

文章编号: 1001- 4322(1999)04- 0509- 04

粒子的横向运动对环形质谱仪性能的影响*

徐建铭

詹文龙, 夏佳文

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要 分析了粒子的横向运动对环形质谱仪的分辨本领及测量精度的影响, 给出了计算这些影响的方法。

关键词 横向运动; 环形质谱仪; 分辨本领; 测量精度

中图分类号: TL 501

文献标识码: A

粒子在环形加速器——同步加速器或储存环里每回旋一周, 即偏转 2π 角度, 大于普遍质谱仪的偏转角。所以, 环形加速器如用来测量粒子的质量, 可以达到较高的分辨本领, 有的可达 10^6 量级, 并可测量短寿命粒子。这时, 可称之为“环形质谱仪”, 以区别于普通质谱仪。

为了提高测量精度, 加快实验进度, 在环形质谱仪里同时测量两种或多种不同粒子的回旋频率或飞行时间。从它们之间的回旋频率差或飞行时间来确定它们的质荷比 (m/q) 之差。它们中间一种粒子的质荷比已经用其他方法精确测定, 利用环形质谱仪测定它们之间的质荷比之差, 便可精确测得待测粒子的质荷比^[1]。本文分析粒子的横向自由振荡和不同种束流的相干运动对环形质谱仪的分辨本领和测量精度的影响。

粒子在环形质谱仪中的回旋频率 f_{rev} 由下式决定。

$$f_{\text{rev}} = \frac{v}{C} \quad (1)$$

式中 v 是粒子运动速度; C 是它的轨道周长。因此

$$\frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}} = \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta C}{C} \quad (2)$$

式中 Δf_{rev} , Δv 及 ΔC 分别是两个粒子的回旋频率、速度及轨道周长之差。

取环形质谱仪的中心轨道为坐标 s , 轨道的曲率半径是 $\rho_0(s)$ 。粒子在径向和垂向相对于中心轨道的距离分别是 x 和 y , 它们都是 s 的函数。于是, 对应于中心轨道上变化 ds , 粒子相应的轨道长度 dL 为

$$dL = \sqrt{1 + x'^2} \sqrt{1 + y'^2} [\rho_0(s) + x] \frac{ds}{\rho_0(s)} \quad (3)$$

上式中, “'”代表“ d/ds ”。以下叙述中为了简单, $\rho_0(s)$ 简化为 ρ_0 , 它是 s 的函数。

考虑到 x/ρ_0 , x' 及 y 都是小量, 只保留它们的一级项, 得到

$$dL = (1 + x/\rho_0) ds \quad (4)$$

式中 x 的表示式为

$$x = D_0(s) \frac{\Delta p}{p} + x_\beta + x_{\text{coh}} \quad (5)$$

在上式中 $D_0(s)$ 是环形质谱仪的色散函数的线性项; $\Delta p/p$ 是粒子束的动量散度; x_β 和 x_{coh} 分别

* 1999 年 2 月 14 日收到原稿, 1999 年 6 月 7 日收到修改稿。
徐建铭, 男, 1925 年 5 月出生, 研究员, 博导

是粒子的径向自由振荡和相干振荡, 它们都是 s 的函数。因此, 粒子轨道周长的表示式为

$$C = \int dL = \int \left[1 + \frac{D_0(s) \frac{\Delta p}{p} + x_\beta + x_{\text{coh}}}{\rho_0} \right] ds \quad (6)$$

积分沿中心轨道进行。或者

$$C = C_0 + \int \frac{D_0(s)}{\rho_0} \left[\frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} + \gamma^2 \frac{\Delta v}{v} \right] ds + \int \frac{x_\beta + x_{\text{coh}}}{\rho_0} ds \quad (7)$$

式中 $C_0 = \int ds$ 是环形质谱仪中心轨道周长。定义

$$\alpha_0 = \frac{1}{C_0} \int \frac{D_0(s)}{\rho_0} ds \quad (8)$$

把上式代入式(7), 得到

$$C = C_0 + C_0 \alpha_0 \left[\frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} + \gamma^2 \frac{\Delta v}{v} \right] + \int \frac{x_\beta + x_{\text{coh}}}{\rho_0} ds \quad (9)$$

式中 α_0 是环形质谱仪的线性动量收缩因子。

把式(9)代入式(2), 便得到粒子回旋频率与环形质谱仪参数和粒子参数之间的关系

$$\frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}} = - \alpha_0 \left[\frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} \right] + (1 - \gamma^2 \alpha_0) \frac{\Delta v}{v} - \frac{1}{C_0} \int \frac{x_\beta + x_{\text{coh}}}{\rho_0} ds \quad (10)$$

如果所有粒子的速度相同 ($\Delta v = 0$), 并且没有径向自由振荡和相干振荡 ($x_\beta = 0, x_{\text{coh}} = 0$), 则

$$\frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}} = - \alpha_0 \left[\frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} \right] \quad \text{或者} \quad \frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} = - \frac{1}{\alpha_0} \frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}} \quad (11)$$

考虑到 $\frac{\Delta T_f}{T_f} = - \frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}}$ (12)

式中 T_f 是粒子的飞行时间。所以质荷比与飞行时间的关系是

$$\frac{\Delta(\frac{m}{q})}{m} = \frac{1}{\alpha_0} \frac{\Delta T_f}{T_f} \quad (13)$$

式(12, 13)是环形质谱仪中测量粒子质荷比的基本关系式。测量了两种粒子的回旋频率差或飞行时间差, 利用式(12)或式(13)便能求得这两种粒子的质荷比之差。

实际上同种粒子间有一定的速度分散 δv , 两种不同粒子的平均速度也会有一定差异 $\Delta v_{\text{AB}}, \Delta v_{\text{AB}} = \bar{v}_A - \bar{v}_B$, \bar{v}_A 和 \bar{v}_B 分别是 A 种粒子束和 B 种粒子束的平均速度。另外, 粒子还进行径向自由振荡和相干振荡。两种不同的粒子束的径向相干振荡也未必相同。这些因素都会影响环形质谱仪的分辨本领和测量精度。

同种粒子的速度分散 $\delta v/v$, 和各粒子进行不同的径向自由振荡会使同种粒子的回旋频率

有一定分散, 分散的最大宽度是

$$\left| (1 - \alpha_0 \gamma^2) \frac{\delta v}{v} \right|_{\max} + \frac{1}{C_0} \left| \frac{x_\beta}{\rho_0} ds \right|_{\max} \quad (14)$$

回旋频率的分散宽度决定了质谱仪的分辨本领 R

$$R = \frac{\alpha_0}{\left| (1 - \alpha_0 \gamma^2) \frac{\delta v}{v} \right|_{\max} + \frac{1}{C_0} \left| \frac{x_\beta}{\rho_0} ds \right|_{\max}} \quad (15)$$

两种不同粒子的平均速度的差异 Δv_{AB} 及两种不同粒子有不同的径向相干振荡, 则给质谱仪的测量结果带来误差。因为在此情况下, A 种粒子和 B 种粒子的平均回旋频率之差为

$$\frac{\Delta f_{\text{rev}}}{f_{\text{rev}}} = -\alpha_0 \left[\frac{\Delta(m/q)}{m/q} \right] + (1 - \alpha_0 \gamma^2) \frac{\Delta v_{AB}}{v} - \frac{1}{C_0} \frac{x_{\text{coh.A}} - x_{\text{coh.B}}}{\rho_0} ds \quad (16)$$

上式中 $\Delta(m/q)$ 是 A、B 两种粒子质荷比之差。等号右侧末后两项是测量误差。相对误差 ϵ 是

$$\epsilon = \frac{(1 - \alpha_0 \gamma_0^2) \frac{\Delta v_{AB}}{v} - \frac{1}{C_0} \frac{x_{\text{coh.A}} - x_{\text{coh.B}}}{\rho_0} ds}{\alpha_0} \quad (17)$$

式(15)分母的第一项和式(17)分子的第一项是粒子速度分散对环形质谱仪性能的影响, 有关文章(如文献[1])已经讨论过。第二项则是粒子横向运动对环形质谱仪性能的影响, 是过去文章中未加讨论的内容。

公式(15)中的 x_β 可表示为

$$x_\beta = \sqrt{\frac{\epsilon \beta_x}{\pi}} \sin(\theta - \theta_0) \quad (18)$$

式中 β_x 是径向振幅函数, 它是 s 的函数; θ 是径向自由振荡的相角; $\theta - \theta_0 = \int_{s_0}^s \frac{1}{\rho_x} ds$; ϵ_x 是束流的径向发射度。式(18)所表示的是束流外缘粒子的自由振荡, 它的振幅最大, 对谱仪分辨率影响也最大。公式(17)中的径向相干振荡可表示为

$$x_{\text{coh}} = F \sqrt{\beta_x} \sin(\theta - \delta) \quad (19)$$

式中 F 和 δ_x 为常数, 对不同束流 F 、 δ_x 值不同。径向相干振荡或者由入射误差引起(当被测束流是从环形质谱仪外面入射进来), 或者由束流在质谱仪内与内靶作用引起平均能损, 而内靶处又未能消色散。把式(18, 19)分别代入式(15, 17)便得到

$$R = \frac{\alpha_0}{\left| (1 - \alpha_0 \gamma^2) \frac{\delta v}{v} \right|_{\max} + \frac{\sqrt{\epsilon_x}}{C_0} \left| \frac{\sqrt{\beta_x} \sin(\theta - \theta_0)}{\rho_0} ds \right|_{\max}} \quad (20)$$

及

$$\epsilon = \frac{(1 - \alpha_0 \gamma_0^2) \frac{\Delta v_{AB}}{v} - \frac{1}{C_0} \frac{[F_A \sqrt{\beta_x} \sin(\theta - \delta_A)] - [F_B \sqrt{\beta_x} \sin(\theta - \delta_B)] ds}{\rho_0}}{\alpha_0} \quad (21)$$

式(21)中 F_A 、 δ_A 、 F_B 、 δ_B 分别是 A 种粒子束与 B 种粒子束的径向相干振荡的常数。

为了提高环形质谱仪的分辨本领和减少测量误差, 在环形质谱仪里常用束流冷却技术以

减少被测束流的 δ_V 、 Δ_{VAB} 以及径向自由振荡和相干振荡。在此情况, 谱仪的分辨本领和测量误差, 一方面由环形质谱仪本身参数 α_0 、 γ 和 β_x 决定, 另外还依赖于冷却装置的冷却效果, 即冷却后束流的 δ_V 、 Δ_{VAB} 以及 ϵ_c 和 F 值。利用式 (20) 和式 (21) 即可决定该质谱仪的分辨本领和测量误差。

冷却过程需要一定时间, 如秒的量级。上述采用冷却技术的测量方法不适于测量短寿命粒子。为了测量短寿命核可以考虑使环形质谱仪工作在它的临界能, 即令

$$\gamma = \gamma_c \quad (22)$$

γ_c 是质谱仪的临界能, 它等于

$$\gamma_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0}} \quad (23)$$

于是式 (20)、(21) 分别化为

$$R = \frac{\alpha_0}{\frac{1}{C_0} \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{\epsilon_c \beta_x}{\pi} \sin(\theta - \theta_0)} ds} \quad (24)$$

$$\epsilon_c = \frac{\frac{1}{C_0} \frac{1}{\rho_0} [F_A \sqrt{\beta_x \sin(\theta - \delta_A)} - F_B \sqrt{\beta_x \sin(\theta - \delta_B)}] ds}{\alpha_0} \quad (25)$$

式 (24)、(25) 是环形质谱仪工作在临界能量时的分辨本领和测量误差的表示式。可以看出, 如不考虑非线性色散, 则在此状态下, 环形质谱仪的性能完全依赖于束流的径向自由振荡和相干振荡。采用这种测量方式时, 被测束流没有经过冷却过程, 它的径向发射度和相干振荡都比较大, 对环形质谱仪的分辨本领及测量精度会有相当的影响。应采取可能的措施, 尽量减小被测束流的径向发射度 ϵ_c 和相干振荡, 以获得较好的分辨本领并减小测量误差。

参考文献

- 1 Franzke B. *Nucl Instr and Methods*, 1987, Section B 24/25: 18

THE EFFECT OF THE TRANSVERSE MOTION ON THE CIRCULAR MASS SPECTROMETER

XU Jianming

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080

ZHAN Wenlong, XIA Jiawen

Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000

ABSTRACT: The effect of the transverse motion on the resolution power and measurement accuracy of the circular mass spectrometer is analyzed. Related expressions for determining these effects are given.

KEY WORDS: transverse motion; circular mass spectrometer; resolution power