

使用自动化装置测试 乳胶室的构思

(E. GANSSAUGE 德国马堡大学教授
1992 年 9 月在中科院高能所的讲演)

I. 引言

EMU-01 (EMU 为乳胶英文名的缩写, EMU-01 为 CERN 的研究计划之一) 国际合作组共有 20 多个单位参加, 包含北京, 马堡非力普大学也是其成员。

合作研究的兴趣在于观测超高能核-核碰撞, 特别是寻找夸克胶子等离子体 (QGP) 存在的讯号。QGP 存在与否对于了解物质结构是极其重要的。为此, 许多研究组用不同方法捕捉 QGP。

在普通物质中, 夸克每三个成组, 生存为核子, 密度为 $\sim 10^{-14} \text{GeV/fm}^3$; 在核物质中, 核力束缚着夸克组成的核子, 在核力作用尺度上宏观地生存为原子核, 密度极大地增长达 0.15GeV/fm^3 ; 当超高能重核与重核碰撞, 产生聚变反应, 密度再次增大一个量级以上, 达 $> 2 \text{GeV/fm}^3$, 夸克单个地“自由地”与传递色力的胶子构成等离子状态的 QGP 存在 (见图 1)。这样一种情况可能就是宇宙混沌初开的最初状态。在实验室中创造这一状态的手段是让极高动量的重核 Au, Pb 碰撞。

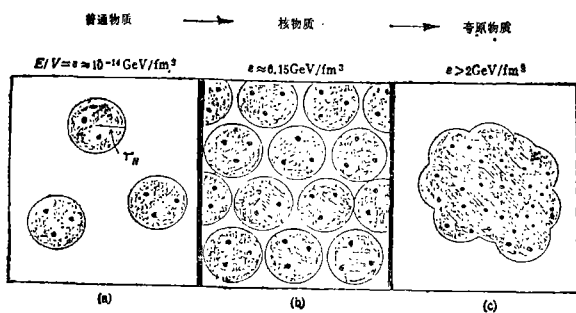


图 1 从普通物质到夸克物质 (a→c 能量递增)

现有加速器最高能量不足以达到创造 QGP 状态所需的能量密度。但是使用 CERN 的新重离子束流 (Pb 60—160 A GeV) 和 BNL/Brookhaven 重离子束流 (Au 10 A GeV), 就可以达到理论预言的过渡到 QGP 的相变。

这一状态的寿命极短, 只可能探测 QGP 的产物。有一系列预言的可能的讯号, 这些讯号显示 QGP 的存在, 还存在各种对不同讯号灵敏的探测方法。方法之一: 乳胶室, EMU-01 合作组使用的核径迹乳胶的新设计, 非常适合于精确的角度测量。

II. 高能核-核碰撞及次级粒子角分布

我们应如何考虑高能核-核碰撞? 在碰撞点射弹核穿透靶核, 区分出反应体和旁观体, 前者发生于重叠部分, 后者或多或少离开碰撞点。

两核重叠部分发生了什么情况?

当两核相互作用时, 它们交换纵向动量, 结果被激发, 产生了所谓“弦”, 并因连续作用变成更加受激的状态。在这一过程中, 两核互相穿透之后, 可以从“反应体中参加碰撞的”核子数之多少, 得到相应程度受激的弦。

随后, 这些弦相互独立地各自在靶核外衰变, 构成强子喷注。喷注所包含的粒子可以借助于适当的仪器探测。在这些探测器内关于碰撞核情况的信息是“准冻结的”。

许多可能的信息源之一, 是这些次级粒子角分布的估算。被测的分布可与模型 (如 LUND 模型) 比较。得到一个显然重要的非统计涨落的新行为, 这行为不能用模型计算解释。可能是个新意, 像是 QGP。

有个非常重要的现象, 叫做“间歇行为”。就是在

$\alpha\text{-Si:H}$ 子层的厚度及结晶完整性之间的关系。

作者的结论是: 采用等离子体增强化学气相沉积法在单反应腔内制备出 $\alpha\text{-Si:H}/\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 多层膜结构样品, 使用连续 Ar^+ 激光扫描辐照, 使 $\alpha\text{-Si:H}$ 阱层晶化。由小角 XRD 及 X-TEM 分析证实晶化后多层膜结构的存在及界面是平整的。其粒晶尺寸由于受 $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 势垒层的限制趋于 $\alpha\text{-Si:H}$ 阱层的厚度。

对于 $L_s = 40 \text{\AA}$, $L_N = 60 \text{\AA}$ 的 $\alpha\text{-Si:H}/\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 多层膜样品的光致发光谱, 作者发现在 630nm (2.0eV) 处存在一可见光发光峰。此结果和理论估算的由量子限制效应引起的晶化硅的有效的带隙宽度值相一致。作者还研究了激光功率变化及激光扫描速度变化对发光峰峰位及 FWHM 的影响; 发现存在一个最佳激光参数范围。(续完)

极小角度内有“间歇参数”，这只有借助于核乳胶才能研究。因为乳胶室的角度分辨本领，比所有已知的计数器实验要好 10 倍。

III. 实验技术：核径迹乳胶室

核径迹乳胶原则上是一种高灵敏的细颗粒照相乳胶，主要由 AgBr 晶体镶嵌在明胶中而成。胶膜厚度 100—600 μm 。

当一个带电粒子穿过乳胶时，引起其路径上晶体核的电离。因此，在穿过点上留下一潜象，这潜象在乳胶显影处理后表现为一暗点，暗点通过显微镜观测，在其它本底上显出视野里的一黑点。黑点的大小和黑度，含有穿过粒子的电荷和能量的特征。

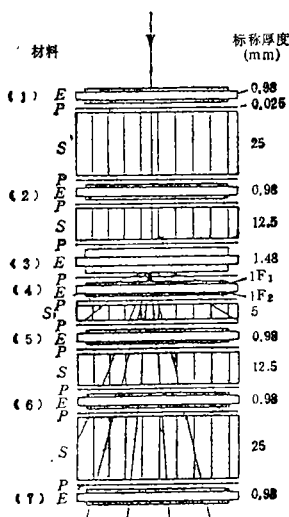


图 2 乳胶室的标准模式(文中讨论的乳胶室与本图略异;第二乳胶片之前的靶箔顶替本图中第三乳胶片的靶功能)。E. 乳胶片; P. 纸; S. 泡沫塑料; F. 界面。

我们的乳胶室(图 2)包含 7 个片两面涂胶的塑料片，第二片(顺束流方向编号)前有一靶片——厚度为 100 μm 的金或铅箔。

乳胶室垂直于束流照射，各乳胶片固定于距靶一定距离的位置上，图 3 表示次级粒子如何从作用点(称为顶点)喷射出来。这使某片上太靠近的分辨不开的两个粒子，在随后的片上可分辨开来。

使用这一种装置，可获得粒子发射角的极好的空间分辨率，这在计数器实验中无法达到。

IV. 乳胶片的信息获取

照射并处理过的乳胶片用手工测量计算，即科学家在显微镜下观察片子并把黑点定位(见图 4)，它们的坐标用一数字化仪记录并贮存于与它联接的计算机中。计算机支援显微镜前的科学家，它计算次层或次片要测量的径迹点的位置，这样科学家立即知道物镜应往何方移动，以测量下一点的坐标。

这工作极端耗费时间，这就是乳胶技术迄今的缺点。一个约有 400 个次级粒子的事例，需要 10—20 小时才能完成测量。这已是使用半自动测量方法的上限。而且这种方法使长时间工作于显微镜前的科学家疲惫不堪。

单个片子上的黑点，不包含关于碰撞过程的任何信息细节，只有当你正确地连接测量点并重建各单个径迹时，才能测有所获，这显然需要一个高水平的软件，寻找顶点并重建单个径迹。

如开头所述，我们计划研究高能 Pb-Pb 和 Au-Au 碰撞，用 LUND 模型模拟表明，可以期待有 2000 个次级粒子(图 5)。按已知的测量耗时情况，并假定仍工作于高多重数事例，你总得用 50—100 小时的测量来结束每个事例。显然，迄今所用的方法对于获取乳胶片中的信息并不适用。

显而易见，需要一个自动化系统来定位空间里的点。商业装置尚不能用，我们只得自己建造这样一个系统。

V. 马堡的自动分析系统

图 6 是我们系统的框图，各个部件有下述的特性及功能：

(1) 显微镜：

Marzhauser MCC 13 式载物台，安装于 LEITZ Otholux 显微镜上。借助于三个步进马达，使乳胶片在 XY 方向以每步 0.25 μm 移动，Z 方向以 0.02 μm 的步长移动。控制单元为 PC/AT386 (DOS5.0)。如果

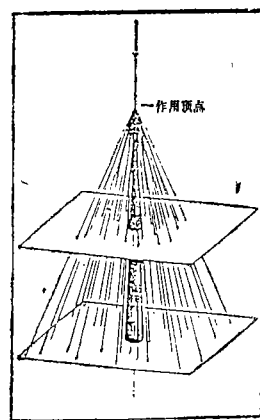


图 3 簇射粒子锥的示意图。借助锥的数学重建寻找作用顶点。计算的数据是各单个乳胶层中黑点的坐标。

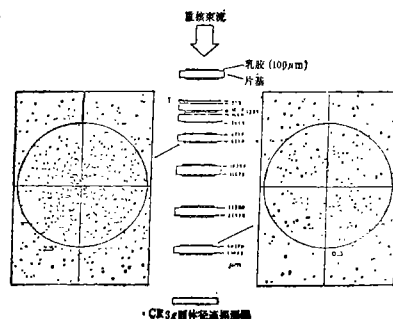


图 4 显微镜的不同视野所能见到的簇射粒子落点分布示意图。

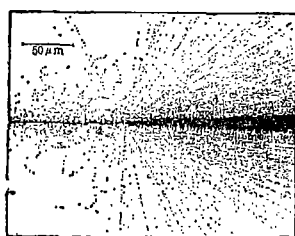


图5 典型的高多重数“事例” $n_s \approx 2000$ (Pb + Ag 60AGeV Fritiof 模拟), 图示为水平照射的迭中的模拟“星”。

需要,可以手工控制。马达的步频约为4赫。

(2) 摄像

显微镜的顶上有一 CCD 电视摄像机 (SONY AVC-D7CE 黑白, 分辨本领 756×581 象素) 的适配器。摄像机记录核乳胶里的图象并分割为小相元 (象素)。摄像机由半导体光敏元件组成, 与传统像机相比, 其优点在于紧凑, 低价以及对光极端灵敏。

(3) 图象处理器

来自摄像机 (RGB-视频讯号) 的模拟讯号, 借助于视频讯号处理板 (连接于标准 SCSI-接口) 被数字化为 256 个灰度值。这能够实时地对图象进行处理 (每秒 25 帧)。视频讯号处理板包含 1MB 的视频存储器 (可能达到 8MB)。C 语言编写的软件也可以对数字化图象进行处理。

数字化后, 图象在视频存储器中可以进一步得到改善, 如减少本底并贮存感兴趣的点的坐标。设置适当的灰度阈值, 并可能从实质上压缩数据量。

(4) 控制计算机与中心计算机 (主机)

控制步进马达以及定位乳胶片由 PC-AT386 来完成。PC-AT386 把达到的位置转换成讯号送往主计算机。

主计算机 [VAX 工作站 VLC4000, VAX/VMS 5.5, (16MB RAM, 121MB 硬盘, SCSI 接口)] 的任务是监控步进马达、图象记录以及数据管理, 而且它担负着计算及重建径迹的职责。

(5) 空间分辨、存贮和系统的工作时间

乳胶含有平均直径为 $0.6 \mu\text{m}$ 的细颗粒。带电粒子平均电离 4 个颗粒。这告诉我们, 分辨两颗粒需要

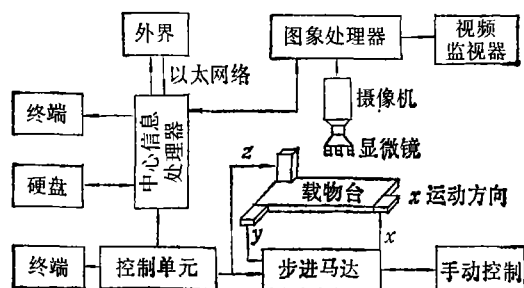


图6 基于 CCD 摄像机的全自动系统的框图

表1 图象分析系统各使用部件汇总

组成部分:	
显微镜	Leitz Ortholux (显微镜台) 不同透镜($5\times, 100\times$)
置位单元	
(a) 马达	Marzheuser MCC-13Js 步长 XY $0.25 \mu\text{m}$, Z $0.02 \mu\text{m}$)
(b) 控制单元	PC-AT386(DOS5.0) 2MB RAM, 44MB Harddisk 马达驱动软件以 C 语言写
CCD 视频摄像机	SONY AVC-D7CE 黑白 756×581 象素 C Mount-adapter
中心处理器	VAX 工作站 VLC 4000 操作系统 VAX/VMS 16MB RAM 121MB 硬盘 SCSI 接口
图象处理器	DASM-FGM 256 灰度级 连接至标准 SCSI-BUS RGB-视频讯号, 实时操作 (25 象/秒) 1MB Video RAM (可能 8MB) C-软件 用于管理数字

分辨 $\sim 1 \mu\text{m}$ 量级的分辨本领, 倘用 $22\times$ 物镜与 512×480 象素的数字化图象, 这一分辨本领是可以达到的。

为估算所需贮存量, 我们设想一个事例有 2000 条径迹, 各自穿过 8 层乳胶膜界面, 那么每事例约有 10000 图象点需记录, 相应于 $\sim 10\text{KB}$ 数据数字化于 256 灰度级。

图象处理器的图象传输得相当快。它能够每秒记录 25 帧图象, 削减本底也完成得很快。

通过高速度 SCSI 总线, 输送数据给中心计算机。它允许数据传输率高达 4MB/秒 。

载物台到达次一位置需时 $1/4$ 秒, 这意味着象处理的速度充足有余。

假定测量一个事例所用时间不超过 1 小时。在这种方案下, 自动化系统不仅使高多重事例的测算成为可能, 而且需要的时间惊人地少。

照射时并不让整个乳胶室接受束流, 而是分步地, 仅让四个照射斑对称地分布于乳胶片上, 有效的照射面积为 $\approx 12\text{cm}^2$ 。

束流密度为 500 粒子/ $\text{cm}^2/\text{斑}$, 大约 $12 \times 500 = 6000$ 条初级径迹应当被记录。当然 6000 中仅有 40 条预期属于非弹性作用的。

簇射粒子中的某径迹由一串串银颗粒组成 (大小约 $0.6 \mu\text{m}$), 无规地分布于粒子的路径上。银颗粒的密度约为 24 颗/ $100 \mu\text{m}$ 。考虑径迹的一幅照片, 设该照片有 100 个粒子穿过, 照片中仅有 25 条径迹将以

说的颗粒出现。

但将有大量与我们所感兴趣的事例无关的本底锐颗粒。现实的数字是：上面考虑的核径迹照片中，这种类型的颗粒有 1000，即有一极不利的讯噪比约为 0.025，这是我们的出发点。

在手工操作测试系统中，这些关键的步骤，是由无法逾越的人眼与脑的“图象识别系统”来担负。在一个固定的视野中无法得知哪个颗粒是所感兴趣的径迹。当往上或往下聚焦时，所看见径迹是运动的点，取向一个共同点，甚至有某些畸变（所有径迹以相同形式畸变）与极重的本底时，也是这样。我们的任务是寻求由计算机控制的有类似功能的测量系统。

VI. 自动化测量过程如何进行

我们从 No.1 乳胶片（在靶的上游方向）开始，寻找并定位某些初级径迹，这些初始径迹因有电离密度很易鉴别。束流方向垂直于乳胶片的表面， X 和 Y 坐标能很精细测量，以这种方法我们得到束流粒子空间坐标的数据表。这数据在整个径迹测量过程中作为参考坐标系。

在第二片中寻找非弹性反应顶点（所谓“星”）可简化为：它们仅出现于有第一片记录着的初级径迹的点上，这就可观地节省了测量星点的时间。

为确定顶点，特别有意义的是测量若干大角而不是后向发射的径迹，因为我们局限于测量发射角 $\theta < 30^\circ$ 的径迹。

简而言之：

A) 借助以下 1), 2) 测算核作用顶点坐标

1) 在靶前测量初级束流的坐标

2) 在靶的下游乳胶片中测量大角径迹的坐标

B) 作畸变坐标关系 $X(z)$, $Y(z)$ 图，并计算畸变函数。（见图 7）

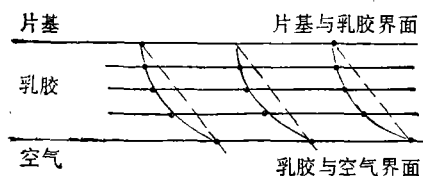


图 7 由最小二乘法拟合测量点 $X(z)$, $Y(z)$ 得到的畸变函数

这意味着：一个极重要的应考虑的问题是计算畸变函数 $X(z)$ 和 $Y(z)$ 。然而一粒子的“真实径迹”将是 (X, Y, Z) 。至 (X, Y, Z) 的直线。如在这两点间是弯曲径迹，则乳胶必有畸变。这弯曲的径迹可按最小二乘法计算并送到主计算机贮存。对每片每个视野都需进行这一道工序。

C) 下述 9 步是测量工序的继续（图 8）

1) 抓住作用顶点后第一层的象点 ($Z = Z_0$)。

2) 把象约化到两种极端灰度值上：黑色为 1（聚

焦于颗粒），白色为 0（聚焦于空白处）。介于 0, 1 两值之间的灰度值将是深度的函数，并且在各片乳胶膜之间不须相等（这一步须费相当时间）。

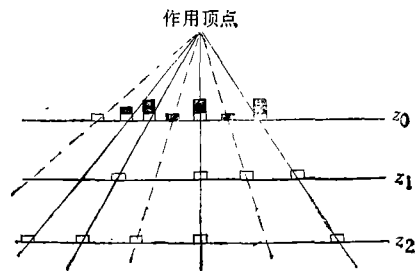


图 8 文中讨论的减少本底方法： Z_0 层的黑斑表示叠加的灰度值，该灰度值应迭加至 ~ 25 ，而本底值显著地小。

3) 把图象贮存于图象存储器中

4) 抓住作用点后第二层的象点 ($Z \neq Z_0$)

5) 使用畸变函数进行坐标变换来补偿畸变

6) 图象坐标必须这样改变：顶点来的径迹即真径迹落入第一层的象素上

7) 把象约化于黑的(1)与白的(0)

8) 把这第二层的坐标添到图象存储器中

9) 重复步骤 4) 至 8)，直到一乳胶平面上的象点（可能 ~ 100 ）都进行到为止。在最优化的情况下，如果一径迹的所有颗粒都落在同一象素上，则能期望从 100 条径迹（按第 5 节）产生一叠加至 25 的灰度值，而本底灰度值在 1 附近。这意味着讯噪比可观地改善了。

事实上，能优化到径迹与本底容易区别开来。

D) 现在用若干乳胶片，借助于高水平的软件从 B) 和 C) 步骤记录的数据，将能完成径迹拟合工作。

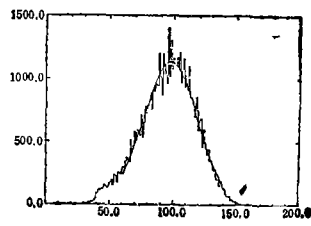
VII. 首批初步结果

图 9—图 12 所示，是若干极初步的结果，说明了减

图 9 200A GeV S + Au 作用星。用 22* 物镜观察的，靶后第一层 ($\Delta Z = 50 \mu\text{m}$) 表面上的径迹。所有灰度值从 255 (白色) 到 0 (黑色)。



图 10 图 9 的灰度值直方图。此处分辨率为 256×240 。其与 22* 物镜搭配的象素大小为 $0.86 \mu\text{m} \times 0.88 \mu\text{m}$ （当使用帧分辨率 512×480 时这分辨率可改善到 $0.43 \mu\text{m} \times 0.44 \mu\text{m}$ ）



永记周培源先生的教诲

秋 埔

一代宗师周培源先生离开我们四个月了,我们依旧深情地思念他。他对我们杂志的关怀,是无法用语言来描述的。在他病重的时候,听说《现代物理知识》创刊五周年,就通过中科院数学部唐廷友先生,送来他的题词:“普及现代物理知识 培育祖国四化人才 周培源 1992年8月28日”。当中科院高能物理所成立20周年时,我们负责主编《所庆增刊》,请先生题词。先生实在无力题词了,便写了封信,表示自己的歉意。内容如下:

由于我现在有病,对高能所成立43周年
更名20周年事,恕我不题词了,请鉴谅。此
复并致
敬礼

周培源 四月十九日

由这件事可见先生是多么平易近人,对别人的请求,事事有着落而不摆领导和科学家的架子。我和大家一样

对先生的高风亮节和卓越的科学成就久已深为敬仰,早就想去拜访他,聆听他的教诲,以便更好地办好《现代物理知识》。然而,这个愿望由于种种原因未能实现,只是在前年朱洪元先生遗体告别仪式上匆匆一见,便再也没看见先生的音容了。当电波传来先生突然去世的消息时,我极为悲痛。我打听到十二月四日是向先生遗体告别的日子,那天早晨我很早就赶到北京医院。我看到先生静静地躺在万花丛中,上面覆盖着鲜红的党旗。我似乎觉得先生并没有死,而是在安详地休息。这时我看见党和国家领导人朱镕基、胡锦涛、荣毅仁、李岚清、李铁映、雷洁琼、卢嘉锡来了,又看见我熟悉的物理学家朱光亚、王淦昌、戴元本、周光召等也站在人群里。过了许久,人们渐渐散去了,吊唁大厅只留下先生的亲属和生前工作人员。我给他们照了许多相,也与他们一样沉浸在无限悲痛之中。先生在世时,未曾如愿长谈,先生去世了,我要送先生到遥远的天边

少本底的方法。

可以看到,以本底为主的灰度值是由半宽度为 $\sigma_{gv} \approx 21$ 、平均值 $\langle gv \rangle \approx 98$ 的正态分布。本底是这样地占压倒优势。从这样的直方图分离出径迹来是无望的。我们只好使用上章讨论的对策。

图11中有许多黑点,主要属于径迹,但若干仍属于需消去的本底。

简而言之,用于此步骤的方法,是图11那种图的



图11 为首次尝试从固定的 Z_0 值取出若干 μm 的薄 Z 层,该层对应于图8中的一水平线。这里仅采用灰度值 $gv = 83 - 85$ 。



图12 灰度值的截断仅取 $gv < 83$,这样再产生图9的极黑部分。

迭加,但取自于不同的 Z 深度。把这些点投影于顶点方向,在 $Z = Z_0$ 的层上,还借助于适宜的阈,把所有代表本底的低值的点截去,真实的径迹理所当然地被分离出来。

VIII. 总结

为用乳胶室研究60 A GeV Pb-Pb作用(CERN 93/94建议书),必须有全自动的图象分析系统。

提出并讨论了这样的系统。各部件的市场价格是合理的,安装与初步调试已经完成,获得了初步结果。

用这种系统,我们能与计数器大实验在一个有限但重要的领域进行竞争。R. Peschansky 强调“若干新近实验信息,让人们间歇现象问题拭目以待”。EMU 01合作组,彻底研究了Au-核作用的间歇现象于小间隔范围揭示出指数律在0.1与0.01间隔上存在问题。……

译后记:

GANSSAUGE 教授长期从事核乳胶实验,研究高能物理与核物理,在各个时期最深层次的研究都独具慧眼与威望。为高分辨本领的核乳胶之观测繁难,GANSSAUGE 教授做了有价值的CCD应用研究,早在1986年就完成了出色的径迹电荷辨认的大作。本文是其新近的杰作,特译出以飨读者。

(艾若译,张英平校)