

费米能区重离子核碰撞的展望

M. Lefort

费米能区重离子碰撞的题目是崭新的，要想从这次会议就作一些结论或作一个总结都是不可取的做法。我们把以下一些想法叫做“展望”，尽管我对这个词的理解不一定确切。我想讲讲我认为在将来会是很典型的也是很激动人心的一些方面。可能这些想法不一定会被每个人能接受，但至少这是会议最后一个报告的特权，也可能是我本人在科学生涯中的最后一个报告，借此机会来表明不矛盾的各种想法。

一、总的看法

会议的主要课题一年前就选了，我认为这样选择并不坏，因此我想以此为线索来谈，先谈总的方面。用CERN的85MeV/A碳素进行费米能区的第一个实验时，要探索什么，我们几乎没有什么概念，有点象500年前在新大陆登岸的水手们，习惯于用欧洲人的传统眼光来审视这块土地。因此我们不得不采用从核反应研究中的别的能区，即从低能重离子碰撞或很高能量的重离子碰撞中借用的一些简单的概念和方法。因此那时德国小组和斯堪的那维亚一格勒诺布小组采用高能方面借用来的擦碎模型；而在奥赛我们对线性动量转移及其和熔合过程的联系感兴趣是不足为怪的。现在令人注目的是已经有了足够的数据和理论方法，使人们能致力于中能区的许多研究。第二个方面是，在进行了三、四年的单举测量后，已经作好设备和物理思想方面的准备来发展符合测量和多重性测量。

和七十年代进行的低能域研究的发展过程比较，情况大相径庭。低能实验是在几乎

没有任何理论模型下开始的。第一批关于后来叫做深部非弹性碰撞的结果是完全没有预料到的，因为那时只考虑两种反应机制即复合核的形成和准弹转移反应。我们老朋友Gross⁽¹⁾在1970年通过引进碰撞中的偏转函数和摩擦力建立了一个能描述我们的结果的模型，当时我们确是很受启发的。在那时为了确定新的实验方向而想要找到一个框架或一条可遵循的路线都是十分困难的。

现在，在费米能区，情况很不一样，正如这次会议上所展示的那样。给人影响极深的是已有了大量的理论方法，困难却在于为了描述一个特定的实验究竟选择那种理论方法才是最有效的。理论的目的在于描述要研究的观察量，这正是爱因斯坦的思想之一。

我的最后一个看法是关于所谓“符合”实验的，几乎每个报告都以建议发展符合实验来结束。但我们没有把握我们时时都能做好这种实验的准备。恕我直言，我们真的已经清楚地知道需要能发生什么，排除什么吗？在一些情况下，符合实验进行得很成功，这是由于这些实验是在单举实验结果的基础上作的周密的设想指导下而准备的。典型的例子是和反冲准复合核符合的快轻粒子发射实验，这些粒子具有束流的速度，对它们的观察为把非完全线性动量转移和非完全熔合作为炮弹的部分质量带入能量来处理提供了证据(参见S. Leray的报告)。另一个例子是在反冲重核源的质心系中轻带电粒子的各向同性发射的研究^(3,4)。它表明高激发态的重系统在裂变前甚至在每核子激发能大于3MeV/A都蒸发质子， α ，氘，氚。我可以肯定很快人们将在各种条件下测量碎片的多重性，即在周边和中心碰撞中以尽可能低

的能阈来测量碎片的多重性。现在已有一些初步结果。我本人感到遗憾的是，在获取数据和最终结果之间拖得时间太长了，至少对象我这样想急于理解在1GeV下被加热了的核究竟发生一些什么现象的人是这样。

在此我们来简略回顾一下各个论题。

二、核-核势， 弹散，全反应截面

重离子光学势模型是描述散射和反应的出发点。象A. Faessler所描述的把Brückner方法推广到重离子是一个很重要的进展。在核的表面锐近似势和绝热光学势无论实部和虚部都几乎一样，因此可以用锐近似来处理碰撞的第一阶段(参见Faessler的报告中的图6)。

精确的全反应截面的知识是很重要的，特别是在费米能区，该能区核子平均自由程变化强烈，n-p, n-n, p-p截面下降。同样我们也很想知道关于中子皮的更多的知识，特别是对轻核。象Bruandet描述的实验方法已有了很大改进，当人们获得次级的“奇异”束流时，把这种方法用到 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{11}\text{C}$ 这样的反应的全截面 σ_R 测量中去是很有意义的，这儿中子皮变化很强烈，后面我们还将谈到这一点。

三、分立态的激发， 准弹性反应，区共振

大的谱仪SPEG已在GANIC运行，要想知道它真正有多大用处还为时过早，但它确实是研究在50MeV/A还存在的截面很小，在零度附近的准弹转移的最好的工具，已经观察到了由50MeV/A ^{16}O 引起的 ^{208}Pb 到 ^{209}Bi 的一个中子转移，它是因布居倒转产生的匹配效应造成的。对很高的选择性的兴趣是否能弥补低截面，现在还很难说。对自旋翻转的研究也是高速炮弹的一个新方向。

我还要强调一下非弹性散射谱中结构的出色的实验证据，GANIL用氦束，SARA和Vicki用氦束都观察到了这种结构。Ph. Chomaz给我们显示了44MeV/A氦在 ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{140}Sn 和 ^{208}Pb 上的非弹性散射中直到60MeV激发能区域中的结构，包括高激发的区四极共振(参见他的报告中的图)。可能这是强的多声子激发的贡献。现在我们能更好地理解核-核碰撞早期阶段快的能量耗散的贡献，人们也应该考虑在锐近似框架中这种多声子激发如何和泡利原理一致。低能时，深部非弹过程跟随着这种耗散，对于高速度，这种能量耗散可能是观察到的类弹碎片减速效应的根源，在100MeV/A以下的周边碰撞中必须考虑这种效应。

四、周边碰撞，类 弹碎片，核子发射

对速度离初始炮弹速度不远的类弹碎片的研究已经有几年了，但是反应中也发射具有较低能量而能谱很宽的轻碎片，另外还有以接近束流速度一半的速度运动的源发射的碎片。这样的工作是从高能考虑的开始的，因此自然会采用Goldhaber⁽⁵⁾的描述方法，它在高能时很适用。当然从钟形的谱提取宽度总是可能的，就是在分布不对称时也能这样做。提取出来的 σ 值和费米动量宽度 σ_0 可按常用的表达式进行比较：

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_P(A_P - A_F)}{A_P - 1}, \quad \sigma_0^2 = \frac{1}{5} \langle P_F^2 \rangle$$

式中 A_P 和 A_F 是观察到的碎片和炮弹的质量(例如看R. Dayra的报告)。现在已经知道这套方法用到费米能区可能导致错误的结论。我们这儿观察到的并不是在1GeV/A下所描述的碎裂。首先，这里有经典的转移反应的贡献，甚至对z值等于 $Z_P - 2$ 的碎片也应减去这部分贡献；其次，正如已提到过的，由于平均场造成的减速过程还存在，甚至并未形成双中心的中间组合系统时就有。最后，

分离成旁观者和参与者的想法太图象化了，而这正是擦碎模型的基础，特别是很难想象可以清楚地分出炮弹旁观者和象火球那样飞走的参与者及靶旁观者。

在几个实验中为建立大的多元探测器作了很大的努力，已经开始符合实验来测量快的轻带电粒子和碎片。在GANIL，用大靶室Nautilus进行这类工作，我们已经听到了35MeV/A $^{40}\text{Ar} + \text{Ag}$ 系统上的首批结果。例如非常惊奇的是看到了 $Z = 16$ 的50%的碎片并没有伴随别的轻碎片。但我们并不知道是否初始碎片是 $Z = 18$ ，由于它的激发能蒸发一个 α 粒子（并未被Nautilus的塑料墙观察到）或是两个质子或一个 α 粒子直接转移到靶中，因此我要重复一下，在进行高度的符合实验之前，还须积累关于多重性及各种符合实验的更多的信息。

已经进行了的粒子-粒子关联，其目的是探测发射快粒子的热的区域。对这样解释有许多反对意见，现在情况还是很模糊的。在准炮弹和轻粒子之间的符合测量实验中，应该注意到用符合的 γ 的圆极化程度来观察核平均场使粒子偏转的实验尝试，结果表明它们主要是在负角发射的，这和吸引型的核平均场产生偏转是一致的。若相互作用纯粹是核子-核子型的，那末极化应很小。也许我们正在采用的是一个新的方法，尤其适用于费米能区，它能估计核平均场和核子-核子碰撞之间的相互影响（交流文章27, M. B. Tsang）。

在引言已提到过的框架内，已有了一些理论模型，也在这次会议上作了报告。它们通过处理平均场以及核子-核子相互作用来描述中能区的耗散碰撞。有几种近似方法，它们或多或少都和Boltymann—Uehling—Uhlenbeck方程有关。在这方面Grégoire提出的移动图象是很有建设性的。另一方面，这种处理对实验工作者来说，有点象一个黑魔盒。有时采用更简单的方法更好，例如碎片产生可作为炮弹核子和靶的核子碰撞

的结果（参见B. Harvey）。当用丰中子的靶观察到的碎片也是丰中子时，很可能是 $n-p$ 散射截面在我们感兴趣的能区内要比 $n-n$ ， $p-p$ 截面大三倍这一已知事实的结果。

最后一个尝试性的看法是我们还不能精确回答，什么能量或速度下深部非弹不再存在？这个很简单的问题和什么时候靶抓住炮弹变得困难以至于不可能这样的重要问题有关，它也和对一个给定的分波熔合的可能性大小有关。一个天真的想法是对炮弹核子的平均相对速度 \bar{V}_p 和费米速度 V_F 进行比较，

入射核子的平均动能是 $\langle E_K \rangle = \frac{m_0}{2} (\bar{V}_p +$

$\frac{3}{5} V_F)^2$ ，当 $\langle E_K \rangle \geq E_F + S$ 时，其中 S 是核子的平均分离能，抓住是很困难的。它相应于 \bar{V}_p 在 $0.2C$ 左右即 20MeV/A 。Rudolf展示了 18.2MeV/A $^{92}\text{Mo} + ^{92}\text{Mo}$ 具有很大能量耗散的典型的深部非弹的结果，而 35MeV/A $^{86}\text{Br} + ^{98}\text{Mo}$ ， ^{93}Nb 的反应中别的新的机制代替了深部非弹。

五、对心碰撞，高激发核，态方程和相跃迁

当我们认识到，在 30MeV/A 时例如氩炮弹将带 19GeV/c 的线性动量，碰撞参数小到 $1F$ 时还可以产生 $100\hbar$ 的角动量时，如何定义对心碰撞就不太清楚了。在对心碰撞研究中有三个方面的问题：和熔合有关的线性动量转移；高激发态核及核系统的温度极限或激发能极限。

为了知道在怎样的程度上二核之间的熔合过程是完全的或不完全的，估算线性动量转移是一个显然的方法，测量还可以通过决定反冲核的速度，可能的话也包括质量来进行。这方面的系统研究的第一个结果是对 30MeV/A ^{12}C 已不可能看到完全的动量转移。数据常用 $\tilde{\rho}$ 即平均线性动量转移和初始动量的比来表示（Viola系统性⁽⁷⁾）。Sylvie Leray

表明在 $\tilde{\rho}$ 和相对速度 $[(E - V_c)/A]^{1/2}$ 之间有一个简单的关系。有一些理论处理方法采用 Boltzman 方程, 假定在速度增加时, 核子-核子相互作用越来越禁止平均场融合过程, 多少可重演以上实验结果。但是另一表达方法也可解释数据, 它是由 Saint-Laurent 等在氦引起的反应的系统研究基础上⁽⁸⁾提出的, 然后又推广到重离子中⁽⁹⁾的方法。关键之处在于线性动量转移的极限随炮弹的质量增加最后相应于每核子 180 MeV/c 的量级。这种想法导致解释结果的列的可能性。例如, 可以注意到相应的速度 0.2c 接近核物质中声速的估算值。

若不完全的动量转移是由于不完全的质量转移造成的, 那末线性动量和带入能量之间的关系是很直接的。现在我们知道接近 1 GeV 的激发能可带入到核的复合系统中去, 正如我在 1981 年 CERN 实验后在 Bad Honnef 的德国物理协会上假设的那样⁽¹⁾, 这个简单的关系是:

$$E^* = \frac{\langle P \rangle^2}{2\langle M'_p \rangle} \cdot \frac{M_T}{\langle M'_p \rangle + M_T} + Q$$

式中 $\langle P \rangle$ 是平均转移的线性动量, M'_p 是融合到质量 M_T 靶中去的那部份炮弹的质量, 假定 $\frac{\langle P \rangle}{P_i} = \frac{\langle M'_p \rangle}{M_p}$ 。Jacob-Bondorf 告诉我, 我

们已发现了 Niels Bohr 在 1936 年即 50 年前在他的三篇发现复合核的文章之一中所说的东西: “可以想象复合核可以承受高达 1 GeV 量级的激发能。”

但是在用统计方法预言很重系统中裂变远超过粒子蒸发时, 一些实验表明, 统计处理并不完全正确。在这次会议上我们听到把 Fokker-Planck 方程用到很短寿命的复合系统的详尽分析预言裂变前有大量的轻带电粒子和中子发射。H. Delagrane 证明, 真要发生裂变时, 核已失去了很多中子, 变得不那么热了。若复合系统确实失去了很多质量, 裂变过程可能根本不发生, 这在 Rivet Ar + ¹⁸⁶H₀ 的实验中表明 (交流文章 39)。

后角发射的轻带电粒子的动能谱的仔细分析(需要验证是否是蒸发产生的)可能是唯一的估计这种激发核温度的方法。有一些问题需要注意, J. Alexander 解释了角动量和形变可能改变谱的极大值和斜率。如 Natowitz 指出的核也可能因长的粒子蒸发级联而冷下来, 实验结果是从很热的初始系统到接近冷的核温度下降过程中的平均值。还好, 对很重的系统在很初始的阶段蒸发少量轻带电粒子(α 和质子), 随后一直蒸发中子, 最后裂变。因此对很热的系统作了一个自然的选择⁽⁴⁾。借助于老的中子闪烁球现在可以测量中子多重性, 这是一个重要的进展。它提供了估计激发能和同时估计反应截面的直接的手段(参见 Jahnke 的交流文章)。

现在我们正在越过激发能的极限, 超过这个值已知的退激过程不再能观察得到了。我越来越相信那些实验事实, 但是我们还不知道它的意义。最近关于各种轰击能量下 ⁵⁸Ni + ²³²Th 反应中发射的裂变碎片角关联的系统研究很典型地表明在 ⁴⁰Ar + ²³⁸U 反应中已经观察到的现象, 即 9.5 GeV/c 处大的动量转移的峰的减小(C. Volant 交流文章 40)。对最高为 30 MeV/A 的轰击能相应的激发能达 920 MeV, 和 35 MeV/A Ar + U 几乎一样, 刚好在 $e^* = E^*/A = 3.5$ MeV/A 的极限的边上。去年给出的图现在还是对的⁽¹⁰⁾。它被我加上的一些新的结果进一步证实了。

有什么现象发生? 我们要寻找什么? 这确实是一个挑战。一个很吸引人的可能性是完全碎裂, 这是由 J. Bondorf 在热统计理论框架下及 X. Campi 用渗透模型提出来的。这两种方法导致类似的结论, 且在物理上是等价的, 而且都可以用于描述对心碰撞及导致近似于半束流速度的源发射轻碎片的那种大碰撞参数的碰撞(Borderie)。Rudolf 已给出了 Kr + Mo 和 Xe + Ag 的碰撞中两个碎片关联的有趣的结果。但真正的回答要由仔细的轻的和中间质量的碎片的多重性测量来给出。现在我们手中仅有核乳胶的结果。核乳

胶确实是很好的 4π 探测器，为电子型的探测器所做的实验努力是很大的，但我们还要等待结果。

当然多重碎裂不是已提出来的唯一的理论可能性，我们也听到平均场的核相互作用的静力学和动力学处理框架中热的核在温度高于 8MeV 时可能气化。

最后，核物质的态方程和相跃迁的假设几年前就作出来了，这导致了許多理论讨论，但关于关键性实验的真正的预言并不多。

六、协同过程

关于这个课题只说几句话。作为 $30\text{MeV}/\text{A} \sim 100\text{MeV}/\text{A}$ 能量下的核碰撞中协同过程的一个可能效应而产生的高能 γ 射线研究方面已有了很多成果。关于质子—中子韧致辐射的想法可追溯到1966年，Pinston给出的结果是令人信服的。Knoll和Gross作的关于 π 介子产生的评论有利于以复杂粒子作为终态的协同模型。

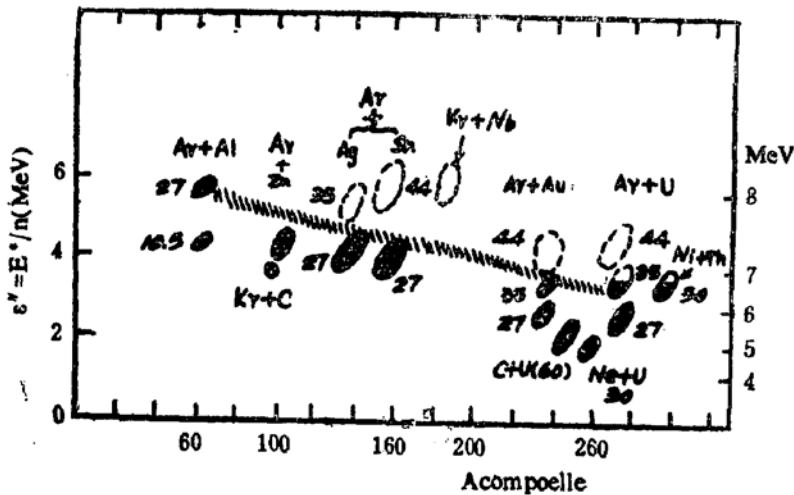


图1. 由线性动量转移和相应的 剩余核或裂变碎片的各种测量导出的每核子的激发能。图中的点复盖了线性动量转移从 $\frac{\langle P \rangle}{P} = 1$ 到 $\frac{\langle P \rangle}{P} = 0.6$ 的区域内的全熔合和非全熔合反应。实的点是对发在熔合的情况的，虚的点是对熔合截面小于 200mb 的情况。在图中也显示了可能的临界区域。

七、远离 β 稳定线核素的产生

这是最后一个但并不是最不重要的课题。首先我应该承认在用重离子代替高能质子作炮弹去产生新同位素，特别是沿着滴线的同位素方面我曾经并不乐观。原因在于我仅考虑了蒸发余核。D. Guerreau 给我显示了周边碰撞确实是产生稳定线谷两边核素的有效工具。

对半中子核直到 $Z = 20$ 已经达到了滴线；在另一边，有趣的核素，如 ^{31}Ar ，已经发现，它是双质子衰变的一个很好的候选者。除此而外，已用很灵巧的技术进行了一些谱学研究。

我的主要的关于这个课题的想法是关于实验方面的。上边所述的大部份结果是在叫做Lise的装置上得到的，它特别适于鉴别周边碰撞产物，它在早期就在 Ganil 运转了。决定建造Lise虽费了一番周折，我为它建得正是时候而感到骄傲。

我想用René Bimbot描述的次级束流的一些想法来结束这一节。

Lise是一个很有力的仪器，它可选出象 ^{17}N ， ^{16}C 和 ^{38}S 这样的不稳定的反应产物，操纵这些核的束流，达到人们早已关心的很高的纯度和强度，尽管我们还处在技术发展的早期阶段。我们希望以 10 粒子/秒量级的强度产生奇异束流，我可以肯定这将开辟反应机制的一些有希望的

实验。同样由于我们将有各种同位素靶和束流，因此可用来探索更多奇异的同位素。

我们的费米能区重离子核碰撞国际会议即将结束，它在Uicksi, GANIL, Sara和Msu初次出来三年后就开了。我再显示一下表示该能区主要特征的图(图2)。这五天中提出了许多有兴趣的结果，讨论非常活跃，

可以说这些加速器的选择是很好的。无论是理论还是已建成的或正在建成的实验设备给我们为未来提供了很大的希望。我希望正在做的这些出色的工作将克服那些使核物理不被重视的悲观论调，特别是我们国家中。我最后祝愿卡塔尼亚、加克河、得克萨斯、东京和兰州我们的正在建新的加速器的同行成功。我希望你们返回你们的实验室时记住Epictete的话：“只有那些记在你脑中，珍藏在你心中的东西才是属于你的”。

参 考 文 献

1. Gross, D. E., Kalinowski, H., Phys. Lett. 48B (1974) 302.
2. Galin, J., Gatty, B., Lefort, M., Peter, J., Tarrago, X. and Basile, R., Phys. Rev. 182 (1969) 1267.
3. Song, S., Rivet, M. F., Bimbot, R., Borderie B., Forest, I., Galin, J., Gardès, D., Gatty, B., Lefrot, M., Oeschler, H., Tamain, B., Tarrago, X., Phys. Lett. 130, B (1983) 14.
4. Jacquet, D., Duek, E., Alexander, J. M., Borderie, B., Galin, J., Gardès, D., Guerreau, D., Lefort, M., Monnet, F., Rivet, M. F., Tarrago, X., Phys. Rev. Lett. 53 (1984) 2226.
Jacquet, D., Galin, J., Borderie, B., Gardès, D., Guerreau, D., Lefort, M., Monnet, F., Rivet, M. F., Tarrago, X., Duek, E., Alexander, J. M., Phys. Rev. C32 (1985) 1594.
5. Goldnaber, A. S., Phys. Rev. C17 (1978) 2243
6. Bimbot, R., Borderie, B., Forest, I., Galin, J., Gardès, D., Gatty, B., Guillemot, H., Lefort, M., Oeschler, H., Rivet, M. F., Song, S., Tamain, B., Tarrago, X., Lecture Notes in Physics 158 (1982) 341.
Galín, J., Oeschler, H., Song, S., Bo-

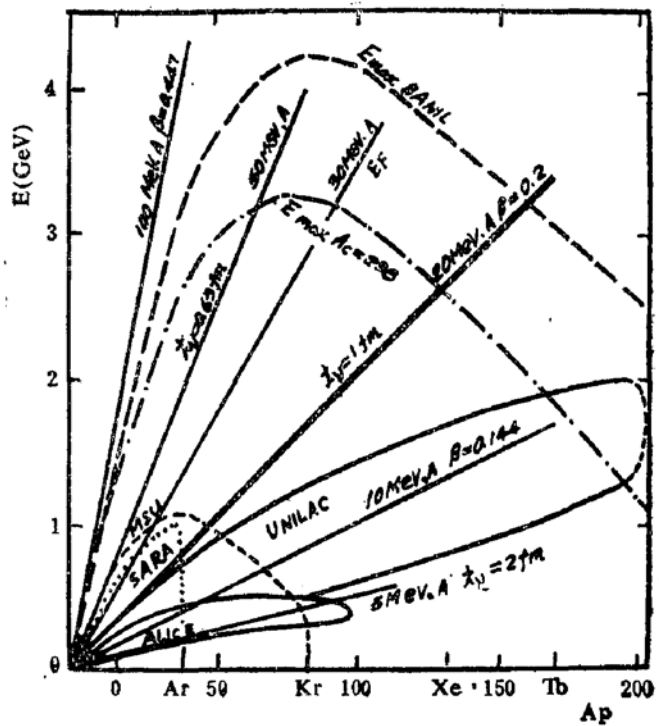


图2. 各种入射粒子A, 在²³⁸U靶上的以MeV/A为单位的质心系能量。图上也标出了以C为单位的核子波长和速度。

7. Back, B. B., Wolf, K. L., Mignery, A. C., Gelbke, C. K., Awes, T. C., Breuer, H., Violle Jr., V. E. and Dyer, P., Phys. Rev. C22 (1980) 1927.
8. Saint Laurent, F., Conjeaud, H., Dayras, E., Harar, S., Oeschler, H. and Volant, C., Phys. Lett. 110B (1982) 372.
9. Lefort, M., Nucl. Phys. A387 (1982) 3c-24c.
10. Lefort, M., Proc. Italian Phys. Soc., R. A. Ricci and C. Villi, 467 (1986).
Borderie, B., IPNO-DRE-85-23 (1985).
11. Edgington, J. A., and Rose, B., Nucl. Phys. 89 (1966) 523.

(王炳译自Journal de Physique C4 Supplement 8(1986) 427-434. 沈文庆校对)