p-p不同质心系能量下碰撞的蒙特卡洛模拟

一、实验背景和目的

（一）、高能核碰撞输运模型的模拟

相对论性核碰撞的理论研究大致可以划分为5支：

1. 有效场论方法
2. 统计（热）模型
3. 流体力学方法
4. 夸克重组模型
5. 输运模型

本次交叉物理实验主要学习与应用输运模型。

高能核碰撞输运模型的模拟可以归纳为两种方法，一种是时间步长法，也叫直接跟踪法，另一种是碰撞表法。直接跟踪法是指自始至终地跟踪粒子，在时间步长内，粒子会在一定的轨道内运动，时间步长终止的时刻，粒子会按一定的规律发生碰撞，如此反复，直到最后的时刻，然后按照这样的规律跟踪粒子做出统计分析，得到所需的物理结果，与实验结果相比较。

碰撞表法没有时间步长，以建立碰撞表的方式研究问题。根据粒子运动学，计算出所有可能的粒子-粒子碰撞对所需的碰撞时间，然后建立由粒子标志和粒子碰撞时间构成的碰撞表，从碰撞表中挑选出最小碰撞时间和与之相对应的粒子碰撞对，令所有粒子按轨道运动，从上一次碰撞时刻到挑选出的最小碰撞时间，执行碰撞过程，更新碰撞表后继续挑选出新的碰撞时间，如此反复，直到碰撞表空了为止，这也是粒子间无相互作用的时刻，也称之为冻结时刻。根据此时的粒子状态做统计分析，求得所需的物理结果。

（二）、PYTHIA 模型简介

迄今高能基本粒子碰撞物理模拟的两大模型是HERWIG和PYTHIA.两者所含的物理内容、物理的模型化、数字化和模拟技巧大致相同，区别多在细节上。PYTHIA模型既可描述高能强子-强子（如p+p等）碰撞，也可描述高能轻子-轻子（如𝑒^+ 𝑒^−湮灭等）和轻子-强子（如e+p等）碰撞。

PYTHIA模型的发展历程：

1、PYTHIA以JETSET模型为前身，其核心是Lund弦碎裂模型

2、80年代，引入末态部分子簇射

3、后加入初态部分子簇射和多次相互作用

4、1996年，JETSET7.4与PYTHIA5.7合并

5、2006年，更新至PYTHIA6.4

6、PYTHIA8.2从Fortran更新至C++

（三）、PACIAE 模型简介

PACIAE模型的发展历程：

部分子-强子级联模型PACIAE，最初是建立在JETSET7.4和PYTHIA5.7之上的，随着PYTHIA模型更新到PYTHIA6.4,PACIAE模型也更新到了PACIAE2.0，现在最新版本为PACIAE2.3。

PACIAE模型把核-核碰撞分为四个阶段描述：

1、部分子初始化 2、部分子再散射

3、强子化 4、强子再散射

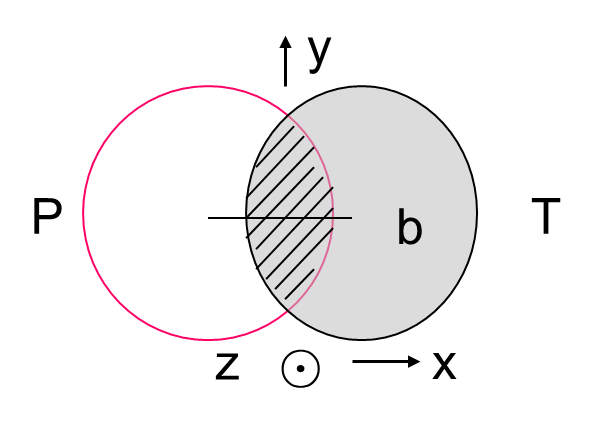
PACIAE模型与PYTHIA模型相比，仅仅是多了部分子再散射和强子再散射。

1. PACIAE 模型理论介绍

（一）、部分子初始化

根据碰撞几何的分布情况，布置核子，给定核子的初始坐标和动量，建立初始粒子表。

参加者核子与旁观者核子：两碰撞核的坐标空间会形成一个几何交叠区；落在交叠区内的核子称为几何参加者核子，否则称为旁观者核子。



几何参加者核子数和几何旁观者核子数满足以下关系式：



对中心度和碰撞参数进行抽样：实验上，中心度用特定截断的粒子多重数与总多重数比值a表示，这也是相应几何截面与总几何截面的比值。理论上，中心度a用碰撞参数b表示，有如下关系：



碰撞实验总是在一定的中心度间隔内进行，由a与b的关系可知，碰撞参数也应在一定间隔 内随机抽取，其抽样表达式为：



其中是[0,1]内的随机数，碰撞参数b在随机抽样下就在内分布，然后用这N个碰撞参数模拟产生N个核-核碰撞事件，反复产生N个碰撞参数，直到达到所需的事件总数。

现在用几何方法表示核A和核B的几何参加者核子数和：





其中



是核密度参数。

参加者核子数除了几何方法以外也可以用Glauber模型计算：





其中，第一个等号表示A+B碰撞。第二个等号表示A+A碰撞，是核子核子碰撞非弹性总截面，是核厚度函数，表示如下：



在得到几何交叠区和参加者核子数以后，参加者核子先是球均匀地分布在核子所在的核内，核子位置可以通过随机抽取得到，要求参加者核子位置(x,y,z)必须落在几何交叠区内，而旁观者方位角和极角按均匀分布抽样，径向分布按照秋Wood-Saxon分布抽样[15]：



其中R为核半径，d为参数，抽得的旁观者核子位置(x,y,z)还必须位于几何交叠区之外。

考虑了核子的初始坐标以后，需要给定核子的初始动量。在考虑打靶问题时，固定核靶核子的初始动量设置为0，射弹核核子的初始动量设置为束流动量；在考虑对撞问题时，两对撞核核子的初始动量可以设置为大小相同、方向相反的束流动量。在得到核子的初始坐标和初始动量后可以建立如下初始核子表（示意图）：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 粒子的序号 | 三坐标 | 四动量 |
|  |  |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
|  |  |  |

部分子初始化还需要建立碰撞表，这就需要计算核子碰撞对的碰撞时间，碰撞时间与粒子对两粒子间的最小逼近距离D有关，D需要满足以下条件：



其中，为粒子-粒子碰撞的总截面。由于因果律，粒子碰撞时间满足：



其中为上一次碰撞时两粒子的时间，（10）式和（11）式正是粒子-粒子碰撞的判据。最小逼近距离对应的时间就是碰撞时间，有了碰撞时间就可以排列所有碰撞对及对应的碰撞时间，构成如下所示的碰撞表：

|  |  |
| --- | --- |
| 碰撞对的序号 | 碰撞时间（秒） |
|  |  |
|  |  |

（二）、部分子再散射

接下来按照pQCD（微扰量子色动力学），执行部分子的碰撞过程，实现部分子再散射。部分子间的9种末态不含光子的散射过程：



式中，不同脚标代表不同的味，(4)、(6)、(7)过程为非弹性碰撞，其他为弹性碰撞。 碰撞过程的最低阶微扰色动力学微分截面可以表示如下：



其中，K是高阶微扰和非微扰效应的修正因子。对于一个给定的入射道，对所有出射道求和，得此入射道的总截面：



知道了碰撞过程的总截面和微分截面，就可以模拟部分子-部分子碰撞。

若一确定的部分子-部分子碰撞初态可以有几种部分子末态，则某一确定末态的相对概率：



非弹性部分子-部分子散射中，散射后夸克味可由以下比例式确定：



上式中是输入参数，它们的缺损值为

（三）、强子化

实现部分子的再散射以后就是强子化过程，PACIAE模型的强子化有两种机制可以选择，一个是Lund弦碎裂机制，另一个是重组合模型，Lund弦碎裂机制的核心思想如下：一对正反夸克对离得比较远时，它们之间会形成一个色场，类似于“一根弦”，新的正反夸克对会在色场中激发出来，激发出的可能会与结合成介子，也可能与接下来激发出的中的结合形成介子，如此迭代下去，直到能量不足以激发出新的正反夸克对为止。当正反夸克对以双夸克或双反夸克替代时，类似的弦碎裂机制正是产生重子的关键。在碎裂中产生的正反夸克对对味的选择与色场中的量子隧穿效应有关，正反夸克对的产生概率由下式决定：



其中，为弦张量，m和分别是正反夸克对中夸克的质量和横动量。弦碎裂模型对奇异夸克这样的重味夸克的产生有压低效应，这表现在各味夸克的产生概率比：



上式中的就是奇异夸克s的压低因子，其缺省值为0.3。而比粲夸克c更重的夸克一般不能通过弦碎裂机制产生。只能在硬散射和初末态部分子簇射的过程之中。增大有效弦张量进而减少奇异夸克压低，此机制中假设有效弦张量随胶子的数目和硬度的增大而增大

（四）、强子再散射

1. 建立强子碰撞时间列表

2. 用同位旋平均参数化的强子-强子碰撞截面，执行强子2➡2的碰撞过程

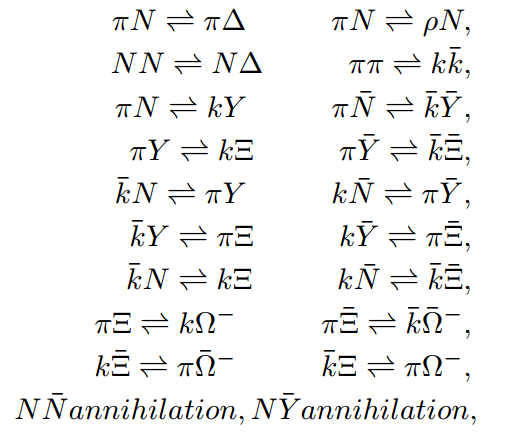
模型中假设：RHIC能区的总截面为： ，LHC能区为：



模型还假设非弹性截面与总截面的比为：0.85，最后假设：



强子-强子碰撞的非弹性道数目太多，PACIAE模型仅考虑如下非弹性道，要决定是哪个散射道由各道的相对概率随机抽样决定。



1. PACIAE2.2程序包
2. PACIAE2.2有3个程序包，其中，PACIAE2.2a用于描述高能基本粒子碰撞，如pp碰撞，而PACIAE2.2b和PACIAE2.2c用于描述高能质子-核碰撞与核-核碰撞；
3. 每一个程序包的强子化都有2个程序，以PACIAE2.2a为例，sfm\_22a.f用的是Lund弦碎裂机制进行强子化，而coales\_22a.f用的是重组合模型进行强子化；
4. PACIAE2.2c与PACIAE2.2b相比的不同之处：主要是拓扑结构不同。PACIAE2.2b是在碰撞表未空的情况下，继续后面的过程，强子化后强子再散射后更新碰撞表，又从部分子再散射开始循环，直到部分子空了为止，这才完成一次碰撞事件；而PACIAE2.2c则是直接通过部分子再散射更新碰撞表，直到碰撞表空了以后，再执行后面的流程，完成强子化后强子再散射即为一次碰撞事件。
5. PACIAE2.2a程序包包含以下程序：

main\_22a.f，parcas\_22a.f，sfm\_22a.f，coales\_22a.f，hadcas\_22a.f，p22a.f和usux.dat：

(1) main\_22a.f：得到部分子初态；

(2) parcas\_22a.f：部分子再散射；

(3) sfm\_22a.f：Lund弦碎裂机制进行强子化，

(4)coales\_22a.f：重组合模型进行强子化；

(5) hadcas\_22a.f：强子化后的强子再散射；

(6) p22a.f：与PYTHIA6.4不同的是，这里初始末态强子的 p\_𝑥,𝑝\_𝑦使用的是二维高斯分布抽样；

(7) usux.dat：输入文件样本。

5. PACIAE2.2b程序包包含以下程序：

main\_22b.f，parini\_22b.f，sfm\_22b.f，coales\_22b.f，hadcas\_22b.f，p22b.f和usu.dat

PACIAE2.2c的程序包包含程序的内容大致相同，但也有区别。

PACIAE2.2b程序包里的程序：

main\_22b.f：用户主程序；

parini\_22b.f：管理和产生一个核-核（A+B）碰撞事件，包含坐标和动量空间的初始化、建立初始碰撞表、从碰撞表中选出最小碰撞时间的碰撞对进行散射、部分子再散射；

sfm\_22b.f和coales\_22b.f同PACIAE2.2a；

p22b.f：在PACIAE2.2a的基础上增加了弦碎裂中电荷守恒的严格处理；hadcas\_22b.f：强子化后的强子再散射；

usu.dat：输入文件样本。

6. PACIAE2.2c与PACIAE2.2b相比的不同之处：主要是拓扑结构不同。PACIAE2.2b是在碰撞表未空的情况下，继续后面的过程，强子化后强子再散射后更新碰撞表；而PACIAE2.2c则是直接通过部分子再散射更新碰撞表，直到碰撞表空了以后，再执行后面的流程。

1. 程序成果展示

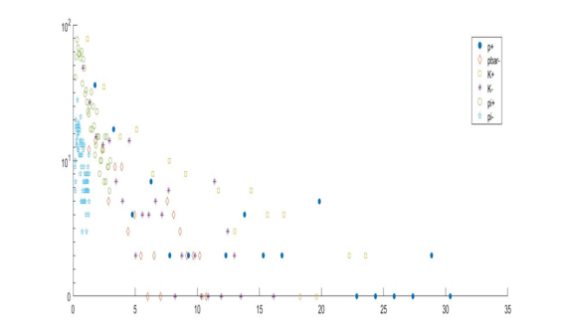
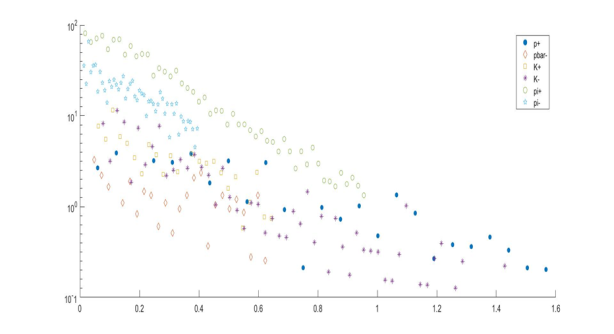
运用PACIAE模型模拟p-p碰撞的末态粒子谱结果展示：主要展示质心系能量为0.9TeV,2.76TeV,5.02TeV,7TeV,8TeV,13TeV下各种末态粒子的横动量、能量、快度、赝快度等物理量分布。

粒子种类： 、 、 、 、 、



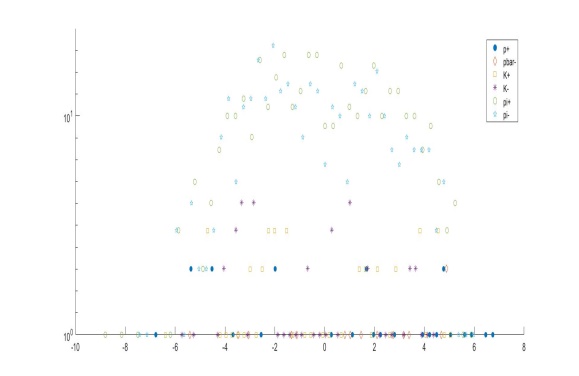
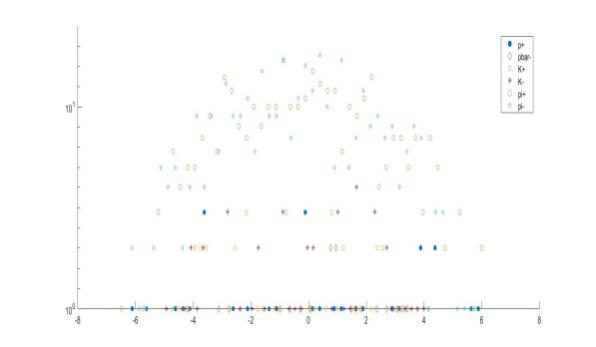
1. 同一质心系能量下不同粒子：

0.9TeV：





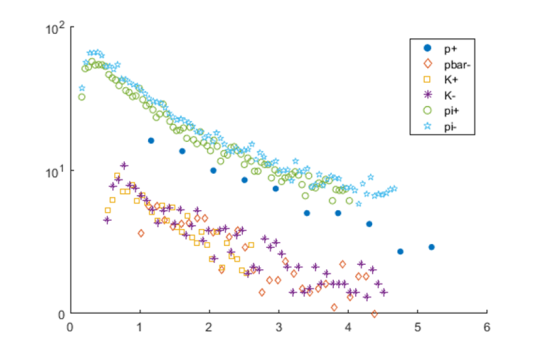
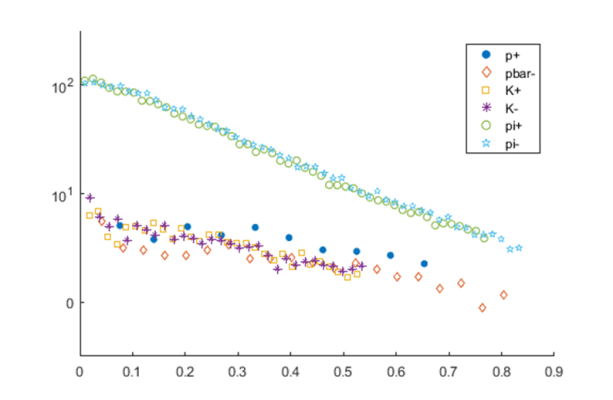
（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）

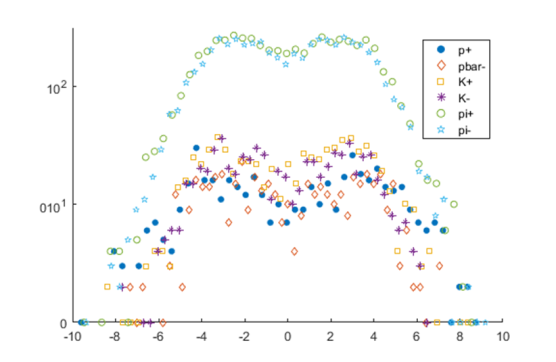
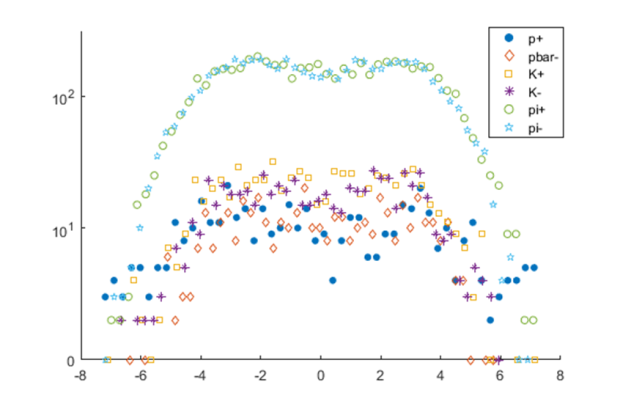


2.76TeV：





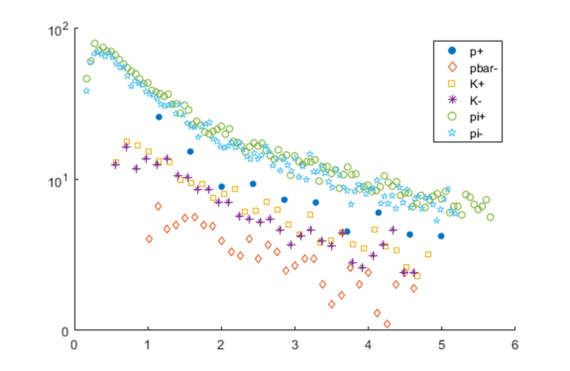
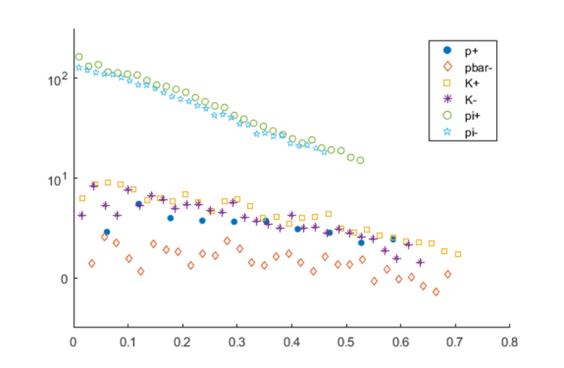
（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）

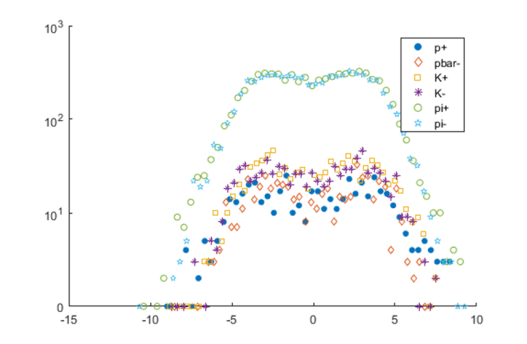
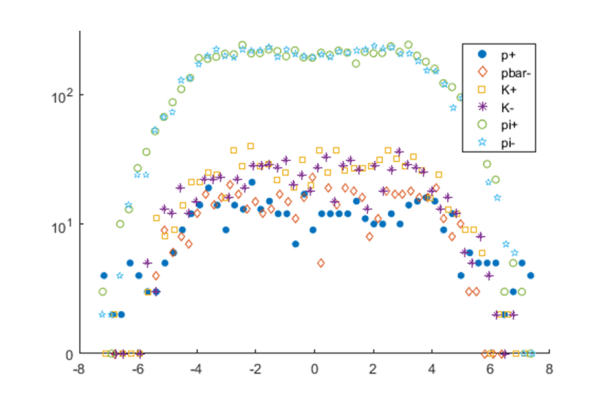


5.02TeV：





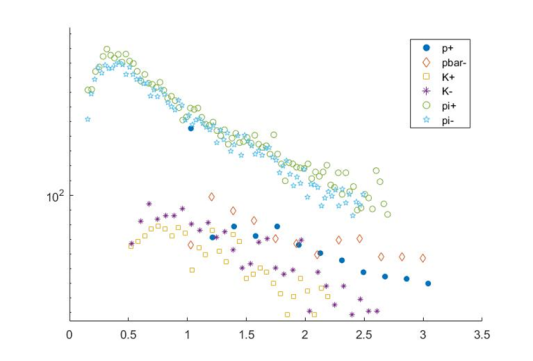
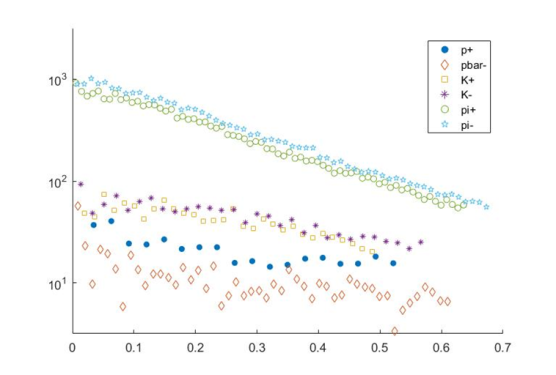
（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）

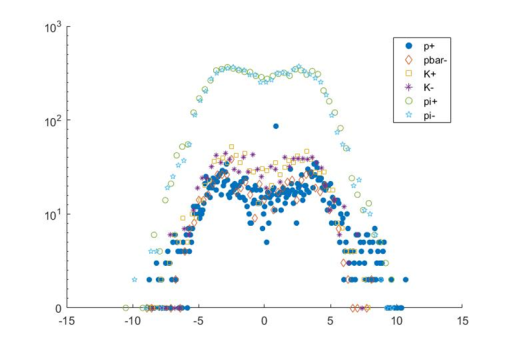
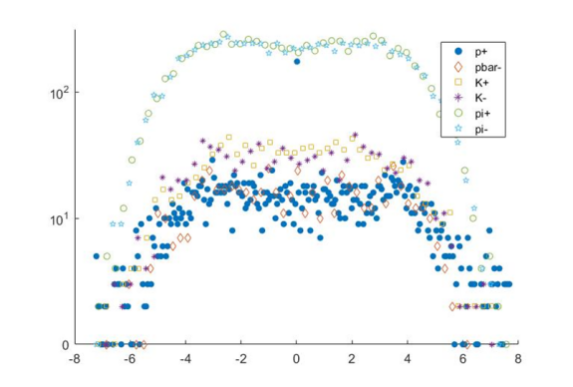


7TeV：





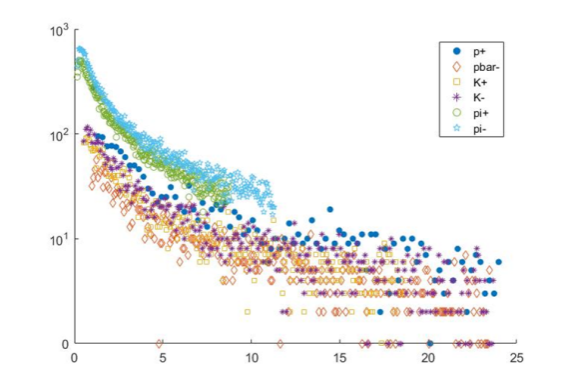
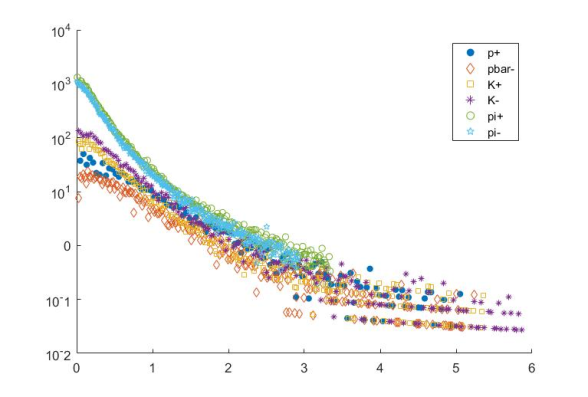
（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）

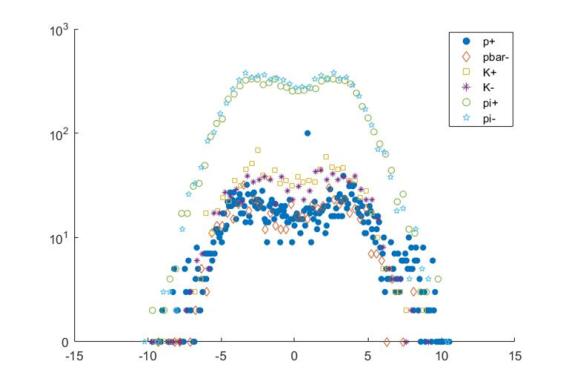
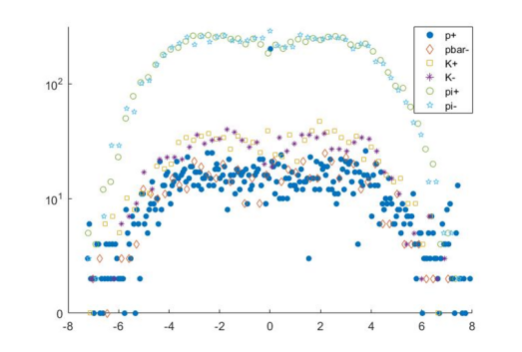


8TeV：





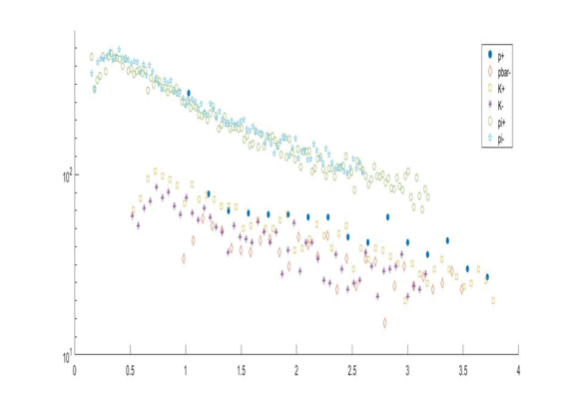
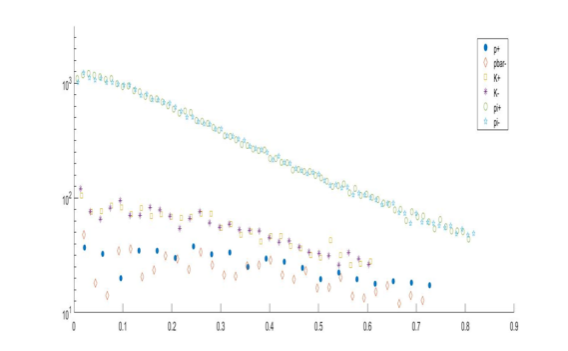
（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）

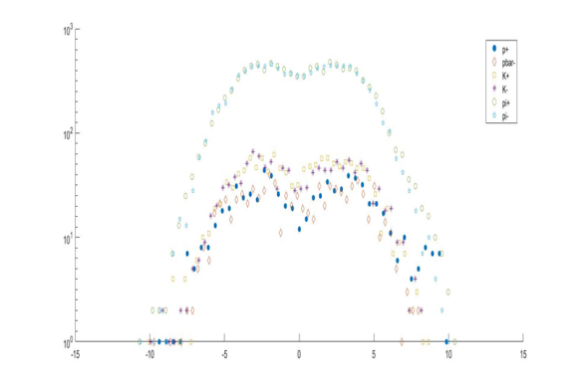
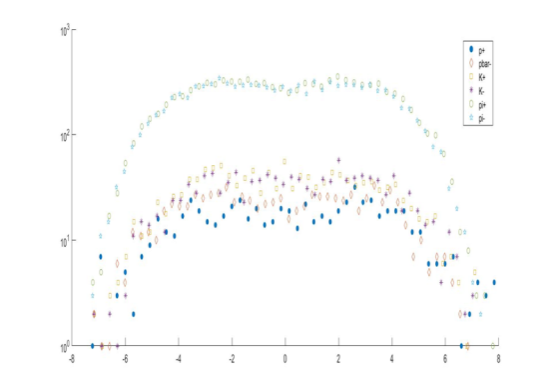


13TeV：





（横动量） E（能量）



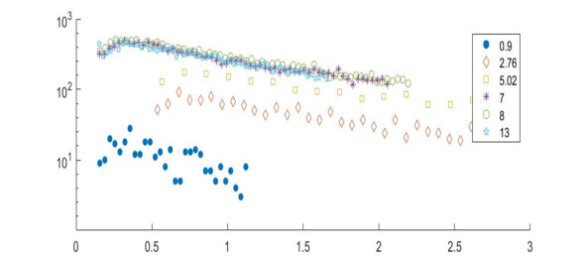
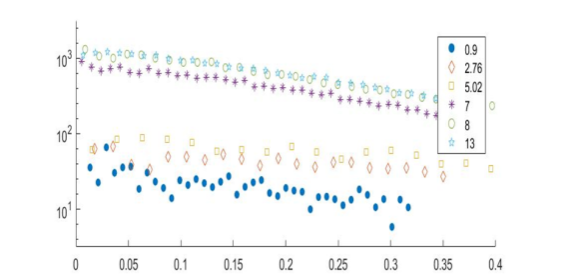
y（快度） （赝快度）



1. 同一粒子不同质心系能量：

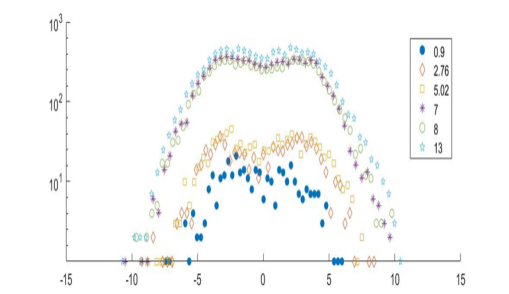
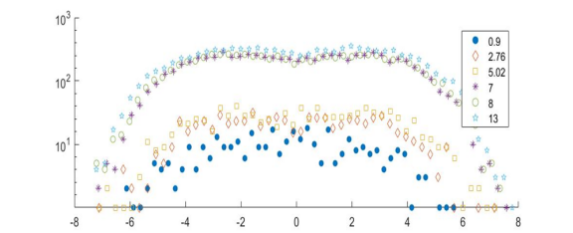
：





（横动量） E（能量）



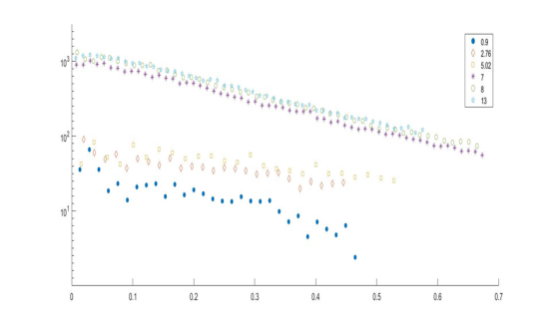
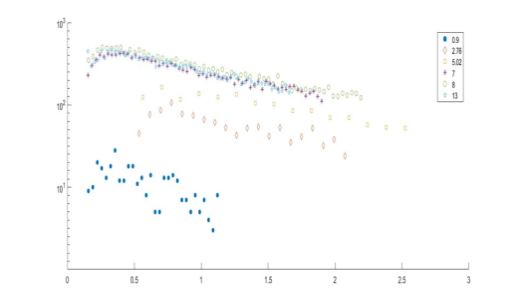


y（快度） （赝快度）



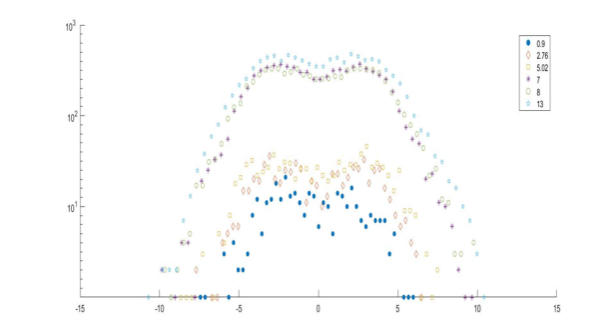
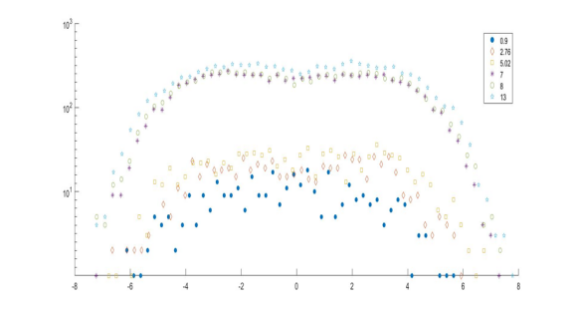
：





（横动量） E（能量）



y（快度） （赝快度）



1. 总结与结论

通过以上结果图像的展示，我们得出p-p碰撞的以下结论：

1. 质心系能量越高，产生同一种类粒子数目越多；
2. 同一质心系能量下，p-p碰撞产生的 、 粒子数目较多



1. PACIAE模型基本上实现了p-p碰撞末态粒子物理特性的描述。

六、总结和收获  
 1. 本次X物理实验需要运用计算机编程实现物理情景的模拟，从中我们可以深刻体会到计算模拟在物理学研究中的重要作用，计算模拟物理随着上世纪计算机的诞生而兴起，虽然没有悠久的历史积淀，但它在当今物理学的研究之中发挥着愈发重要的作用；

2. 通过此次X物理实验的学习，我们在指导老师那里学到了不少关于计算机编程与高能粒子物理的基本知识，小组成员内的合作提高了实习效率，彼此帮助也解决了一些难题，可见，合作学习是比较有效的学习方式。