

回折遷移放射を利用したリニアコライダー用ビームモニタの提案

高林雄一

九州シンクロトロン光研究センター

現在、国際規模で計画が進められている電子・陽電子リニアコライダーでは、ビームサイズが数 nm と極端に小さいために、そのビームサイズを測定するためには、特殊な方法が必要となる。最も有望視されているのが、新竹モニタ[1]と呼ばれるものである。新竹モニタでは、2つのレーザービームによる干渉縞標的と電子（陽電子）が衝突（レーザーコンプトン散乱）することによって生成される γ 線が検出される。そのため、大強度・高安定度のレーザー、ビームを掃引するための電磁石、そして高度な実験技術が必要となる。

本研究では、回折遷移放射（diffracted transition radiation : DTR）を利用したビーム診断技術を提案する[2,3]。高速の荷電粒子が固体に入射すると、固体の入口面で遷移放射が前方に生成される。固体が結晶の場合、遷移放射は結晶内部で回折され、ブラッグ方向に放出されるが、それが DTR と呼ばれるものである。本研究では、下記の2点に着目した。

(i)リニアコライダーの衝突点でのビームサイズ σ は数 nm と極端に小さいが、ビームの角度拡がり σ' は数 10 μrad と比較的大きい[4,5]。そこで、ビームサイズの代わりに、ビームの角度拡がりを測定することを提案する。ビームサイズ σ は、 $\sigma \times \sigma' = \varepsilon$ (ε はエミッタンス)の関係式から求められる。エミッタンスは、衝突点よりも上流で測定するか、または計算値を用いることができる。

(ii)DTR の特徴的な角度拡がり θ は、 $1/\gamma$ (γ はローレンツ因子)で表わされるが、これは、ビームの角度拡がりよりも十分小さい。例えば、200 GeV 電子の場合、 $1/\gamma = 2.6 \mu\text{rad}$ となるが、これは、ビームの角度拡がり（数 10 μrad ）よりも十分小さい。よって、DTR の角度分布は主に、ビームの角度分布で決まる。

本発表では、DTR の角度分布のシミュレーション結果と、ビームの角度拡がりの導出方法について報告する。新竹モニタと比較して、DTR モニタの特長は、測定が容易、測定装置が低コスト、ビームを掃引するための電磁石が不要、複数設置可能であることである。短所は、大強度のビームを入射させたときに、結晶が破壊されることである。DTR は、ビームを結晶内部に入射させずに、結晶表面近傍を通過させるだけでも生成されることが予想される。この放射現象を、表面回折遷移放射（surface diffracted transition radiation : SDTR）と呼ぶことにする。SDTR を用いれば、結晶の破壊を回避できると考えられる[3]。本発表では、SDTR についても議論する。

参考文献

- [1] T. Shintake, Nucl. Instrum. Methods A 311 (1992) 453.
- [2] Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, Nucl. Instrum. Methods A 808 (2016) 71.
- [3] Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, submitted.
- [4] ILC Technical Design Report, 2013.
- [5] CLIC Conceptual Design Report, 2012.

回折遷移放射を利用したリニアコライダー用ビームモニタの提案

高林 雄一

九州シンクロトロン光研究センター

背景

現在、国際規模で計画が進められている電子・陽電子リニアコライダーでは、ビームサイズが数nmと極端に小さいため、そのビームサイズを測定するには、特殊な方法が必要となる。最も有望視されているのが、新竹モニタ[1]と呼ばれるものである。新竹モニタでは、2つのレーザービームによる干渉縞標的と電子(陽電子)が衝突(レーザーコンプトン散乱)することによって生成される γ 線が検出される。そのため、大強度・高安定度のレーザー、ビームを掃引するための電磁石、そして高度な実験技術が必要となる。

[1] T. Shintake, Nucl. Instrum. Methods A 311 (1992) 453.

目的

より簡便で、新竹モニタと相補的なビームモニタの開発を目指し、回折遷移放射を利用した、新しいビーム診断技術を提案[2,3].

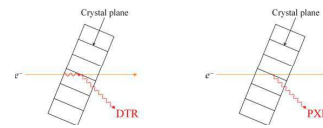
[2] Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, Nucl. Instrum. Methods A 808 (2016) 71.
[3] Yu.A. Goponov, M.A. Sidnin, K. Sumitani, Y. Takabayashi, I.E. Vnukov, submitted.

回折遷移放射

Diffracted Transition Radiation (DTR):

高速の荷電粒子が固体に入射すると、入り口面において前方に遷移放射が生成される。固体が結晶の場合、遷移放射の一部はブラッグ方向に回折される。

DTRの他に、ブラッグ方向に放出されるものとして、パラメトリックX線(PXR)がある。PXRは、入射荷電粒子がまとっている擬似的光子が結晶によって回折されたものと解釈することができる。



シミュレーション結果

ポイント1:

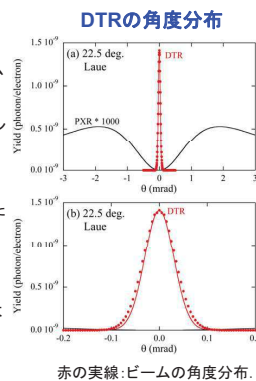
リニアコライダーの衝突点におけるビームサイズは数nmと非常に小さく、測定が難しい。しかし、ビームの角度拡がりには数10 μ radと比較的大きい。そこで、本研究では、ビームの角度拡がり σ を測定することを提案。ビームサイズ σ は、 $\sigma \times \sigma = \epsilon$ (ϵ はエミッタンス)から求めることができる。

ポイント2:

DTRの角度拡がりには、 $1/\gamma$ (γ はローレンツ因子)程度と、ビームの角度拡がりよりも十分小さい。そのため、DTRの角度分布は、主にビームの角度分布を反映する。つまり、DTRの角度拡がりからビームの角度拡がりを求めることができる。

ポイント3:

PXRの角度拡がりには、ビームの角度拡がりよりも大きい。そのため、ビームの角度拡がりモニタには向いていない。



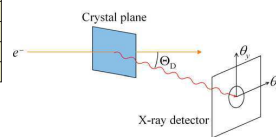
赤の実線: ビームの角度分布。

計算条件

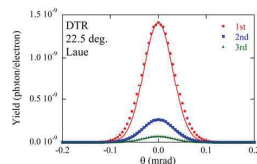
ビームエネルギー	200 GeV
標的	50 μ m厚 Si結晶
回折面	(220)
標的からX線検出器までの距離	2 m
X線検出器のピクセルサイズ	10 μ m
ビームの角度拡がり	30 μ rad

X線のエネルギー

ブラッグ角 (観測角度)	ブラッグエネルギー
11.25° (22.5°)	16.5 keV
22.5° (45°)	8.4 keV
45° (90°)	4.6 keV

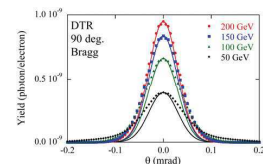


回折次数依存性



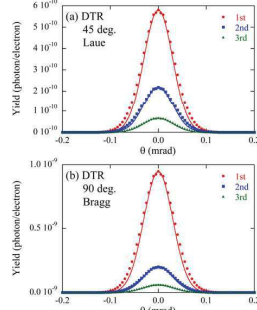
回折の次数が大きくなると、DTRの強度が減少。高次の次数においても、ビームの角度分布とDTRの角度分布がよく一致。高次の次数に関しても有効であることを示唆。

ビームエネルギー依存性



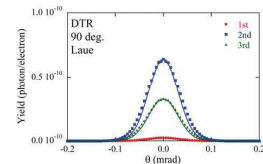
ビームエネルギーを下げていっても、ビームの角度分布とDTRの角度分布がよく一致。低エネルギー側(リニアックの上流側)においても有効であることを示唆。ただし、50 GeV程度からビームの角度分布とDTRの角度分布のずれが大きくなる。

観測角度依存性



広い観測角度範囲(22.5°~90°)において、ビームの角度分布とDTRの角度分布がよく一致。

ラウエ対ブラッグ配置

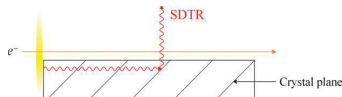


観測角度が大きい場合、ラウエ配置では、結晶におけるX線の吸収の効果が大きい。ブラッグ配置の方が、X線の吸収の効果が小さいので有利。

表面回折遷移放射

Surface Diffracted Transition Radiation (SDTR):

ビームを結晶内部に入射させずに、結晶表面近傍を通過させるだけでも、電子のまとう電磁場の一部が結晶内部に侵入するので、DTRは生成されると考えられる。このSDTRを利用すれば、結晶の破壊を回避できると考えられる。SDTRはまだ観測されていない放射現象なので、検証実験が必要。



新竹モニタとの比較

	利用放射現象	測定対象	操作性	コスト	設置可能台数	ビーム強度	検証実験
新竹モニタ	レーザーコンプトン散乱 γ 線	ビームサイズ	難	高	~1	大	実施済 [4]
DTRモニタ	DTR	ビームの角度拡がり	易	低	複数	小	未実施
SDTRモニタ	SDTR	ビームの角度拡がり	易	低	複数	大?	未実施

DTR・SDTRモニタは、新竹モニタと相補的なモニタ。

[4] J. Yan et al., Nucl. Instrum. Methods A 740 (2014) 131.

まとめ

回折遷移放射(DTR)を利用した、新しいビーム診断技術の提案

長所: 測定が容易、測定装置が低コスト、ビームを掃引するための電磁石が不要、複数設置可能
短所: 大強度のビームを入射させると結晶が破壊される

結晶の破壊を避けるため、表面回折遷移放射(SDTR)の利用を提案
SDTRはまだ観測されていない放射現象であるため検証実験が必要

謝辞

この研究は、ロシアのベルゴロド大学のGoponov氏、Sidnin氏、Vnukov氏、高輝度光科学研究センターの隅谷氏との共同研究によるものです。本研究の一部は、JSPS科研費26400304の助成を受けたものです。