

核-核碰撞研究

沈文庆

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 本文以从低能到相对论性重离子束进行的核-核碰撞为主线索, 主要介绍重离子在核物理研究中的进展, 也涉及到一些天体物理和粒子物理方面的问题。本文将依次介绍下述专题: 核结构研究; 热的核的性质; 核反应动力学; 夸克禁闭的释放; 其它论题。

第三届国际核-核碰撞会议1988年6月6—11日在法国的Saint-Malo召开。国际核-核碰撞会议是国际纯粹和应用物理协会组织的重大学术会议之一, 会议每三年一次。第一次会议于1982年在美国Michigan州立大学进行, 第二次会议于1985年在丹麦Visby进行, 每次会议均有四、五百参加者。重离子物理从1970年左右开始发展以来, 涉及的研究领域越来越多。当然它是以重离子加速器给出的重离子束进行的核-核碰撞作为其主要实验手段的。随着重离子加速器从低能 ($< 10\text{MeV/A}$)、中能 ($10\text{MeV/A} \sim \text{几百 MeV/A}$)、高能 ($> 1\text{GeV/A}$) 的发展, 重离子物理也经历着同样的发展。同时重离子物理这一学科正在和粒子物理、天体物理、原子物理、材料科学、凝聚态物理及生物医学等学科交叉。因此迫切需要在重离子物理不同领域内工作的学者及工作者、其它和其有关的学科的科学家进行尽可能广泛的学术交流和合作研究。核-核碰撞会议正是在这种背景下开始组织的, 它以从低能到相对论性重离子束进行的核-核碰撞为主线索, 主要交流重离子在核物理研究中的进展, 也涉及到一些天体物理和粒子物理等方面的问题。

会议共收论文229篇, 分成5个专题: ①核结构 (53篇); ②热的核的性质 (54篇); ③核反应动力学 (82篇); ④夸克禁闭的释

放 (22篇); ⑤其它论题。这些论文以大学报形式在会议中交流并都收在会议论文集中。会议报告主要是特邀报告 (36个) 及少量从收到的论文中选出来的报告 (12个), 这些报告将在Nuclear Physics杂志出的会议论文集特刊中发表。会议一开始以美国哥伦比亚大学的S. Nagamiya作的题为“用相对论重离子碰撞探索核物质的新的形态”及丹麦玻尔研究所的J. Bondorf作的题为“低于几百MeV/A的核-核碰撞”两个报告为重点发言; 会议结束时有F. Plasil组织G. Baym、P. Benche、H. Doubre、W. Henning、J. Hüfner和U. Mosel以圆桌会议形式对会议及核-核碰撞研究的前沿进行总结。从上述活动及提交会议的论文来看, 核-核碰撞研究主要集中在: 核物质态方程的实验和理论研究; 核物质新形态的实验和理论研究; 中能和高能核反应动力学研究, 其中多重碎裂反应机制成为一个热门课题; 原子核可忍受的最高激发能或最高核温度, 核温度的定义和测量方法及热的原子核的性质; 原子核高自旋态、超形变及巨共振等和核结构紧密相连的课题; 中、高能重离子束产生的次级奇异核束流及合成新元素和新核素及其奇异衰变性质研究。会议还邀请了天体物理及粒子物理工作者进行报告和讨论。

一、核结构研究

这个题目下的特邀报告主要涉及内容有：①中能重离子激发巨共振及其衰变研究，中能重离子转移反应研究；②合成重元素的进展，奇异核的合成及其衰变性质研究和次级放射性束流的产生及在核反应和合成新核素等方面的应用；③高自旋下核的结构、超形变和其它运动形态。

中能重离子可产生到孤立态的削裂和拾取型的转移反应，在激发巨共振方面有截面大、角分布集中在小角区等优点，用这类反应来研究核的结构及核激发的各种集体运动等方面还在做工作。会议上对电荷交换反应有较多讨论。例如H. G. Bohlen报告了30~100MeV/A的 ^{12}C 在 ^{12}C 靶上发生的 $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})$ 单电荷交换反应的实验。一般认为重离子碰撞中产生电荷交换反应通常来自两种机制：
①核子-核子碰撞直接产生电荷交换反应；
②炮弹和靶里的质子与中子的两步转移交

换。通过对角分布、激发函数等实验测量结果的理论分析得出结果。直接产生的电荷交换反应随轰击能增加而增加，两步转移产生的电荷交换反应随轰击能增加而减小。图1显示了实验和理论计算的 $^{12}\text{C} (^{12}\text{C}, ^{12}\text{N}) ^{12}\text{B}$ 产生 ^{12}B 基态及4.37MeV、 2^- 激发态的激发函数及角分布上最大截面随轰击能的变化。从这个结果可清楚看出随轰击能增加平均场效应减小而直接的核子-核子碰撞的作用大大增加。电荷交换反应对研究核中核子-核子相互作用是很有意义的。例如法国在Saturne上用1100MeV/A ^{12}C 及900MeV/A ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{20}Ne 研究了在不同靶上的 $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{B})$ 、 $(^{16}\text{O}, ^{16}\text{N})$ 、 $(^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{F})$ 、 $(^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{Na})$ 等的电荷交换反应。在出射粒子能谱上看到了在300MeV左右激发的核中的 Δ 共振激发，这是一个很宽的峰，且核中 Δ 激发的能量比在H上产生的自由 Δ 激发的能量要低，这个能量的移动和靶的质量数有关（图2）。在低激发能处有一些粒子-空穴态激发的贡献（没有区分得很好），它是各种自旋-同位旋模式的有选择性的激发（图2）。

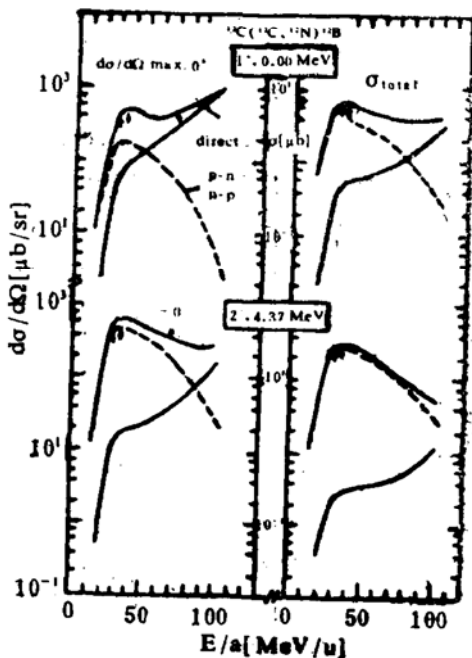


图1. $^{12}\text{C} (^{12}\text{C}, ^{12}\text{N}) ^{12}\text{B}$ 单电荷交换反应产生 ^{12}B 的 1^+ 基态和 2^- 、4.37MeV激发态的激发函数和角分布上截面最大值。随轰击能变化的实验和理论计算的结果。

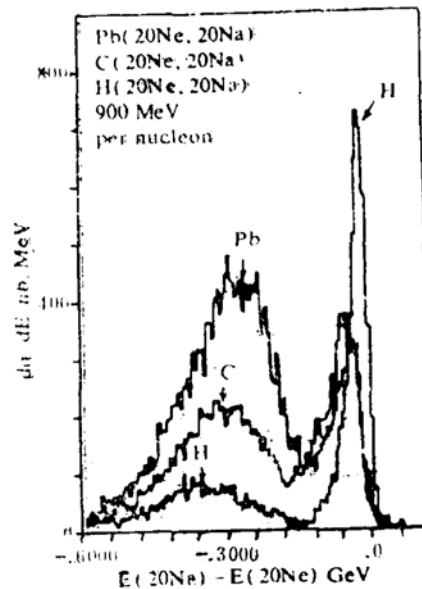


图2. 900MeV/A ^{20}Ne 轰击各种靶，由 $(^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{Na})$ 电荷交换反应激发的 Δ 激发和各种粒子-空穴态的激发。

日本K. Asahi在会上报告了中能重离子炮弹碎裂反应产生的自旋取向的不稳定核的实

验。通过测定碎裂产物的自旋取向来研究反应机制，而且将试图用这种自旋取向的不稳定核来探索其它问题。图3显示了用60MeV/A $^{18}\text{O} + ^9\text{Be}$ 产生 ^{14}B ，通过测量有外磁场或没有外磁场时 ^{14}B β 衰变后放出的6.09MeV的 γ 计数率的变化定出的自旋取向及 ^{14}B 的动量谱。图4显示了根据这个结果设想的产生不同能谱区域产物的碎裂机制。

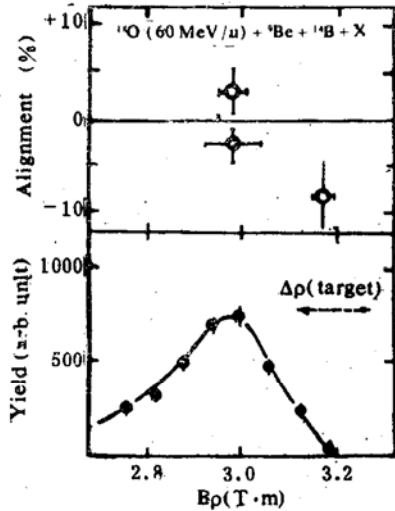


图3. 60MeV/A $^{18}\text{O} + ^9\text{Be} \rightarrow ^{14}\text{B} + x$ 产生的 ^{14}B 动量和自旋取向

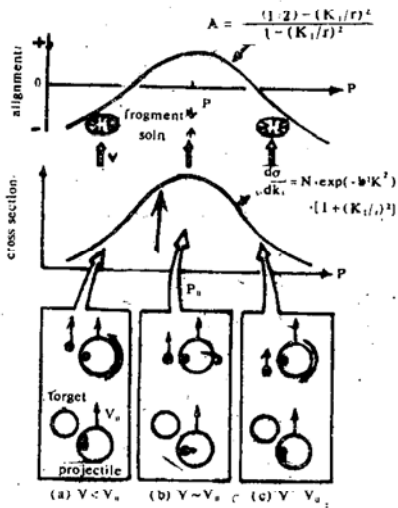


图4. 自旋取向随动量变化的碎裂模型图示

用中高能重离子产生新元素和新核素是大家感兴趣的内容。苏联杜布纳的Yu. Ognession和西德GSI的E. Roeckl作了综述报告。在这方面另一个感兴趣的课题是用中高能重离子束产生次级放射性奇异核束，并用

它来研究新核素，直接测量奇异核的质量及用奇异核次级束进行核反应研究和应用研究。利用束流输运线及奇异核次级束产生装置可得到长于100米的飞行距离，可把直线质量测量的精度提高到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，为奇异核质量的直线测量提供了条件。图5显示了轻的丰中子核实验测量的结合能和理论计算值之差作为中子数的函数关系，N=20的Na和Mg同位素比壳模型预言的要束缚得紧得多。这无疑对核结构理论的检验和发展提供了有力的实验依据，一些理论工作者已试图解释这些结果了。日本I. Janihata综述了用放射性奇异核次级束进行的反应总截面、弹散及碎裂方面的情况。这方面的研究刚开始，但已有了一些有意义的结果。例如从反应总截面对N—Z自由度关系导出核半径对N—Z自由度的关系。他们从反应总截面得出结论 ^{11}Li 有异常大的核半径，可能是最外层二个中子造成的。用 ^{11}Li 次级束轰击C靶，通过碎裂反应产生 ^9Li 的实验进一步证实了这一点。 ^9Li 的动量谱有二个组成，一个宽的组分和通常碎裂反应一致，估计是 ^{11}Li 内层中子产生，窄的组分可能由 ^{11}Li 最外层的二

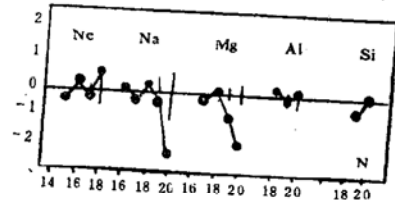


图5. 丰中子轻核的实验和理论结合能之差和中子数的关系

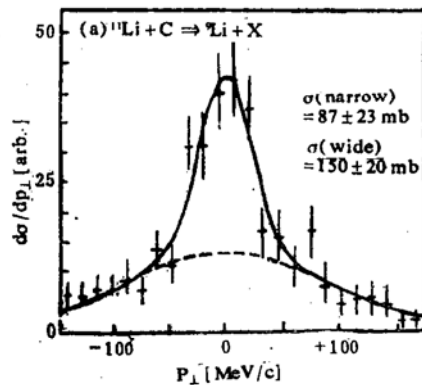


图6. 次级束 ^{11}Li 碎裂产生 ^9Li 的横向动量谱

个中子产生(图6)。 ^{11}Li 最外二个中子结合能很小,在 ^{11}Li 中的动量涨落也很小,导致 ^9Li 动量分布上的尖峰。会上还有一些高自旋、超形变等方面的报告,这里不再叙述了。

二、热的核的性质

在这个题目下的特邀报告主要论述:①热的复合核的产生及衰变;②新的反应机制—多重碎裂的实验和理论研究;③中能碰撞中发射的复杂粒子及发射带电粒子的关联和相干。

首先是如何定义热的核。例如J. Galin认为热的核是核子还能自动地束缚在一起(至少一段时间),且已处在热平衡,而且 $T \geq 3\text{MeV}$ (此时对效应和壳效应已消失)的核。它不是象中高能重离子碰撞中产生的象火球那样的热的流体(它可达到很高的温度)。人们对这样的核最多可忍受多大激发能或达到多高温进行了广泛的理论和实验研究。通常认为这类核可达到的最大核温度是5~6 MeV。但是它和入射道的动力学和热的核的同位旋、自旋、压缩及形变状况、质量数等紧密相关。例如研究表明同位旋越大,核可忍受的极限激发能越高(图7),轻核能忍受的每核子的激发能也比重核大(图7)。这反应了库仑能使核不易吸收激发能,同样压缩和转动也会大大减小核可忍受的激发能。因此包含这些自由度的动力学计算就成了一个重要的研究课题。图8显示了考虑平均场和剩余相互作用的Landau—Vlasov方程对 $27\text{MeV}/A \text{ Ar} + \text{U}$ 算出的系统随时间演变的情况。由于 $T \sim 5\text{MeV}$ 时,热的核发射大量粒子或复杂碎片衰变的时间是 10^{-22} 秒,和能量耗散及热平衡需要的时间差不多,即在热的核的形成和衰变之间没有明显的时间差别,这将造成入射道的动力学对形成热的核有很大的影响。形成角动量、压缩能等集体运动较小的热的核可使所研究的问题简单化,CERN用反质子和核碰撞($\bar{p} + ^{98}\text{Mo}$),反质子在核表面湮灭

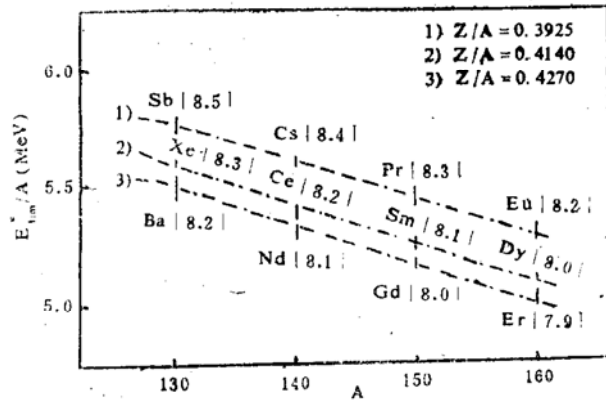


图7. 同位旋和质量对极限激发能的影响

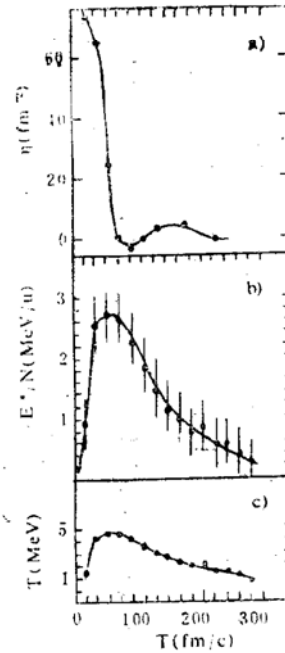


图8. 四极矩、激发能和核温度随时间的动力学演变过程

从而产生角动量、压缩能很小的热的核以供研究。通常通过中能重离子碰撞来产生热的核,这时通过线性动能转移、中子多重性、带电粒子多重性作为灵敏的触发器来选择角动量窗,这些触发器测到的量通常也作为核温度的量度。必须指出过去用单举测到的碎片的能谱,用运动源模型拟合导出核温度的办法,现在普遍认为不可靠或导出的核温度的含义很难说清。图9显示了 $35\text{MeV}/A \text{ Kr}$ 和 Ar 轰击各种靶测到的最可几中子多重性,由此通过中子探测效率及带电粒子多重性等修正可导出核温度(通常在5~6 MeV/A且随靶变

重而减小)，但是对形成同样重的热的核，重的炮弹可带入的激发能更多。如何形成更热的核，吸收的激发能的极限和各种量的关系目前正在深入研究中。

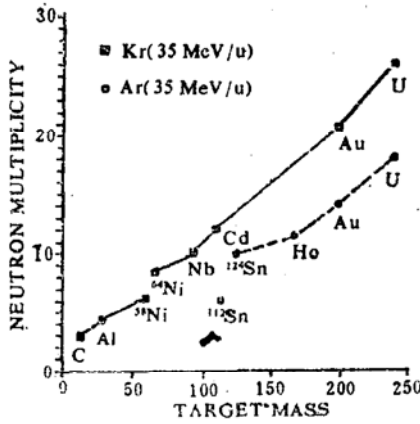


图9. 35MeV/A Ar和Kr轰击不同质量的靶产生的最可几中子多重性

由于 $T \sim 5\text{MeV}$ 时，热的核衰变时间约为 10^{-22} 秒，而裂变的演变过程需要 10^{-20} 秒左右，因此随着核变热，衰变时间变短，发射复杂碎片和多重碎裂的截面都大大增加，这种发射复杂粒子及多重碎裂究竟是一个蒸发过程还是一种新的退激发机制或新的反应机制，现在还没有搞清楚。但大部分人倾向后者，多重碎裂作为一种新的反应机制在会上受到很大重视。从低能开始随轰击能增加先是深部非弹出现，随后非完全熔合和熔合反应竞争，到中能区出现多重碎裂，熔合反应不再可能。C. Ngo指出，多重碎裂反应通常分成两步，先是形成热的核，随后发生多重碎裂，可能这两步不能明显分开。动力学效应的影响，特别是反应初始阶段核压缩的影响是极为重要的。压缩能导致可带进核的激发能大大减小及多重碎裂截面的大大增加。图10显示了热的 ^{208}Pb 核产生多重碎裂或通常衰变随每核子压缩能 ϵ_c 和每核子热激发能 ϵ_T 变化的关系。若 $\epsilon_T = 0, 1.5\text{MeV}$ 的 ϵ_c 就导致多重碎裂；而 $\epsilon_c = 0$ 时，需 $5 \sim 6\text{MeV}$ 热激发能才可导致多重碎裂。产生压缩的热的核后发生膨胀导致多重碎裂，现在还在发展渗透模型等理论方法加以描述。在这个压缩和膨胀的过程中

还可能通过核物质的气液共存区，这些都是目前正在研究的问题。图11显示了C. Cerutti等人用唯象模型描述Ar+Au系统的全熔合、非全熔合（这二者图中用裂变表示）及多重碎裂反应随轰击能增加而演变的过程。对Ar+Au系统，在轰击 $40 \sim 50\text{MeV/A}$

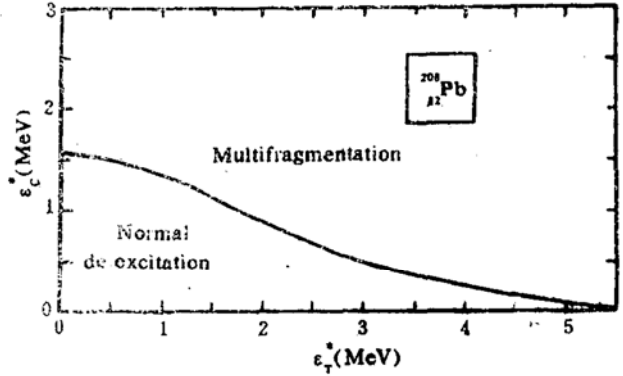


图10. 在压缩能 ϵ_c 和热激发能 ϵ_T 平面上， ^{208}Pb 核发生多重碎裂和通常方式退激的区域。

时出现多重碎裂，到 80MeV/A 就几乎都是多重碎裂反应了。

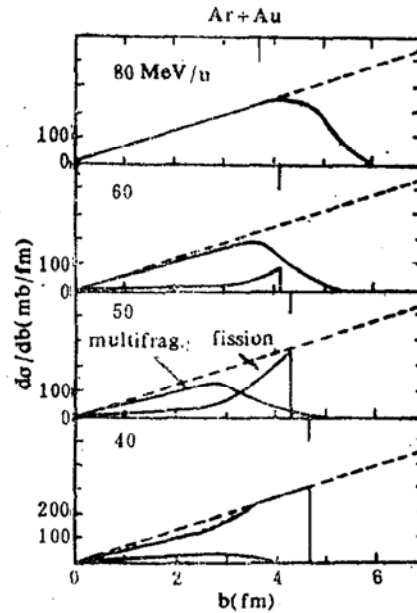


图11. Ar+Au系统在几个不同轰击能下，多重碎裂和裂变的竞争。

三、核反应动力学

低能、中能和高能重离子碰撞动力学，核-核碰撞中的耗散及从有序向混沌的跃迁，重离子碰撞中或超新星爆发产生的高密

度、高温核物质的态方程的实验和理论研究是主要的论题。

从亚库仑位垒区到低能、中能和高能及超高能核-核碰撞的动力学显然有很大的不同。随轰击能增加量子效应逐步减弱，平均场逐步被核子-核子相互作用取代。当然在这样大跨度能区内的核反应动力学已有了一些模型来描述不同能区的核反应动力学，但随着研究的深入各种新自由度的激发和人们对它的认识的增加，核反应动力学的研究也在发展。例如早已有了低能区深部非弹的耗散的动力学描述及高能时周边反应的动力学描述，对中能区的碎裂反应通常是沿用高能反应时的模型来描述的。但中能反应的实验研究表明中能碎裂反应中已有较强的耗散现象，但由于反应时间短能量又不能象低能时全部耗散为激发能，正在发展一些考虑耗散的以高能的擦散模型或旁观者参与者模型为基础的模型来解释这些实验数据。图12显示了26.5MeV/A $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 实验测到了 ^{34}S 能谱及上述模型计算的结果(黑点)，计算可较好解释实验。近物所在会上作了有关非完全深部非弹的特邀报告，并介绍了11MeV/A $^{24}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ 轻系统上观察到非完全深部非弹的实验结果。有趣的是同时西德西柏林提交了20MeV/A ^{20}Ne 在重靶 ^{197}Au 上观察到非完全深部非弹及他们发展的一个动力学裂开模型来拟合实验数据的三篇论文。图13显示了和束流速度 α 符合且减去跟随衰变的出射C和O的实验和动力学裂开模型计算的角关联。

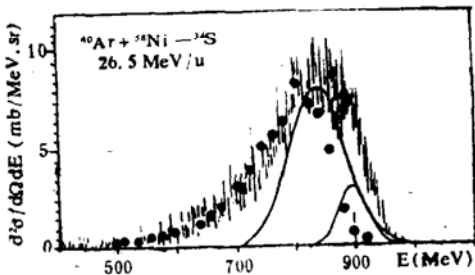


图12. 26.5MeV/A $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 发射 ^{34}S 的实验和理论计算的能谱

度分布很好地展示了 ^{20}Ne 裂开成 α 和 ^{16}O 后 ^{16}O 和靶核发生的深部非弹的情况(图14)，这个计算和符合实验得到的 ^{16}O 的能谱随出射角的变化是很一致的。在各种不同轰击能区的核反应动力学，在各种反应之间的新反应机制都是很值得研究的课题。

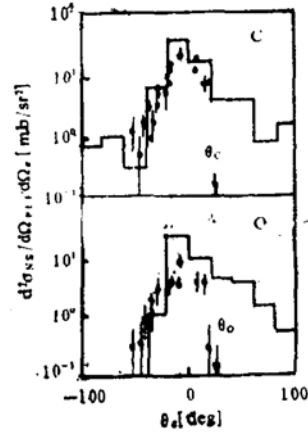


图13. 20MeV/A $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 在扣除跟随衰变后和束流速度 α 符合的类弹碎片实验和理论计算的角关联

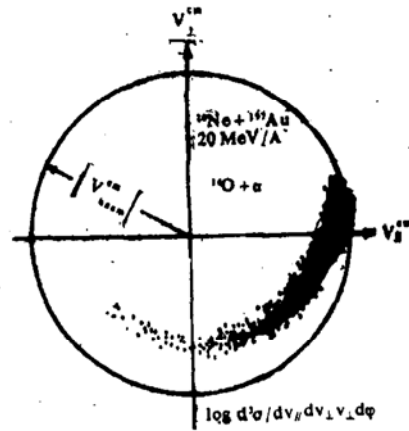


图14. 20MeV/A $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 和束流速度 α 符合的 ^{16}O 碎片的计算的速度分布

中能重离子碰撞中有 π 介子的阈下产生、高能光子和高能质子发射，它们可能都来自于核-核碰撞中协同效应的结果，当然也还有其它解释。这方面的实验和理论也都在进展中。同时中高能重离子碰撞中发射 π 介子和K介子等介子，各种轻子和反轻子的实验也在进展中，会上也报导了以反质子作为探针轰击原子核来研究强子和核的相互作用，同

时也试图把这些出射粒子的实验能谱和角分布通过模型假设和核物质的态方程联系起来。这些从上述实验信息提取核物质在碰撞过程中的密度、温度、压缩能等方法还是有很多问题的,但也是人们去努力研究的问题。图15显示86MeV/A $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 出射高能质子的能谱和随角度变化的实验和理论(考虑协同效应)数据。若理论中没有考虑终道量子统计效应及出射碎片形成几率,那末虽然考虑了协同效应也不能拟合实验数据(图中虚线),但考虑了所有这些效应,则可较好地拟合实验数据(图中实线)。在更高的轰击

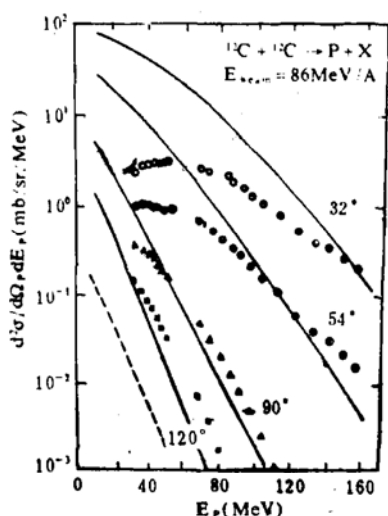


图15. 86MeV/A $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 出射高能质子的实验和理论计算的能谱及其随角度的变化

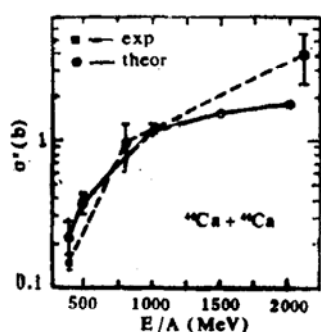


图16. $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 产生 π 介子激发函数

能量下各种介子主要是非相干的核子-核子碰撞中产生的。图16显示 500MeV/A~2000 MeV/A $\text{Ca} + \text{Ca}$ 产生 π 介子截面实验和计算的结果。图17是这种碰撞中产生 η 介子几率(以产生 η 介子的几率和产生 π 介子几率的形

式表示)。费米能区到2GeV/A 重离子核-核碰撞发射各介子、轻子、光子等可用来探索直到2-4倍通常核物质密度时的态方程。

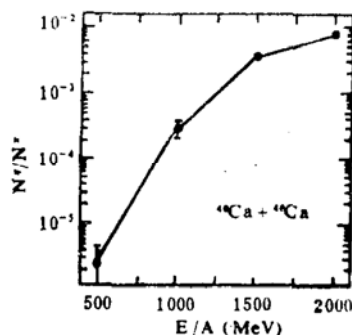


图17. $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 产生 η 介子激发函数

四、夸克禁闭的释放

相对论重离子产生的核-核碰撞研究是会议的一个重点。内容有:相对论和极端相对论重离子碰撞动力学及禁闭释放的可能信息;强相互作用物质的相结构和早期宇宙的强子化;高能碰撞下产生高能 γ 、 π 介子、K介子、激发 Δ 共振、轻子和反轻子及丰重物质的研究等。

理论上早就预言了在超高能重离子的核-核碰撞中可形成高温高密度的核物质,并预言此时可形成夸克胶子等离子体,它将通过从强子物质到夸克胶子物质的相跃迁。这类过程的研究表现为在极端条件下核物质流的行为即相对论的核物质的流体动力学和介质的温度密度变化的模型研究。然后是中间状态即混合相,在形成夸克胶子等离子体前可能于小空间区域内部分出现夸克禁闭释放,从而形成在高密度核子和 π 介子气体中有夸克、反夸克及胶子集团。最后是夸克胶子等离子体形成及其特性的研究,实验上表现为寻找可以产生夸克胶子等离子体的条件(多高能量、怎样的碰撞对有望形成夸克胶子等离子体)及通过发射带电粒子及各种介子、轻子、反轻子发射随实验条件的变化去证实夸克胶子等离子体的形成。这些工作在理论上和实验上都是很困难的,但是也是很有意义

的。最早进行的这类实验是西欧核子中心的 $100\text{GeV}/A$ ^{16}O 和 ^{32}S 轰击金核的实验。图18显示了早期的MIT口袋型计算的作为口袋常数 $B^{\frac{1}{4}}$ 函数的产生夸克胶子等离子体在核物质密度和温度平面上的位置。图中 $B^{\frac{1}{4}} = 245$ 、190和155MeV分别相应于口袋半径0.5Fm、0.65Fm和0.8Fm。已经出现了一些其它模型，考虑了更多因素修正了这类计算。会上还有天体物理及粒子物理学者参加了讨论。在这方面的主要特邀报告有：“极端相对论碰撞动力学和禁闭释放的讯号”、“强相互作用物质的相结构和禁闭释放”、“极端相对论能量下质子-核碰撞动力学”、“60和200GeV/A碰撞中产生的光子和反轻子的性质”、“14.5 GeV/A碰撞下高能丰重子物质的研究”、“60和200GeV/A下强子和二粒子关联的性质”及“60和200GeV/A碰撞下的横向动量和多重性分布”。会上有人认为强子相到夸克胶子等离子体跃迁的早期阶段的实验特征是光子产额增加一个量级，并对此展开了热烈讨论。

会议的论文也有少量介绍加速器和实验技术进展的论文。例如瑞典在 Uppsala 的重离子加速器，由 $K=200$ 的同步回旋改进而成，已获得 $50\text{MeV}/A$ α 、 $35\text{MeV}/A$ ^{12}C 等束流。他们将加上 ECR 离子源、后加速及贮存环。质子能量 $13.6\text{GeV}/A$ ，对 $Q/A=0.5$ 的轻重粒子可得到 $460\text{MeV}/A$ 。在中高能重离子碰撞中，由于出射产物能谱、质量电荷谱很宽和多重性很高，发展了射程对数响应的探测系统，并由多个这种单元组成整个探测装置。图19显示了美国伯克利 Bevalac 上的一个这种装置。其中前方向由34个1mm快 ΔE 和 40cm 慢 E 的光垒层塑料探测器组成，其它角度方向是8个对数响应探测器系统 (Pagoda)。每个 Pagoda 由二个多丝正比 (测位置和时间)，一个正比计数器及一个电离室和 9个 1mm $\text{CaF}_2 \Delta E$ 、25cm 快塑料闪烁体组成的光垒层探测器组成。它可测轻粒子、复杂碎片、裂变碎片及重的靶剩余核。这种对数响应的重

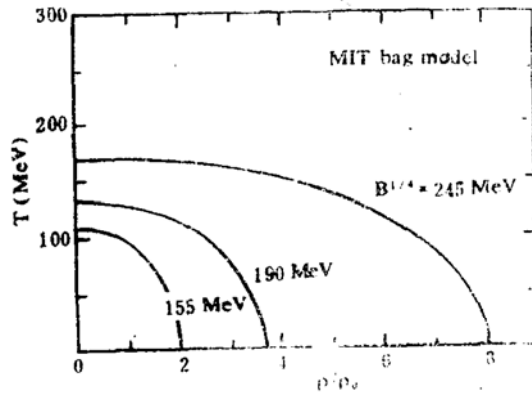


图18. MIT口袋模型描述的从强子物质到夸克胶子等离子体跃迁的相图

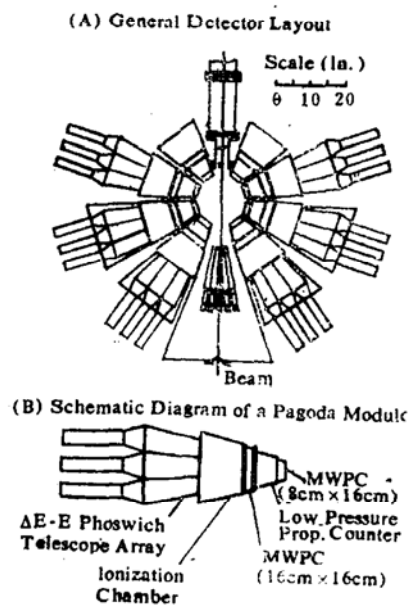


图19. 适应中高能重离子反应研究的对数响应探测器系统

离子探测单元对中高能重离子碰撞实验研究是极为重要的。另外还有用新型材料 BaF_2 来测高能 γ 及测量 π 介子谱仪等方面的介绍。

另外还有重离子由于原子碰撞过程产生的电荷态分布、中能重离子碰撞产生次级奇异核束的实验方法及现有这种装置的探测极限、相对论重离子碰撞中的电磁过程、用对称碰撞对的角分布测定自旋、重离子碰撞中产生的 K 壳层激发等实验方法和基本实验数据积累方面的文章。由于会议主要集中在物理问题方面，因此实验技术、实验方法和基本实验数据积累方面的文章不多。但在讨论中及有些特邀报告中对此非常重视。