

BEAM STORAGE IN A SYNCHROCYCLOTRON

Makoto Inoue

Synchrotron Light Life Science Center, Ritsumeikan University (SLLS),

Noji-higashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

Abstract

A new 'storage' method in a sector-focusing synchrocyclotron where the acceleration, storage, and deceleration processes are repeated without extraction is proposed. It is not real storage but at the outermost orbit the beam has the maximum energy and stays long time then its phase slips into the deceleration region. In case of electron beam this system becomes a strong X-ray source by using a thin inner target at the maximum-energy orbit. The decelerated beam is dumped at the center with very low energy that reduces background X-ray. In case of proton beam this system becomes useful for a secondary-beam production experiment with a thin target.

シンクロサイクロトロンにおけるビーム蓄積

1. はじめに

近年、放射光なみの光子を小型の装置で得ようと、電子ビームをMeV領域に加速して光子線源とする試みが盛んになっている。リニアックの利用では、赤外線領域の小型のFELの実用化や、小型のリニアックとレーザーコンプトン後方散乱を組み合わせた軟X線源が開発されている。

立命館大学では6MeVおよび20MeVのマイクロトロンを入射器とした小型の電子蓄積リングにより、赤外線領域の放射光源とすると共に、蓄積ビーム中に微小なターゲットを置いて高輝度の硬X線源ともする「みらくる」の開発に成功している^[1]。加速器中にターゲットを置いて硬X線源とすること自体は、ベータトロンで行われてきたことであるが、「みらくる」ではビーム蓄積と微小ターゲットの組み合わせに特徴がある。

今回提案するものは「みらくる」のような高輝度低エミッタンスを目指すものではないが、蛍光分析による環境試料の微量元素検出などを目的とする、低バックグラウンドX線源を目指す試みである。入射・加速器と蓄積リングを一体化して、電子ビームをある程度蓄積し、薄膜ターゲットを置いてビームを再利用することによって、有効利用を図る。またビームを捨てる方法としては同一の加速器で減速することによりバックグラウンドになる無駄な硬X線を発生させないようにする。

このような要請に応える加速器として、シンクロサイクロトロンの原理を活用することを提案する。

2. 加速・蓄積リングとターゲット

蓄積リング中に薄膜ターゲットを置いてビームを繰り返し利用することは、インディアナ大学のPollockによって電子冷却装置付きの陽子ビーム蓄積リングで核物理の精密実験を行うために提案され、建設された。ビームはターゲットで加熱されるが、電子冷却法で冷却され低エミッタンスを回復するも

のである。このようなターゲット付きのクーラーリングはその後何カ所かで作られた。

一方、等時性のサイクロトロンで加速蓄積を行うASTORという提案があった。これは、PSI(当時はSIN)のJohoが示した^[2]、高周波加速電場が半径方向に勾配がある時の位相幅圧縮・拡張の原理に基づくリングであった。このときはパルス中性子源への適用を目指したものであり、上述の原理で最外周に蓄積された陽子ビームをパルス的にキックして取り出すというものであった。しかし強度を確保するためには、パルスの繰り返しをkHzにする必要があり、パルス中性子源で必要とされる数十Hzというパルスの繰り返しより速すぎたために実用機として計画されることはなかった。ただし薄いターゲットをリング内に置いて、高速中性子のモノクロビームを得たいときや、負のパイ中間子を得たいときには有効かもしれない。ASTORでは最外周で位相が広がり長時間滞在しているうちに減速位相に移り、位相圧縮しつつ減速されて最内周に移り、そこではまた位相が広がって加速位相に移るといった繰り返しをする。

3. 電子蓄積シンクロサイクロトロン

3.1 磁場と加速位相の考え方

今回は例題として、このような先人の考えを電子ビームに応用し、X線源とすることを提案する。しかし電子の場合は陽子と異なり、MeV領域で光速になってしまうので、等時性サイクロトロンの磁場を作ることは現実的でない。また薄いターゲットを最外周の軌道に置くためにはエネルギーによって軌道が変化することが必要なのでシンクロトロンは使えない。ベータトロンも磁場を時間的に変化させるので、繰り返しが遅く、また加速中は軌道が一定なので軌道中にターゲットを置くわけにはいかない。そこでシンクロサイクロトンの原理を応用する。

磁場としては古典的なシンクロサイクロトロンとは異なり、AVF(セクターフォーカス磁場)を使う

ので、FFAGシンクロトロンといってもよいが、別途入射器を使わないなど、イメージ的にシンクロサイクロトロンという方がふさわしいので、そのように表現することにする。なお、光速に近い電子ビームの軌道半径は、一様磁場であればエネルギーに比例して増加し、従って回転周期もエネルギーに比例することを利用してマイクロトン加速が可能であるが蓄積には適さない。

そこである程度の磁場勾配で中心から最外周まで磁場を上げていき、加速の周波数を変調してシンクロトロン加速をするが、最外周で引き出すことなく位相をずらして、かなり長期間最外周にビームを留め、さらに減速位相にして中心まで減速してビームを失わせる。

周波数が減少するタイミングで加速され、周波数が上昇するタイミングで減速される。この意味でも陽子加速の場合のシンクロトロンより、シンクロサイクロトロンに近い。

3.2 蛍光 X 線測定用小型シンクロサイクロトロン

重金属までの微量元素検出が環境試料、考古学試料などの検査にとって有用である。X線のエネルギーが高い方が、重元素検出には有利であることが知られている。「みらくる20」及び「みらくる6X」（蓄積電子エネルギーはそれぞれ20MeV及び6MeV）では鉛などの重元素のK殻に対応する蛍光X線が鮮明に測定できている。一方、エネルギーが高いと核反応などによるバックグラウンドが問題になる。通常のX線管より高エネルギーではあるが、小型化ということと、半導体検出器の窓によく使われるBeによるガンマ線の中性子発生の際値等を考慮して、2 MeV程度以下のX線源とするために、一応ここでは2 MeVのシンクロサイクロトロンとする。

3.3 磁場分布

非常に簡単な近似でセクター型AVF磁場におけるベータトロン周波数（チューン）は以下ようになる。（簡単のためスパイラル角は無しとする）

$$\nu_r^2 \approx 1 + k$$

$$\nu_z^2 \approx -k + F^2$$

ここで

$$k = \frac{r}{\langle B \rangle} \frac{d\langle B \rangle}{dr}$$

$$F^2 = \frac{\langle (B - \langle B \rangle)^2 \rangle}{\langle B \rangle^2} = \frac{1}{f} - 1$$

であり、 f はセクター部の磁場 B の占める割合である。

等時性サイクロトロンの磁場であれば

$$k = \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} = (\beta\gamma)^2$$

である。

いま電子のエネルギーが $\beta\gamma = 1$ （約212keV）になるまでは等時性の磁場で加速し、その後 $k = 1$ の磁場でシンクロサイクロトロン加速をするとする。

即ちシンクロサイクロトロン領域では磁場分布は

$$B = B_0 r$$

とする。

まとめると

E	0MeV	0.212MeV	2MeV	10MeV
β	0	0.707	0.892	0.975
γ	1	1.414	4.914	20.569
k	0	1	1	1
r	0	r_0	$2.09 r_0$	$4.48 r_0$
B	$0.707 B_0$	B_0	$2.09 B_0$	$4.48 B_0$
T	T_0	T_0	$1.66 T_0$	$3.25 T_0$

となる。ここで T は周期である。

一方、集束力はフラッターに関して

$$f \approx \frac{1}{3.2} \rightarrow F^2 \approx 2.2$$

とすると、ベータトロン振動数は

$$\nu_r : 1 \sim 1.41$$

$$\nu_z : 1.48 \sim 1.10$$

の範囲にある。ただし中心部はフラッターが十分には出ないので、上の値は目安である。

3.4 高周波加速位相

212keVまでは等時性加速なので一定周波数の加速でよい。そのまま続けると、 k 値が一定領域に入り位相が遅れて、減速位相に移る。そこで周波数を減らすように変調をかけると、先に減速領域に入った粒子も含め、ある程度の位相幅の粒子は高周波バケットに捕捉されてシンクロサイクロトロンとして加速を始める。最外周に達した頃に高周波の周波数を減る方向から増える方向にゆっくり変える。この時、シンクロトロンの同期位相 ϕ_s は0になり、安定領域は最大になる。つまり加速はされず蓄積状態になる。この最外周に薄いターゲットが置いてあり、X線を発生する。理想的には高エネルギーのX線を発生しなかった場合は、電子のエネルギー損失が少なくバケット内に留まる。やがて減速位相に移り、粒子は内側の軌道に向かう。

このような加速のためには台形的に周波数変調をするべきであるが、変調を三角関数的に行っても、最初の等時性加速の領域と最外周の蓄積領域では比較的一定周波数になるので実用になると考えられる。

3.5 ターゲットでのエネルギー損失など^[3]

電子がターゲット通過中、制動放射のX線の発生によるエネルギー損失とイオン化によるエネルギー損失を比較すると、高エネルギーの電子ではターゲットの原子番号と電子のエネルギーに比例して制動放射によるものが大きくなる。両者が等しい電子のエネルギーは鉛のターゲットの場合10MeV程度である。2MeVではイオン化による損失が数倍大きい。

2MeVから10MeV程度の電子のイオン化エネルギー損失は10mg/cm²のターゲット厚さのとき約20keVであり、これよりエネルギーが上がるにつれて緩やかに増える。

重い元素のターゲットはX線の発生量は多いが、多重散乱による角度の変化が大きくなる。多重散乱角はターゲットの厚さの平方根と原子番号に比例し、電子の運動エネルギーに反比例する。2MeVの電子ビームに対しターゲットを鉛だとすれば10mg/cm²厚(約10ミクロン)のターゲットのとき約0.5radであり、非常に大きい。

高エネルギーの制動X線を放出した電子は軌道から外れるのは、もちろんであるが、電子がターゲットを通過するとイオン化損失のためにエネルギーが下がり軌道半径が変わる。また、多重散乱によりエミッタンスが大きくなって、多くの電子が次のターンではターゲットをはずれる。これらのことから2MeV程度の電子ビームの場合はほとんどの電子が一度ターゲットに当たると軌道から外れてしまう。

強集束なので、ある程度のビームは回転を続け、再びターゲットに当たるものもあるが、ターゲットの厚さと、高周波電圧が作るバケットとの兼ね合いである。電子エネルギーが数十MeV以上にならないと、実用的なターゲット厚さの場合、ターゲットを一度通過した電子の再利用はわずかしか期待できない。また、1MeV以下ではイオン化損失が急激に大きくなるので制動放射の効率が悪い。

加速電圧を10kV以上にするのは困難なので、2MeV電子の場合は、蓄積するメリットは量的なことより、スペクトルを高エネルギー側に寄せるということになる。

また、軌道中にターゲットがあるので通過後の直進ビームはなく、多くは減速され、加速器内部に衝突した電子が発生する不必要なX線は遮蔽されて加速器の外には出ないこともメリットである。

4. 陽子ビームの蓄積

4.1 磁場分布

陽子の場合には1GeV程度までの等時性磁場を持つサイクロトロン磁石の設計も困難ではないので、ビーム強度の点からはJohoが提案したASTORの考え方でよい。むしろ高周波の周波数を下げて同期するいわゆるシンクロサイクロトロンにすると、すでに磁石があったものを利用するウプサラ大学のサイクロトロンのような場合をのぞき不経済である。

陽子の場合、低エネルギーでは、いわゆる

FFAGシンクロトロンとして、高周波の周波数が上がるタイミングで加速するようにすると、磁石の大きさが節約できる。しかしエネルギーが高くなると、等時性サイクロトロンの半径の増大がFFAG並に小さくなるので磁石の大きさはFFAGと変わらない。数GeV以上になると電子の場合と同じように周波数を下げるタイミングで加速するFFAGシンクロトロンにしなければならない。

いずれにしてもエネルギーが高くなると一つの磁石で最高エネルギーまでの加速をすると大きくなるのでリングを複数にする。このため減速はリングの最内周までとなるから、その範囲で加速減速して蓄積されることになる。

4.2 蓄積ビーム利用

陽子の場合には電子の時のような多重散乱はあまり問題にならないので、薄いターゲットを最外周においてこれを通過したビームをバケット内に捕捉したまま再利用できる可能性が増える。しかし電子の場合のX線発生とは異なり、二次粒子を発生した陽子はその核反応で失われるので再利用はあり得ない。核反応はしないで、イオン化によるエネルギー損失をただけの陽子は再利用できる。高エネルギーの単色中性子源としては利用価値があり、無駄なバックグラウンドを減らす利点がある。

5. 結びと謝辞

この方式は、電子ビームの入射器と蓄積リングを一体化することでコンパクトにできること、ビームをリング内で減速してダンプできること及び構造上シールドしやすいことなどから不要な放射線を減らすことができる、などの利点はある。しかし2MeV電子の場合、X線強度はあまり強くないと考えられる。核反応が起こる欠点はあるが、10MeV以上の方が適当であろう。

立命館大学山田廣成教授には、客員として仲間に入れていただき、山田研究室および光子発生技術研究所の方々との交流の機会を与えていただきました。これが、この検討の契機となったことを記し、山田教授及び関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 「みらくる」の最近の状況は、山田廣成ほか“みらくる6Xのプリリンスと利用の現状”，第1回日本加速器学会・第29回リニアック技術研究会プロシーディングス(日大船橋、Aug. 2004)参照, URL: <http://www.bkc.ritsumei.ac.jp/se/re/SLLS/>
- [2] W.Joho, “Application of the Phase Compression-Expansion Effect for Isochronous Storage Rings”, Particle Accelerators, 6, 41 (1974).およびSINの年報参照
- [3] 数値の推定には、E.Fermi, “Nuclear Physics”およびW.Heitler, “The Quantum Theory of Radiation”などの教科書を参考にした。