

布鲁克海文的相对论重离子对撞机(RHIC)

吴国华 陈根海

洪忠悌

(中国科学院近代物理研究所 兰州市 730000) (兰州大学物理系 兰州市 730000)

摘要 介绍正在布鲁克海文建造的相对论重离子对撞机(RHIC)的概况,可达到的指标,对可能建造的探测器的要求和在 RHIC 期待寻找和探索的夸克胶子等离子体的实验该如何进行? 理论家的预言和建议是什么.

关键词 RHIC, 夸克胶子等离子体, 相变, 探测器, 强子, 轻子, 超子.

1 引言

经过8年前(碰撞束加速器计划)被取消后的漫长等待,终于在布鲁克海文开始建造RHIC. 它由美国核物理学会主持建造,由基本粒子物理学家积极参与. RHIC 将加速反向循环的重核离子束,能量范围从质子的250GeV直到100GeV/u的Au束. 加速管道的周长为4km,与原有的Van de Graaff和AGS(交变梯度同步回旋加速器)联合组成RHIC. 物理实验可望于1997年开始.

2 RHIC 设备^[1]

RHIC 像SSC(超导超级对撞机)一样具有超导偏转磁铁的双环,但RHIC只需要一个强度为3.5特斯拉的适中的偏转场,这大约是SSC磁场强度的一半. RHIC的每一偏转磁铁长9.7m. 在1600块超导偏转磁铁、聚焦磁铁和校正磁铁中大多数是由工厂制造的,但400块独特的磁铁由布鲁克海文制造,它们用于反循环束互相交叉的6个区域.

作为一个重离子机器,RHIC需要比质子加速器更宽的束流输运管道. 在注入对撞机环之前所有的离子要完全剥离掉电子. 例如,

一个剥离的Au离子带的电荷是质子的79倍,束流离子之间的库仑散射对束流相空间分散的不利效应随电荷增加而变坏. 所以,RHIC必须有直径为8cm的束流输运管道,几乎两倍于SSC磁铁所需宽度.

核素的 Z/A 愈高,最大偏转磁场允许的每核子最大束流能量也愈高. 但当RHIC工作在非对称方式时,使束流同步的考虑给出附加约束. 例如,磁铁可以储存 $\sim 125\text{GeV/u}$ 的氧束,相对 $\sim 100\text{GeV/u}$ 的金束反循环. 当这两束的速度相差十万分之几时,就会完全破坏反循环束的同步化. RHIC将有6个交叉点,在此两束离子碰撞,要保证反向运行的两束同时到达碰撞点,不同核素的反循环束必须有相同的速度,这就要限制较重核素的每核子能量.

在RHIC组合系统中,离子加速是从现有的一台串列加速器开始,通过Van de Graaff后离子被剥离掉一部分电子,具有能量为 $15\text{MeV} \times$ 纯电荷数,通过700m长的输运线将离子送到一个1991年6月刚完成的增能加速器. 在增能器被建造作为AGS的注入器之前,AGS不可能加速比硫重的离子,有了增能器就可加速到Au. 当AGS继续用作质子加速器时,增能器也有助于提高AGS

的束流强度.从增能器出来具有100MeV/u能量的离子通过剥离膜(除最重核的最内层电子外,所有电子均剥离),然后进入AGS,加速的能量范围从28GeV(质子)到10GeV/u(Au),再通过一剥离膜剥离剩下的电子后进入RHIC环,以57个离子束团去充满每一环(大约要1min),每一束团大约1m长包含有数量级为 10^9 个离子.为了缩短这些束团到30cm并加速它们到RHIC的全能量还需要1min.然后这两个束流将连续循环数小时之久,使它们在放置探测器的任一交叉点发生连续碰撞.RHIC组合系统见图1.

3 探测器

RHIC上所要求的探测器面临着独特的问题.100GeV/u重离子的对头碰将产生上万个带电粒子.每隔114ns的切断和束流交叉大大提高了示值读数电子器件的密度和速度要求.探测器要能用在RHIC产生的从250GeV的质子到100GeV/u的重核范围内不同能量的不同束流的碰撞.另一方面,在RHIC的碰撞中产生的大多数感兴趣的粒子能量都不会大于几个GeV,因为小角度出射的高能量产物对于研究从被激发真空中出现夸克胶子等离子体是最不感兴趣的.在RHIC中核碰撞将包含所有碰撞参数,感兴趣的是可以产生高能量密度的对头碰.一个简单的“多重性”触发器找寻产生粒子数远大于平均值的那些事件,这可以很快地初步鉴别是否为感兴趣的事件.RHIC计划的负责人Satoshi Ozaki期待探测器记录和测量的事件中大约百分之一会是感兴趣的.随着RHIC工作在全流强,要求探测器和它的在线计算机处理总计大约每秒10个事件,每一事件产生上万个次级粒子.

截止1990年10月,已收到9份建议书^[2],这凝聚着美国和海外50多所大学和研究中心的近三百名研究人员多年的心血.大

多数建议书可分为两大类:探测夸克胶子等离子体(QGP)表面辐射的强子分布的探测器;探测出射的轻子和 γ 射线来研究QGP内部的探测器.

我们研究的是一个热过程,所以不必记录全部出射的能量,这与从丢失的能量和动量来找中微子的实验不同.但是有一类建议是建造“大接受”的探测器,可以接受中心相空间的一大块区域内出现的所有带电粒子.在此中心区域一个事件中可出现成千个粒子,大多数是 π 介子,这就使得可用统计系综来表征单个事件.这对寻找达到QGP的热动力学相变是重要的.

最雄心勃勃的强子探测器计划围绕碰撞点张一大立体角,测出射强子在中心相空间的分布.为了精确测量动量和区别 π 、 X 、 p 、 \bar{p} 和超子,要跟踪所有的痕迹直至相当远处.这些强子被认为是当QGP膨胀和冷却到夸克又回复到束缚态时从热等离子体表面发射出来的.所选的设备可能是具有优良的径迹和游离测量本领的大时间投影室.

假如想看看在强子被“冻出”来之前QGP的内部,就要测轻子(e^+ , e^- 或 μ^+ , μ^-)或 γ 射线.与强子不同,这些深部探针不会使内部受损伤,就像用太阳中微子来研究太阳内部一样.轻子探测器必须区分从碰撞来的瞬发轻子和十分大的强子本底以及强子衰变产生的次级轻子.

橡树岭专家小组提出的 μ 介子探测器用一厚吸收强子垒紧紧包围碰撞点,使强子被吸收之前没时间衰变.该设计利用中心区的超导环形室,在端帽区布满了阻止强子通过并提供清洁 μ 介子的钢铝吸收装置.为此付出的代价是在强子被吸收前测量强子的空间就很小了.这种探测器被分成中心区域和两个端帽区.小型的“孔谱仪”不带吸收装置,由跟踪探测器与量热计组成.它不仅对强子的生成进行研究,而且在大横向动量时对直接光子的生成进行研究.硅条探测器在孔谱仪中提供顶点与跟踪.

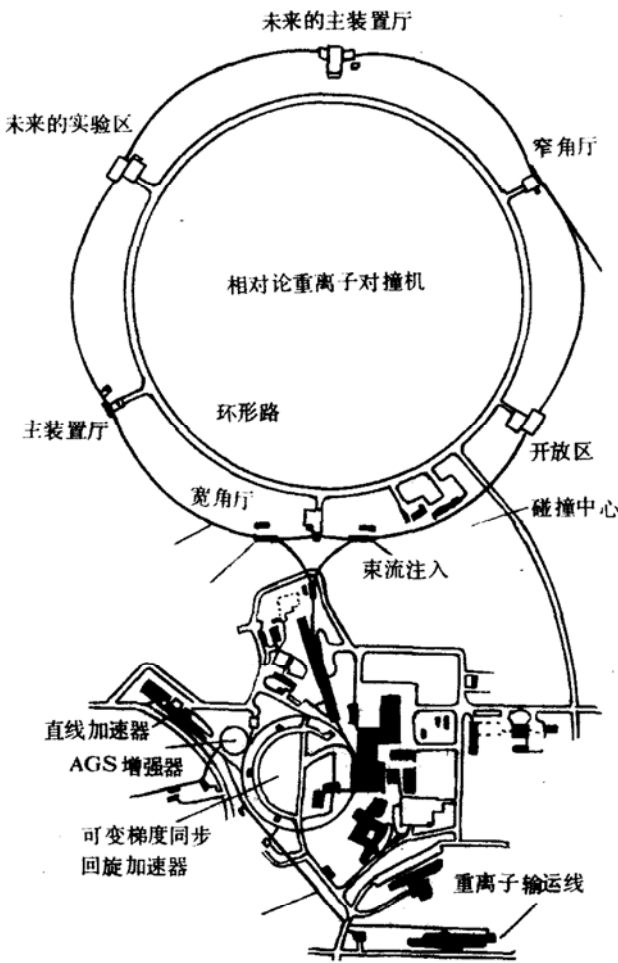


图 1 RHIC 组合系统

为测量正负电子对设计的探测器与强子测量较少矛盾,但高能电子与 μ 介子较难区分. 为了区分轻子与强子,建议采用飞行时间计数器、环形镜象切伦科夫计数器和漂移辐射探测器.

以日本人为主提出的 TALES 设计方案采用一种双柄光子、强子谱仪. 该谱仪由两个以常规动量分析为目的的二极磁铁、以跟踪为目的的时间投影室、以光子电子探测为目的的电磁热量计和以粒子鉴别为目的载飞行时间计数器的环形镜象切伦科夫计数器所构成. 这种探测器旨在拾取正负电子对,因为这

种探测器不易产生终态强相互作用,是一种性能良好的探测器.

由哥伦比亚和布鲁克海文为首提出的 OASIS 方案设计了一种利用列宁格勒 Gatchina 回旋加速器再循环磁铁轴场谱仪. 它包括:一种设计新颖以探测电子光子为目的的高分辨液体氩热量计,为鉴别强子和研究喷射生成的跃迁辐射跟踪器,飞行时间闪烁计数器与切伦科夫计数器,顶点及全事件特征的硅条及硅漂移探测器.

由石溪分校提出的方案采用一个碘化铯材料的六线圈超导空心环结构,用可变能量的铅玻璃量热计,对电子和光子测量的空间分辨被电子和强子的辐射跃迁径迹探测器所加强,亦被顶点硅条探测器和多重性探测器而增强. 再次强调对大横向动量时直接光子和电子对的研究.

布鲁克海文小组设计了前向可变角谱仪,有一些中间隔开的偶极磁铁,一个观测径迹的时间投影室和测量粒子产额的切伦科夫计数器. 着重于强子径迹探测、产生粒子的横向动量谱和角分布的研究. 投影范围从前角富重子区延伸到 QGP 生成的自由重子区. 寻找的信号有粒子反粒子之比以及各种夸克味的相对产额,如 κ 与 π 之比.

1991 年 4 月在评议了这些意向书之后,布鲁克海文的副所长 Melvin Schwartz 极力主张把具有许多共同性质的九份建议综合归纳为较少的提案供 1991 年 8 月末再次评议. 在 RHIC 总投资的 4 亿美元中有 8 千万用于探测器,其中 6 千万用于大型探测器,2 千万留作以后需要的各种小型探测器. 这就意味着只能建造 2~3 个大型探测器.

4 夸克胶子等离子体(QGP)

RHIC 的主要目的是探索 QGP. 目前基本粒子之间的强子相互作用(即强相互作用)的标准理论是 QCD(量子色动力学). QCD 十

分肯定地预言:把核物质,甚至真空激发到足够高的能级密度时,夸克和胶子就不再被束缚在核子或介子内而成为自由的,可以在1fm(强子的特征大小)内自由活动,这一状态并非是全新的,宇宙学家认为在大爆炸后 $10\mu\text{s}$ 时整个宇宙就是QGP状态.

RHIC将产生真空能量密度高达 $10\text{GeV}/\text{fm}^3$.这足以产生QGP. RHIC的碰撞能量将大大超过现有的加速器所能达到的碰撞能量,包括目前最强有力的CERN的SPS.它一般用作质子反质子对撞机,偶而可提供 $200\text{GeV}/\text{u}$ 能量的离子束来做实验^[3],但在这些实验中均用固定靶,所以每核子质心碰撞能量比RHIC的要低一个数量级.但是,在CERN、布鲁克海文的AGS和伯克利的Bevalac所做的实验使我们认识到在RHIC上可以期待些什么.其中之一是随着碰撞能量的增加核将变得愈来愈透明.两个 $100\text{GeV}/\text{u}$ 的Au核对头碰,将会互相穿过,大约90%的能量由碰撞时产生的碎片带走,剩下约10%的入射能量激发在质心处留下的真空到足够高的能量密度,可产生大量的介子和重子反重子对.这些将是短暂的QGP出现的冷痕迹.

在基本粒子的标准模型中真空起着两个决定性的作用.“QCD真空”的特色被认为是要对夸克束缚于强子内部负责的.李政道博士指出RHIC将提供我们首次机会去检验QCD真空的动力学特性,这一假设的基本粒子与真空的相互作用是宏观与微观的非凡偶合,尚需实验证实.检验真空的其它关键作用也许要等到超导超级对撞机(SSC)提供 $10\text{TeV}/\text{u}$ 的重离子碰撞才可进行.标准模型的弱电成分使真空反对称,使光子与矢量玻色子之间有巨大质量差.检验这些猜想需要激发真空到足够热去产生大量的 W^\pm 和 Z^0 玻色子,这些矢量玻色子比强子重100倍.

目前的理论尚不能肯定在通常物质与QGP之间存在一级或二级热动力学相变或者某种较缓慢的变化.当QGP冷却到“冻出”

强子时,由于失去了放出夸克胶子自由度,它的熵密度大大减小,但热力学第二定律不允许系统的总熵减少,所以冷却过程必然随着膨胀过程,相对束流轴可膨胀达(30~40)fm.怎么测等离子体的大小?借用天文学家的诀窍,在五十年代Robert Hanbury Brown和Richard Twiss发展了一种测量星球角直径的干涉仪方法.作为玻色子的光子在相空间中是正相关性的,当两个光子的动量差 ΔP 为零时双粒子关联函数为峰值,随 ΔP 增加关联函数消失率即为源大小的量度.源愈小能看到关联函数还存在的 ΔP 就愈大. π 也是玻色子,有同样的结团趋势,用 π 来实现上述干涉仪的想法可追溯到1962年Berkeley的一些人所做的尝试.但是只有在RHIC上才可能有如此大的多重性使单个事件中对源大小做有统计意义的测量.QGP的 π 干涉仪可给出 π 开始冻出时等离子体的膨胀体积,膨胀前的横向直径基本上由入射核的直径决定.也可以用轻子的布居做费米统计来量度膨胀前等离子体的大小.

大的 π 多重性也使得可能从横向(相对束流轴而言)动量的分布来精确测量一个单个事件的中心区域的温度.温度愈高,出射强子的横动量就愈大.多重性本身是熵的量度,因此可以画出中心区域的 π 多重性对温度的曲线,来寻找到达QGP的突然相变.某些热动力学的相变由大规模的涨落来标志,把中心相空间分为不同纵向动量的区段,在一个单个事件中比较不同区段中的多重性或能量密度来寻找激烈的涨落.

5 有味无质量的夸克

从激发真空产生的QGP中应该有比普通核碰撞中看到的更高比例的“没有帷幕的夸克”、反夸克和奇异夸克.所以RHIC上的实验将会出现随温度增加 κ 和反超子的相对产额会增加. κ 也会在 π 之前被冻出.从 κ 干

涉仪而得的一个较小的源大小将被作为 QGP 的证据。

QCD 理论预言:QGP 的起点与其它相变紧密相关,如“手征对称性”的恢复,事实上正是这点判定夸克无质量.在各种通常介子(如 ρ 和 ϕ)的质量和共振宽度时,这一对称性开始恢复的信号将会改变,它们被看成是从核碰撞中出现轻子和 κ 对的不变质量分布中的峰,进而从轻子对的不变质量谱可得奇异夸克共振.如夸克和反夸克的著名的具有魔力的 J/ψ 束缚态.理论学家期待这类介子的产生将由于 QGP 中的屏蔽效应而大大压缩.在 CERN 的重离子实验上已看到一些 J/ψ 压缩

的征兆,当然也可能有别的解释.而 RHIC 将是更有力的验证工具.

总之,相对论性重离子碰撞将是当前和今后十余年中核物理研究的第一重点方向,将探索完全未知的领域,发现没有料到的新现象,有可能完全更新核理论. RHIC 的建成和投入运转使这一期盼得以实现.

参 考 文 献

- 1 Physics Today, 1991, 8 月: 17
- 2 CERN Courier, 1991, 5 月: 12
- 3 Physics Today, 1988, 3 月: 17

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven

Wu Guohua Chen Genhai

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Hong Zhongti

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract The RHIC being built at Brookhaven is introduced, the facility and index of which are described. The proposed detectors designed by several collaboration groups vary in their scope and physics focus. How to research QGP at RHIC? What is the plasma like? what is the QCD prediction? How to make the experiments?

Key Words RHIC, Quark-gluon plasma, phase transition, detector, hadron, lepton, hyperon.

超微“金字塔”已用硅原子堆成

人类早已梦想有一天可以按人的意志安排一个个原子.今天日本人首先人为地把原子排列成立体形状.日本电气公司最近用半导体材料硅制成超微“金字塔”,高度仅有 36 个原子高.把硅加热至 600℃,硅原子就会活跃起来,在隧道扫描电子显微镜下,用极细的针将硅原子排成了四棱

锥体——“金字塔”.锥体的长方形底边的宽度为 36 nm,长为 48 nm.“金字塔”共 18 级台阶,每阶 2 个原子高.这是世界上纳米加工的首例,必将极大地鼓舞和激励纳米加工和纳米工程学的发展.

(吴国华供稿)