

凹面鏡からの後方遷移放射

柴田行男¹, 佐々木理志¹, 伊師君弘¹, 蔦谷 勉¹, 大坂俊明²
近藤秦洋², 日出富士雄³, 松山正佳³, 小山田正幸³

¹東北大学科学計測研究所 (980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

²東北大学大学院工学研究科 (980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

³東北大学原子核理学研究施設 (982-0826 仙台市太白区三神峰1-2-1)

Backward Transition Radiation from a Concave Mirror

Y. Shibata¹, S. Sasaki¹, K. Ishi¹, T. Tsutaya¹, T. Ohsaka¹, Y. Kondo²,
F. Hinide³, M. Matsuyama³ and M. Oyamada³

¹*Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University,
Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577*

²*Faculty of Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
Aramaki aza-aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579*

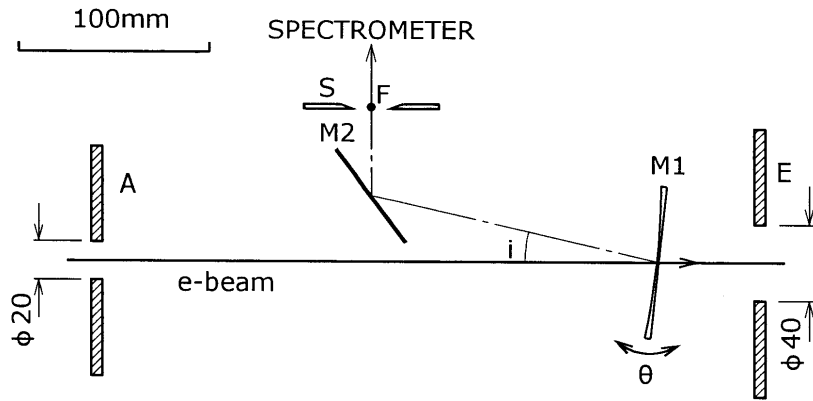
³*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University,
Mikamine 1-2-1, Taihaku-ku, Sendai 982-0826*

Coherent backward transition radiation (BTR), emitted from bunched electrons passing through a concave mirror, was observed in the far-infrared region. The BTR from the mirror showed more concentration into the direction of the specular reflection than BTR from a flat mirror. The concentration was prominent toward decrease of the wavelength.

§ 1. 序 論

電子ライナックの短バンチな電子ビームからの放射は、遠赤外・ミリ波域では、個々の電子からの放射の位相がそろったコヒーレントな放射である[1-3]。コヒーレントな放射のスペクトルはバンチの電子分布と関係しているため、コヒーレントな放射の解析からバンチの縦（進行）方向電子分布を求めることが出来る[4,5]。そのようなビーム診断にしばしば利用されるのは、電子ビームが金属箔を通過する際に発せられる遷移放射である。

電子ビームが金属箔を通過するとき、軌道に沿って電子の進行方向に前方遷移放射が放射され、金属箔の鏡面反射方向に後方遷移放射が放射される。前方・後方両遷移放射ともにバンチ診断に利用されている。高エネルギーな電子の場合、前方遷移放射は、境界面の凹凸には極めて鈍感で、境界面の局所的な平面構造によらず、電子軌道に沿った方向に集中して放射される。それに対し、後方遷移放射は境界面の平坦さや凹凸に敏感であると考えられている。高エネルギーな電子ビームが周囲の物質との相互作用で光を発生する場合、類推として、電子を仮想光子と想定しその平面波が入射し物質により反射・透過・回折されるとして発生する光の様子を考察することが出来る場合がある。そのように考えた場合、球面鏡からの後方遷移放射は鏡の焦点距離の位置に集光されると予想される。



第1図 実験配置図。M1：球面鏡，M2：平面鏡，S：スリット，A：開口衝立，E：エコソープ。平面鏡からの後方遷移放射を測定する場合は球面鏡M1を平面鏡に交換する。

そこで、電子ビームが凹面球面鏡を通過する場合の後方遷移放射の角分布測定を試みた。その場合、上期類推にもかかわらず実験結果の理論との比較は容易ではない。何となれば、通常、遷移放射は真空と物質（金属）との境界が平面と仮定して定式化されているためである。それゆえ、性質の明らかな平面鏡からの後方遷移放射を比較の基準として測定し、球面鏡からの後方遷移放射の性質を調べた。このような実験は、遷移放射に関する基礎的な実験であるにもかかわらず、これまでに明らかにされていない。実験結果は未だ解析中であるが、ここでは主な実験結果を報告する。

§ 2. 実験

実験は核理研のSバンドライナックを用いてビーム偏向室で行った。実験配置を第1図に示す。電子ビームは合成石英の凹面球面鏡M1を通過し、遷移放射を発生する。鏡M1は焦点距離が200mm、直径80mmの円形で中心部の肉厚が1mmである。電子軌道にそって平面波が入射したときの球面鏡M2による結像点がFであり、その位置に両開きスリットSが設置されている。測定光学系は点Fを仮想光源として調整されており、受光角は70mradである。鏡M1からの後方遷移放射は平面鏡M2で回折格子型分光計に導かれ、極低温ボロメータで検出される。電子ビームの軌道と測定用光軸は床面に水平な面をなす。球面鏡M1は鏡の中心を通る垂直軸のまわりにパルスモーター制御で回転でき、後方遷移放射の放射角分布が測定できる。

この実験系を納めた真空容器は、ライナックに直結する、より高真空な上流部とは真空中には切断されている。すなわち、鏡M1の上流約1.35mのところ厚さ15ミクロンのアルミ箔ガasketを境に上流と下流は、別々の真空度に保たれている。下流の実験系の真空度は、典型的には 10^{-6} torrであった。電子ビームがそのアルミ箔を通過する際、前方遷移放射が発せられる。その前方遷移放射が鏡M1で集光され、測定系に導かれるのを防ぐため、鏡M1の上流290mmの軌道上にアクリルとアルミ箔からなるマスクAを置いた。電子ビームはマスクAに開けられた直径20mmの円形開口を通過する。従って真空仕切り用アルミ箔からの前方遷移放射は殆どマスクAで遮蔽されるが、一部は開口を通して鏡M1で反射され測定系に入射する。また、電子ビームがマスクを通過するときや、平面鏡M2の近くを通過するときには前方回折放射が発せられ、それがやはり鏡M1により測定系に導かれる。それゆえ、測定された光は、純粋に球面鏡からの後方遷移放射だけでは無く、以上の放射の重ね合わせである。鏡M1からの前方遷移放射が下流の真空容器壁により反射され測定系に検出されるのを防ぐため、M1の下流にもエコソープ（サブミリ・ミリ波吸収体）の衝立Eを配置した。

参照基準となる平面鏡からの後方遷移放射を測定する場合は、球面鏡を直径80mmで厚さ1mmの合成石

英平面鏡に交換した。使用した鏡はすべてアルミ蒸着鏡である。

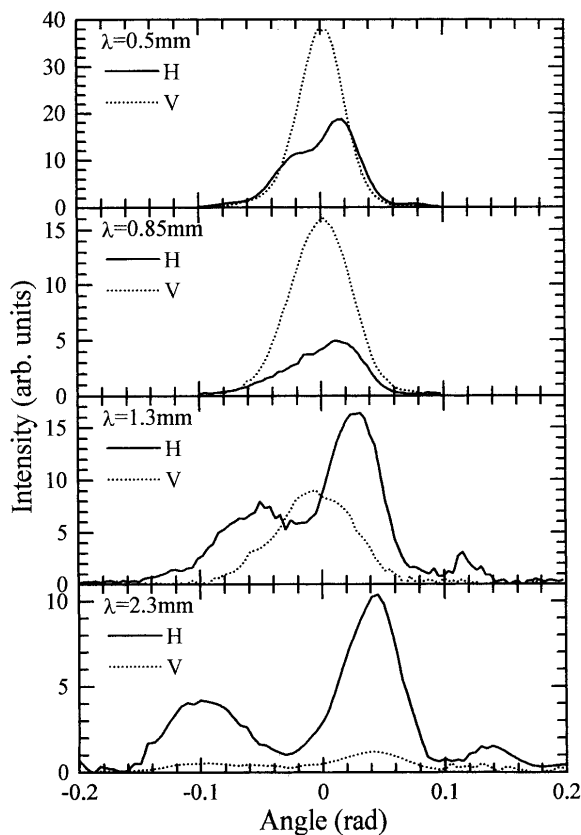
実験に使用した電子ビームのエネルギーは 150MeV で、エネルギー幅は0.5%、マクロパルス幅は $1.5\mu\text{s}$ であった。そのマクロパルスの繰り返しは 16.7Hz、平均ビーム電流は $0.6\mu\text{A}$ であった。マクロパルスは約 4,300個のバンチからなり、バンチ当たり電子数は 5.3×10^7 である。また、ビーム径はほぼ円形で約 5mm であった。

電子ビームは種々の原因により、ビーム軌道やバンチ構造が変動し、その変動の時間スケールも多岐にわたっている。それをビーム電流計の出力のみで補正することは出来ない。そこで M1 の下流約 1m の軌道上にアルミ箔を置き、電子ビームが通過するときに発せられるコヒーレントな遷移放射を別のシリコンフォトダイオードで受光し、変動補正用モニターとして使用した。

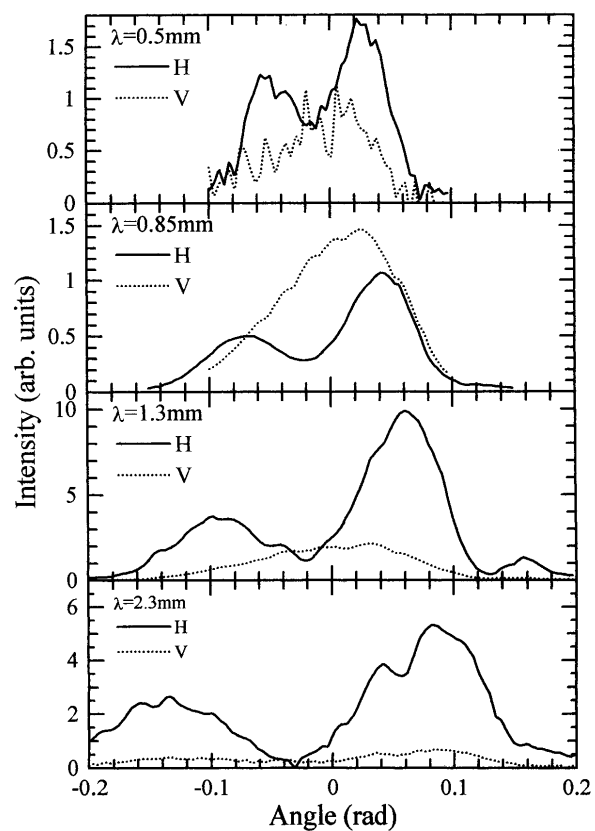
§ 3. 結果と考察

実験配置図 1 のスリットを 10mm にし、球面鏡 M1 を回転することにより測定した放射の角分布を第 2 図に、M1 を平面鏡に置換した場合の測定結果を第 3 図に示す。測定波長 λ は 0.5, 0.85, 1.3 および 2.3mm であり、角度は光軸（鏡面反射）方向が零で、鏡 M1 の時計回りの方向が正の増加方向を示す。実線が水平方向の偏光成分を表し、点線が垂直偏光成分を表す。また、スリット幅を 23mm にした場合の同様の測定結果を第 4, 5 図に示す。これら 4 図の強度分布は同一スケールで描いてあり、ビーム電流の変動による測定強度の揺らぎは補正してある。

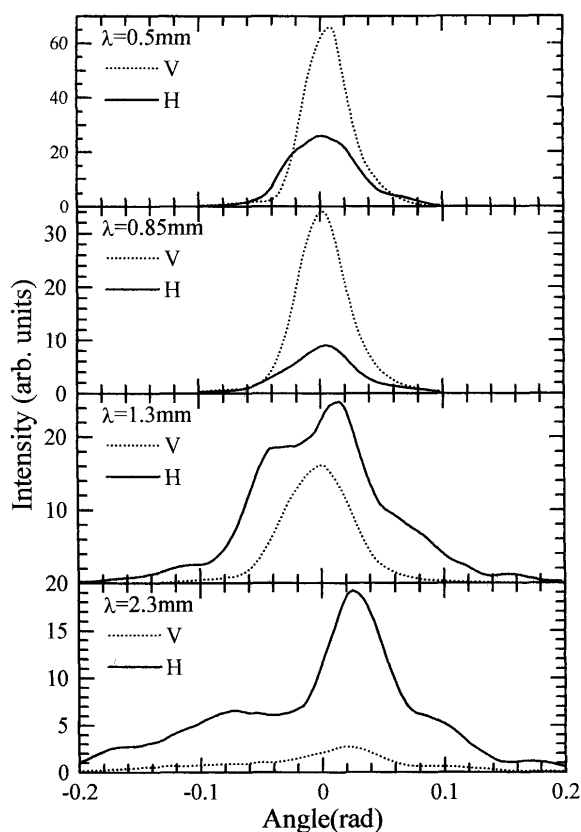
第 3 図および第 5 図に明らかなように、平面鏡からの後方遷移放射は鏡面反射方向に対してほぼ対称的で



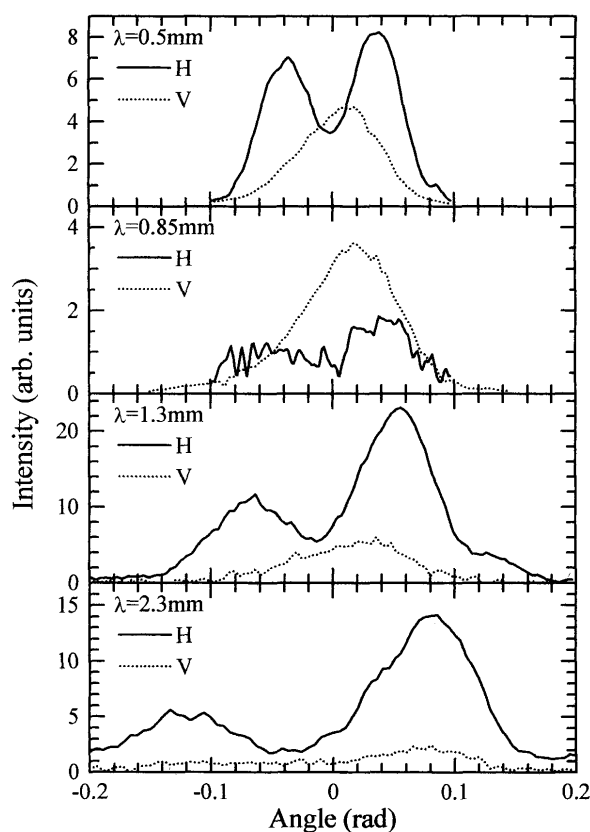
第 2 図 球面鏡からの後方遷移放射の角分布。スリット幅は 10mm。実線は水平偏光成分の分布を、点線は垂直偏光成分の結果を表す。



第 3 図 平面鏡からの後方遷移放射の角分布。スリット幅は 10mm。実線は水平偏光成分の分布を、点線は垂直偏光成分の結果を表す。



第4図 球面鏡からの後方遷移放射の角分布。スリット幅は 23mm。実線は水平偏光成分の分布を、点線は垂直偏光成分の結果を表す。



第5図 平面鏡からの後方遷移放射の角分布。スリット幅は 23mm。実線は水平偏光成分の分布を、点線は垂直偏光成分の結果を表す。

あり、水平偏光成分ではふた山のピーク構造を示しそのピーク角は長波長ほど大きくなる。垂直偏光成分では鏡面反射方向にピークのあるひと山構造を示す。また、波長 1.3mm 近辺で測定強度が最大である。

球面鏡からの後方放射は、やはりほぼ対称に分布しているが、平面鏡の場合と比較し可成り顕著な相違があり、次の特徴を示している。

- 1) 水平・垂直両偏光成分ともその放射分布は鏡面反射方向に集中している。すなわち、水平偏光成分は波長 1.3mm および 2.3mm ではふた山構造を示すが、ピーク各および各ピークの半値幅は、平面鏡からの放射に比較し小さい。また短波長では、スリット 10mm 波長 0.5mm の場合を除き、ふた山に分離できずひと山構造のように見える。垂直偏光成分でもピークの半値幅は平面鏡の場合のそれより明らかに小さい。
- 2) 放射強度が平面鏡の場合の強度に比較し強い。その傾向は短波長ほど顕著である。例えば、スリット 10mm の場合、球面鏡の場合の放射強度は水平・垂直両偏光成分とも平面鏡の場合の10倍以上の強度を示すが、波長 2.3mm では2倍程度である。また、測定波長範囲では球面鏡の場合、波長が短くなるほどピーク強度も強くなっている。

一般に、波長が短い場合に比較し、波長が長いほどその波長にとって球面と平面との差は相対的に小さくなる。その効果が、短波長の測定ほど平面鏡と球面鏡との差が顕著となって現われているのであろう。

この結果は、球面鏡からの後方遷移放射の集光効果を示唆している。しかし、球面鏡の焦点に集光しているならば、水平偏光成分も中心に集中したひと山構造となるはずであるが実験結果はそうなっていない。それゆえ、実験配置を考慮に入れた解析が必要である。この実験では後方遷移放射のみを測定しているので

はなく、上流からの放射の影響や回折放射と一緒に測定されているとして実験結果を解釈しなければならない。例えば、長波長になるほど回折の効果が大きくなるのでそれを避けて、測定波長 0.5mm, スリット幅 23mm の結果について幾何光学的に考察する。鏡 M1 の約 1.35 m 上流にある真空隔絶のためのアルミ箔からは前方遷移放射が放射される。そのビーム軸にそった 19mrad の光は、マスク A を通りぬけ鏡 M1 に入射する。鏡 M1 が平面鏡の場合、その入射光は測定系の方に反射され、その約 88% はスリットを通過し測定系に検出される。それゆえ M1 が平面鏡の場合の結果は、近似的にはアルミ箔からの前方遷移放射と平面鏡からの後方遷移放射の重ね合わせと考えられる。また、鏡 M1 が球面鏡の場合は、上流からの入射光は球面鏡 M1 で反射された後スリット S を通過し F 点から約 3cm 離れた所に収束し、その後発散光となって測定系に導かれる。それゆえ、この場合もアルミ箔からの前方遷移放射と球面鏡からの後方遷移放射の重ね合わせとみなせる。それゆえ、数値計算を基に解析を進めてゆく必要がある。

実験結果は、球面鏡の後方放射は平面鏡の場合とかなり顕著な相違があることを示した。この結果は、穴開き球面鏡の穴を電子ビームが通過する場合の後方回折放射も、球面鏡からの後方遷移放射と同様の効果を有することを示唆している。穴開き球面鏡を有効に利用したバンチ計測用光学系を工夫すると、光強度が強くなり S/N 比が改善される可能性がある。

本研究は、東北大学理学研究科附属原子核理学研究施設のライナックを用いて行われた。実験においてはマシングループをはじめとして多数の職員から種々の支援を戴いた。ここに記して感謝する。

References

- [1] T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, O. Konno, A. Kagaya, R. Kato, T. Kamiyama, Y. Torizuka, T. Nanba, Y. Kondo, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, and M. Ikezawa: Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 1245.
- [2] K. Ishi, Y. Shibata, T. Takahashi, H. Mishiro, T. Ohsaka, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nakazato, S. Urasawa, N. Niimura, R. Kato, Y. Shibasaki, and M. Oyamada: Phys. Rev. A **43** (1991) 5597.
- [3] Y. Shibata, K. Ishi, T. Takahashi, T. Kanai, F. Arai, S. Kimura, T. Ohsaka, M. Ikezawa, Y. Kondo, R. Kato, S. Urasawa, T. Nakazato, S. Niwano, M. Yoshioka, and M. Oyamada: Phys. Rev. E **49** (1994) 785.
- [4] Y. Shibata, T. Takahashi, T. Kanai, K. Ishi, M. Ikezawa, J. Ohkuma, S. Okuda, and T. Okada: Phys. Rev. E **50** (1994) 1479.
- [5] R. Lai and A.J. Sievers: in *Microbunches Workshop* AIP conf.proc. **367** ed. by E.B. Blum, M. Dienes, J.B. Murphy, (AIP press, New York 1996) p312.