新しいX線源としてのシンクロトロン放射

Synchrotron radiation as a new source of X-ray

竹内 慶夫 (Takéuchi, Yoshio)*

1. 緒 言

——SOR 光は地学と縁が深い——

結晶の構造中における原子配列の不整が、その逆空間に diffuse した極めて弱い反射を与える場合、あるいは構造の特徴から単結晶回折パターンを与える部分の体積が極めて小さいもの、また極めて弱い 'extra' な反射を与える超構造など、逆空間における弱い強度の測定にわれわれはしばしば悩まされる。それらの強度値を精確に知ることによりはじめて、問題とする結晶の本質が解明出来るわけであるが、現在一般に用いられている X線源では強度の点で不十分であるため、解決し得ない類の問題が少なくない。したがって、X線の回折現象を用いて鉱物の研究をする場合おのずから一つの限界が存在することになる。この限界を打破するには、何らかの新しい X線源を探さなくてはならない。

強力な X線発生装置の開発は事実古くから回折結晶学の分野での念願であり、その努力の一つの成果として回転対陰極を用いた発生装置が出現している。しかし、これにしても得られる X線の強度は、一般の X線管から得られるのに比べて桁違いに強いと言はれるには程遠く、上に述べたような結晶学上の問題を根本的に解決し得るようなものではない。此の種の装置を更にパワーアップすることも考えられるが、一研究室で維持するには困難な程に装置がぼう大となり、その反面得られる X線の強度は期待程ではない。文字通り超強力であり、しかも平行性もすぐれているような新しい X線源は無いものであろうか？ この疑問、および切実な要望に答えて現在脚光を浴びるに至ったのがシンクロトロン軌道放射 (Synchrotron Orbit Radiarion) の機構

---

* 東京大学理学部鉱物学教室

によって得られるX線、いわゆる略してSOR、あるいはSR (Synchrotron Radiation) といわれる電磁波である。その強度は驚異的であり、また平行性にすぐれており、正に理想的なX線源と言ってよい。

シンクロトロンと言うと原子核物理学者の専有物であり、他の分野には全く無関係のように思われがちであった。事実、核物理学以外の分野でSOR光が始めて注目され使用されたのは僅か10年程前のことに過ぎない。しかし、鉱物の研究から地球の成因、ひいては宇宙科学まで論じようという勇ましい鉱物学者達にとっては、この種の電磁波の存在は極めてなじみ深い筈である。超新星として知られているカニ星雲から放射されている強いX線がSOR光であることは天文学(地学?)の常識であり、また銀河系に半径16光年くらいの強いSOR光を出す中心核のあることなども知られている。

2. シンクロトロン放射

原 理

SORの発生原理を理解するには、まず一つのfreeな電子によるX線の散乱を思い出すとよい。X線結晶学でなじみ深いこの現象は古典電磁気学の理論により次のように表現されている。即ち、電子の荷電を e 、その質量を m_0 とすると、振幅 $\mathcal{A}_0$ の電場に電子が置かれた場合、距離 γ の所に与える散乱波の振幅は

$$\mathcal{A}_0 \frac{e^2}{m_0 c^2} \frac{1}{\gamma} \sin \chi \quad \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。この表現の中で c は光速である。重要なのは角度 χ は散乱波の方向と、電子が置かれた電場、即ち加速度、の方向とのなす角であるという点である。距離 γ の所で観測される散乱波の強度は、上式の2乗に相当するから、電子が受ける加速度の方向に対して、強度分布は $\sin^2 \chi$ のファクターで変化することになる。言い変えると、加速度の方向ではゼロであり、それと直交する方向で最大となる。以上はX線の電場によって電子が加速度を受ける場合の話で、それによって生じるX線(散乱波)の強度は勿論極めて微弱なものである。

一般に、静止している電子が加速度 α を受けるとき、瞬間的に放射される電磁波のパワー P (1秒あたりの放射エネルギー)は、次のLarmorの式

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \alpha^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

で与えられるように加速度の2乗に比例する。従って、放射波のパワーを上げるには加速度を増さなくてはならない。これに適した方法は外磁場を設けて電子に円運動さすことである。円運動の場合、中心に向ってたえず加速度が作用し、それは電子のエネルギーと磁場の強さによって極めて強大なものにすることが出来る。この際、電子はたえず電磁波を放射しながら円周をまわることになり、その放射の様子はすでに述べた理由により円の半径に垂直で円に接する面内で振幅が最大となり動径方向（加速度の方向）でゼロとなる（第1図a）。

この関係は電子の速度が光速より十分小さな場合で、もし電子の速度を光速に近づけ実験室で電磁波の放射の様子を観察すると、相対論効果のため、放射の状況は極端な変形をうけて、第1図bのように、電子の進行方向に向い、円軌道に接する方向に鋭く集中されるようになる。このような相対論的条件下では、放射波のパワーは(2)の代りに

$$\frac{2}{3} \frac{ec^2}{R^2} \left(\frac{E}{m_0c^2} \right)^4 \quad \dots\dots\dots(3)$$

第1図 (Marr, 1974)

で近似的に表現され、 E (電子の全エネルギー) の4乗に比例してくる (E は $\text{GeV}=10^9\text{eV}$ であらわされる)。ここに R は円の軌道半径 (m)、 m_0c^2 は静止している電子のエネルギーで約 0.5 MeV の値を持つ。また、放射波の鋭さは、円軌道面で接線方向を軸とする半頂角 $\theta \approx m_0c^2/E$ の円錐で与えられ、有効強度はこのごく狭い円錐内に集中される。高エネルギーシンクロトロンから放射される電磁波の鋭さは上記の式からも分るようにレーザー光に匹敵することになる。これがシンクロトロン軌道放射光 (SOR 光) と呼ばれるものである。この際の波長分布は連続スペクトルである (最大強度を持つ波長を λ_p であらわす)。

第2図はそのような連続スペクトルの例で、これは NINA (英国) ($E=5.2\text{ GeV}$, $B^*=7.5\text{ K gauss}$) の場合である。 $E=5\text{ GeV}$ の時、 $\lambda_p < 1\text{ \AA}$ である

第2図 (Marr, 1974)

* エネルギー E (GeV) の電子が磁場 B (K gauss) の下で円運動する時、円の半径 R (m) との間には次の関係がある。

$$R = \frac{E}{B} \cdot \frac{10^2}{3}$$

ことがわかる。他の計算例では $E=2.5\text{ GeV}$ の時、 $B=10\text{ K gauss}$ で $\lambda_p=2.27\text{ \AA}$ 、 60 K gauss で $0.378\text{ \AA}$ となる。

装 置

電子シンクロトロンで電子を加速するには、電子銃から出る熱電子をパルス電場で引き出し、これをライナック（線型加速器）に打ち込んで、あらかじめ $10\sim 100\text{ MeV}$ に加速したのち、シンクロトロンの電磁石の間に打込むということをする。大出力の高周波による加速と場磁の増大によって、電子は一定の軌道上を運動しながら加速され続け次第にエネルギーを増す。与えられたシンクロトロンの磁場の値が最高値になった所で、高周波加速を打ち切り電子を外にとり出して原子核の実験を行う。高エネルギー物理学では電子シンクロトロンがこのように用いられることが多いから、そのシンクロトロンで得られる最高エネルギーの SOR を利用しうる時間は短時間にすぎない。また、シンクロトロンの加速の性格上 SOR は安定でない。安定な SOR を得るためにはストレージリングを用いる。これはシンクロトロンで得られた最高エネルギーの電子ビームを一定の軌道に打込み、一定のエネルギーでまわし続ける装置である。SOR を発生することによって電子はエネルギーを失なうから、高周波空洞を通して、その分だけ補給するようにされている。軌道内に残留ガスがあれば衝突によっても電子はエネルギーを失なうから、軌道内は高真空に保たねばならない。 10^{-9} Torr 程度ならば一回の打込みで10時間余りの実験が出来る。打込む電子はシンクロトロンによらず、ライナックを大型にして直接これからとり出すことも出来る。(第3図)。

具体的には、わが国で計画されているストレージリングの規模はその円の部分で半径約 26 m 、電子エネルギーは 2.5 GeV である。軌道の接線の方に $20\sim 30\text{ m}$ 位の長さのビームチャネルを各所に設けて SOR 光を取り出し、夫々の先に実験所を建設して、夫々の分野の実験を行うことになる。

特 徴

現在一般に回折用に用いられている X 線にくらべて SOR は特に (1) 強度、(2) 偏光の性質 (3) パルス波であるという点で本質的に異なっている。

(1) 強度 SOR のスペクトルは赤外、可視光から軟 X 線、硬線領域にわたり、ゆるやかな山をもった連続光であるが、遠紫外から硬 X 線の短波長領域

第3図

にかけて現在の線源より桁違いの強度を持つ、 $\text{Cu K}\alpha_1$ に対して、ごく普通の実験条件（ビームの断面積 1mm^2 ，開き角1ミリラディアン）で，例えば 2 GeV，500 m A 程度のストレーチリングから放射される電磁波は，時間平均で1万倍（高良，1974），また連続 X線の部分で比較すれば更にその数百倍

と驚異的な強さである。この数値をかりにそのまま使って計算すると、今まで $\text{Cu K}\alpha_1$ で24時間の露出を必要とするような実験は僅か9秒足らずで済むことになる。宇宙のかなたで SOR を放射している星の構造が想像の域を脱し得ないのに対して、われわれの作る SOR の強度、波長分布などの特性は正確に計算することが出来る。

(2) 偏光 SOR は軌道面内に高度に偏光している。SOR の偏光特性を示した第4図から分るように、軌道面内では垂直な偏光成分はゼロである。軌道面から僅かにずれると垂直成分が現はれるが、水平成分に対してはるかに弱い。この図はまた、実験値と計算値が如何によく一致するかを示している。偏光していることが SOR 光の大きな特徴であることは、天空から降りそそぐX線が SOR であるか否かの判定に、それが一つの決め手とされている点からも明らかであろう。ちなみに、現在用いられているX線は偏光していないことは周知通のりである。

SOR が軌道面内に高度の偏光性を持つということは、回折実験方法によ

第4図 (Marr, 1974)

第5図

っては好ましくない場合ある。然し、超電導磁石 ($\sim 60 \text{ K gauss}$) を用いた wiggler という装置を附加することにより、局部的に軌道を例えば垂直面内に曲げることも可能である(第5図)。この部分からの SOR 光は主軌道からのものに対して波長が短くなり、その偏光方向は当然主軌道面に垂直となる。

(3) パルス波であること

装置の所で述べたように、電子はパルスとしてシンクロtron (およびストレージリング) に注入されるから、実際にストレージリングでは電子は不連続な束(ビーム)として回転している。この電子束は例えば現在日本で計画されているリング (2.5 GeV , 10 K gauss) では長さ約 52 mm 、断面 $0.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ のダ円になっており、このような 256 個の束が等間隔で軌道を回る(第6図)。したがって発生する SOR は $1.7 \times 10^{-10} \text{ sec}$ の短いパルス光として約 $2 \times 10^{-9} \text{ sec}$ の間隔で起る(第7図)。

SOR は以上の他に、指向性が鋭く、一般の実験に対しては平行束と見做することが出来るという大きな特徴を持ち、また普通の X線は電子が金属に衝突して失うエネルギーに基因しているに対して、SOR は超高真空中での電子自身の運動エネルギーの変化によるものであるから、化学的に理想的な清浄線源であるということも出来る。

SOR と鉱物学

SOR が圧倒的に強力な広い波長範囲の白色光であるという上記の特徴は、

第 6 図

SOR PULSE

256 bunches

第 7 図

必然的に起るであろう所の具体的な夫々の実験装置開発の問題を別にすれば、われわれに種々の思考実験をする夢を与えてくれる。蛍光分析，物質内の電

子状態分析を行う光電子分光学、構造、組織の研究等の分野で質的な発展がみられるであろうことは疑う余地がない。鉱物学へ与える一般的な効果を、もし一口で言うことを強いられたとしたら、“微小鉱物学”への道が新しくひらかれると言っても良いであろう。X線による鉱物結晶の、特に構造的な研究範囲がより微小部分へ、また、より微小結晶へ広がられることは間違いない。ごく一般的な構造解析を例にとれば、われわれが現在実験に使用しうる結晶の大きさの限界を多少過大評価して 50μ 程度とすれば、使用しうるSORの強度を過小評価して現在の線源の1000倍としても、原理的には 5μ 程度の微結晶の解析を十分行うことが出来る。恐らく 1μ 程度まで可能になるであろう。X線と電顕(電子線)の守備範囲のギャップが一步縮まることになる。したがって微小であるがゆえに、また微小部分の問題であるがゆえに閉ざされていた研究の道がSORによって開かれることになる。

特殊な問題を取りあげれば、SORが威力を発揮しうるであろう所の好例の一つに高圧力下におけるX線回折の実験があげられる。高圧力下では高圧容器、圧力媒体を通して容器内の結晶の回折パターンを記録しなければならないという技術的難問があるが、強力なSOR線源はこれを容易にするに十分であろう。特に白色光であるSORの特徴を生かしてSSD(半導体検出器)を用いたエネルギー分散型(島津, 中沢, 1974)の回折装置にすれば、複雑な高温での高圧力容器の製作も楽になる筈である。また、構造解析の観点からは、非常に大きな単位胞の解析が可能になる。無機物質では、そのような結晶はいわゆる超構造的な性格のものが殆どで、回折スペクトル数は手がつけられぬ程多いという難点の他に、それらの殆どがsubcellの強度に対して1/100以下であるような場合が多く、有意義な数値として記録しうるスペクトル数はごく一部に限られるケースが少くない。SORを用いて2次元検出器(two-dimensional position sensitive counter)を併用すれば、この問題は一挙に解決出来る。その他個々の問題を取りあげればきりが無い。それらは科学(岩波, 44, No. 10, 1974)にゆずるとして最後にSORが 10^{-7} sec の間隔でおこるパルス光である点を見逃すわけにはいかない。この特徴を利用すれば、その時間より遅い構造の変化を動的にとらえることが出来る。生物学の分野では筋肉の収縮運動の機構をSORによる回折を用いて分子科学的にとらえようとする研究が海外で既に始められている。

3. 付 記

——日本における SOR 計画——

わが国における一部の回折結晶学者達は超強力な X線源開発について検討を進めていたが、3・4 年程前に高エネルギーの電子シンクロトロンを建設して、SOR を利用する以外にないという結論に達した。たまたま、より高エネルギーの電子加速器を必要とする東大核研の将来計画像があったため、原子核研究グループと回折結晶学者が中心となり、関連分野の有志に呼びかけて“フォトン・ファクトリー研究所”設立計画案を立案し、その世話人会が成立するに至った。この計画は数 GeV のストレージングを建設して、極めて広いエネルギー範囲のフォトン（光子）を作り、高エネルギー物理学の研究と同時に、物理、化学、鉱物、生物は勿論、医学、農学などの広い分野の応用に提供するのを目的としたものである。シンポジウムを開いて検討を重ね、計画が練られた結果、“放射光総合研究所”と名を改めて関連分野の研究連絡委員会の共同提案として学会会議に提案され、その審議を通して 1974 年 10 月政府に設立の勧告が答申された。

ところで、SOR を利用した研究論文が始めて出たのが 1963 年と言われるが、これより先 1961 年には東大核研のシンクロトロン (INS) が完成していた (1.3 GeV , 10.5 K gauss , $\lambda_p = 10 \text{ \AA}$)。これには 2 本の SOR チャネルが設けられており、1964 年から分光学分野で SOR を用いた先駆的業績があげられて来ている。更に同研究所では今年になって専用のストレージング (0.3 GeV , 9 K gauss) も完成し、それよりの成果がぼつぼつ始まる頃である。わが国には SOR についてこのような背景と実績があり、より高エネルギーのストレージング建設の地盤が十分固められている。しかしながら、英、米、独等においては INS の成果が出始めた頃より、 $5 \text{ GeV} \sim 12 \text{ GeV}$ という高エネルギーのシンクロトロンが続々と完成し、先駆的役割を演じた INS を規模の上で凌ぐようになった。先に述べた筋肉の研究はハンブルグの DESY (7.5 GeV , 7.9 K gauss , $\lambda_p = 0.42 \text{ \AA}$) での仕事である。その成果は恐らく回折実験分野での SOR 時代の黎明を告げるものとなるかも知れない。

しかし、これらのシンクロトロンに対して“放射光総合研究所”のストレージングは始めから結晶学はじめ広い分野の実験が出来るよう計画されている所に大きな相違があり、大変な特徴を持っている。これが、すみやかに

実現すれば世界の話題となるであろう。

現在、日本学術会議の第4部附置として「放射光総合研究所設立準備委員会」があり、主として研究者間の意見調整を計っている。一方、今年2月、フoton・ファクトリー世話人会は「PF懇談会」へと発展的に再編成され、設立推進の役割を演じている。現在、事務所は東大・工学部・物理工学科・高良和武教授の研究室にあり、定期的に“PFニュース”が発行される予定になっている。今の所、300人余りの会員が登録されているが、SORに関心ある研究者の入会が期待されている。この会を通じて種々の形でSOR計画に参加することが出来る。

本稿執筆に陰し種々御教示いただいた東京大学工学部の高良和武教授、東京大学生産技術研究所の菊田惺志博士に謝意を表する。なお、文中の第1図、第2図、第4図はMarr (1974) の論文よりそのままの形で引用した。第5図、第6図は模式的なものである。

文 献

- 高良和武 (1974) シンクロトン光の利用とその展望. 科学 44, 586-592. 岩波書店
Marr, G. V. (1974) Synchrotron radiation, a new research tool. Endeavour 33, 55-59.
島津正司, 中沢弘基 (1974) 半導体検出器とそのX線回折法への応用, 鉱雑. 11, 411-431.

(昭和50年9月30日 受理)