

相对论核-核碰撞 (续完)

R. Stock

4. 作为火球温度计的 π 介子产额

在研究高压火球物质的特点时，已经提出了另一个这类基本的可观测量，这就是在接近中心相对论碰撞中观测到的 π 介子产额或 π 介子多重性³³⁾。图14说明了构成这种类型分析基础的想法³⁴⁾。这里示出了作为压缩(程度) ρ/ρ_0 函数的核基态能量的略图，式中 ρ_0 表示正常核物质的密度。这条曲线用于表明基态能量，它给出了也称为核物质状态方程预期行为的略图，这个量是我们希望由实验确定的。这个压缩过程大致分为三个相继阶段：相互作用前、火球持续期间和稍后的凝结阶段。在第二阶段(火球)时，我们将发现系统主要包含压缩能和二次热能。前者消耗在由密度 ρ_0 到密度 ρ 过程中克服甚小距离时的核子-核子排斥；而后者产生于相互穿透期间，我们在第2节已经看到它近似于匀配。这两个子成分耗尽了束流能量提供给该系统的全部可得到的能量。在第3阶段时，压缩压强导致膨胀，我们又回到低

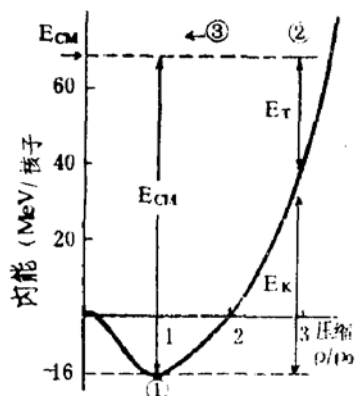


图14 作为密度函数的内能。反应周期用1(相互作用开始前)，2(最大压缩，能量分配在热能和压缩能之间)和3(膨胀)表示。

密度而压缩能转化为动能自由度和在终态幸存下来的 Δ 和 π 介子的质量。

通过可以观测到的热能部分的测量换句话说这个合适的温度计，上述思想现在已用于确定火球阶段热能部分和压缩能之间的匀配。正如图7所示的，高密度阶段火球中开始出现的 Δ 和 π 介子的数目直接正比于火球中的热能容量¹⁷⁾。因此，知道了来自入射束能量的总能量和由 π 介子产额测定了热能份额，我们就能估计在该具体反应中的压缩能份额。这样一来对于一系列的入射能值，就相当于火球中可达到的不同的最终压缩，我们能够依照核物质基态能的这个曲线描绘出几个点。另外业已表明：在火球持续期间这一阶段的近似化学平衡中， Δ 和 π 介子自由度的丰度与此时的重子数有关，在膨胀过程中它们保持不变，这就是说最终测量到的每参加者重子的 π 介子多重性类似于高密度阶段中的 π 介子+ Δ 的丰度^{17, 33, 34)}。只要采用下述很简单的想法，即 π 介子和 Δ 的丰度只是由可得到的热能成比例地引起的，那末这个丰度就能够作为热能容量的温度计。应该指出：膨胀持续期间正是 π 介子与核子作用产生 Δ 的过程；反之亦然， Δ 亦能衰变成 π 介子和核子。但是，尽管上述相互作用在膨胀期间占优势， π + Δ 的“类 π 介子”的自由度总和却并不改变能级占有度。

用这种方法得到的数据的一个典型例子如图15所示。对于从1GeV/u到1.8GeV/u五种不同能量时的Ar+KCl，用最小偏压触发方式的流火室研究了 π^- 介子产额。把 π^- 多重性作为参加者质子数目Q的函数得到的曲线，在每种能量时都是相当直线性的。把数

据外推到理想对头碰撞 $Q = Z_1 + Z_2$ 的极限情况,是相当简便的。在零碰撞参数的极限情况下,每参加者重子的 π^- 数目是可观测的“温度计”。每重子的总 π 介子多重性由等压线模型 $n(\pi) \sim 3n(\pi)$ 给出。更进一步的分析示于图16。它给出了该火球热能容量和平均 $\pi + \Delta$ /重子丰度之间的关系,而后者是用Cugnon¹⁸⁾和Yariv-Fraenkel¹⁹⁾级联模型这两个“热”模型以及化学平衡模型^{17, 21)}计算得到的(参见图7)。 $\langle \pi \rangle$ /重子这个数据外推到 Ar + KCl 对头碰撞,也显示出随 $c.m$ 能量增加而相当线性地增加,但在能量标度上偏离。分析火球中的能量分配是很简单的;

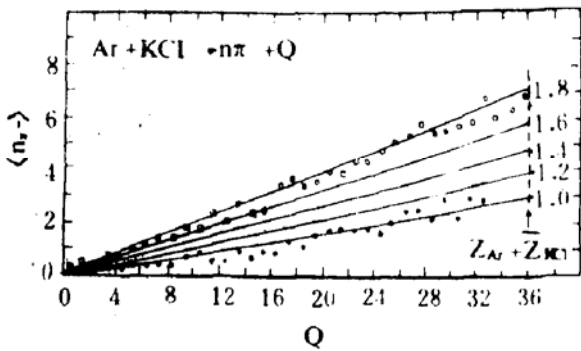


图15 入射能为1.0到1.8GeV/u时Ar + KCl中的 π^- 介子多重性,该图给出了它与参加者质子多重性的关系(参考文献17)。除1.0和1.8GeV/u的情况以外,都只是由内插线给出。

$$E^{c.m.}/A = E^T/A + E^c/A \quad (2),$$

这正如图14所暗示的,之后导致对每一数据点确定 E^c 。因此热模型曲线用于测定 π 介子温度计(由 $\langle \pi \rangle/B$ 测定 E^T)。

这个方法测定作为束流函数的压缩能。由于我们主要兴趣在于 E^c 和密度之间的关系,而后者已在它的能量相关性中测定了。无论是由级联模型³³⁾(对于该反应的高密度阶段)还是更一般地由化学模型和Rankine-Hugoniot冲击压缩方程^{1, 3, 35)}的结合,都能够得到压缩能。图17给出的用这两种方法得到的结果是相当类似的。 $W(\rho) = E^c(\rho) - 10\text{MeV}$ 是每重子的压缩能减去核物质的基态结合能。这个结果示于图17,它给出了大块核物质结合能的第一次实验估算,表明它随

密度平稳增长,同时揭示出“刚性”核介质。这与场论的最新预期是符合的。把实验结果用常见方式参数化,

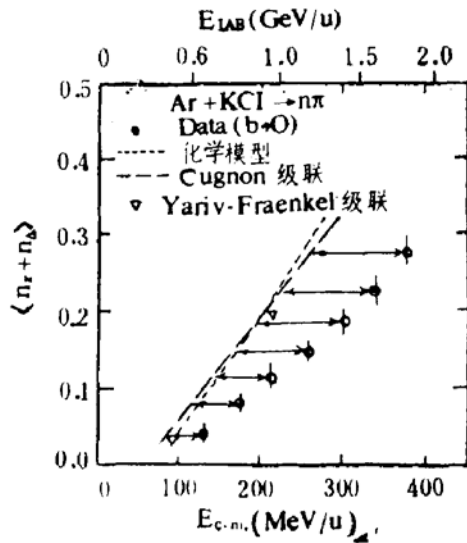


图16 作为能量函数的每参加者重子的 $\pi + \Delta$ 丰度,图解说明了从数据和热模型比较提取压缩能的方法(箭头)(参考文献17)。

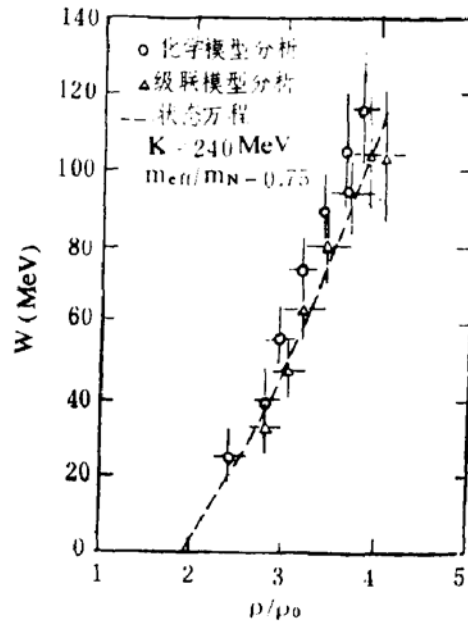


图17 作为密度函数的核物质基态能量。给出了用两种不同的热自由度处理得到的结果(参考文献17)。破裂线是由场论得到的(参考文献36)。

$$W(\rho, T=0) = \frac{K}{18\rho_0^2}(\rho - \rho_0)^2 + W(\rho = \rho_0, T=0) \quad (3),$$

要求压缩常数 $K \sim 240\text{MeV}$,这与由图9和图12流变角得到的大小相同。但是应当指出,图17的结果不能对 $\rho = \rho_0$ 附近的情况进行描

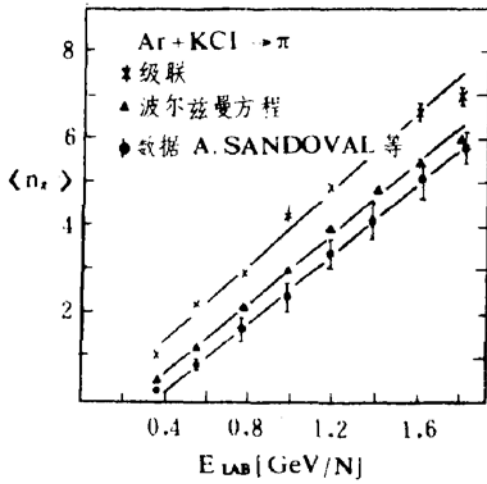


图18 Ar + KCl 中的 π^- 介子多重性。数据(参考文献8)与两种微观模型进行了比较,波尔兹曼方程模型框架中包括了平均场效应(参考文献30)。

述,而K通常就在这里决定,并且在 $\rho = 3\rho_0$ 时的W数据重演实际上用线性增加不如用二次方增加。核物质对压缩的“刚性”共振,正如此处要表明的,已从约两个太阳质量的相当质量的中子星得到支持³⁸⁾。在这里指出下面的情况是合适的。尽管W(ρ)经常倾向于称为状态方程,后者由压强—密度关系式给出:

$$P(\rho, T) = \rho^2 \left[\frac{dW(\rho, T=0)}{d\rho} + \frac{\partial E^T}{\partial \rho} \Big|_{S=0} \right] \quad (4),$$

此式中知道W(ρ)能够计算的只是冷介质P($\rho, T=0$)的压强(类似于中子星)。已经弄清了介质的特殊加热,以便得到最终温度时的P。在上面描述的方法中,已经使用了 π 、 Δ 和核子的理想气体混合物的热自由度,因此不管量子数和介质对特殊加热的修正³⁹⁾。但是,在所讨论的高温环境下, $50 \leq T \leq 110$ MeV,上述近似或许不是太严密。

这类方法^{17, 33, 34)}就是通过“ π 介子温度计”效应已接近得到核物质状态方程。在最近的理论文章^{29, 30, 40-42)}中已热烈地讨论了这类方法。这类方法的一般做法是引入了微观动力学描述,象Pauli修正、核子有限尺寸、两体势等。这些改进无论是对特殊加热项还

是对在微观模型中隐含的状态方程都有关系。因此的确这些模型应当重演依据介质参数变化的 π 介子数据(和流变角),也就确定了隐状态方程。已经发现预期的 π 介子产额确实对于核介质的刚性是灵敏的,当然不言而喻是通过各种参数表现出来^{29, 30, 40)}。Kruse等人的结果³⁰⁾示于图18(我们已经看到图12中那些流变角的结果)。这里的微观方法是根据包含Vlasov-Landau平均场项的波尔兹曼方程,由它得到的 π 介子多重性的确相当靠近数据但定量符合尚嫌不足。

尽管尚需更多的工作,但是业已增加了信心:借助于流变气压计和 π 介子温度计这两个基本探针,我们已经来到紧靠问题的核心(核物质光谱学,核物质状态方程),也就是说相当靠近了这一领域诞生时的原始理想公式¹⁻³⁾。

5. 走向夸克物质

我们现在从Bevalac-Dubna能量范围转向极端相对论重离子反应研究的情况,这类研究将来在象CERN SPS和Brookhaven AGS那样的高能加速器中进行。让我从我们在Bevalac收集到的数据出发,把它们在能量上向上外推。对于产生夸克物质的无约束状态(deconfined state)的关键量将是每立方费米的能量密度,它能在相互作用区域累积⁴³⁾。图19示出了我们现有知识的概况和作为炮弹实验室能量函数的这个量的有关预期值。在1-3.5 GeV/u的较低能量测量时,箭头表明相应于Saturne、Bevalac和Dubna的情况。我们认为有很站得住脚的理由:在Dubna最高能量时,事实上能量密度已经接近达到约1 GeV/fm³。在该图中我们看到:在向上外推到AGS和SPS的箭头所指能量时,数据不确定性并不总是太大。图中的实线是在没有考虑任何透明度效应的情况下得到的,它上升到超过3 GeV/fm³的范围已经在我们遇到高达225 GeV/u的SPS能量范围之

前。如果我们考虑部分透明性，实线或许在Dubna能量⁴⁴⁾附近就要恰当地修正，得到所示的虚线。在SPS能量时已超过 $3\text{GeV}/\text{fm}^3$ 。绝大多数理论研究都预期夸克物质相变，存在于约2到 $2.5\text{GeV}/\text{fm}^3$ 处。用格栅方法得到约 250MeV 的相变温度，它应当也需要 $2.5\text{GeV}/\text{fm}^3$ 用于压迫强子物质进入无约束相。关于未来加速器计划和达到夸克物质相变的一些最佳化方法，在这个曲线图中也得到了启示。

在这样的实验中所涉及到的实验努力集起精华于图20中。该图给出了 $50\text{GeV}/\text{u}$ 时氧在铅靶上引起的中心反应的模拟，这是在磁场中即这是第一张流光室照片。该图使你得以看到极端相对论重离子碰撞。该图中的

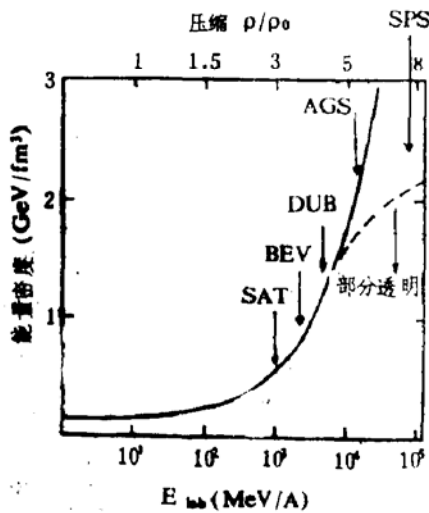


图19 在各种不同加速器和高能事件中达到的火球体积的每 fm^3 的密度的略图。上标给出了重子密度的估计。

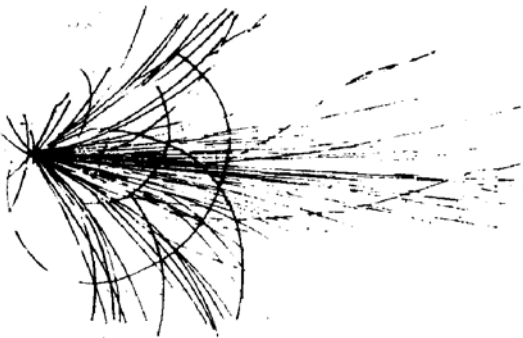


图20 模拟事件， $50\text{GeV}/\text{u}$ 时 $^{16}\text{O} + \text{Pb}$ 中心碰撞，假定叠加着无关的强子核碰撞。

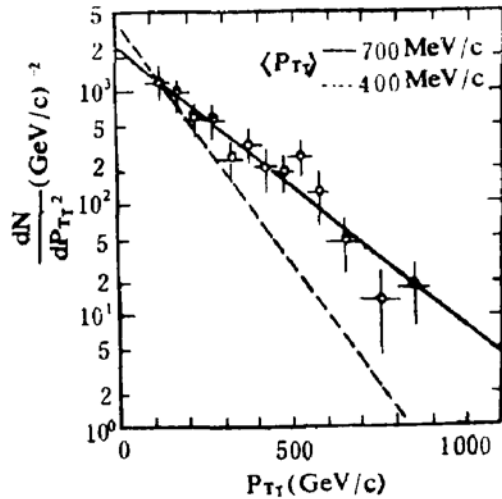


图21 约 $100\text{TeV}/\text{u}$ 的单个 $\text{Ca} + \text{C}$ 碰撞时光子横向动量分布(参考文献46)。

多重性约200带电参加者粒子。但是应当指出，我们在Bevalac已经处理过120的多重性；多重性乘以2并不能表示出这个至关重要的问题。我们希望，预计在1986年开始的CERN SPS的第一批实验确实能够提供这里示出的这类图象。但是，我不打算过分深入到我们的加速器实验计划中去，因为我希望宇宙射线界已经给我们提供了极有挑战性的第一组数据，这组数据与夸克物质形成的问题有关，几乎就意味着夸克物质的发现。图21示出了JACEE小组发表的数据的富有特征的部分⁴⁶⁾。该图所示为约 $100\text{TeV}/\text{u}$ 时Ca打C的一次单个宇宙射线的结果。在这类事件中遇到的多重性约1000，这样以来每个事件构成单个粒子径迹的集合，这就能够在横向动量谱中收集起来。该图所示是 γ 粒子的横向动量。假定它们由 π_0 衰变产生，就能估计出在该事件中产生的 π 介子的平均数 P_T 。这个结果即 $700\text{MeV}/c$ 在传统的Hagedorn热力学中相当于超过 500MeV 的温度。这些数据第一次表明，我们达到了火球状态，它远远超出强子物质边界之外。JACEE的几个反应中的横向动量数据系统收集正在继续进行中。让我在图22中示出一个这类事件的多重性矩形图，它是在几乎20年前的一次宇宙射线研究⁴⁷⁾中观测到的。约 $300\text{GeV}/\text{u}$ 的Ca粒子打在Pb核上。

这个事件的多重性约600, 在伪速度中的分布有一个相当尖锐的峰, 在峰处达到每单位速度约150到170带电粒子。中等速度时的速度密度和由光子量热计观测到的 $\langle P_t \rangle$, 现在这两组信息由JACEE小组⁴⁶⁾对约50个极端相对论反应事件进行了收集。这就得到了示于图23的结果。这里标绘的是作为 GeV/fm^3 表示的能量密度标度函数的每 π 介子的平均横向动量。这相当于由中等速度时观测到的多重性密度和由观测到的粒子的平均横向能来估计中等速度时的能量密度。Bjorken⁴³⁾给出了下述简单的关系式:

$$\epsilon = \frac{1.5 \langle E_t \rangle}{2\pi A^{2/3}} \cdot \frac{dN}{dY} / Y = 0 \quad (5)$$

式中A是较小的碰撞参加者的质量。在这个令人惊叹的标绘中, 我们看到能量密度一超过约 $2.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 数据中出现尖锐向上的趋势。在该点上 π 介子的平均横向动量约 $0.5 \text{ GeV}/c$, 这相当于约 200 MeV 的Hagedorn温度。因此在这两种观测中我们都和预期精确符合。在该点相变理应存在。该图明确表明 $\langle P_t \rangle$ 较之预期值惊人增加, 这反映了熵由于相变而增加⁴⁹⁾。

这些观测为同一目的的系统加速器研究计划增添了新的动力, 因为在加速器实验中

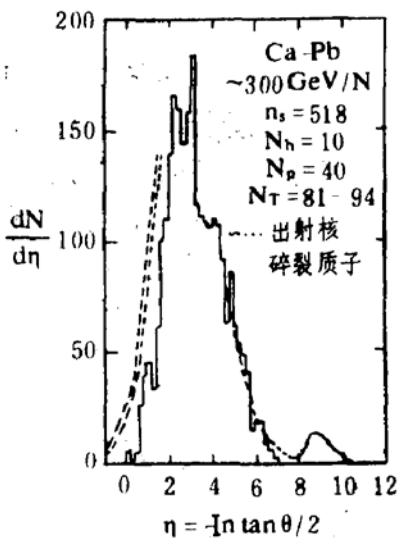


图22 约 $300 \text{ GeV}/u$ 的单个Ca + Pb事件中, 带电粒迹与伪速度 η 的分布(参考文献47)。

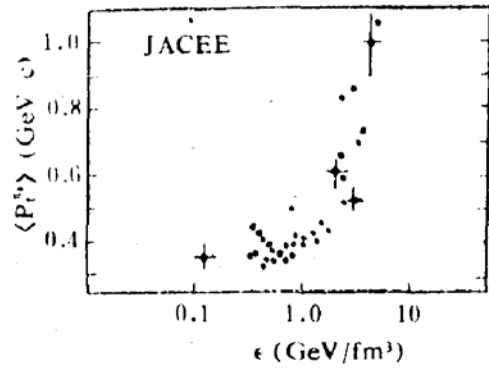


图23 JACEE小组分析过的约 $1 \text{ TeV}/u$ 的宇宙射线事件, 作为能量密度 ϵ (由公式5得到)函数的 π 介子平均横向动量(参考文献48)。

进行这些观测比在宇宙射线事件的乳胶中观测要远为切实可行。因此当我们展望1986年开始进行的实验计划时满怀信心, 那时在CERN的SPS应当开始运行。如果联合的GSI-LBL-CERN首创的氧离子预注入器使用的话, 其氧束能量可高达 $225 \text{ GeV}/u$ 。约在同一时间, 在Brookhaven预期AGS可提供 $14 \text{ GeV}/u$ 的硫束。计划使用新升降器的规划, AGS应当能使金束能量高达约 $12 \text{ GeV}/u$ 。最后, 正如我们所知道的, 在Brookhaven、Berkeley和Oak Ridge有几个致力于重离子碰撞的计划。最直接可以得到的合适的碰撞器就是恰好接近完成的CERN的ISR。

让我以说明在Berkeley和Dubna能量时的重离子碰撞研究来总结这次谈话。这类研究已从约10年前有关核物质状态方程的理论想法就开始了, 现在已达到某种成熟, 这基本上要归功于 4π 探测器综合实验的研制进展。我们观测到火球内部事实上能量已达到了近似平衡分布, 如果是在对头碰撞中轰击足够重的核的话。这样以来我们就能够使用微观语言, 并且除了级联模型以外带有若干改进的微观模型也正在进步完善之中。现在我们能够肯定地说存在高密度和高温度的核物质流, 我们已经指出侧向流的定量行为对核物质状态方程的刚性是灵敏的。这个流分布能够作为初始压强分布的气压计, 它用于测定这个流的特性曲线。第二个基本的可观

测的量也已推测并使用,那就是作为火球温度计的 π 介子产额。如果假定只是由火球能的热部分产生,压缩能可由能量守恒得到。迄今为止可以得到的所有信息表明,核物质状态方程存在相当的刚性,这与我们由短距离时核子-核子力的预期是一致的。在今后几年我们将会看到,在进一步研究压缩核物质的状态时,无论实验还是理论模型都将更趋精致。同时我们现在就要做好准备,向前迈进,走向夸克胶子等离子体的新的科学前沿。我已提醒你们,第一批宇宙射线的结果强调了这一事实,我们从未离开正确的航道。

参考文献

33. R. Stock et al., Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1236
 34. R. Stock et al., Physica Scripta T5 (1983) 130.
 35. H. Stöcker, W. Greiner, W. Scheid, Z. Phys. A286(1978)121; P. Danielewicz, Nucl. Phys. A314 (1979) 465.
 36. J. Boguta and H. Stöcker, Phys. Letters 120B (1983)289.
 37. F. Serr, G. Bertsch, and J. P. Blaizot, Phys. Rev.C22 (1980) 922.
 38. N.Nauenberg and G. F. Chapline, Astrophys. Journ. 179 (1973) 277.
 39. I. N. Mishustin, F. Myhrer, P. J. Siemens, Phys. Letters 95B (1980) 361.
 40. M. Cahay, J. Cugnon, and J. Vandermeylen, Nucl. Phys. A411(1983) 524.
 41. G. F. Bertsch et al., Phys.Rev. C29 (1983) 673.
 42. Y. Kitazoe et al., Phys. Letters 138B (1984) 341.
 43. J.D. Bjorken, Phys.Rev. D27(1983) 140.
 44. M. Guylassy, Nucl. Phys. A418(1984) 59c.
 45. H. Satz, Nucl. Phys. A418 (1984) 447c.
 46. T. H. Burnett et al., Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 2062.
 47. K. Rybicki, Nuovo Cim. 28 (1963) 1437; I. Otterlund and E. Stenlund, Physica Scripta 22 (1980)15.
 48. O.Miyamura, JACEE collaboration, Proceedings of Quark Matter 84 (Helsinki), to be published.
 49. L. van Hove, Phys. Letters 118B (1982) 138.
- (颜家骏译自 Nuclear Physics Vol. A434 (1985) 550—562)

(上接45页)

杨福家同志还在会上宣布,由本届离子束分析会组委会讨论,全国第二届离子束分析会议1988年初在北京召开,由北大、北师大联合筹办。在此期间,将举办小型学术讨论会。初步决定1986年由物理所举办轻元素分析小型讨论会,1987年由冶金所和原子核所举办背散射沟道效应讨论会。

这次会议的成功召开将促进核分析技术在国民经济各部门的推广应用。《人民日报》、《光明日报》、《文汇报》、《解放日报》、《上海科技报》和上海电视台都先后作了报导。这次会议采取了与国际离子束分析会议类似的组

织形式,并邀请了15名外宾参加。国外几位专家对我国离子束分析工作的成果有较好的评价,认为已取得“了不起的进展”。同时也提出只有加强基础研究,才能更多地做出超过前人的成绩,并希望大大提倡学术方面的争论,对研究成果的反复推敲,形成浓厚的学术争辨气氛。在会议经费筹集方面,首次尝试了由国外公司资助的办法。美国ORTEC公司、NEC公司和丹麦DANFYSIK公司的资助占会议总经费的六分之五。复旦大学为开好这次会议做了较周密的安排,与会代表对会议的组织工作表示比较满意。