

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11944

研究課題名(和文) 多重エッジ放射干渉効果の研究

研究課題名(英文) Investigation of multiple interference effect of edge radiation

研究代表者

江田 茂 (Koda, Shigeru)

公益財団法人佐賀県産業振興機構 (佐賀県産業イノベーションセンター産業振興部研究開発振興課、九州シンク・加速器グループ・主任研究員)

研究者番号：50311189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：周期的に配置された3極ウィグラーを相対論的電子が通過することで、ウィグラー間直線部で発生するエッジ放射が増大する多重エッジ放射干渉効果を提案し、そのスペクトル、空間分布等基本的性質を理論的モデルを用いて明らかにした。この3極ウィグラー磁石配置をEdge Radiation Undulator (ERU)と名付けた。ERU放射は、アンジュレータとほぼ同じオーダーの放射強度を有していることが解析的に示された。ERUはアンジュレータとは放射原理がまったく異なることを考えると非常に興味深い結果であった。また特定条件のアンジュレータ放射は、ERU放射で近似できるという意外な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3極ウィグラーを周期的に配置した磁石系においてエッジ放射が増大する効果は、エッジ放射研究における新しい考え方である。この放射のスペクトル、空間分布等の基礎的一般的性質を解析的に明らかにしたことはエッジ放射研究において重要な成果と考えている。さらにこの増大効果が、アンジュレータに近い放射強度を有することが解析的検討から示されている。放射光を基礎とする既存高輝度光源であるアンジュレータとはその放射増大の原理が大きく異なる点を考えると、このエッジ放射増大効果は、高輝度放射光源に関する学術的及び応用的観点双方において新しい関心を生み出すものと考えている。

研究成果の概要(英文)：An intensification effect of edge radiation was investigated. Superimposing fields of edge radiations due to relativistic electron passing through straight sections between periodic alignments of three-pole wigglers, the radiation intensity was estimated to be proportional to square of number of the straight sections. By analogy with magnet alignment of undulator, the alignment was named edge radiation undulator (ERU). The elementary properties of the ERU radiation such as spectrum structure and spatial distribution were clarified by using a simple analytical model. The peak intensity of the ERU radiation was thought to be same order of a planar undulator. Considering difference between radiation principles of the ERU and the undulator, the result about the radiation intensity was very interesting. Furthermore a result was obtained as follows. The undulator radiation with specific K value could be partially understood as the ERU radiation.

研究分野：加速器科学

キーワード：エッジ放射 アンジュレータ ウィグラー 放射光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者らの先行研究 [1]、[2] で、3 極超伝導ウィグラー設置直線部において、ウィグラー前後の直線部からのエッジ放射がウィグラー励磁によって増大することが理論的にも実験的にも示された。この効果は 3 極ウィグラー前後の二つの直線部からのエッジ放射の電場が重ね合わせられることによって発生すると理解された。さらにこの効果は、単一の 3 極ウィグラーのみならず複数の 3 極ウィグラーを周期的に配置することで増大する原理的可能性が示された。これはそれまでにないエッジ放射研究の観点であり、新しい高輝度放射機構の可能性を示すものであった。先行研究 [1] では周期的 3 極ウィグラー配置におけるエッジ放射最大化の条件が得られた。この放射の性質をより広く明らかにすることが次の課題となった。

2. 研究の目的

相対論的電子が周期的に配置された 3 極ウィグラーを通過する際に発生するエッジ放射増大効果について、スペクトル構造、空間分布等一般的性質を解析的及び数値計算的手法を用いて明らかにする。

3. 研究の方法

3 極ウィグラーが周期的に配置された磁石系を、アンジュレータに似た磁石配列を持つことから Edge Radiation Undulator (ERU) と名付けモデル化した。この ERU モデルに対し Paraxial 近似理論 [3] を用いて定式化し、その放射の一般的な性質を求めた。これにより ERU のスペクトル構造、放射の空間分布等放射の基礎的性質を解析的に求めた。得られた ERU 放射の式と既知のアンジュレータ放射の式を用いて ERU とアンジュレータの放射光強度の解析的な比較を行った。また ERU の電子軌道とアンジュレータ内電子軌道の比較から、既存アンジュレータにおける ERU 放射の観測可能性を数値計算を用いて検討した。

4. 研究成果

ERU 放射を検討するために導入したモデルを図 1 に示す。二つの偏向磁石の間に等間隔で 3 極ウィグラーと直線部が配置され、相対論的電子 ($\gamma \gg 1$) が通過する。ERU に Paraxial 近似理論を適用するにあたり、放射の性質を解析的に取り扱うことを容易とするためウィグラー及

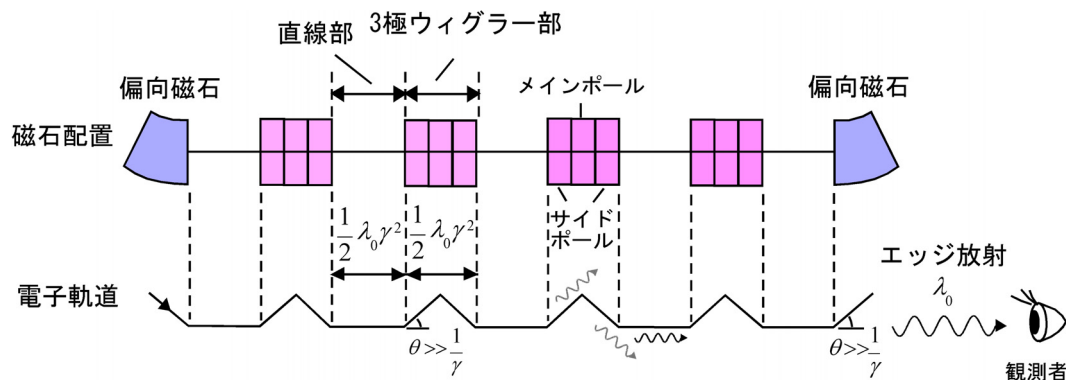


図 1 Edge radiation undulator (ERU) のモデル

び偏向磁石と直線部との境界ではフリッジ磁場はなく、電子軌道はウィグラー及び偏向磁石側で軌道偏向角が直ちに $1/\gamma$ ラジアンより十分大きくなると理想化した。直線部軸方向下流で観測する波長を λ とした時、エッジ放射が波長 λ_0 で最大となる条件は、先行研究 [1] により直線部及び 3 極ウィグラー部の長さが等しく $\lambda_0^2/2$ の時である。この ERU モデルに paraxial 近似理論を適用することで、放射強度最大波長 λ_0 に対し、一般波長 λ での電場として次の式が得られた。

$$\vec{E} \approx \frac{ie\gamma^2}{\pi\epsilon_0 z} \vec{\theta} e^{i\frac{\pi}{\lambda} z} \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2} \sin \left[\frac{\pi}{4} \frac{\omega}{\omega_0} \left\{ 1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2 \right\} \right] \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \cos \left[\pi \frac{\omega}{\omega_0} \left\{ 1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2 \right\} k \right] \right] \quad (1)$$

ここで z は直線部下流軸上の観測者位置、 ω_0 はそれぞれ ω_0 に対応する角振動数、 N は直線部数、 k は k 番目の直線部、 $\vec{\theta}$ は直線部軸に対する z での放射角の水平、垂直成分から成る 2 次元ベクトルである。この式から電場の絶対値は λ について対称で、放射電場の大きさは

リング上の構造を持つことがわかる。また電場が放射角 θ に比例することからラジアル偏光である。これは個別直線部のエッジ放射がもともと持つ性質に由来している。(1)式から一般的な ERU 放射強度式として

$$\frac{d^2W_E}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^3 \epsilon c} \gamma^2 \frac{\left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2}{\left\{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2\right\}^2} \sin^2 \left[\frac{\pi}{4} \frac{\omega}{\omega_0} \left\{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2\right\} \right] \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \cos \left[\pi \frac{\omega}{\omega_0} \left\{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_\gamma}\right)^2\right\} k \right] \right]^2 \quad (2)$$

が得られた。これにより ERU 放射のスペクトル構造、空間分布が明らかになった。図 2 に ERU 放射のスペクトル及び空間分布例を示す。式(2)が に対して極大となる条件より、ERU のスペ

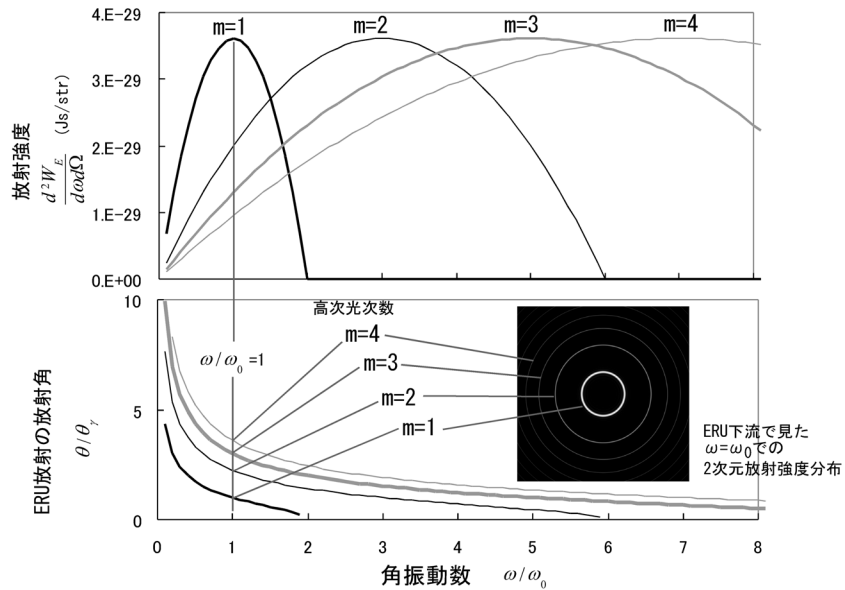


図 2 ERU 放射のスペクトル構造と空間分布

クトル構造には整数で特徴づけられる短波長領域の構造が見られた。これはある種の高次光である。図 2 における m の値がこの次数を意味する。高次光のピーク強度は 1 次光と等しく直線部数の自乗に比例し、そのバンド幅は次数の増大に伴い広がってゆく。また ERU 放射の空間分布は放射角が $1/\gamma$ ラジアン程度の同心円状の分布をしており、波長が λ_0 では同心円分布の最も内側のリング状放射が最も強く、 λ_0 が短波長になるにつれてピーク強度は、より外側のリングへと移ってゆくというスペクトルと空間分布の関係性を有する。

また ERU とアンジュレータの放射強度比較を行った。ERU 放射強度を与える式(2)と一般的なプラナーアンジュレータ放射の強度式の比を取り、アンジュレータに対する ERU 放射の相対強度を定式化した。ERU とアンジュレータの電子エネルギー、放射波長、周期数は等しいとし、アンジュレータ、ERU それぞれの長さ当たりの放射強度の比を求めた。得られた結果を図 3 に示す。図 3 左側は ERU とアンジュレータ (K 値=1) の水平面上の強度分布である。図 3 右側はアンジュレータ K 値に対する ERU とアンジュレータの放射強度比である。図中の R_p は ERU の 1 次光 ($m=1$) に対応するリング状分布のピークとアンジュレータの 1 次光のピークの強度の比で

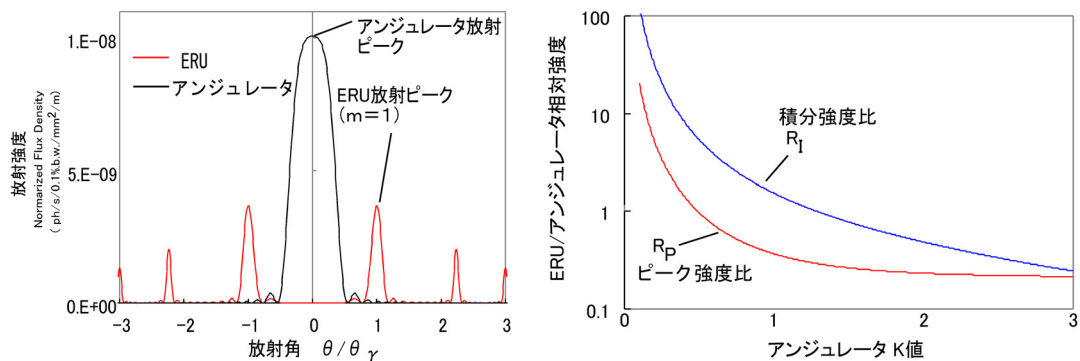


図 3 アンジュレータ K 値に対する ERU 放射とアンジュレータ放射の強度比 ($\theta = 1/\gamma$ rad)。

ある。R₁ は ERU の 1 次光であるリング状分布の積分強度とアンジュレータ 1 次光の積分強度の比である。K 値=1 領域ではアンジュレータに比べ ERU のピーク強度はやや弱く、積分強度ではやや強い、オーダーとしてはピーク値、積分値ともにアンジュレータに近いという結果を得た。ERU が、アンジュレータのような放射光を基礎とする高輝度光源と放射原理がまったく異なることを考えると、アンジュレータに近い高輝度が得られることは非常に興味深い結果である。

ERU とアンジュレータの関係について、別の観点からの検討も行った。ERU 放射の本質は図 1 で示したように電子軌道が周期的に直線領域と軌道偏向の大きな領域を繰り返すことにある。軌道偏向の大きな領域が観測者の観測する電場には寄与せず、直線部のエッジ放射からの電場のみが in phase で足しあげられることで高い輝度を得ることができる。この観点でプレーンアンジュレータ内の電子軌道を見ると、観測者から見て軌道偏向が緩慢で直線運動に近い領域である軌道の最大変位部分とアンジュレータ長手軸と交差する軌道傾斜の大きな部分が交互に繰り返されていると解釈でき、アンジュレータ内軌道を ERU 内軌道と対応付けられると考えられた。この対応を図 4 に示す。この対応付けが成立するための条件は K 値が特定の値 (K= 2) を

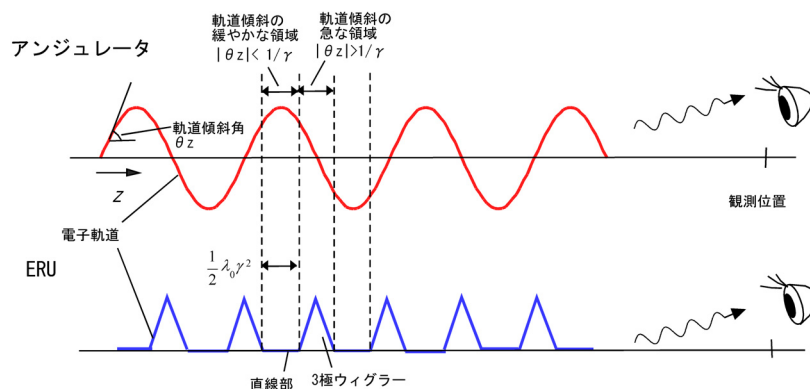


図 4 アンジュレータ内電子軌道の ERU 近似

とすることであった。この時、アンジュレータ 1 次光の半分の波長において ERU 放射が実現されると見込まれた。計算結果を図 5 に示す。図 5 上側は既存放射光計算コード SRW で計算したアンジュレータ放射、下側は図 4 の対応から式 (2) の ERU モデルで計算した結果である。放射強度は低下しているものの放射角 $1/\gamma$ rad において ERU の特徴的なリング状放射が見られる。このことは ERU とアンジュレータの意外な関係であるとともに、ERU のエッジ放射増大原理の一般性を示していると考えられる。

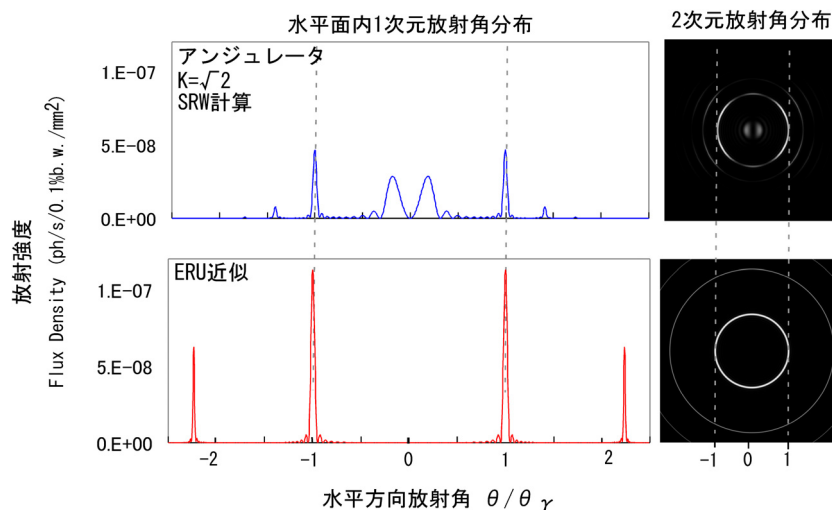


図 5 既存計算コード SRW によるアンジュレータ放射の計算と ERU 近似放射の比較 ($\theta = 1/\gamma$ rad)。

以上まとめると ERU はエッジ放射固有の放射強度増大方法であり、その放射の基礎的性質は本研究によって明らかになった。さらに放射光を基礎とする高輝度光源であるアンジュレータに近い放射強度を持つことが解析的に示された。また軌道偏向の少ない領域と大きな領域の交互の入れ替わる電子軌道が、ERU 放射の増大効果の本質ととらえ、この考察からアンジュレータ放射の一部が ERU 放射で理解できることを示した。これらの結果を整理し原著論文として発表された。

<引用文献>

S. Koda, Y. Takabayashi, “ Interference effect of edge radiation at three-pole wiggler section ”, Japanese Journal of Applied Physics, 55, 096301 (2016)

S. Koda, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, “Observation of intensification of edge radiation from a superconducting three-pole wiggler section”, Japanese Journal of Applied Physics, 56, 126401 (2017)

G. Geloni, V. Kocharyan, E. Saldin, E. Schneidmiller, M. Yurkov, "Theory of edge radiation. Part I: Foundations and basic applications", Nuclear Instruments and Methods A 605, 409 (2009)

S. Koda, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, “Investigation of edge radiation intensification effect generated by periodic alignment of three-pole wigglers”, Japanese Journal of Applied Physics, 61, 036001 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koda Shigeru, Takabayashi Yuichi, Kaneyasu Tatsuo, Iwasaki Yoshitaka	4. 巻 61
2. 論文標題 Investigation of edge radiation intensification effect generated by periodic alignment of three-pole wigglers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 036001 ~ 036001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac4a0a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 江田茂、高林雄一、金安達夫、岩崎能尊
2. 発表標題 3極ウィグラー周期的配置によるエッジ放射増大効果実現のための磁場分布の基礎的検討
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江田茂
2. 発表標題 SAGA-LSにおけるハイブリッド型3極超伝導ウィグラー開発とその長期運用
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江田茂、高林雄一、金安達夫、岩崎能尊
2. 発表標題 3極ウィグラー周期配置によるエッジ放射増大の検討
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------