定例報告@11/28
高 $B\rho$ 粒子のための BigRIPS 磁場設定探索

中村研究室 河田鷹介

平成 20 年 11 月 28 日

1 背景

加速器実験で用いる粒子ビームは、ターゲットやディグレーダの存在により (そしてそもそも加速器から出射された時点である程度の) 角度拡がりを持っているため、磁場を使って角度拡がりを制御する必要がある。荷電粒子の静磁場に対する応答性は磁気剛性 (Magnetic Rigidity)$B\rho$ というパラメータであらわす。$B\rho$ が大きければ大きいほどその粒子は磁場で曲げにくく、よってコントロールには大きな磁場を必要とする。しかし、電磁石により得られる磁場には限界値があり、それを超える磁場を必要とする $B\rho$ を持つ粒子はそのシステムでは扱えないことになる。
なお、磁気剛性の定義式は

$$B\rho = \frac{p}{q} = \frac{A}{Z}\frac{m_0\gamma v}{e_0}. \tag{1}$$

p, q はそれぞれ粒子の運動慮と電荷、A, Z, γ, v はそれぞれ粒子の質量数、原子番号、ローレンツファクターと速度。m_0, e_0 は 1a.m.u. と素電荷である。
これより $B\rho$ は A/Z に比例することがわかる。^{22}C は BigRIPS でこれまで扱ってきた粒子より A/Z が大きいため、$B\rho$ もそれに伴って大きくなる。

2 動機

12 月の DayOne 実験 (の中村 Grp. パート) で用いる ^{2}2C は、$B\rho = 9.0$Tm を想定している。BigRIPS は、仕様の上では 9.0Tm の粒子を通せることになっているが、実際の標準設定では、いくつかの STQ マグネットが限界磁場を超えてしまうために通せない (8.8Tm?が限界)。そのため、9.0Tm を通すためには現状の他に新たな設定を見つける必要がある。

3 目的 (目標？)

大目標は、$B\rho$=9.2Tm の粒子を、BigRIPS の最後 (F8) まで通すこと。想定 $B\rho$ は 9.0Tm だが、9.2Tm をギリギリで通しておくことで、9.0Tm の時に修正の余地を確保できると考える。(実際には、F0-F1 間で 9.4Tm, そこでディグレーダにぶつかって 9.0Tm に落ちる。)

もう一つ、途中でビームがロスしないことも目標とする。

4 手法

COSY Infinity を使い、特定区間の STQ 磁場強度に対するイオン光学計算によるフィッティングを行う。フィッティングの概念は次の通り:

1. 磁場強度の初期値を与える
2. 特定の焦点面における転送行列の要素を目標値として与える
3. フィッティングの対象となる変数 (どの磁石の強度を変えるか) を指定する
4. その焦点面での実際の転送行列要素の成分と目標値との差を計算する
5. 差が許容範囲内であればフィッティングを終わる

6. そうでなければフィッティング対象となっている磁場強度を少し変更し、転送行列を再計算する

7. 4 に戻る

フィットの際使ったビームのプロファイルは表 1 の通り。

5 経過 (未整理)

磁場限界を超えている磁石は 3 つ程度なので、そこに掛かっている負荷をうまく分散させることを考えた。

まず、限界越え磁石の 1 つ STQ07M のある区間 F3-F5 でフィッティングを行った。フィッティングの対象となるのは STQ07U から STQ10D までの 11 個。STQ07M のみフィッティングの対象から外し、磁場強度を限界値付近まで少しずつ手動で下げていった。その結果、STQ07M を限界値以下まで下げることに成功したが、X 方向において、ビームが内壁を大きく擦ってしまうこととなった。

これを回避するためには、F3 でのビームの X 方向の角度拡がりを標準の 0.65 倍まで絞らなければならない。対して、Y 方向には標準の 1.6 倍までの余裕があったので、X の拡がりを Y に押し付けるという方針で区間 F2-F3 の STQ 磁石についてフィットを実行した。その結果、X の角度拡がりを標準の約 0.75 倍まで狭めたところで、STQ02 の 2 つの磁石が限界強度を超えてしまうことがわかった。

そこで F3-F7 間を調整し、なんとか F3 で標準の 0.9375 倍まで X の角度拡がりを狭めればよい、という状態にした (この作業は自分がやったわけではないので詳しいことはまだわからない)。

そして F2-F3 間を再調整して、F3 での X 角度拡がりを標準の 0.9375 倍にした。この結果を F7 までを絵を描いて通しでチェックすると、1 次のオーダーではロスなしで全て通っていることが確認できた。

最後に、F2-F8 が見かけ上対称であるように、すなわち F2 と F8 でのビームプロファイルが一致するように、F7-F8 間をフィッティングした。

6 結果

得られた磁場強度は表 2 にまとめてある。各 STQ は 3 つの超電導四重極磁石からなり、上流側から U(up),M(mid),D(down) のラベルが付く。U,M,D は奥行きが異なり、U と D は同じで浅く、M は深くなっている。深いものほど磁場限界は大きい。表 2 にあるものは、全て限界強度をクリアしている。

この時の粒子の軌道を、F2 から F8 までの間で描画したものが図 1 である。軌道の色は赤緑青の 3 色あるが、これはそれぞれ運動量のズレが $+0.30$,0,-0.30 の粒子に対応する。また、3 色それぞれについて、出射時の角度が X,Y あわせて 3×3 パターンある。

図上の軌道以外の図形はダイポール (短い長方形) または STQ(長い長方形) の形状を表しており、これはビーム輸送経路の物理的な制約 (つまり壁) を表す。しかし、何を問題とするかは X と Y とで若干異なる。

X STQ の短辺の延長が輸送経路の幅となるので、これを切っていなければ良い。

Y 上に加えてダイポール形状が問題となる。ダイポールの側面を切ってはいけない。

参考：各 STQ の限界磁場強度

BigRIPS の STQ には 6 種類がある。そのうち 3 種類は最初の STQ01 でのみ使われる特殊仕様 (空芯)。それ以外の 3 つはそれぞれ Q500,Q800,Q1000 と呼ばれる。数字は mm 単位での奥行き。
6 種それぞれの限界磁場を表 3 にまとめた。
各 STQ の構成は、STQ02 以降は基本的に U-M-D の順で Q500-Q800-Q500. ただし、STQ05,06,10,11 のみ、Q500-Q1000-Q500 という構成になっている。

Situation	X Angl. Sprd. [mrad]	Y Angl. Sprd. [mrad]	$\pm P$ Disp.
F0 Std.	40	50	3%
F3 Std.	18.4	26.6	3%

表 1: Beam Profiles

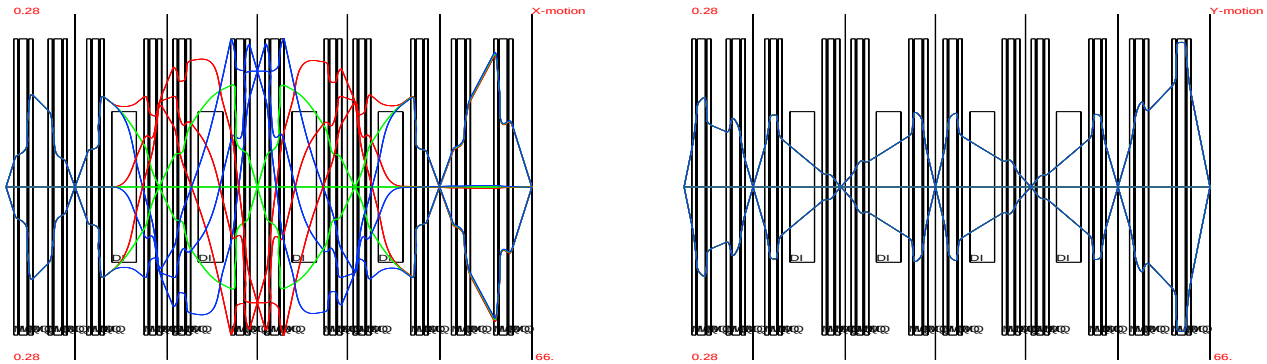

図 1: 現在の F2-F8 間の粒子の軌道

7　今後

ここで提示した結果はまだ最終的なものではないので、今後も調整が続く。具体的には F5 と F7-F8 間の拡がりをより緩やかなものにする。

また、現状の COSY Infinity による計算では、各要素 (ダイポール,STQ) の入口と出口におけるヒットチェックはできるが、要素内部でのヒットチェックはできない仕様となっているので、これの解決も今後の課題となる。

なお、高次の項による効果は、六極磁石で修正する予定 (らしい。詳しいことはこれから)。

8　おまけ

8.1　COSY Script の画像出力

BP(Begin Picture) と EP(End Picture) コマンドの間にシステムをマークアップする (描きたい部分の定義を並べる)。その後で PG コマンドを実行する。PG は 2 つの整数引数をとる。COSY Script では、グラフィック描画コマンドに与える整数引数に一般的な規則がある。まず正整数の場合、出力は無理やり文字に変換される。また、-9 までの負整数の場合、「標準」の画像出力先に出力される。PS ファイルにしたい場合は-10 を指定する。

場所	磁場 [T]	場所	磁場 [T]
BQU01	1.995	BQU06	1.210
BQM01	2.351	BQM06	1.307
BQD01	1.883	BQD06	1.473
BQU02	1.153	BQU07	1.207
BQM02	1.301	BQM07	1.875
BQD02	1.128	BQD07	1.765
BQU03	1.179	BQU08	1.062
BQM03	1.420	BQM08	1.343
BQD03	1.226	BQD08	1.111
BQU04	1.563	BQU09	1.019
BQM04	1.663	BQM09	1.054
BQD04	0.717	BQD09	0.681
BQU05	1.550	BQU10	1.682
BQM05	1.580	BQM10	1.559
BQD05	1.790	BQD10	1.488
BQU15	1.021	BQU16	1.608
BQM15	0.953	BQM16	1.266
BQD15	0.801	BQD16	0.999

表 2: 現在までに得られた磁場強度。STQ11 ~ STQ14 までは STQ10 ~ STQ07 と対称。

Name	max B[T]
STQ1U	2.173
STQ1M	2.418
STQ1D	2.479
Q500	1.821
Q800	1.882
Q1000	1.897

表 3: STQ Specs