

——一九八九年巴西国际核物理会议介绍

姜承烈 赵 葵

(中国原子能科学研究院)

一、会议一般情况

每三年召开一次的国际核物理会议于1989年8月21—26日在巴西圣保罗召开。相对地讲,这个会议规模较小,1980年在美国Berkely召开的会议有上千人参加;1983和1986年在意大利Florence及英国Harrogate召开的会议分别也有700—800人参加。这次会议的各国代表共465人,其中巴西代表120人,我国代表有杨立铭,姜承烈,萨本豪,陈崇光以及何国柱先生。会议期间,国际纯粹物理与应用物理联盟的核物理分委员会召开了年会。年会上决定下一届国际核物理会议将于1992年在西德慕尼黑附近召开。

此次会议共收到文章近470篇,中国送交了44篇。大会特邀报告26个,分会报告32个,其中13个也是特邀报告。值得提出的是,中国原子能科学研究院的萨本豪等同志的文章被采用为分会报告,题目是“Mass Dependence of the Phase Transition in Disassembly of Hot Nuclei”。这是我国核物理工作者在这么大规模的世界性核物理会议上第一次做这类报告。会议的最后一天,由Amand Faessler做了一个总结报告,受到很高的评价。Peter Paul做了题为“The Future of Nuclear Physics”的报告。从大会报告内容来看,这次会议比起上次Harrogate会议来更为侧重能量稍低的核物理研究。

在本文的第二部分,将会上有兴趣的问题参照Faessler的总结报告归纳为六个部分,并侧重于介绍前三个部分。

二、大会报告中着重讨论到的一些问题及其新进展

1. 用重离子核反应研究核结构

A. 高自旋态的超形变 (Superdeformation at High Spins)

这是当前核结构研究中的最大热点。超形变带的发现是英国Daresbury的Peter Twin在86年的Harrogate会议上宣布的。这几年来有关超形变的研究有了很好的发展。

首先是又发现了一批超形变核,并测出了一些核的四极矩。发现的新超形变核集中在三个区域,见图1。第一个是 $A=150$ 区域,在这个区域, ^{152}Dy 是Twin发现的第一个超形变核,接着在这个区域里先后共发现了九个超形变核,它们的椭球轴之比是2:1:1;第二个是 $A=130$ 区域,已发现了七个超形变核,它们的椭球轴之比是3:2:2;最近又有人在 $A=190$ 区域发现了三个超形变核,它们的椭球轴之比是1.6:1:1。当初确证存在超形变带的证据是由于观察到能级间距很小,从而说明它们有大的动力学转动惯量 $J(2)$ 。现在好多实验利用多普勒位移法测量了这些核的能级寿命,发现这些核的能级寿命确实都非常低,测出它们有大的四极矩。例如对 $A=150$ 区, $Q_0 \sim 17-19\text{eb}$,这与超形变形状预言的数值很好一致。

其次是较好地研究了超形变核粒子的组态,从转动惯量出发,对超形变的粒子态的组态有所确认。大致的结论是:高 N 壳的少数核子起着重要的作用。对Gd, Tb和Dy的组

态分别为 $\pi(N=6)^{2,3,4}$; 对 $n=82, 84$ 和 85 为 $\nu(N=7)$, 对 $n=86$, 为 $\nu(N=7)^2$, 可能对 $n=87$ 为 $\nu(N=7)^3$ 。

第三是对超形变带的布居有了较仔细的研究。在 $A=150$, 所有超形变带的相对强度数据非常相似。如图2所示。它们在最高自旋处的4—5个跃迁里有一个快的上升, 跟着一个近似常值的强度分布, 然后是带的退激的一个快下降, 这种布居的特性与通常的形变转子的Yrast态的情况有明显的差异。另外实验上发现, 当入射粒子能量增高时, 一般增加了平均的入口自旋, 但现在对 ^{152}Dy , 超形变带的布居并不改变。即使最大角动量增加了 $10\hbar$, 还是一样。看来角动量究竟能记录到多少值并不决定于什么核, 而主要决定于测量仪器的水平。

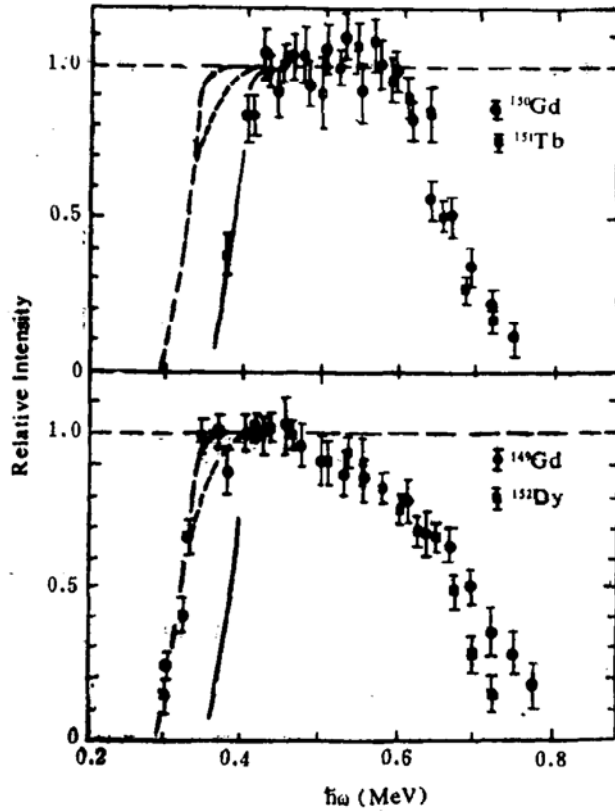


图2. 一些 $A=150$ 核的超形变带的带内相对强度。所画的线表示了带退激的频率变化。

到目前为止, 所找到的超形变核的长短轴之比最多是接近于2:1的叫做“Superdeformation”。那么下一步的任务是找长短轴之比为3:1的形变核, 叫做“Hyperdeformation”。当然这种带的布居会更弱, 因此必须提高实验设备的探测效率。相应的计划已经提出。美国已决定在橡树岭国家实验室做一个 γ -Sphere, 由100个BGO-HPGE反康谱仪组成, 立体角为50%, 480个小的BGO晶体构成了多重性滤波器和其它信息源。此设备拟投资20百万美金, 三年完成。欧洲也打算做一个Euroball。这些设备的奋斗目标使五重符合计数效率能相当于现在的三重符合计数的效率。

B. 巨共振 (Giant Resonance)

这是核结构研究中的另一个热点。近年来, 此项研究的最大进展是找到了新的工具, 即用重离子的库仑

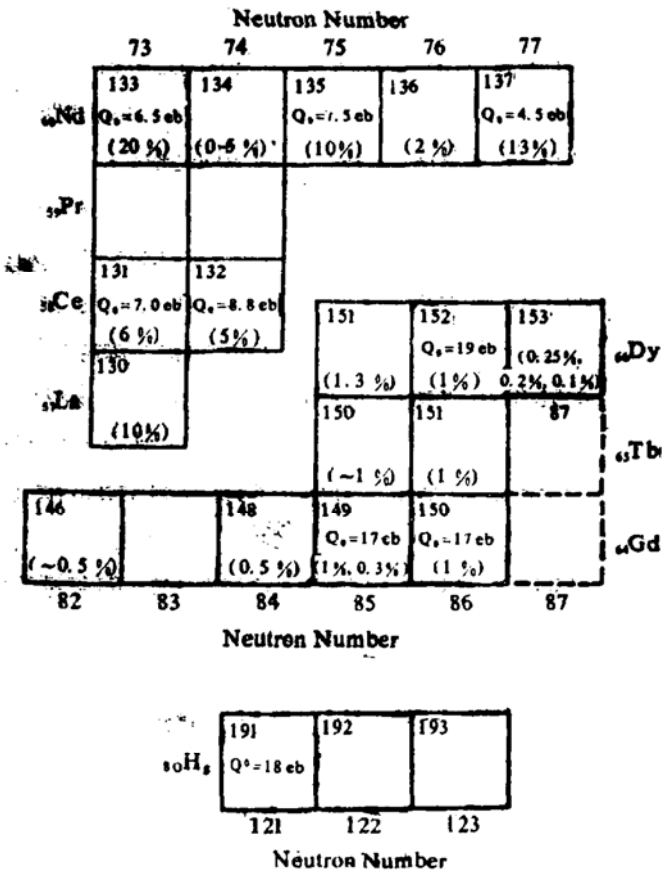


图1. 在 $A=130, 150$ 和 190 区域存在的超形变核, 在方框左上角有质量数的, 表示有已确定的超形变带。括号里数字表示相对于总的布居, 超形变带的布居强度。

* ^{131}Ce 和 ^{134}Nd 的 γ 线是相同的, 因此已认为 ^{134}Nd 的跃迁是定错的。

激发来研究巨共振。用电子束研究巨共振时，由于电子的速度接近光速，相互作用可看做是“Sudden”。 γ 射线的强度随 γ 射线的能量变化平缓。当用重离子研究巨共振时，其速度低，相互作用可看作是“Adiabatic”， γ 射线强度随 γ 射线能量下降。而当重离子能量升高时，巨共振的截面上升得很快。这样使得巨共振研究随着重离子入射能量的增高而进入了一个有利的状态。图3是Fred Bertrand给出的结果。可以看到，对于 ^{208}Pb (^{17}O , $^{17}\text{O}'$)实验，能量为84MeV/A的产额要比22MeV/A的明显增大(上图)。中间一张图给出角分布，可见完全集中在前冲角。下图给出外推到更高能量的计算结果，可见随能量上升，截面上升很快，但截面也愈来愈集中于小角区，这样对谱仪就提出更高的要求。

C. 分子共振(Molecular Resonance)

三十年前重离子物理中首先发现的惊奇现象之一是在 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应中观察到了分子共振。这些共振现象现在仍在继续研究之中。看来至少是对直到 ^{68}Ni 为止的 α -粒子核是一个普遍的现象。至今这些结构还不能用已知的核结构知识给以很好的解释。现在有人企图用动力学的核对称性去解释，例如对于 $^{16}\text{O}+^{24}\text{Mg}$ 体系的一个新的计算结果，见图4。

D. 新核素(New Nucleide)

重离子核反应在创造远离稳定线的新同位素方面是非常有用的，这包括丰中子和丰质子这两边。值得提出的一个比较瞩目的进展是在Daresbury的反冲分离器上找到的 ^{80}Zr 新核素。它是双幻数核。这个实验代表了目前实验的水平，见图5。

E. 奇异的放射性(Exotic Radioactivity)

继 ^{14}C 放射性发现后，奇异衰变研究在不断发展中，近来使用磷酸盐玻璃固体径迹探测器看到了来自 ^{234}U 和 ^{238}Pu 的 ^{24}Ne 和 ^{24}Mg 发射的奇异的衰变方式，见图6。它们的分

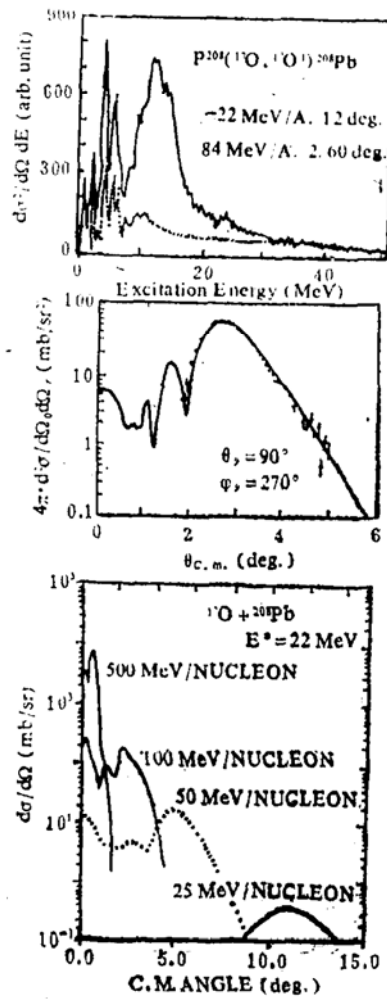


图3. 在GANIL, 借助于 ^{17}O 在 ^{208}Pb 上的库仑激发观察到的巨共振(由Bertrand et al.). 中间图是角分布, 第三张是外推到高能时的计算结果。

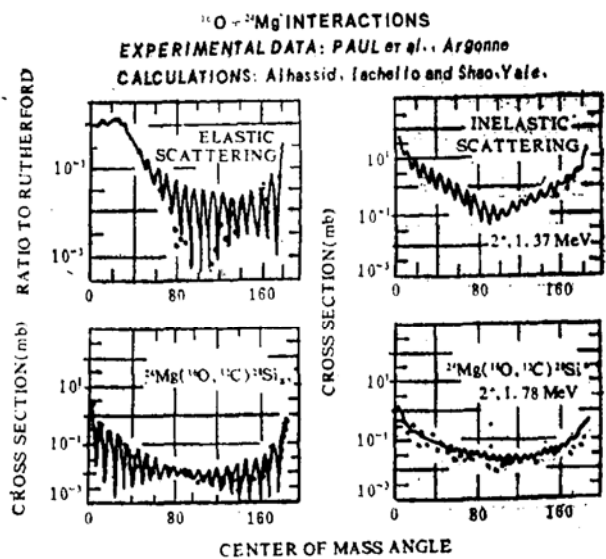


图4. 用基于动力学对称性的模型, 对 ^{40}Ca 的一个分子共振上的角分布实现拟合的一个尝试。

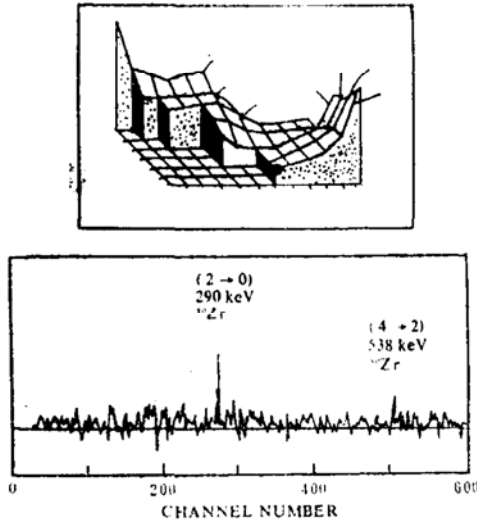


图5. 观察到幻数核 ^{80}Zr 的结构第一个数据 (由Lister et al.), 来自Daresbury反冲分离器。

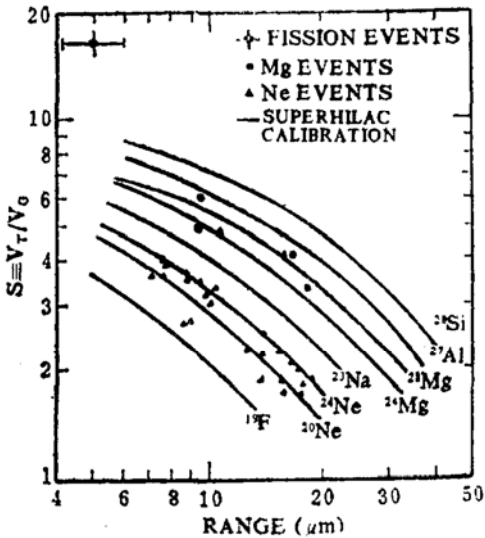


图6. 从 ^{234}U 的衰变所探测到的径迹, 表现了奇异的衰变方式的证据 (由Price et al.) 可见Mg和Ne重同位素在能量上占优势。

支比比起 α 衰变或裂变来讲是 10^{-16} 。

F. 远离稳定线的轻核特性 (Properties of Light Nuclei far from Stability)

这是此次会议给予高度重视的一个新的实验方面, 即用放射性束流做实验的问题。实验首先是在美国伯克莱实验室发展起来的。用它来研究核的“Rydberg”态。实验测量到 ^{11}Li , ^{14}Be 和 ^{17}B 核有大的半径。例如测量 ^{11}Li 核外面两个核子的动量分布, 并由测不准关系, 定下了这两个核子在核心外面运动的半径, 见图7。这类实验已引起人

们的普遍注意, 认为是非常有前途的。

会上介绍了两个设备的计划, 都非常强调可以加速放射性核。一个是GSI发展的重离子计划。它把可加速到 11.4MeV/A 的重离子加速器LINAC做为注入器, 注入到名为SIS 18的环中, 加速后再引入到贮存环ESR中, 中间的一个FS段用重离子核反应产生放射性产物, 亦可注入ESR中。由于ESR中有电子冷却段, 就可以大大提高束流品质。这样这个设备建立后得到的放射性束流品质能够好到和现在初级束一样的水平。第二个计划是日本的“Japanese Hadron Project”, 见图8。拟建造强流的 1 GeV 的质子加速器。其目标之一是用质子打靶产生放射性核, 进入一个可加速成 $0-6.5\text{MeV/A}$ 的重离子加速器。这个设备是专门用做加速放射性核的。

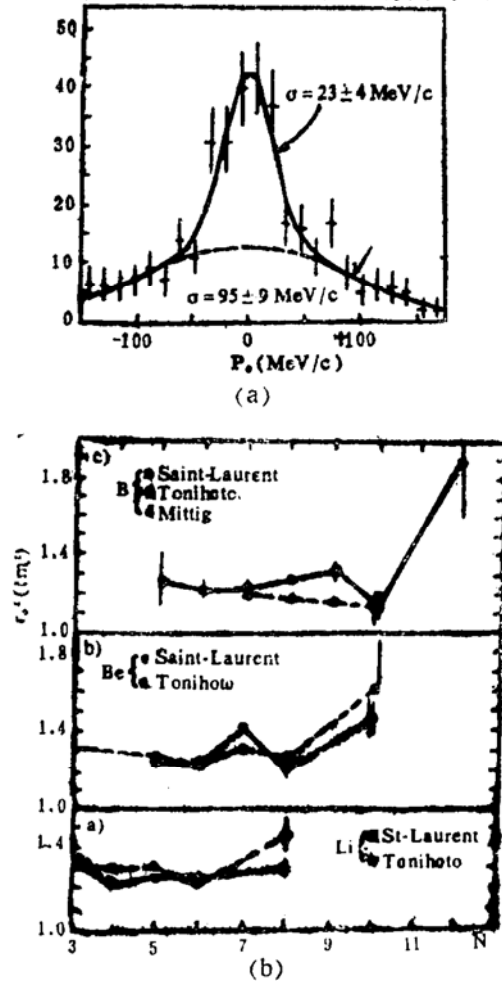


图7. (a) ^{11}Li 中双中子对的动量分布。从 $\Delta R \cdot \Delta P \approx \hbar$ 可以确定 ΔR 。
(b) B, Be和Li同位素的核半径随中子数的变化。

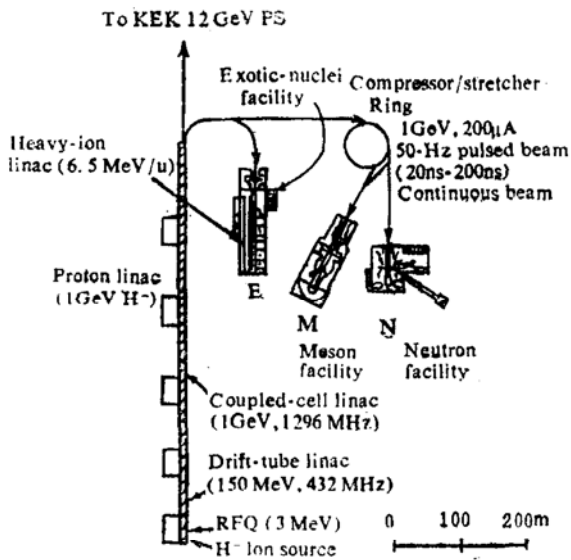


图8. 日本强子计划的布局。

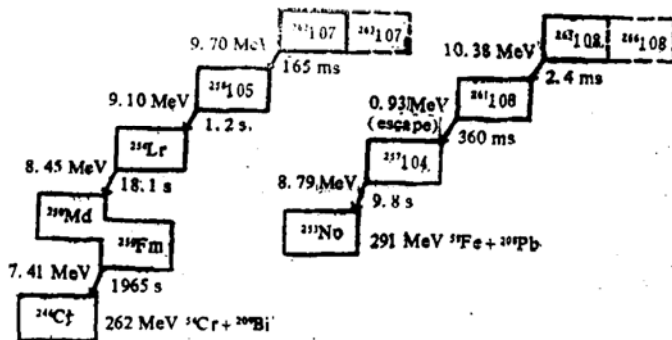


图9. 经 $1n$ 反应形成107到109号元素的同位素后的衰变链。图中注明了熔合反应, 衰变能量及观测时间。所列时间是关联事件之间的关联时间, 能量是这些事件中观察到的 α 能量。最后一个元素109的链表明了对于壳-稳定的重元素的 α - α 裂变序列的特征。

这两个设备的建成将可以开展一个完全新的实验领域。

G. 用冷聚变合成超重核 (Superheavy Nuclei by Cold Fusion)

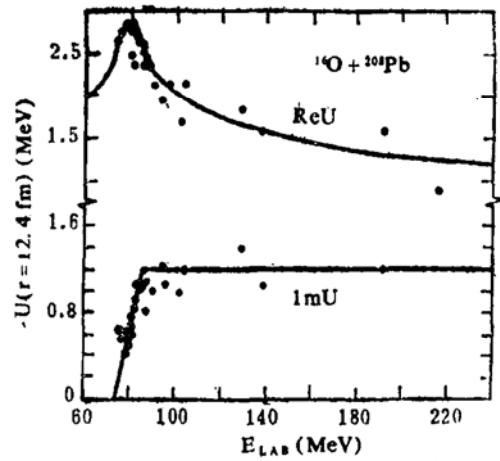


图10. 在表面范围中的光学势的值, 以及色散关系的拟合。

从历史上看, 大型重离子加速器建造的最初动力来自制造超重元素。近年来一个主要方面是用冷聚变来找超重核。经研究已认识到冷聚变方法成功的两个要素: 一个是两核子打在一起时形成的复合核体系的激发能很低; 二是 ^{208}Pb 做为一个集团能在两个核碰撞过程中钻得很深, 即在很长的路程里仍然保持它的稳定性。

到目前为止, GSI的Peter Armbruster等人已找到很多Z高到109的新核, 如图9所示。共看到Z=107的38个链事例, Z=108的4个以及Z=109的三个链事例。他们曾试图制造Z=110元素, 但没有成功。

2. 重离子核反应

近年来在低能核反应方面有不少意外, 就是发现了一系列的反常现象。

A. 阈反常(Threshold Anomalies)

英国 Daresbury 的一些人在分析 $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射及非弹性散射实验结果时发现, 在近垒附近用双折迭势(大家普遍接受的认为是最好的势)的光学模型不能拟合实验, 而必须把势的归一化常数值 N_R 提高到1.8倍才行。同时发现当用光学模型去拟合过去所有的各个入射能量的 $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 弹性散射时, 实阱和虚阱需由

图10中的曲线表示。即随能量下降，实阱升高，而虚阱下降。原因在于，由于能量下降时，很多反应道达到阈附近就被封闭了，致使虚阱下降，这就是所谓的阈反常。目前还在 $^{16}\text{O}+^{60}\text{Ni}$ ， $^{16}\text{O}+^{144}\text{Sm}$ ， $^{32}\text{S}+^{58}\text{Ni}$ 和 $^{32}\text{S}+^{24}\text{Mg}$ 等系统中看到了这种阈反常。Ray Satchler等人从因果性出发推出了一个实、虚阱之间的色散关系：

$$U(E) = V(E) + iW(E)$$

$$V(E) = V_0 + \Delta V(E)$$

$$\Delta V(E, \gamma) = \frac{\rho}{\pi} \int \frac{W(E', \gamma)}{E' - E} dE'$$

$V(E)$ 和 $W(E)$ 分别是实阱和虚阱。 V_0 是双折透势。任何快的 $W(E)$ 变化都伴随有快的 $\Delta V(E)$ 变化，这就是图10的解释。

阈反常不仅仅发生在弹性散射道，也发生在非弹性散射道。另外用极化的 ^6Li 和 ^7Li 束（现在已有极化的 ^{23}Na 束了）做实验也发现了这种反常。还有人用耦合道的办法来描写阈反常现象。

有人认为，在阈附近不仅非弹性散射，转移和弹性散射之间有很大联系，在熔合反应中也一样。图11是 $^{16}\text{O}+^{208}\text{Pb}$ 垒下熔合的结果。用普通单维理论，计算出的结果不能拟合实验（如图中虚线所示），但用上述随能量变化的势代进去，仍旧是单维模型，就可使理论与实验拟合了。因此有一种观点认为垒下熔合的反常现象就是阈反常。持另一种观点的人不同意这种说法。这在下面还将讨论。

B. 垒下熔合(Subbarrier Fusion)

这是近些年来在低能核反应研究中的一个热点。

前几年在熔合反应中，发现能量在库仑位垒以下或附近，熔合反应截面远比以单维势垒穿透因子计算出来的要大，甚至大几个数量级，这就是所谓的垒下熔合反常现象。人们已经认识到这是由于两核碰撞过程中有种种别的自由度被包括进去的结果。比如，核的激发使得有效势垒下降，从而使穿透增

加，于是截面就增高了。近年来，研究了一些更细致的问题：

a. 熔合发生在哪里？

过去在较高入射能量时人们已经总结出来，当两核相碰撞时，两核间的距离 r 满足 $r < r_F(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ， $r_F \sim 1\text{fm}$ 时才可引起熔合。

现在认为，即使当两核接近到 $r < r_F(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ，而 $r_F = 1.4 - 1.5\text{fm}$ ，就发生中子流动，就可以对熔合有所贡献。

b. 原来认为集体激发对垒下熔合反应的贡献很大，这是对的。现在认为它在 σ_{fus} ， $< 10\text{mb}$ 范围起主要作用，而在 $10\text{mb} < \sigma_{fus} < 100\text{mb}$ 范围里，中子结合(neutron binding)是主要贡献，即对转移的作用强调得更多了。

c. 关于熔合的光学模型：熔合反应的截面是各个角动量贡献之和，即

$$\sigma_{fus} = \sum_l \sigma_l = (\pi\lambda^2) \sum_l (2l+1) T_l(E)$$

现在往往很多理论都能拟合熔合反应的激发函数，实际上角动量分布才是对理论的一个更加严峻的检验。对角动量分布，现有的理论还没能很好地回答实验，见图12。正是这一点，上面谈到的持不同观点的人认为随能量变化的光学阱的办法也不能很好描述角动量的分布。会上，R. Satchler提出一个新概念，把光学势的虚阱分成为两部分：

$$W(E) = W_F(E) + W_D(E)$$

$W_D(E)$ 表示直接反应吸收部分， $W_F(E)$ 表示距离在库仑位垒以内引起的熔合的吸收。如果按过去的概念，熔合只发生在 1fm 以内，那么如果再认为直接反应部分很小，实际就过渡到一维势垒穿透模型。如果现在把 $W_F(E)$ 扩展到较大的半径区域，如 $r_F = 1.4\text{fm}$ ，角动量分布的计算结果马上就上去了，与实验一致，见图13。实际上认为虚势阱需增加一个表面分量，这个分量在 $r_F \sim 1.4\text{fm}$ 时首先引起中子流动，然后引起熔合。

d. 另一个问题是在 $A=100$ 附近，现在的理论还不能很好地解释熔合反应实验。

图14是 $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo}$, $^{100}\text{Mo} + ^{110}\text{Pd}$ 和 $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd}$ 三个体系的激发函数。可以看到这三者的形状和数值之间在阈附近有极大差异,但质量间的差异仅为10%。看来是由于熔合位垒的形状有急剧变化的原因。

对于 $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 的熔合反应激发函数,现在的理论也不能很好给以解释,必须把形变参数 β 不适当地增加50%才能拟合实验。另外实验测得的转移反应的截面又很小,很难用转移的耦合去解释,因此还是一个难点。

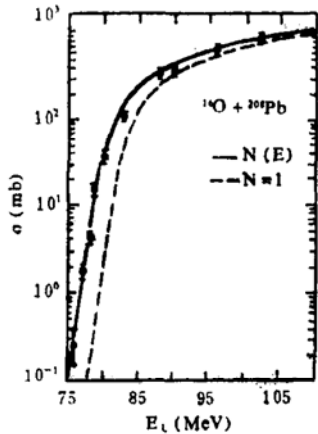


图11. $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 垒下熔合反应的激发函数。虚线表示用普通固定势单维理论计算结果,实线是使用“阈反常”势的计算结果。

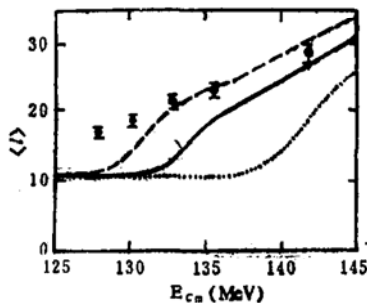


图12. $^{58}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 熔合的平均角动量。实线和点线分别表示有和没有耦合的情况。对于点划线,耦合强度增加了50%。

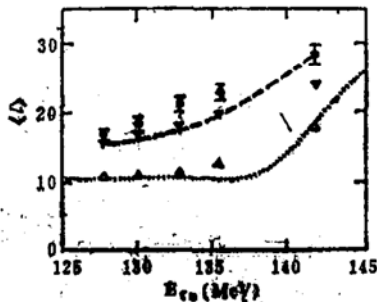


图13. 同图12。但光学模型计算中,点线用 $r_F = 1.0\text{fm}$,虚线用 $r_F = 1.44\text{fm}$ 。

C. 转移反应(Transfer Reaction)

a. 核的Josephson效应

重离子多核子转移反应中有一个老问题,理论预言的截面值有时大大低于实验值。从图15可以看到(^{16}O , ^{14}C)反应截面竟比DWBA理论预言的大了上百或上千倍。

由于BCS理论在解释核中的对效应的成功,人们试图在“超导”核间转移核子过程中来观察Josephson效应。Josephson效应是超导理论中的一种隧道穿透效应。起先有人对核子转移反应进行实验,但效应不明显。近期已经做的质子转移反应似乎有些效应。他们用 ^{144}Sm 打 ^{88}Sr , ^{144}Sm 有82个中子, ^{88}Sr 有50个中子,两个核的中子都是满壳的,而质子数不是满壳,实验是观察1p、2p、3p和4p的转移。

转移反应的微分截面可以以弹性散射的截面为基准,表示为:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Tr} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{el} \cdot P_t \cdot F(Q)$$

P_t 被叫做转移函数, $F(Q)$ 是一个修正因子。对于上述反应,用转移函数对最小碰撞距离作图可得到图16。一个质子转移的几率为 P_1 ,若两个质子的转移是二步过程,那么在经典近似下,两个质子转移几率 P_2 应为 $P_1 \times P_1$ 。实验结果是:二质子转移不是两次一个质子的转移,即 $P_2 > P_1 \times P_1$ 。而四个质子的转移是两次二质子的转移, $P_4 = P_2 \times P_2$ 。他们认为看到了对的转移,即二质子转移得到了加强,这就是核的Josephson效应。

b. 转移反应的系统学

重离子转移反应远比弹性散射研究的少。但最近这方面工作逐渐增多,因此有可能进行系统地总结。做为一个例子,把所有的中重核打较重的靶的单中子转移反应截面对 Q 值画在一张图上时,就会发现如图17所示的规律性。另外,一个中子转移截面约比二个中子转移大五倍,二中子转移截面约比三中子转移大五倍,见图17b。

在低能方面,除上述的一些反常外,转

移反应也有一个反常。若将转移函数对最小碰撞距离画图时，转移函数的斜率的实验值比理论预言值为大，见图17c，图中K是转移粒子的波数。实验值对理论的偏离称为“斜率反常”。

c. 转移到高自旋态

另一个可以提的是随着单核子转移、双核子转移反应研究增多的同时，使用 γ 射线与散射粒子符合的测量以达到高分辨的目的是一个引人注目的办法。这可以导致研究高自旋态。

基本的激发方式是，两个重离子相碰时，首先产生库仑激发，把核的角动量激发高了，然后再马上转移。在转移过程中角动量变化用不着非常多，但结果的状态却可以达到高角动量态。这是由于库仑激发过程中已经转移了好多角动量。如Pb+U，仅在库仑激发部分角动量就可以达到 $I \approx 28\hbar$ 。

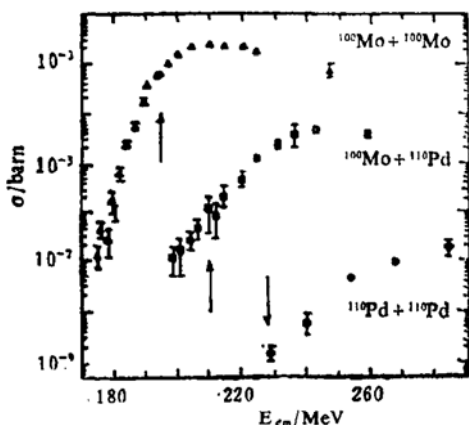


图14. 从重系统的熔合产生蒸发残核的激发函数(由Morawek et al., 来自GSI), 图中箭头表示计算出来的熔合势垒高度的位置。

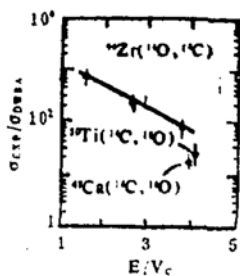


图15. 在不同能量轰击下， $^{90}\text{Zr}(^{16}\text{O}, ^{14}\text{C})$ ^{92}Mo 两质子转移反应实验测量截面与DWBA预言(假定是集团转移)截面的比例。

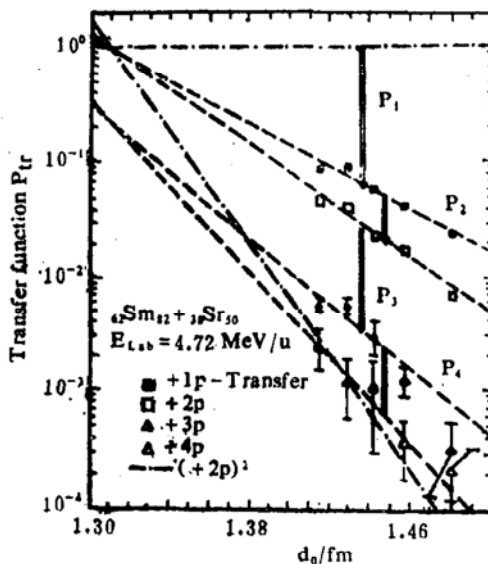
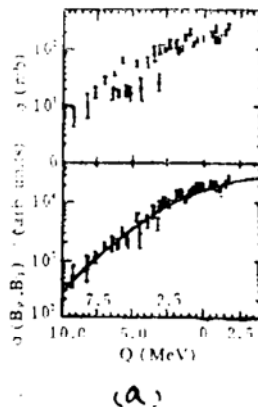
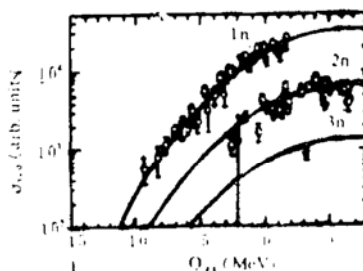


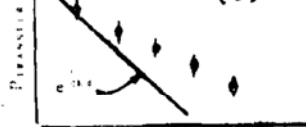
图16. 在GSI测得的重离子碰撞测量中的转移质子的几率(由V. Oertzen et al.)



(a)



(b)



(c)

图17 a. 中等质量核轰击重核靶($A_T > 120$)的单中子转移反应截面对基态 Q 值 Q_{gg} 的关系。下图同上图，但作了结合能修正。
b. 中等质量核轰击重靶而引起的单中子，二中子和三中子转移反应的截面(已进行结合能修正)。
c. 中子转移几率随最小碰撞距离的变化，曲线是半经典模型计算结果。K是转移粒子的波数，数据与曲线的偏离就是所谓的“斜率反常”。

D. 低能的阻尼碰撞 (Damped Collisions at Low Energy)

深部非弹性散射对重离子核反应有重要的作用。一般认为需要有较高的能量才能发生。近来发现,即使在能量比较低,甚至于接近库仑位垒的情况下,强阻尼碰撞仍有其贡献。一个例子是Ni+Sn。出射的类弹碎片和类靶碎片的能量是如此低,显然在分离时它们都必须有了大的形变。从图18可见,这种现象持续到很低的入射能量,在那里,位垒以上已经没有动能了。这时,核形变后的轴比是2:1,正是超形变的范围。

图19表示了在各种能量下, $^{58}\text{Ni} + ^{124}\text{Sn}$ 的熔合,深部非弹性散射和准弹性散射的强度。可以看到当能量降低到某值时,深部非弹性散射的贡献比熔合反应截面还要大。

E. 不完全熔合反应 (Incomplete Fusion)

讨论的是能量为20MeV-100MeV/A范围里的一些实验,其遍及了预平衡发射、Fermi喷射和大块转移等。

这里有兴趣的讨论会上提到的一个实验,用 ^{40}Ar 轰 ^{232}Th 。显然若先中心碰撞形成熔合,而后再裂变的话,二个碎片间的夹角小,而对于周边碰撞的不完全熔合之后的裂变碎片间的夹角就接近 180° 。从图20可见能量到44MeV/A时只看到有周边碰撞后的裂变。但是另外的实验,从测量中子多重性(图20下)来确定中心碰撞,看到在高到77MeV/A时仍有熔合反应成份。于是认为在高的入射能量时可能由于不是二体分裂,才使测到的裂变碎片夹角并不是原先所预言的。这些说明在解释实验现象时要非常小心。

F. 正电子线 (Positron Lines)

两个低能重离子相碰时产生非常强的电场,足够把真空极化推向极限,导致电子-正电子对的产生。过去十年里GSI对此现象进行了详细的研究。除了连续的正电子谱外还看到了意外的窄的正电子谱线。这些窄的正电子线是与电子相符合且向相反方向发射

的。人们曾认为这可能是一种低质量的中性粒子。当核的强仓库场消失后,其在自由空间继续存在有足够长的寿命,然后衰变。然而如同从图21所见到的,这种线不止一根,于是排除了用一种简单粒子来解释这种现象的可能性。虽然至今已有一家独立的实验组报导了这种符合的数据,但这些结果仍是令人迷惑而要给以进一步研究的。

G. 在重离子反应中的 Δ 共振 (Δ -Resonance In Heavy Ion Reactions)

这是个粒子自由度问题。过去曾在(^3He , t)和(p, n)等电荷交换反应中看见过 Δ 共振。

即使在高入射能量下,周边碰撞也能产生准弹反应。近期在重离子核反应中也同样看到了此现象。如在C和Pb的(^{20}Ne , ^{20}Na)和(^{20}Ne , ^{20}F)反应中,见图22,两个过程都有 Δ 激发。但是其截面数值和对其它激发的相对强度是不一样的,现在还不清楚该如何解释。

H. 高能量下的核阻止本领 (Nuclear Stopping Power at High Energies)

这个问题对相对论重离子的研究很重要。因为提高加速器能量是想提供造成所谓的夸克——胶子等离子体的更有利的条件。如果能量高到粒子不能被阻止,即能量不被吸收,而是穿过去了,当然就不利于造成所谓的夸克——胶子等离子体了。

现在有两个实验,一个是CERN的200 GeV/A的S,一个是Brookhaven的14.5 GeV/A的Si。看到不同半径的靶核在低能量下有相同的效应而在高能量下则不然。结论是,对200 GeV/A的S束,核就已经有些透明了。实验结果见图23。

I. 集体流动 (Collective Flow)

在较高能量时,核发生碎裂。现在技术已逐渐发展,探测器不仅能尽量多地去测量粒子分布,还可测量它们的动量分布。这是很重要的。图24表示出这种过程有集体的性质。在50 MeV/A入射的C+C和Ca+Ca的情况下,观察到碎裂核子有趋向去表现出关联

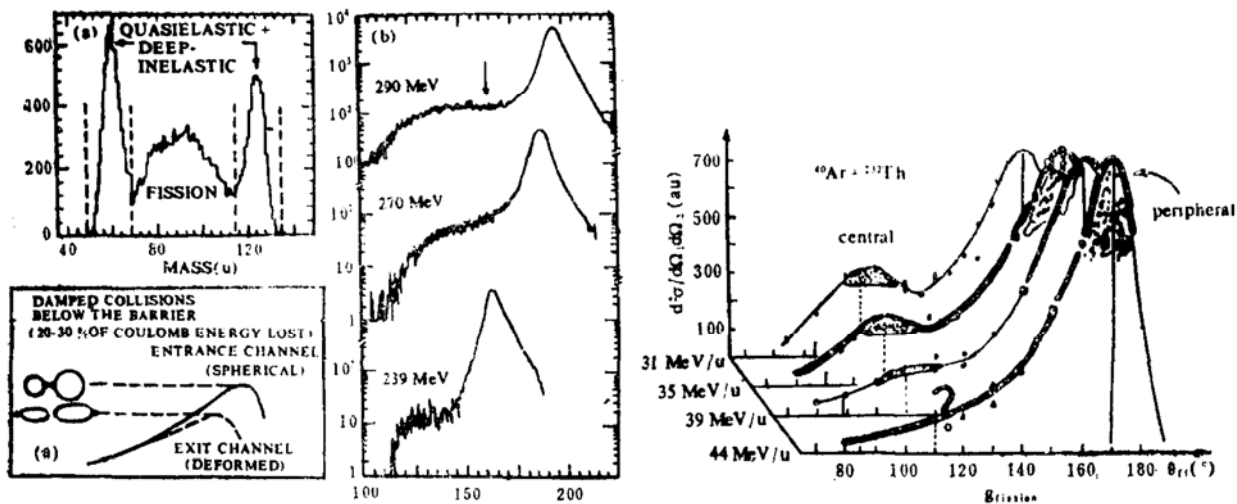


图18. 在ANL测得的Ni+Sn的深部非弹性散射的特性 (由Wolfs et al.) (a)质量分布, 虚线表示切割区域, 由其给出能谱; (b)能谱; (c)表示严重降低了的势垒。

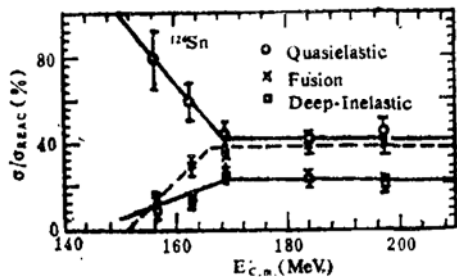


图19. 在各种能量下, $^{58}\text{Ni}+^{124}\text{Sn}$ 的熔合, 深部非弹和准弹性散射相对于总反应截面的强度分数。

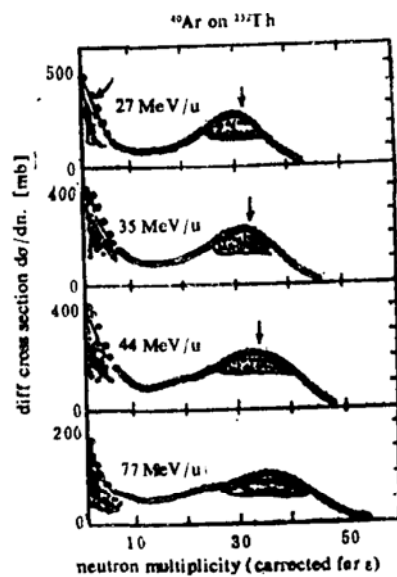


图20. 几种能量下 $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 的裂变碎片间夹角分布(上图), 下图来自HMI的中子多重性分布。

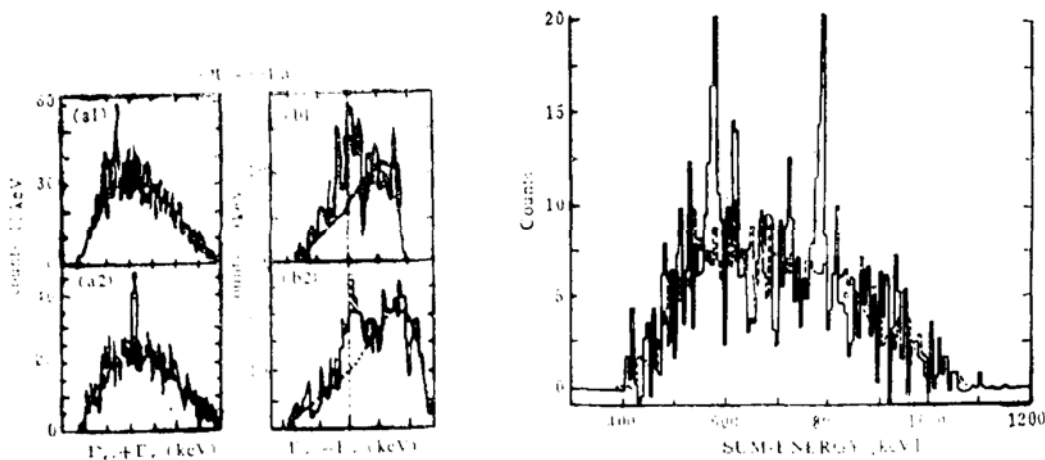


图21. 在GSI的重系统碰撞中, 符合的正电子和电子的窄谱线证据。左图给出在两个能量下U+Th的EPOS组的结果。右图是ORANGE组的 $^{208}\text{Pb}+^{238}\text{U}$ 结果, 实线是ORANGE组的背对背段的数据, 虚线是归一到其它段对的数据。

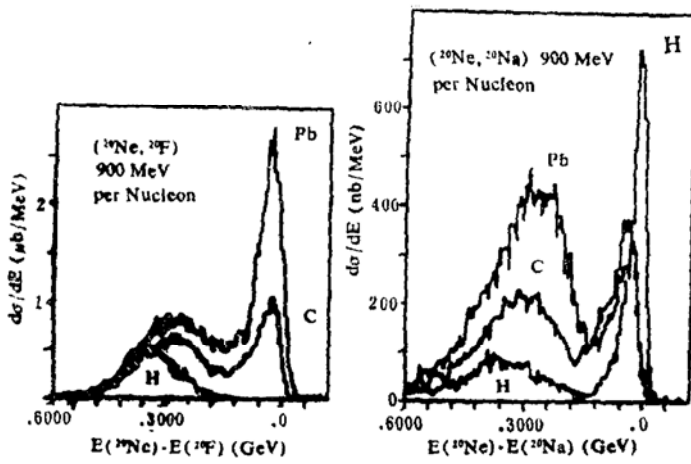


图22. 在SATURNE的电荷交换反应中的 Δ 布居。

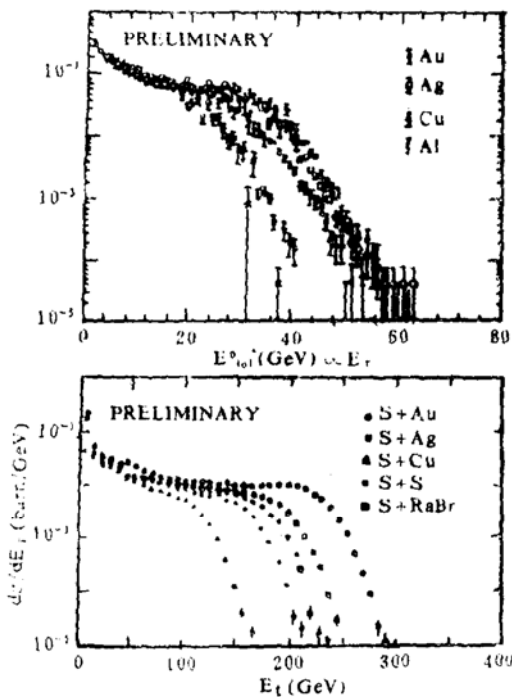


图23. 14.5GeV/A Si (BNL E-802) 和 200GeV/A S (CERN NA35) 的能量沉积的数据

的横向动量。开始这现象是在较高能量下发现的，后来看到其在较宽广的入射粒子能量范围里有稳定的表现。近来看到了一个新的结果，粒子有趋向在与反应平面相垂直的方向发射。从图25可以看到在400MeV/A情况下，对于许多体系在 90° 看到了峰。

J. 阈下的 π 介子、K介子和反质子 (Subthreshold Pions, Kaons and Antiprotons)

阈下 π 介子生成是个老问题，即两核子相碰，需要300MeV能量才能产生 π 介子。但实际上在入射能为20MeV/A时，就已经产

生了 π 介子，这显然不是粒子—粒子作用的结果，而是一种集体效应。这一点人们早就知道了，但至今仍没有能给以圆满的解释。

更使人感兴趣的新现象是K介子的阈下产生和反质子的阈下产生。这些问题现在都没有得到解释。图26给出 K^- 和 \bar{p} 的产生，上图给出 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 的结果。按理 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 产生的 K^- 的截面值应是 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 产生的5.4倍，即

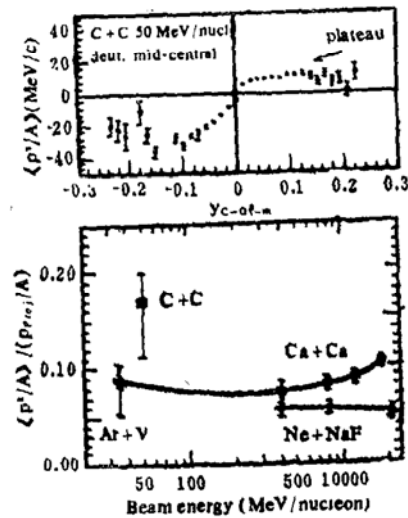


图24. 上面的图表示在相对低的能量下，垂直的动量随快度的变化，其表现出集体行为，取自MSU (由Westfall et al.)。下图是在较宽的能量范围和更多系统内这种效应的稳定表现。

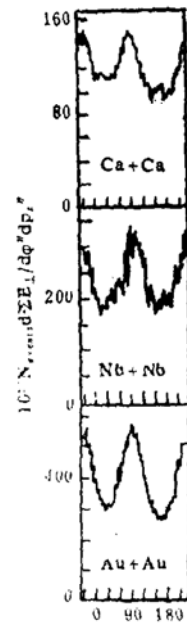


图25. 在400MeV/A时横向能量流的证据，数据来自LBL (由Gutbrod et al.)。

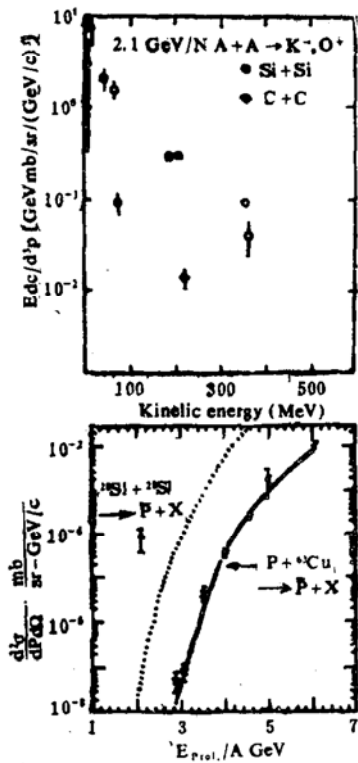


图26. LBL的 K^- 和 p 的产生(由Carroll et al.). 对于 p , 点线表示的是从动量分布(从拟合 $P+Cu$ 的数据)计算出来的 $Si+Si$ 产额。

$(28/12)^2$, 而实际观察到的是大20—30倍。下图给出的是 $^{28}Si+^{28}Si$ 与 $P+^{63}Cu$ 产生的反质子截面的比较, 虚线是从 $P+^{63}Cu$ 截面以已有理论算出来的 $^{28}Si+^{28}Si$ 的产额, 其比实际小几个量级。

3. 超相对论重离子碰撞

超相对论重离子碰撞的中心问题是两核碰撞后产生夸克—胶子等离子体(以下简称为Q—GP)即用压缩、挤压的办法在真空中从原子核中挤出这种东西来。这种东西的核密度相当于普通核子密度的3—15倍。如何实现Q—GP呢? 无非就是加热或挤压, 用 π 介子填充所有的自由空间。实验有两家, 就是前面已提到的CERN的200GeV/A的 ^{16}O 和 ^{32}S 束以及Brookheven的14.5GeV/A的 ^{16}O 和 ^{28}Si 束。他们认为可以在能量(温度)很高, 密度又很高的区域产生Q—GP, 见图27。但A. Feassler担心如果在很高的温度和密度都时间太短的话, 就可能产生不了。

那么怎么判断是否产生了Q—GP呢? 或

者说产生Q—GP的痕迹是什么? 现在有两类最引人注目的研究。

一类叫 J/ψ 抑制 (J/ψ Suppression), 是CERN的实验: J/ψ 粒子有三种衰变方式, 即变成两个电子 e^+ 和 e^- 、两个 μ 介子 μ^+ 和 μ^- 或若衰变成强子。在碰撞中同样可由强子产生 J/ψ 粒子。如果在碰撞中真的产生了Q—GP, 那么就会阻止产生 J/ψ 粒子, 或者说使 J/ψ 产生机率下降, 这就叫 J/ψ 抑制。道理是这样的, J/ψ 粒子可看作是由 C 和 \bar{C} 粒子组成的, 自由的 $C\bar{C}$ 对有束缚态。当有Q—GP时, 就有Debye屏蔽效应, 使 $1s$ 态能量上升。当屏蔽到一定程度时就不再出现 $C\bar{C}$ 束缚态了, 也就组成不了 J/ψ 粒子了, 见图28。

实验是用200GeV/A的 ^{32}S 打 ^{238}U 。形成的体系可能发射 K 介子, π 介子, 也可能发射 J/ψ 粒子。而 J/ψ 粒子可以衰变成 μ^+ 和 μ^- 。以测量关联的 μ^+ 和 μ^- 来找 J/ψ 粒子。把那些不关联的 μ^+ 和 μ^- 做为本底。那么测得的 J/ψ 产生与本底之比, 对于周边碰撞为9.3, 对于中心碰撞为5.9, 见图29。因此认为在中心碰撞中见到了 J/ψ 抑制, 即有产生Q—GP的迹象。但会议认为, 目前 J/ψ 抑制的实验证据尚属含糊不清的。

第二类实验是做 K^+/π^+ 比例, 是Brookheven进行的实验。认为若产生了Q—GP, 这个比例要得到加强。因为从与上面相类似的讨论中可以看到, 当有Q—GP存在时, K^+ 产生得到了加强, 而 π^+ , K^- 和 π^- 的产生得到减弱或维持不变。那么 K^+/π^+ 应当加强。而 K^-/π^- 应大致不变。在Brookheven的实验用20GeV/A的 ^{28}Si 束打Au靶, 看相对于质子打

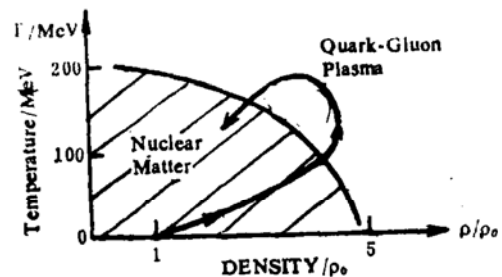


图27. 可能由高能重离子碰撞产生夸克—胶子等离子体的示意图。

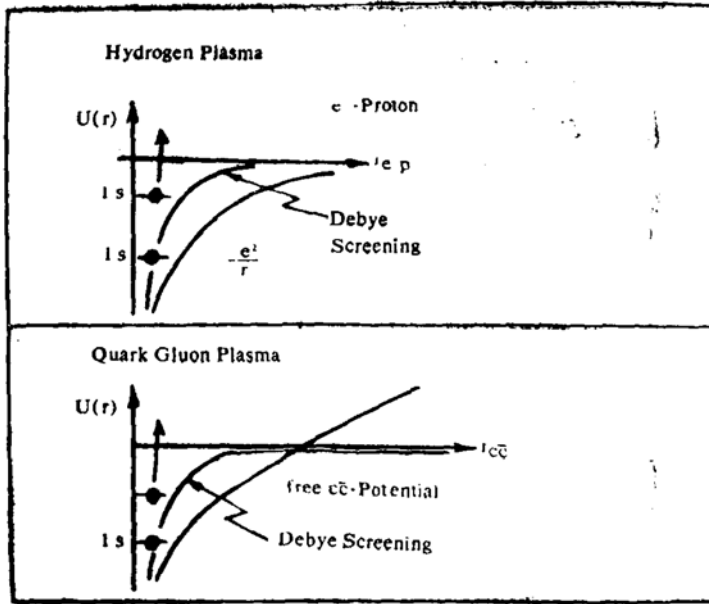


图28. 在夸克-胶子等离子体中, 由于 Debye 屏蔽引起的J/ψ粒子抑制机制的示意图(下图), 上图是对应的氢等离子体情况。

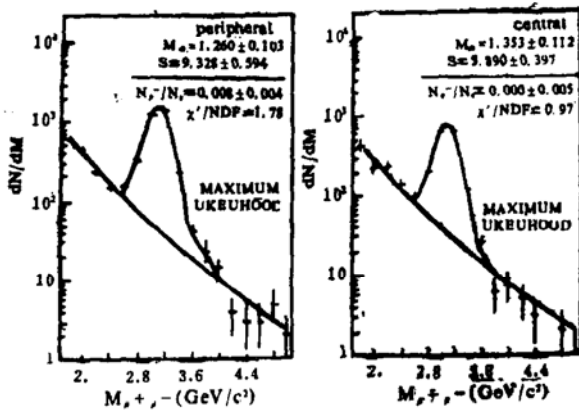


图29. 在CERN (NA38), 200GeV/A的O打U, $\mu^+\mu^-$ 对中的J/ψ产生的证据. 产额归一到连续本底上, 似乎中心碰撞(右图)比周边碰撞(左图)要低。

质子的 K^+/π^+ 比例的变化。得到的结果是 ^{28}Si 打Au的 K^+/π^+ 比例由0.07上升到0.20, 而 K^-/π^- 的比例与质子打质子时一样, 都是0.04, 因此认为是产生了Q—GP。但是有个问题, 由于 K^+ 在核子里的平均自由程很长, 约6fm, 而 π^+ 和 K^- 等平均自由程很短, 小于1fm。因此看到的 K^+/π^+ 比例增大可能并不是真正的加强而是由于产生的 π^+ 被阻止了。只不过是自由程的差异而引起的假象, 这个判据也就不充分了。

不管怎样, 这些仍是当前相对论重离子

碰撞中最有趣的问题。

4. 核和次核的自由度

重点讨论了以下两个问题:

A. 核子在核内是否肿胀?

从分析 $^{40}\text{Ca}(e, e')^{40}\text{Ca}^*$ 实验看, 有人认为核子肿胀了, 其半径增加15%, 也有人认为增加4%。但实际上这可能是一种核结构效应才导致了以上结果。因此肿胀现象到现在为止还没有得到确证。

B. 质子的自旋在哪里?

现在有一套理论计算, 认为若质子是由夸克组成的, 夸克的自旋就变成质子的自旋。分析实验和计算结果, 得到夸克的自旋

是 0.114 ± 0.09 , 大大小于质子的自旋 $\frac{1}{2}$ 。究竟是实验问题还是理论问题, 尚不清楚。

目前关于质子自旋从哪里来, 有三种提法, 即内部运动的轨道角动量, 从胶子来和从夸克海来。

5. 核子—核子相互作用

与这方面有关的报告有I. Ericson, R. Vinh-Mau和D. H. Wilkinson三个。

一个核子由三个夸克组成。当两个核子间距为几个fm时, 核子—核子相互作用的图像很正确。但是当两个核子的间距为0.5fm时, 一般处理是把六个夸克反对称化, 现在提出的问题是, 此时无法定义核子的中心。

氘是由二个核子组成的, 它从来是研究核子—核子相互作用的重要对象。从对它的波函数研究可以看到, a. 要坚持有正确的束缚, b. 在正规性。这方面现在还没有彻底解决。看来下一步研究中, 二级张量力是关键。

6. 天空核物理

这方面有关的报告有G. E. Brown, N. Glendenning和D. Schramm三个。这里仅想讲到对G. E. Brown的报告, A. Feassler

提出一个问题“Will Stonybrook explode the Supernova?” N. Glendenning的报告讨论了从超星87A来的一个新脉冲是否是一个夸克物质星? D. Schramm的报告讨论了在大爆炸中的核合成问题。

三、结束语

美国最近有一个讨论会,对以后十年核物理研究列出以下八个课题*:

1. 核结构;
2. 核-核碰撞;
3. 核中的强子;
4. 核中的夸克;
5. 相对论重离子物理;
6. 味物理;
7. 电子-弱相互作用;
8. 中微子-天体物理。

现任美国科学顾问委员会主席的Peter Paul讲到,现在核物理研究的领域正在不断扩大,原来一些由高能物理研究的领域现在

都归到核物理研究范围里来了;QCD理论已为大家所接受,研究夸克-胶子等离子体问题非常感兴趣;现在一批实验设备在建造中。提到的有:CEBAF(连续电子束加速器装置),原设计为4GeV,现在估计可以做到6GeV;计划中的加拿大的TRIUMF是一个30 GeV, 100 μ A, Duty Cycle为10%的质子加速器,1990—1995年建成,投资为470百万美金,由美国、加拿大、日本和西德等联和投资;美国的BNL的相对论重离子对撞机RHIC的申请可能在近期被通过,投资约400百万美金;另外有西德GSI的SIS-ESR,美国密西根州立大学的K=1200,荷兰KVI和法国Orsay合作在建的K=600的重离子加速器等等,不一一赘述。

最后还想说一句,在这次会上有多个人,多次提请注意的研究课题是:

用放射性束进行实验,

寻找长短轴比为3:1的Hyperdeformation。

(本文根据姜承烈的一个报告和大会资料整理而成)

*美国在1983年由DOE/NSF组织,请由John P. Schiffer担任主席的核科学顾问委员会撰写了一个报告“A Long Plan for Nuclear Science”另外在1986年出版了一本Nuclear Physics (是“Physics Through The 1990s”中的一卷)是由Joseph Cerny任主席的一个委员会撰写的。这里讲的是从会议中听到的消息,还来不及考证其出处,仅供大家参考。