第24卷 第7期 高 能 物 理 与 核 物 理 Vol.24, No.7
2000年7月 HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS July, 2000

环形质谱仪中的非线性效应

徐 建 铭[1)]
(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 分析了环形质谱仪中的非线性效应,讨论了它们对质谱仪的分辨本领和测量精度的影响,并给出计算这些影响的公式.

关键词 环形质谱仪 非线性色散 非线性效应 分辨本领 测量精度

环形加速器如同步加速器、储存环也可用来测量带电粒子的质量. 这时,可称作“环形质谱仪”. 在环形质谱仪里,粒子每回旋一圈就偏转 2π 角度,大于普通质谱仪的偏转角. 所以环形质谱仪有较高的分辨本领,有的可达 10^6[1,2] 量级. 环形质谱仪既要有较高的分辨本领,又要求有较大的动量接受度,非线性效应对环形质谱仪的性能的影响显然是需要认真研究的问题.

为了改善测量精度并提高测量效率,在环形质谱仪里同时回旋着多种粒子. 通过测量不同种的粒子的回旋频率之差或回旋一定圈数的飞行时间之差,便可确定各种粒子之间质荷比之差. 它们中间有一种粒子的质荷比已经精确测定,利用环形质谱仪再测定其它粒子与这种粒子的质荷比之差,便可确定待测粒子的质荷比.

1 线性和非线性条件下的质荷比表示式

粒子在环形加速器中的回旋频率 f 如下式所示,

$$f=\frac{v}{C}, \tag{1}$$

式中 v 是粒子的速度,C 是它的轨道周长. 于是,

$$\frac{\Delta f}{f}=\frac{\Delta v}{v}-\frac{\Delta C}{C}. \tag{2}$$

下面将求出粒子轨道周长和粒子本身参数及环形质谱仪参数间的关系. 取环形质谱仪的中心轨道为坐标 s,它的曲率半径是 $\rho_0(s)$. 粒子在径向和垂向相对于中心轨道的距离分别是 x 和 y. 于是对应于中心轨道上变化 ds,粒子轨道相应的长度 dL 为

1999-04-20 收稿,1999-06-16 收修改稿

1)通讯地址:100080 北京 2732 信箱,徐清转交

$$\mathrm{d}L=\sqrt{1+x'^2}\sqrt{1+y'^2}\left[\rho_0(s)+x\right]\frac{\mathrm{d}s}{\rho_0(s)}. \tag{3}$$

上式中“$'$”代表$\frac{\text{“d”}}{\mathrm{d}s}$.

可表示为

$$x=D(s)\frac{\Delta p}{p}+x_\beta+x_c. \tag{4}$$

上式中$\frac{\Delta p}{p}$是粒子的动量分散,x_β是径向自由振荡,x_c是径向相干振荡. $D(s)$是环形质谱仪的色散函数,它可表示成,

$$D(s)=D_0(s)+D_1(s)\frac{\Delta p}{p}+D_2(s)\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2+\cdots. \tag{5}$$

式中 $D_0(s)$,$D_1(s)$等分别是线性和非线性色散函数. 以下为行文简洁,简写成 D_0,D_1,$\rho_0(s)$也简写成 ρ_0,但它们都是 s 的函数. y 可表示成,

$$y=y_\beta+y_c. \tag{6}$$

同样,y_β 和 y_c 分别是粒子的垂向自由振荡和相干振荡. 这里,假定环形质谱仪里没有垂向色散现象,和绝大多数环形加速器一样.

把式(4—6)代入式(3),得到

$$\begin{aligned}\mathrm{d}L=\Bigg\{&1+\frac{D_0}{\rho_0}\frac{\Delta p}{p}+\frac{x_\beta+x_c}{\rho_0}+\frac{D_1}{\rho_0}\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2+\frac{1}{2}\left[D_0'^2\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2+\right.\\&\left.2D_0'\frac{\Delta p}{p}(x'_\beta+x'_c)+(x'_\beta+x'_c)^2+(y'_\beta+y'_c)^2\right]\Bigg\}\mathrm{d}s.\end{aligned} \tag{7}$$

展开式中只保留了$\frac{x_\beta}{\rho_0}$,$\frac{x_c}{\rho_0}$,$\frac{D_0}{\rho_0}$,$\frac{\Delta p}{p}$,x'_β,x'_c等小量的二级项. 按照环形质谱仪的具体参数和性能要求及被测束流的参数($\frac{\Delta p}{p}$,x_β,x_c,y_β,y_c等),如有必要,可采用类似本文的分析方法,求得包括更高级项,如三级项的影响.

轨道周长 C 等于,

$$\begin{aligned}C=\oint\mathrm{d}L=\oint\Bigg\{&1+\frac{D_0}{\rho_0}\frac{\Delta p}{p}+\frac{x_\beta+x_c}{\rho_0}+\left(\frac{D_1}{\rho_0}+\frac{1}{2}D_0'^2\right)\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2+\\&D_0'\frac{\Delta p}{p}(x'_\beta+x'_c)+\frac{1}{2}(x'_\beta+x'_c)^2+\frac{1}{2}(y'_\beta+y'_c)^2\Bigg\}\mathrm{d}s.\end{aligned} \tag{8}$$

积分沿环形质谱仪的中心轨道进行. 于是

$$C=C_0+\Delta C, \tag{9}$$

上式中 C_0 是环形质谱仪中心轨道的周长,为

$$C_0=\oint\mathrm{d}s. \tag{10}$$

而 ΔC 的表示式是

$$\Delta C = \oint\Big[\frac{D_0}{\rho_0}\frac{\Delta p}{p} + \frac{x_\beta + x_c}{\rho_0} + \left(\frac{D_1}{\rho_0} + \frac{1}{2}D_0'^2\right)\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + D_0'\frac{\Delta p}{p}(x_\beta' + x_c') + \frac{1}{2}(x_\beta' + x_c')^2 + \frac{1}{2}(y_\beta' + y_c')^2\Big]ds \tag{11}$$

定义

$$\alpha_0 = \frac{1}{C_0}\oint\frac{D_0}{\rho_0}ds, \tag{12}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{C_0}\oint\left(\frac{D_1}{\rho_0} + \frac{1}{2}D_0'^2\right)ds \tag{13}$$

α_0 是环形加速器的线性动量收缩因子,α_1 是第一项非线性动量收缩因子　考虑到式(12,13),便得到$\frac{\Delta C}{C_0}$的表示式,

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \alpha_0\frac{\Delta p}{p} + \alpha_1\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \oint\frac{x_\beta + x_c}{C_0\rho_0}ds + \oint\frac{1}{C_0}\Big[D_0'\frac{\Delta p}{p}(x_\beta' + x_c') + \frac{1}{2}(x_\beta' + x_c')^2 + \frac{1}{2}(y_\beta' + y_c')^2\Big]ds \tag{14}$$

已知,

$$p = m\gamma v, \tag{15}$$

式中 m 是粒子的静止质量,γ 是相对论因子. 因此,

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta m}{m} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v} \tag{16}$$

或者

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta(m/q)}{(m/q)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v} \tag{17}$$

式中 q 是粒子的电荷数. 把式(17)代入式(14),得到$\frac{\Delta C}{C_0}$的表示式如下,

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \alpha_0\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v}\right] + \alpha_1\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v}\right]^2 + \oint\frac{x_\beta + x_c}{C_0\rho_0}ds + \frac{1}{C_0}\oint\left\{D_0'\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v}\right](x_\beta' + x_c') + \frac{1}{2}(x_\beta' + x_c')^2 + \frac{1}{2}(y_\beta' + y_c')^2\right\}ds \tag{18}$$

把上式代入式(2)便得到环形质谱仪中粒子回旋频率与粒子参数及质谱仪参数的关系式.即

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha_0\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + (1 - \alpha_0\gamma^2)\frac{\Delta v}{v} - \alpha_1\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v}\right]^2$$

$$\oint \frac{x_\beta + x_c}{C_0 \rho_0} ds - \frac{1}{C_0} \oint \left\{ D'_0 \left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2 \frac{\Delta v}{v} \right] (x'_\beta + x'_c) + \frac{1}{2}(x'_\beta + x'_c)^2 + \frac{1}{2}(y'_\beta + y'_c)^2 \right\} ds \tag{19}$$

当参考粒子的平均动量是 p_0,(p_0 是环形质谱仪中心轨道所对应的动量)公式(19)表达了其它种粒子与参考粒子的回旋频率之差和粒子质荷比之差,速度差及其它参数间的关系. 如果参考粒子的平均动量不是 p_0,而是 p_r.

$$p_r = p_0 + \Delta p_r. \tag{20}$$

它的理想闭轨就不再是环形质谱仪的中心轨道. 则在公式(2)中的$\frac{\Delta C}{C}$应为$\frac{\Delta C}{C_r}$而不是$\frac{\Delta C}{C_0}$. 动量为 p_r 的粒子的闭轨周长 C_r 应为

$$C_r = C_0\left[1 + \alpha_0 \frac{\Delta p_r}{p_0} + \alpha_1\left(\frac{\Delta p_r}{p_0}\right)^2\right] + \cdots$$

考虑到上述情况,一般情况下,$\frac{\Delta f}{f}$的表示式应为:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha_0 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + (1 - \alpha_0\gamma^2)\frac{\Delta v}{v} - \alpha_1\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v}{v}\right]$$

$$\oint \frac{x_\beta + x_c}{C_0 \rho_0} ds - \frac{1}{C_0} \oint \left\{ D'_0 \left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2 \frac{\Delta v}{v} \right] (x'_\beta + x'_c) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2}(x'_\beta + x'_c)^2 + \frac{1}{2}(y'_\beta + y'_c)^2 \right\} ds + \left[\alpha_0 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \alpha_0\gamma^2\frac{\Delta v}{v} + \right.$$

$$\left. \oint \frac{x_\beta + x_c}{C_0 \rho_0} ds \right] \frac{\alpha_0 \Delta p_r}{p_0} + \cdots. \tag{22}$$

上式最后一项是由于参考粒子不在质谱仪中心轨道上运动,而是在动量相当于 $p_0 + \Delta p_r$ 的轨道上运动.

如果所有粒子速度相同($\Delta v = 0$),也没有横向自由振荡和相干振荡($x_\beta = x_c = y_\beta = y_c = 0$),则得到

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha_0 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} - \alpha_1\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)}\right]^2 + \alpha_0^2 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} \frac{\Delta p_r}{p_0} \tag{23}$$

只考虑一级项时,上式化为

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha_0 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} \tag{24}$$

或者

$$\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} = -\frac{1}{\alpha_0}\frac{\Delta f}{f}$$

考虑到$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta T}{T}$. 当测量粒子回旋 n 圈的飞行时间以测定其质量时,则

$$\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} = \frac{1}{\alpha_0}\frac{\Delta T}{T}.$$

式(25)和(26)是环形质谱仪中不考虑非线性效应时确定粒子质荷比的基本公式. 当考虑到非线性效应时,应采用式(23). 从式(23)得到

$$\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} = -\frac{1}{\alpha_0}\frac{\Delta f}{f} - 2\frac{\alpha_1}{\alpha_0^3}\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 - 2\left(\frac{\Delta f}{f}\right)\left(\frac{\Delta p_r}{p}\right) - \frac{\alpha_0^3}{4\alpha_1}\left(\frac{\Delta p_r}{p}\right)^2 + \cdots$$

上式最末两项是由参考粒子不在中心轨道上回旋即其动量不是 p_0 而是 $p_0 + \Delta p_r$ 所引起.

2　测量误差分析

上面讨论的公式(23—27)是理想情况. 实际进行测量时,同种粒子间有一定的速度分散 δv,它们的横向自由振荡也不相同. 这些因素将使同种粒子的回旋频率有一定的分散宽度 δf. 同种粒子回旋频率的分散宽度决定了环形质谱仪的分辨本领. 同种粒子之间 Δm 为零,并且相干横向振荡相同,从式(22)可求出同种粒子回旋频率分散宽度的表示式如下,

$$\begin{aligned}\frac{\delta f}{f} = {} & (1-\alpha_0\gamma^2)\frac{\delta v}{v} - \alpha_1\left(\gamma^2\frac{\delta v}{v}\right)^2 - \oint\frac{x_\beta}{C_0\rho_0}\mathrm{d}s - \frac{1}{C_0}\oint\Big[D'_0\gamma^2\frac{\delta v}{v}x'_\beta + \\ & \frac{1}{2}(x'^2_\beta + y'^2_\beta)\Big]\mathrm{d}s + \left(\alpha_0\gamma^2\frac{\delta v}{v} + \oint\frac{x_\beta}{C_0\rho_0}\mathrm{d}s\right)\alpha_0\frac{\Delta p_r}{p_0} + \cdots .\end{aligned} \tag{28}$$

式(28)是动量为 $p_0 + \Delta p_r$ 的粒子束的$\frac{\delta f}{f}$表示式. 如果某种粒子的平均动量是 $p_0 + \Delta p_A$,则在式(28)中应以 Δp_A 取代 Δp_r. 质谱仪的分辨本领 R 的表示式是

$$R = \frac{\alpha_0}{\left(\frac{\delta f}{f}\right)_{\max}}$$

$\frac{\delta f}{f}$表示式(28)中等号右侧的第一和第三项是线性项,其它项都是二级非线性项.

两种粒子的质荷比之差是根据这两种粒子的平均回旋频率之差或飞行时间之差利用式(25—27)来确定的. 实际测量时,两种粒子的平均速度也会有些差异 Δv_{rA},

$$\Delta v_{rA} = \bar{v}_r - \bar{v}_A. \tag{30}$$

上式中 $\bar{v}_r$ 是参考粒子的平均速度,$\bar{v}_A$ 是待测的 A 种粒子的平均速度. 另外,不同种粒子的相干横向振荡也不一定相同. 因此,测得的两种粒子的平均回旋频率之差,除由两种粒子的质荷比之差所造成外,平均速度间的差异及相干横向振荡的不相同也同样导致回旋频率的差异. 后两项原因所造成的频率差异构成了测量误差. 平均速度差 Δv_{rA}和横向相干振荡不同所造成的回旋频率差 Δf_{er}的表示式为

$$\frac{\Delta f_{er}}{f} = (1-\alpha_0\gamma^2)\frac{\Delta v_{rA}}{v_r} - \oint\frac{x_{cr}-x_{cA}}{C_0\rho_0}ds - \alpha_1\left[2\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v_{rA}}{v_r}\right]\gamma^2\frac{\Delta v_{rA}}{v_r} -$$

$$\oint\frac{1}{C_0}\left\{D'_0\left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2\frac{\Delta v_{rA}}{v_r}\right](x'_{cr}-x'_{cA}) + \frac{1}{2}(x'^2_{cr}-x'^2_{cA}) + \right.$$

$$\left.\frac{1}{2}(y'^2_{cr}-y'^2_{cA})\right\}ds + \left(\alpha_0\gamma^2\frac{\Delta v_{rA}}{v_r} + \oint\frac{x_{cr}-x_{cA}}{C_0\rho_0}ds\right)\alpha_0\frac{\Delta p_r}{p_0} + \cdots$$

上式中 x_{cr}、y_{cr}分别是参考粒子的径向、垂向相干振荡,而 x_{cA}、y_{cA}则是待测定的 A 种粒子的相应值. 测量误差的表示式为,

$$\varepsilon_r = \frac{\left(\frac{\Delta f_{er}}{f}\right)_{max}}{\alpha_0} \tag{32}$$

3 环形质谱仪分辨本领和测量精度的计算

下面将给出 x_β, y_β, x_c, y_c 以及 D_0, D_1 的表示式,以便利用前面得到的一些公式,求得测量结果$\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)}$和质谱仪的分辨本领和测量误差. 计算分辨本领时,$x_\beta$、$y_\beta$ 的表示式是

$$x_\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon_x\beta_x(s)}{\pi}}\sin[\theta(s)-\theta_0] \tag{33}$$

$$y_\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon_y\beta_y(s)}{\pi}}\sin[\varphi(s)-\varphi_0] \tag{34}$$

上两式中 ε_x、ε_y 分别是束流的径向和垂向发射度,$\beta_x(s)$、$\beta_y(s)$是环形质谱仪的径向、垂向振幅函数. $\theta(s)$及 $\varphi(s)$则是两个方向的横向振荡相角.

$$\theta(s)-\theta_0=\int_{s_0}^{s}\frac{1}{\beta_x(\sigma)}\mathrm{d}\sigma\ , \tag{35}$$

$$\varphi(s)-\varphi_0=\int_{s_0}^{s}\frac{1}{\beta_y(\sigma)}\mathrm{d}\sigma\ . \tag{36}$$

对给定了的环形质谱仪的聚焦结构,所有粒子动力学程序都能求出它们的振幅函数 $\beta_x(s)$,$\beta_y(s)$及相角$\theta(s)$,$\varphi(s)$. 式(33,34)是束流截面外缘粒子的横向自由振荡表示式,它们的振幅最大,影响谱仪分辨本领也最大. 起始相角 θ_0 及 φ_0 随不同粒子而各异,可取 0—2π 间值. 随起始相角不同,式(28)中有关积分结果也不同. 应取最大值代入式(29)以确定谱仪的分辨本领. 公式中的色散函数 D_0,D_1 为

$$D_0(s)=\frac{\sqrt{\beta_x(s)}}{2\sin Q_x\pi}\int_s^{s+C_0}\frac{\sqrt{\beta_x(\sigma)}}{\rho_0(\sigma)}\cos[Q_x\pi+\theta(s)-\theta(\sigma)]\,\mathrm{d}\sigma \tag{37}$$

$$D_1(s)=\frac{\sqrt{\beta_x(s)}}{2\sin Q_x\pi}\int_s^{s+C_0}\sqrt{\beta_x(\sigma)}f_1(\sigma)\cos[Q_x\pi+\theta(s)-\theta(\sigma)]\,\mathrm{d}\sigma \tag{38}$$

上两式中 Q_x 是质谱仪径向振荡周期数,它是

$$Q_x=\frac{1}{2\pi}\oint\frac{1}{\beta_x(\sigma)}\mathrm{d}\sigma \tag{39}$$

f_1 的表示式是

$$f_1(s)=\frac{-1}{\rho_0}+\left[\frac{2}{\rho_0^2}-k+\left(\frac{1}{\rho_0}\right)'D_0'\right]D_0+\left(\frac{2k}{\rho_0}-\frac{1}{\rho_0^3}+\frac{m}{2}\right)D_0^2+\frac{D_0'^2}{2\rho_0}\ , \tag{40}$$

上式中 k 是环形质谱仪的规一化四极场强度,m 是规一化六极场强度,它们都是 s 的函数.

$$k(s)=-\frac{1}{(p/q)_0}\left.\frac{\partial B_y(s,x,0)}{\partial x}\right|_{x=0}, \tag{41}$$

$$m(s)=-\frac{1}{(p/q)_0}\left.\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}\right|_{x=0,y=0}$$

对给定的质谱仪,利用粒子动力学程序给出的 β_x,β_y 等参数,便可求得式(28)中的一些有关积分并进而求出质谱仪的分辨本领.

质谱仪的测量误差和束流的相干横向振荡有关. 相干振荡的表示式要根据质谱仪的实际情况具体分析. 例如:如果主要是由质谱仪部件性能误差引起的闭轨畸变,则可表示为

$$x_\alpha=\sqrt{A_r\beta_x(s)} \tag{43}$$

而$\sqrt{A_r\beta_x(s)}$即为在 s 位置上参考粒子的闭轨畸变. 在 y 方向及待测定的 A 种粒子也都有类似的表示式. 如果被测粒子是从谱仪外面注入,则不同种的粒子由于参数不同,注入情况不同,注入误差所引起的相干振荡可能不同. 在此情况下,参考粒子的相干振荡可表示为,

$$x_\alpha=\sqrt{A_r\beta_x(s)}\sin[\theta(s)-\delta_r] \tag{44}$$

其中 A_r 及 δ_r 为常数,由注入误差决定. 即

$$\text{入射位置误差} = x_{\sigma}(s_{\text{inj}}),$$
$$\text{入射角度误差} = x'_{\sigma}(s_{\text{inj}}), \tag{46}$$

上式中 s_{inj} 是入射点的 s 坐标. 在 y 方向也有类似的表示式,

$$y_{\sigma} = \sqrt{B_r\beta_y(s)}\sin[\varphi(s) - b_r]$$

待测定的粒子也有类似的表示式,

$$x_{cA} = \sqrt{A_A\beta_x(s)}\sin[\theta(s) - \delta_A] \tag{48}$$

$$y_{cA} = \sqrt{B_A\beta_y(s)}\sin[\varphi(s) - b_A] \tag{49}$$

公式中的一些常数如 A_A, B_r, B_A 以及 δ_A, b_r, b_A 等都可以利用和式(45,46)相似的关系式来确定. 从式(31)知道,只有当参考粒子和被测粒子有不同的横向相干振荡时,才造成测量误差. 如果两种粒子横向相干振荡相同,并不影响精度.

前面的讨论表明,环形质谱仪的性能,即其分辨本领和测量精度一方面和质谱仪的参数有关,另外也和被测束流的性能参数有关. 即依赖于同种粒子的速度分散 δv,横向发射度,两种不同粒子平均速度之差异 Δv_{rA} 以及横向相干振荡. 如采取措施,减小束流的上述参数,可以有效地提高环形质谱仪的分辨本领和测量精度. 因此,在环形质谱仪里常采用束流冷却技术,以减小被测束流的速度分散,横向发射度等. 在此情况下,环形质谱仪的性能,一方面由谱仪本身的参数(如 $\alpha_0, \alpha_1, \gamma, \beta_x, \beta_y$ 等)决定,另外还依赖于冷却装置的冷却效果. 进行质量测量时,被测束流较弱,经充分冷却,其速度分散和差异 $\left(\frac{\delta v}{v}\text{及}\frac{\Delta v_{rA}}{v}\right)$ 可降到 10^{-6} 量级,而横向发射度可降到 10^{-8}m 量级或更低. 在此情况下,二级项的贡献通常可忽略不计. 但横向运动的一级项的贡献仍需考虑,它们是式(28,31)等号右侧的第三项.

冷却过程需一定时间,约秒的量级. 上述束流经充分冷却后再进行测量的方法不适于短寿命核的测量. 未经冷却的束流的速度分散可能为 10^{-3} 量级,它将严重影响环形质谱仪的性能. 如果让谱仪工作在它的临界能,即

$$\gamma = \gamma_t, \tag{50}$$

而 γ_t 的表示式为

$$\gamma_t = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0}}$$

把上述两式代入式(28)和(31),则 $\frac{\delta v}{v}$ 和 $\frac{\Delta v_{rA}}{v_r}$ 的一级项的系数为零,只留下它们的二级项. 这一测量模式可称为等时性模式[3],可以提高测量短寿命核时的分辨本领和精度. 这时,决定环形质谱仪分辨本领的同种粒子回旋频率分散 $\frac{\delta f}{f}$ 的表示式从式(28)化为

$$\frac{\delta f}{f} = -\oint \frac{x_\beta}{C_0\rho_0}\mathrm{d}s - \alpha_1\left(\gamma^2\frac{\delta v}{v}\right)^2 - \frac{1}{C_0}\oint\Big[D'_0\gamma^2\frac{\delta v}{v}x'_\beta + \frac{1}{2}(x'^2_\beta + y'^2_\beta)\Big]\mathrm{d}s + \left(\alpha_0\gamma^2\frac{\delta v}{v} + \oint\frac{x_\beta}{C_0\rho_0}\mathrm{d}s\right)\alpha_0\frac{\Delta p_r}{p_0} + \cdots. \tag{52}$$

上式表明,等时性模式只能消除速度分散$\frac{\delta v}{v}$的一级项的作用. 横向自由振荡 x_β 的一级项并未被消除. 能造成质谱仪测量误差的$\frac{\Delta f_{\sigma}}{f}$,在等时性模式下化为,

$$\frac{\Delta f_{\sigma}}{f} = -\oint \frac{x_{\sigma} - x_{cA}}{C_0 \rho_0} ds - \alpha_1 \left[2 \frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2 \frac{\Delta v_{rA}}{v_r} \right] \gamma^2 \frac{\Delta v_{rA}}{v_r} - \oint \frac{1}{C_0} \left\{ D_0' \left[\frac{\Delta\left(\frac{m}{q}\right)}{\left(\frac{m}{q}\right)} + \gamma^2 \frac{\Delta v_{rA}}{v_r} \right] (x_{\sigma}' - x_{cA}') + \frac{1}{2}(x_{\sigma}'^2 - x_{cA}'^2) + \frac{1}{2}(y_{\sigma}'^2 - y_{cA}'^2) \right\} ds + \left(\alpha_0 \gamma^2 \frac{\Delta v_{rA}}{v_r} + \oint \frac{x_{\sigma} - x_{cA}}{C_0 \rho_0} ds \right) \alpha_0 \frac{\Delta p_r}{p_0} + \cdots \tag{53}$$

上式同样表明,利用等时性模式只能消除$\frac{\Delta v_{rA}}{v_r}$一级项所造成的测量误差. 横向相干振荡的差异的一级项的作用并未被消除. 所以,在采用等时性模式的同时,还应采取措施,尽量减小束流的横向发射度和不同种粒子的横向相干振荡的差异,以提高环形质谱仪测量短寿命核的分辨本领和测量精度.

感谢近代物理所詹文龙和夏佳文同志的有益的讨论.

参考文献(References)

1 Radon T et al. Phys. Rev. Lett., 1997. **78**:4701
2 Geissel H et al. Phys. Rev. Lett., 1992 **68**:3412
3 Dolinskii A et al. Proc. 5th Europ. Part. Accel. Conf. 1996. 596

Nonlinear Effect in the Circular Mass Spectrometer

XU JianMing[1)]

(*Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract The effect of the nonlinear terms on the resolution power and measuring accuracy of the circular mass spectrometer is analyzed. Related expressions for determing these effects are given.

Key words circular mass spectrometer, nonlinear dispersion, nonlinear term, resolution power, measuring accuracy

Received 20 April 1999, Revised 16 June 1999

1) Mailing Address: P.O. Box 2732, Beijing 100080, China c/o XU Qing