

# 面向对象的BESIII探测器模拟系统

邓子艳<sup>1;1)</sup> 曹国富<sup>1</sup> 付成栋<sup>1</sup> 何苗<sup>1</sup> 刘怀民<sup>1</sup> 冒亚军<sup>3</sup> 夏宇<sup>2</sup> 尤郑昀<sup>3</sup> 袁野<sup>1</sup> 汤睿<sup>2</sup>  
刘英杰<sup>1</sup> 马秋梅<sup>1</sup> 马想<sup>1</sup> 王大勇<sup>1</sup> 毛泽普<sup>1</sup> 文硕平<sup>1</sup> 王喆<sup>1</sup> 李卫东<sup>1</sup> 张长春<sup>1</sup>  
邱进发<sup>1</sup> 张学尧<sup>4</sup> 张晓梅<sup>1</sup> 张瑶<sup>4</sup> 郑直<sup>1</sup> 俞国威<sup>1</sup> 黄性涛<sup>4</sup> 蒋林立<sup>5</sup> 臧石磊<sup>1</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (湖南大学 长沙 410082)

3 (北京大学 北京 100871)

4 (山东大学 济南 250100)

5 (中国科技大学 合肥 230026)

**摘要** BESIII探测器的模拟软件包BOOST, 是基于Geant4开发的面向对象的模拟软件. BOOST全面地模拟了BESIII探测器的物质和几何结构, 给出了粒子在各个子探测器中的击中信息, 以ASCII码文件的形式输出原始数据和MC truth信息可供重建软件开发和物理分析使用, 初步结果显示BOOST的模拟是合理的.

**关键词** BESIII探测器 模拟 Geant4

## 1 引言

可靠稳定的探测器模拟软件对大型粒子物理实验是必不可少的. 曾经运行在北京正负电子对撞机BEPC上的谱仪BES II<sup>[1]</sup>, 其模拟程序SIMBES<sup>[2]</sup>是基于Geant3<sup>[3]</sup>和Fortran77开发的. BESIII<sup>[4]</sup>是即将运行在改进后的北京正负电子对撞机BEPC II上的新型谱仪, 它比BES II在设计性能上有很大提高, 因此对探测器模拟的精确性提出了更高的要求. Geant4<sup>[5]</sup>是基于C++语言开发的面向对象的软件包, 易于维护和扩展, 已被国际高能物理界的大型实验组所采用(如BaBar和LHC的4个实验组); 另外, Geant4提供了非常全面的粒子与物质的相互作用, 包括电磁相互作用和各种强相互作用包; Geant4还提供了构造各种几何结构的方法和多种用户接口以便用户提取粒子穿过几何物质时的各种信息; 而Geant3从Geant3.21版本之后就再无更新. 基于上述考虑, 决定开发一套全新的基于Geant4的BESIII探测器模拟软件BOOST (BESIII Object Oriented Simulation Tool)<sup>[6]</sup>.

## 2 BOOST现状

完整的探测器模拟程序包括物理事例产生子, 物质与几何结构的描述, 磁场, 粒子与物质的相互作用, 子探测器中击中信息的记录, 探测器响应, 真实化信息, 数据输出, 用户界面等部分. 图1为基本的模拟流程图, 事例产生子(Genbes)以HepEvt的格式<sup>[7]</sup>产生出物理事例, 作为输入提供给Geant4, 通过Geant4来构造探测器并模拟粒子在物质中的各种相互作用, 同时记录下粒子在各个子探测器中的击中信息(Hit objects). 探测器响应是独立于Geant4的, 它利用Hit信息确定探测器的输出信号, 也称为数字化过程(Digitization). 各个子探测器中的击中信息经过数字化

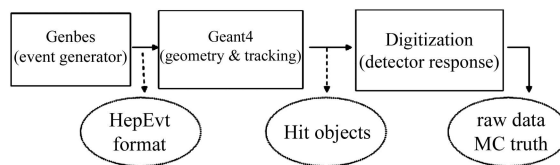


图1 探测器模拟流程图

2005 - 08 - 15 收稿, 2005 - 11 - 10 收修改稿

1) E-mail: dengzy@ihep.ac.cn

以后得到的原始数据 (raw data) 跟探测器在线取数时得到的真实数据具有相同的数据格式. 同时, 在模拟阶段也需要记录下模拟时粒子的真实信息 (MC truth) 供重建和物理分析人员参考和使用. 以下分别介绍各个部分的现状.

## 2.1 事例产生子

事例产生程序 Genbes 是 BES II 中基于 Fortran77 开发的独立软件包, 产生的初态事例的信息, 如粒子

种类, 四动量等, 存放在 common 块中. 为了能够让 Genbes 产生的事例信息用于 BOOST, 将这些信息以 Geant4 支持的 HepEvt 格式写成 ASCII 码文件输出. 如表 1 所示, Genbes 中包含了 30 个产生子, 如均匀相空间产生子 (HOWL),  $J/\psi \rightarrow \rho\pi$  事例产生子 (RHOPI),  $J/\psi$  和  $\psi(2S)$  单举衰变产生子 (LUND-CRM)<sup>[8]</sup> 等等. 另外, Geant4 本身还提供了一个单粒子产生子 (Particle-Gun), 可模拟由对撞点出射的不同动量不同方向的粒子, 主要用于程序开发和调试.

表 1 Genbes 产生子

generator	description	generator	description
HOWL	phase space event	FFGEN	$e^+e^- \rightarrow Ds^+Ds^-$
RHOPI	$J/\psi \rightarrow \rho\pi$	FSFGEN	$\psi(\text{energy}) \rightarrow Ds^*D\text{sbar}$
P2MUMU	$\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	DSSGEN	$e^+e^- \rightarrow D^*D^*$
P2EPEM	$\psi \rightarrow e^+e^-$	DDGEN	$\psi'' \rightarrow DD\text{bar}$
KSTARK	$\psi \rightarrow K^*(890)K$	DSDGEN	$e^+e^- \rightarrow D^*D$
SAGERX	$\psi$ radiative decays	DDPROD	D production
P2BB	$\psi \rightarrow \text{baryon baryonbar}$	MUGEN	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$
PPGEN	$\psi'$ decay	RADMU	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$
KORALBE	$\tau$ pairs	BHAGEN	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$
TAUPRD	$\tau$ production	RADEE	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$
FFF	field-feynman fragmentation	EPSCAT	Bhabha scattering
LUND	$e^+e^-$ annihilation for BES using JETSET	V2LLG	vector meson $\rightarrow l^+l^-\gamma$
LUND_CRM	charmonium inclusive generator	GAMMA2	two-photon process
JETSET	LUND generator	TWOGAM	two-photon process(new)
TESTER	single particle generator	RADGG	$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

## 2.2 物质与几何

BESIII 的子探测器包括主漂移室 MDC, 飞行时间计数器 TOF, 电磁量能器 EMC, 和  $\mu$  鉴别器 MUC, 其中 TOF, EMC 和 MUC 分别包含桶部 (barrel) 和端盖 (end-cap) 两部分. 除以上 4 个子探测器外, BESIII 还包括束流管, 超导磁铁系统 SCM (提供 1T 磁场) 及其支撑系统.

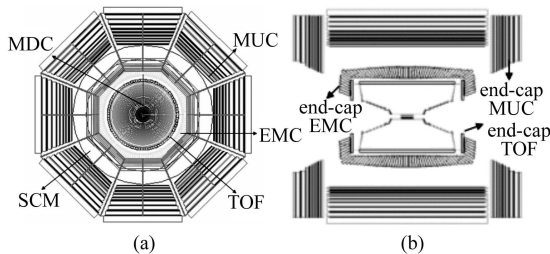


图 2 BESIII 结构图

(a)  $xy(z=0)$  截面; (b)  $yz(x=0)$  截面.

在 BOOST 中探测器几何与物质的描述都尽可能严格按照 BESIII 设计报告给出. 探测器中所用到的物质材料都在 xml 文件中统一定义. 对于各个子探测器的几何结构, 现阶段有两种方法来构造, 一种是用

Geant4 中提供的类, 另外一种是采用基于 xml 的统一几何描述标识文件 (GDML)<sup>[9]</sup>, 用这两种方法模拟的结果相同. 图 2 是 BOOST 中构造出的 BESIII 结构图. 图 3 显示了用 Genbes 中的产生子产生的物理事例  $\psi(2s) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$  和  $J/\psi \rightarrow \rho\pi$  在探测器中的行为.

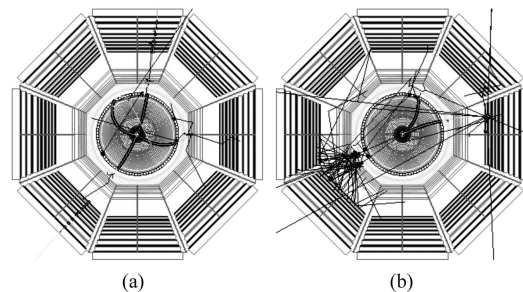


图 3 事例显示图

(a)  $\psi(2s) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$ ; (b)  $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ .

## 2.3 磁场

由于目前还无法提供整个 BESIII 探测器区域内的磁场分布, 因此暂时采用超导磁体内部 1T 的均匀磁

场而超导磁体外部无磁场的近似. 利用有限测量点的磁场值局部或整体拟合得出全空间的三维磁场分布, 可在BOOST中实现完整的磁场描述.

## 2.4 相互作用

Geant4提供了非常全面的相互作用模型, 包括电磁作用和强相互作用软件包. 对强相互作用的模拟, Geant4根据不同的实验备有不同的软件包. 对典型的对撞物理实验, 主要有基于实验数据的模拟(LHEP)和基于理论的模拟(QGSP)两大类, 如表2所示. 在BOOST中用户可以自由选择使用哪个强相互作用模型.

表2 强相互作用模型

package	description
LHEP	GHEISHA ported from GEANT3
LHEP_BERT	$E < 3\text{GeV}$ Bertini cascade
	$E > 3\text{GeV}$ GHEISHA
LHEP_BIC	$E < 3\text{GeV}$ Binary cascade
	$E > 3\text{GeV}$ GHEISHA
LHEP_GN	GHEISHA+gamma nuclear processes
LHEP_HP	as LHEP, for neutrons with $E < 20\text{MeV}$ use evaluated cross section data
QGSP	$E > 25\text{GeV}$ quark-gluon string model
	$E < 3\text{GeV}$ Bertini cascade
QGSP_BERT	$3 < E < 25\text{GeV}$ GHEISHA
	$E > 25\text{GeV}$ quark-gluon string model
QGSC	$E < 25\text{GeV}$ GHEISHA
	$E > 25\text{GeV}$ quark-gluon string model
FTFP	$E < 25\text{GeV}$ GHEISHA
	$E > 25\text{GeV}$ quark-gluon string model with fragmentation ala FRITJOF

## 2.5 击中信息及数字化

BOOST中每个子探测器都定义了相应的灵敏探测单元, 对于主漂移室, 每个灵敏探测单元对应于一个漂移单元; 飞行时间计数器对应于一块塑料闪烁体; 电磁量能器对应于一块碘化铯晶体;  $\mu$ 鉴别器则对应于一个RPC气体室. 粒子经过灵敏探测单元时会留下击中信息, 如位置, 时间, 能量沉积, 探测器单元号等等. 利用这些击中信息, 经过计算和修正, 得到的raw data跟探测器在线取数得到的真实数据具有相同的数据格式.

主漂移室中需要对每个被击中的单元根据其漂移距离计算漂移时间, 还需考虑丝分辨、丝效率和噪声. 飞行时间计数器则需要对能量沉积过阈值的闪烁体计算其两端的TDC和ADC的值. BOOST中TOF的数字化有两个版本, 第一个版本是根据Geant4所提供

hit信息中的能量沉积和击中时间, 加上若干经验公式的修正得到闪烁体两端PMT输出脉冲幅度ADC和时间信息TDC, 这种数字化方法需要通过和数据的对比来确定具体的修正参数. 第二个版本是从真实的物理机制出发, 模拟了闪烁体发光, 光在闪烁体内的传输, 衰减, 以及光电倍增管的响应, 甄别等过程. 电磁量能器中计算每块晶体内的能量沉积, 并模拟主放大器信号的上升时间来抑止噪声.  $\mu$ 鉴别器则需要记录被击中的探测器单元号.

## 2.6 真实化信息(MC truth)

在探测器模拟过程中, 除了要记录下各个子探测器的raw data, 另一项重要的任务就是记录下事例模拟过程中产生的粒子的真实状态以及他们在探测器中的响应, 供重建软件开发和物理分析调试程序参考和使用. 这些信息被称为蒙特卡罗真实化信息(MC truth), 分为粒子和探测器响应两部分.

对于粒子部分, 我们不可能把事例模拟过程中产生的所有粒子都记录下来, 尤其是电磁量能器中的次级粒子非常之多. 只记录产生子里提供的粒子以及由这些粒子在探测器中经过不间断的衰变所产生的粒子, 衰变间断以后所产生的次级粒子都不做记录, 这样就形成了一个完整的衰变链. 对于这些粒子, 记录了它们的起始位置, 四动量, 粒子种类(PDG code), 电荷, 衰变成什么粒子或者从哪个粒子衰变而来等信息, 用径迹(track)和顶点(vertex)对象来描述.

对于探测器响应部分, 考虑到物理分析的要求, 记录粒子在主漂移室和 $\mu$ 鉴别器中的击中历史信息, 即该粒子本身穿过主漂移室和 $\mu$ 鉴别器的探测单元时留下的击中信息. 记录粒子首次击中飞行时间计数器时的信息, 和粒子首次击中电磁量能器时的信息以及由该粒子引起的总能量沉积.

## 2.7 数据输出

现阶段, BOOST采用ASCII码的方式输出raw data和MC truth信息供重建软件和物理分析使用, 这虽是暂时的, 却是在离线软件开发阶段非常有用的方法. 开发人员可以很方便, 直接地看到所产生数据的具体内容. BOOST将raw data和MC truth信息一起输出到一个ASCII码文件, 而且用户可以很方便地控制每个子探测器的raw data和MC truth信息是否输出. 采用ASCII码输出的缺点是文件长度过大, 目前raw data的ASCII码与在线二进制码(binary)之间的转换已经完成, MC truth信息的ASCII码与二进制码之间的转换正在进行中.

## 2.8 用户界面

BOOST友好的用户界面使得无论是软件开发人员,还是普通用户,都可以很方便地利用BOOST来产生所需要的MC数据.跟BES II中SIMBES的用法类似,通过一个配置文件就可以设置好所有相关的环境变量.用户可以从CVS库中检出BOOST软件包,只需编辑简单的用户运行卡(boost.cards和boost.user),就可以通过命令boost运行,利用不同的运行参数,可方便地提交后台,交互式 and PBS作业.

## 2.9 整合到BOSS框架

BOSS<sup>[10]</sup>是基于GAUDI<sup>[11]</sup>开发的BESIII离线软件系统的框架,目的在于为模拟、重建、事例显示和物理分析提供统一的平台. BOOST的开发一直以来都是独立于框架系统的,而且与BOSS的开发平台,配置管理方法都有所不同.而将来BOOST需要完全整合到BOSS框架里去.现阶段,初步的整合工作已经完成,相关的算法和软件包已经建好,BOOST的主要功能都可以在BOSS里面得以实现.整合到BOSS框架后,除了用户界面不一样以外,性能不受影响.

## 3 BOOST性能

### 3.1 速度与稳定性

在模拟速度方面,将BOOST与SIMBES进行了对比. BOOST是基于Geant4的BESIII的模拟, SIMBES是基于Geant3的BES II的模拟,因此在这里不是直接比较Geant4和Geant3.根据LHC实验组的经验,Geant4的速度比Geant3慢大约1.5—2倍,这主要是因为Geant4跟踪每一个产生的粒子到能量为0为止,而Geant3跟踪粒子的截止能量为10keV.表3所示为在同样的Linux平台上,相近的能量cut条件(在SIMBES中电子和光子的截止能量CUTE CUTM为10keV, BOOST中产生次级粒子的截止条件range cuts设为1mm)下, SIMBES和BOOST模拟单个事例所需要的平均时间.对比显示, BOOST比SIMBES慢大约1.5倍,这个速度是可以接受的,而且BOOST的模拟速度还有改善的余地,例如现在只有TOF的数字化过程加了阈值,其他子探测器都没加. EMC中电磁簇射过程用FSM(flash shower model)代替可以大大提高模拟速度.在稳定性方面,对10万个

单径事例进行了模拟测试, BOOST运行良好,无中断现象.

表3 SIMBES和BOOST模拟速度对比

CPU time/s for one event Besfarm7 (PIII/933)		
Event	SIMBES	BOOST
ee → μμ	0.122	0.189
J/ψ → ρπ	0.471	0.763
ee → ee	0.736	1.224

### 3.2 主漂移室

图4是利用BOOST产生的主漂移室模拟数据经重建出来的动量分布图,对于1GeV的电子和μ子( $|\cos\theta| < 0.8$ ),动量分辨( $\sigma_p$ )分别为6.1MeV和5.8MeV.与设计指标一致.

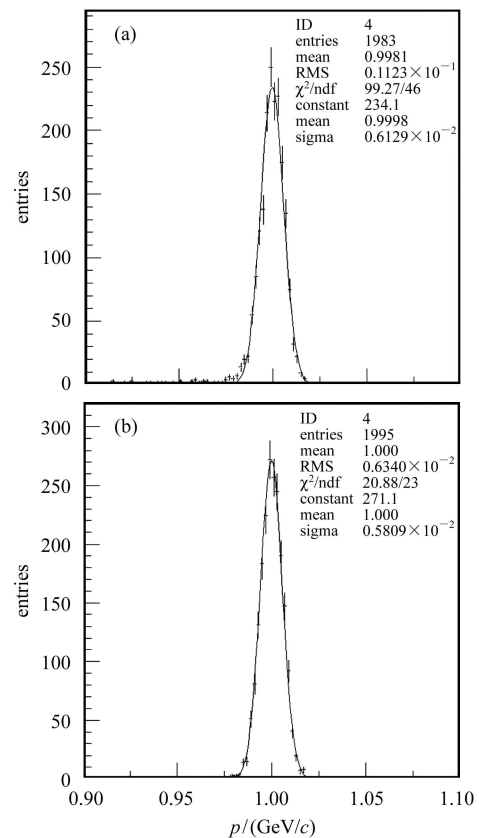


图4 利用BOOST数据重建出的MDC动量分布图

(a) 1GeV/c  $e^-$ ; (b) 1GeV/c  $\mu^-$ .

图5(a)为经过重建后1GeV电子的能损(截断平均值)分布图,  $dE/dx$ 分辨率为6.3%(设计指标6%—7%).图5(b)为不同粒子 $dE/dx$ (以最小电离能损MIP归一)随动量变化的散点图.

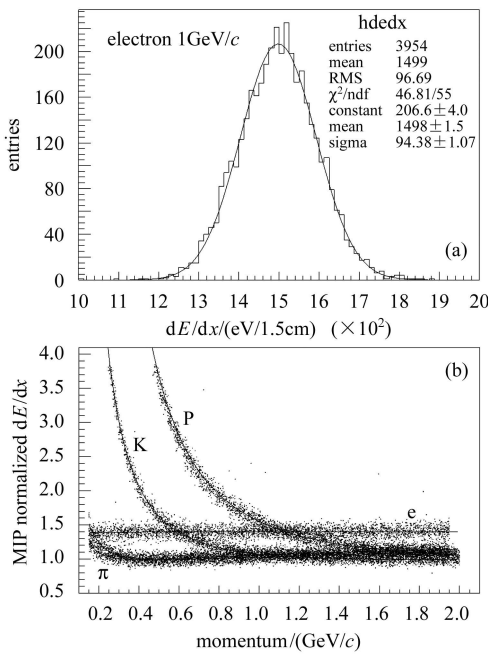


图 5 (a) 1GeV 电子的能损分布; (b) 不同粒子  $dE/dx$  随动量变化的散点

### 3.3 飞行时间计数器

TOF 第 2 个版本的数字化是从真实的物理机制出发进行的模拟。根据 Geant4 所提供 hit 信息中的能量沉积和击中时间, 利用闪烁体和光电倍增管的参数, 经过抽样和计算得到闪烁体两端 PMT 脉冲幅度 ADC 和时间信息 TDC. 这里只考虑的闪烁体的本征分辨, 没有考虑其他因素引起的的时间晃动, 比如对撞时间的不确定性, 对撞束的长度引起的不确定性, 以及电子学时间测量的不确定性等等。图 6 为 1GeV/c 电子垂直入射闪烁体中间 ( $z = 0$ ) 时, 前端和后端的 TDC, ADC 分布以及 time-walk 效应 ( $T: 1/\sqrt{Q}$ ) 散点图。得到的单端时间分辨率为 121ps 左右, 双端的时间分辨率约为 86ps, 与 TOF 本征时间分辨率的设计指标 80ps 基本吻合。图 7 为不同粒子的飞行速度  $\beta$  随动量变化的散点图。

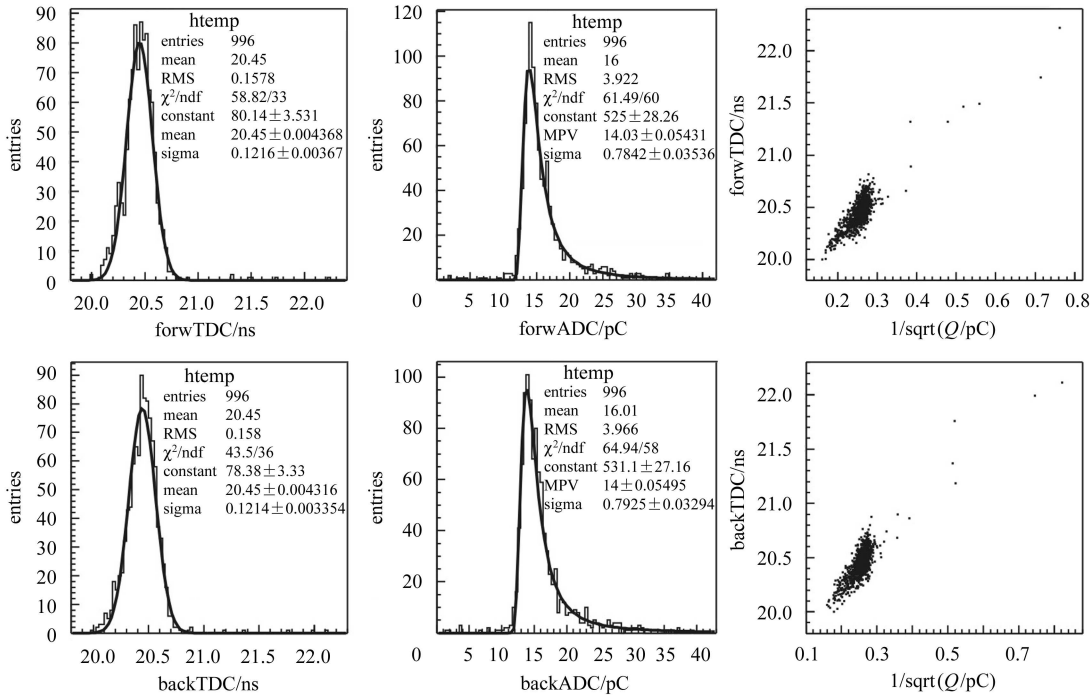


图 6 TOF 的 TDC, ADC 分布和 time-walk 效应

### 3.4 电磁量能器

量能器的数字化部分记录了粒子在每块晶体上的总能量沉积, 图 8 显示了 1GeV/c 的  $\pi$  和 e 在量能器里沉积能量的分布。

另外, 量能器的数字化部分还加入了电子学的模拟。如图 9 所示, 通过拉普拉斯变换计算出 CsI 晶体

信号经过前放、主放后的波形, 并模拟 Flash ADC 的采样和寻峰, 从而得到跟硬件设计上一致的幅度和时间信息。模拟主放大器的输出波形, 不仅可以模拟 BESIII 量能器独有的时间测量, 还为加入电子学噪声和束流本底提供了一条新的途径。图 10 为在主放输出波形的每个采样点上加入 0.5MeV 噪声后, 经过重建得到的不同入射能量光子的能量分辨率。

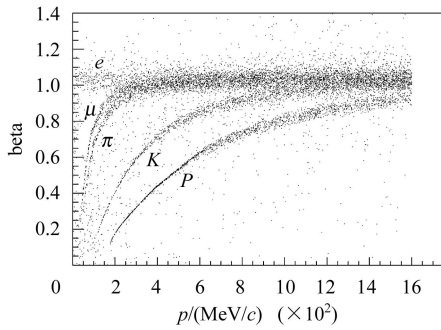


图7 粒子飞行速度和动量的关系

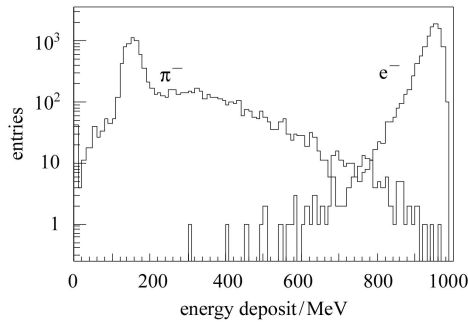
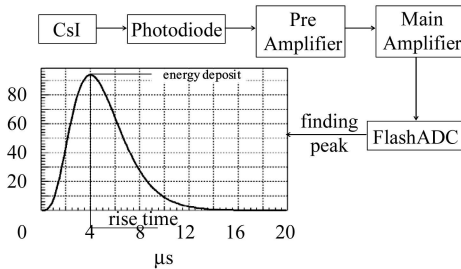
图8 1GeV/c的 $\pi$ 和 $e$ 在量能器里沉积能量的分布

图9 量能器电子学模拟流程图

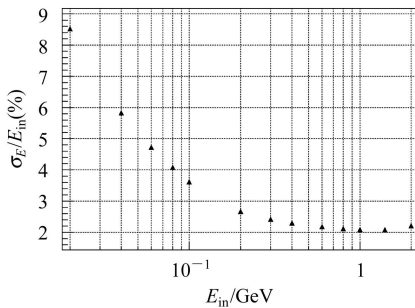
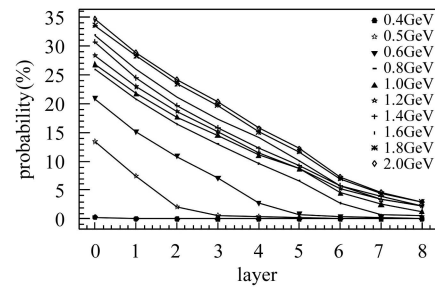
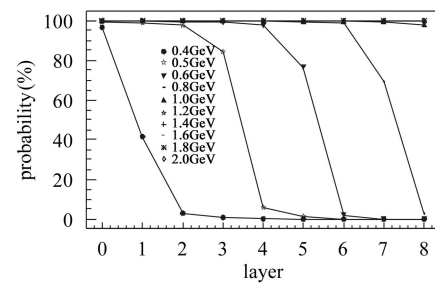


图10 量能器能量分辨率

### 3.5 $\mu$ 鉴别器

图11和图12分别为不同动量的 $\pi/\mu$ 粒子在不同 $\mu$ 探测器层中的穿透几率. 可以看出, 动量低于0.4GeV的 $\pi$ 介子基本上无法到达 $\mu$ 探测器, 当动量大于或等

于0.8GeV时,  $\pi$ 介子穿透 $\mu$ 探测器第0—3层的几率已基本大于14%. 由对撞点产生的 $\mu$ 子, 当动量高于0.5GeV时, 穿过 $\mu$ 探测器的层数在3层以上, 且效率都在97%以上.

图11  $\pi$ 介子在 $\mu$ 鉴别器中的穿透几率图12  $\mu$ 子在 $\mu$ 鉴别器中的穿透几率

## 4 进一步的工作

虽然BESIII模拟已经取得了很大的进展, 但是还有很多需要进一步完善的地方. 1T均匀磁场应该由更接近于真实分布的磁场来代替. 内存泄漏和模拟速度方面还有待于进一步优化. raw data和MC truth信息均需由ASCII码转为二进制输出. 噪声和本底也应该纳入考虑范围之内. 物理相互作用, 探测器响应方面都需要通过与束流实验 (beam test) 结果和物理实验数据对比来验证模拟的准确性.

## 5 总结

面向对象的BESIII探测器模拟已经完成了探测器构建, 产生子, MC truth和简单的探测器响应(数字化), 以ASCII码格式输出的MC数据已经能满足重建软件开发的需求. 各个子探测器的模拟结果都基本合理, 进一步的改进与优化工作正在进行当中.

## 参考文献(References)

- 1 BAI J Z et al(BES Collab.). Nucl. Instrum. and Methods, 2001, **A458**: 627
- 2 Ablikim M et al(BES Collab.). BES II Detector Simulation, to be Appeared in Nucl. Instrum. and Methods
- 3 CERN Program Library Long Writeup W5013. CERN, 1993
- 4 BESIII Design Report. Interior Document in Institute of High Energy Physics, 2004. (in Chinese) <http://epc.ihep.ac.cn/epc/design> (BESIII 设计报告. 高能物理研究所内部资料, 2004)
- 5 Agostinelli S et al(Geant4 Collab.). Nucl. Instrum. and Methods, 2003, **A506**: 250. <http://geant4.web.cern.ch/geant4>
- 6 DENG Zi-Yan. BESIII Simulation Status. BES Annual Meeting Report, 2005 (in Chinese) (邓子艳. BESIII Simulation Status. BES 年会报告, 2005)
- 7 [http://dino.ip.fmph.uniba.sk/pythia\\_html3/node37.html](http://dino.ip.fmph.uniba.sk/pythia_html3/node37.html)
- 8 CHEN J C et al. Phys. Rev., 2002, **D62**: 034003
- 9 <http://gdml.web.cern.ch/GDML/>
- 10 LI Wei-Dong. BESIII Software: Overview, Status and Plan. BES Interior Report, 2005 (in Chinese) (李卫东. BESIII Software: Overview, Status and Plan. BES 内部报告, 2005)
- 11 <http://lhcb-comp.web.cern.ch/lhcb-comp/Frameworks/Gaud>

## Object-Oriented BESIII Detector Simulation System

DENG Zi-Yan<sup>1,1)</sup> CAO Guo-Fu<sup>1</sup> FU Cheng-Dong<sup>1</sup> HE Miao<sup>1</sup> LIU Huai-Min<sup>1</sup> MAO Ya-Jun<sup>3</sup>  
 XIA Yu<sup>2</sup> YOU Zheng-Yun<sup>3</sup> YUAN Ye<sup>1</sup> TANG Rui<sup>2</sup> LIU Ying-Jie<sup>1</sup> MA Qiu-Mei<sup>1</sup>  
 MA Xiang<sup>1</sup> WANG Da-Yong<sup>1</sup> MAO Ze-Pu<sup>1</sup> WEN Shuo-Ping<sup>1</sup> WANG Zhe<sup>1</sup>  
 LI Wei-Dong<sup>1</sup> ZHANG Chang-Chun<sup>1</sup> QIU Jin-Fa<sup>1</sup> ZHANG Xue-Yao<sup>4</sup>  
 ZHANG Xiao-Mei<sup>1</sup> ZHANG Yao<sup>4</sup> ZHENG Zhi<sup>1</sup> YU Guo-Wei<sup>1</sup>  
 HUANG Xing-Tao<sup>4</sup> JIANG Lin-Li<sup>5</sup> ZANG Shi-Lei<sup>1</sup>

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (Hunan University, Changsha 410082, China)

3 (Peking University, Beijing 100871, China)

4 (Shandong University, Jinan 250100, China)

5 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** An Object-Oriented Monte Carlo program BOOST based on Geant4 toolkit has been developed for BESIII detector simulation. It describes the full BESIII detector geometry and records hit information in sub-detectors. BOOST outputs raw data and MC truth information in an ASCII file for reconstruction and physics analysis, and preliminary results show that BOOST simulation is reasonable.

**Key words** BESIII detector, simulation, Geant4