

分类号_____ 密级 _____
UDC _____ 编号 _____

中国科学院高能物理研究所 博士后研究工作报告

BEPCI/BESII束流本底的MC研究

杨 胜 东

工作完成日期: 2001 年 9 月 至 2003 年 8 月
报告提交日期: 2003 年 8 月

中国科学院高能物理研究所(北京)

2003 年 8 月

BEPCI/BESII 束流本底的 MC 研究

THE MONTE CARLO STUDY OF BEAM BACKGROUND ON BEPCI/BESII

博 士 后 姓 名 杨 胜 东
流动站(一级名称) 物 理 学
专 业(二级名称) 粒子物理与原子核物理

研究工作起始日期: 2001 年 9 月

研究工作期满日期: 2003 年 8 月

中国科学院高能物理研究所(北京)

2003 年 8 月

内 容 摘 要

北京正负电子对撞机(BEPC)是我国高能物理领域物理研究的最主要的对撞机,对它的本底研究对于北京正负电子对撞机(BEPC)和北京谱仪(BES)的升级改造具有重要的参考作用。

本文采用 Monte Carlo 模拟方法对 BEPCI/BESII 的主要本底--束流本底进行了比较仔细的研究,这是关于 BEPCI/BESII 本底的首次通过实际模拟计算的研究,并进行了系列实验,分析表明本底 MC 研究结果比较令人满意。

研究采用 DECAY TURTLE 模拟正负电子流在储存环中运动造成的丢失粒子的产生,采用基于 GEANT3 的 SIMBESv102 模拟丢失粒子在 BESII 附近造成的次级粒子本底产生和本底在 BESII 中的探测器响应,进行实验并对比分析。本底产生机制本文主要考虑了正负电子束流与残余气体的库仑(Coulomb)作用和韧致(Bremsstrahlung)作用以及电子束团内部的托歇克(Touschek)效应。

本文对 BEPCI/BESII 的束流本底研究表明,BESII 中束流本底的产生主要是由于束流与残余气体的韧致作用,BESII 束流附近的磁场和器件对本底的影响较大。本文研究还证明了本文所用的程序对于模拟束流本底是有效的。

关键词: 本底、MC 模拟、韧致作用、库仑作用

Abstract

BEPC(Beijing Electron Positron Collider) , a best significant collider for high energy research of China, The study of its background is very necessary for upgradence of BEPC and BES(BEijing Spectrometer).

It is the first computing study for BEPC/BES to study background of BEPCI/BESII through Monte Carlo simulation. The beam background is main subject in this careful study. Comparing with the experiments we did, the Monte Carlo method is more satisfied.

It is using DECAY TURTLE to do simulation of lost particles of electron or positron beam in the storing ring and using SIMBES version102 based on GEANT3.21 to do simulation of the background of the lost particles near and in BESII and of the response of the detectors. After then, the background experiments were done and the data was analysed. The effects in this study are that the beam-gas part, eg. Coulomb interaction and Bremsstrahlung interaction, and the in-beam part, eg. Touschek effect.

The study of beam background on BEPCI/BESII shows:

- 1.it is Bremsstrahlung interaction of beam-gas to cause beam background of BESII
- 2.The quadupole magnet and other equipment near beam are more important for background.
- 3.This Monte Carlo simulation is valuable to study beam background.

Key word: background, Monte Carlo simulation, Bremsstrahlung interaction , Coulomb interaction

目 录

内容摘要.....	i
Abstract	ii
目录.....	iii
图目录.....	v
引言.....	1
第一章 BEPCI/BESII 的本底.....	4
§ 1 BEPCI/BESII 本底.....	4
1、宇宙线本底.....	5
2、加速器的束流相关本底.....	5
3、加速器和探测器的电子学噪声.....	5
§ 2 BEPCI 简介.....	6
1、直线加速器.....	7
2、输运线.....	7
3、储存环.....	8
§ 3 BESII 简介.....	9
1、束流管.....	10
2、顶点探测器.....	10
3、主漂移室.....	14
4、飞行时间计数器.....	14
5、簇射计数器.....	15
6、磁铁系统.....	16
7、Muon 计数器.....	16
8、亮度监测器.....	16
9、气体系统.....	16
10、北京谱仪的数据获取和离线分析系统.....	17
§ 4 BEPCI/BESII 束流相关本底.....	18
1、丢失粒子.....	18
2、同步辐射.....	20
3、次级本底.....	20
4、本底模拟涉及的 BEPCI/BESII 部件.....	20
第二章 束流相关本底模拟研究方法.....	31

§ 1 模拟工具.....	31
1、 DECAY TURTLE.....	32
2、 探测器模拟和 GEANT.....	32
§ 2 束流相关本底模拟方法.....	36
1、 事例产生子.....	36
2、 补充的 BEPCI/BESII 部件.....	37
3、 探测器结构编程.....	39
第三章 本底 MC 模拟分析和实验对比.....	41
§ 1 MC 模拟结果及分析.....	41
1、 VC 电缆形状.....	41
2、 几何对称性和电荷对称性.....	43
3、 MC 模拟初级本底检验.....	45
4、 四极磁场的影响和坐标变换的影响.....	46
5、 不同作用对本底的贡献和本底的特征.....	48
6、 储存环不同区段对本底的贡献和本底的特征.....	49
§ 2 本底实验的结果及分析	51
1、 探测器本底与流强的关系.....	51
2、 探测器本底与束流在对撞点处穿越角度的关系.....	52
3、 探测器本底与储存环上不同区域段真空度的关系.....	53
4、 Touschek 效应.....	53
§ 3 本底实验与 MC 模拟的数据比较.....	55
1、 本底来源.....	56
2、 顶点室丝击中率.....	56
3、 实验和 MC 模拟的 VC 本底计数率比较.....	58
§ 4 总结.....	59
参考文献.....	60
致谢.....	61
博士期间发表的文章.....	62
博士后期间发表和已被接受的文章.....	63
个人简历.....	64
通讯地址.....	65

图 目 录

图1.1 BEPC鸟瞰图.....	8
图1.2 BEPC示意图.....	9
图1.3 BES的侧向和轴向示意图.....	11
图1.4 顶点探测器结构示意图.....	12
图1.5 顶点探测器稻草管排放示意图.....	12
图1.6 顶点探测器与束流管的连接部分示意图.....	13
图1.7 北京谱仪主漂移室丝层结构示意图.....	14
图1.8 桶部簇射计数器结构示意图.....	15
图1.9 BES亮度监测器.....	17
图1.10 BEPC对撞区直线段布局.....	21
图1.11 四分之一的四极磁铁铁核z向剖面示意图.....	22
图1.12 静电分离器示意图.....	23
附图1 BES和对撞区BEPC结构示意图.....	25
附图2 束流管结构示意图1.....	26
附图3 束流管结构示意图2.....	27
附图4 BEPC 直线段结构示意图1.....	28
附图5 BEPC 直线段结构示意图2.....	29
附图6 BEPC 直线段结构示意图3.....	30
图3.1 bremsstrahlung本底计数: VC 电缆Cu的筒状和片状对比.....	42
图3.2 coulomb本底计数: VC 电缆Cu的筒状和片状对比.....	42
图3.3 bremsstrahlung本底: 电子、电子反向的结果.....	44
图3.4 coulomb本底: 电子、电子反向的结果.....	44
图3.5 bremsstrahlung本底: 电子、正电子同向的结果.....	45
图3.6 coulomb本底: 电子、正电子同向的结果.....	45
图3.7 电子束流的coulomb作用本底的对称性.....	46
图3.8 磁场反向和坐标变换下的bremsstrahlung作用本底.....	47
图3.9 磁场反向和坐标变换下的coulomb作用本底.....	47
图3.10 韧致、库仑和touschek三种作用机制引起的本底和总的本底.....	49
图3.11 不同作用区段的本底对韧致作用的本底的贡献.....	50
图3.12 不同作用区段的本底对库仑作用的本底的贡献.....	50
图3.13 顶点室第5层第10、20、30和 40号丝计数率与流强的关系.....	52

图3. 14 VC第5层第10、20、30和 40号丝计数率与穿越角度的关系.....	53
图3. 15 储存环上真空计分布及实验时的真空度.....	54
图3. 16 对撞点上游距对撞点200米到160米和100米到40米区域段内真空度随时间变化 曲线(左图)和顶点室第5层第10、20、30和40号丝计数率随时间变化曲线(右 图)	54
图3. 17 对撞点上游距对撞点30米到13米区域段内真空度随时间变化曲线(左图)和顶 点室第5层第10、20、30和40号丝计数率随时间变化曲线(右图)	55
图3. 18 顶点室第5层第10、20、30和40号丝计数率与束团个数关系.....	55
图3. 19 韧致辐射丢失电子来源.....	56
图3. 20 实验时(左图)和MC模拟(右图)顶点室5—8层丝击中率分布.....	57
图3. 21 模拟同步辐射(左图)和实验(右图)的顶点室1—4层丝击中率分布.....	57

引 言

探索自然奥秘是人类心智的永恒追求，高能物理实验是人们探索物质结构和物质运动基本规律的最主要的手段。经过人们的努力，对物质的认识也逐渐深入，从分子、原子、亚原子粒子进入到夸克层次。探索越来越进入微观世界，高能粒子加速器和探测器是从事这种高能物理实验的有力的也是最主要的实验工具。粒子加速器的优越性在于它能随人们的意愿产生需要的粒子和碰撞。粒子加速器从回旋加速器、同步加速器到当今的对撞机，能量越来越高，追求更高能量、更高亮度的加速器和性能更卓越的探测器是世界上各大实验室的努力方向。这样，就可以更深入研究未知的物理世界、了解未知的基本规律，但同时，实验仪器的造价也急剧增加。要进行合理的设计以取得最优的造价和性能，本底的研究是必不可少的，这也是加速器技术和探测器技术的重要内容。

高能粒子加速器的本底研究对于高能物理实验的加速器和探测器的设计和建造以及对于实验数据的获取和重建的系统设计具有非常重要意义。本底对加速器的设计原理和技术提出了更高的要求。

现在世界上的高能物理实验都是极高能量、极高精确度的实验。粒子能量提高，也就更难产生和加速、更难约束控制，束流本底更强，加速器噪声也更强，保证束流亮度和寿命也就更困难。因此，加速器的应用原理和加速器各部件的设计都需要随之更新，以保证能产生需要的粒子种类及能动量要求，以保证完成需要的对撞事例。

加速器产生的束流会带来大量的高能本底，这些高能本底首先会造成加速器和探测器的材料的损伤，会降低加速器和探测器部件的使用寿命特别是高精密度的探测器的使用性能和寿命。只有进行本底研究，才能保证探测器的器件在高能本底下正常工作，特别是保证对撞中心区域附近器件的正常工作，才能保证加速器和探测器器件达到设计使用寿命，保证实验的顺利进行。

高能粒子对撞产生的事例极大多数都是本底事例，这需要有快速有效的触发判选和高速的数据传输，也要求高质量高性能的数据获取和收集的软硬件系统，来保证对撞事例的收集效率和速度。同时，大量的本底对探测器的设计精度也有损害，各种本底会给数据分析带来系统误差。必须研究本底，以求较好地排除本底保留真实事例，以保证合理有效的触发判选系统设计、保证高效的数据获取、保证探测器的数据分析精度。

在加速器和探测器的设计中，本底的研究是前期工作，对于整个工程

的设计和 implement 进度影响很大，本底模拟研究可以对具体的设计提供必要的参考，例如对撞区域的加速器和探测器的部件布局、屏蔽的添加和放置、探测器各子件的结构位置等，都需要了解本底的种类、强度、分布等等信息。

北京正负电子对撞机 (BEPC) 是我国高能物理领域物理研究的最主要的对撞机，也是世界上少数的几个主要高能对撞机之一。现在，它又要进行新的升级改造，对它的本底研究对于北京正负电子对撞机 (BEPC) 和北京谱仪 (BES) 的原有数据的系统误差分析、对于 BEPC 和 BES 新的升级改造都具有重要的参考作用。

对比于世界上其它的高能加速器，BEPC 储存环较小，而新的升级改造目标是对撞能量提高、对撞亮度提高两个量级，要保证加速器达到设计的能量和亮度，要保证在这样的能量和亮度下探测器及附属数据获取系统能正常可靠的工作，本底的研究是必需的。

本文工作是采用 Monte Carlo 模拟计算研究 BEPC/BES 的束流本底，束流本底是 BEPCI/BESII 最主要的本底。对于束流本底的模拟研究分两部分，第一部分是束流在储存环中产生粒子丢失，这部分应用 DECAY TURTLE 模拟研究，主要考虑了束流与真空腔中残余气体的库仑散射和韧致作用，第二部分是束流丢失粒子（初级本底）在 BES 对撞区域附近与 BEPCI 各器件真空壁碰撞和 BESII 各器件碰撞产生的次级粒子本底，以及这些初级粒子本底及次级以上粒子本底在 BESII 中的探测器响应，这部分应用了基于 GEANT3 的专用于 BESII 物理分析的 SIMBES，经过修改加以利用。DECAY TURTLE 是国际上通行的模拟束流传输的软件，GEANT3 是国际高能领域的标准探测器模拟软件，SIMBES 是分析 BESII 的标准软件，对 SIMBES 的修改是加入了 BEPCI/BESII 近对撞区域的 BEPCI/BESII 的近束流中心线的器件和磁场。

这是关于 BEPC/BES 的首次本底计算研究，而相比于以前，都是根据经验估计本底进行设计建造工作。同时，为了仔细研究 BEPCI/BESII 的本底特征，在 BEPCI/BESII 上进行了系列的束流相关的本底实验，模拟结果与实验数据的分析表明，本研究采用的方法能够正确的模拟束流本底，从而对 BEPC/BES 束流本底的模拟研究奠定了基础，也为新一代 BEPC/BES 的设计提供更确实可靠的参考。

本文研究的目的是完成 BEPC/BES 束流本底模拟程序的框架，为以后的本底模拟研究提供一个基础；确定模拟程序的有效程度和可靠性；研究本底的性质特征和影响本底的因素，特别是对撞区附近器件的影响；为新的 BEPC/BES 升级设计和本底研究提供经验和参考。

但由于是首次模拟研究，模拟的计算量也大，新的 BEPC/BES 升级设计已经开始，而本底研究又是设计的前期工作，任务也很紧迫，故而为加快本底研究工作，由本底研究合作小组合作完成，本人承担第二部分工作也即次级本底产生和本底的探测器响应部分的工作。本人这部分工作涉及的加速器和探测器器件主要是 BESII 各子探测器（特别是近束流中心线的器件）和对撞区附近直线段上的部分 BEPCI 近束流中心线器件。

本论文共分四章，第一章介绍 BEPCI/BESII 及其本底分类和来源，第二章介绍本文工作的研究方法和具体考虑，第三章是 Monte Carlo 模拟的结果分析，以及实验数据的分析和对比，并总结这次模拟研究。

第一章 BEPCI/BESII 的本底

高能物理实验的基础是高质量高性能的加速器和探测器以及与之相配套的电子学 and 软件等系列软硬件设备。北京正负电子对撞机 (BEPC) 及其探测器-北京谱仪 (BES)^[1,2] 是中国研究高能物理的最重要的实验装置, 也是目前世界上唯一工作在 τ -粲物理能区的大型实验装置。北京正负电子对撞机 (BEPC) 和北京谱仪 (BES), 自 1989 年建成以来, 已成功地运行了 12 年。1996 年加速器和探测器均进行了升级, 使性能有了相当大的改进。此后, 对撞机仍称为 BEPC, 而谱仪则称为 BESII。

从建造以来, 北京正负电子对撞机 (BEPC) 和北京谱仪 (BES) 已产生和积累了大量的 J/ψ 和 $\phi(2S)$ 事例, 在 τ 轻子物理和粲物理方面已取得一系列高水平的重要物理成果, 使我国高能物理研究在国际高能物理界占有重要位置。而本底的研究对于北京正负电子对撞机 (BEPC) 和北京谱仪 (BES) 高性能的获得是不可缺少的。

本章简要地介绍 BEPCI/BESII 的本底种类和来源, BEPCI 和 BESII 的结构功能, 以及本文所考虑的 BEPCI/BESII 束流本底的产生机制和影响因素。

§ 1 BEPCI/BESII 本底

北京谱仪 BES 是一个通用型的大型粒子探测装置, 用于探测正负电子对撞产生的末态粒子, 将末态粒子产生的信号记录下来, 通过离线分析重建这些粒子的能动量, 以研究正负电子对撞过程。由正负电子对撞的基本物理过程的截面可知, 该能区反应截面最大的是 J/ψ 和 $\phi(2S)$ 的产生过程, 相应的事例率也不过是几 Hz。产生正负电子对撞事例的同时, 会有大量的并非由正负电子对撞产生的事例, BES 获取的事例只有极少部分是正负电子对撞产生的事例, 其余的事例成为研究事例的本底。对撞事例的本底主要包括宇宙线本底, 加速器束流相关本底, 加速器和探测器电子学噪声等, 其中最首要的是加速器的束流相关本底。^[3,4,5] 下面分别介绍各种本底及其产

生原因和压低方法，对于加速器的束流相关本底后面专门论述。

1 宇宙线本底

空间存在高能的宇宙线粒子，这些宇宙线粒子会穿过探测器外的屏蔽，进入探测器造成本底。宇宙线本底的主要成分是 μ 粒子，其强度随入射的天顶角而变化。对探测器外面加上一定屏蔽，可以阻挡一部分宇宙线，再根据宇宙线本底在探测器中的特征，通过选择BES的对撞事例触发条件可以排除大部分，但仍有少部分宇宙线事例被记录下来。宇宙线本底相对较小，对数据采集的造成的本底也较小，再通过离线分析排除，其对数据的影响较小。

2 加速器的束流相关本底

加速器的束流相关本底是主要的本底，有以下几类：加速的正负电子偏离束流轨道逸出束团成为丢失粒子，这些丢失粒子直接进入探测器被记录下来，成为束流的初级本底；高速的正负电子束团在储存环中回旋运动以及由于聚焦偏转产生的同步辐射光子，也有一部分直接进入探测器，成为初级粒子本底；束流的丢失粒子和同步辐射光撞击探测器附近的加速器器件和探测器器件，会由于级联簇射产生次级及多级粒子，这些多级粒子会在探测器中产生次级粒子的本底。

加速器的束流相关本底影响最大，损害加速器和探测器部件，影响设计的质量性能，对数据的采集和分析增加困难，实验上最直接的是降低束流的寿命和质量。

束流相关本底是 BEPC/BES 的主要本底，也是本次研究主要关注的对象。BES 的束流相关本底大，原因复杂，将在本章后面较详细分析它的分类、来源、产生机制和影响因素等等。

3 加速器和探测器的电子学噪声

加速器和探测器工作时，可能由于各种原因造成对其电子学系统的噪声干扰，电子学设备自身也会有噪声，这些都可能造成一部分本底事例。这类本底的原因比较复杂。对于加速器方面，主要是其工作的高频腔会产生高频干扰，正负电子束团在储存环内高速高频运动，这会在束流轨道附近的加速器器件和探测器器件上引起感应电流，产生电磁噪声。对于探测器方面，各子探测器的室体及前端线路屏蔽接地不好，可能内部打火放电；

高压不稳定或屏蔽接地不良，可能存在打火。电子学设备自身也会有噪声，电子学内部激荡，电子学前端屏蔽不好引起的电磁干扰，电子学器件的热噪声等等。

这类电磁干扰噪声比较杂，有时很难被注意，这类本底问题的解决，就要根据不同的产生原因分别对待，逐个解决。好在这种本底正常情况一般不大，对数据的影响也相对较小，但也不容忽视，BESII 的升级过程中遇到的问题就是例子。

本底问题比较复杂，很多都是相互关联的。要解决本底问题，必须从加速器和探测器的设计就开始考虑。加速器的束流本底是首先要关注的本底，但所有这些本底都需要重视。这些本底会损害加速器和探测器与配套系统甚至使其不能工作，会降低束流的寿命和质量，会损害数据的质量，它们都可能对研究造成很严重的障碍。

在BESII的改进过程中，安装联调时出现的两个技术关键都是和本底有关。一，是主漂移室的pick-up噪声，是实验必须在高域下工作。它来源于触发系统的reset信号，通过高压电缆耦合到主漂移室室体上，而主漂移室的高压机箱过紧使机箱间的耦合增强。解决办法是减少高压电缆的数量和长度并增加电缆间的屏蔽，隔离高压机箱并加强屏蔽，特别注意主漂移室的接地。结果使工作域由 1200 降到 350 域以下。二，是主漂移室的暗电流与随机噪声，它来源于定位子的绝缘材料结晶不好在工作时产生滞后的漏电效应，这是以前未被认识到的问题。最后采取混合高压的方案解决了这一问题。主漂移室噪声问题的基本解决还得益于另外两个主要发现，找到了谱仪周围空间电磁噪声的两个噪声源：加速器束测装置DCCT（直流电流变压器系统）和静电分离器，并对它们进行了屏蔽。由此，BESII主漂移室的电磁噪声问题终于解决。^[6, 7, 8]

BEPC/BES 又要进行新一轮的升级，新的设计亮度要提高两个数量级，加速器束流流强更大，相应的束流本底及相关本底将更大，本底研究在新BEPC 设计工作中也更为重要。

下面将简单介绍 BEPCI/BESII 结构功能，再详细介绍本研究的重点束流本底，进行进一步分析。

§ 2 BEPCI简介^[1, 2, 8]

北京正负电子对撞机（BEPC）是专为研究 τ -粲能区物理而设计的，是

把正负电子加速到 1.1-1.4GeV 从而实现正负电子对撞的加速器。1987 年 10 月 7 日破土动工，1988 年 10 月 16 日完成第一次对撞。

BEPC 有两个对撞点，实际运行中只有安放在南对撞点的北京谱仪在工作。BEPC 设计为兼用模式，除提供 BES 采集数据之用外，还可提供同步辐射光进行应用研究。BES 取数的工作模式有三种：对撞模式、分离束模式和单束模式。除对撞模式用于物理数据的获取外，其余两种模式用于本底研究之用。分离束是指使相对而行的束流中心相距一定的距离。

BEPC 由电子直线加速器和储存环组成，如图 1.1，图 1.2 所示。正负电子在直线段被加速到 1.1-1.4GeV，然后沿相反方向分别注入储存环中并被加速到所需要的能量，进行对撞。同时环上的四个高频腔不断补充束流，由于同步辐射造成的能量损失，使束流保持在工作能量。

1996 年，BEPC 进行了升级，主要是提高亮度、减小束团长度及增加运行可靠性。主要采取的措施有：采用 Mini- β 技术，提高亮度并缩短束团长度；增加束流强度；改两个对撞点（IP）为一个对撞点。现在，BEPC 要进行新的升级，称现有的为 BEPCI。涉及 BEPCI 的模拟研究考虑的是储存环的束流丢失模拟和束流在近对撞区的加速器器件的溅射，前部分是由合作者完成的，后部分是本人的工作。

1 直线加速器

注入器是一台可将正负电子加速到 1.1-1.4GeV 的直线加速器，全长 202 米。注入器头部有一个毫微秒强流电子枪，产生流强 5-10A 电子束。电子束经过预加速达到 150MeV 时进入正电子靶区。

第六届加速管后面，有一个厚度为 6 毫米的钨靶，电子束打在钨靶上，由级联簇射过程产生正负电子对，用磁压缩系统收集正电子消除负电子，使正电子进入主加速段，得到能量 1.1-1.4GeV 的正电子束流。

需要负电子束流时，将正电子靶移出到束流轴线以外，直接得到加速的负电子流。

2 输运线

输运线的作用是将注入器输出的正负电子束流分别由两条通道传送到储存环里。有控制导向的聚焦磁铁和偏转磁铁。

3 储存环

储存环是一个跑道形环形加速器，中心轨道长 240.4 米，由四个长直线节连接四个圆弧。长直线节中点是正负电子发生对撞的地方，在这里安装北京谱仪。

储存环两侧的直线节叫注入区，注入系统使输运线来的电子束流进入环形轨道。

弯转磁铁和四极聚焦磁铁控制电子流的运行轨道。围城环形的真空盒从所有这些磁铁的中间穿过，电子在高真空的环内运动。

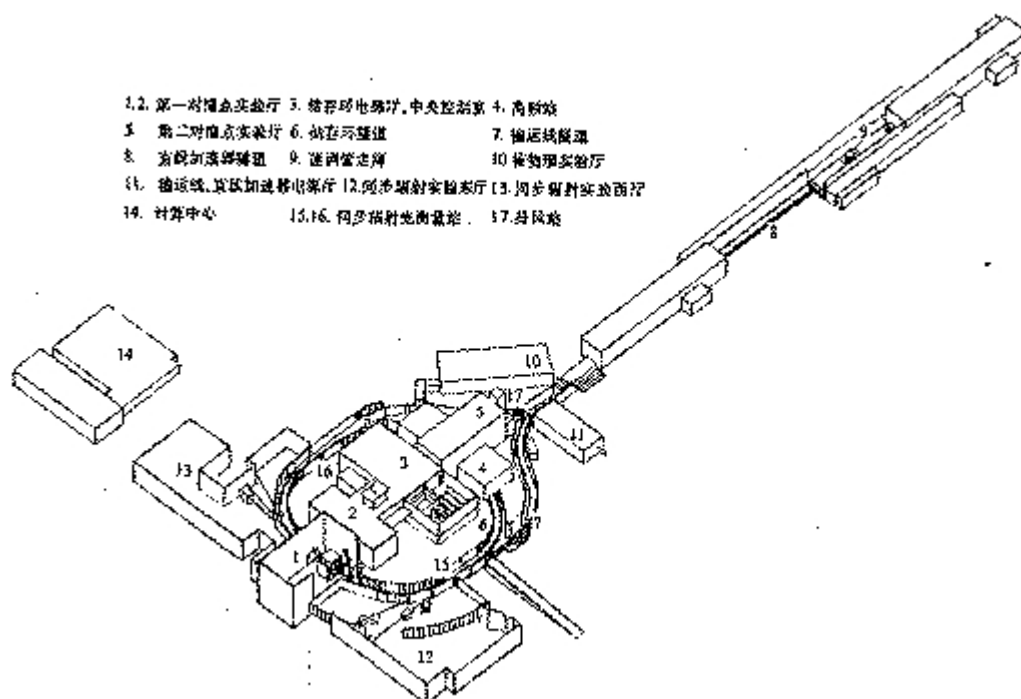


图 1.1 BEPC 鸟瞰图

BEPC 束测系统的任务是给出正负电子流在束流输运线和储存环总长约 550 米的轨道上运动这一个过程中的束流性能与参数。

加速器控制系统的任务是对束流和各部件进行数据采集和实时控制。

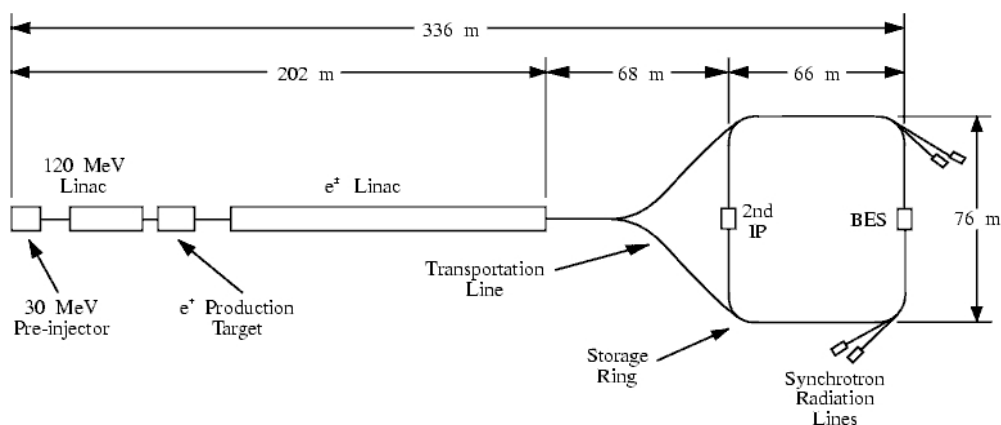


图 1.2 BEPC 示意图

§ 3 BESII简介^[1, 2, 8]

北京谱仪 (BES) 是工作在北京正负电子对撞机上的大型通用磁谱仪，用于测量正负电子对撞后产生的末态反应，研究末态粒子的性质及其相互作用的规律。BES 建成运行一段时间后，从 1993 年到 1997 年进行了升级改进工作，改进后的北京谱仪称 BESII。现在，北京正负电子对撞机 (BEPC) /北京谱仪 (BES) 又要进行新一代升级改造，称新一代的为 BEPCII/BESIII。涉及 BES 的模拟研究是本人的工作。

现在的北京谱仪 (BESII)^[8, 9, 10, 11]长约 6 米，宽、高各为 7 米，重约 480 吨，主要由以下几种子探测器和控制系统组成：

- 束流管(Beam Pipe);
- 稻草管顶点室(Straw Vertex Chamber);
- 主漂移室(Main Drift Chamber);
- 飞行时间计数器(Time Of Flight Counter);
- 簇射计数器(Shower Counter);
- μ 子计数器(Muon Counter);
- 亮度监测器(Luminosity Monitor);
- 磁铁线圈(Magnet System);
- 气体系统(Gas System);
- 触发判选系统(Trigger System);
- 电子学系统(Electronics System);
- 在线数据获取系统(Online Data Acquisition System);
- 离线数据分析系统(Offline Data Analysis System)

等等。图 1.3 给出了 BES 的侧向和轴向示意图。

BEPC 的工作能区为 2-5.0GeV, 北京谱仪的物理目标是 τ -粲物理。BES 是目前世界上唯一运行在此能区上的磁谱仪。根据物理事例特性, 要求北京谱仪具备以下性能:

- 要求对带电径迹和中性径迹有大的立体角覆盖率;
- 对于光子的测量, 不仅要求有较好的能量分辨率, 还要求有好的角度分辨率;
- 要使带电径迹在进入主漂移室(MDC)前的物质量尽可能少, 以减少多次库仑散射给动量较低的带电径迹带来的测量误差; BESII 最内层探测器部分的束流管由铍制成。

北京谱仪利用飞行时间计数器、主漂移室、簇射计数器和 μ 子计数器来鉴别粒子。

飞行时间计数器的时间信息可提供 $\pi/K/p$ 分辨; 主漂移室 dE/dX 取样次数达到 40 次, 改善了粒子能损的测量精度; 簇射计数器采用自猝灭流光模式(SQS), 用于区分电子和强子; μ 子计数器可以区分 μ 子和强子。

1 束流管(Beam Pipe) ^[8]

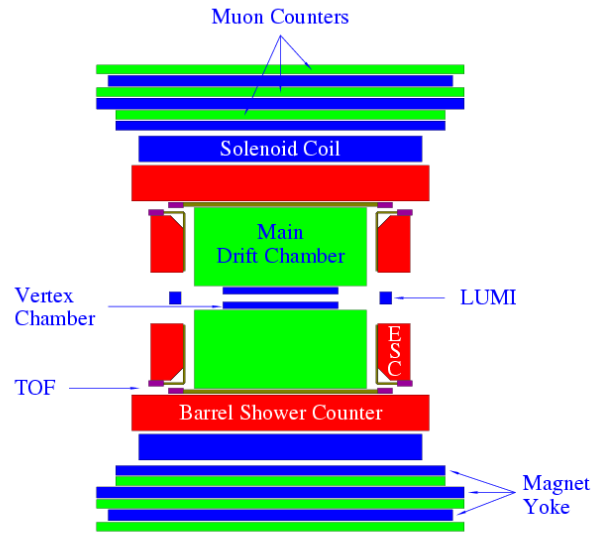
束流管是北京谱仪最内层的部分, 也是储存环的一部分。为了减少多重散射效应对动量分辨的影响, 束流管应采用低原子序数的材料, 目前 BESII 束流管所用的材料为外直径 97.79mm, 厚 1.27mm 的铍(Be)管。

BESII 束流管是利用 MARKIII 束流管, 中间段是长 406.4mm 长的铍管, 外接一段铝管与顶点探测器外的不锈钢束流管相连。顶点探测器的内外端板就焊接在铝管上。铍与钢不易焊接, 用铝可以解决焊接问题, 铝管也提供了束流管的固定。

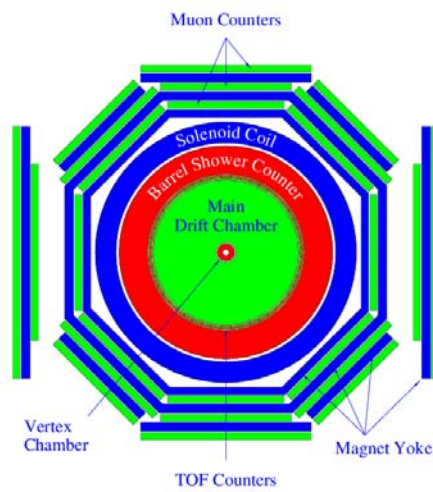
BESII 内部的束流管离对撞点(IP)最近, 离束流中心线也近, 是束流本底模拟研究中的必须仔细考虑的部分。

2 顶点探测器(Vertex Chamber) ^[8, 9, 12]

利用 MARKIII的顶点探测器(Vertex Chamber)代替老的中心漂移室。顶点探测器是用来探测对撞束团中粒子相互作用顶点以及次级粒子衰变的二次顶点的探测器。



Side view of the BES detector



End view of the BES detector

图 1.3 BES 的侧向和轴向示意图

顶点探测器的作用：探测粒子相互作用顶点以及次级粒子衰变的二次顶点，这要求它具有良好的空间位置分辨能力；测量粒子径迹，配合主漂移室可使径迹沿径向方向向内延伸；与主漂移室配合测量粒子动量；提供触发信号，参与触发，可以进一步排除本底。

顶点探测器由 640 个漂移管(单元)组成，围绕束流管沿径向分成 12 层：第 1~8 层，每层有 40 个单元；第 9~12 层，每层有 80 个单元；1~4 层及 9~12 层为轴向层，信号丝平行于束流，共 480 道；5~8 层为斜丝层，5~6 层及 7~8 层分别向相反方向倾斜 3° ，共计 160 道斜丝信号。参见图 1.4，图 1.5 所示。

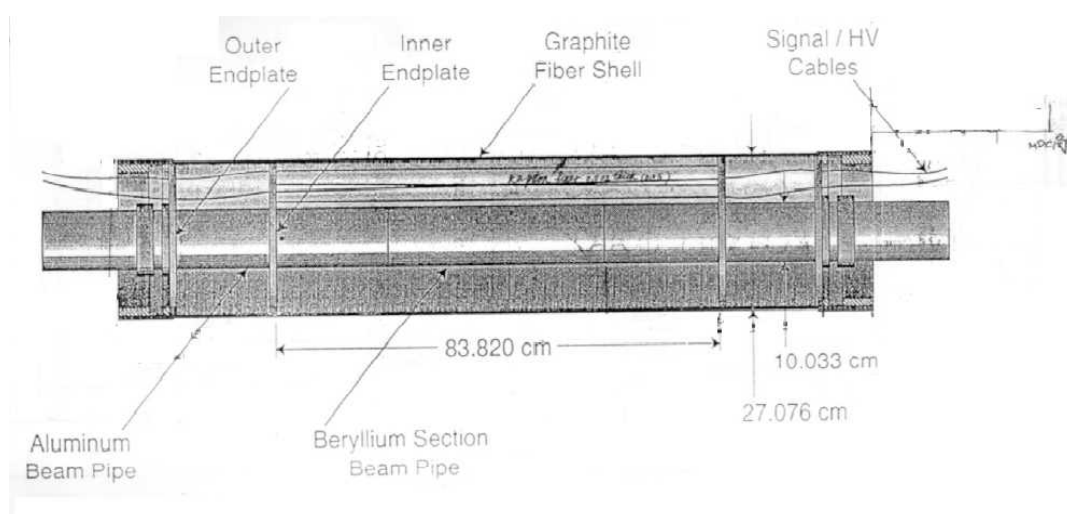


图 1.4 顶点探测器结构示意图

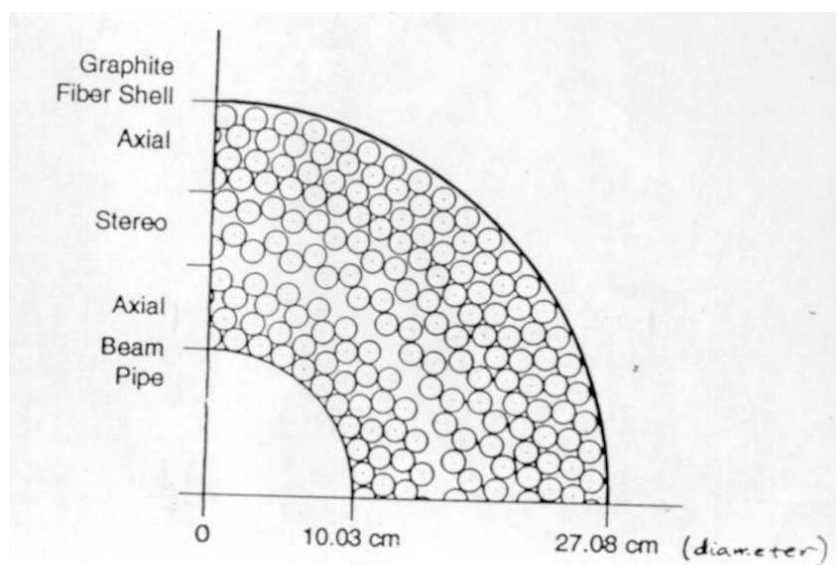
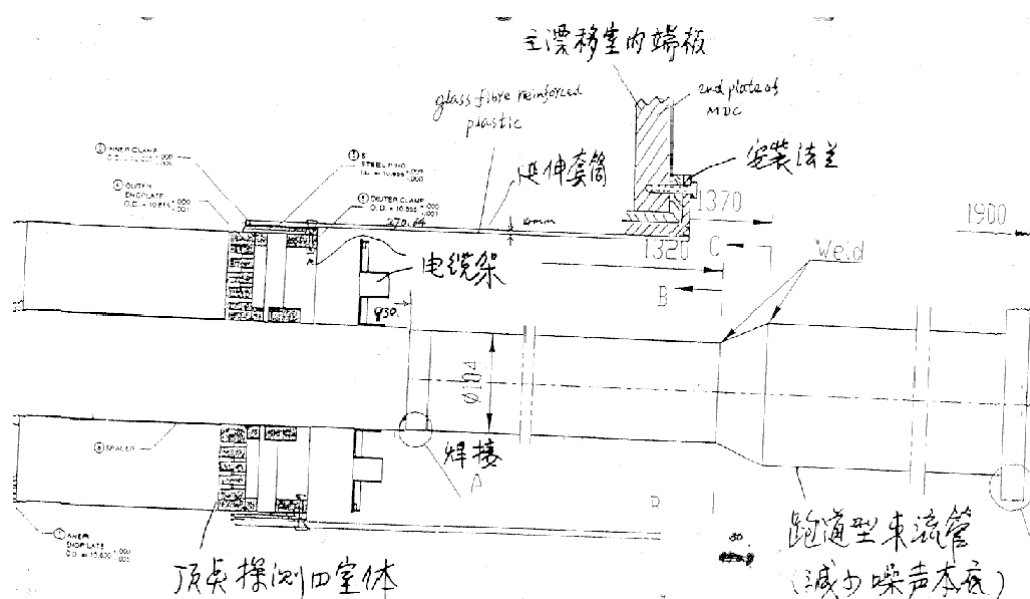


图 1.5 顶点探测器稻草管排放示意图

640 个漂移管封装在一个圆柱型室体中，室体内壁是作为储存环真空管道一部分的对撞区束流管的管壁。室体外桶半径为 142mm，由强度大、密度低的石墨纤维/环氧树脂叠层构成。在外桶内壁粘有 50 μ m 厚的 kapton 衬套密封，以防止工作气体泄漏。室体两端分别装有铅制的厚 2.54cm 的内、外端板，两个内端板的作用是承受漂移管的压力并将其准直定位；外端板除了起密闭作用外，640 道信号也通过外端板上的接线端子由电缆引出。漂移单元的工作高压也通过外端板由电缆引入。端板和电缆物质量大，本底模拟时需考虑，顶点探测器与束流管的连接部分见图 1.6。图上也标明了各位置距对撞点(IP)的 z 向距离，单位 mm。

顶点室的主要性能指标如下:



3 主漂移室(Main Drift Chamber)

主漂移室(MDC)是北京谱仪的核心探测器之一，它用来测量带电粒子的径迹(r 、 θ 、 ϕ)、动量和能量损失(dE/dX)。

主漂移室为圆筒型，内径为 310mm，外径为 2300mm，有效长度 2120mm。内筒采用 2mm 厚的碳素纤维，外筒为 100mm 厚的铝筒，两端是 40mm 厚的铝端板。它由 10 个同心单元丝层组成，各层间距为 300~400mm，其中第 2、4、6、8、10 层丝与 Z 轴平行，称为轴向丝，第 1、3、5、7、9 层为斜丝层，倾角范围 3 度~4 度。斜丝层用来测量径迹的轴向坐标。图 1.7 为主漂移室丝层结构示意图。

由 Bethe-Bloch 公式知，带电粒子单位路径上的能损与粒子的质量和速度有关。因此，对于确定动量的粒子，可由 dE/dX 鉴别粒子。

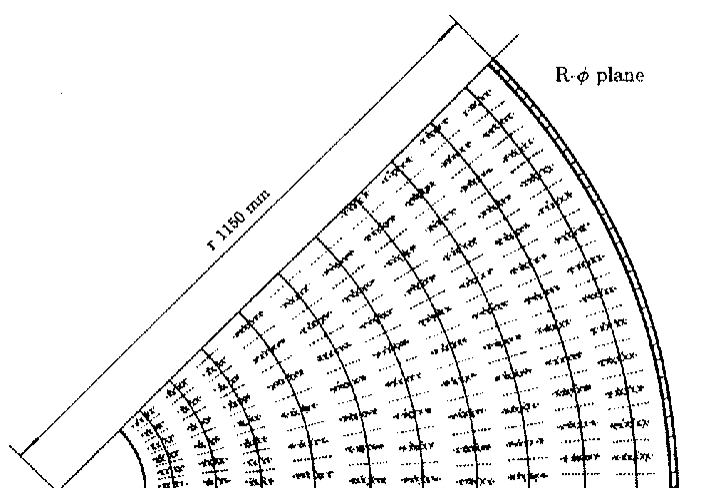


图 1.7 北京谱仪主漂移室丝层结构示意图

4 飞行时间计数器(Time Of Flight)

飞行时间计数器(TOF)的主要作用有两个，一是测量带电粒子的飞行时间，利用测得的时间信息和主漂移室测得的径迹和动量信息一起推算出粒子质量，从而分辨粒子种类；二是利用所测到的时间信息为触发判选系统提供信号，以排除本底。

飞行时间计数器由桶部和端盖两部分组成。桶部飞行时间计数器位于

主漂移室与簇射计数器之间的圆环空间内，由均匀分布着 48 块闪烁计数器组成。端盖飞行时间计数器分为东、西两块，分别放置在主漂移室的两端，各有 24 个梯形闪烁计数器组成环形端盖。每块闪烁体两端经鱼尾形光导和圆柱形光导与光电倍增管相连。信号采用双端读出方式由闪烁体两端读出。

飞行时间计数器的时间分辨率为 170ps(对 Bhabha 事例)。

5 簇射计数器(Shower Counter)

簇射计数器(SC)由桶部簇射计数器(BSC)和端盖簇射计数器(ESC)组成；分别覆盖 4π 的 80%、13%的立体角。

桶部簇射计数器(图 1.8)由 24 层自淬灭流光(SQS)计数器和 24 层吸收层组成，每层有 560 个单元。它采用电荷分配法确定粒子的轴向位置，由计数管的位置决定径向位置。端盖簇射计数器(ESC)为圆环形，分为东、西两块，均由两个半圆环组成。每个端盖由 23 层 Al-Pb-Al 吸收体和 24 层方铝取样管(厚度与桶部簇射计数器一样)组成。

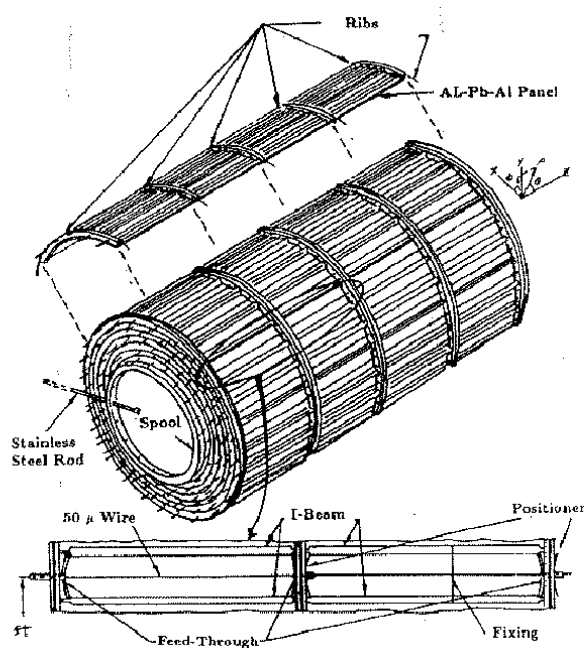


图 1.8 桶部簇射计数器结构示意图

簇射计数器通过利用电磁簇射的方法探测光子或电子的能量和空间位置。在簇射计数器中，不同类型的带电粒子的能量沉积是不同的；利用这

个特点可以区分电子与强子：电子在簇射介质中进行电磁簇射，能量几乎全部沉积，而 μ 子与强子是最小电离过程，能量沉积较小。

6 磁铁系统(Magnet System)

北京谱仪的磁铁系统由螺线管磁铁，磁铁电源和磁铁测量系统组成，其作用是为漂移室提供均匀的轴向磁场。

北京谱仪磁铁为大型螺线管磁铁，中心处轴向磁场 0.4T，磁场精度 0.25%，径迹区的磁场不均匀度 3%，磁场电源为螺旋管磁铁提供高稳定的直流电源，磁场测量系统用于谱仪的磁场分布测量。

7 μ 子计数器(Muon Counter)

μ 子计数器的作用是鉴别和测量正负电子反应末态中的 μ 子。

它通过测量多层击中点的位置来确定粒子飞行轨迹，再与谱仪内层探测器的粒子径迹相匹配，由内层探测器拟合径迹确定 μ 子动量，从而与其它粒子区别开来。

μ 子计数器安装在北京谱仪的最外边，由三层吸收体和三层 μ 子计数器组成，三层吸收体由八边形的钽铁构成， μ 子计数器放在钽铁后面。

8 亮度监测器(Luminosity Monitor)^[8]

亮度监测器通过对小角度 Bhabha 散射的测量来确定 BEPC 的亮度。

亮度监测器是在对撞点的两侧紧贴束流管处的四组探测器，每组均由一个定义计数器 P、一个辅助计数器 C 和一个电磁量能器 S 组成。（）实验上，亮度监测器接收的本底很大，模拟中要考虑它的影响，其中主要是丢失粒子在物质质量大的电磁量能器 S 上的溅射。每个电磁量能器 S 由 12 层钨板和 12 层闪烁体相间叠成，每层长 85mm、宽 100mm，厚度：钨板 3.5mm，闪烁体 4mm。图 1.9 是亮度监测器示意图。

9 气体系统(Gas System)

北京谱仪的顶点室、主漂移室、簇射计数器和 μ 子计数器需使用不同的混合气，以满足各自的设计指标。它们对气体的基本要求是：有适当的漂移速度以利于谱仪在线系统的触发判选；工作电压不宜过高，以利于探测器的运行；有好的猝灭性，从而使探测器有好的坪特性；配比精度高，使相应的探测器有好的空间分辨率。气体系统的作用就是提供满足要求的工作气体。

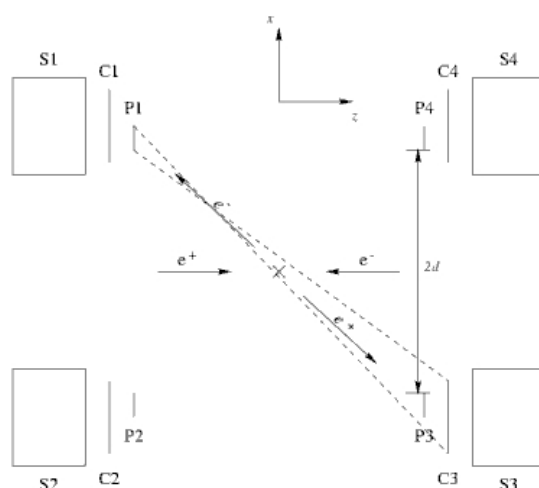


图 1.9 BES 亮度监测器

10 北京谱仪的数据获取和离线分析系统

电子学系统、触发判选系统、在线数据获取系统用于获取原始数据。

BES 电子学系统的基本任务是：接收各探测器来的信号，进行数字化和数据预处理，请求在线计算机读出，并将部分信息提供给触发判选电路；接受在线计算机的控制，对电子学系统本身进行校准；接收对撞机控制的时间参考信号，以便有序、精确地工作。

触发判选系统是北京谱仪的快速实时事例选择和控制的系统。触发判选系统就是在快速判别本底甄别好事例和保证判选取数时间的条件下设置合理的判选条件，符合条件时送出好事例的指示给在线计算机。触发判选系统要求：好事例判选效率高，尽可能排除本底，判选速度快，相对灵活以适应不同的实验条件和物理要求。为了减少死时间，BES 的触发判选采用多级判选方式。

在线数据获取系统的主要任务是把电子学信息记录在磁带或磁盘上，

以便离线分析使用，对系统的运行进行逻辑控制，提高在线数据获取效率。另外还要监视 BEPC 束流亮度、探测器工作状态和工作环境，以及进行单事例采样，以保证整个系统处于正常工作状态。

离线数据处理系统的任务是将在线数获取系统记录下来的数字信号，在离线计算机上还原为粒子种类、能量、动量、空间位置坐标等物理量，为物理分析提供条件。

BESII 束流本底模拟研究中，由于本底计数在主漂移室以外的探测器中计数率过低，分析的数据主要取自顶点探测器。

在本次本底模拟研究中，探测器响应部分的 BESII 子探测器模拟在 SIMBES 都已基本完成，只需修改加入对本底影响较大的 BES/BEPC 器件。一般靠近束流中心线、物质量大且受撞击较多的器件影响大，另外有 BEPC 磁场和 BESII 的铁门需要考虑。磁场是用来约束粒子长生对撞点高量度的，铁门是用来屏蔽同步辐射和束流丢失粒子的。这些器件在下面部分给以较仔细的说明。

§ 4 BEPCI/BESII 束流相关本底

高能加速器的束流相关本底是各种本底中主要的本底，是本次模拟研究的对象。前面说过，束流相关本底有丢失粒子、同步辐射和这些初级本底溅射产生的次级本底。下面较详细介绍这几类本底的来源、产生机制以及研究中需要考虑的影响本底的 BEPCI/BESII 的器件。

1 丢失粒子

储存环中的正负电子脱离束团成为丢失粒子，主要有以下几类：正负电子束团与束流管道中残余气体分子撞击造成粒子偏离或逃逸成为丢失粒子；储存环束流辐射光子时由于量子效应导致的丢失；同一束团内部的电子或正电子之间的托歇克效应导致的粒子丢失；正负电子束团在对撞点附近束流一束流相互作用造成的粒子丢失；正负电子束团在受到加速和约束过程中，会由于约束不理想造成正负电子偏离束流中心轨道成为丢失粒子等等。

a. 正负电子束团与束流管道中残余气体分子作用 (beam gas) 会造成

粒子丢失。正负电子束团在高真空的束流管道中运行，束流管道的真空由 BEPC 的真空系统通过真空泵吸走束流管道中的气体分子来提供。正负电子束团与束流管道中残余分子会发生碰撞，造成正负电子能动能量改变束流超出相稳定区而丢失。这种碰撞包含两种作用机制：弹性的库仑作用散射（Coulomb Scattering）和非弹性的韧致辐射（Bremsstrahlung）。当粒子发生气体散射时能量会损失 ΔE ，这样粒子可能损失在下一个色散函数或 β 函数较大的位置处。

束流与气体作用是束流相关本底的主要原因，而束流管道的真空度是影响此本底的关键因素。残余气体来源主要有：真空泵能力限制和管道中气体输运特性决定的原有气体的残余；束流丢失粒子在真空管壁上的撞击产生的粒子；注入束流和打出束流是引入的偏离束流的正负电子；上面提到的约束不理想造成的丢失粒子以及偏离的高能粒子在真空管壁上溅射产生的次级粒子；正负电子运动产生的同步辐射的未穿出管壁的残余光子和同步辐射打在管壁上的溅射粒子；束流管道的高频阻抗和同步辐射打在管壁上的加热作用，使吸附在管壁上的气体分子脱离管壁进入管道空间；真空管壁的泄漏以及材料内气体的扩散渗入。

b.量子效应会造成粒子丢失。储存环束流由于辐射光子失去能量，束流的横向位移会发生变化，当位移过大，束流就会和真空盒壁相碰撞而丢失。此外，由于辐射光子还会导致束流的能量振荡造成束流超出相稳定区而丢失。总之对于具有高斯分布的束流来说，量子效应主要受限于束流有限的横向孔径和能量接受度。只要高频腔压足够高时，横向量子寿命将会占主导地位，特别是在注入时。对于 BEPC，磁聚焦结构的设计给出了较大的横向束流孔径，因而量子效应一般不会太严重。

c.存在于同一束团内部正负电子之间的托歇克（Touschek）效应对束流寿命影响很大。同一束团内部的电子之间的弹性散射会使束流的纵向动量发生变化而导致电子越出相稳定区，进而造成束流丢失，这个过程叫做托歇克效应。托歇克效应主要取决于束流能量、发射度等参数。

d. 束流--束流相互作用：当加速器处于对撞模式，正负电子经过对撞点附近时，正负电子束团在接近、穿越和远离过程中正负电子束团之间存在束流--束流相互作用，这会造成一部分正负电子成为丢失粒子。

e.约束不理想等其它因素造成的直接丢失，可能有以下原因：磁铁边缘效应是磁铁边缘磁场复杂、不理想，高频电源工作不稳定会给磁场带来不稳定，靠近对撞点附近的磁铁的过渡聚焦，磁铁等器件的安装误差，闭

轨调整不好未达到设计要求等等，都会造成对一些正负电子约束不理想而丢失。BEPC 一些部件如高频腔、束流位置测量装置（BPM）等的工作对束流的影响，也会造成束流的丢失。这些方面的影响比较复杂。

造成正负电子丢失的主要就是这里提到的几种机制。束流与气体作用是本次模拟中考虑的主要丢失机制。

2 同步辐射

在储存环中运动的正负电子束流会在磁场中发生偏转而产生辐射，这就是同步辐射。同步辐射的能量与粒子的质量的四次方成反比，与粒子能量的四次方成正比，与偏转半径成反比。对于 BEPC/BES，同步辐射光子的能量远低于丢失粒子的能量。

3 次级本底

正负电子束团在储存环运动产生的同步辐射，正负电子由于束流—气体作用、touschek 效应、束流—束流作用和约束不理想等造成的正负电子丢失，形成了初级本底。这些初级本底粒子撞击对撞区附近的探测器器件和加速器器件会与物质的相互作用，发生电磁簇射或折射、透射，产生次级及多级粒子，形成次级本底。同步辐射光子的能量远低于丢失粒子的能量，次级本底粒子的产生主要是由于丢失的高能正负电子。

上面论述的所有的初级粒子本底及次级粒子本底合在一起构成了 BESII 的束流相关本底。

加速器的束流相关本底在各种本底中最大，也是本次研究主要关注的对象。本次本底模拟研究，初级本底产生的模拟是由合作者完成的，次级粒子的产生和所有束流相关本底在探测器中的响应的模拟是本人的工作。

4 本底模拟涉及的 BEPCI/BESII 部件^[8, 11]

本文的工作部分是模拟次级粒子的产生和所有束流相关本底在探测器中的响应，这部分本底模拟涉及的是 BESII 和对撞区直线段上的 BEPC 器件，

通过修改 BESII 的 Monte Carlo 模拟程序 SIMBES 加入对束流本底影响大的器件完成本底模拟程序。SIMBES 是基于 GEANT3.21 用来模拟高能粒子与 BESII 物质作用的探测器模拟系统,它已包括了所有与数据物理分析有关的子探测器部分,为了进行本底模拟,需要加入对本底影响较大的对撞区直线段上的 BEPC 器件和 SIMBES 中没有的 BESII 器件。对程序部分的说明在后面介绍本次模拟方法的章节专门介绍。这里介绍本文本底模拟修改 SIMBES 所需考虑的 BEPCI/BESII 器件。

对束流本底影响大的器件有影响束流运动的磁铁和近束流中心线的包含致密的较大质量物质的器件以及用于阻挡本底的机械器件。这些器件有: BESII/BEPCI 对撞区直线段上的束流管道(BES 部分称束流管, BEPC 部分称真空盒), BESII 的顶点探测器、亮度探测器、铁门, BEPCI 的对撞区直线段上的左右各四块插入四极磁铁(Q1, Q2, Q3, Q4)、左右各一个静电分离器等。BESII/BEPCI 对撞区直线段上的器件关于对撞点左右完全对称,避免了不对称造成的不必要的意外因素。图 1.10 是 BEPC 对撞区直线段布局示意图。本章末的附图 1 是 BESII 和对撞区 BEPC 器件结构示意图;附图 4-6 是对撞区直线段的 BEPC 的器件结构和放置示意图。

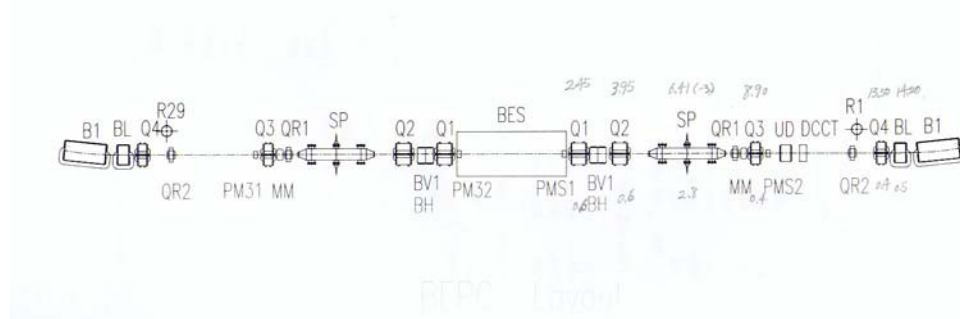


图 1.10 BEPC 对撞区直线段布局

- 束流管和顶点探测器 (VC): (参见 BES 介绍部分) 这部分主要考虑的是: 束流管的中间铍管以外的部分; VC 的内外端板和 VC 端板外的引出电缆及固定电缆的电缆支架。铍管外接一段圆筒状铝管与顶点探测器外的不锈钢 (S.S.) 束流管相连, 顶点探测器的内外端板焊接在铝管上。铝管内径 92.964mm。不锈钢近端距对撞点 (IP) 936mm。距 IP936mm 至 1900mm 间的不锈钢束流管有几段构成: 距 IP936mm 至 1320mm 之间是外径 104mm、厚 2mm 的圆筒, 距 IP1370mm 至 1900mm 之间是外长径 150mm、外短径

100mm、厚 2mm 的跑道型管，这两段钢管由过渡管连接。内外端板为厚 25.4mm 铅板，外径 270.76mm，内端板内表面相距 838.2mm，外端板内表面相距 1320.8mm。参见本章末的附图 2，3。

- 亮度探测器：四组，每组均由一个定义计数器 P、一个辅助计数器 C 和一个电磁量能器 S 组成。本底主要是丢失粒子在物质量大的电磁量能器 S 上的溅射。每个电磁量能器 S 由 12 层钨板和 12 层闪烁体相间叠成，每层长 85mm、宽 100mm，厚度：钨板 3.5mm，闪烁体 4mm。电磁量能器 S 总厚 96mm，中心位于束流水平面上，距束流线 93.5mm，距 IP 1222mm。参见前面图 1.9。亮度探测器必须去除 S 计数器的本底后才能得到真正的亮度，而且本底所占比例相当大。

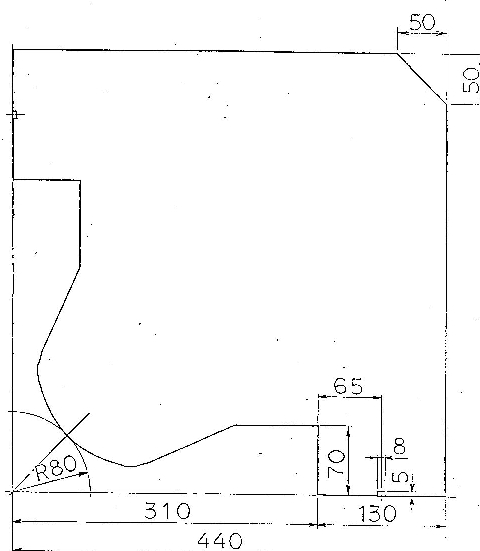


图 1.11 四分之一的四极磁铁铁核 z 向剖面示意图

- 插入四极磁铁 (Quadrupole)：BEPC 近对撞区的直线段上有四块插入四极磁铁，距 IP 由近至远分别为 Q1、Q2、Q3 和 Q4。它们提供四极磁场，用来聚焦束流，使束流在对撞点亮度最大，其中 Q1、Q3 垂直聚焦，Q2、Q4 水平聚焦。四极磁铁 Q1、Q2 为外部长 800mm、宽 800mm、厚 600mm 的铸铁，内径 160mm，四极磁铁 Q3、Q4 为外部长 400mm、宽 400mm、厚 400mm 的铸铁，内径 110mm，中间穿过真空盒，内表面（极面）为近双曲柱面，图 1.11 为四分之一的四极磁铁铁核 z 向剖面示意图。每一极上缠绕铜线，提供电流。四极磁铁的磁场调控束流的运动，对本底影响很大，是模拟中必须

考虑的另一重要因素。Q1-Q4 中心距 IP 分别为 245mm、395mm、890mm 和 1350mm。参见本章末的附图 1，4-6。

- 静电分离器 (SP)：参见图 1.12，图中所示外观图。静电分离器外筒为不锈钢，内部为两块电极板。束流从极板中间穿过，当极板上加上高压时，极板间产生静电场，使正负电子束团分离，需要对撞时就去掉极板上的高压，正负电子束团就相撞了。外筒中间一段为长 2300mm、内径 305mm、厚 5mm 的不锈钢圆筒，两端各为长 220mm 和 280mm 的锥形筒与真空盒相接。两块电极板为长 2020mm、宽 140mm、厚 0.8mm 硬铝板，上下平行置于筒内，极板间距 60mm。静电分离器在 Q2 和 Q3 之间。放置参见章末的附图 6。

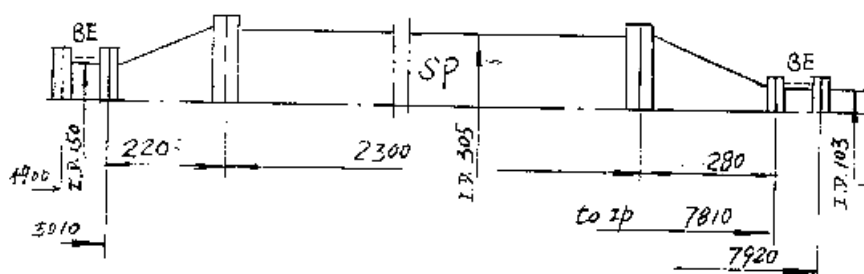
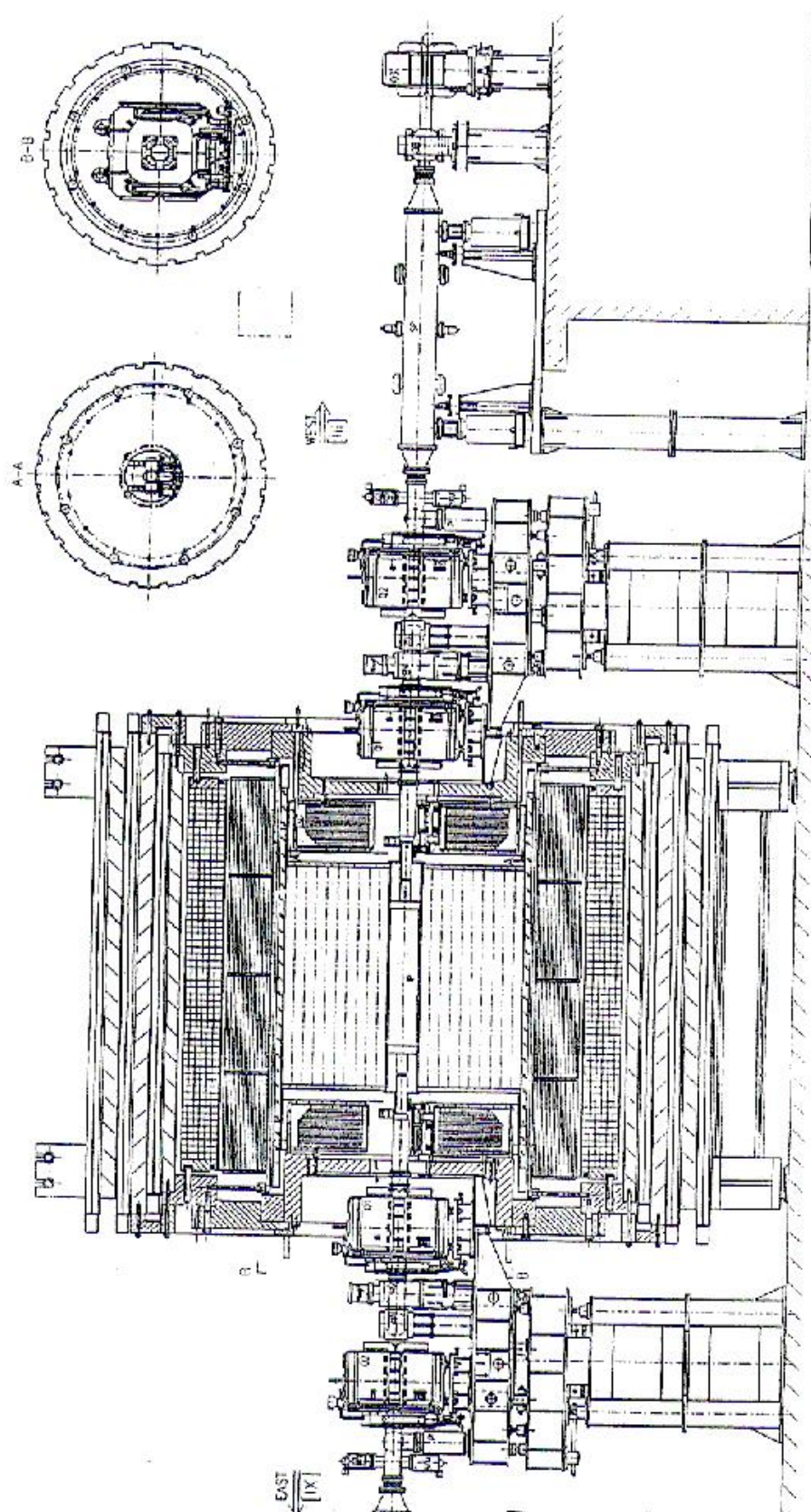


图 1.12 静电分离器示意图

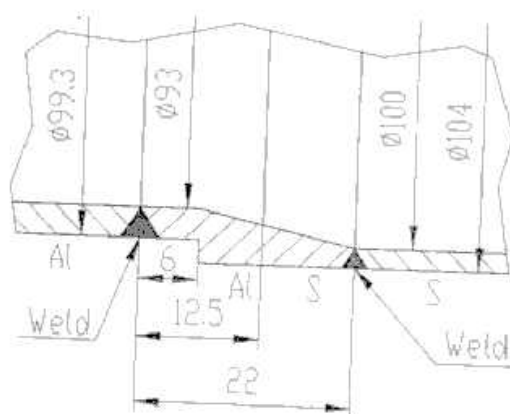
- 真空盒：束流管道 BEPC 的部分（在 BESII 以外）称真空盒，提供束流运动的真空腔，全部是不锈钢材料。从距 IP 1989.5mm 至 5100mm 处与静电分离器近 IP 端相接这一段是外径 152.4mm、厚 2.1mm 的圆筒，静电分离器远 IP 端以外一段是外径 108mm、厚 2.5mm 的圆筒。束流管与真空盒由过渡管相接（距 IP 1900mm 至 1989.5mm 之间）。参见章末附图 1，4-6。
- BESII 铁门：正负电子束流进出 BESII 的东西两端各有一个铁门，用以阻挡丢失粒子和同步辐射等。铁门贴端盖，厚 124mm，内径 500mm，外径接桶部簇射器，约为 2180mm，铁门外端面与 BES 外面平齐，距 IP 1900mm。参见章末附图 1，4。
- 其它：挡块 (Mask)，设计置于束流管道中用来刮束和阻挡丢失粒子和同步辐射本底，但 BEPC 实际工作中未用。其它部件影响没有以上部件影响大，暂时未考虑。

本底模拟，作为首次模拟研究，只能就主要影响本底的因素加以考虑，给以模拟。调研所有需要考虑的部件，决定取舍，就有很大的工作量。

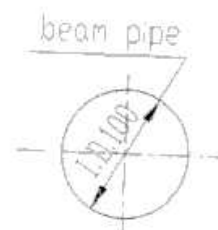
本底的来源多，产生原因和机制复杂，涉及的 BEPCI/BESII 的部件也多，在这次本底模拟研究中，我们主要研究束流相关本底的模拟，对于涉及的产生机制和 BEPC 部件仅就主要方面加以考虑。从模拟结果与实验数据的对比来看，模拟是成功的，主要方面已基本包括。



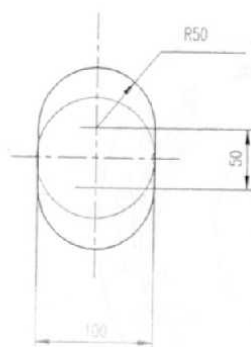
附图 1. BES 和对撞区 BEPC 结构示意图



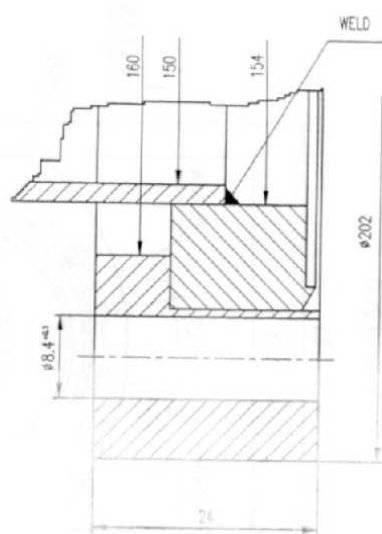
Detail A
Scale 2:1



Section B-B
Scale 1:4



SECTION C-C
SCALE: 1:4

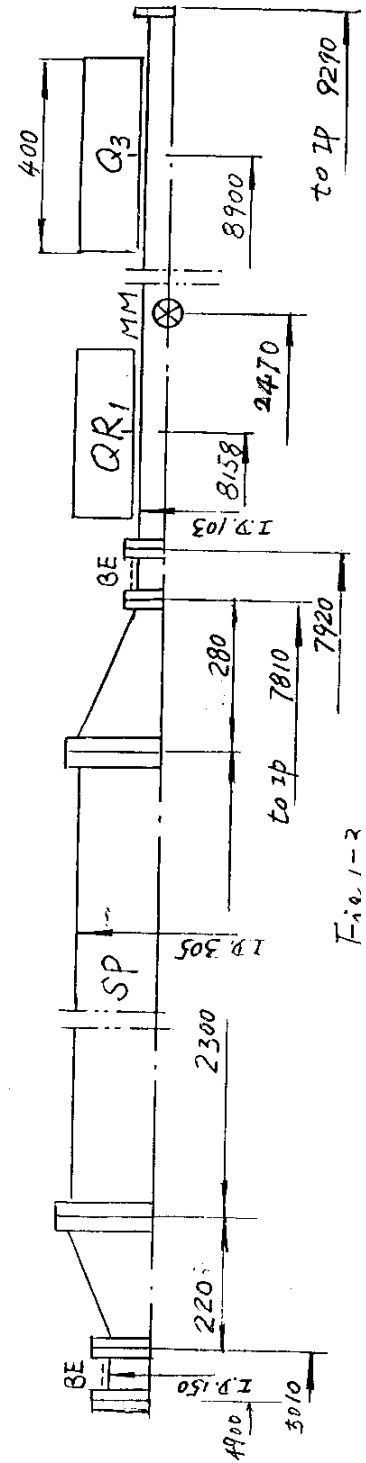
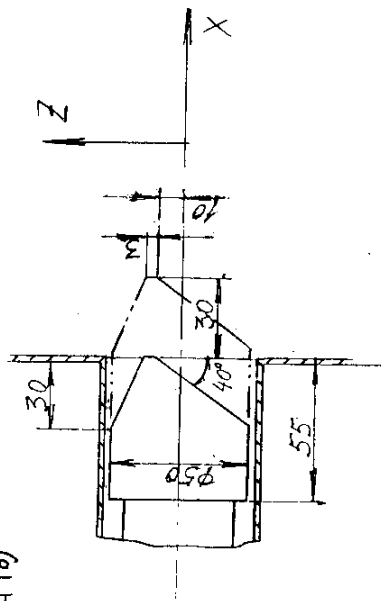


DETAIL D
SCALE: 2:1

附图 3 束流管结构示意图 2

V (M:1:2)

A向



附图 6 BEPC 对撞区直线段结构示意图 3

第二章 束流相关本底模拟研究方法

加速器的束流相关本底是BEPCI/BESII的主要本底。我们对束流相关本底的模拟研究是这样的：用DECAY TURTLE模拟正负电子束流在储存环中的输运和丢失，产生初级本底粒子；用DECAY TURTLE产生的初级本底粒子做成产生子，输入修改SIMBES而成的本底模拟程序，完成次级本底的产生、输运和所有本底在探测器中的响应的模拟。最后，将模拟结果与实验比较。初级本底的产生是合作者完成的，这部分的介绍参见合作发表论文^[3]及所附文献。本章介绍修改SIMBES模拟次级本底的产生和探测器响应的方法和程序以及模拟程序的检验等。

§ 1 模拟工具

高能物理实验的研究中，特别是探测器模拟研究中，涉及到高能粒子与物质的复杂的相互作用。研究对象往往是一些随机变量，常常涉及到大量随机因素，对它们要想通过解析方法解决是十分困难的，甚至是不可能的。在高能粒子通过介质的输运过程中，遇到大量随机过程。当粒子向前行进时，它们将与介质发生各种相互作用，在可能的各种相互作用中，实际发生某一种相互作用是随机的，作用发生的地点、作用后终态粒子的动量和方向也都是随机的。输运过程研究的随机变量，通常是介质内粒子的空间分布，产生的次级粒子数目以及它们的动量等等。对这些量如用解析计算方法求解，一是要引入大量近似，二是有的无法解析分析。而用Monte Carlo方法来研究这些随机的物理过程，以及物理量（随机变量）的统计分布（动量分布、角分布等），由于模拟研究可以设计得全面而周密，从而它模拟各种随机物理过程得到的结果可比较全面地反映这些物理量的统计性质。探测器模拟的物理研究中广泛采用Monte Carlo模拟方法。^[10, 13]

本次 BEPCI/BESII 的本底模拟研究，用 DECAY TURTLE 模拟正负电子束团在储存环中的输运，用 SIMBES 模拟初级本底与对撞区的 BEPC/BES 物质作用和本底在 BES 中的响应。DECAY TURTLE 和 SIMBES 所基于的 GEANT3 都是国际上通行的这方面研究的 Monte Carlo 程序。

1. DECAY TURTLE

DECAY TURTLE (Trace Unlimited Rays Through Lumped Elements) 是模拟带电粒子束流在电磁场空间中的输运的Monte Carlo程序，其中包含了束流粒子的衰变，主要考虑电磁作用。本次研究所用的是当前的稳定版本v108。这个程序可用来评估存在于束流的小的相空间的发散效应，它包括了高阶的时间发散项、磁场的非线性效应和源于二阶效应积累的高阶几何发散项。^[14]

本次本底研究应用 DECAY TURTLE 模拟正负电子束团在 BEPC 储存环中的输运，其中主要考虑的是正负电子束团与储存环内残余气体的作用。这次模拟考虑了正负电子束团与储存环内残余气体的弹性的库仑 (Coulomb) 作用和非弹性的韧致 (Bremmstrahlung) 作用以及部分的电子束团内部电子之间弹性散射的 Touschek 效应。DECAY TURTLE 不能模拟初级本底粒子中的同步辐射光子的产生，并且对于 BEPCI，它的同步辐射光子的能量相比于丢失的高能正负电子比较小，对于顶点探测器和主漂移室的影响要比丢失电子小的多，暂时未模拟。

这次用 DECAY TURTLE 模拟正负电子束流的丢失，模拟的是单束团非对撞模式的本底产生，只考虑正负电子束团在储存环的单圈运动，束流是沿理想的束流中心线运行，未考虑 BEPCI 储存环上各器件的安装误差。

不同的作用机制产生的本底，特征都不一样，在储存环不同区段上发生作用造成的 BESII 的本底也不同，而实际运行的 BEPCI 储存环上的不同区间真空度也相差比较大。为比较确切的研究不同作用的本底，并考虑不同区段以及实际的真空度的不同，模拟采用分区段模拟，先是三分区、七分区，最后采用十分区，对那些对 BESII 本底影响突出的区段更仔细地分区模拟。这次模拟的正负电子束流能量是 1.842 GeV，流强是 30 mA。

2. 探测器模拟和 GEANT

对本底的探测器响应部分的模拟是通过修改BESII的探测器模拟程序包SIMBES完成的，而SIMBES是基于GEANT的应用程序。GEANT是国际高能物理界广泛采用的由CERN开发的探测器 Monte Carlo 模拟的程序包。^[15, 16, 17]

2.1 探测器模拟原理

BES探测器接收的长寿命高能粒子主要有 e^- 、 γ 、 μ^- 、 π^- 、 K^- 、 p^- 、 n^- 等，高能带电粒子会在稠密介质中发生电磁作用进而产生电磁簇射，有的要衰变，强子可能产生强子簇射和电磁簇射。由于对于各种强子与核之间的多种反应过程的定量了解还比较有限，目前对于强子簇射的模拟并不是十分可靠。

高能带电粒子通过电离或激发介质原子而沉积能量于介质中。正是这种能损经传播和放大进入光电器件形成测量信号，使得探测高能粒子成为可能。电离能损宏观上是一个连续过程。高能粒子与介质原子核的频繁碰撞称为多次散射，也是连续过程。对于这些连续过程，计算机模拟只能，一般也只需要是统计平均的，即给出经过一段路程，而不是经过每个原子后的能量动量变化。

高能粒子留在介质中的能量就是宏观测量信号的种子。在气体探测器中，如BES主漂移室，簇射计数器和 μ 探测器的气体管，原始电离离子对在外加高压电场作用下加速，产生级联甚至雪崩放大而在高电位丝上形成电荷信号。在飞行时间测量器的闪烁体中，原子(分子)激发和跃迁产生光子，经闪烁体和光导成为适合光电倍增管工作波长的光子，在光电倍增管的串列的极板中打出光电子，光电子数目逐级倍增，形成电荷信号。计算机模拟只关心输出电荷信号与输入能损之间的函数或统计关系，而不是中间过程或所有末态粒子的状态，因为这些信息并不能增加对于前面的高能物理过程的理解。

2. 2 GEANT3

前述的高能粒子在介质中的多种物理过程在模拟上是相当复杂和烦琐的，某些物理过程的理论和实验数据还不确定。而对于这些过程的模拟是高能物理(以及某些其它学科领域)的理论和实验研究中带普遍性的任务。CERN的GEANT库就是为此建立的高能物理界通用的探测器模拟程序库。目前，大多数高能实验的探测器模拟已基于GEANT3，而且GEANT3已经被世界范围内的高能实验检验了许多年。SIMBES是基于GEANT的Fortran版最终版本GEANT3.21库。

作为探测器通用模拟程序库，GEANT采用模块化思想将不同功能模块化，它将粒子跟踪与探测器结构描述在程序中分开，前者由GEANT完成，而后者留给用户(GEANT应用程序的编写者)，以适应于用户对于不同探测器模拟研究的需要。

GEANT定义了一整套数据结构，并使用CERN库的数据管理程序ZEBRA来管理其数据结构。这些数据包括材料数据，几何结构数据，基本粒子定义数据，衰变数据和多种物理反应过程的数据，原始事例及次级粒子的数据等等。GEANT还为用户提供了描述探测器几何结构和介质特性的一组服务程序，使得用户无需了解GEANT的数据结构即可简单地完成探测器几何材料的描述。

GEANT实际上提供了整个探测器程序的框架。程序的基本流程是这样：

- 初始化阶段，调用用户的探测器结构描述程序，以将几何结构和材料特性数据传入GEANT的数据结构；
- 事例处理阶段，调用用户的事例输入接口程序，以将原始事例的反应顶点和粒子的运动学数据(位置，动量，粒子编号等)传入GEANT的数据结构；然后，GEANT对来自每个顶点的粒子，包括在探测器中新产生的次级粒子，逐一跟踪。完成每一步跟踪后，调用用户单步击中记录程序，将击中信息(位置，飞行时间，能量损失等)传到用户定义的数据结构中。对一个事例的全部粒子跟踪完成后，调用用户信号产生程序，由击中信息产生测量信号。然后，GEANT调用用户的输出程序，将模拟事例的原始数据(raw data)输出。
- 程序结束阶段，完成关闭文件和运行统计工作。

总结起来，用户主要编程任务就是提供探测器描述，事例输入，击中记录，信号产生等几个程序，而粒子跟踪的复杂过程则由GEANT完成，这使得用户的编程任务大大简化，难度、复杂度也大大降低。

3. SIMBES

SIMBES(SIMultion of BEijing Spectrometer) 是用于 BES 探测器的蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟程序。BES 原来的 Monte Carlo 模拟程序是 SOBER(Simulation Of Beijing spectrometeR)，基于 70 年代 MARKIII 的程序发展而来。SIMBES 是由 BES 合作组(主要参与人员为 Bian J. G., Chen B. G., Chen J.C., Li C. G., Liu H. M., Zhang Lin 等)从 1996 开始基于 GEANT3 重写 BES 的 MonteCarlo 模拟程序。GEANT3 库已被国际高能实验探测器模拟中广泛采用，它可以模拟粒子与探测器物质之间更多的物理作用过程，尤其是在 SOBER 里无法模拟的强子过程。本次本底模拟采用的是 SIMBES 的 v102 版本。

探测器模拟包括探测器结构描述、粒子跟踪和测量信号产生三部分。事例的 MC 模拟过程分以下几个部分：

- 模拟事例产生过程：模拟 BEPC 对撞点上正负电子对撞时产生共振态及其衰变的过程，计算对撞终态产物的物理量；
- 径迹计算过程：模拟对撞终态粒子在 BES 空间的运动及与谱仪物质的相互作用；
- 击中计算过程：模拟 BES 各子探测器的灵敏区接受终态粒子或其次级产物所产生的信号；
- 数字化过程：模拟电子学线路和在线获取系统的作用，将模拟信号转换为数字。

SIMBES产生的MC模拟数据的格式与真实的原始数据相同，可用与处理真实原始数据相同的方法来处理。

在程序规划和编制上，SIMBES吸收了软件工程的基本思想，注重程序设计，设计中以可维护性为主要目标，以数据结构为中心，坚持层次化和模块化的编写原则。SIMBES同时重视服务程序，特别是错误和异常的捕捉。这使程序的理解和维护相对容易，修改增强也比较容易完成。

SIMBES强调运算阶段的隔离，即探测器描述、粒子跟踪和信号产生三阶段的隔离。这是符合GEANT的设计思想的。它的程序调用结构比较简单：除工具性(如函数计算)和服务性(如报错)程序，调用结构基本是树形的，易于模块化。SIMBES特别注意了初始化程序的层次化和分散化。它实现了各子探测器的独立，方便了程序调试工作。

与SOBER相比，SIMBES在物理方面的主要特征是：

- 基于 GEANT3.21 模拟探测器行为，可以模拟粒子与探测器物质之间的强子相互作用；
- 对假光子的情况进行了模拟；
- 用双高斯分布取代单高斯分布来描写 Q 依赖的分辨率；
- Q 依赖分辨率的效益被包括到对 MDC 的模拟中，误差矩阵也得到改进而与实验数据一致；
- 几乎全部子探测器都得到了很好的模拟，包括 VC、MD、BSC、TOF、 μ 子计数器等；
- 可以很好地模拟多种实验事例的行为，如 Bhabha、双 μ 、强子事例等；

经过几年的发展和测试，SIMBES 已经比较完善了，还剩下一些问题也正在解决过程中。

利用 SIMBES 模拟本底的探测器响应，编程上只须修改事例产生程序

(产生子)和探测器结构描述部分,这得益于 SIMBES 的程序设计原则和方式。

§ 2 束流相关本底模拟方法

BEPCI/BESII 的束流相关本底的模拟,初级本底的产生通过应用 DECAY TURTLE 考虑正负电子束团与储存环内残余气体的库仑作用和韧致作用以及束团内部电子之间的 Touschek 作用模拟束团在储存环中的输运完成;有了初级本底粒子,然后就是次级本底的产生和所有本底在 BESII 探测器中的响应的模拟,这部分是本文的工作,由修改 SIMBES 完成。

SIMBES 模拟物理事例的探测器响应,主要有事例产生、探测器结构描述和粒子跟踪、信号产生等部分。SIMBES 已有几乎所有的 BESII 探测器部分的程序,利用 SIMBES 完成本文工作,即模拟初级本底与对撞区的 BEPC/BES 物质作用和本底在 BES 中的响应,主要需要:修改事例产生程序(产生子),将 DECAY TURTLE 产生的初级本底输出作为事例产生输入;探测器结构描述部分,确定本底模拟需要考虑的 BEPCI/BESII 的部件加入原有 BESII;其余粒子跟踪和信号产生等部分无须修改,想物理事例模拟一样运行程序,产生本底 MC 数据,和离线分析真实数据一样分析即可。虽然涉及的 BEPCI/BESII 器件和 SIMBES 编程等内容比较繁杂,但结构和逻辑是清晰的,下面较具体地介绍事例产生子和探测器结构描述方面的编程等工作。

1. 事例产生子

用 SIMBES 模拟本底,需要有本底事例产生程序(产生子)。这部分比较简单,通过修改原用于检验 SIMBES 的 TESTER 产生子完成。修改主要有两方面:首先,修改 TESTER 产生子,使之产生一个以任意动量从任意位置入射的任意种类粒子(本底涉及的初级本底是电子或正电子或光子);还有,将 DECAY TURTLE 的输出(本底粒子的种类、动量等)转换为 TESTER 的输入。

在 DECAY TURTLE 的输出转换为 TESTER 的输入时,在产生子中读入 DECAY TURTLE 的输出数据,要根据产生子所需的数据将其补充完整,然后才能将这些数据赋给出射粒子。

这里需要注意的是,由于 DECAY TURTLE 和 SIMBES 两个软件系统

的对 BEPC/BES 定义的空间坐标系并不相同，在从 DECAY TURTLE 到 SIMBES 系统之间作空间坐标及动量的输出输入转换时，要根据 BEPC/BES 的实际布局进行坐标及动量的变换才能赋予产生子的出射粒子，保证模拟计算的空间坐标一致性和计算有效性。

SIMBES 中取 BESII 坐标系，对撞点是坐标原点，束流中心线是 z 轴，东向是 z 轴正向，北向是 x 轴正向，垂直向上是 y 轴正向。电子束运动方向是从东向西，即电子沿 z 轴负向运动。这次模拟中 DECAY TURTLE 取 beam 坐标系，对撞点位置为坐标原点，束流中心线是 z 轴，西向是 z 轴正向，南向是 x 轴正向，垂直向上是 y 轴正向。

2. 补充的 BEPCI/BESII 部件^[8, 11]

模拟次级粒子的产生和所有束流相关本底在探测器中的响应，涉及的是 BESII 和对撞区直线段上的 BEPC 器件。对束流本底影响大的器件有影响束流运动的磁铁和近束流中心线的包含致密的较大质量物质的器件以及用于阻挡本底的机械器件。SIMBES 几乎已包括了本底研究所需要模拟的所有的 BESII 子探测器部分，只需要补充加入对本底影响较大的对撞区直线段上的 BEPC 器件和 SIMBES 中没有的 BESII 器件。

补充的 BEPCI/BESII 器件有，BESII 部分包括束流管、顶点探测器（近束流小角度部分）、亮度探测器、铁门；BEPCI 部分是对撞区直线段上主要器件，包括对撞区直线段上的真空盒、对撞区左右各四块插入四极磁铁(Q1, Q2, Q3, Q4)、左右各一个静电分离器等。参见前面的介绍部分。编程中所用的各组件数据如下（单位：mm）：

束流管及顶点探测器：

	内径	外径	长度	厚度	距 IP(外端)
Be	95.25	97.79	406.4	1.27	
Al	92.964	100.33	215.9	3.683	419.1
Al 内端板	99.134	270.76		25.4	419.1
Al 外端板		270.76		25.4	635.
Al	92.964	99.314	516.9	3.175	936.
S. S.	100.	104.	384.	2.	1320.
S. S.	100*150		580.	2.	1900.

备注：BESII 内部近门处束流管是跑道型，100.*150. 是数据短径*长径。

真空盒:

	内径	长度	厚度	距 IP(外端)
S. S. (Q1Q2)	148.2	250.	2.1	5010.
S. S. (Q3Q4)	103.		2.5	
Cone1		50.	2.	
Cone2		64.5		

备注:连接锥体的厚度是保持与两端真空盒内外径相接。S. S. 后的 Q1Q2Q3Q4 是指穿过 Q1Q2 段和 Q3Q4 段的均匀长真空盒, Q3Q4 段一直到直线段远端尽头。

静电分离器(SEP):

	内径	长度	厚度	距 IP(外端)
S. S.	305.	2800.	5.	7530.
Cone1		220.		5230.
Coner		280.		7810.
极板		2020.*140.	8.	

备注:极板两块, 长方板, 长*宽是 2020*140, 极板间距 60, 上下平行放置, 中心与 SEP 重合。

插入四极磁铁 (Q)、亮度监测器 (LUM) 和铁门:

	内径	长度	厚度	距 IP(中心)
Q1	160.	800*800	600	2450.
Q2	160.	800*800	600	3950.
Q3	110.	400*400	400	8900.
Q4	110.	400*400	400	13500.
LUM(S)		85*100	96	1210.
Fe DOOR	500.	124	2180	1838.

备注:亮度监测器只考虑电磁量能器 S, S 的 z 向坐标 1210, 水平和垂直坐标为: +/-86 和 0。

插入四极磁铁的聚焦强度 K1(束流能量 E=1.842 GeV):

	Q1	Q2	Q3	Q4
K1	1.335	0.946	0.2834	0.5817

实际上, 一些 BEPCI/BESII 器件是很复杂的, 而 GEANT3 本身能描述的几何体也是很有限的, 所以在模拟计算中都对需要考虑的部分根据具体情

况在保证模拟精度和编程简化的原则下进行了简化处理。

插入四极磁铁内表面（极面）为近双曲柱面，无法在 GEANT3 中定义，实际上也无须按照实际形状定义，因为四极磁铁内通过真空盒，粒子穿过真空盒在四极磁铁内表面上产生簇射而簇射粒子穿回真空盒并且进入 BESII 探测器形成本底的几率并不大，四极磁铁对本底的主要影响是它的四极磁场对正负电子运动的影响。插入四极磁铁的内表面计算中用圆孔代替，比双曲的内孔径稍大一些。

铁门内孔径准确，外孔径就取至挡住主漂移室，在本次本底模拟研究中，只有顶点探测器的计数率较高，其余子探测器的本底计数率很低，铁门这样设置对现在的研究已足够了。

麻烦的是顶点探测器每侧端板上的 640 路电缆，离这次分析所取的探测器 VC 最近，离束流中心线也近，物质量又多，实际计算中简化为三层圆筒，等距放置于原电缆所在的空间。为检验电缆的简化是否合适，又作了以几片圆环片形状的简化情形的模拟计算，计算中差别不大，决定采用三层圆筒的简化方式。

亮度监测器只考虑电磁量能器 S、P、C 计数器相比于电磁量能器 S 质量很小。每个电磁量能器 S 由 12 层钨板和 12 层闪烁体相间叠成，厚度 96mm，计算中用钨和闪烁体的混合体代替。

这部分数据的调研涉及的 BEPC/BES 器件比较多，有些数据要求精度较高，现有的档案材料有些乱，数据难以查找，这部分的工作比较耗时。

3. 探测器结构编程

描述探测器的结构涉及以下几方面：探测器的几何结构（Geometry）、材质特性（Material）和介质性质（Tracking Media）。

探测器的描述就是将探测器的几何结构和材料等特性的数据在程序中描述出来，GEANT 将材料性质分成材质特性和介质性质，材质（Material）指探测器的器件组成的仅仅作为材料部分的固有特性，例如分子成分、材料密度、作用截面等性质，介质（Tracking Media）指作为输运介质的探测器的器件材料的性质，例如空间磁场、跟踪步长、计算精度等参数。

本底模拟修改 SIMBES 补充 BEPCI/BESII 的探测器描述，也就包括以上几个方面。几何结构和材料（材质和介质）的描述通过修改 SIMBES 的相应的 BESII 几何和材料描述文件加入补充部分而完成。本底模拟需要增加几种原 SIMBES 未有的材料，例如硬铝、铸铁、亮度监测器电磁量能器 S 的混

合体材料等。BEPCI/BESII 器件的空间放置位置也在 BESII 描述文件加入。本底模拟所需的对撞点左右 14 米整个对撞区直线段上的 BEPCI/BESII 主要部件都已包括。

描述插入四极磁铁的磁场属于粒子跟踪部分，通过修改 BESII 的磁场描述文件和参数卡文件完成。四极磁场的定义需要仔细，SIMBES 原先仅有常数场和二级场，四极磁场需重新定义，四极磁场的梯度为：

$$\text{Grad(T/m)} = \text{Energy(Gev)} * K1 / 0.3$$

其中 K1 为上一小节中的四极磁场的聚焦强度，对应束流能量 1.842 GeV。

注意四极磁场的正确聚焦或散焦。Q1、Q3 垂直聚焦，Q2、Q4 水平聚焦。

这部分编程涉及的 SIMBES 编程方面较多，涉及的参数数据量较大，需要仔细。SIMBES 和 DECAY TURTLE 之间本底粒子的模拟传递需要相互密合，即 DECAY TURTLE 的动力学孔径不能大于本底模拟的 SIMBES 的束流管道孔径，这点也要注意。

在运行用于本底模拟的 SIMBES 时，不能象通常 BESII 模拟那样运行。这是由于在探测器描述部分增加材料等对 SIMBES 的库函数进行了修改，光链接所有的改动程序是不行的。需要用户自己重建 SIMBES 系统，在用户自己的更新了库的 SIMBES 系统上才能进行本底模拟计算。

第三章 本底 MC 模拟分析和实验对比

本章介绍 BEPCI/BESII 束流相关本底的 Monte Carlo 模拟的结果分析和本底实验的一些结果，以及 Monte Carlo 模拟结果与实验的对比分析。^[3]

本次 BEPCI/BESII 的束流相关本底的模拟，根据模拟过程中对模拟结果的分析，考虑不同作用发生的区段不同以及实际的真空度的不同对本底的影响会有差异，模拟采用不断加细的分区段模拟，先是全环、三分区，然后是七分区，最后达到十分区。全环全长 240.4 米，模拟中取由对撞点向上 0.0 米至 246.45 米区域，即考虑到探测器附近发生作用的粒子可能直接丢失，也可能转过一整圈后才丢失；三分区是将上述全长分成三个区段，0.0 米至 14.0 米的上游直线段，14.0 米至 226.4 米环线段，226.4 米至 246.45 米对撞区三段；七分区是对三分区增加分区：14.0 米至 180.3 米，180.3 米至 195.4 米，195.4 米至 210.4 米，210.4 米至 227.4 米，227.4 米至 246.45 米五个区段；十分区是对七分区再增加对撞区及下游直线段分区：227.4 米至 235.4 米，235.4 米至 240.4 米，240.4 米至 246.45 米三个区段。对那些对 BESII 本底影响突出的区段或区段内对本底贡献可能不平分的区段作更仔细地分区模拟，可以比较仔细地研究不同作用、不同区段对本底的影响，加深对本底的认识。

这次 MC 模拟的正负电子束流能量是 1.842 GeV，流强是 30 mA。

本次本底模拟的数据，主要取自顶点探测器，除顶点探测器外，其余子探测器中的本底计数率过低，尚不足以提供分析信息。

§ 1 MC 模拟结果及分析

现在介绍 BEPCI/BESII 的束流相关本底的 MC 模拟的一些结果，包括对 MC 模拟方法进行的检验和 MC 模拟本底的一些特征等等。

1. VC 电缆形状

VC 端板外的电缆处于内接束流管、外接主漂移室内壁的圆筒状空间里，质量大，距束流中心线又近，本底模拟中必须考虑，而这些电缆不能照实际情形加入，也没有必要这样做，在计算中进行简化，可用两种方式：将电缆的质量分成几个圆筒（tube）或几片圆环片（piece）置于原空间。

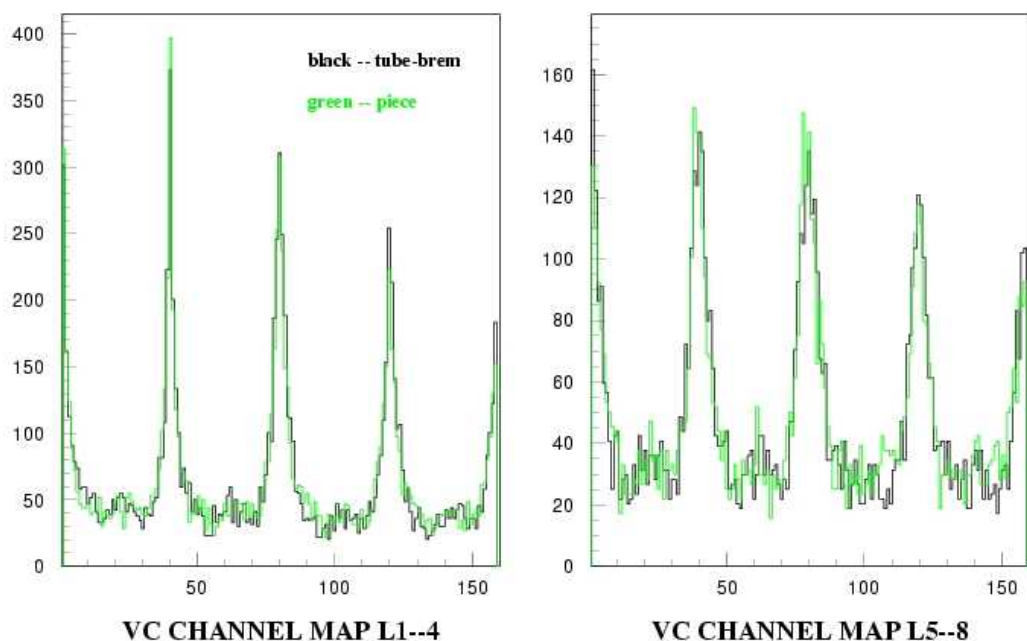


图 3.1 bremsstrahlung 本底计数: VC 电缆 Cu 的筒状和片状对比

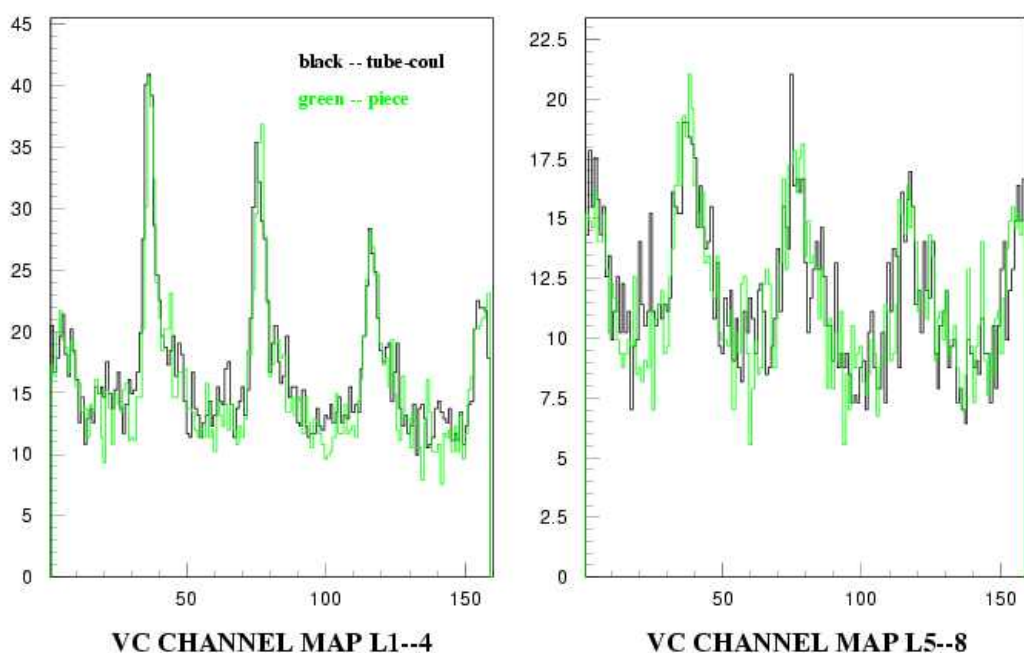


图 3.2 coulomb 本底计数: VC 电缆 Cu 的筒状和片状对比

为确定两种方式的差异，对韧致作用和库仑作用产生的本底进行了模拟，结果见图 3.1，图 3.2。图 3.1 为电子束流在两种方式下韧致作用

(bremsstrahlung) 产生的本底在顶点探测器 (VC) 的单丝计数率，图 3.2 为两种方式下库仑作用 (bremsstrahlung) 产生的本底在顶点探测器 (VC) 的单丝计数率，这里只给出 VC 1 至 8 层的丝计数，且未经归一。图中横坐标是道数，1 至 8 层每层 40 道，纵坐标是单丝计数率。VC 共 12 层丝，9 至 12 层每层 80 道，结果与 1 至 8 层类似，除非必要或差别较大，本文一般都只给出 VC 前 4 或 8 层丝的图，足以代表本底的特征，实际上 1 至 12 层逐渐向外，外层的数据差异比内层的小。如果不同实验比较，这里的 MC 数据一般都不归一，也无须归一。所谓归一，是指根据实际的束流及真空度，对本底计数乘以修正系数进行修正。

由图可见，这两种方式在误差允许范围内是一致的，本文实际采用圆筒简化方式。

2. 几何对称性和电荷对称性

本底模拟中的对撞区直线段 BEPCI/BESII 的器件是相对对撞点 (IP) 对称的，将电子反向 (左侧) 输入并将左侧磁场反向，结果应该与原来结果对称。图 3.3，图 3.4 中就是电子正向 (右侧，e right) 与反向 (e left) 两种方式下韧致作用和库仑作用产生的本底在顶点探测器 (VC) 1 至 8 层的单丝计数率的结果。图 3.3 显示的是韧致作用产生的初级本底造成的探测器本底，图 3.4 显示的是库仑作用产生的初级本底造成的探测器本底。图中横坐标是道数，纵坐标是单丝计数率。由图可见，无论对韧致作用产生的本底还是对库仑作用产生的本底，所加器件的几何左右对称性都很好。

本底 MC 模拟比较了正负电子束的束流本底的电荷对称性，将负电子的输入数据直接变换电性成正电子，坐标和动量不变输入，并将四极磁场方向反转，比较这两种情形的本底，图 3.5，图 3.6 是正、负电子两种情形下韧致作用和库仑作用产生的本底在顶点探测器 (VC) 1 至 8 层的单丝计数率的结果。图 3.5 是韧致作用产生的本底的电荷对称性，图 3.6 库仑作用产生的本底的电荷对称性。可以看到，正电子束的本底和负电子束的本底的数据曲线基本相符，就是说束流相关本底具有电荷对称性。这也和实际情况符合，实际情形正电子本底稍大是由于正电子注入时能散较负电子大。

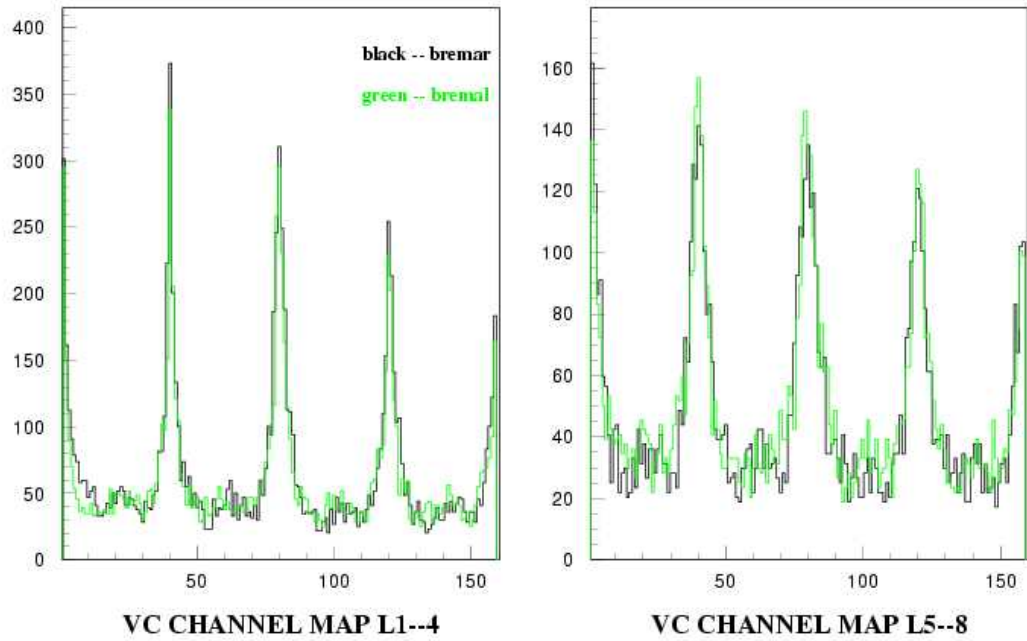


图 3.3 bremsstrahlung 本底：电子、电子反向的结果

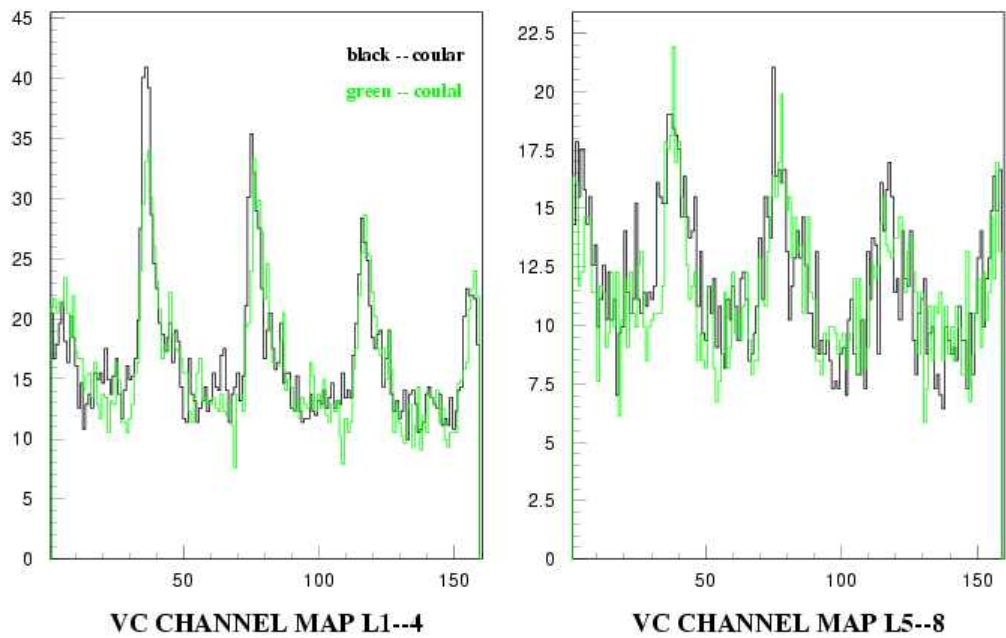


图 3.4 coulomb 本底：电子、电子反向的结果

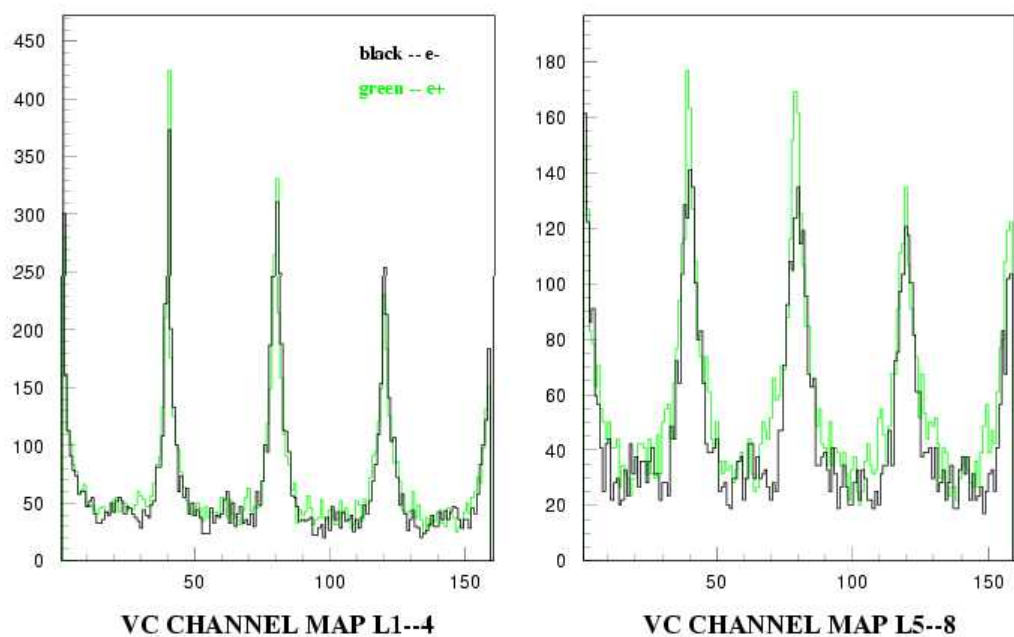


图 3.5 bremsstrahlung 本底：电子、正电子同向的结果

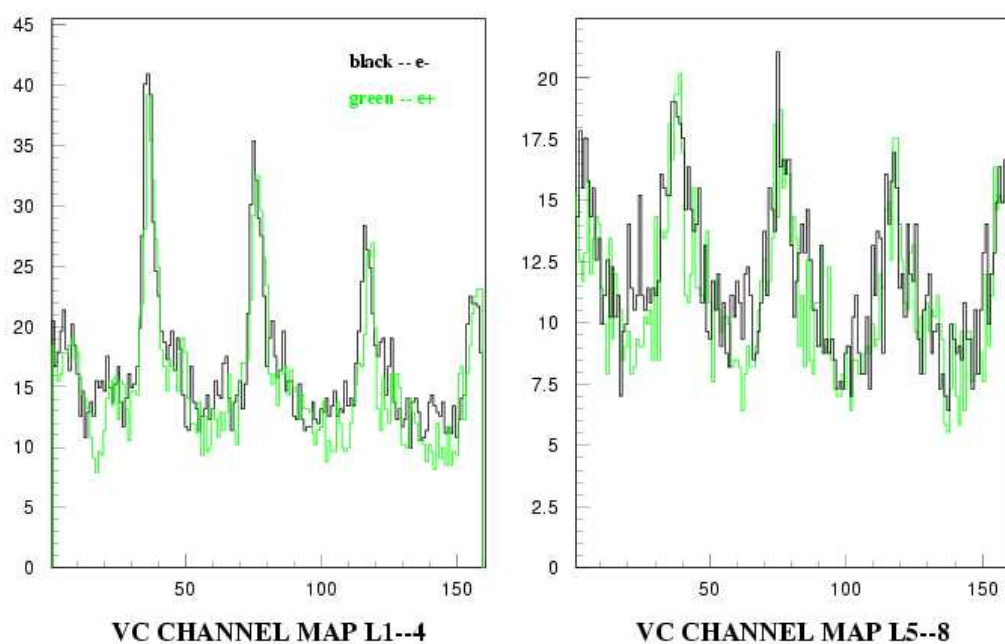


图 3.6 coulomb 本底：电子、正电子同向的结果

3. MC 模拟初级本底检验

SIMBES 是输入 DECAY TURTLE 产生的初级本底作为自己的本底事例产生子。对 DECAY TURTLE 的初级本底数据应具备一些条件。数据样本量要足够，使统计误差比较小。理论上，BEPc 储存环的束流本底应该是 y 向对称的。图 3.7 显示的就是检验电子束流的初级本底的 y 向对称性的结果，这里只给出库仑作用导致的本底在顶点探测器（VC）1 至 8 层的单丝计数率。由以上本底 MC 模拟的结果可以看出，对于 BEPcI/BESII 情况，韧致作用产生的本底要比库仑作用产生的本底大很多，这一点后面还要给出较仔细的分析，故而对于数据统计性的检验只需检验库仑部分就足够了。图中 black—e right 指的是通常（实际中）的电子束流的本底，green—y Py 指的是将电子的坐标 y 和动量 Py 同时反向再输入后的本底结果。

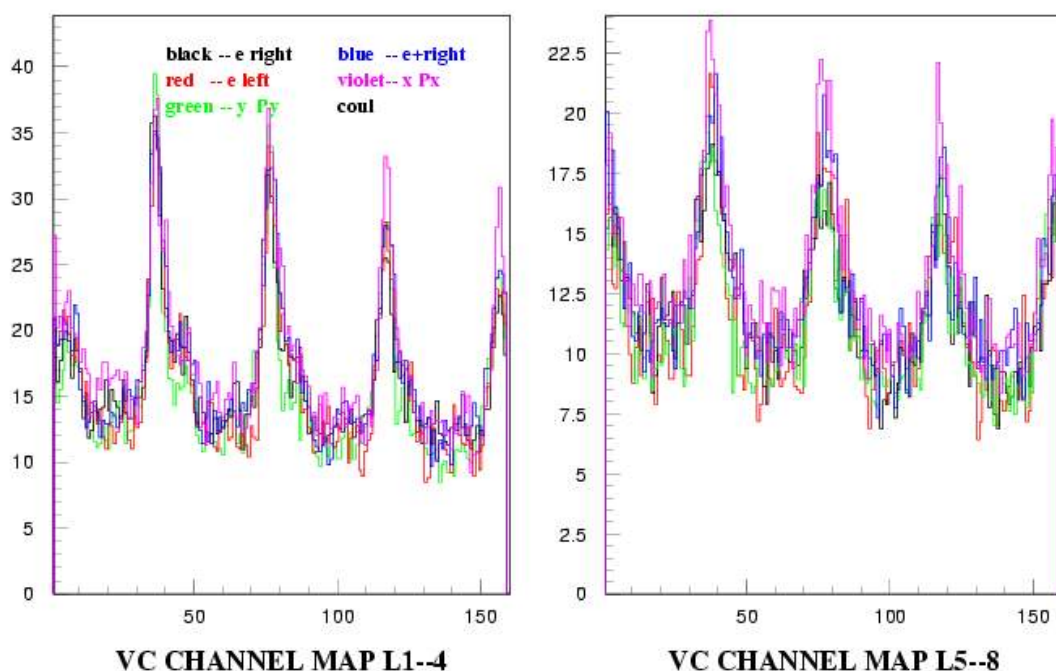


图 3.7 电子束流的 coulomb 作用本底的对称性

由图可以看出，电子束流的库仑作用的本底具有 y 向对称性，这也说明了库仑作用产生的初级本底具有 y 向对称性，同时也说明了这次本底模拟的 DECAY TURTLE 产生的初级本底的数据样本对于 SIMBES 的 MC 模拟已经足够大，可以不必考虑统计涨落的影响。

图中还给出了库仑作用本底的电子反向输入（red—e left）、正电子输入（blue—e+ right）和电子的 x 向反向输入（violet—x Px）的结果，由图可见，这几种情形的本底基本一致。

4. 四极磁场的影响和坐标变换的影响

插入四极磁铁的磁场对本底的影响较大，将四极磁铁的磁场反向其余条件不变，结果与原来磁场不变的结果比较了解四极磁场对本底的影响。

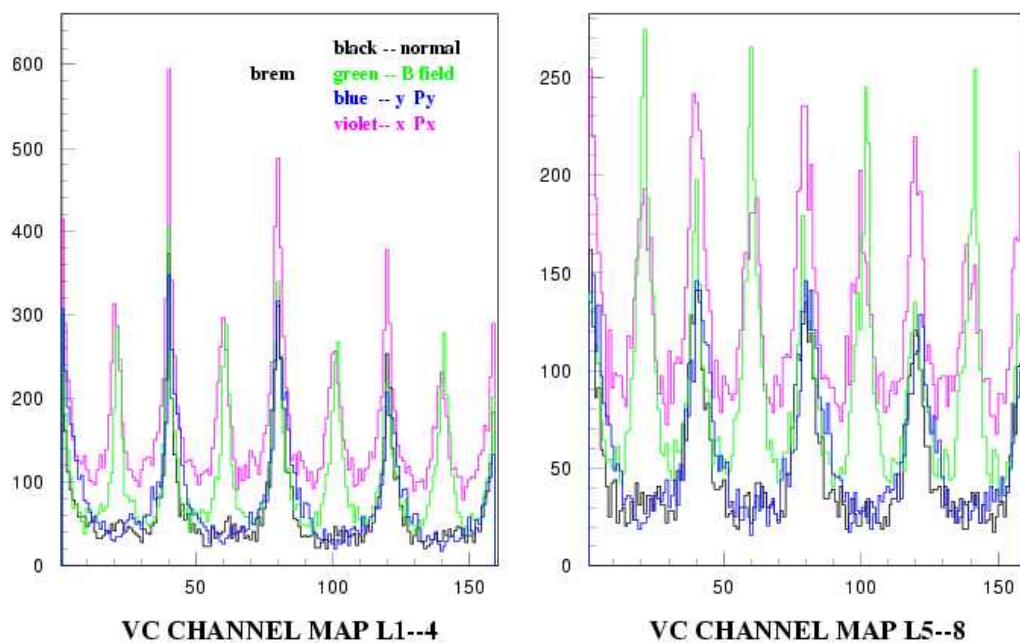


图 3.8 磁场反向和坐标变换下的 bremsstrahlung 作用本底

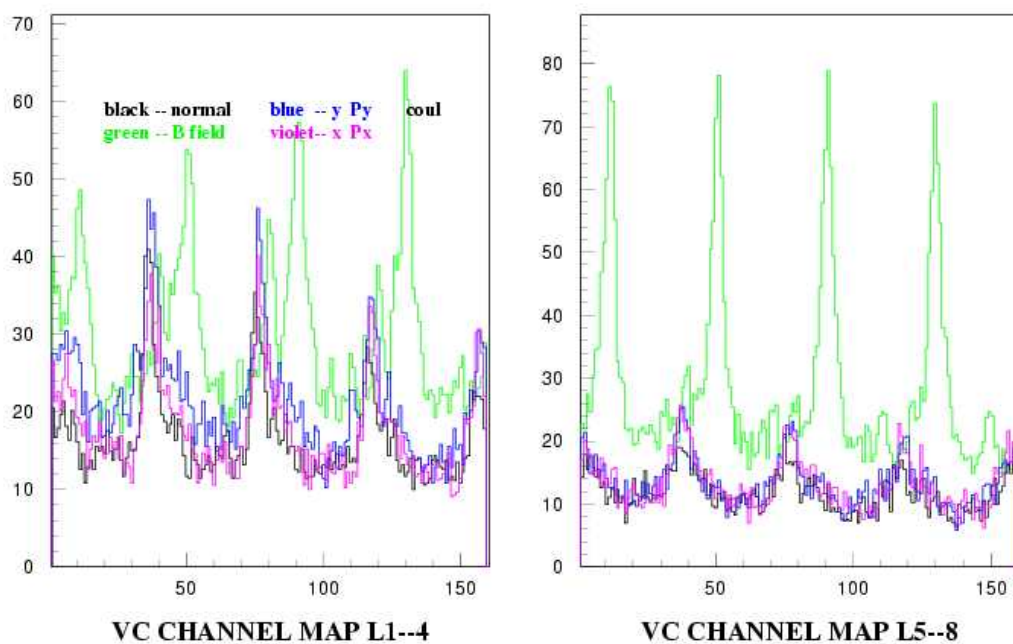


图 3.9 磁场反向和坐标变换下的 coulomb 作用本底

图 3.8, 图 3.9 显示了四极磁场与磁场反向两种情形下韧致作用和库仑作用导致的本底在顶点探测器(VC)1 至 8 层的单丝计数率。图中 black—normal 指示的是电子按实际条件输入的产生的本底, green—B field 指示的是四极磁场反向其余条件不变情形的本底。

由图中可以看出, 无论对于韧致作用产生的本底还是库仑作用产生的本底, 四极磁场对它们的影响都是很大的。对于韧致作用的本底, 在原来一个水平单侧(环内侧)峰的情况下又增加了一个水平(环外侧)峰。对于库仑作用的本底, 使原先的一个水平单侧(环内侧)峰劈裂成两个稍偏的水平单侧(环内侧)峰。

除了考察变换磁场的影响, 还考察了坐标变换对束流本底的影响。这些结果也显示在图 3.8, 图 3.9 上。象以前一样, 坐标反向同时相应的动量也反向。图中 blue—y Py 指示的是 y 坐标反向其余条件不变情形的本底, violet—x Px 指示的是 x 坐标反向其余条件不变情形的本底。

由图中可以看出, 无论对于韧致作用产生的本底还是库仑作用产生的本底, 都具有 y 向对称性; 库仑作用产生的本底, 还具有 x 向对称性, 但 x 坐标反向对韧致作用产生的本底影响却很大, 增强了原来的水平内侧峰, 同时增加了一个水平外侧峰。

5. 不同作用对本底的贡献和本底的特征

本次模拟对初级本底的产生考虑了束流与储存环残余气体的 beam-gas 作用和束团内部的弹性 touschek 效应两种原因, beam-gas 包括非弹性的韧致(bremmstrahlung)作用和弹性的库仑(coulomb)作用。这三种作用机制对 BESII 本底的贡献显示在图 3.10 中。图 3.10 是 bremmstrahlung、coulomb 和 touschek 三种作用机制引起的本底和总的本底在顶点探测器 1 至 8 层的单丝计数率。图中 green—brem, blue—coul 和 violet—tous 分别指示的是 bremmstrahlung 作用、coulomb 作用和 touschek 效应三种作用引起的本底, black--tot 指示的是总的本底。

由图中可以看出, 对于 BEPCI/BESII 的束流相关本底, 韧致作用、库仑作用和 touschek 效应三种作用引起的本底对总的本底的贡献, 韧致作用的本底贡献比库仑作用和 touschek 效应的本底贡献都大, 库仑作用和 touschek 效应的本底贡献相当。

由图中可以看出本底分布的一些特征：总的本底有水平方向的两个峰，一个环内侧，一个环外侧；水平方向环内侧峰要明显高于水平方向环外侧峰；环内侧峰主要来自于韧致作用的本底；对于环外侧峰，韧致作用的本底贡献比 **touschek** 效应和库仑作用的本底大，但由于韧致作用和库仑作用的本底贡献在环外侧比较平均，峰形主要决定于 **touschek** 作用的本底贡献。

由图中各个作用的本底贡献曲线可以看出，对于韧致作用、库仑作用和 **touschek** 作用的本底计算，韧致作用和库仑作用的本底的数据量足够，本底贡献的曲线相当连贯，而 **touschek** 作用的本底的数据量偏小，本底贡献的曲线不够连贯，但 **touschek** 作用的本底贡献比较小，不会影响模拟计算的结论。对于韧致作用、库仑作用和 **touschek** 作用的本底分布，韧致作用和库仑作用的本底是水平方向的环内侧峰，**touschek** 作用的本底是水平方向的环外侧峰，水平内侧是否有峰由于数据统计量不足不能肯定。

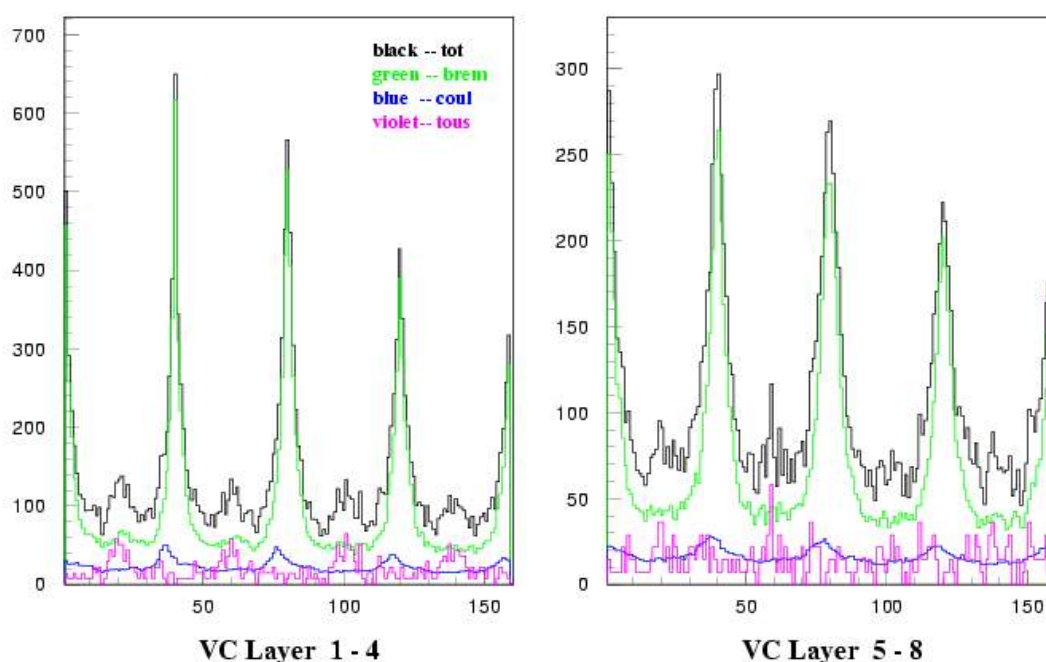


图 3.10 韧致、库仑和 **touschek** 三种作用机制引起的本底和总的本底

6. 储存环不同区段对本底的贡献和本底的特征

对于韧致作用、库仑作用和 **touschek** 作用的引起的本底，每个作用发生的区段位置不同，丢失粒子丢失的位置和动量都会不同，最终各个区段

对每个作用的本底的贡献也不相同。

本次本底模拟中，对丢失粒子的模拟采取分区段模拟，由三分区、七分区，最后到十分区。分区划分见本章开始部分的介绍。图 3.11，图 3.12 显示了十分区模拟的不同作用区段的本底在顶点探测器 1 至 8 层的单丝计数率。

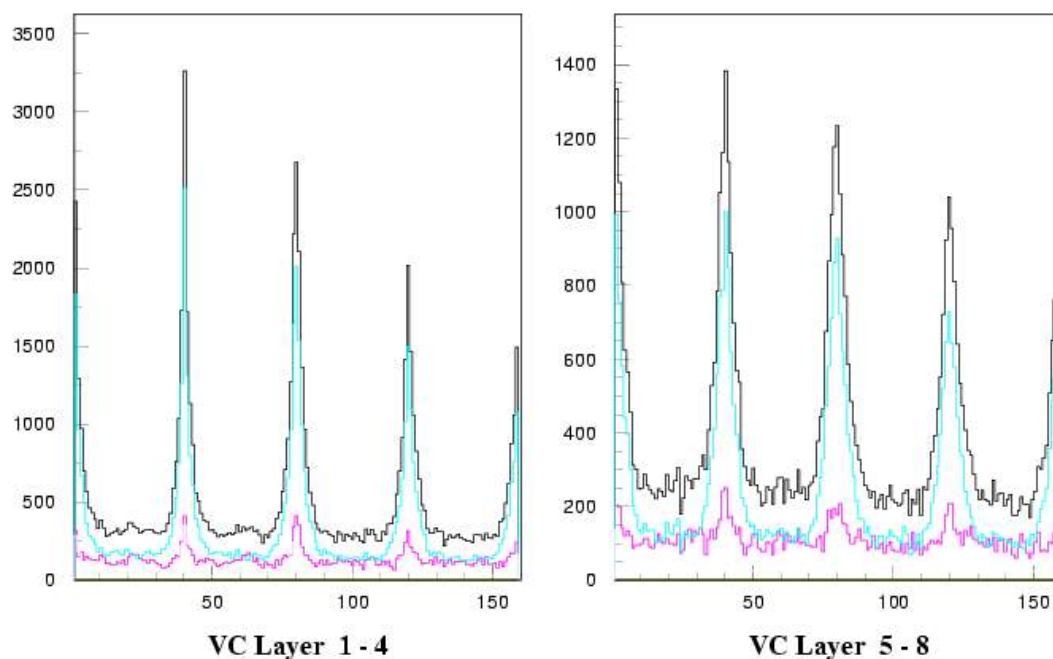


图 3.11 不同作用区段的本底对韧致作用的本底的贡献

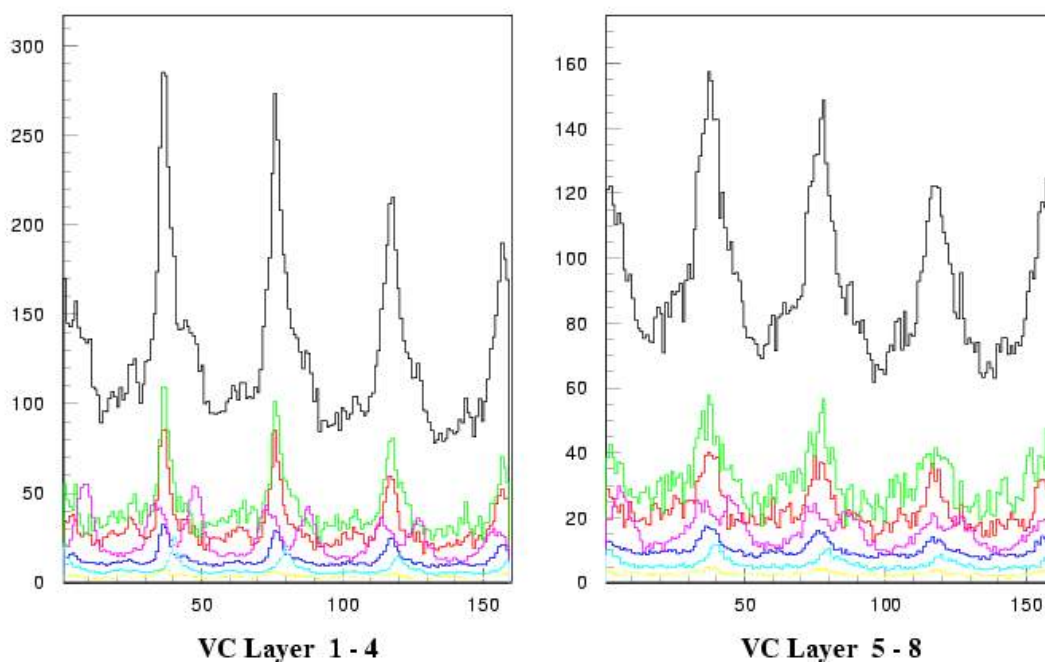


图 3.12 不同作用区段的本底对库仑作用的本底的贡献

图 3.11 显示了十分区模拟的不同作用区段的本底对韧致作用的本底的贡献，图 3.12 显示了十分区模拟的不同作用区段的本底对库仑作用的本底的贡献，不同颜色的曲线指示了不同区域段的本底贡献。对于 touschek 效应的本底的各区段模拟的本底结果，统计量小，数据计数过低，曲线很不规则，省略。由图 3.11 和图 3.12 中的本底贡献曲线和区段划分可以知道，对于韧致作用的本底，主要来自对撞区上游直线段和紧接的弧区段的贡献，对于库仑作用的本底，各区段的作用全环比较平均，长的区域段贡献就稍大。

这里可以比较清晰地看到不同作用的本底的峰形，韧致作用的本底有一个水平环内侧峰，对撞区上游直线段区域的峰形也是明显的高的水平环内侧峰，别的不同区段峰形类似但较小；库仑作用的本底也是一水平环内侧峰，各区段的峰形主要也是水平环内峰，有单峰的有双峰的，很可能双峰是由于路程远正负电子途经电磁场使单峰分裂形成的。

经过以上模拟，我们知道，对 BEPCI/BESII 束流相关本底的主要贡献来自于韧致作用的本底（占 beam—gas 总本底的 85%左右），而韧致作用的本底，主要来自对撞区上游直线段和紧接的弧区段的贡献。故而对撞区直线段及附近区域对束流相关本底的影响最大。

§ 2 本底实验的结果及分析

为了对束流本底特征有比较深入的了解，并考察本底模拟工具的可靠性，对 BEPCI/BESII 的本底情况进行了实验研究。

2002 年 5 月，我们在 BESII 上做了三天的本底实验。用随机取数的触发条件获取了一批本底数据，研究了探测器的本底特征。本节以顶点室第 5 层第 10, 20, 30 和 40 号丝单丝计数率随实验条件的变化为例研究本底特征。其中，第 10 号、20 号、30 号和 40 号信号丝分别位于储存环上方、水平外侧、下方和水平内侧。实验中，除 Touschek 效应实验外，其它实验束流均为单束团。

BESII 本底实验主要包括：研究探测器本底与流强的关系，与束流在对撞点处穿越角度的关系，与储存环上不同区域真空度的关系，以及 Touschek 效应的影响。

1. 探测器本底与流强的关系

图 3.13 为顶点室第五层第 10、20、30 和 40 号丝单丝计数率与流强的关系。实验束流为负电子束。由图中可见，相同条件下，环外侧丝 (VC_L05_20) 计数率明显高于其它丝；探测器本底与流强大致成二次关系。这是因为，对于 beam--gas 本底，储存环真空度随流强增加线性增加，而本底与流强和真空度成正比关系，所以 beam--gas 本底随流强二次变化；对于 Touschek 本底，其作用截面与带电粒子密度平方成正比，即与流强平方成正比，所以，Touschek 本底也随流强二次变化。

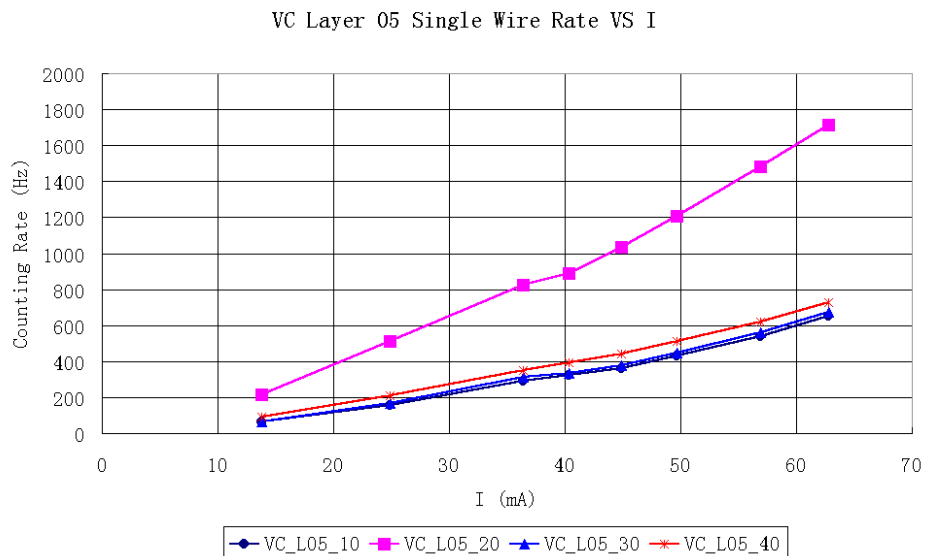


图 3.13 顶点室第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率与流强的关系

2. 探测器本底与束流在对撞点处穿越角度的关系

为了达到最高亮度，正负电子束团在对撞点对撞时的角度经常不为零；同时，稳定运行时，束流在对撞点处的穿越角度也时常小幅偏离中心轨道（远小于 1.0 mrad）。图 3.14 为顶点室第五层第 10、20、30 和 40 号丝计数率与束流在对撞点处穿越角度的关系曲线。实验束流为 40 mA 正电子，横坐标为束流在对撞点处的穿越角度（mrad）。

由图可见，束流在对撞点处的穿越角度变化是可逆的，当束流在对撞点处的穿越角度恢复原值后，探测器本底也恢复原值；探测器本底随束流在对撞点处穿越角度增大而增大，且角度越大，本底增大越快。当束流在对撞点处的穿越角度由 0.0mrad 增大到 1.0mrad 时，顶点室单丝计数率变

为原来的约 4 倍。

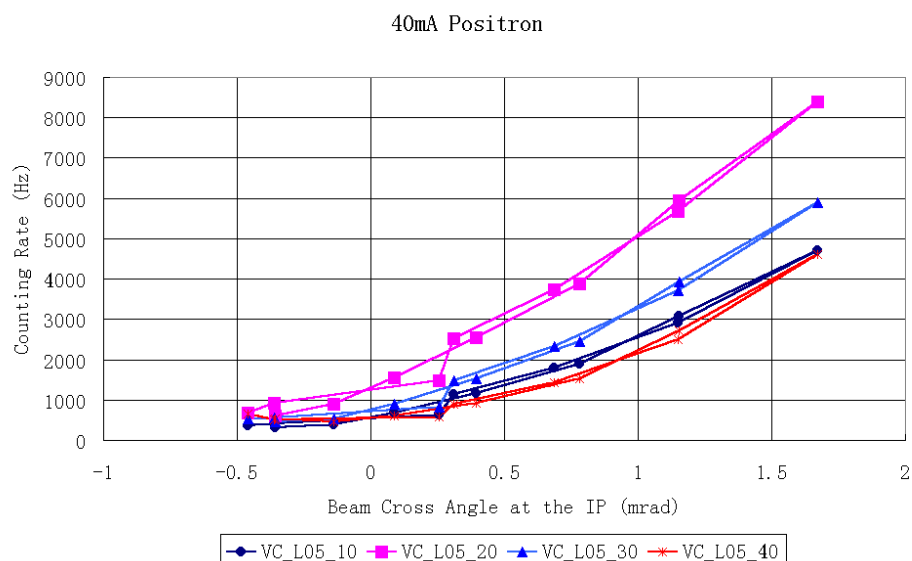


图 3.14 VC 第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率与穿越角度的关系

3. 探测器本底与储存环上不同区域段真空度的关系

储存环上不同区域段的真空度各不相同，且某一区域段的真空度也随流强的变化而变化。图 3.15 为储存环上的真空计分布图，正负电子运动方向如图中箭头所示，图中每一真空计旁边均标有一实验时的真空度值(单位: Torr)。为了研究探测器本底对储存环上不同区域段真空度的敏感程度，选择了 30mA 的负电子束流，并先后改变了对撞点上游不同区域段的真空度。

实验结果表明，改变对撞点上游距对撞点 160 米到 140 米区域段内的真空度，及 200 米到 160 米和 100 米到 40 米区域段内的真空度时，探测器本底基本无变化，如图 3.16 所示（以 200 米到 160 米和 100 米到 40 米区域为例）。而改变对撞点上游距对撞点 30 米到 13 米区域段的真空度时，探测器本底随真空度变差明显变大，如图 3.17 所示，探测器单丝计数率基本与此区域段内真空度同时变化，且变化比例大体相当。所以，探测器本底主要来自于对撞点上游距对撞点 30 米以内的区域段。

4. Touschek 效应

Touschek 效应是同一束团内部带电粒子之间的库仑散射。束团尺寸越小，Touschek 效应越强；单束团流强越大，Touschek 效应越强。实验束流为负电子。实验时，保持总流强（40mA）不变，改变束团个数（分别为 1、2、3、4、5、8、10 和 20 个束团），研究探测器本底的变化情况。图 3.18 为顶点室第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率与束团个数的关系曲线。由图中可见，相同流强下，束团个数越多，探测器本底越小。当束团个数增加到 10 个以上时，探测器本底随束团个数增加缓慢变小。单束团时的探测器本底约为多束团(20 束团)时的 1.5 倍。

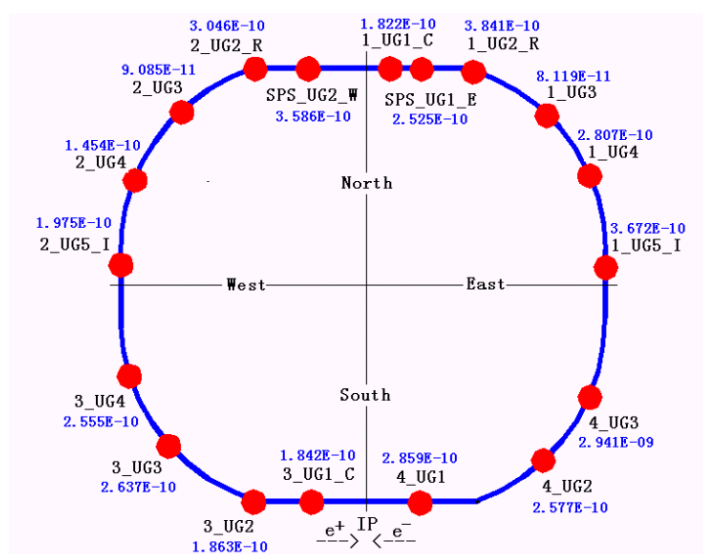


图 3.15 储存环上真空计分布及实验时的真空度

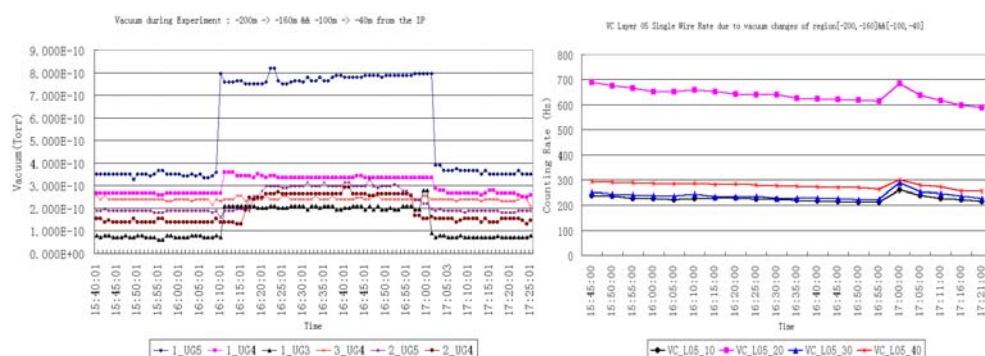


图 3.16 对撞点上游距对撞点 200 米到 160 米和 100 米到 40 米区域段内真空度随时间变化曲线(左图)和顶点室第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率随时间变化曲线（右图）

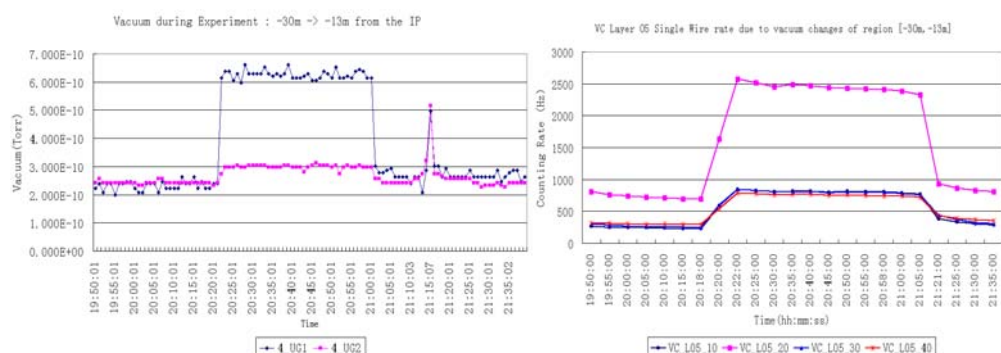


图 3.17 对撞点上游距对撞点 30 米到 13 米区域段内真空度随时间变化曲线(左图)和顶点室第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率随时间变化曲线(右图)

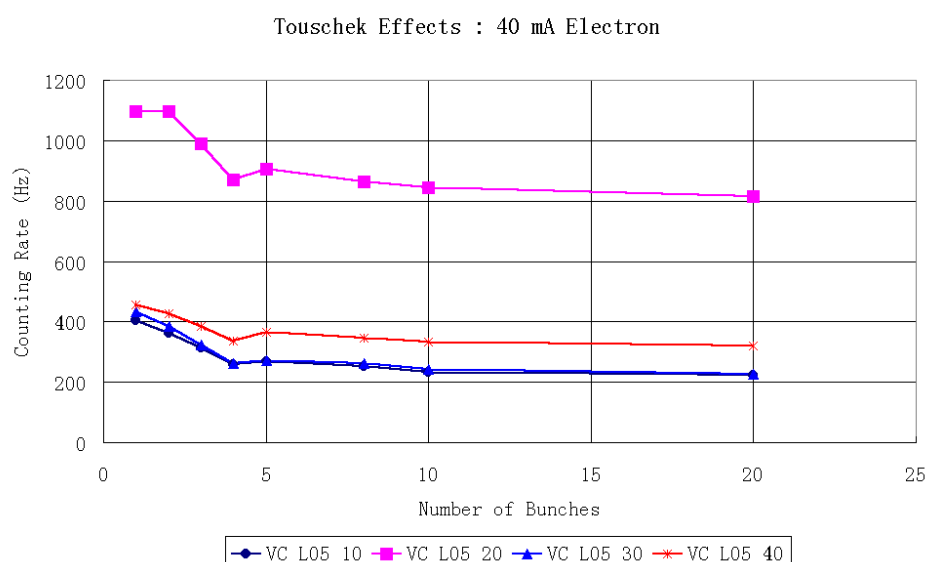


图 3.18 顶点室第 5 层第 10、20、30 和 40 号丝计数率与束团个数关系

§ 3 本底实验与 MC 模拟的数据比较

为了验证现有模拟工具的可靠性,对 BESII 本底实验和模拟进行了数据比较。首先对本底实验与模拟的特征进行了比较,然后比较了顶点室各层单丝平均计数率。实验流强均为 40mA,模拟流强归一化到 40mA,模拟时储存环上不同区域的真空度按实验时真空度刻度。储存环上真空计分布和

实验时真空度如图 3.15，真空度单位为 Torr。

1. 本底来源

模拟结果表明，束流—气体本底中，韧致辐射为主要本底来源（占整个束流—气体本底的 85%左右）。韧致辐射本底主要来自于对撞点上游 40 米到对撞点区域，这和上面的关于实验本底与储存环上不同区域段真空度一节的实验结果一致。图 3.19 为 DECAY TURTLE 模拟的丢失在对撞区的韧致辐射电子来源图。图中所有粒子均丢失在对撞区，横坐标表示丢失粒子与残余气体分子发生作用的位置到对撞点的距离(单位：米)，负号表示对撞点上游。上半图纵坐标为计数；下半图纵坐标为丢失电子相对于母粒子的分数能量。

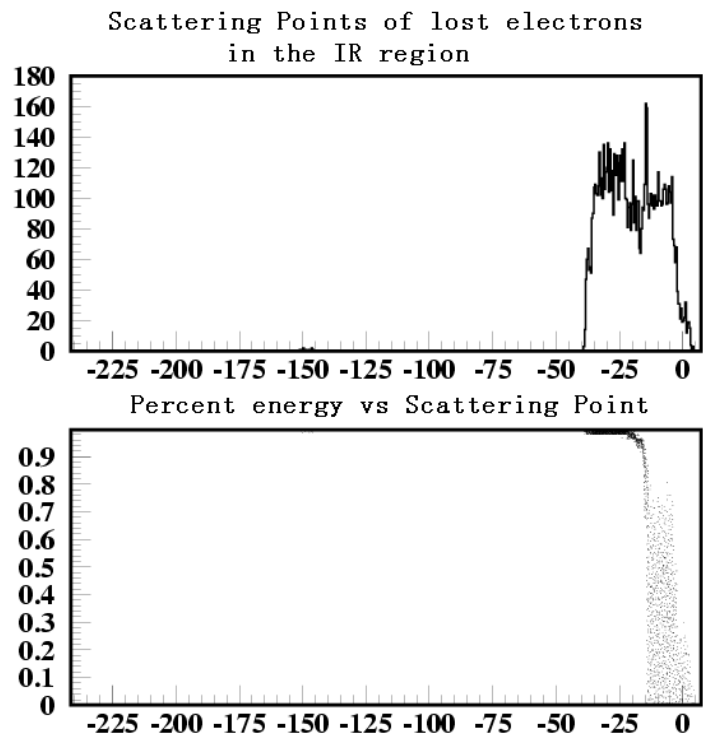


图 3.19 韧致辐射丢失电子来源

2. 顶点室丝击中率

图 3.20 中左图为实验时顶点室 5—8 层丝的击中率分布，右图为模

拟顶点室 5—8 层丝的击中率分布，其中包括韧致辐射和库仑散射。横坐标依次为顶点室 5—8 层的信号丝；其中，第 20、60、100 和 140 号丝位于环外侧，第 1、40、80、120 和 160 号丝位于环内侧。

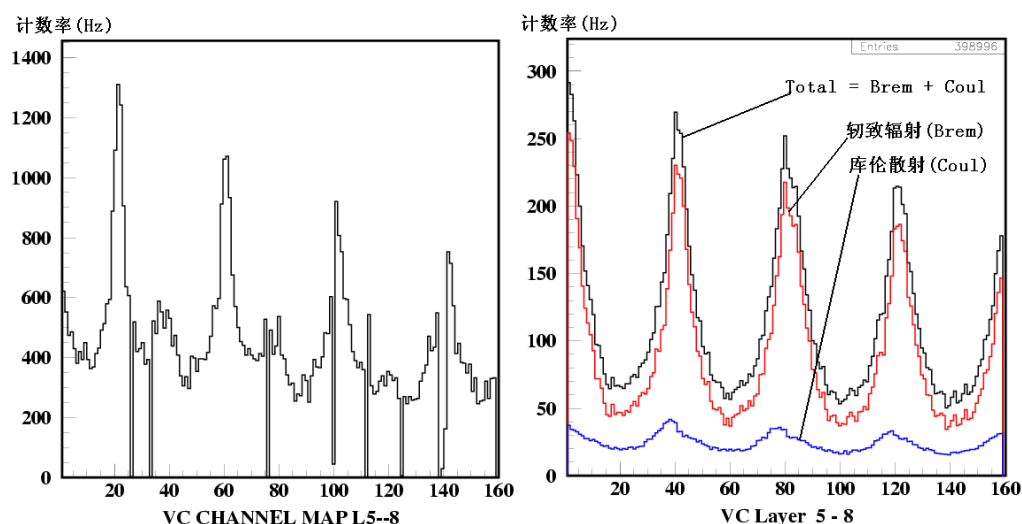


图 3.20 实验时 (左图) 和 MC 模拟(右图)顶点室 5—8 层丝击中率分布

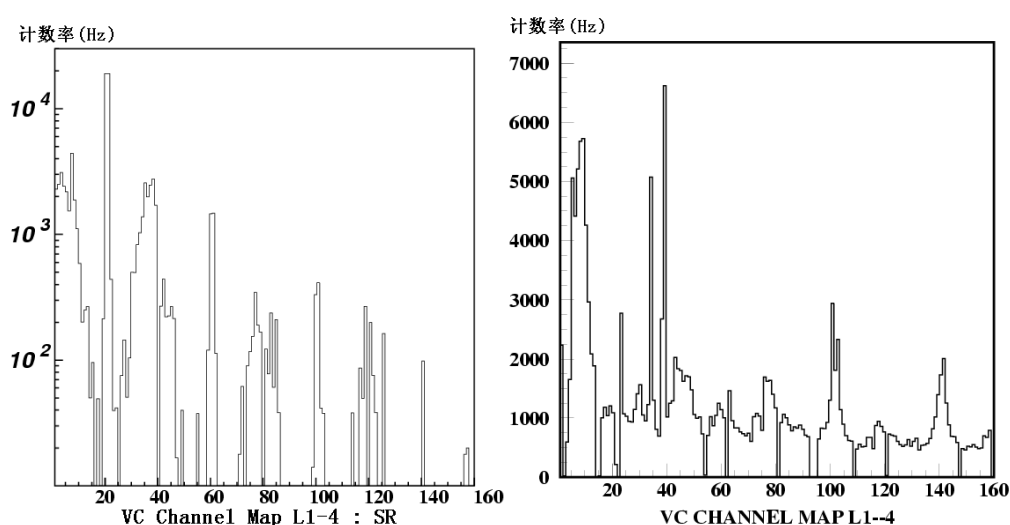


图 3.21 模拟同步辐射(左图)和实验(右图)的顶点室 1—4 层丝击中率分布

图 3.20 的实验与 MC 模拟的主要差别在于，实验时，顶点室环外侧明显的有一个峰，而模拟没有。二者在环内侧均有一个峰。根据同步辐射模拟结果，顶点室前 3 层环外侧有明显的同步辐射击中峰，但峰高随层号增加迅速下降(如图 3.21 左图)，到第 5 层，同步辐射击中率已经比较小了。所以，对于顶点室第 5 层以后各层的丝击中率，同步辐射影响较小，实验

上的环外侧峰的物理机制暂时不清楚，有待进一步的研究。图 3.21 右图为实验时顶点室 1—4 层丝击中率分布。

3. 实验和 MC 模拟的 VC 本底计数率比较

按照实验的真空度和流强来模拟束流—气体作用产生的本底，并考虑 Touschek 效应的 1.5 倍修正（如图 3.18，单束团时顶点室单丝计数率约为多束团时的 1.5 倍），对实验和 MC 模拟的本底的顶点室各层平均单丝计数率进行了比较。下面的表为实验与模拟的顶点室各层单丝平均计数率比较，包括不去掉环外侧峰情况和去掉环外侧峰情况。

层	模拟 (Hz)	不去掉环外侧峰		去掉环外侧峰	
		实验 (Hz)	实验/模拟	实验 (Hz)	实验/模拟
01	255.3	2102	8.23	— — — —	— — — —
02	225.5	1146	5.08	979.8	4.35
03	190.7	925.0	4.85	645.1	3.38
04	160.2	688.8	4.30	494.3	3.09
05	147.0	547.6	3.73	426.5	2.90
06	136.2	498.4	3.66	378.5	2.78
07	126.1	405.5	3.22	308.0	2.44
08	114.0	341.4	2.99	253.5	2.22
09	102.1	297.9	2.94	198.9	1.95
10	92.62	262.5	2.84	179.8	1.94
11	88.21	237.9	2.70	165.2	1.87
12	81.68	201.0	2.46	135.5	1.66

顶点室各层单丝平均计数率实验与模拟比较表

实验上，顶点室 1—4 层靠近束流管，容易受同步辐射(图 3.21 左图)，高次模效应影响，其丝的击中率不是很正常(图 3.21 右图)。所以，从 VC 第五层开始比较更为合理。由上表中可见，实验和 MC 模拟的本底的顶点室各层单丝平均计数率的比值随层号增加（到束流管距离变大）而减小，原因之一可能正是越靠近束流管的顶点室信号层越容易受到同步辐射的影响。不去掉环外侧峰时，实验和模拟按层单丝平均计数率的比值不超过 3.73；去掉环外侧峰时，实验和模拟按层单丝平均计数率的比值在 3 倍以内。可见当前的模拟工具在 4 倍以内是可靠的。目前国际上两个 B-工厂实验和模拟的符合大约在 2 倍以内，而它们的束流能量比 BEPC 高很多，我们

的本底模拟的结果比它们差一些也是可以理解的。

§ 4 总结

通过对 BEPCI/BESII 的束流相关本底的 MC 模拟以及实验研究的结果表明, BESII 本底的主要来源是 beam—gas 的韧致作用产生的丢失电子本底, 对撞区直线段对本底的影响比较大。结果也表明了, 当前的 MC 模拟方法是可靠的, 利用 DECAY TURTLE 和 SIMBES 对当前的 BEPCI/BESII 的束流本底的 MC 模拟是成功的, 可以通过模拟, 研究 BESII 本底的基本情况; 这样, 也就可以用于估计新的 BESIII 工作状态下的本底, 为 BEPC/BES 的升级提供参考, 实际上这方面已经有了一些初步的结果。

这次的本底模拟研究结果比国外的模拟稍显不足, 这里有几方面的原因。国外在加速器和探测器的本底模拟方面的工作已经比较成熟, 已经很有经验, 而对 BEPC/BES 的本底 MC 模拟尚属首次; 另外, 它们加速器所在能区比 BEPC 高, 这也会使本底 MC 模拟的结果容易跟实验结果接近。从这次本底 MC 模拟研究中, 也可以看出还可以有改进结果的可能: 实验上 BESII 内部距束流中心线较远处也有较大的本底, 而此处 MC 模拟的结果偏低, 对于初级本底粒子的模拟有改进的余地; 现在模拟的正负电子束团运动沿理想的束流中心线, 而实际上正负电子束团总要有些偏离; 四极磁场对本底影响很大, 而四极磁场的边缘效应这次模拟没有考虑; 束流管环外侧峰在模拟中显现不明显, 更仔细的 Touschek 效应的模拟和同步辐射模拟会帮助对本底的了解; 对于 MC 模拟程序, 原是由于分析物理数据的, 程序考虑的能量域要比本底研究所需的要高, GEANT 和 SIMBES 的能量截断会减少一部分本底; 对于 BEPC 储存环的部件的考虑还可以再仔细些等等。

总之, 对于 BEPCI/BESII 的本底 MC 模拟的首次研究, 结果是令人满意的, 同时, 也还有改进的余地。

参 考 文 献

- [1] 谢家麟主编,《北京正负电子对撞机和北京谱仪》,浙江科学技术出版社,1996年11月
- [2] 郑志鹏,朱永生主编,北京谱仪正负电子物理,广西科学技术出版社,1998年11月
- [3] 金大鹏,杨胜东等,探测器束流相关本底的实验研究. 高能物理与核物理,2003年47卷10期.(待出版)
- [4] 孟祥承,高能物理实验中的噪声本底及其抑制. 核电子学与探测技术, Nucl. Elect. & Det. Tech., 16, (1996) 388-392.
- [5] 孟祥承, BES/BEPC 的本底问题初步实验研究. 核电子学与探测技术, 17, (1997) 478-482.
- [6] 王运永等,一种漂移室定位性能反常现象的研究, 高能物理与核物理, 22, 5 (1998) 398-405.
- [7] 王运永等,北京谱仪-II 主漂移室干扰噪声的研究. 核电子学与探测技术, 19, (1999) 201-205.
- [8] 北京正负电子对撞机、北京谱仪改进工程, 内部资料
- [9] Bai J Z et al. Nucl. Instr. Methods, 2001, A458:627.
- [10] 谢一冈等, 粒子探测器与数据获取, 科学出版社, 2003年7月.
- [11] 北京正负电子对撞机、北京谱仪研制报告, 内部资料
- [12] 郑建平等, BESII 顶点探测器, 高能物理与核物理, 25, 5 (2001) 423-428.
- [13] 唐孝威主编,《粒子物理实验方法》,高等教育出版社,1982年
- [14] D. C. Carey et al. DECAY TURTLE manual, March 1982.
- [15] GEANT-Detector Description and Simulation Tool, edition Oct. 1994.
- [16] SIMBES 库文件, 高能所内 Linux 工作站上的内部资料.
- [17] 李灿国,北京谱仪模拟程序 SIMBES 开发工作报告,博士后出站报告,1997年9月

致 谢

在高能所实验中心的这两年博士后工作即将结束，回顾这一段的生活，感慨颇多。通过这段时间的学习工作，对实验物理方面的了解加深了许多，技能和能力都有所提高。在此，要感谢各位老师、同事和家人、朋友的帮助和支持。

感谢实验物理中心的朱永生研究员和张长春研究员提供博士后的研究机会，感谢王贻芳研究员指导我的博士后工作。

我的博士后工作涉及 BEPC/BES 的很多部门，感谢王贻芳研究员和过雅南研究员对具体研究的指导，感谢陈江川副研究员对 SIMBES 编程和使用方面的指导和帮助，也感谢在调研 BEPC 器件中提供帮助的吕军光、白景芝、郑建平、孟祥承、杨云、石才土、郝耀斗、徐绍旺等等。还要感谢组长赵棣新研究员对我研究起步时对 BEPC/BES 的指教和这时组里的同事刘振安、金大鹏对我的帮助，金大鹏的工作上的合作和软件使用上的帮助使我比较顺利的进入工作。感谢金山研究员在博士后工作后期提供了数据分析时间的机会和这方面的指点 and 帮助，感谢季小斌博士、房双世博士、杨洪勋博士在数据分析上的帮助。感谢同事周能锋对准备这份报告的图形制作上的帮忙。感谢触发组全体同事形成的在学习生活上宽松愉快的环境。感谢这段时间里所有给过我帮助的人们。

最后感谢我的家人，让我能按照着自己喜欢的做去，也感谢我的朋友们，让我的生活多一些乐趣。

博士期间发表的文章

1. The Effect of Quark Mass and α - α Term on $\bar{q}q$ Condensation in QCD Vacuum, Shengdong Yang, Zhining Zhou, Zesen Yang, Communications in Theoretical Physics. v36.443, 2001
2. The Effect of Retardation on the Spontaneous Breaking of Chiral Symmetry, Shengdong Yang, Chenyang Zhai, Zhining Zhou, Zesen Yang, Communications in Theoretical Physics. v36.589, 2001
3. The motion of repulsive Brownian particles in quenched disorder, Gang Liu, Rushan Han and Shengdong Yang. COMMUNICATIONS IN THEORETICAL PHYSICS, v35.241, 2001

博士后期间发表和已被接收的文章

1. 探测器束流相关本底的实验研究. (待出版)
金大鹏, 杨胜东 等, 高能物理与核物理, 2003 年 47 卷 10 期.

个 人 简 历

姓 名： 杨胜东

性 别： 男

出生年月： 1969.12

民 族： 汉

籍 贯： 辽宁省瓦房店市

E- mail: yangsd@mail.ihep.ac.cn

主要经历:

✧ 2001.9-2003.8: 中科院高能所实验物理中心 (博士后)

✧ 1997.9-2001.8: 北京大学物理系 (攻读理论理论博士,
导师杨立铭教授)

✧ 1994.9-1997.8: 中国原子能院物理所 (理论物理硕士,
导师张锡珍教授)

✧ 1989.9-1994.8: 北京大学技术物理系 (核物理理学学士,
本科)

✧ 1986.9-1989.8: 辽宁省瓦房店市高级中学

通 讯 地 址

中国科学院高能物理研究所

北京 918 信箱 1 分箱

邮编: 100039

Institute of High Energy Physics

Chinese Academy of Science

P. O. Box 918-1

Beijing, 100039

P. R. China