

氏 名 張 曉 龍

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第286号

学位授与の日付 平成9年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Experimental Study of Fast Beam-Ion
Instability at AR

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 春日 俊夫
教 授 佐藤 康太郎
教 授 平松 成範
教 授 黒川 眞一
助 教 授 伊澤 正陽
教 授 横谷 馨（高エネルギー加速器研究機構）
助 教 授 福間 均（高エネルギー加速器研究機構）
助 教 授 末廣 直樹（筑波大学）

Recently a new type of ion related instability, *namely fast Beam-Ion Instability (FII)*, was predicted by several researchers for accelerators with high currents, long bunch trains and low emittances. Even though ions are cleared by a bunch gap and the normal ion trapping does not appear, the FII may arise during a passage of a bunch train. Ions created by bunches are accumulated rapidly within the train. If the head bunch of the train start to oscillate due to some disturbance, the oscillation is resonantly coupled to that of the trailing bunches through ions and amplified. As a result FII has very fast growth in the tail of the bunch train.

This kind of instability might be very harmful to B-factories. For instance, the e-fold growth time for KEKB HER with the bunch number 500 is estimated to be about 70 turns. Up to now FII has not been clearly observed by any experiments; therefore, experimental cross checks are highly demanded. We performed an experiment in November 1996 at AR that aimed to detect FII.

In the experiment, AR was filled with 100~200 bunches train of 2 ns bunch spacing and 50 bunches train of 4 ns spacing. Since the harmonic number of AR is 640, the bunch gap was large enough to prevent usually ion trapping from being established. In order to excite FII, nitrogen gas was intentionally leaked into the AR vacuum chamber. The vacuum pressure was kept in the order of 30~80nTorr. We observed the spectrum of the beam oscillation by a HP8562E spectrum analyzer and recorded the vertical position of each bunch in the train on a memory board.

The experiment was carried out in the following way: (1) Firstly, we stored a beam of a long bunch train with the help of the beam feedback system and kept observing the vertical betatron sidebands of the beam by the spectrum analyzer. As the beam current decreased, the sideband was diminishing and eventually disappeared when the beam current became lower than a threshold; (2) then we deliberately leaked nitrogen gas into the vacuum chamber. As soon as the gas was leaked, we observed strong vertical instability and the vertical betatron sidebands also appeared on the spectrum analyzer. Then we recorded the data of the spectrum analyzer and the vertical bunch oscillations of every bunch turn by turn for 1600 turns on a memory board. During the whole experiment, we recorded totally 67 data samples. Since the instability was excited only after we injected nitrogen gas into the ring, we are confident the instability that we observed was an ion-related instability.

We extracted the vertical betatron oscillation of bunches by filtering out unnecessary frequency components by discrete Fourier transform and digital filter techniques. By analyzing these oscillations, we determined the phase and the amplitude of every bunch every turn when it passed the observation point of the A R.

The oscillation of bunches showed typical characteristics of FII, such as:

- the oscillation amplitude was growing from head to tail in the bunch train;
- the oscillation pattern in a bunch train was a traveling wave from the head to the tail of the train;
- the almost constant phase shift between bunches was consistent with the coupled bunch instability caused by ion oscillation;
- the sideband spectrum showed the characteristic ion oscillation frequency.

We conclude that we observed FII at A R

張曉龍氏の博士論文内容は、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）トリスタンAR（Accumulation Ring, AR）を用いての高速ビーム・イオン不安定性現象（Fast Beam-Ion Instability, FBII）の実験的研究である。

従来より良く知られた円形加速器内ビームによるイオンの捕獲現象は、周回するビームの一部に“切れ目（ギャップ）”を入れることで避けることができる。FBIIは、ビームにギャップを入れても先頭バンチの横方向振動がイオンとの相互作用を通じて後続のバンチと結合し、その振幅が急激に増大する現象である。最近、Bファクトリーや高輝度放射光源用の大電流・低エミッタンスの電子円形加速器においてFBIIが問題となってきた。

本実験においては、ARに2 nsの時間間隔で連続100–200個のバンチを蓄積した。ARには640個のバンチを蓄積できるので、ギャップはイオン捕獲現象を避けるのに十分であった。FBIIを引き起こすために真空路に窒素ガスを導入し、ビームの鉛直方向の振動を観測した。観測は①放射光を用いてビームプロファイルを見ること、②ビーム位置検出器の出力のスペクトラム分析を行うこと、③個々のバンチの鉛直位置を各周回毎に1600周分デジタルメモリーに記録することにより行った。窒素ガスの導入後、鉛直方向の強い不安定現象が生じ、スペクトラム分析器に鉛直方向のベータトロンサイドバンドが現れた。デジタルメモリーに記録されたデータにはシンクロトロン振動の影響、ノイズ分が含まれている。この中から個々のバンチに対応するデータ列を取り出してフーリエ変換を行い、ベータトロン振動に対応する周波数域のみを取り出し、さらに逆フーリエ変換により時間領域に戻した。周波数領域は必要とする情報を失わないよう十分注意している。得られた個々のバンチの鉛直方向振動は、①振幅は先頭から末尾に向かい増大し、②振動パターンは先頭から末尾に向かい進行し、③バンチ間の位相差はほぼ一定であった。これらの結果は、すべてARにFBIIが生じていることを示している。

この論文では、ARを用いてFBIIの実験的検証を行っている。その中では膨大なデータを収集し、そこから必要な情報を抽出する方法の開発を行った。実験結果はARにFBIIが生じていることを示している。この研究は数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文としての内容に値すると判断した。