

放射光の利用について

フォトン・ファクトリーの現状と海外の動向

高工研 放射光実験施設 高良和武

1 はじめに

放射光実験施設(フォトン・ファクトリー)は、極紫外線からX線までのシンクロトン放射(放射光)を自然科学の広汎な分野の研究に使うための専用施設として、昭和53年度から建設を開始しました。その基幹設備である2.5 GeVの電子線型加速器と2.5 GeVの電子貯蔵リングは、4年計画で建設が行われましたが、最終年度末にあたる今年の3月には、設備の据え付けを終えただけでなく、2.5 GeVの電子の線型加速器による加速と、貯蔵リングへの貯めこみ、さらに放射光の取り出しに成功、それを用いてX線回折像のテレビ撮影、X線吸収曲線の迅速測定など予備実験も行いました。6~7月の第2回の運転では、リニャック、ストレージ・リングの試運転も順調に進み、終りには、2.5 GeV、100 mAで放射光使用も可能になり、4本の基幹チャンネル、10本のブランチ・ビーム・ライン、やく15台の分光、回折などの大型実験装置の設置、調整が行われ、その間に、本格的な研究結果もいくつか得られました。短い期間で建設を終え、非常に早さで装置の立ち上げに成功したことは、海外で大きな反響をよんでいます。これも線型加速器の優秀な性能によるところが非常に大きく、えを實現された所内のスタッフとそれを助けて下さった所外の研究者、メーカーの方々の努力に、深く感謝するとともに、また高性能の線型加速器を可能にした日本の線型加速器関係の方々のレベルの高さに敬意を表したいと思います。

さて、放射光を使って、どのような研究をやろうとしているのか、話すようにということですが、フォトン・ファクトリーの測定器系の現状と、放射光利用に関する最近の動向を、少しばかり話したいと思います。その前に順序として、放射光の性質、それを利用した研究についての大まかな説明をすることにします。

2 放射光の性質

光速に近い速度で運動する電子が、その運動方向を変えるとき、軌道の切線方向に電磁波を放出する。この現象は1940年代に観測され、シンクロトン(軌道)放射(Synchrotron (Orbital) Radiation)とよばれる。わけわけは、放射光とよんでいる。(わが国では、またSOR光ともよばれる。)

エネルギーE[GeV]の電子が、軌道に垂直な磁場B[G]により、円弧状の軌

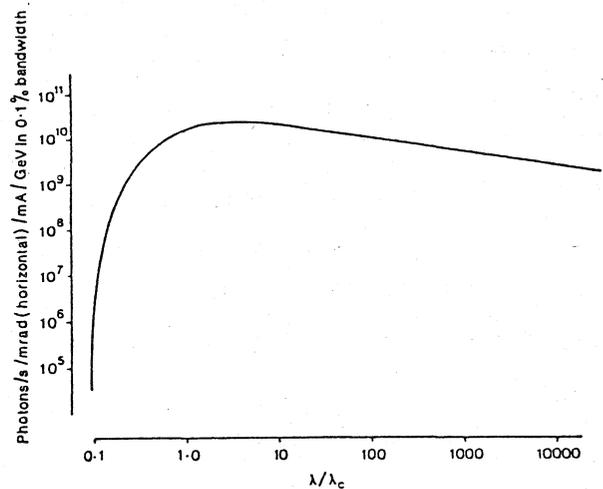


図1 放射光のスペクトル

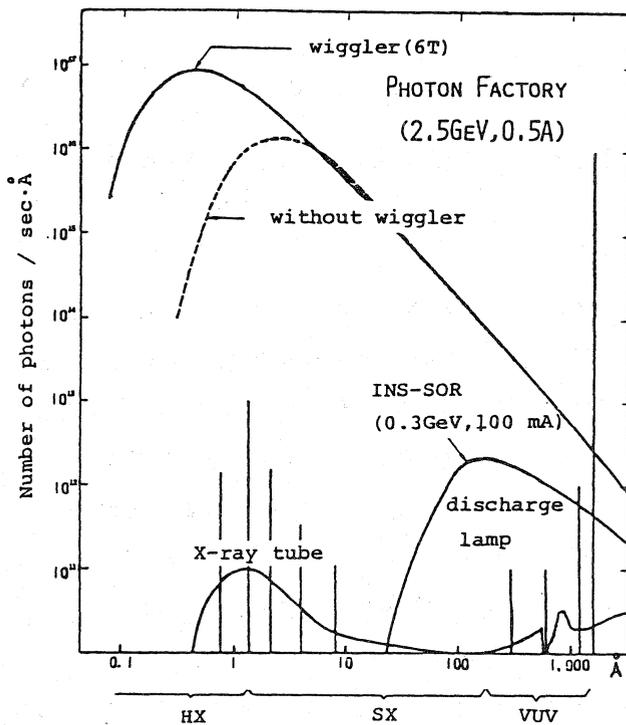


図2 放射光と従来の光源による光のスペクトル

なお、フォトンエネルギー E [eV] と波長 λ [Å] の間には次の関係がある。

$$E = 12.4 / \lambda \quad (6)$$

図1には、 $\Delta\lambda/\lambda = 1\%$ あたりのスペクトルを示す。横軸は λ_c でノーマライズしてある。 λ_c より長い方では、フォトン数は、ゆるやかに減少し、可視光さらに赤外線までひろがる。 λ_c より短い方では、急速に減少し、 $\lambda = \lambda_c/3$ の所で、 λ_c に対する値の $\sim 10\%$ になる。

図2には、フォトン・ファクトリーで期待される放射光のスペクトルと、従来の方法で得られる最強のスペクトルとが与えられている。図1と違って、縦軸は Å^{-1} になっている。従って長波長側で、カーブの落ちかたが急になる。後者のスペクトルは、さめめて定性的なものであるが、放射光の強さの感じを掴んでいただけれると思う。X線領域の場合、Cu $K\alpha$ に対し、10 kW (50 kV 200 mA) のX線管で得られる強度が示してある。放射光の場合、 $\sim 200 \text{ Å}$ に必通する。連続(白色)X線に対しては、 $2 \times 10^4 \text{ Å}$ にも必通する。なお、表には、東大物性研のINS-SORのスペクトルも示してある。(ただし、最近では0.4 GeV, 300 mA (最高500 mA) で運転されている。)

放射光の最大の特徴の一つは、強度であるが、連続スペクトルであることも極めて重要である。一つの線源で、このように広い波長(エネルギー)領域をカバーするものは、ほかにはない。とくに、 $1000 \sim 10 \text{ Å}$ の極紫外軟X線の領域は、これまで実用的な線源がなかった。

放射光のスペクトルは、黒体放射のそれと似ている。後者の場合、 $\lambda_p T = \sim 4 \times 10^7$ [Å K] の関係があるから、 1 Å のピークをもつ放射光は $\sim 4 \times 10^7 \text{ K}$ の温度からの黒体放射に相当している。

放射光は軌道の切線方向を軸とする狭い半頂角の内錐内に集中し、エネルギーの半分は λ_c 附近

道に沿って進むとき、その曲率半径 R [m] は

$$R = (10^8/3) (E/B) \quad (1)$$

で与えられる。電子1個あたり単位時間に放出される放射光の波長分布を光子数で表わすと、

$$N(\lambda) = 1.44 \times 10^{-5} \frac{\gamma^4}{R^2} \frac{G(\gamma)}{\gamma} \quad (2)$$

[photon/Å - sec electron]

の形になる。ここで

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

放射光の11°ワ-は、 $\lambda > \lambda_c$ に対する部分と $\lambda < \lambda_c$ の部分とほぼ等しい。

$$G(\gamma) = \gamma^2 \int_{\gamma}^{\infty} K_{5/3}(\gamma) d\gamma \quad (4)$$

$$\gamma = \lambda_c / \lambda$$

で、 $K_{5/3}(\gamma)$ は変形された第2種ベッセル函数、 λ_c は臨界波長とよばれる量で

$$\lambda_c = 5.59 R / E^2 = 186 / BE^2 \quad (5)$$

で与えられる。

で

$$\theta = mc^2/E = \frac{1}{\gamma} = 0.51 \times 10^{-3}/E \text{ [rad]} \quad (7)$$

に集中する。たとえば $E = 2.5 \text{ GeV}$ のとき、 $\theta = 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$ (40秒)である。指向性は、ふっ
うのレーザーよりすぐれている。長い波長に対しては θ は大きくなる。実際には、円軌道の一定の長
さの部分から扇状に広がったビームが取りだされる。

放射光は軌道面では、完全に偏光しており、その電界ベクトルは軌道面に平行である。軌道面から
上下に区れると、軌道面に直角な成分も現われ、楕円偏光になる。

一般に、ストレージ・リング内では、電子はバンク(塊)となって周回しており、その長さは、
3~30 cmで、観測者からみると、0.1~1 nsのパルス状の光として見える。このバンクがリング
の軌道面に ~ 300 個まで等間隔に並べることができれば、そのうちのある個数だけ、あるいは1個だ
けを回すこともできる。フォトン・ファクトリーの場合、全周180 mであるから、バンクが一個の
とき、0.6 μs ごとに放射光がくることになる。

放射光は超高真空の中を走る電子から放出され、物質が介在しないので、装置や試料が汚染されな
い。またスペクトルにも不純物によるものが、混ざらず、きれいである。

3. 放射光の利用

極紫外から硬X線までの領域($10 \sim 10^5 \text{ eV}$, $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$)は、エネルギーとしては、物質内のほと
んどすべての核外電子(軽い原子核のまわりの電子,自由電子,価電子を除く。)の束縛エネルギーをカバ
ーしており、電子のエネルギー状態を研究するのに適している。また $\sim 0.1 \text{ \AA}$ の波長は、物質内の
核外電子の空間分布(そのひろがり)あるいは原子の空間的配列を研究するのに適して
いる。電子のエネルギー状態(あるいは準位)に関する情報は、いわゆる分光法(Spectroscopy)
により、空間分布に関する情報は回折法(diffraction)により得られるが、運動量に関する情報
も、二次電子の分光あるいは散乱現象の測定により得られる。放射光は、電子とのいろいろな種類の
相互作用を通過して、物質の原子、分子レベルにおける構造と機能を研究する最もオーソドックスある
いは有効な方法といえることができる。(電子陽子、重イオン、中性子 などにくらべて、電荷がないとか
同じ程度のエネルギーや波長に対して運動量が小さいというような特徴があり、原子を叩き出すよう
な効果がなく、いわゆる非破壊法としてすぐれている。)

とくに、軟X線($\sim 20 \text{ \AA} \sim 200 \text{ \AA}$)の領域は、これまで実用的な線源がなかっただけでなく、モノク
ロメーターも、従来の回折格子あるいは結晶モノクロメーターでは間に合わず、これまで、研究が、
ほとんど行われていなかった。この領域は、物質、とくに生体物質(Cの励起波長は $\sim 40 \text{ \AA}$)との相
互作用が大きく、非常に重要で、今後の発展が期待される。軟X線は、核融合用のプラズマ、超高温
の天体などでも発生し、それらを研究するための最有力な手段でもある。

また、放射光による核外電子の励起に伴い、物質内の原子の結合状態が変化する効果は、放射線化
学、損傷などとして重要な研究分野を作っている。その他、X線顕微鏡、X線マイクロソグラフィ、
超微細加工、X線診断などの応用分野も発展しつつある。

核外電子でなく、原子核を励起する効果を利用する研究もある。いわゆるメスバウアー線として、超単色の放射光を作り出す、あるいはそれを干渉させて指向性のすぐれたメスバウアー線を作るという計画もある。

放射光の分野は、物理、化学、生物学などの理学から、医学、工学などと広がり、また、対象も、原子、分子、液体、非晶質、結晶、生体物質表面、薄膜、微粒子、プラズマ、天体などと多様である。ここでは、物質との相互作用、あるいは研究方法により大きく分けて、最近の動向を二三のトピックについて述べる。

(i) 光電吸収(分光法)

光電吸収により、電子状態の励起あるいは原子のイオン化が起り、緩和過程(二次過程)として光(蛍光)、電子の放出が起る。極紫外における吸収、反射スペクトルの測定が、初期には、専ら行われたが、この数年間、光電子のエネルギー分析(光電子分光)が、原子、分子、さらに固体について盛に行われるようになった。さらに光電子の角度依存性も測定することにより、試料内の電子のエネルギー状態だけでなく、運動量の情報も得られ、いわゆる分散関係が分かるようになった。原子、分子の気体、純粋な金属やイオン結晶などの固体の表面状態の研究のほか、最近ではまたイオン打ちこめを行った半導体(LSI素子)の状態を μ 程度の空間分解能で測定することも試みられている。また、光電子の回折現象の測定、偏光した光子による、試料(下地のけならず吸着分子など)の対称性あるいは電子のスピン状態の研究も可能になってきた。

また緩和過程の時間的解析も行われるようになり、 μ あるいはそれ以下の分解能での測定が可能になった。ある種の生体物質(蛋白質)では、吸収された光子のエネルギーは、まず原子の運動として拡散した後、発光するという新しい緩和過程も観測されている。

この数年、X線の吸収端側の短波長側の数eVの領域における吸収曲線の微細構造EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure)の研究が非常に盛になってきた。この微細構造は、吸収原子から叩き出された電子波と、隣接原子の電子分布との干渉効果によるもので、この構造を解析(フーリエ分析)することにより、吸収原子のまわりの原子の配位(距離と数)が分かる。従来のX線管では、10時間以上かかったものが、20分ぐらいで測定できる。非晶質、微粒子、溶液、固体表面への分子の吸着状態、触媒、生体高分子内の金属のまわりの状態(ヘモグロビンのFe原子のまわりOの状態)合金の析出などの研究に利用されつつある。

また最近では吸収に伴って起る二次電子の測定を行い、表面状態の研究(SEXAFS)が盛になりつつある。

EXAFSのための新しい光学系として、湾曲モノクロメーターを用いる方法。(Dispersive EXAFS)では、測定時間は、1~2秒(写真乾板)、あるいは、0.1~0.01秒(一次元検出器)と短縮される。この方法は、われわれが提案し、松下(高工研)が、スタンフォードでの協同研究で之を確めた。その後、アメリカ、フランス、イギリスでも研究が行われている。動的過程の研究、低濃度の溶液などの研究に威力を発揮するものと思われる。

蛍光X線は、原子の内殻の電子の励起に伴い放出されるが、そのスペクトルは一般に簡単で、その波長から元素の種類を決めることができるので、従来のX線管を使って、これまでも非破壊的に元素

分析法として、産業界などで広く使われてきた。放射光を用い、その検出感度をあげることができ、 p や b 以下の量も検出できる。原子吸光法、放射化法などと違って、軽い元素を除けば、ほとんどすべての元素に適用できる。試料を破壊することもなく、超微量分析の標準的方法として、公害物質の測定などに重用されると思われる。

(ii) 散乱 回折

X線回折は、物質内の原子配列を研究する主要手段として、長い歴史をもつが、放射光の強度および連続スペクトル（波長可変性）などを利用して、画期的な発展が起りつつある。

巨大蛋白（分子量数万～数十万）の構造解析、長周期構造（数石 \AA ）の生体物質（筋肉など）の構造の動的研究、超高压、極低温など極端条件下の構造変化（相転移）など同様の構造の解析のほか、周期構造の乱れ（格子欠陥）を研究する方法として、散漫散乱の解析や、回折トポグラフィー角度の超精密測定などがある。

筋肉の収縮過程を 1ms の時間分解能で測定することが行われ、分子レベルでのメカニズムの解明が行われつつある。

トポグラフィーでは、磁性体の分域構造の動的研究、誘電体における弾性波の観測（波面の格子欠陥による変化）など、注目すべき成果が最近得られている。

(iii) 放射線効果

極紫外～軟X線領域の放射線化学、極紫外～X線領域の生体損傷のDNAあるいは分子レベルでの研究などが始まりつつある。とくに後者については、わが国の研究グループが先駆的な研究を行いつつある。

半導体のエピタキシャル成長を熱処理でなく、放射光照射により行う可能性（レーザー・アンニリングに対応）も最近議論されている。

(iv) その他（サブミクロン加工 X線顕微鏡など）

写真乾板（AgBr乳剤）にかわる高分解能の感光剤として有機物質（PMAなど）を用い、軟X線で露光する撮影法が進展しつつある。分解能は、現在 0.01μ 程度である。超LSI素子の回路焼き付け、サブミクロンの加工（回折格子、分子フィルター）などに利用されようとしている。

$\sim 40\text{\AA}$ の波長のX線はC原子に吸収されるが、 H_2O 分子は透過するので、生体試料を水を含んだままの状態で見ることが出来る。電顕にくらべ分解能は劣るが水分を含んだままでも厚い試料が可能になる。

最近 血管にIあるいはBrを注入してコントラストの高い血管のX線像を撮影する方法がふつうのX線でも実用になってきているが、放射光を用いる方法が注目されている。吸収端の両側の波長の単色光で2枚の像をとり、コンピュータによる画像処理を行えば、鮮明な血管像だけが得られる。ソ連およびアメリカで始められた。

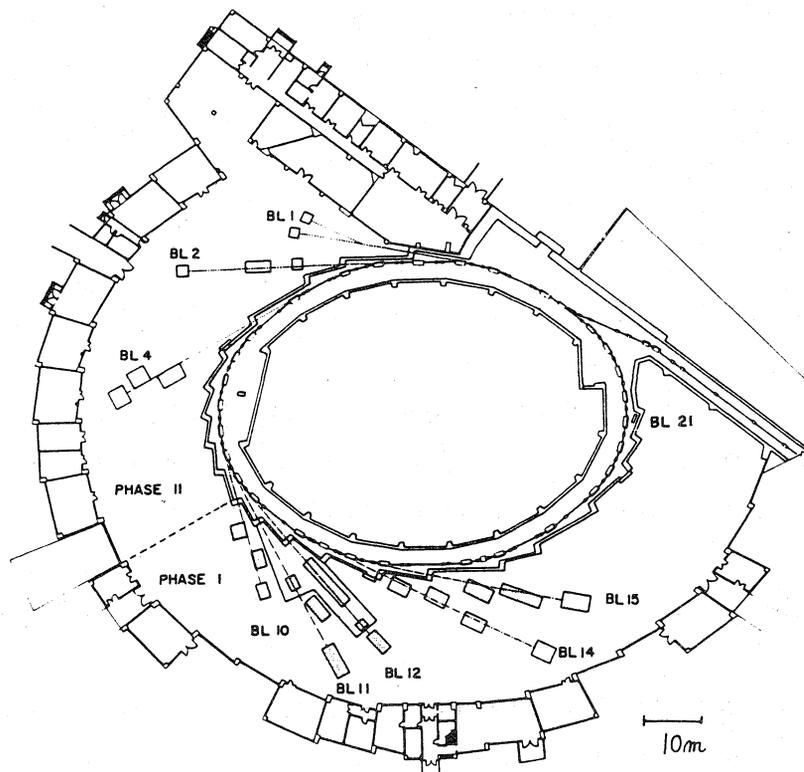


図3. 光源棟とビーム・ライン

実験ホールの面積は、第1期 1750 m²、第2期 1750 m²、合計 4300 m² である。

実験ホールを、取りまく側室は、試料準備、工作用などのほか、

機械室、ヘリウム回収室などにあてられる。

上部の部屋は、下の方はコントロール・ルームで、マイクロリング・スリープで、上の方は生物試料準備室で、放射性同位元素も、将来利用できるように設計されている。

4 フォトン・ファクトリーの現状

図3に、光源棟におけるビーム・ラインと測定装置の配置を示す。第一期計画では、下半部の実験ホールが作られ、第二期計画で左上の部分が拡張された(57年7月)。

放射光の取り出し口としては、24個が用意されている。うち20個は偏向磁場の部分からの放射光用で、4個は直線部におかれるウイグラーまたはアンジュレーターからの放射光用である。それ以外の基幹チャンネルは、3~4本のブランチ・ビーム・ラインに分岐される。

現在 BL 10, 11, 12, 15 が整備されている。BL 10, 15 は X線用、BL 11, 12 は極紫外・軟 X線用である。本年度中(58年3月まで)に、5本の基幹チャンネルが整備され、59, 60年度に、さらに2本づつ、合計15本の基幹チャンネルが整備される予定である。

大型の分光および回折装置が10数台製作されているが、X線の場合、ビーム・ラインの数より多くの装置が準備されており、1つのビーム・ラインを複数の装置で順番で使うようになっている。6~7月のサイクルでは、次のように装置の設置・整備が行われ、またそれらを利用していろいろの予備実験が行われた。EXAFSや、極低温の相転移のトポグラフィなど、本格的な研究成果も、いくつか得られた。〔〕内は、実験の種類

10A: 4軸自動X線回折装置〔鉱物、蛋白質、放射線生物等〕 10B: EXAFS装置〔高圧X線回折〕 10C: 収束単色X線光学系

11A: 軟X線分光装置Ⅰ(回折格子) 11B: 軟X線分光装置Ⅱ(結晶) 11C: 極紫外固体分光

12A: 極紫外紫外分光装置 15A₁: X線小角散乱装置〔筋肉 酵素〕 15A₂: 紫外X線分析
 15B₁: 液体液体回折装置 気体回折装置 X線干渉計 低温X線回折装置
 15B₂: 高速X線トポグラフィ装置 15C: 高速EXAFS 精密X線光学装置

さらに 58年 3月までに 6.5メートル分光装置、4軸自動回折装置、光電子分光装置などの製作 および上記の装置の試料まわりの装置、データ-処理系などの整備が行われる予定である。

ウィグラーおよびアンジュレーター

ストレージ・リングの電子軌道の直線部に、特殊な磁場を加えて 電子の軌道をうねらせ、放射光のスペクトルを短波長側に伸ばしたり(ウィグラー)、あるいは、多重回うねらせて 何箇所から来る放射光の干渉効果により 単色の強いビーム(アンジュレーター)を作ることができる。フォトンファクトリーでも、ウィグラー(超伝導マグネットによる $B=6T$) および アンジュレーター($d=6cm$, 59周期)が設備され 来年春からはビームが得られるはずである。前者のスペクトルは図2に、後者のものは図5に与えてある。なお、ウィグラーは、電子の軌道を垂直面内でうねらせるもので、放射光の電界ベクトルが鉛直になり、X線回折の実験で、鉛直軸を含む格子面に対し 偏り因子の補正が不要で、多軸の超精密回折実験などに便利である。

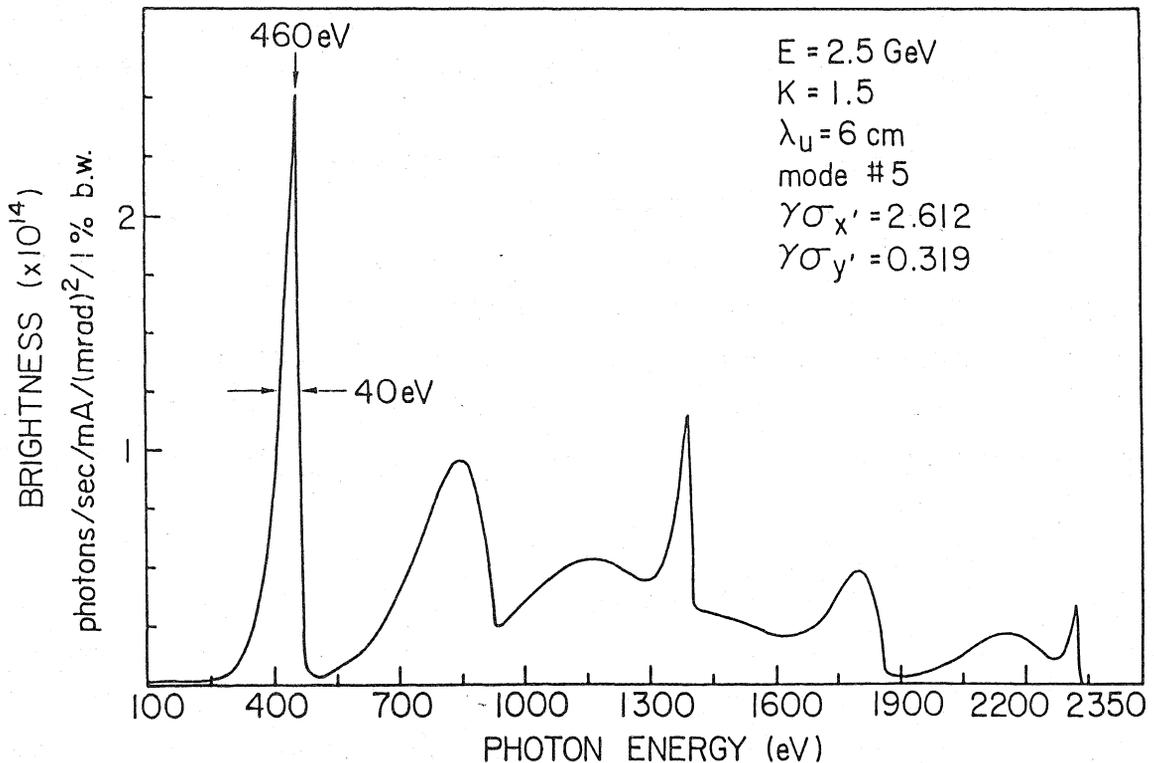


図4. アンジュレーターによる放射光のスペクトル
 (北村(高工研)の計算による)

共同利用について

上述の装置は、それぞれのワーキング・グループにより、高工研の予算で作られたものであるが、装置の整備が終ったものから順次(58年春以降)一般のユーザーの共同利用に公開される予定である。大学関係だけでなく、他の官公庁(工技院, 科技庁, 電々公社, NHKなど)および民間の研究所の研究者にも公開される。

大型の測定装置さらにビーム・ラインの製作設置が、高工研以外の予算で実施あるいは計画されている。文部省の特定研究費などによるもののほかに、通産省の予算によるものなどがある。とくに電々公社は高エネルギー研との協同研究として、来年3月までに基幹チャンネルおよび一本のビームラインを設置して、それに続いて測定装置, クリーン・ルームの整備, X線マイクロ・リソグラフィ 表面評価 加工に関する基礎研究を行う予定である。

5 おわりに

放射光を利用した研究の発展に対応して、線源としての加速器の進歩、発展も目ざましい。最近の動向についていくつかのトピックスをあげてみよう。

- (i) より強い より明るい光源を目指して (SPEAR (スタンフォード), VEP II (ボンビルスク PF)) より短い波長を目指してウィグラーが 既成の装置に挿入され、あるいはされつつある。(SRS (ダレスベリー), NSLS-UV (ブルク・ヘブン) PF)。新しく建設の始まった Super ACC は undulator 中心のリング (1 GeV) であり、計画中のヨーロッパ連合の (ESRF) のリング (5 GeV) では undulator, wiggler と多極 wiggler をユニットにしたリングが 計画されている。
- (ii) この1~2年に、中国、印度、台湾、ブラジルなどの中進国でも、建設が始められ、あるいは始められようとしている。いずれも 1 GeV 程度 (印度は ~ 2 GeV) で アンジュレーター、超伝導ウィグラーが 初めから設置されるであろう。ウィグラーにより 1° 近くの放射光が利用できる、X線回折の実験が可能になる。この方が 建設費、維持費が安くなる。
- (iii) 一方 より短波長の放射光のために より高 エネルギーのリングの要求がある。2~2.5 GeV クラスのものは、専用器が作られ (SRS (ダレスベリー) PF NSLS-X (ブルクヘブン)) 3.5 GeV は 高エネルギー物理学と共用。(SPEAR (スタンフォード), DESY (ハンブルグ)) で 5~7 GeV は 寄生モードで 使用されている。

上述のヨーロッパ連合が計画中の 5 GeV リングは 専用器である。

また、測定系の進歩についても、あまり目立たないが 着実な進歩がある。

- (iv) 軟X線領域 ($3 \sim 50^\circ$) のモノクロメーターとして、多重薄膜、ホログラフィによる回折格子 安定な長周期の人工結晶などがある。
- (v) また データ処理技術の導入により、新しい研究分野の展開が 試みられている。ストロボ方式による高時間分解測定 ($10 \mu s \sim 1 ms$)、サブ μs の過渡現象、イメージ・プロセッシングによる像の分解能向上などである。

(vi) 放射光実験施設でも、トリスタン計画の蓄積リング(8 GeV)の利用が考えられており、γ線、アンジュレーターによる単色のX線が期待されている。またリニアックの1 GeVの取り出し口を利用しアンジュレーターに重点をおいた、低エミッタンスのリングについて、技術的検討が始まった。

(vii) リニアックの高い技術の利用に対しても、高い期待がかけられている。上述のマイクロウェーブによるアンジュレーターのほかに、高エネルギー電子とくに陽電子による結晶のチャネリングを用いた放射光発生、超高圧電(5 MV以上)などである。

(viii) 1980年代の後半、1990年代の前半にかけて、放射光科学は、ますます発展するであろう。高エネルギー物理学研究所は、高性能のリニアック、余裕のあるスペースをもったストレージ・リング、トリスタン計画のリングなどをもち、海外の諸研究所より有利な状況にある。国際競争の先頭に立ち、国際的研究の中心になることを期待してまいらる。