

# GANIL 重离子研究展望

C · Détaz

作者曾将该文在 1989 年 10 月 3—12 日苏联杜布纳召开的重离子物理国际讲习班上报告

## 一、引言

GANIL 已在积极研究的两个科学领域是:高内部能量的原子核系统的热力学性质和远离稳定线轻核性质的研究,这些是当束流能量接近费米能时可有效开展的核物理研究的基础课题。在今后的几年里,GANIL 的目标是发展并进一步探索这两个领域的研究项目。

事实上,一些新的机器正在提供类似于 GANIL 可提供的束流给物理学家们使用,这些将一起为获得富有成果的研究作出贡献。当前,GANIL 致力于为研究稀有奇异核和高激发态核物质性质提供良好的实验条件。

## 二、奇异核研究的展望

十几年以前,Bevalac 作了一个从 212 MeV/A 的  $^{48}\text{Ca}$  的碎裂反应产生奇异核的先驱性实验<sup>[1]</sup>。与 Bevalac 获得的产额相比较,GANIL 的预言值相对偏低,这是因为低能时角分布较宽导致消色差分析谱仪不可能收集所有碎片。与 Bevalac 能区相比较,GANIL 的探测效率要减小二至三个数量级,甚至于,过去 GANIL 所能获得很高的束流强度还不足弥补这一点。然而经改进后,现在 GANIL 探测奇异核的总能力已超过 Bevalac 两个数量级左右。当然,GANIL 的

能力与即将投付使用的 SIS/ESR 的比较还是一个问号。

就如何有效地研究奇异核的问题,GANIL 已制定一些改进的方案,它们可通过一个特定的例子来说明。通过碎片的两个独立参数的精确测定可提取绝对质量。这种方法在其他文献中也有描述<sup>[2]</sup>,把磁刚度测到精确到  $10^{-4}$ (FWHM),通过约 100 米长的飞行距离可测量飞行时间。用这种方法也可测量一个精度好于 500 keV,有时甚至达到 200 keV 的新质量值。

测量的精度直接和收集到的所要测的核素的数目有关。粗糙地说,与  $\sqrt{N}$  成正比。从中可看到,在第 4 和第 7 节所描述的关于流强增加的方案是十分重要的。

显然,新同位素的发现、新的稀有的衰变方式的研究以及在这个讲习班中其他地方<sup>[3]</sup>提到的 GANIL 的主要研究领域,都获益于流强的增加。

这方面的第一个进展是近来成功地完成 OAE,即提高能量的运行模式<sup>[4]</sup>。

GANIL 已能由 PIG 离子源产生重离子束,它可加速从 95 MeV/A 的碳核到 8 MeV/A 的铀核区域。在此基础上,1975 年最终确定了加速器的主要参数。现在 ECR 源也已投入使用,与 PIG 源比较起来有很大的优点,其中包括运转的可靠性。事实上,自 1986 年起,GANIL 已用一个外部 ECR 源和一个轴向注入器进行过工作。

ECR 源产生更高流强更高电荷态的离子束,从而可把离子加速成更高的能量。然而,CSS2 的注入半径要求通过剥离器后电荷

态增加 3.5 倍,当然若用高电荷态的轰击离子是不可能做到这一点。

因此,GANIL 需要改进的是增加 CSS2 的注入半径,以便它能接收通过剥离器增加 2.5 倍电荷态的离子。用这种方法,较重的元素可确实得到较高的能量(图 1)。同时,整个加速器系统的另几个改进也得适应于这种新的运行方式。CSS1 要用的谐波数是 5 而不是 7。注入器 CO 也得相应修正,它用谐波数 3 运行。这样大大减小了引出半径,仅增加 23mm。这些和另一些不太重要的改进从 1988 年 12 月 1 日开始进行了六个月就实现了,这是 GANIL 出束六年以来第一次中断正常的运行。

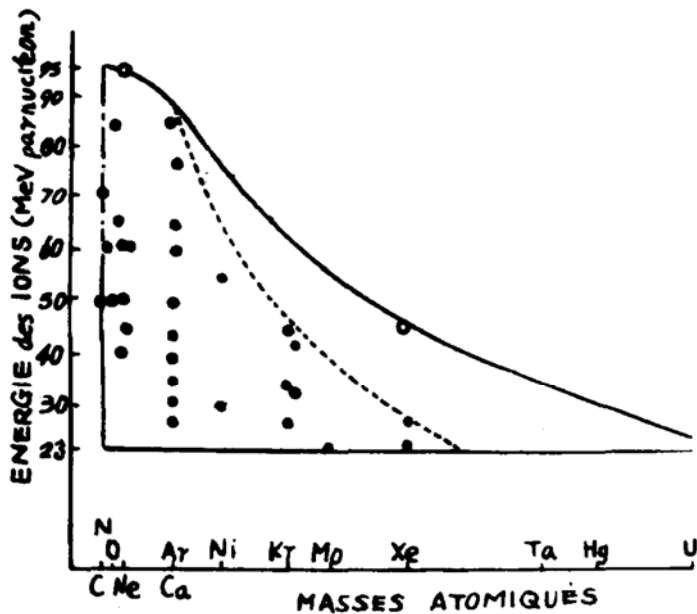


图 1. GANIL 加速的束流能量。黑点相应于 1983—1988,空心圆对应于能量提高(OAE)后加速的离子,实线代表现可达到的最大束流能,虚线对应于以前的能量上限。

这种改进方案的一个显著优点是利用高能量的较重离子可产生中重奇异核素成为新的可能,同时还可减少部份削裂碎片的数目,它们通常使通过磁谱仪确认核素变得不太确定。

第二个优点是 GANIL 的 ECR 源的持续发展促进束流强度的提高<sup>[9]</sup>,例如,对 Xe 离子,能量可从 27MeV/A 升高到 40MeV/A,

同时流强也从 50nA 增加到 800nA。

另一个奇异核研究的进展来源于丰中子同位素束流的使用,它可产生更丰中子的奇异核碎片,由 Dubna—GANIL 合作加速 <sup>48</sup>Ca 离子得到了丰硕成果<sup>[9]</sup>。另外,加速诸如 <sup>76</sup>Ge 等的可能性,也在积极的研究之中。

### 三、热核系统研究的展望

在过去的几年里,对高激发态原子核的研究,已取得了一些可喜的成果。

首先,在碰撞的初始阶段,原子核跨越了一个较广的温度和压缩范围,激发能在这两个自由度间分配,且随着时间而变化。用压缩能解释核的极限温度(对重系统  $T = 5\text{MeV}$ )越来越为人们所接受。这也意味着系统返回到低激发态的过程可被用来研究很宽范围内的核态方程。

其次,在某种条件下,动力学的演化会使这个系统通过所谓的临界不稳定性区域。通过计算预言,在这点上,多重碎裂将在短时间内发生,产生一个重碎片的特征分布。预计这个过程通过临界区发生,十分类似于物理学中许多情况下观察到的相变过程<sup>[7]</sup>。

这两个基础问题的进一步研究需要重大的实验的发展。

例如,关于热能和压缩能分配的研究需要详细地观察热核的退激发。在退激发过程中有大量轻粒子和重碎片发射。因此测量复盖  $4\pi$  立体角内的多重性是必需的。核碰撞的逐个事件的计数中对每个碎片要测量的量是速度、角度,对较轻碎片,还要测量 Z、N 值。真象第 6 节中讨论的很低的能量阈值也是十分必要的。

至于多重碎裂的研究,近来发展的分析方法指出必需测量碎片大小的分布(即 A 或 Z)的矩。通过临界区域,质量分布遵循幂次律( $A^{-1}$ ),然而在临界区域的二边遵循指数分布( $e^{-\alpha A}$ )。由此推论,大小分布的矩应依赖于临界区周围的多重碎裂的多重性。

从实验的观点来看,需要每个事件能发射具有多重性达到 30 或 40 的轻粒子和  $Z > 4$  的 10 个碎片,并且如果未测量 A、Z 的话,至少也得估计 A 和 Z 的值。

当然这些实验并未能通过现有的设备得到十分满意的结果,要么是能量阈值太高,要么是测量到的多重性不够,因此为了获得更满意的实验结果,需要发展一种新的如第 6 节中所描绘的探测器。

在这里必须提到一个新的情况,利用现有的 OAE 运行产生新的重离子束,GANIL 现已能研究费米能附近包含有 400 个核子参与的碰撞。当然,这节所讨论的这个困难而又基础的课题的进展将大大得益于新束流的使用。迄今为止,被研究过的大小有限和表面效应的强烈影响都干扰着热核的研究,现有的更多系统的研究将使这方面的研究变得越来越清楚。

#### 四、增加强度的运行模式(OAE)

目前的流强由于空间电荷效应(对较轻离子),或者离子源流强小(对较重离子)而受到限制,为了增加 GANIL 注入器提供的流强,已设计了一种新的高效注入系统<sup>⑧</sup>,它使放在 100 keV 平台上的 ECR 源和注入回旋加速器 CO1 的第一个加速间隙之间在六维相空间达到最佳匹配。

这个新的注入系统包括与后面紧接的静电四极透镜相联系的螺旋形偏转器,这个系统计划于 1990 年底开始运行。

确实,在过去的几年里,通过加速器的运行,清楚地表明了,当离子源的强度上升时(对 1.3keV/A 的  $O^{2+}$  束从 10 到 100e $\mu$ A),由于存在空间电荷效应,离子源和注入器输出之间的传输系数迅速地从 25% 递减到 3.5%。如果离子源的电压上升到 100 KV(偏转器的最大击穿电压)而不是现在的 15—20KV,由于速度的增加和聚束的增长,这个效率将增加到 40%。这样,在注入器中能加速强度

100e $\mu$ A、能量为 15keV/A 的  $Ar^5$  参考束流。另一方面,离子源和加速器间的束流输运线不仅无损失地传输束流,而且提供了六维相空间中从偏转器到加速器的最佳匹配。

考虑到总的相空间体积,在注入器传输线中可以传输 300 到 400e $\mu$ A 流强和在注入器中可加速 100 至 150e $\mu$ A 的流强。估计增加强度运行模式(OAE),尤其是利用现正在研制中的 14GHz 的 Caprice 型新 ECR 源,将使流强增加 3 ~ 5 倍。

#### 五、TAPS 光子多重探测器

在 GANIL 提供束流的头六年中,人们逐步认识到通过探测高能光子,可以很好地研究一些费米能附近的特有的并富有成果的核物理课题,例如对碰撞初始阶段的研究、 $\pi$  介子的阈下产生、巨共振的  $\gamma$  衰变和微结构研究。

下面简明扼要地提到这三个课题:

实验观察到重离子碰撞中高能  $\gamma$  发射超过自由核子—核子碰撞中预期的发射,这是由于原子核内核子的费米运动提供了额外的能量。所有的分析说明了,在能量被分配、热化之前的核碰撞初始阶段,硬光子发射的几率最大。人们已认识到怎样用硬光子的检测来阐明碰撞引起的动力学演化过程中的一个特定的阶段。

同样, $\pi$  介子的阈下产生也可通过核子的费米运动产生,同时集体效应也起作用。几个核子汇集各自的能量使  $\pi^0$  介子产生成为可能,它衰变时,可探测到两个硬光子发射,这可能是了解核物质内  $\pi$  介子场某些特征的唯一途径。

尽管在很长一段时期内,人们已认识到巨共振主要来源于核的集体激发,但还有许多问题要研究。首先,并非所有的巨共振模式都观察到了,例如矢量同位旋巨四极共振的研究是十分重要的。其次,巨共振的微结构研究、振动的阻尼,可能有助于弄清核物质

的基本性质。这就需要对它们的  $\gamma$  衰变进行细致的研究。

所有这些都促使 GANIL 寻求一种高效率的  $\gamma$  探测器, 它将与高分辨率的并能选择特定反应道的 SPEG 谱仪相连。

在 GSI 即将投付使用的 SIS/ESR 装置上设计的双臂光子谱仪 (TAPS) 是最恰当不过的。一个可喜的合作已在 GSI、GANIL 和 GIESSEN 实验室 (这种探测器的最主要用户) 和 KVI (未来的 AGOR 加速器的所在地) 之间建立, 共同筹建 TAPS。它将交替用在上面提到的实验室。

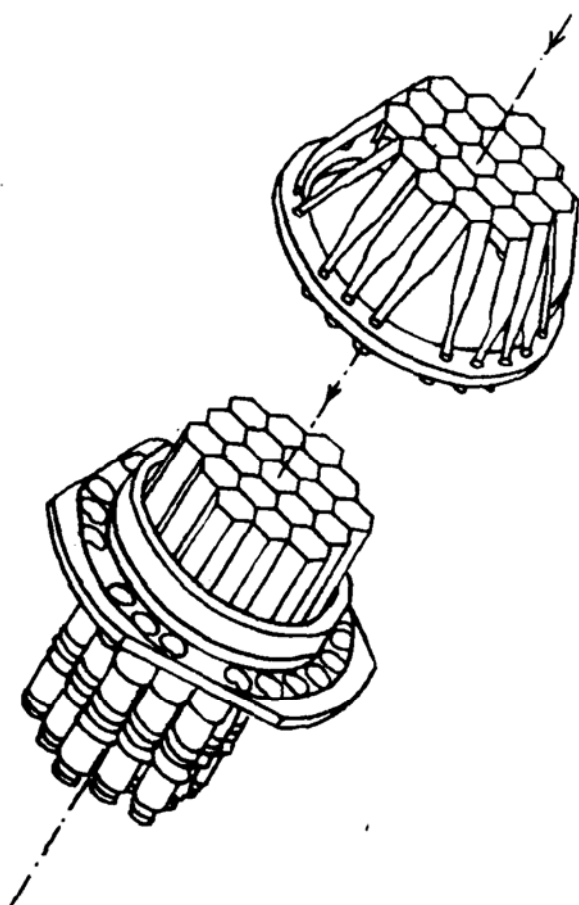


图 2. 上右图是反符合探测器, 下左图是 19 个  $\text{BaF}_2$  探测器组合。它们将记录  $\gamma$  信号同时甄别掉带电粒子, TAPS 将包括四个这样的组合。

系统包含 14 个由 19 个  $\text{BaF}_2$  探测器组成的基本单元, 可用两种方式来甄别  $\gamma$  粒子

和带电粒子。在线时, 每一个基本组合前安放一个反符合塑料闪烁器。  $\text{BaF}_2$  输出信号的离线时间分析也可提供另一个补充甄别。众所周知,  $\text{BaF}_2$  信号有快分量和慢分量,  $\gamma$  粒子的快分量比带电粒子的快分量强得多。

TAPS 多重探测器预期 1989 年 12 月在 GANIL 投付使用, 基本上与 SPEG 谱仪联合使用, 如图 3 所示。SPEG 鉴别粒子和测量能量的本领使它将用作 TAPS 的触发器。

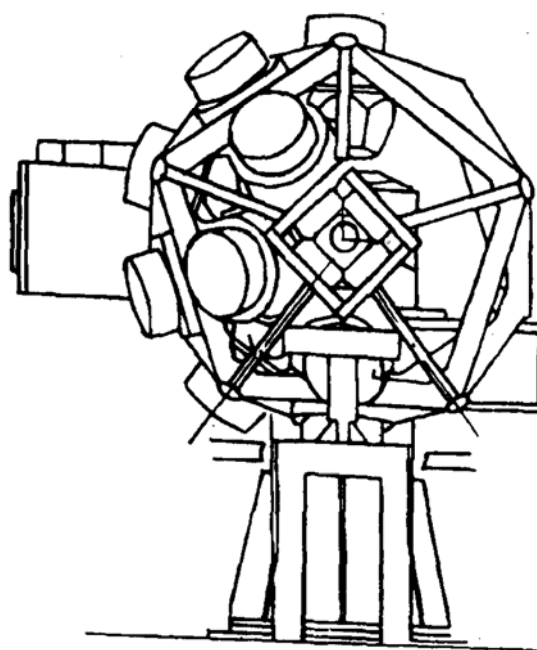


图 3.  $\gamma$  多重探测器安置在一个球形机械装置上, 从束流线左边或右边与 SPEG 谱仪相连。

## 六、带电粒子多重探测器 INDRA

第 3 节已提到不造成实验设备截断的, 多单元的多重探测器对研究 GANIL 的重离子引起的核碰撞的热力学演化过程是很有必要的。

时至今日, 还没有一个实验进行过包含所有符合的多举性测量, 而假设总是把实验结果和一个详尽的核过程联系起来。考虑到原子核系统的热力学演化过程是既困难又复杂的课题, 如果一开始就着手做这类多举性测量也许是不明智的, 从成百上千个同时记

录的参数中也只能提取很少一点有用的东西。然而,正是那些只注重某些参数的实验是现在的主要发展方向。因此,设计一种技术上可能的尽可能避免实验设备造成截断的探测器是十分适宜的。

可以预期,对几年前已安放在大型散射室 Nautilus 中的多重探测器将会有重大的改进。

这种称作 INDRA 的探测器是一种复盖  $4\pi$  立体角的探测器;它既能探测轻的带电粒子又能探测重离子。它由 GANIL (Caen)、Dphn/BE (Saclay)、IPN (Orsay) 和 LPC (Caen) 联合研制,它最适合于 GANIL 的  $10\text{MeV}/A$  —  $100\text{MeV}/A$  的热核形成的研究。

在向前角中,每个单元由三个探测层构成[  $\theta < 45^\circ$ : 轴向电离室(5cm; 50mb; CF 4),

硅探测器(300 $\mu\text{m}$ )和 CSI 探测器],在向后角中有二层探测层[  $\theta > 45^\circ$ : 轴向电离室(5cm; 50mb; CF 4)和 CSI 探测器],这些组合探测器将在一个大动态范围内 ( $2 < E < 100A \cdot \text{MeV}$ ) 可甄别轻粒子和重离子 ( $Z < 30$ )。探测器的几何效率接近  $4\pi$  角的 90%。

在更前冲角 ( $\theta < 3^\circ$ ), 12 个光透层探测器 (NE 102—NE 115) 组成的环,即使在高计数率的情况下也能鉴别 Z 数 ( $Z < 20$ )。

这个探测系统包括 96 个电离室、180 个硅探测器、324 个 CSI 探测器和 12 个光透层探测器。

总之,它是一个高分辨率、通用并且容易操作的探测系统,它既能单独使用又能与另一些供特定研究目的用的探测器联合使用。例如,在 INDRA 的设计中就考虑了可能和用来探测  $\gamma$  和  $\pi^0$  介子的 TAPS 装置或用来

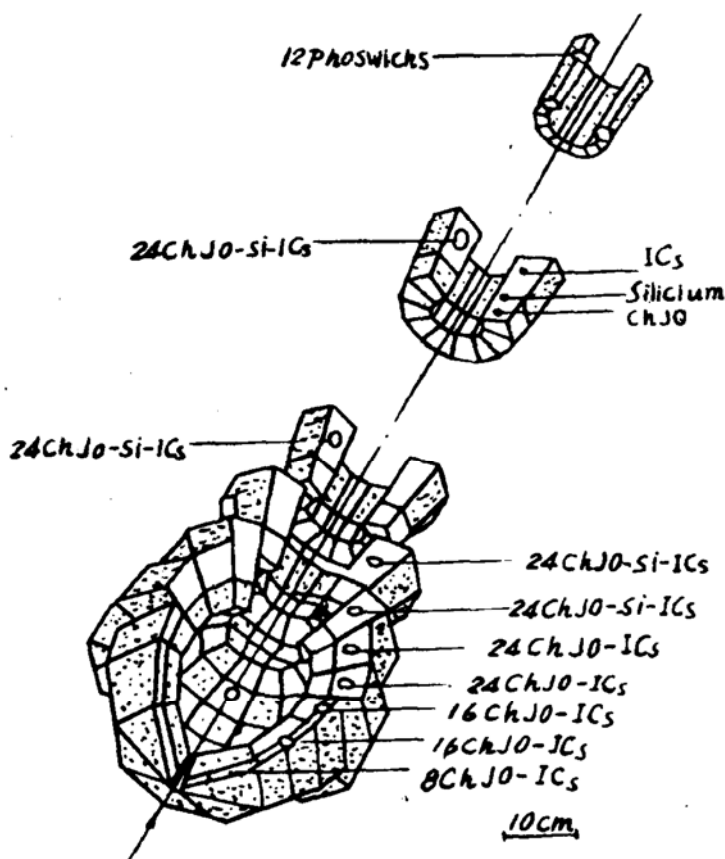


图 4. INDRA 多重探测器的示意图。探测器的几何形状分解成一系列轴心沿束流方向的环。这种环复盖了一定的极角范围,随极角减小而每个单元探测面积减小。每个环分成 24 个方位角单元。

进行中子符合的 ORION 装置联合使用。

值得一提的是计算机化电子学和触发过程都尽可能做得让用户满意。要象所希望的那样,在一个国家实验室里探测器系统应是一个重要的共用工具。

## 七、次级束流传输装置: SISSI

在 GANIL 能区,次级束流是强的初级束流通过类碎裂过程产生的,次级束流产额受制于当今束流传输系统的水平,其中包括 LISE 谱仪<sup>19</sup>,它接收有宽广的角分布和动量分布的碎片的能力有限。从这点看来,由于相对论展宽尚小,诸如在 Bevalac 现有的和不久的 SIS/ESR 中获得更高轰击能将会更有利。

如果 GANIL 能够设计成一个束流传输系统来接收所有的或大部分的碎片,充分利用高强度的人射束流( $10^{12}$  至  $10^{13}$ pps 不久会更),就会产生最强的次级束流,这将为次级束流轰击产生核反应研究(在合理的计数率下)和开展奇异核甚至迄今尚未发现的核素的研究提供新的机会。

正在研究的两个超导螺线管系统放在靶子的任一边可把次级碎片的收集率提高到现有的 20 倍,图 5 显示了当  $35\text{MeV}/A$  的  $^{86}\text{Kr}$  束流在  $^{27}\text{Al}$  或  $^{12}\text{C}$  靶碎裂反应产生的不同质量值的碎片的角分布  $d\sigma/d\theta$ (此图略)。显然,现在  $1^\circ$  左右的探测装置的角接收度限制了碎片的收集,若角度接收度增加到  $5^\circ$  左右,将使碎片接收率增加大约 20 倍。

这可从下列方法获得成功,GANIL 传输线的接收率可达  $35\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。对要传输的次级束流,它的线度  $\Delta x$  和角发散度  $\Delta\theta$  必须在各点都刘维定理,即  $\pi\cdot\Delta x\cdot\Delta\theta < 35\pi$ 。假如  $\Delta\theta$  必须如设想的那么大,即  $5^\circ$ ,那么  $\Delta x$  必须小于  $0.35\text{mm}$ 。换句话说,入射束流必须

聚焦于直径  $0.35\text{mm}$  的圆内。

这就意味着,在第 2 个加速器 CSS2 出来后尚未到达靶子之前,应该安置一个很强的聚焦螺线管。同样,在经过靶子后的下游应放第二个螺线管以减少次级束流的角发散度(起初是  $5^\circ$ ),使它可被束流传输线的第一个光学元件接收,即约是  $85\text{mrad}$  的角接收度。

空间利用的限制暗示着要有高的磁刚度,  $2.8\text{T}\cdot\text{m}$ ,在超导螺线管要达到 10 特斯拉才行。现阶段,正进行详尽的设计研制。

这种进展的优点是不言而喻的,奇异核产额将比过去高一个数量级以上。要分离出强度  $10^7$  到  $10^8\text{pps}$  的次级束流将成为现实,它们可直接输运至 GANIL 的各实验设备。

这个发展和束流强度的计划将一起大大促进远离稳定线核素的研究。

## 结 论

研究费米能附近的核碰撞方兴未艾,一些新的机制的发现,例如多重碎裂反应以及远离平衡态的核态方程的研究都构成重要的基础课题。研究远离稳定线核素能力的增加可能达几个数量级,将进一步增加了 GANIL 束流的可用性。随着 MSU 的  $K=1200$  的超导加速器的运行和 RIKEN、兰州分离扇回旋加速器的投入使用,卡塔尼亚和格罗宁根新加速器方案和另一些诸如杜布纳研究计划的实施,使这个能区的加速器正在增加。

因此,GANIL 要通过在加速器和实验设施的持续改善,才能在这个激动人心的领域里保持领先地位,使得研究长期处于预期的发展之中。

## 参考文献(略)

(译自 GANIL P 89-18,马余刚译,沈文庆校)