the Imaging Plate Mounted in a Weissenberg Camera	Takashi YAMANE	86-022	156
Diffraction Experiments of Hydrogenase at Two Wavelengths	Yoshiki HIGUCHI	86-042	157
Development of a Rapid Laue-diffraction Technique for Protein Crystallography	Yishinori SATOW	87-059	158

BL-6B

High Pressure Equation of State of α -MN to 42 GPA	Kenichi TAKEMURA	85-122	159
Phase Transitions of Black Phosphorus and Black Phosphorus-arsenic Alloy at Very Low Temperatures and High Pressures	Ichimin SHIROTANI	86-114	160
X-Ray Diffraction Study under Pressure Using an Imaging Plate	Osamu SHIMOMURA	85-122	161

BL-6C

Preliminary Study of Charge Density Wave in Chromium	Masahiro MORI	85-120	162
Low Temperature and High Pressure X-Ray Study on the Pressure-induced Phase Transition of Amorphous Semiconductors	Kazuhiko TSUJI	86-112	163
Intensity of X-Ray (222) Line in InSb under High Pressure	Bin OKAI	85-083	164
A New Kind of Interference Fringe Induced by X-Ray Resonant Scattering	Masami YOSHIKAWA	87-071	165
Absolute Lattice Parameter Measurement of GaAs Crystals Using Monochromatic Synchrotron Radiation	Koji USUDA		166

BL-7A

A Soft X-Ray Beam Line (20-1000 eV) with a Plane Grating Monochromator for Surface Studies	Hidetoshi NAMBA		167
--	-----------------	--	-----

BL-7B

UPS Studies of 2X1 Reconstructed Surface of Diamond (111)	Hidetoshi NAMBA		168
A VUV Beam Line (5-45 eV) with a 1m Seya-Namioka Monochromator for Surface Studies	Hidetoshi NAMBA		169

BL-7C

Ce L ₁₁₁ EXAFS Study of CeO ₂ -Stabilized Tetragonal ZrO ₂	Fumiyuki MARUMO	85-014	170
EXAFS Study of Relaxation of a Cu ⁺ Impurity in Alkali Halides	Takatoshi MURATA	86-059	171
Local Structure around Br Atoms in AgBr-AgO-GeO Glasses	Hideki MORIKAWA	86-084	172
The Mechanism of Solution Strengthening by C and N in Austenitic Steel	Nobuhiko KONDOH	86-018	173
High Pressure-induced Polymorphism in Vanadium Oxides	Ayako TOKIWA	87-004	174
Zn EXAFS Measurements under High Pressure Conditions Using a Diamond Anvil Cell	Shigeho SUENO	87-007	175
EXAFS and XANES Studies of Cobalt(III)-EDTA Complex	Hideto SAKANE	85-111	176
Coordination of Fe in Garnets by EXAFS Spectroscopy	Yasunori TABIRA	86-083	177
The Local Structure of a Vanadate in Supported Vanadium Oxide Catalysts. II.	Tsunehiro TANAKA	85-101	178

Structure of Ultrafine Iron Oxides on Activated Carbon Fiber	Katsumi KANEKO	86-011	179
The Structure Change of P_2O_5 - V_2O_5 during the C_4H_8 Oxidation Reaction	Kiyotaka ASAKURA	86-013	180
An EXAFS Study of Co-Mn/SiO ₂ Bimetallic Solvated Metal Atom Dispersed Catalysts	Hiroyoshi KANAI	86-085	181
EXAFS Studies on the Se-Nb Catalyst Obtained by Use of the Two-step Fixation Reaction	Kiyotaka ASAKURA	87-013	182
Determination of the Environmental Structure around a Specific Atom in Disordered Materials by the Anomalous X-Ray Scattering	Yoshio WASEDA	86-063	183
Vanadium K-edge X-Ray Absorption Spectroscopy of the Reduced and Thionine-oxidised Forms of the VFe Protein of the Vanadium Nitrogenase from Azotobacter Chroococcum	Judith M. ARBER	86-097	184
<u>BL-8C</u>			
A High-speed Digital Subtraction Angiography System for Phantom and Small Animal Studies	Ken UEDA	86-Y018	186
High Resolution Tomography Employing an X-Ray Sensing Pickup Tube	Tatsumi HIRANO	86-Y018	187
X-Ray Sensing Pickup Tube	Yoshio SUZUKI	86-Y014	188
<u>BL-9A</u>			
Investigation of System Reliability on the BL-9A SR Lithography Beamline	Koichi OKADA	87-Y001	189
<u>BL-9C</u>			
Interfacial Superstructure of a-Si/Si(111)-7×7 and a-Si/Ge _{0.2} Si _{0.8} (111)-5×5 Studied by Grazing Incidence X-Ray Diffraction	Koichi AKIMOTO	87-Y001	190
Interfacial Superstructure between an Epitaxial Si(111) Layer and a B($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)/Si(111) Substrate Studied by Grazing Incidence X-Ray Diffraction	Koichi AKIMOTO	87-Y001	191
Investigation of the Interface Structure between Al and GaAs(001) by Grazing Incidence X-Ray Diffraction	Jun'ichiro MIZUKI	87-Y001	192
X-Ray Topography of 6 inch Diameter Si Crystal	Tomohisa KITANO	87-Y001	193
Fluorescence EXAFS Study of AlGaAs Doped with Se Donor Impurities	Tomohisa KITANO	87-Y001	194
Fluorescence EXAFS Study of Zn Doped LEC InP Crystal	Tomohisa KITANO	87-Y001	195
<u>BL-10A</u>			
Determination of Fe and Ni Ordering in Tetrataenite from Saint Severin Meteorite Using Synchrotron Radiation	Tokuhei TAGAI	85-064	196
Crystal Structure of KBSi ₃ O ₈ Microcrystal	Mitsuyoshi KIMATA	85-075	197
Structure Study on the Single Crystal of Cu-Al-Ni γ_1' Martensite Phase	Jinhua YE	87-077	198
Dynamical Diffraction and Anomalous Transmission of Thermally Scattered X-Rays in a Perfect Germanium Crystal	Yasuji KASHIWASE	87-067	199

Photon Counting in X-Ray Diffraction	Kazutoshi GOUHARA	86-058	200
<u>BL-10B</u>			
EXAFS Study on Local Structure Changes of Amorphous Alloy	Toshio NASU	85-002	201
EXAFS and XANES Study of the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Solid Solution	Kichiro KOTO	85-012	202
Chain Structure of Liquid Selenium Systems (II)	Hirohisa ENDO	85-103	203
An EXAFS Study of Nickel(II) Complexes Containing Carbohydrates; A Novel C-2 Epimerization of Aldoses Promoted by Nickel(II) Diamine Complexes Involving a Stereospecific Rearrangement of Carbon Skeleton	Tomoaki TANASE	85-104	204
EXAFS and XANES Studies on Martensitic Transformation in Iron Base Alloys	Osamu YAMADA	85-107	205
Disordered Effect in Pentanary Alloy Semiconductor AlGaInPAs	Shun-ichi GONDA	85-108	206
X-Ray Absorption Study of Linear-chain Semiconductor $(\text{NbSe}_4)_3\text{I}$	Mitsuru IZUMI	85-112	207
X-Ray Absorption Study of Quasi-one Dimensional Conductor NbS_x ($x \sim 3$)	Toshiaki IWAZUMI	85-113	208
Short-range Order Investigation in $a\text{-Ge}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}$ by EXAFS	Hiroaki MYOREN	86-003	209
EXAFS Study on the Structure Changes of GeTe_2 Films	Keiji TSUNETOMO	86-003	210
EXAFS Study on Premartensitic Phase in A-15 Compounds	Kazuya KAMON	86-005	211
Local Structure of the $\alpha\text{-AgI}_{1-x}\text{Br}_x$ Solid-solution	Akira YOSHIASA	86-007	212
EXAFS and XANES Studies on $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ Glasses Containing Copper Ion	Xu QIANG	86-078	213
Study of the Electronic Structures of Highly Conductive Phthalocyaninato Nickel Complexes by Polarized XANES Spectra	Haruo KURODA	86-079	214
Crystallization of Gd_2O_3 Stabilized Zirconia from Gel by EXAFS	Kichiro KOTO	86-089	215
EXAFS Study of the Perovskite Type $\text{SrCo}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ Solid Solution	Akira YOSHIASA	86-090	216
Local Crystal Structure of Exchanged Ions in Zeolite	Yasushige KURODA	86-093	217
Structure Studies of Niobium and Tantalum Oxides by EXAFS	Takashi USHIKUBO	87-Y004 86-Y003 86-Y016	218
XANES and EXAFS of High T_c Superconductive Ceramics	Haruo KURODA	87-U002	219
EXAFS Observation of Vapor Quenched Fe-Ag and Fe-Ti Alloys	Yoji NAKAMURA	86-087	220
Local Structure in the Pre-martensitic State of AuCd Alloy	Yukio NODA	86-088	221
Fe K-edge XANES Study of the Metamict State in Oxide Minerals	Junji AKIMOTO	84-052	222
EXAFS/XANES Analysis of Selenium Compounds	Takuji KAWASHIMA	87-008	223

EXAFS Study on the Local Structural Rearrangement of Amorphous Cu-Zr Alloy during the Crystallization Process	Hiroimi YAMASHITA	85-102	224
Studies on the Structure of Molybdenum(V) Species in Aqueous Acidic Solution by EXAFS	Kunihiko YOKOI	85-015	225
Solute Structure of Copper(II) Perchlorate Aqueous Solution in Liquid and Glassy States: Its Concentration Dependence	Masaharu NOMURA	85-021	226
Solvation Structure of Cu(II) in Liquid Ammonia	Toshio YAMAGUCHI	85-021 87-023	227
Solvation of Ag(I) in Some N-donor Solvents	Toshio YAMAGUCHI	85-021 87-023	228
Structure of Bis (2,3-Alkanedione Dioximato) Nickel(II) in Solid and Pyridine Solution by the EXAFS Method	Seiichi YAMASHITA	86-008	229
Structure of Zinc Bromide Complexes in Glassy Aqueous Solutions	Toshio YAMAGUCHI	87-023	230
EXAFS Studies on Mo, Co-Mo, and Ni-Mo Supported Catalysts for Hydrotreating of Petroleum II. The Deactivation Behavior of Molybdenum Catalysts Used for Hydrotreating Coal-derived Liquid	Nobuyuki MATSUBAYASHI	85-006	231
EXAFS Studies on the Metal-support Interaction in the Pd-supported Nb System	Kiyotaka ASAKURA	85-019	232
EXAFS Studies of Silica-supported Metal Catalyst I. Effect of Additives Such as Ti, Nb and Ta on the Surface Structure of Supported Metal	Takakazu FUKUSHIMA	85-105	233
Thermal Expansion and Debye Temperature of FCC Metals	Toshihiko YOKOYAMA	85-106	234
High Pressure In-situ EXAFS Studies on the Catalytic Reaction Mechanism the Oxidation of Co on the Co(II) Oxide Cluster	Kiyotaka ASAKURA	85-110	235
EXAFS Characterization of Zeolite-encapsulated Rh and Bimetallic RhFe Carbonyl Cluster Catalysts	Masaru ICHIKAWA	86-001	236
An XANES and EXAFS Study of Gold Catalysts	Hiroyuki KAGEYAMA	86-002	237
EXAFS Study on the Structure of Catalysts for Photodecomposition of Water	Akihiko KUDO	86-004	238
EXAFS Study on the Structure of the ZSM-5-attached one Atomic ZrO ₂ Catalyst	Kiyotaka ASAKURA	86-012	239
An EXAFS Study of the Local Structure of Iron-Tin Composite Oxides	Satohiro YOSHIDA	86-086	240
Characterization of Supported RhFe and PtFe Bimetallic Carbonyl Clusters and Their Catalytic Functions	Masaru ICHIKAWA	87-002	241
EXAFS Studies of Supported Ultra Fine Metal Particles I. Effect of Additives and Supports on the Morphology of Rh	Takakazu FUKUSHIMA	87-010	242
EXAFS Studies on the Structure of the Attached Rh Dimer Carbene Complex	Kiyotaka ASAKURA	87-011	243
The Structure Studies on the TiO ₂ One-atomic Layer by Means of EXAFS	Kiyotaka ASAKURA	87-012	244
The Structure of Mo(CO) ₆ Supported in the Zeolite NaY	Kiyotaka ASAKURA	87-014	245

Studies on the Structure of Bimetallic Colloidal Catalysts	Naoki TOSHIMA	87-016	246
EXAFS Study on Local Structures of Active Site on Mo Supported Catalysts for Hydrocracking and Hydrogenation Activities I. The Effect of Presulfiding Condition	Nobuyuki MATSUBAYASHI	87-024	247
EXAFS Study of Selenocysteine Structure	Yuzuru HIRAGI	86-016	248
X-Ray Absorption Study on the Type II Copper-depleted Cucumber Ascorbate Oxidase	Takeshi SAKURAI	86-091	249
EXAFS and XANES of the Metallic Components in Plant Leaves	Masayasu KURAHASHI	86-094	250
 <u>BL-10C</u>			
Small-angle Scattering from Polymer Solutions Using Synchrotron Radiation	Hiroyuki TAGAWA	85-066	251
Study on the Size and Shape of Fine Particles of Semiconductors by Means of X-Ray Small-angle Scattering	Tadashi ITOH	85-119	252
Aggregation Process of β -Casein	Kanji KAJIWARA	86-025	253
Small-angle X-Ray Scattering Study on Higher-order Structures of Chromatin in Solution	Yoji INOKO	86-027	254
X-Ray Solution Scattering Studies on Solubilized Bacteriorhodopsin II	Mikio KATAOKA	86-028	255
Microsegregated Structure in the Silk Fibroin from Bombyx Mori	Masanobu NAGURA	86-029	256
Structural Studies on Aldolase by Means of Time-resolved X-Ray Scattering	Mamoru SATO	86-030	257
Lytotropic Mesophase of Imogolite Observed by Small-angle X-Ray Scattering	Kanji KAJIWARA	86-060	258
Effects of Ionic Strength, Temperature and the Coenzyme on the Quaternary Structure and Activity of Tryptophanase	Yuzuru HIRAGI	86-103	259
The Structure of P2 Myelin Protein in the Solution	Michio KIMURA	86-104	260
X-Ray Solution Scattering Studies on Phytochrome Phototransformation	Satoru TOKUTOMI	86-106	261
Small-angle X-Ray Scattering Study of Aggregation Process of Cucumber Green Mottle Mosaic Virus Protein	Yoh SANO	86-107	262
Structural Behavior of Troponin-C Upon Calcium Ion Binding	Tetsuro FUJISAWA	87-033	263
Micelle Structure of Polyethylene Glycol Monoether Liquid Crystal	Hiroshi URAKAWA	87-084	264
Multiply Charged Xe Ions Produced in 4.1 - 8.0 keV X-Rays	Tadao TONUMA	86-134	265
X-Ray Raman Scattering as a Tool for Structure Determination	Kazuyuki TOHJI	87-066	266
Surface structure Analysis of $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Bi}$ by X-Ray Diffraction	Toshio TAKAHASHI	87-085	267

BL-11A

Multiple-photoionization of Cs and Ba Atoms Due to Creation of 4d-hole States	Tetsuo NAGATA	85-090	268
2p-shell Photoionization of K and Ca Atoms	Takashi MATSUO	85-090	269
Threshold Photoionization of Kr 3d Subshell	Tatsuji HAYAISHI	86-073	270
Investigation of Fragmentation Processes Following Inner-core Level Excitation of $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ and $\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$ in the Vapor Phase	Shin-ichi NAGAOKA	87-105	271
S K and $L_{2,3}$ Absorption Spectra of $\text{Ni}(\text{mnt})_2$	Koichi KIKUCHI	85-144	272
Polarized S K and $L_{2,3}$ Absorption Spectra of $(\text{TMTTF})_2\text{ClO}_4$	Koichi KIKUCHI	86-143	273
Optical Constants of SiC in the Soft X-Ray Region; Determined from Eight Samples	Mihiro YANAGIHARA	85-095	274
Optical Constants in the Soft X-Ray Region	Naoto KIHARA		275
Reflectivity of Multilayer Reflectors in 0.1 - 1 keV Region	Koujun YAMASHITA	85-137	276
Optical Constants of Highly Reflective Materials for Soft X-Ray Multilayer Mirrors	Masaki YAMAMOTO	85-095	277
Resuscitation of Carbon-contaminated Mirrors and Gratings by Oxygen-discharge Cleaning	Tsuneharu KOIDE	85-097	278

BL-11B

STE Luminescence Excitation Spectra near the K and Cl is Edges in KCL and KBR	Mihiro YANAGIHARA	85-094	279
Direct Observation System for Two-dimensional X-Ray Photoelectron Diffraction (XPED) Patterns	Eisaku NAKAMURA	85-096	280
Polarization-dependent S K-edge XANES for Sulfur on Nickel II. $(5\sqrt{3}\times 2)\text{S}/\text{Ni}(111)$ and $p(2\times 2)\text{S}/\text{Ni}(111)$	Yoshinori KITAJIMA	85-092	281
Surface EXAFS of $(5\sqrt{3}\times 2)\text{S}/\text{Ni}(111)$	Yoshinori KITAJIMA	85-092	282
Ru L-edge X-Ray Absorption Studies on $\text{Ru}_3(\text{CO})_{12}$ Adsorption and the Formation of $\text{Ru}_3\text{-Cu}$ Bimetallics on $\text{Cu}(111)$	T.K. SHAM	86-080	283
Surface EXAFS and XANES of S/Fe Systems I. Measurement of X-Ray Absorption Spectra of $c(2\times 2)\text{S}/\text{Fe}(100)$	Yoshinori KITAJIMA	86-142	284
Enhanced Killing on <u>E.Coli</u> and Bacteriophage by X-Rays at Resonance Energy of Phosphorus K-absorption Edge	Hiroshi MAEZAWA	86-101	285
Strand Breaks in PBR322 DNA Induced by Monoenergetic X-Rays around K-absorption Edge of Phosphorus	Kotaro HIEDA	86-098	286
Irradiation Effects of Monochromatic Soft X-Rays around K-shell Absorption Edge of Phosphorus on Yeast Cells	Katsumi KOBAYASHI	86-102	287

BL-11C

Piezoreflectivity of $\text{Na}^+ 2p$ Core Excitation in NaCl	Masatada YURI	86-071	288
--	---------------	--------	-----

The Optical Spectra of α -Al ₂ O ₃ Single Crystals in VUV Region	Tetsuhiko TOMIKI	86-070	289
VUV Spectra of CdIn ₂ S ₄ and Cd _x InGa _{3-x} S ₄ (x=1,2,3) Single Crystals	Takeo TAKIZAWA	87-110	290
VUV Reflection Spectra of Paratellurite, TeO ₂	Takeo TAKIZAWA	87-110	291
<u>BL-11D</u>			
Angle-resolved Photoemission Study of Oxygen Adsorption on Ni(110) at 300 K	Yasuo SAKISAKA	84-080	292
Angle-resolved Photoemission from the Ni(110)(1×2)-H Surface at 80 K	Yasuo SAKISAKA	84-080	293
Angle-resolved Photoemission Study of Oxygen Adsorption on Ni(110) at 80 K	Yasuo SAKISAKA	84-080	294
4f-electron Densities of States in Light Rare-earth Halides Studied by Resonant Photoemission Spectroscopy	Atsushi FUJIMORI	86-146	295
Photoelectron Spectra of La- and Ce-compounds	Takaaki HANYU	86-148	296
Near-normal Reflectance Spectra of CeO ₂	Tsuneaki MIYAHARA	85-131	297
Photoemission Studies of Neutron-irradiated Graphite	Kazutoshi YAGI	86-149	298
Angle-resolved Photoemission Study of Cr(110). Energy-band Dispersions and Magnetic-phase Transition	Yasuo SAKISAKA	86-150	299
Angle-resolved Photoemission Study of NO Chemisorption on Ag(111)	Kazuyuki EDAMOTO	86-151	300
Resonant Photoemission Study of High-Tc Superconductors	Takashi TAKAHASHI	87-U001	301
<u>BL-12A</u>			
Photodissociation of the Doubly Excited States of H ₂	Shin ARAI	85-089	302
Kinetic Energy Analysis of Photofragments Produced in Dissociative Photoionization of O ₂ in the VUV Region	Masatoshi UKAI	85-143	303
Vacuum-ultraviolet Absorption of Cl ₂ and HCl between 33 and 105 nm	Shin YOKOYAMA	86-072	304
Synchrotron Radiation-assisted Photochemical Etching of GaAs	Shingo TERAKADO		305
<u>BL-12B</u>			
Photoelectric Absorption Measurements in the Focal Scanning Mode of the 6VOPE Facility and Its Application to Krypton in the VUV Region	Kenji ITO	85-088	306
Absorption Spectrum of the Neon Atom in the Vacuum-ultraviolet Region	Kenji ITO	85-088	307
High-resolution Measurements of Photoabsorption Coefficients for Carbon Monoxide Absorption Bands between 94.0 nm and 100.4 nm	Kouichi YOSHINO	85-088	308
High Resolution Absorption Spectra of H ₂ O and D ₂ O the V.U.V Region	Yumio MORIOKA	85-088	309

BL-12C

Basic Characteristics of Microchannel Plates for Plasma X-Ray Diagnostics	Naohiro YAMAGUCHI	85-145	310
Deep Submicron Pattern Replication and Measurement of Temperature Rise Distribution for X-Ray Mask Membrane in SR Lithography	Ichiro MORI		311
A Method of Pattern Reduction in SR X-Ray Lithography	Shigeo SUZUKI		312

BL-14A

Crystal Structure Analysis of Pseudomonas Isoamylase	Kunio MIKI	85-114	313
Use of Apoenzyme Crystal in Structure Analysis of Serratia Protease	Yoshio KATSUYA	86-034	314
Intensity Measurements with Short Wave-length X-Rays; Structure Refinement of Ilmenite	Masataka OHGAKI	86-062	315
A Single Crystal Diffraction Study of the Natural Zeolite Cowlesite	Gilberto ARTIOLI	87-086	316
The Structural Study on the SMSI Catalysts by Means of the Polarized Total Reflectance Fluorescent EXAFS Method(2)	Kiyotaka ASAKURA	85-011	317
Measurement of a Cerium K-edge EXAFS Spectrum of Cerium Oxide	Yoshinori SATOW	85-020	318
Development of a PPAC and Construction of an ALCD	Hiroyuki TAKAHASHI	85-073	319

BL-14B

Dynamical Phenomena in Grazing-incidence X-Ray Diffraction by Perfect Crystals	Osami SAKATA	86-076	320
Angle-dispersive X-Ray Diffraction by Water Molecules	Hiroshi TAKEUCHI	86-125	321

BL-14C

Nuclear Excitation by Synchrotron Radiation	Takeshi MUKOYAMA	85-074	322
In Situ Observation of the Structure Change in Vacancy-rich TiO (x=0.84, 1.0, 1.25) at High Pressures and Temperatures	Toru FUJIMURA	85-081K	323
High Resolution Momentum Density Measurement for Silicon Using 29.5 keV Synchrotron Radiation	Fumitake ITOH	86-124	324

BL-15A

Time-resolved X-Ray Studies of the Aggregation of Bleached Rhodopsin	Toshiaki HAMANAKA	85-026	325
X-Ray Diffraction Studies of Glutaraldehyde and Triton X-100 Treated Purple Membrane during Its Photocycle	Tomoya URUGA	86-035	326
Development of Specimen Chamber for Light Irradiation at Low Temperature and Its Application to Bacteriorhodopsin Photocycle III	Fumio TOKUNAGA	85-028 87-036	327
X-Ray Diffraction of Bacteriorhodopsin with Nitrated Tyrosine Residues III	Fumio TOKUNAGA	85-029	328

Changes in the Equatorial Intensities on Activation of Overstretched Frog Skeletal Muscle	Naoto YAGI	85-030	329
An X-Ray Diffraction Study of Chemically Skinned Cardiac Muscle	Yasutake SAEKI	85-032 87-043	330
X-Ray Diffraction of Skeletal Muscle under the Inhibitory Action of 2,3-Butanedion-2-Monoxime	Keisuke HORIUTI	87-045	331
Effect of Slow Length Changes on the Equatorial X-Ray Diffraction Intensities of Frog Skeletal Muscle at Short and Long Sarcomere Lengths	Hiroyuki IWAMOTO	85-031	332
Use of Skeletal Muscle Fiber Bundle as a Material for Dynamic X-Ray Diffraction Studies	Hiroyuki IWAMOTO	87-044	333
Analysis of the Intensity Change of the Actin-based Layer Lines in the Two-dimensional X-Ray Diffraction Pattern from a Frog Skeletal Muscle during Isometric Contraction	Katsuzo WAKABAYASHI	85-042	334
Intensity Changes of the Second Actin Layer-line Reflection and the Equatorial Reflection at the High Radial Position of 0.21 nm^{-1} from Tetanized Frog Skeletal Muscles with Non-overlap Sarcomere Length	Katsuzo WAKABAYASHI	87-041	335
Intensity Change of the 7.2 nm Myosin Meridional Reflection from Tetanized Frog Skeletal Muscle during Sinusoidal Length Changes	Katsuzo WAKABAYASHI	86-036	336
Diffraction Studies of Muscle Contraction by Sinusoidal Length Change - Theoretical Model and Explanation of Experimental Results -	Toshio MITSUI	86-036	337
Small Angle X-Ray Diffraction of a Molluscan Smooth Muscle Contracting Tonically in Response to Acetylcholine	Yoshiko TAJIMA	86-038	338
Time-resolved Small-angle X-Ray Scattering Study of Tobacco Mosaic Virus Protein Association Induced by Salt Concentration Jump	Hideo INOUE	85-116	339
Conformational Change of Ovomacroglobulin Caused by Interaction with Chymotrypsin	Hideo ARAKAWA	85-117	340
Stopped-flow X-Ray Scattering Study VII. Dissociation of Hemocyanin from Limulus Polyhemus and Panulirus Japonicus	Yoshihiko IGARASHI	85-117	341
Slow Change of P_{β}' Structure after Temperature Jump across Main β Transition in Dimyristoylphosphatidylcholine	Morio AKIYAMA	86-037	342
Dynamical Structure Change during Reversion in Al-Zn Alloys	Kozo OSAMURA	86-065	343
Dynamical Structures during Decomposition in Al-Li Alloys	Tatsuo SATO	86-066	344
Time-resolved Small Angle X-Ray Scattering of Polyethylene under Stretching Process	Toshiro KOJIMA		345
Development of a Stretching Device of Synthetic Polymers for Time-resolved X-Ray Scattering	Toshiro KOJIMA		346
Imaging Analysis by Photoacoustic X-Ray Absorption Spectroscopy	Tsutomu MASUJIMA	86-020	347

X-Ray Photoacoustic Effect of Gas Phase	Tsutomu MASUJIMA	86-020	348
Photoacoustic Dosimetry (PAD) - Test of Metal Powder as Targets -	Masaharu HOSHI	86-020	349
Correlation Photoacoustic Measurement with Synchrotron Radiation as Exciting Source	Yoshinori SUGITANI	86-020	350
<u>BL-15B</u>			
Non-destructive Investigation of the Surface-damaged-layer of (Mn, Zn) Ferrite by X-Ray Diffraction near Absorption-edge	Yoshiro AKAGI	85-Y029	351
X-Ray Topographic and Goniometric Study of Lattice Mismatches in InAlAs Films on InP Substrates	Osamu NITTONO	86-129	352
Direct Observation of Lattice Defects in Solid Helium by SR X-Ray Topography	Hideji SUZUKI	86-131	353
Section Topography Using a High-order Reflection and Its Application	Yoshimitsu SUGITA	86-152	354
Generation of Lattice Defects in Ice at a Temperature Close to the Melting Point	Takeo HONDOH	87-095	355
Structural Study of GaAs/AlAs Superlattices	Susumu NANA0	86-130	356
X-Ray Parametric Frequency Conversion	Kazumichi NAMIKAWA	87-098	357
<u>BL-15C</u>			
X-Ray Topography of LEC GaAs Crystal (I)	Tomohisa KITANO		358
X-Ray Topography of LEC GaAs Crystal (II)	Tomohisa KITANO		359
Time-resolved X-Ray Measurement System for Studying the Structural Change under Laser Irradiation	Seiji KAWADO		360
Observation of Microdefects in a Thin Silicon Crystal by Means of Ultra-plane Wave Topography	Yoshinori CHIKAURA	85-118	361
<u>BL-16</u>			
A New Grazing Incidence Monochromator for Undulator Radiation, MMM(Muramatsu-Maezawa Monochromator)-22. (1) Design Concept	Hideki MAEZAWA	87-104	362
A New Grazing Incidence Monochromator for Undulator Radiation, MMM(Muramatsu-Maezawa Monochromator)-22. (2) Optical Designing	Yasuji MURAMATSU	87-104	363
A New Grazing Incidence Monochromator for Undulator Radiation, MMM(Muramatsu-Maezawa Monochromator)-22. (3) Mechanical Designing	Yasuji MURAMATSU	87-104	364
<u>AR</u>			
Measurements of Pressure Dependence of Debye Temperature of Aluminum	Akihito MATSUMURO	86-055	365
Structure of Liquid Gallium under Pressure	Kazuhiko TSUJI	87-094	366
Measurement of Ni ₂ SiO ₄ Olivine-Spinel Transformation Kinetics at High Pressure and Temperature	David C. RUBIE	87-102	367
Hydrostatic Compression of MgO-FeO to 6.2 GPa: X-Ray Measurement Using Synchrotron Radiation	M.H. MANGHNANI	86-041	368

High Pressure Generation with a Multiple Anvil System Using Sintered Diamond Anvils	Eiji OHTANI	86-121	369
Animal Experiments by K-edge Subtraction Angiography Using SR	Izumi ANNO	85-038	370
X-Ray K-edge Subtraction Television System	Kiwamu SUZUKI	87-046	371

「放射光利用研究」は、せいぜい「量子力学」の枠内にあり、もう全て解決済みのことの「重箱のすみ」をつついている……というような見解をお持ちの方は、以下の練習問題を試みていただきたい。

[練習問題]

量子力学の第1原理から、インフルエンザウイルスの原子構造を求め、それに効く薬の原子構造を決定せよ。

インフルエンザウイルスの原子構造は、実際に放射光を用いて決定されたのであり、「原理的に可能」であることと、「実際にできる」こととの違いは大きい。

物質の構造といっても、その形態は、結晶、非晶質、高分子、蛋白質等の巨大生体高分子、筋肉や生体膜等の生体物質、大きいものでは生物の心臓のまわりに血管の構造にまで及んでいる。また超高压下での構造や、極低温下での構造、表面、界面の原子構造、結晶格子欠陥等の二次的な構造も含まれる。

これらは、今流行の「機能性材料」や「新素材」を開発していく上で、必要不可欠な情報を提供する。この理由で、フォトンファクトリーには、4本の民間会社のビームライン(NTT, 日立, NEC, 富士通)が設置され、他にも、民間からの利用が多数ある。

X線回折によって、結晶構造を知ることは、LaueのX線回折の発見(1912年)以来、広く知られた技術であり、DNAの二重らせん構造もX線回折法によって見出されたことは余りに有名であろう。ここではX線回折による結晶構造解析方法の詳細を述べることはやめ(多分、毎週2時間の講義を10~12回続ける必要がある)、放射光の利用により、結晶構造解析の分野で、どの様な変化がおこりつつあるかを簡単に紹介することに留めたいと思う。

(A)測定の高速度

非常に強力な放射光を用いると、あたり前の話ではあるが測定時間が短縮される。これは、不安定な試料

の構造決定には、非常に重要である。また筋せんいの構造等の動的な観察の可能性を展いてきた。

(B)異常分散の利用による位相決定

原子によるX線の散乱幅巾は、吸収端の近傍で大きく変化する。放射光は原理的に白色光であるから、吸収端の近くの波長でチューンすることができる。普通のX線回折法では、強度の測定をしているので、位相情報は失われてしまうが、異なる波長での強度測定から、位相情報を得ることができる。

(C)試料の微小化

いろいろな結晶の中には、大きな単結晶の育成が困難なものも多い。このような場合、回折強度は体積に比例するので、従来のX線源では、十分な信号が得られない場合が多かったが、入射強度が十分に大きければ、微小単結晶を用いても構造決定が可能である。現在放射光を用いて、Mmオーダーの大きさの結晶までの構造回折が可能になっている。

(D)表面構造、界面構造

(C)と同様に、二次元的な構造(体積は非常に小さい)も、X線による構造解析が可能になってきた。特に表面構造に関しては、放射光出現以前は、電子線、イオンビーム等の粒子線回折を用いて研究が進めてきたが、放射光X線によるデータは、X線が、粒子線に比べて、物質との相互作用が非常に小さいことから、非常に解釈の容易なデータを与え、構造決定のあいまいさが減少する。

(E)磁気構造

放射光の出現以前は、磁気構造解析は中性子が、独走状態にあつたが、電磁波とスピンの非常に弱い相互作用であっても、入射強度が、「べらぼう」になると、みえてくる。この場合X線は中性子にくらべて、高い運動量分解能が得られるので、高精度の磁気構造解析が可能になる。

(F)粉末結晶による構造決定

平行性の良い放射光X線を用いると、単結晶が得られない試料に関しても、高精度の粉末回折プロフィールが得られる。これからの構造決定が進められている。他にも、ある原子のまわりの局所的構造を解析するた

めの、EXAFS等は、放射光の波長連続性の利用によって、飛躍的に発展した分野であるが、現在放射光で何ができるかという話は、このくらいにしておこう。

8. おわりに

我が国に於けるX線領域での放射光利用が、本格的にスタートして5年経ち、その間フォトン・ファクトリーは他に例をみない、安定な運転を続けている。これは、全く、ライナック、光源リング、測定器各々の

スタッフ及び共同利用実験ユーザーの努力の結果であるが、フォトン・ファクトリー計画の成果をふまえて、広島大学、東北大学、九州大学等で、シンクロトロン放射光施設を作る計画が進められており、また科学技術庁でも大型放射光施設計画が進められている。更に民間でも、既にNTTがX線リソグラフィ用小型リングの建設を行なっているし、放射光用加速器を売り出した会社もある。

昨今、諸外国(とくにアメリカ)との間で、技術摩擦という言葉が耳にするが、PFによって世界一線級と並んだ日本の放射光科学は、次の時代には、世界をリードしてみたいものである。