

STAR 飞行时间探测器和反物质氦核的发现

王 义 李元景

相对论重离子碰撞物理是 20 世纪 70 年代以来形成的一个新的研究领域，其内容是研究在极端条件下的核物质形态，即研究由相对论核-核碰撞所产生的极端高温、高能量密度下核物质的性质，寻找和探测新的核物质相。这种研究对人们了解物质更深层次的性质，对于粒子物理、核物理和有关宇宙形成及演化的研究都有非常重要的意义。目前美国布鲁克海文国家实验室 (BNL) 的相对论重离子对撞机 (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)，是正在运行的高能量的相对论重离子对撞实验，它通过高能核子的对撞，达到产生夸克胶子等离子体 (QGP) 所需的高温、高压和高能量密度。因此，RHIC 是产生高温高密核物质形

态的理想场所，被人们看作是研究宇宙起源和宇宙演化的人工实验室。RHIC 将带电离子 (如金核、氩核和质子等) 加速到很高能量，速度接近光速。从 2000 年运行以来，已得到了 200GeV 能量的 Au+Au 对撞数据，也得到了 200 GeV 能量的 d+Au 和 p+p 的对撞数据。在 RHIC 的四个实验组中，螺旋形径迹探测器 (Solenoidal Tracker at RHIC, STAR) 的鲜明特点是它具有最大的接收度，能测量在重离子对撞中产生的大部分粒子，并能同时测量单个事例的许多物理量。STAR 组可以广泛开展相对论金-金核对撞的实验研究，以探索夸克-胶子等离子体 (Quark Gluon Plasma, QGP) 存在的信号和在能量密度下强作用物质的行为，研究可

能的 QGP 相变及在相应能量下碰撞过程的时间-空间演化的信号，从而获得在夸克和胶子层次上，强子相互作用的微观结构的基本认识。著名物理学家李政道先生是这一物理研究领域的创始人之一，并一直在推动中美在这领域的合作。

STAR 国际合作组由 12 个国家的 59 个研究单位的五百七十多名研究人员组成。中国 STAR 合作组由华中师范大学、山东大学、清华大学、中国科学技术大学、中国科学院近代物理研究所和中国科学院上海应用物理研究所组成。为了提高离子鉴别能力，我们采用多气隙电阻板室 (Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC) 技术建成了 STAR 实验的大型飞行时间探测装置。

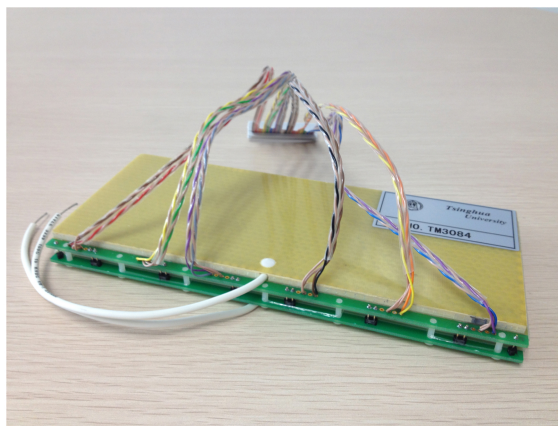
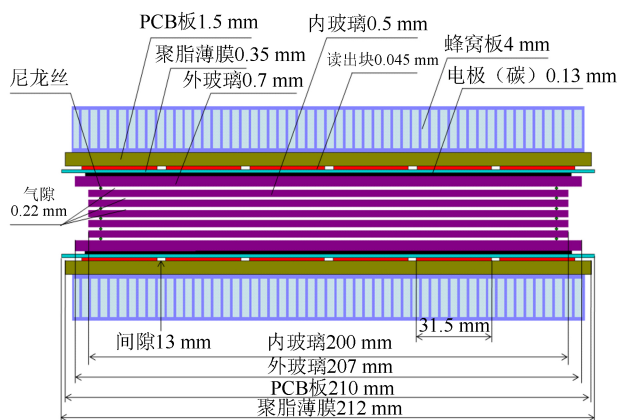


图 1 MRPC 结构及照片

飞行时间探测器 (Time Of Flight, TOF) 是根据粒子的飞行时间来测量其飞行速度, 结合由其他探测器测得的粒子动量, 可以得到粒子的质量, 以达到对粒子种类的鉴别。探测器的时间分辨越好, 则可以区别的粒子动量越高。飞行时间探测器要求具有优良的时间分辨性能。我们知道, MRPC 是一种新型的气体探测器, 具有优良的时间分辨性能, 而且能够很方便地设计出不同大小和不同形状的读出单元, 已经成为高能物理实验中建造飞行时间探测器的主流技术。图 1 显示了 STAR-TOF MRPC 的结构及照片。MRPC 采用超薄玻璃做电极, 采用印制电路板读出感应信号, 玻璃电极之间的间隙仅仅 200 ~ 300 微米, 而其中的电场强度高达 10^5 V/cm。工作气体采用电负性的氟里昂 (95%) 和异丁烷 (5%), 这样探测器工作在雪崩状态, 保证了其优良性能, 时间分辨达到 60ps, 探测效率高于 95%, 综合性能达到国际先进水平。

STAR 飞行时间探测器建造

是中美高能物理界的重大国际合作项目。中国科学家从 2000 年就开始了 MRPC 的研发, 解决诸多技术难题如气体密封问题, 高压绝缘问题, MRPC 气隙均匀性问题, 宇宙射线精密时间测量问题等。图 2 表示由 32 个 MRPC 组成的 TOF 长条, 整个 TOF 由 120 个

长条组成, 需要近四千个 MRPC 模块。为了实现 MRPC 的大批量制作, 我们采用校企合作模式, 利用同方威视股份有限公司的密云生产基地, 建立了 MRPC 批量生产车间。借鉴公司在探测器批量生产中严格的生产流程及质量保证体系, 将老师和学生以前的单件制作方法成功地转移到车间, 建立了适合于工人操作的 MRPC 生产制作流程和质量检验方法, 实现了 MRPC 的大批量生产, 如图 3 所示。从 2006 年 4 月到 2008 年 9 月, 与中国

科学技术大学合作完成了四千多个 MRPC 的制作和测试, 产品合格率达 95%, 且各项性能指标均优于设计要求, 得到美方专家的高度评价。2009 年顺利建成 STAR-TOF, 并投入实验运行, 大大提高了高动量区的粒子鉴别能力。如对 π/K 的鉴别提高到 1.6 GeV/c, 对 $(\pi, K)/p$ 的鉴别提高到 3.0 GeV/c, 如图 4。TOF 已经成为 STAR 各方面物理运行的必备探测器, TOF 数据在 STAR 物理分析方面发挥了重要作用。

RHIC 利用两束接近于光速

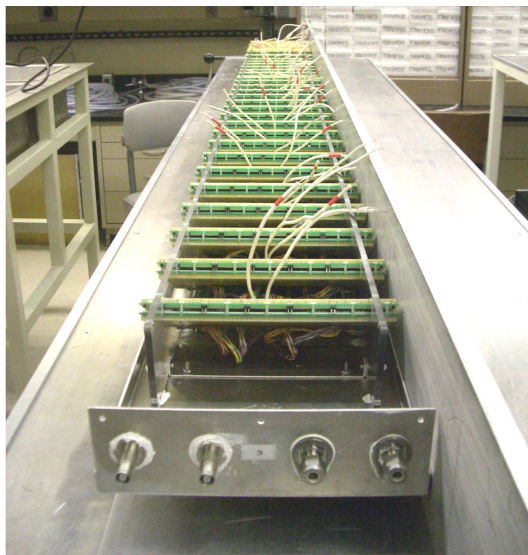


图 2 由 32 个 MRPC 组成的 TOF 长条

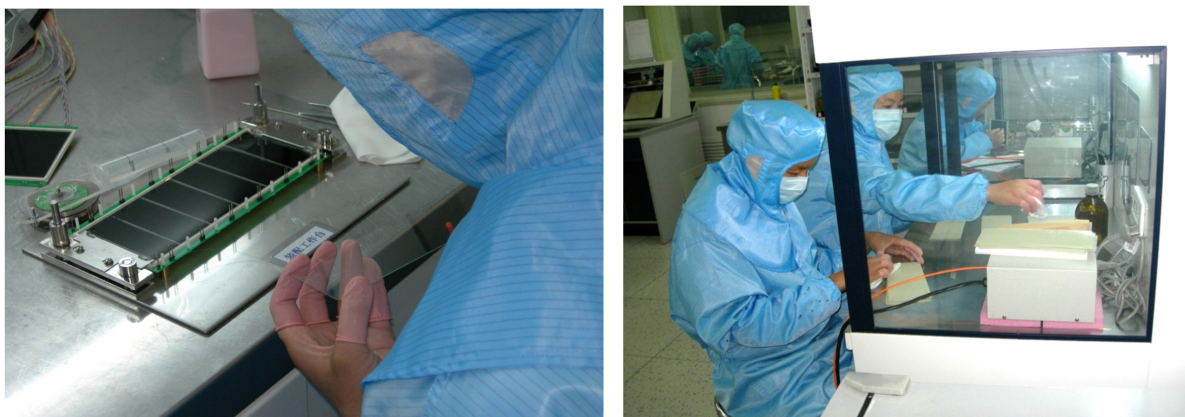
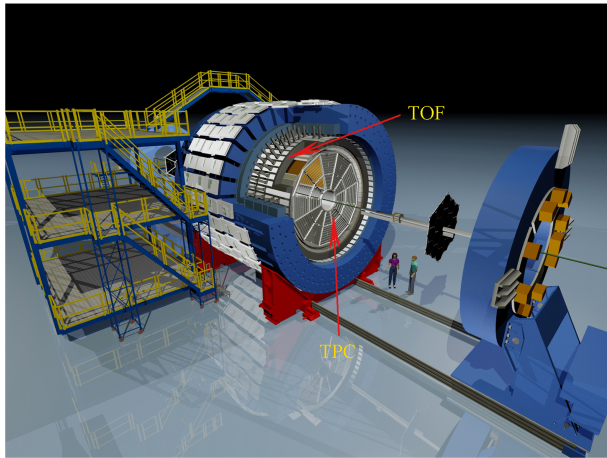


图 3 工人在制作 MRPC



(a) STAR 探测器结构

STAR 探测器的粒子鉴别主要由中心的时间投影室 (Time Projection, TPC) 及其外围的 TOF 组成。TPC 能记录带电离子的径迹进而得到其动量, TOF 测量离子的飞行时间

的金核对撞来模拟宇宙大爆炸, 产生类似于早期宇宙的物质形态。这种剧烈的碰撞产生大约等量的夸克和反夸克物质, 其中一部分稳定的反物质可以在与正物质湮灭之前在 STAR 探测器中留下清晰的信号。为了能及时地从海量对撞数据中捕获到反氦核的信号, STAR 合作组研制了专门的高级触发判选系统, 通过筛选 10 亿次碰撞事例中产生的 5000

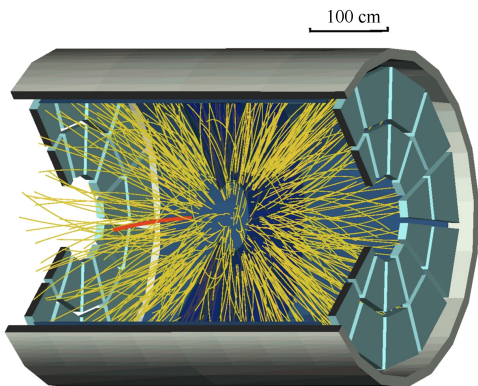


图 5 STAR 主探测器时间投影室和飞行时间探测器的三维图, 浅色 (金黄色) 的径迹代表一个包含反物质氦 4 的碰撞事例, 红色的径迹代表此事例中的反物质氦 4

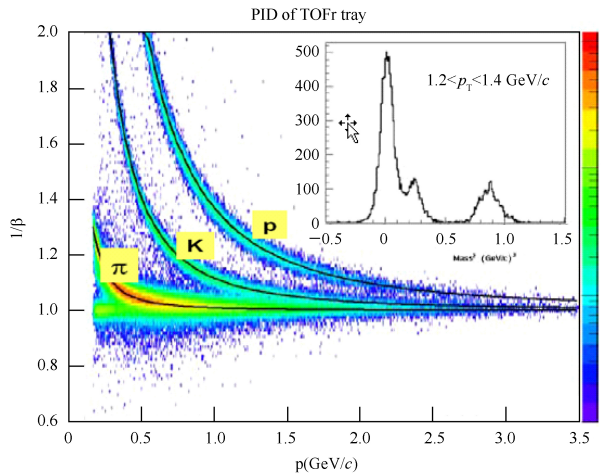


图 4

(b) TOF 的粒子鉴别图

STAR 增加 TOF 后, 粒子分辨能力大大提高。把 π/K 分辨的动量范围扩展到 $\sim 1.6\text{GeV}/c$, 把 $(\pi, K)/p$ 分辨的动量范围扩展到 $\sim 3.0\text{GeV}/c$, 并能有效地鉴别低横动量区间的电子与 π 介子

亿个带电粒子, STAR 合作组利用 TOF 探测到了 18 个反氦 4 信号。图 5 表示由 STAR 主探测器——时间投影室所记录到的反氦 4 的径迹 (图中深色红线所示), 图 6 表示带电粒子质量和能损分布图, 可以清楚地分辨出反氦 4 的信号。这种稳定的反物质原子核包含两个反质子和两个反中

子, 电荷是电子的 2 倍, 质量是质子的 4 倍。这种新型粒子又名反阿尔法粒子, 是迄今为止所能探测到的最重的反物质原子核, 因为下一个更重的稳定反物质原子核 (反锂 6 核) 产生的可能性是反氦 4 的百万分之一, 以现在的加速器技术几乎不可能实现。该成果已于 2011 年 4 月 29 日在

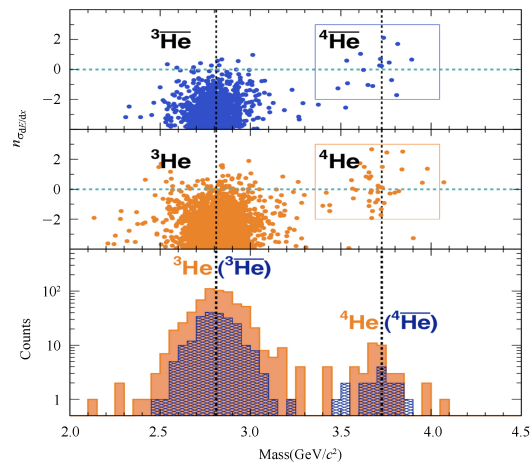


图 6 上图和中图是通过 STAR-TOF 测得的带电粒子质量和能量损失的二维图; 下图是带电粒子质量的一维图, 反物质氦 4 的质量等于 $3.73\text{GeV}/c^2$ 。利用 TOF, 我们可以在 10 亿次碰撞产生的 5000 亿条径迹中清晰地分辨出反物质氦 4

英国《自然》(*Nature*)杂志发表。在该项重要发现中,中方 STAR 合作组成员与 BNL 方紧密合作,起到了十分重要的作用。

在类似于早期宇宙的条件下,产生和研究反物质是一件非常有意义的事情:宇宙大爆炸之初产生了等量的物质和反物质,而现今所能观测到的宇宙几乎全部是由物质所构成的。什么原因造成了物质和反物质的不对称

性,反物质在哪里?这仍是困扰物理学家的一个未解之谜。2011 年 4 月发射升空的阿尔法磁谱仪

(AMS) 已安装在国际空间站上去寻找宇宙的反物质,而 STAR 的这次测量结果将提供一个定量的背景估计值。国家自然科学基金委副主任沈文庆院士评价说,这次 STAR 合作组的反氦 4 重要发现是继 2010 年发现反物质超氦核后的又一具有重要里程碑意

义的突破性进展,而在这两个重要的科学发现中,我国的核物理学家队伍都起到了极为关键的作用,突显了基于大科学基础研究的国际合作的重要性。

本文及文中述及的 STAR-TOF 的研究工作,是在科技部 973 计划项目“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”支持下完成的,在此表示感谢。

(清华大学工程物理系 100084)

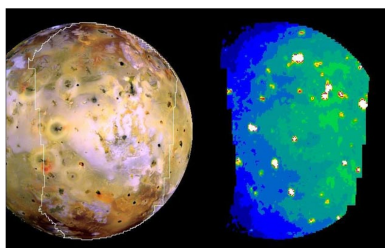
科苑快讯

地面观看木星火山爆发

把双脚搭在桌子上,呷一口咖啡,然后观赏数百万英里外的火山爆发,是行星学家的莫大享受。这要感谢三台大型望远镜(两台在夏威夷、一台在智利),它们都安装了相应设备,以抵消地球大气产生的闪烁。

2003 年 1 月~2011 年 11 月,研究者对木星的卫星木卫一(Io)在近红外波段进行了 40 多次观测,右图中白色部分为火山爆发区域。火山热点区域最小直径达 100 千米,多数火山活动与装载照相机掠过木星的探测器以前所发现的 160 多座火山有关。研究组在美国内华达州里诺(Reno)市,美国天文学会行星科学分会召开的会议上做了报告。

木卫一比月球略大,是太阳系中火山活动最活跃的天体。它的动态在 1979 年旅行者 1 号飞越

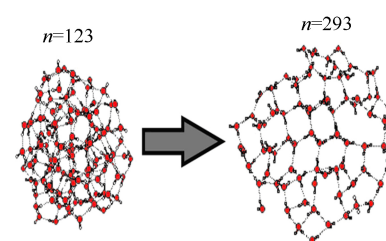


该卫星之前,一直都是未知。地球上的定期观测将填补探测器释放卫星进行详细观测的缺口——从发射伽利略探测器撞击木星开始,至少要到 2030 年。

(高凌云编译自 2012 年 10 月 17 日 www.sciencemag.org)

打造最小冰晶

听起来似乎异想天开,但却是个严肃的科学问题——多少个水分子能够组成最小的冰晶呢?因为晶体是由三维重复排列的分子组成,所以不是结合在一起的小团分子都能称为晶体。特别是水,当凝结成冰时,微弱的氢键将水分子松散地束缚在一起,把无序的分子团(图左)拉扯得更远,并且变得像笼子一般更为刚硬(图右)。



为了计算一个冰晶所需最少的分子数量,一个研究小组用红外激光照射包含水分子数量为 80 ~ 500 个不等的水分子集团。研究小组特别注意到水分子集团吸收的波长在 2.63 ~ 3.57 μm 之间,这个能量区间能使水中的氢氧键不断伸展和收缩。而吸收峰值出现在 3.125 μm 波长,表现出了冰的光谱特征,此时出现的水分子集团只包含 275 个水分子。这样的分子集团大小为 1 ~ 3 nm (1 nm = 10^{-9} m),已是碎冰晶体积的极限,该论文已发表在《科学》(Science)网站上。

(高凌云编译自 2012 年 9 月 20 日 www.sciencemag.org)