

氏名 橋 本 智

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大乙第17号

学位授与の日付 平成8年3月21日

学位授与の要件 数物科学研究科

学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 NONLINEAR RESONANCES IN A MULTISTAGE
FREE-ELECTRON LASER AMPLIFIER

論文審査委員 主査教授 鈴木敏郎

教授 平松成範

教授 佐藤康太郎

助教授 平田光司

教授 安東愛之輔

（姫路工業大学）

助教授 高山 健

（高エネルギー物理学研究所）

博士論文の要旨

将来のTeV領域の高エネルギー衝突型加速器として電子陽電子リニアコライダーが有力である。仮に、線形加速器の加速勾配を20MeV/mと仮定すると、電子ビームを500MeVまで加速するには長さ25kmのリニアックが必要である。従ってリニアコライダーをできるだけ現実的な規模とコストで建設するには、高加速勾配の加速管とそれにマイクロ波を供給する高出力高周波源が必要になる。そのひとつのアイデアとして2ビーム加速器(Two Beam Accelerator; TBA)が1982年にA.M.Sesslerにより提案された。この方式では高加速勾配の線形加速器に平行して大電流ビームを走らせて、この大電流ビームの持つ運動エネルギーの一部を大電力マイクロ波に変換して高加速勾配の加速管に供給する。このためのエネルギー変換装置の一つとしてマイクロ波領域の自由電子レーザー(Free-Electron Laser; FEL)の使用が考えられている。ウイグラーと呼ばれる周期的磁場の中で蛇行運動をする電子ビームと矩形導波管内を伝搬する TE_{01} モードのマイクロ波との間のself-consistentな相互作用によりマイクロ波が増幅されるのがFELである。FEL内で電子ビームはエネルギーを失った後、誘導加速器によって再加速される。このようにTBAはFELと誘導加速器を一つの周期とする多段構成型の高周波源を使用しているため、加速器システム全体のエネルギー効率が非常に高くすることができる。

このような多段構成のマイクロ波FELにおける大きな問題の一つはバンチした大電流ビームの長距離輸送である。この問題に大きな影響を与える可能性があるのが(1)位相空間内での非線形共鳴と(2)導波管高次モードである。(1)の非線形共鳴に関してはこれまでMurray&Liebermanの研究が唯一である。彼らはシミュレーションおよび理論解析によって、粒子のFEL-bucket内でのシンクロトロン運動の周期と多段構成FELの周期との間に共鳴が起こることを明らかにした。ただし、これまでに提案された2種類(旧式と新式)のTBA/FELのうち、彼らが対象にしたのは旧式の多段構成FELにおける共鳴現象であったが、このタイプのTBAは現在技術上実現が困難であると考えられている。2つの多段構成FELの違いはマイクロ波の取り扱いである。すなわち旧式の多段構成FELでは電子の感じるRF電場の変化はわずかであるのに対して、新式の多段構成FELでは電子の感じるRF電場は微小な値から非常に大きな値へとダイナミックにかつ多段構成FELの周期で周期的に変化する。このために位相空間内での粒子の運動は旧式の多段構成FELでは単振り子の方程式で、また新式の多段構成FELでは重さおよび長さが複雑に変化する非線形振り子方程式で表される。このように新式の多段構成FELではRFのダイナミックな変化による非線形性のために共鳴現象の理論的解析は比較的困難である。また(2)の導波管高次モードに関する研究はsingle-stage FELでは行われているが、TBAのような多段構成FELについてはこれまでにない。

本研究では新式の多段構成FELの駆動電子ビームのビーム力学を取り扱う。特に(1)位相空間内での非線形共鳴のメカニズムの解明 [1,2] と(2)導波管高次モードがビームに与える影響を評価する。本研究はシミュレーションおよび理論解析でこれらの問題を初めて明らかにするものである。

(1)の研究(学位論文第3章)では、先ずシミュレーションによって3次、4次共鳴が起こり、共鳴構造が電磁波の強さに強く依存することを明らかにした。またマクロ粒

子モデルを適用して、この共鳴現象を簡単なモデルで記述することを試みた。その結果、位相空間内の粒子の運動は、重さと長さが周期的に変化するような非線形振り子方程式で記述できること、その周期的変化が三角関数で表せることを明らかにした。さらに円形加速器で一般的な β 関数、チューンの概念を多段構成FELに新たに導入し、Isolated resonance theoryを適用して、多段構成FELの非線形共鳴を摂動論で解析する手法を開発した。摂動論による結果は位相空間の共鳴構造がRF電場の強度すなわち導波管のサイズに強く依存することを示しており、シミュレーション結果と定性的に一致することを示した。

(2)の研究では(学位論文第4章)では、シミュレーションによって高次モードの増幅過程を調べ、 $TE_{2,1}$ 及び $TM_{2,1}$ モードの増幅の影響が基本モードの $TE_{0,1}$ モードに比べて無視できなくなるほど大きいこと、高次モードが存在する場合にも非線形共鳴が生じることを明らかにした。また理論解析については、 $TE_{0,1}$ モードのみを取り扱う従来のマクロ粒子モデルに高次モードを摂動として繰り込んで、その増幅過程が $TE_{0,1}$ モードと同じく簡単な関数で表せることを示した。高次モードによる共鳴構造の変化はチューンシフトによって定性的に説明できることを示した。

結論として多段構成FELにおいて大電流ビームの長距離輸送を可能にするには、位相空間における共鳴のために生じるビーム不安定性が発生しない領域にFELパラメータを設定する必要があることが分かった。また各段のFELで一様なFEL増幅を可能にするには高次モードの発生をおさえる必要性を明らかにした。本研究はこれらの問題を初めて取り扱ったものであり、将来のTBA/FELのための多段構成FELにおける大電流ビームの不安定性の理論解析に対して十分に寄与するものである。さらに本研究で用いた摂動論は相対論的クライストロンや加速管を用いたFEL以外のTBA構想にも適用する事ができ、今後の発展性は大きいと言える。

***** REFERENCE *****

- [1] S. Hashimoto, K. Takayama, Physics Letters A208(1995) p127.
- [2] S. Hashimoto, K. Takayama, Proc. 17th. Int. FEL Conf., Nucl. Inst. and Meth., (in press).

論文の審査結果の要旨

橋本智君の論文は、電子-陽電子リニアコライダ-のマイクロ波源として自由電子レーザー(FEL)増幅器を用いるいわゆる2ビーム加速装置(TBA/FEL)についての理論的研究で、特にこれに必要な多段FEL増幅器について解析したものである。彼はシミュレーションによりマイクロ波を増幅する電子のFELパケット内のシンクロトロン振動と、FELが多段であるための周期性とに起因する非線形型共鳴により電子ビームが失われ、増幅効率が落ちてしまうという事を見出した。更にマクロ粒子モデルと摂動論とにより、定性的にシミュレーションの結果を再現した。これによると、マイクロ波の電場強度即ちパワー密度が大きいほど共鳴の強さは強くなり、共鳴を避けるためマイクロ波の出力を下げるか、または導波管のサイズを大きくしなければならなくなる。前者は強電場が得られるというTBA/FEL方式の魅力を損なうものである。なおMurray-Liebermanは増幅されたマイクロ波を徐々に取り出す旧方式のアイデアに基づくFELについて共鳴現象を発見、解析したが、ここで橋本君が行ったのはマイクロ波を各段毎に取り出す新方式(旧方式では技術的問題点が多い)の場合についてである。この場合は重さと長さが周期的に大きく変化する非線形振子の方程式を扱う事になり、理論的取扱いがむずかしくなっている。

また導波管のサイズを大きくすると高次モードの影響が大きくなると考えられるが、シミュレーションによって $TE_{2,1}$ 、 $TM_{2,1}$ の高次モードの増幅過程を解析し、これらの高次モードの増幅の影響が無視できず、この場合も非線形共鳴が生じることを示した。更にマクロ粒子モデルによって理論的解析を行い、チェーンシフトの概念によって共鳴現象を定性的に説明できることを示した。高次モードを取り入れて非線形共鳴を解析したのは橋本君が最初である。

このように橋本君の論文は多段FELをTBAのマイクロ波電源として用いる際の重要な問題点を指摘したものである。従って、この論文は数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文として十分な内容を持っているものと判断した。なおこれについての論文をPhysics lettersに投稿し受理されている。