

Coherent Synchrotron Radiation by the Tohoku Linac

Toshiharu NAKAZATO, Masayuki OYAMADA, Nobuo NIIMURA,
Shigekazu URASAWA, Ryukou KATO and *Yoshiharu TORIZUKA

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

**Atomic Energy Research Institute, Nihon University*

ABSTRACT

Coherent effects in synchrotron radiation (SR) have been observed for the first time using the Tohoku 300 MeV Linac. The energy of the electron beam was 180 MeV and its bunch length was estimated to be about 2.5 mm. The observed intensity of the coherent SR was about 10^6 times as strong as that of the calculated incoherent SR in the wavelengths of 0.3 to 2.2 mm. This enhancement factor corresponds to the number of electrons in a bunch. The SR intensity showed a quadratic dependence on the electron beam current. The radiation was mainly polarized in the orbital plane. When the bunch length was stretched to 15 mm by the debuncher, the SR intensity was drastically reduced. The possibility of the induced RF effect in the vacuum chamber was excluded experimentally.

電子ライナックによるコヒーレント放射光

1. はじめに

シンクロトロン放射光 (SR) は連続スペクトルを有し、その強度は光を放出する電子数に比例するインコヒーレントな光源である。1982年、バンチ内の電子からのコヒーレントSRの可能性が天文学者¹⁾によって示された。それによると、SRの波長が電子のバンチ長に近づくと、バンチ内電子からのSRはコヒーレントとなり、その強度はバンチ内の電子数の二乗に比例する。このコヒーレントSRによって長波長領域のSRの強さは飛躍的に増大し、従来のSR強度の6~10桁も強い光源が得られることになる。

1984年の Daresbury の観測では²⁾、長波長領域で放射光強度のわずかな増加が見られたがコヒーレント放射の決定的確認までは至ず、その後の BNL³⁾や BESSY⁴⁾での観測でも検証されなかった。これらはいずれもバンチ長が数10mmのストレージリングの電子からの放射光を観測したものである。バンチ長が長いのは、ストレージリングの加速RF周波数が500MHz程度と低く、更にシンクロトロン振動によって進行方向にバンチが広がるためである。

本研究に使用した東北大学理学部原子核理学研究施設の300MeV電子ライナックは、短いバンチが得られる。これはライナックの加速RF周波数が2856MHzと高く、しかもシンクロトロン振動のようなバンチを長くする効果がないためである。これによって、ミリ

波・サブミリ波領域でコヒーレントSRの発生が可能となる。

現在、遠赤外からミリ波領域にわたって波長が連続で強力な光源は開発されていない。コヒーレントSRが確認され実用化されれば、各方面への波及効果も大きい。尚、コヒーレント放射光は天文学におけるパルサーの研究に端を発しており、この存在が地上で確認されれば物理学及び天文学の基礎問題として重要な情報を提供することになる。

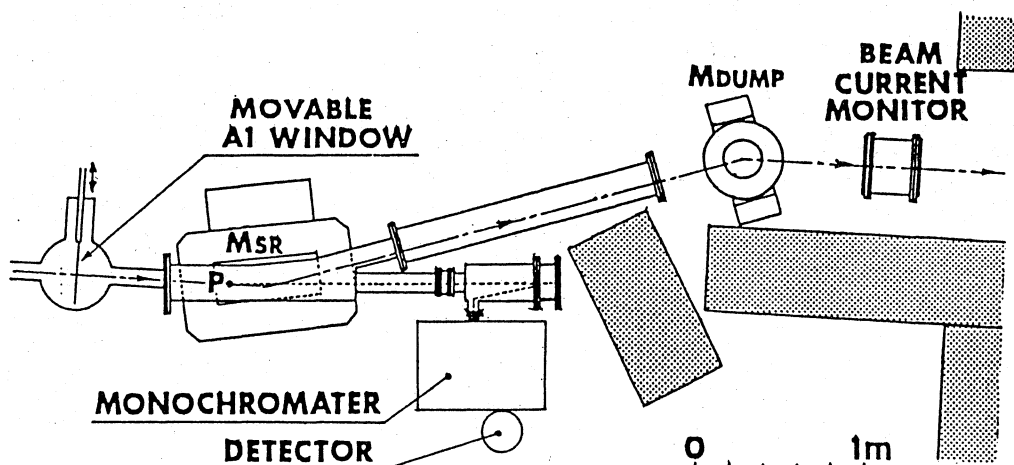
2. 実験装置

第1図にコヒーレントSR観測の実験装置を示す。矢印のついた一点鎖線が電子ビームの軌道である。ライナックからのビームはコヒーレントSR観測用偏向電磁石 (M_{SR}) 中の発光点 (P) を通り、その下流のアルミニウムの窓を通して空気中に出て、円形偏向電磁石 (M_{DUMP}) でビームダンプに棄てられる。電子ビームのエネルギーは 180MeV、エネルギー幅 0.2% である。ビーム電流は平均 $1\mu A$ まで得られ、平均電流は二次電子放出モニターによって測定した。ライナックはパルス幅 $0.1\sim 2\mu sec$ 、繰返し 300pps で運転した。発光点での磁場は 0.247T、曲率半径は 2.44m である。

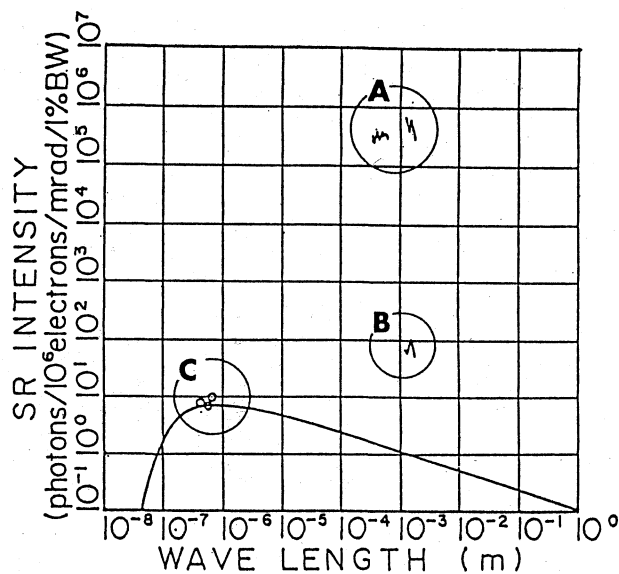
ライナックの加速周波数は 2856MHz、加速位相内でのバンチの幅は約 5° 、即ちバンチ長は約 1.5mm である。ライナックから実験室までのビーム輸送系を通過すると、エネルギー幅 0.2% の場合はバンチ長が約 2.5mm に伸びる。また、ライナックの最終段には 3 台の偏向電磁石からなるデバンチャーがあり、これを通過させることによりバンチ長を 15mm に伸ばすことができる。

発光点から出たコヒーレントSRは反射望遠鏡型集光系、遠赤外分光器 (日立 FIS-3) で分光され、検出器 (LHe温度のSiボロメータ) に導かれる。SR強度の絶対値は、高圧水銀灯を温度 4000K の黒体と考えて光学測定系を較正することにより求めた。検出器の波長分解能は数%程度、反射望遠鏡型の集光系の見込角は $2\times 35mrad$ である。集光系と分光器との間に熔融石英の窓がある以外は、発光点から検出器までの光路は全て真空である。これによって、大気中の水蒸気の吸収等の影響は除去してある。観測した波長域では石英窓の吸収も無視できる。

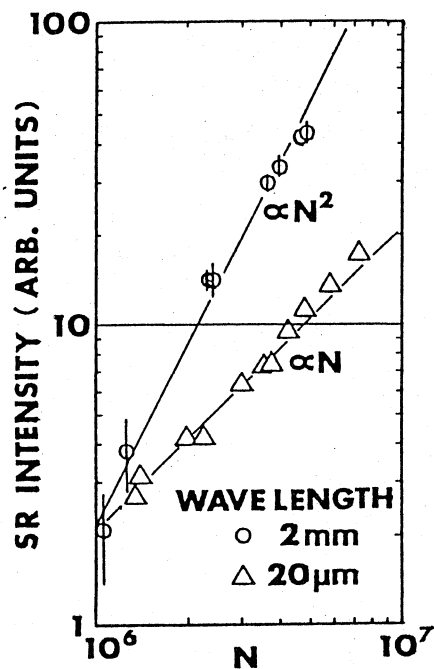
絶対値測定の信頼性を確認するために、可視光領域のSR強度の絶対値も測定した。これは同じ光学系で検出器を光電子増倍管で置き換え、色ガラスと干渉フィルターで可視領域の分光を行なった。可視光測定の絶対値は光度が既知のハロゲンランプで較正した。



第1図 コヒーレント放射光観測実験装置



第2図 SRスペクトルの測定結果



第3図 SR強度の電流依存性

3. 測定結果

SRスペクトルの観測結果を第2図に示す。SR強度（縦軸）は 10^6 個の電子からなるバンチが放出する光子数で、軌道の偏向角 1mrad、波長バンド幅 1% 当りの値である。円 A 及び円 B 内（以下 A, B と記す）は長波長領域のスペクトルで、それぞれバンチ長は 2.5mm と 15mm である。円 C 内はバンチ長 2.5mm における可視光領域の測定点である。曲線は同じ測定条件におけるインコヒーレント SR の強さの計算値である。この計算値は放射光角分布の垂直方向の全角度について積分された値であるが、観測値は垂直方向の見込角 $2 \times 3.5\text{mrad}$ の中に放射される光の強さである。

A における SR 強度はインコヒーレント SR の強度の 10^5 倍程度の強さを示している。バンチの形状因子³⁾を考慮すればこの増加率は 1 バンチ中の電子数 10^6 にほぼ対応している。これに比較して B の場合は増加率が著しく低下しており、この波長領域ではバンチ形状因子が小さな値となっていることを示している。

A のスペクトルはバンチが複雑な形状をしていることを示唆している。これは、もしバンチがガウス分布のような単純な形状だとすると、SR 強度はそのバンチ形状因子に従ってバンチ長程度の波長以下で急激に強度が減少するためである。

可視光領域の C の測定点はほぼ計算値と一致している。これは A や B の測定と同じ光学系で測定しているので、これ等の絶対値測定の信頼性評価の目安となっている。

波長 2mm と $20\mu\text{m}$ における SR 強度のビーム電流依存性を第3図に示す。横軸 N はバンチあたりの電子数で、ビーム電流に比例する。SR の強度は波長 2mm のときは N^2 に、 $2\mu\text{m}$ のときは N に比例する特性があることがわかる。

また偏光度 P を次式のように定義すると、波長 0.3~2mm において観測した SR は $P \approx 0.6 \sim 0.7$ であった。ただしここで I_H (I_V) は電場成分の偏光面が水平 (垂直) 方向の SR 強度である。

$$P = (I_H - I_V) / (I_H + I_V)$$

従って、観測された SR の電場成分は水平方向に強く偏光している。この偏光度は同じ光学系の幾何条件でのインコヒーレント SR の計算値 $0.6 \sim 0.8$ とほぼ同様の値である。

4. RF 励振の影響

ビームダクトを通過する際にビームが真空ダクト内に励振するRF強度は、ビーム電流値の2乗に比例しかつバンチ形状因子にも依存するため、コヒーレントSRに良く似たの性質を示す。コヒーレントSRはこの励振されたRFと区別する必要がある。ISR (CERN) における真空ダクトのインピーダンスの測定値を使い、電荷 10^6e のデルタ関数型のバンチ形状を仮定して波長1mmの励振RFの強度を見積ると、真空ダクト1m当り 3×10^6 photons/1%BW/mとなる。これに対して、この実験の光学系内に入るSRの測定値は 3×10^7 photons/1%BWである。即ち、真空ダクト1m内に励振されたRFが全て光学測定系内に到達したとしても測定値よりも1桁小さい値となる。しかしこの測定系に至るまで電子ビームは約20mの真空ダクトを通過して来るため、もしRFの影響があるとすれば、測定系の上流で励振されたRFの寄与は無視できないはずである。そこで測定系の発光点の上流にアルミフオイルの可動窓を取付け、上流で励振されるRFを遮断してみた。その結果、遮断してもSR強度には有意な差は表れなかった。このことから、測定した光は励振RFではないと判断して良い。更に、真空ダクトで励振されたRFは、ダクト壁面で乱反射されて測定系に到達するため、観測された光の偏光度のように強く偏光することは考えにくい。以上のことから、RF励振の影響はないものと判断する。

5. まとめ

観測されたSRは、①短バンチのとき、バンチ長程度の波長領域でインコヒーレントSRに比べて強度が極端に大きくなる。②この増加率はバンチ内の電子数程度である。③SR強度は長波長で電流の2乗に比例する。④SRは水平方向に偏光している。この値はインコヒーレントのものと似ている。⑤SR強度はバンチの長さに強く依存する。⑥真空ダクト内で励振されるRFの影響はない。以上のことから、観測されたSRはコヒーレントSRであると結論する。コヒーレントSRの確認はこの実験が最初である。

コヒーレントSRの発生のためにはバンチ長だけでなく、バンチの形状が重要な要素である。電子ライナックはコヒーレントSRの発生に、強力な手段となる。これはストレージリングと比較して、ライナックのバンチが一般に短いのと、その形状が複雑であることによる。さらに、大電流単バンチ (例えば 10^{10} 電子/バンチ) 加速がライナックで可能になったため、大強度パルス光源として非平衡系の物理実験等に広い応用が考えられる。また、SRスペクトルを測定することにより、これまで困難だったライナックのバンチ形状を測定することも可能となり、特にリニアコライダのバンチモニタとして応用が期待できる。

参考文献

- 1) F.C.Michel : Intense Coherent Submillimeter Radiation in Electron Storage Rings : Phys.Rev.Let.48 (1982) 580.
- 2) J.Yarwood, T.Shuttleworth, J.B.Hasted and T.Nanba : A New Radiation Source for the Infrared Region : Nature 312 (1984) 742.
- 3) G.P.Williams, C.J.Hirschmugl, E.M.Kneedler, P.Z.Takacs, M.Shleifer, Y.J.Chabal and F.M.Hoffmann: Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 261.
- 4) E.Schweizer, J.Nagel, W.Braun, E.Lippert and A.M.Bradshaw, Nule. Instr. and Meth.: A239 (1985) 630.