

核核碰撞的最新进展

——第四届核核碰撞国际会议简介

姜承烈

罗亦孝

(中国原子能科学研究院 北京 102413) (中科院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文介绍了第四次核核碰撞国际会议的主要报告内容, 包括核结构、核反应机制、超相对论重离子碰撞、放射性核束及其核物理研究、核天体物理学及核技术应用. 同时, 也介绍了各个领域已经取得的最新进展及今后研究的热门课题.

关键词 超相对论性重离子碰撞, 放射性核束, 超形变, 巨偶极共振, 大强子对撞机.

1 引言

1991年6月10~14日在日本金沢市召开了第四届核核碰撞国际会议. 共有300人参加, 其中190人来自国外. 向大会提交的论文共330篇, 其中64篇在大会上报告, 其余分组报告. 近物所魏宝文教授和原子能院姜承烈教授是会议的国际顾问委员会委员, 中国参加会议的共8人: 兰州近物所罗亦孝、上海核子所付德基、蔡延璜、上海科技大学许梦杰、北京原子能院李祝霞、吴锡真、张焕乔、姜承烈. 张焕乔在会上作了题为“垒下和近垒熔合一裂变的碎片各向异性的反常”的报告.

会议期间, 国际顾问委员会和组织委员会召开了联席会议, 讨论下届会议的东道主, 最后集中到美国的LBL和意大利的Catania南方实验室, 会后由通讯投票的方式再作决定.

自1988年在法国Saint-Malo召开的第三届会议^[1,2]以来, 核核碰撞的研究在各个领域都取得了很大进展. 大会报告可分为七个专题: (1) 核结构(8篇); (2) 核反应机制(29篇); (3) 超相对论重离子碰撞(11篇); (4) 放射性核束及核物理实验(8篇); (5) 核

天体物理(4篇); (6) 核技术应用(3篇); (7) 实验设备(1篇). 从报告的情况来看, 超相对论重离子碰撞研究受到高度重视, 无疑将是今后核物理研究的最前沿. 放射性核束及其核物理研究正蓬勃发展, 它是今后传统核物理研究的一个极为重要的发展方向.

会议的重点报告: (1) 李政道的“对称性的消失和物理真空”; (2) P. Kienle的“GSI在低和中能重离子研究方面的方向”; (3) M. Gyulassy的“RHIC上的高 P_{\perp} 物理”.

2 核结构

1986年发现了超形变核 $^{152}\text{Dy}^{(3)}$, 这是1975年理论上预言在 $Z\sim 64$ 、 $N\sim 86$ 附近可能存在高自旋超形变核后, 经过十年努力获得的重要实验发现. 因为其布居很弱和实验中存在很大本底, 故采用多个反康Ge谱仪, 这对提高探测效率和克服本底起关键作用. 目前, 在 $A\sim 130$ 、150、190区域已经找到40余个超形变核, 超形变带(SDB)共60余条, 并对超形变带的布居、转动惯量、形变、对关联、退激和特殊的组态结构进行了研究. 这是近年来核结构研究最引人注目的进展^[4]. B. Hass的报告“超形变研究的近期进展”, 综

述用各种炮弹和靶的组合, 各种入射能量进行的实验, 回答了一个重要问题: 如何才能找到 SDB? 当初¹⁷⁵DY 的 SDB 是用¹⁸Ca+¹⁰⁸Pd 反应找到的。¹⁸Ca 的入射能量为 205MeV, 其复合核激发能 $E_{ex} \approx 79\text{MeV}$, 最大角动量 $L_{max} \approx 73\hbar$ 。但在³²S+¹²²Sn 反应中, 同样有 $E_{ex} \approx 80\text{MeV}$ 和 $L_{max} \approx 64\hbar$, 却看不到¹⁷⁵DY 的 SDB。另外想用下述反应:

$^{32}\text{S} + ^{151}\text{Sn} \rightarrow ^{151}\text{Gd}^* \rightarrow ^{150}\text{Gd} + 4n$ 去找¹⁵⁰Gd* 的 SDB, 尽管 $E_{ex} \approx 80\text{MeV}$ 和 $L_{max} \approx 64\hbar$, 结果也未找到。最后总结出来的规律是: 对 $A \sim 150$ 区域, 存在一个角动量为 $54 \sim 64\hbar$ 的窗, 处于此窗内的剩余核必须是冷的才有可能看到 SDB。当角动量大于 $64\hbar$ 时发生裂变, 小于 $54\hbar$ 时, 例如 $50\hbar$ 处, SD 带与 Yrast 带之间的能量间隔虽然只有 0.6MeV , 但在 SDB 附近正常态的能级密度已如此之高, 难以布居到 SDB。

J. Kasagi 和 J. Gaadhoje 两人的报告都是巨偶极共振 (GDR) 的宽度随 E_{ex} 和 l 的变化。Kasagi 用³²S 轰击¹⁰⁰Mo, 入射能量分别为 150, 180 和 210MeV。用七块大的 BaF₂ 在 90° 测高能 γ , 另外 25 个小的 BaF₂ 构成多重 γ 滤波器。用下面公式拟合不同 N_γ 开门时的能谱 (图 1)

$$Y(E_\gamma) = A_1 \exp(-E_\gamma/T_1) + A_2 \exp(-E_\gamma/T_2) E_\gamma^3 \frac{\Gamma}{(E_\gamma^2 - E_0^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma^2}$$

其中 N_γ 为 $9 \sim 10$ 时, $l \approx 30\hbar$, N_γ 为 $15 \sim 16$ 时, $l \approx 60\hbar$ 。结果为 Γ 对 l 的依赖很弱, 但随 E_{ex} 的增加而增加, 关系为:

$$\Gamma = 4.8 + 0.035E_{ex} + 1.6 \times 10^{-8} E_{ex}^3$$

(适用于 $A \approx 130 \sim 136$, $E_{ex} \geq 100\text{MeV}$)

J. Gaadhoje 对 Sn 核 GDR 宽度的系统研究却得到了不同的结果, 随 E_{ex} 的增加 Γ 出现饱和现象。他认为这个实际上反映了自旋饱和的现象。两个工作的不同结果或许是由于他们研究的核体系不同。J. Gaadhoje 指出, 对 GDR 衰变, 高能 γ 的角分布测量可以直接提

供核平均形变和形状的信息。对 Sn 和 Yb

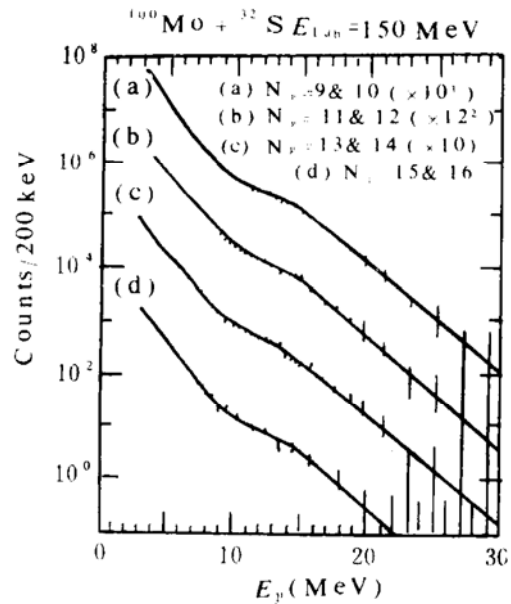
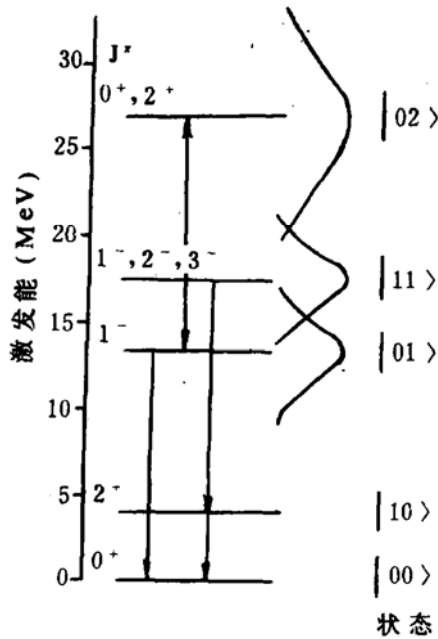


图 1 用不同 N_γ 开门的巨共振 γ 谱的拟合结果

同位素已分别观测到随着形变的增加, 从球形到扁椭球和从长椭球到扁椭球的演变。

随着研究的不断深入, 人们已开始研究双光子巨共振态。图 2 是²⁰⁸Pb 的几个单或双光子 GDR 态示意图。这种态的布居几率极低。Oak Ridge 的 J. R. Beene 报告中指出, 当用 95MeV/u 的²⁰⁸Pb ($^{17}\text{O}, ^{17}\text{O}'$) 来, 比 22MeV/u 的²⁰⁸Pb ($^{17}\text{O}, ^{17}\text{O}'$) 来, 单光子的 GDR 激发峰可强 250 倍, 而连续本底只增加了 4 倍。他用磁谱仪测非弹性散射粒子, 用 19 个 BaF₂ 测 γ 且进行符合。用²⁰⁸Pb ($^{86}\text{Kr}, ^{86}\text{Kr}'$) 反应, GDR 的激发几率更为增加, 但对⁸⁶Kr' 的分辩却碰到了困难。Y. Blumenfeld 在题为“⁴⁰Ca 的 GQR 及更高激发能态的衰变”报告中, 用⁴⁰Ca ($^{40}\text{Ca}, ^{40}\text{Ca} + \text{P}$) 反应, $E_L = 2016\text{MeV}$, 研究靶 Ca 核的激发与衰变。他们认为激发能为 17MeV 的峰是单光子的 GQR, 34MeV 处的峰很可能是双光子 GQR 激发。这是一个很有趣的新结果。

图2 ^{208}Pb 的一些单和双光子态

3 核反应机制

德国 GSI 的 SIS 已于 90 年初投入运行, 目前它是世界上中能重离子加速器中最为先进的设备. 从 UNILAC 把重离子加速到 11.4 MeV/u, 送入 SIS 加速到 1~2 GeV/u. 从 SIS 输出的重离子可以直接输入到一个储存环 ESR, 也可以先进入 FRS, 由炮弹碎裂反应获得放射性核束. 放射性核束可以直接进行实验, 亦可把它再输入到 ESR. ESR 最大的工作能量为 600 MeV/u. 特别是它有一个以电子束使重离子冷却的设备, 使重离子束的相空间特性大大改善. 目前, 对 $^{86}\text{Kr}^{36+}$ 束, 150 MeV/u 的实验结果表明, 可得到很高的能量分辨, $\frac{\Delta P}{P} = 10^{-6}$. 但目前还只能工作在流强较低的情况. 放射性核束由炮弹碎裂而来, 能散很大, 通过 ESR 可大大减小其能散. 利用能量分辨高的原理, 用精确测频率法可测放射性核的质量. P. Kienle 在“GSI 在低和中能重离子研究方面的方向”报告中, 用

较大篇幅讨论了 FRS 及放射性核束. 目前已获得很好的粒子分辨结果.

目前 GSI 已在靶区建立一批实验设备并进行实验. 例如, 使用一个大二极磁铁 (ALADIN, 2.1 Tm), 就有三种组合形式: (1) 靶室探测器为 48 个氟化钡计数器, ALADIN 后有一个 10m 飞行管道, 此管道前后分别为 X-Y 位置灵敏探测器, 束流前端还有 Cherenkov 计数器, 并有一个大面积带电粒子剔除器和一个大面积中子探测器; (2) 靶室探测器为 Si-CsI 点阵, ALADIN 后为三个 TP-Music 多取样游离室 (Multi-Sampling-Ionization Chamber), 再接飞行时间墙, (3) 靶室探测器是一个 4π 探测器, 放于一个 Solenoid 中, 后接一个塑料墙, 再进入由 ALADIN 等组成的前角谱仪.

Kienle 列举了今后的研究课题, 在一定程度上它们反映了中能重离子物理研究的热点.

3.1 远离 β 稳定线核素及超重核素的寻找.

在这类研究中, 包括对其核的性质研究, 特别提到准备以冷熔合反应 $^{62}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ 合成 $^{269}110$ 和 $^{62}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi}$ 合成 $^{271}111$.

3.2 集体激发

包括双光子激发和巨共振的研究等. 现已获得了 ^{208}Pb 的双八极激发证据.

3.3 核动力学

包括熔合反应、深度非弹、多重碎裂、中心碰撞、阈下粒子产生和高密度物质中的强子等.

3.4 原子物理现象 (正负电子对的产生)

用双桔子谱仪测量, 正电子在后半球探测, 电子在对应的前半球探测 (都是用 60 个 Si 探测器). 在 $\text{U} + \text{Ta}$ 反应中 $\text{Pe}^{+DTC} \approx 10\text{Pe}^{+QBC}$. 当改变入射能量时, “Sum-Energy” 谱形有所不同, 在 6.3 MeV/u 时, 峰最窄, 为 200 keV. e^+e^- 产生的机制尚不清楚.

当核处于 $E_{ex}/u \leq 1\text{MeV}$ 时, 主要的衰变方式为轻粒子蒸发和裂变. 当 $E_{ex} >$ 总结合能

时,可能出现完全的汽化过程.在这两个极限之间,主要是发射中间质量碎片的衰变.为了仔细研究中间质量碎片发射机制,需要测量一个事件中的全部 $Z \geq 3$ 的碎片.这是中能核核碰撞的中心课题之一.有几个报告讨论了这方面的研究成果. GSI 的 J. Pochodgalle 的报告“ $E/u=600\text{MeV}$ 的 $^{197}\text{Au} + \text{C}, \text{Al}, \text{Cu}$ 反应中多重碎片产生的上升和下降”,他们使用前面提到的 ALADIN 谱仪的第二种工作方式.用反运动学的优点(Au 入射),在前角区测了所有 $Z \geq 2$ 的碎片,测到的平均多重性 $\langle M_{IMF} \rangle$ 对 Z_{bound} 的结果见图 3. 对三种不同靶的结果变化不大,峰值都在 $Z_{bound} \approx 35$ 处,峰值为 3.5. 这说明中间质量碎块产生的最大几率发生在一半炮弹电荷被包含在复杂集团中,也说明 $\langle M_{IMF} \rangle$ 和 Z_{bound} 间存在一个普遍的关系,可能反映出表征正在衰变的炮弹旁观者的那些初始量间有强的关联.

中能重离子核核碰撞中,集体流的研究也是一个重要的课题.二核相碰时,在相互作用带里有粒子发射,可以讨论沿反应平面的平均横向动量 $\langle P_x/A \rangle$,也可以讨论沿 Y 方向的平均横向动量 $\langle P_y/A \rangle$. J. Poter 在题为“用一个 4π 带电粒子阵列测量的集体物质流的倒向”的报告中,研究了能量为 $25 \sim 85\text{MeV}/u$ 的 Ar 轰击 ^{27}Al 和 ^{58}Ni 的带电粒子和碎片发射,以及 $\langle P_x/A \rangle$ 的情况.他指出,反应平面内集体横向动量随碰撞参数和入射能量而变,当入射能量低时,主要受平均场吸引相互作用的影响,出现 Orbiting 现象, $\langle P_x/A \rangle$ 是负的;在入射能量高时,由于两体相互作用的排斥效应(压缩系数很大),出现 $\langle P_x/A \rangle$ 为正;在 $E_{lab} = 40 \sim 100\text{MeV}/u$ 区域,两种相互作用竞争,导致平均流动 ≈ 0 . W. Bauer 在“重离子碰撞和核状态方程”的报告中研究了相类似的问题,也指出 $E_{lab} \sim 100\text{MeV}/u$ 时核集体流的消失是由于核压缩的排斥效应和核表面的吸引效应平衡的结果.

实验测到的核核碰撞产生 π, η, κ 和 \bar{P} 等

粒子的截面都较 $N-N$ 相互作用的截面大,在阈下能区更为突出,这一直是个悬而未决的问题. T. Suzaki: 在“中能核核碰撞中 π 产生”的报告中指出,用计及核子高动量尾巴的解 BUU 方程的办法,可以解释 π 产生问题. E. Chiavassa 在“阈下的 η 产生”的报告中则指出,目前计算截面仍低于实验值,即使已考虑核子的高能动量尾巴及 η 产生后的吸收效应.

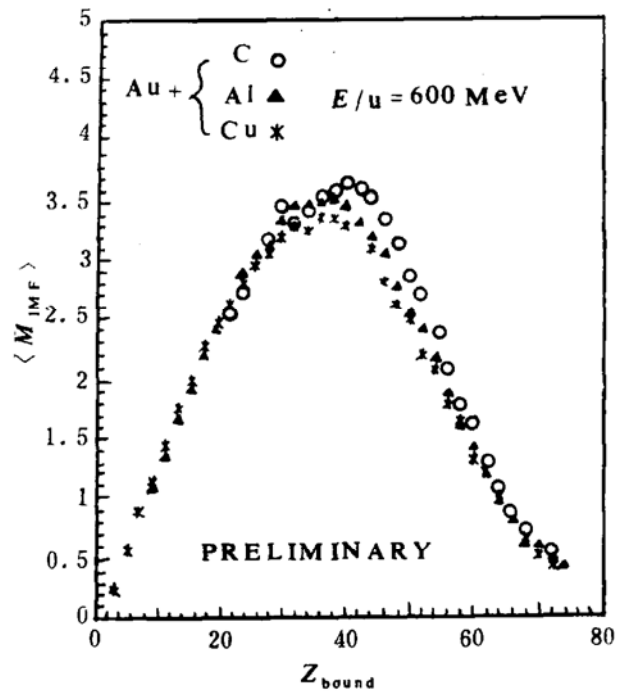


图 3 $\langle M_{IMF} \rangle$ 和 Z_{bound} 的关联 ($3 \leq Z \leq 30$)

N. Takigawa 由于看到像 ^{11}Li 等核有中子晕,他建议:“用丰中子放射性核束合成超重核”.用 ^{11}Li 引起的熔合反应 Q 值太大,研究了 $^{41}\text{K} + ^{238}\text{U}$, $^{46}\text{K} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi}$ 等反应,认为用 ^{46}K 等束是很有利的.中子晕的存在使溶合位垒降低很多.但不少人指出,由于中子晕的存在,在两核相碰时,首先会把中子碰掉,难以合成超重核.

通过多年的研究,人们已清楚垒下熔合反应的增强是由于碰撞过程中介入了其它运动自由度,多维动力学过程使有效位垒大大

下降. 但仍存在难点, 如 $^{64}\text{Ni}+^{100}\text{Mo}$ 等体系, 即使已考虑了其它已知的自由度, 在垒下的理论截面仍比实验低得多. 另外, 平均角动量值在垒下区理论值也小得多⁽⁵⁾. A. M. Stefanini 在“近垒和垒下熔合反应系统学”报告中指出, 最近他们测量了 $^{64}\text{Ni}+^{92}\text{Zr}$ 和 $^{64}\text{Ni}+^{96}\text{Zr}$, Scarlassara 等人测量了 $^{58}\text{Ni}+^{90}\text{Zr}$ 和 $^{58}\text{Ni}+^{94}\text{Zr}$ ⁽⁶⁾, 结果都是理论值低于实验值. 他提出如果用推广的 Wong 公式:

$$\sigma_{fus}(E) = \frac{R_0^2 \hbar \omega_1}{2E} \text{Ln}$$

$$\left\{ 1 + \exp\left[\frac{2\pi}{\hbar \omega_1}(E - V_b)\right] + \exp\left[\frac{2\pi}{\hbar \omega_2}(E - V_b)\right] \right\}^2$$

对前二个反应系统, 调节 R_0 、 V_b 、 ω_1 和 ω_2 四个参数, 可很好拟合激发函数的实验结果. 熔合反应激发函数亦可唯一确定自旋分布.

$$\sigma_l(E) = \frac{\pi}{K^2} (2l+1) \left[E' \frac{d\sigma}{dE} \Big|_{E=E'} + \sigma(E') \right]$$

$$\text{其中 } E' = E - \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu R_0^2}$$

这样算出的 σ_l 和 W. Kuhn 等人⁽⁷⁾测得的 σ_l 很好一致. 但此方法是否可说明 Ni+Mo 及其它反应? 推广的 Wong 公式的物理背景是什么? 是否因增加一个参数而掩盖了矛盾? 这些问题都需要进一步研究. H. Esbensen 等人⁽⁸⁾指出, 一般处理表面振动自由度和相对运动的耦合, 仅采用线性项 βR , 这是模型空间只截断到单光子态, 如果计及双光子态或把耦合计及二级项, 就有 $(\beta R)^2$ 项, 在 $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ 的研究中看到, 这个二级效应不可忽略. 问题是在什么情况下, 二级甚至更高级效应是重要的? 判据是什么?

4 超相对论重离子碰撞

李政道在报告中指出, 1887~1925 年出现两大物理之谜: (1) 不存在绝对的惯性系; (2) 波粒二重性. 这两大物理之谜的解决分别导致相对论和量子力学的建立. 从此有原子结构、分子物理、核物理、激光、半导体、超导、x 射线技术、超级计算机等一系列巨大

发展. 今天也存在两大物理之谜: (1) 对称性的消失; (2) 尚未观察到的夸克.

所有的物理理论都是基于对称性的, 但大部份对称的量子数是不守恒的. 李提出: 是否存在对称性破缺的定律? “物理真空”是否不对称? 所有的质量使对称性破缺? Higgs 型粒子是否存在?

大多数人都认为介子由夸克和反夸克组成, 重子由三个夸克组成. 但至今尚未观察到夸克. 李认为 QCD 真空是完全的 Color dielectric, $K_{vac}=0$, $\vec{E}_{color}=0$. 李相信这两大物理之谜的解决也必将导致物理学的大发展. 解决的希望寄于正在美国建造的 SSC (超级超导对撞机, 20TeV 质子 × 20TeV 质子) 和 RHIC (相对论重离子对撞机).

目前已有的可以研究相对论核核碰撞的设备有: LBL 的 BEVALAC, CERN 的 SPS 和 BNL 的 AGS. SPS 可把 ^{32}S 每核子加速到 60~200GeV/c, AGS 可把 ^{28}Si 加速到每核子 14.5 GeV/c, 预计 1992 年可把 Au 加速到同样能量. 1994 年, SPS 可加速 Pb 每核子到 60~160GeV/c. 这些设备都是用束流打静止靶, 因此质心系能量较低, 加速得来的动能没有被充分利用. 要达到质心系能量每核子 10GeV 以上, 就要靠对撞机.

H. Gutbrod 报告“欧州关于超相对论核核碰撞物理的未来计划”, 欧共体最近在 GSI 开会拟定新计划. 一般对撞机亮度约为 $\mathcal{L} = 10^{26} \sim 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. 如果建一个 50AGeV × 50AGeV 而亮度为 $10^{29} \sim 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的对撞机, 将极大有利于开创新研究领域. GSI 将负责研究重离子碰撞中亮度的极限问题, 并将进一步提高亮度. CERN 原有一台电子正电子对撞机 LEP, 如果在同一隧道里 (长 27km), 在 LEP 之上加造一个新的对撞机, 并使用超导磁铁, 就可建成一个质子-质子对撞机. 每束能量约为 7~8TeV⁽¹⁰⁾, 命名为 LHC (大强子对撞机). 1992 年将决定是否建 LHC? (计划 1998 年建成), 是否 2000 年用

LHC 出 Pb 束(636TeV * 636TeV 的 Pb—Pb 对撞机)? 图 4 给出设计中的 LHC 加速 Pb 离子的示意图.

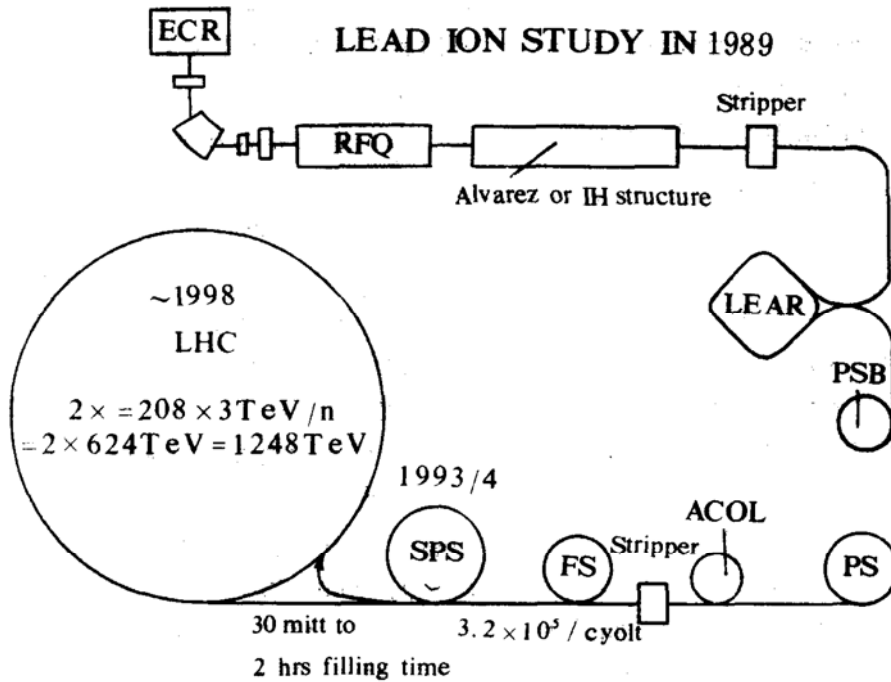


图 4 设计中的用 LHC 加速 Pb 离子

如果 LHC 计划能获批准并实施, 同 RHIC 相比将使超相对论性核核碰撞的研究又有一个大飞跃.

有 9 个报告讨论寻找 QGP (夸克—胶子等离子体), 其中最重要的三个是: R · Stock 的“CERN 关于产生强子的实验”, Y. Miake 的“BNL—AGS 上相对论重离子实验”和 L. S · Schroeder 的“以双电子探查核物质——BEVALAC 能区 N—N、N—A 和 A—A 碰撞的最新结果”

理论上预言了发生相变, 出现 QGP 时的标识, 已从实验上观察到了出现 QGP 的必要条件的证据, 尚无否定的结果, 也尚无“充分”的证据, 因为这些单个的证据还可由其它原因而出现, 不一定反映 QGP 的必然存在. 如果脱禁闭的夸克物质确实存在, 在相

碰区域必需出现足够高的能量密度, 足够高的温度, 才能使末态的奇异粒子数加强, J/ψ 粒子则出现压制现象. 同时应该看到直接光子产额的增强.

200GeV/u ³²S 轰击各种靶的总横能分布中, 对那些重靶, 已观察到分布遍及到 E_T^{max} 的 65%, 由此算得能量密度已达 ε = 3.5 GeV/fm³ (图 5), 满足理论上预言的 QGP 存在的条件. 理论预言, 在温度高于 160MeV, 强子物质已不能存在. 实际上 AGS 上的实验, 入射束能量仅为 14.5GeV/u 时, 用测量到的粒子谱推算的温度在 A—A 碰撞下, π[±]、P 等为 150MeV, 而 P、K⁺ 等已为 160MeV. 理论预言, 由于 Pauli 不相容原理, 如果 QGP 出现, 高温高密度必然导致生成更多奇异夸克对, 改变夸克味的组成, 使某些

奇异粒子如 K 、 Λ 、 φ 、等得到加强。因此期望 $A-A$ 碰撞与 $P-P$ 碰撞相比, Λ/π 、 K^+/π^+ 等会增大。CERN 的实验已观察到 Λ/π 有 2.5 倍的增强。类似的讨论指出, 当 QGP 出现时, 会出现 J/ψ 粒子 ($c\bar{c}$ 束缚态) 的压低, 在 CERN 也已观测到, $O+U$ 和 $S+U$ 的实验与 $P+U$ 实验相比, $N_{J/\psi}/N_c$ 下降一个 0.5 因子, 由于 QGP 温度高, 热黑体辐射增加, 由 $q+\bar{q}\rightarrow\gamma$ 等过程会直接产生光子, 因此也应观测到直接光子的增强, 这种增强现象, 在 CERN 的实验中得以证实。总之, Stock 认为: 一个有限体积, 在短时间中系统的确发生了相变。

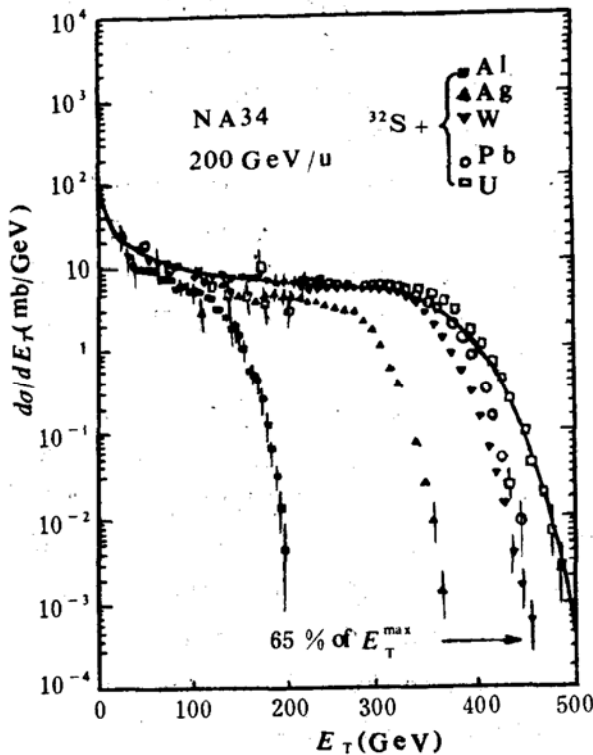


图 5 用 4π 量能器测到的总横能

已经发展了许多理论模型, 但迄今尚无一个模型可以解释全部实验事实。

G. Young 以“RHIC 上的物理和实验”为题报告了那些正申请在 RHIC 上做第一批实验的课题和打算建造的装置。最初有 9 个协作组织提出了申请, 后经筛选剩下 4 个。BNL

已宣布, 对第一批实验准备投资约 80 万美元, 其中 2 千万美元作为建造通用性设备和资助较小的实验。预计, 第一批只能支持 2~3 个大型的装置, 所以各课题间的竞争十分激烈 (有关材料可参考 [9] 的 vol II, No. 2)。

5 放射性核束及其核物理研究

关于放射性核束的第一代装置始建于 LBL (B42 和 B44) 和 GANIL (LISE)^[11]。在第一代装置的基础上已相继建立了一批第二代装置, 如 RIKEN (RIPS)、MSU (A1200)、GSI (FRS) 和 SATURNE 等。GANIL 的 LISE 经过改进后建成 LISE3。LISE3 是在 LISE 的后面增加了一系列二极和四极磁铁及两节 Wien 滤波器, 并将飞行距离加长达 43m。总的来讲, 第二代装置的放射性核束具有如下特点: (1) 流强增加了 100 倍以上, 例如 GANIL, 用 ECR 源的情况下束流为: ^{11}Li , $4 \times 10^7 \text{s}^{-1}$; ^{14}Be , $\sim 10^7 \text{s}^{-1}$; ^{72}Zn 可达 10^{10}s^{-1} 。流强增加了, 不仅可测量全截面, 还可以进行弹性与非弹性散射和转移反应等较细致的研究。(2) 放射性核束的种类增加了, 例如新有了 ^{42}Cr 束。(3) 有了极化的放射性核束^[12]。RIKEN 的 RIPS 中有一个摇摆器单元, 可使束流方向偏转 $0^\circ \sim 15^\circ$, 得到的放射性核束就可以不在零度方向, 就有可能从炮弹碎裂反应获得极化放射性核束, 现已可获得 ^{12}B 、 ^{12}N 、 ^{13}B 、 ^{13}O 和 ^{14}B 等极化束。例如, ^{13}B 束为 10^4s^{-1} , 极化度为 3%~10%, 这与出射的动量有关。

有了放射性核束就使传统核物理研究领域大大扩展了, 但这方面的潜力和优越性还没有充分发挥出来, 现在申请美国 MSU 的束流课题中, 有一半以上是要求使用放射性核束设备 A-1200 的。目前, 这方面已开展较多工作的课题有: (1) 寻找新核素, 研究奇异同位素的性质和衰变方式, 研究中子晕核。

A. C. Mueller 在会上报告了近年发现的新衰变模式- β 诱发 3 个质子衰变 ($\beta-3P$). 从 ^{31}Ar 经 β^+ 衰变到 ^{31}Cl 时 (Q_β 高达 19MeV), 有高达 4.8% 的分支比衰变到子核 ^{31}Cl 的同位旋相似态, 接着不仅发射双质子衰变到 ^{29}P , 还可发射三个质子衰变到 ^{28}Si , 这是一个新的衰变方式. D. J. Morrissey 报导, 在 ^{78}Kr 束流的炮弹碎裂中找到了新核素 ^{61}Ga , ^{65}As , $^{62,63}\text{Ge}$.

(2) 研究炮弹碎裂机制及次级粒子的反应机制. M. S. Pravikoff 在“远离稳定线的 Li 同位素的总反应截面”报告中, 测量了 80MeV/u 的 ^8Li , ^9Li , ^{11}Li 与靶 C, Al, Cu, Sn 和 Pb 反应的总截面, 和已有的 800MeV/u 的数据进行比较, 观察到电磁解离效应在入射能量下降时的确上升了, 但变化比理论预言的小. K. Soutome 研究了 ^{11}Li 的库仑解离截面对靶电荷的关系. (3) 研究自旋-极化的机制, 利用极化束测量 g 因子. K. Matsuta 等人用 106MeV/u 的 ^{40}Ca 束打 Au 靶, 研究了 ^{39}Kr 和 ^{39}Ca 的自旋-极化效应. H. Okuno 已对 $^{12,13,14,15}\text{B}$ 核, 以极化束方法测量了它们的 g 因子. (4) 核天体物理学.

关于放射性核束, 现在急需填补能量从 1keV/u~20MeV/u 能区的空缺. 这要靠放射性核束的加速技术才能解决⁽¹¹⁾.

6 核天体物理学

核物理学和天体物理学的结合, 形成了一门新兴的学科: 核天体物理学⁽¹²⁾. 近年来, 这门学科发展甚速. M. Arnould 在“星体上的核反应——近期理论与实验的发展”报告中, 综合评述了这方面的情况. 标准的大爆炸理论, 不能说明银河系中比 ^7Li 更重的元素丰度. 更大的困难是: 在该模型中, 宇宙是开放的. 在此基础上发展起来的非均匀密度模型较好地解决了这些困难. 但为了进一步检验非均匀密度模型, 需要大量从未测过 (亦不可能) 的核反应截面和核衰变性质的数

据. 由于实验技术的发展, 特别是放射性核束的使用, 使一些核性质研究和反应截面的测量成为可能. 例如, ^{34}S , ^{46}Cl 等的 β^- 衰变特性 (半衰期等), 将决定 $Z=20$ 附近的那些核在当初元素形成过程中的情况. 这里, β^- 衰变和中子俘获的竞争, 将决定有些核是所谓转折点. 现在用炮弹碎裂反应已有可能研究这些核.

这次会议上报导了三个新的核反应测量, 它们都对核天体物理学的研究有重要的意义.

在元素合成过程中, $^{13}\text{N} (P, \gamma)^{14}\text{O} (1^-)$ 反应在热 CNO 键中是一个关键点. 由 $^{13}\text{N} + P$, $l_P=0$, $E_{\text{cm}}=0.547\text{MeV}$ 所得的 $^{14}\text{O} (1^-)$ 有个共振. 已知 $\Gamma_P=38.1\pm 1.8\text{keV}$ 但 Γ_r 未知. 从非直接测量, 例如 $^{12}\text{C} (^3\text{He}, n)^{14}\text{O}$, $\text{H} (^{14}\text{N}, ^{14}\text{O}) n$ 等测量结果得 $\Gamma_r=2.7\pm 1.3, \dots, 7.6\pm 3.8\text{eV}$ 分散极大. 理论计算也不准, 结果为 1.2~4.1eV. 现在, 美国 LLNL 用产生 ^{13}N 放射性核束直接测量了 $^{13}\text{N} (P, \gamma)^{14}\text{O} (1^-)$, 得到 $\Gamma_r=3.8\pm 1.2\text{eV}$. 这是一个评价甚高的实验结果.

要解释比 ^{12}C 更重核的丰度, $^8\text{Li} (\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反应是一个关键的反应通道. 过去有人用 $n + ^{11}\text{B} \rightarrow ^8\text{Li} + \alpha$ 反应测过逆截面, 但靶只能是基态的, 而 $^8\text{Li} (\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反应中, ^{11}B 可处于激发态. R. N. Boyd 等人在日本 RIKEN 的 RIPS 上, 第一次用放射性束 ^8Li 加上 MUSIC, 用直接观测 ^8Li 和 ^{11}B 径迹的办法, 测量了 $^8\text{Li} (\alpha, n)$ 反应的激发函数. 可以看到: 包括 ^{11}B 激发态比只包括 ^{11}B 基态的截面要大五倍, 这对理论计算 ^{12}C 以上各种核的丰度会产生重要影响.

A. Coc 等人最近测量了 $^3\text{H} (^7\text{Li}, n)^9\text{Be}$ 反应截面, 测量的能区是 $E_{\text{cm}}=0.195\sim 0.9\text{MeV}$. 该反应的反应率 $\langle\sigma v\rangle$ 在检验模型和预言原始元素丰度方面是很重要的. 测得的 $\langle\sigma v\rangle$ 值比历来理论计算时使用的理论 $\langle\sigma v\rangle$ 值小了 10~14 倍. 这将对理论发展有

重要的影响。

在比利时,正在建造一个产生放射性束 ^{13}N 的加速器^[10],主要目的是研究 ^{13}N (P, γ)反应,不过,他们获得的 ^{13}N 束里 ^{13}C 玷污极为严重,现在可能已基本克服此问题了。

7 核技术应用

R. H. Rose作了题为“加速粒子在工业中的某些应用”的报告。Y. Hirao在“医用重离子同步加速器”中报导了日本的一个宏伟计划的进展情况。日本政府于1983年决定了一个用重离子束治癌的十年战略计划,称之为HIMAC计划。在1987~1993年间,计划投资3.1亿美金。由日本四大工业公司(三菱、东芝、日立和佳友)负责在千叶县兴建。由于重离子束的 dE/dx 曲线的特性,它的能耗主要集中于射程的末端。另外,重离子束的多次散射少。这些优点使高能重离子束对杀伤局部的癌组织而较少危害正常组织特别有利。他们的计划是:PIG(ECR)源—RFQ—ALVAREZ—SYNCHROTRON,能量可达600MeV/u。包括两个加速环,同时引出两束

重离子,一束是水平的,一束是垂直的,可以分别或联合使用。两束是可以相交的,有利于治疗安排。预计到1993年建成时,每年可做两万人次的医疗处理。医疗只在白天进行,晚上就可开展研究工作。

参 考 文 献

- 1 沈文庆. 核物理动态, 1989, 6 (2): 1
- 2 姜承烈, 赵葵. 核物理动态, 1990, 7 (1): 1
- 3 Twin P. Proceedings of Beijing International Symposium on Physics at Tandem, Beijing, China, 1986, World Scientific.
- 4 罗亦孝, 钟纪泉. 核物理动态, 1988, 5 (3): 1, 1988, 5 (4): 16, 1990, 7 (4): 1, 1991, 8 (1): 5
- 5 Halber M L, et al. Phys. Rev., 1989, C40: 2558
- 6 Scariassara F, et al. Zeit. Phys., 1991, A338, 171
- 7 Kuhn W, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 62: 1103
- 8 Esbensen H, et al. Phys. Rev., 1987, C35: 2090
- 9 RHIC Bulletin, 1990, I (1—4), 1991, II (1—2)
- 10 Supplement to CERN Courier, July/August, 1991
- 11 姜承烈. 核物理动态, 1991, 8 (2): 11
- 12 Asahi K, et al. Phys. Lett., 1990, 251B: 488
- 13 姜承烈, 程业浩. 核物理动态, 1991, 8 (2): 1
- 14 Darguennes D, et al. Phys. Rev., 1990, C42: R804

Latest Development in Nucleus—Nucleus Collisions —A Brief Introduction of the 4th International Conference on Nucleus—Nucleus Collisions—

Jiang Chenglie

(Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413)

Liu Yixiao

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

Abstract In this paper the main reports given on Nucleus—Nucleus Collisions International Conference IV are briefly introduced. It includes nuclear structure, nuclear reaction mechanism, super relativistic HIC, radioactive nuclear beams and its nuclear physics research, nuclear astrophysics and applications of nuclear technique. The Latest developments in every fields and the top research point in the near future are introduced.

Key Words SRHIC, radioactive nuclear beam, super deformation, GDR, LHC.