

論文内容の要旨

論文題目

DYNAMICS OF COHERENT SYNCHROTRON RADIATION BY PARAXIAL APPROXIMATION

(近軸光線近似による干渉性シンクロトロン輻射の解析)

氏名 吾郷 智紀

バンチ化された電子は偏向電磁石により軌道が曲げられ、シンクロトロン輻射によりそのエネルギーの一部を失う。高エネルギーにおけるシンクロトロン輻射は低周波から X 線にいたる幅広いスペクトルをもつが、この周波数スペクトルのうち、輻射波長がバンチ長と同等または長い波長成分は位相がそろうために干渉性を有する。この長波長、すなわち低周波成分の輻射は「干渉性シンクロトロン輻射 (Coherent Synchrotron Radiation : CSR / coherent radiation)」と呼ばれ、バンチを構成する膨大な数の電子からの輻射がほぼ同位相で重なり強めあうために CSR の輻射強度の増幅率は膨大なものとなる。

この大強度の CSR を赤外領域の放射光として利用しようとする試みも一部で見られるが、CSR は輻射したバンチ自身に影響を与えるために、ほとんどの加速器において有害であり望ましいものではない。CSR による最も大きな影響は電子にエネルギー変化を与えることである。CSR により電子が進行方向に不均一に加速または減速され、バンチのエネルギー分布の幅が広がり、バンチが著しく不安定な状態に陥る可能性がある。

将来の電子加速器では、利用者の様々な要望により、長さの短いバンチが求められる傾向がある。また、大強度 (大電流) のビームへの要望もあり、バンチに含まれる電子の個数も増やしたい。短く、多粒子のバンチは偏向磁石で非常に強度の高い CSR を発生するため、バンチ長・粒子数ともに CSR によって決められる安定性の限界が存在する。つまり、短バンチ・大電流が志向される将来の電子加速器では、CSR の影響が深刻な問題となりうる。したがって、CSR を精確に計算しビームへの影響を評価することは、短バンチ・大電流が希求される将来の電子、陽電子加速器の設計において必要不可欠であり、極めて重要な課題である。

ある理想的な状況を仮定すれば、CSR による粒子のエネルギー変化率の式を導くことができるが、極めて短いバンチで、長さが変化しない場合を除き、実際の加速器でこれら

の式を用いて精確に CSR の影響を評価することはできない。したがって、CSR の計算は数値計算に頼らざるを得ない。

現在既にいくつかの CSR 計算コードが存在する。それらは遅延ポテンシャルを時々刻々積分する手法であり、過渡状態の CSR を計算できる。CSR は真空チェンバーの影響を受けるが、その効果は上下に置いた 2 枚の完全導体平行平板を想定し、鏡像法にもとづくイメージ電荷をバンチと一緒に走らせることで平行平板の効果を演出している。この手法の最大の欠点は遅延ポテンシャルの積分が恒常的に過去への遡及を要するために計算に時間がかかり、のみならず、遮蔽が強い場合には多数のイメージ電荷がつくる場合も計算せねばならず、大きな計算になってしまう点である。この手法による数値計算はスーパーコンピュータや PC クラスタなどにより実行されるのが通例である。もうひとつの欠点が左右の壁の効果が考慮されていない点である。

我々は CSR を計算する新たな手法を考案し、現実的なハイク形状の真空チェンバーで遮蔽された CSR を過渡状態で計算することに初めて成功した。本論文はこの新しい手法をまとめたものである。この手法の最も重要な点は電磁波の近軸光線近似 (Paraxial Approximation) である。輻射スペクトルのうち、低周波成分である CSR は非干渉性の高周波成分に比べ広い角度で放出されるが、それでもその角度は進行方向の基準軸に対し 0.01 radian (数度) 程度でしかない。つまり、CSR の大部分は軸のまわりの狭い角度に放出される。そして CSR は真空パイプ表面での反射のために基準軸から大きく離れることはできず、常に基準軸に対し小さな角度を保ちながら伝播する。要するに、CSR は基準軸の周りを伝播する「近軸光線」とみなせる。近軸光線は正弦波に近いため、激しく振動する正弦波の因子を Fourier 変換によって剥ぎ取ることで、残りの緩やかな変化をする部分だけ扱えばよい。これにより現在の PC で CSR の電磁場のメッシュ計算が可能になる。

電磁場 E, B による記述のおかげで、真空パイプの境界条件を課すことは容易である。既存の計算手法では真空チェンバーの効果は鏡像法に頼っているため、CSR の遮蔽は完全導体の平行平板しか扱うことができなかったが、我々の手法では偏向磁石内の電子の軌道に沿って湾曲したパイプ状の境界に resistive wall を考慮することもできる。つまり、銅など有限の電気抵抗率をもつ材質から成るパイプを境界条件として考慮することも可能である。

我々の手法を用いた CSR の計算は既存の 3 つの理論とよく一致し、直線パイプの resistive wall wakefield もまた理論と極めてよく一致することが示された。つまり、CSR を近軸光線とみなすことができることが証明された。そして、バンチ長が数 mm の storage ring では、既存の retarded potential による手法は平行平板の仮定のために左右の壁の効果が考慮されておらず、CSR によるエネルギー変化の値で 46 % もの誤差を生ずる。この誤差は無視できる許容範囲を超えており、既存の手法に基づく計算コードは storage ring の CSR の計算には使えないことが明らかになった。

我々の新しい手法では CSR の場を計算する際に、分布が変化しない rigid な Gauss 分布のバンチを仮定している。しかし、storage ring では放射減衰によりバンチの電荷分布は時々刻々と変化し、CSR の影響でもバンチ長が変化する。この rigid バンチの仮定は粒子追跡法による計算と我々の手法を組み合わせることで払拭することができる。つまり、マクロ粒子の任意の形状の電荷分布を幅の細い Gauss 分布の重ね合わせで表現し、任意の分布のバンチが出す CSR を計算することが可能となる。

本論文では、将来計画されている SuperKEKB と CLIC の Damping Ring を挙げて、CSR によって引き起こされる粒子の進行方向の運動への影響も調べた。計算の結果、SuperKEKB におけるバンチ長 3mm, バンチ電流 2mA のバンチは現在の設計値では不安定であることが判明した。現在考えうる対策としては、真空パイプを細くし CSR を遮蔽することでその強度を弱めることである。我々の計算では一辺の半分長さが 25mm の正方形断面のパイプで CSR の影響がほとんど無くなることが分かった。しかし、細いパイプは

resistive wall の航跡場により後続のバンチに悪影響を及ぼす恐れがあるため、この処方が CSR によって引き起こされる不安定性の解決策となりうるか否かは現時点では不明である。この調査は今後の課題である。一方、CLIC の damping ring では長さ 1.3mm、バンチ電荷 0.48nC のバンチは安定に ring を周回できることが判明した。これはバンチ電荷が小さいためである。そして現在の設計値である一辺の半分の長さが 20mm の正方形断面のパイプ（実際には半径 20mm）を用いた場合の不安定性の閾値はバンチ電荷が 1nC であることも突き止めた。つまり現在の CLIC damping ring の設計値はバンチ電荷について 2 倍程度の余裕があることが明らかになった。

本研究により CSR によって生ずる粒子のエネルギー変化を極めて現実的な状況により計算することが可能となった。しかも CSR の計算時間は通常の PC で数分～数十分、粒子追跡を実行した場合でも数時間である。本論文ではその手法を紹介し、また、その応用として 2 つの storage ring を取り上げ、CSR による単バンチの縦方向の不安定性の解析をした。本研究で構築した手法は柔軟性に富み、storage ring のみならず FEL や ERL など、どのような加速器にも適用できる。したがって、CSR の影響が懸念される将来の電子加速器の設計において、本研究は極めて有用である。実際、本論文で取り上げた CLIC damping ring の安定性解析は、この手法に目をつけた CERN の研究者の依頼により我々が実行したものである。また、我々の手法は基準軸にほぼ平行に伝播する電磁波の計算をするものであるので、我々の手法において真っ直ぐな真空パイプの径を緩やかに変化させることでビームの collimation の計算にも応用可能である。

本論文で取り上げた storage ring の研究では、CSR が関与するビームの縦方向（進行方向）の力学のみを調べた。しかし、実際には粒子は 3 次元の運動をしており、横方向（水平・垂直）の運動の安定性も解析しなければならない。CSR による横方向の力 F_x 、 F_y を取り入れて 3 次元の計算を行い、emittance の増加を評価することが今後の課題である。