

GANIL的三个主要实验装置介绍

祝翔 王柄 沈文庆

(中国科学院近代物理研究所)

法国GANIL加速器于1983年1月开始进行物理实验,其能量范围为20—100MeV/u,束流强度范围为 1.5×10^{12} 粒子/秒($94\text{MeV/u}^{16}\text{O}$)到 2×10^9 粒子/秒($23\text{MeV/u}^{100}\text{Mo}$)。加速器提供了相当好的束流品质,束流能量分辨好于 10^{-3} ,水平发散度和垂直发散度小于 5π 毫米毫弧度[1]。由于GANIL是国际上较早达到中能区的重离子加速器,并且具有相当强的束流强度,所以它的实验装置和物理工作引起了广泛的兴趣。图1是GANIL的实验区,本文主要介绍它的三个主要装置:Nautilus大靶室(G1),SPEG磁谱仪和LISE束流线(D_3, D_4),以及用它们做出的一些物理工作。

在一个典型情况下,HF+BCS理论[2]计算了 ^{31}Na 、 ^{33}Na 的形变,相应的束缚能变化在1MeV量级。因此要求:

$$\Delta E_{\text{测量}} \sim 0.5\text{MeV} \quad (1)$$

相应的质量分辨为:

$$\frac{\Delta mc^2}{mc^2} = \frac{0.5}{M \times 931.5} \sim 2 \times 10^{-6} \quad (\text{对 } M = 20) \quad (2)$$

这在实验上是很难达到的。

若质量测量中质量半宽度为 Δm_{FWHM} ,质量谱是高斯型的,则由重心位置决定的质量的相对误差为

$$\left(\frac{\Delta m}{m} \right)_{s,t} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{2.35} \frac{\Delta m_{\text{FWHM}}}{m} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} + \sigma_{s,t}^2} \quad (3)$$

式中N是峰的计数, $\sigma_{s,t}$ 是把测量值和物理量联系起来时的精度。在可能达到的计数率下($N \sim 10^2 - 10^4$), $\left(\frac{\Delta m}{m} \right)_{\text{FWHM}}$ 的精度 10^{-3} 到 10^{-4} 是完全可以达到的。

为了保证最终的精度,就要求 $\sigma_{s,t} \leq 10^{-5}$,这样就可以满足(2)式的要求。

SPEG磁谱仪[3]于1985年中开始运行。

结构如图2。它的最大磁刚度为 2.88Tm ,立体角为 1msr (在垂直和水平方向 $\pm 2^\circ$)。通常利用磁刚度测量质量是利用下式:

$$B\rho = \frac{mv}{Ze} \quad (4)$$

SPEG谱仪的 $B\rho$ 精度为 10^{-4} ,z用经典方法确定,但对直接碎裂过程,产物速度v分布很

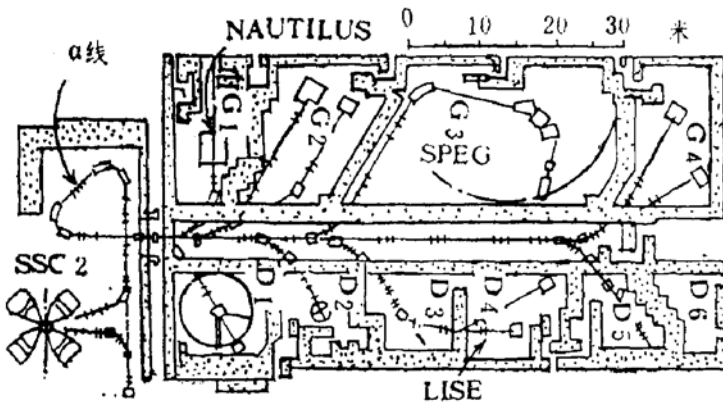


图1 GANIL的实验区

一、SPEG磁谱仪

在中能区,重离子碎裂反应已成为研究奇异核产物的重要工具。这些研究中,除了对新核素本身的观察外,需要知道它们最主要的性质——实验束缚能。SPEG磁谱仪就是用来探测新核素、在GANIL能量(1—2GeV)下研究分离核态的实验装置。

宽，需用其他独立的测量从(4)式中定出m。一种方法是通过能量测量来定m；

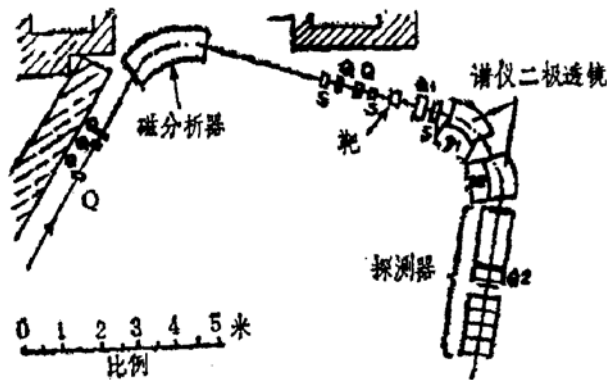


图2 SPEG谱仪图示

$$(B\rho)^2/E = 2m/(z^2e^2) \quad (5)$$

若用固体探测器，能量分辨最好约为 $[\frac{\Delta E}{E}]$

$\sim 1-2 \times 10^{-3}$ ，加上它对所探测的不同质量或原子序数的粒子，信号幅度有百分之几的变化，在 10^{-3} 内修正这个变化量使 σ_{sys} 达到 10^{-5} 的精度是相当困难的。SPEG采用了由直接速度测量得到m的方法：

$$B\rho/v = m/(ze) \quad (6)$$

在GANIL能量下($\sim 50\text{MeV/u}$)，典型的碎裂产物速度是 $v \sim 10\text{m/ns}$ ，因此要得到 $\Delta v/v \sim 5 \times 10^{-4}$ ，在时间分辨为 $\Delta t \sim 0.5\text{ns}$ 时，需要 $L = 100\text{m}$ 的飞行长度。因此把靶室移到加速器SSC2出口处，利用束流输运线作为飞行管道。

探测器的安排是：在磁谱仪入口处用一个平行板探测器确定粒子的水平位置X，同时还可给出时间信息；在聚焦平面上用两个漂移室确定粒子的水平和垂直坐标x, y。它们的结合给出 $B\rho$ 值。漂移室后面积为 4cm^2 的固体 $\Delta E-E$ 望远镜给出了z信息， ΔE 的快信号被用做飞行时间的停止信号，起始时间由第二个回旋加速器SSC2的射频信号给出，飞行距离为 108m 。SPEG束流传输系统是双消色差的，这使得飞行时间在一级近似下不依赖于产物在靶上出射的地点和角度。用新的一套束流传输线在发散度从标准线的 5π 毫米毫弧度增大到 35π 毫米毫弧度时，仍保证

双消色差。

图3是N的同位素质量谱，其分辨为 $7 \times 10^{-4}\text{amu}$ (FWHM)。主要贡献来自时间测量。若减小束流时间分辨可达 230ps ，相应质量分辨为 2×10^{-4} 。在全束流强度时，束流的时间宽度增加到 1ns (FWHM)，时间分辨变坏。对固体探测器的等离子体延迟效应引起的时间漂移进行修正后，可以得到 $\sigma_{sys} = 1.7 \times 10^{-5}$ 。这样SPEG可用来直接进行反应产物的质量测量，精度可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。

从SPEG对 $^{208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, ^{15}\text{N})^{209}\text{Bi}$ 反应得到的单核子转移导致的 ^{209}Bi 激发能谱可以看出，SPEG的高能量分辨可用来研究重核的孤立态的激发。

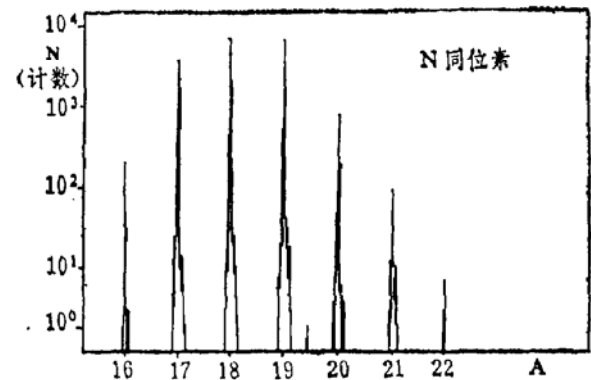


图3 SPEG测量的产物的质量谱，分辨为 $7 \times 10^{-4}\text{amu}$ (FWHM)

GANIL准备对SPEG时间测量系统作进一步的改进，主要是用微道板代替射频信号做起始探测器，用平行板代替固体探测器做停止信号，以提高时间分辨，减小系统误差。由于SPEG的高能量和质量分辨，使它成为中能重离子核反应机制研究、奇异核的发现及其质谱等方面的有力的实验手段。

二、LISE束流线

中能区的碎裂反应，弹核和靶核之间只有很小的动量转移，出射速度接近于束流速度，并在 0° 附近成峰。LISE^{[4][5]}提供的磁

分离对这类产物的分析是很合适的，它对碎裂产物起着A/Z分离器的作用。LISE束流线于1984年建成，进行了一系列实验。例如利用44MeV/A的⁴⁰Ar束流轰击钼靶，在实验中测到了用现有的质量公式预言的中子滴线上直到Z=7的核素，并且首先证实了稳定核素²²C, ²³N, ²⁰Ne, ³⁰Ne的存在。

LISE安装在两个相邻的，中间由混凝土屏蔽的实验大厅中（见图4）。主要由下列几部分组成：

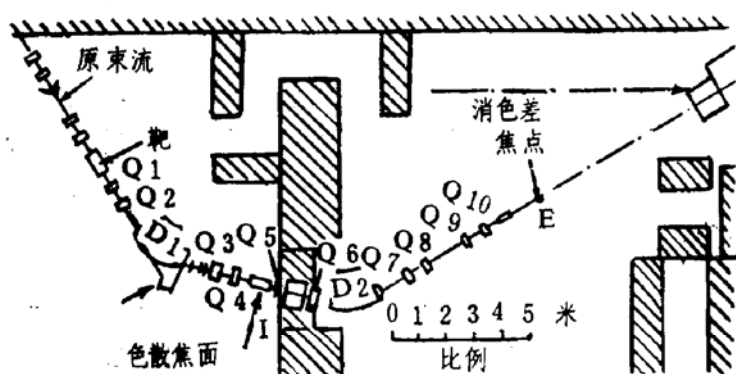


图4 LISE束流线

(一) 靶或剥离器。入射束流通过四个电磁四极透镜后直接引到靶上。10个不同的靶装在一个轮子上，靶用水冷却，计算机遥控使得在不破坏真空的情况下能方便地轮换靶。

(二) 分析部分。二极磁铁D1 (45°偏转，最大磁刚度为 $B\rho = 3.2\text{Tm}$ ，中心轨道半径为 $\rho = 2\text{m}$) 作为一色散单元。四极透镜Q1-Q4用于磁场中束流尺寸和真空腔I中像平面色散的调整。I中有一可调的狭缝。在色散为 $D = 1.84\text{cm}/\%$ 的情况下，靶中 $x_0 = 0.15\text{cm}$ 的物长，象放大率为 $G = 0.75$ 时，理论上

系统的分辨率为 $R = 1.2 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{R} = \frac{D}{Gx_0} \right)$ 。

缝的后面有一装置用于加降能片或剥离器。

(三) 色散补偿部分。第一个二极透镜D1及束流的色散，由第二个相同的二极透镜D2和四极透镜Q5, Q6补偿。这样就可调整由分析器状态的变化所引起的与角度和位置有关的色差项。应强调的是，在不同束流能量

以及在像平面上安装了降能片的情况下，仍能在D2的出口处得到双消色差，因此粒子在靶和探测器之间的飞行长度是固定的 ($l = 18\text{m}$, $\Delta l/l = 10^{-4}$)，碎片的飞行时间成为鉴别粒子的重要参数。

(四) 聚焦系统。四个四极透镜Q7-Q10把束流引到实验区E。由于双消色差，它们仅在两种主要情形下传递聚焦参数：在实验区要么水平面和垂直面内都聚焦，要么水平面内聚焦而保持垂直方向平行。

LISE总的接受角为1msr，相平面上狭缝给出的最大 $B\rho$ 接受范围为 $\Delta B\rho/B\rho = 5\%$ 。束流的色络面和强度由次级发射多丝正比室和法拉第筒监视。一个在线计算机控制束流线上所有的部件并给出束流诊断。

F. POUGHEON^[6]等人在LISE上首次发现了 $T_z = +5$ 的奇异核²²C。实验用44MeV/A⁴⁰Ar轰击 $166\text{mg}/\text{cm}^2$ ¹⁸¹Ta靶。束流强度为 3×10^{11} 粒子/秒。选择丰中子靶是为了增加碎片的丰中子产物。碎片在0°由LISE收集，并由一望远镜系统鉴别。望远镜由两个 ΔE 面垒型Si探测器 (1500 μm 厚)，一个4000 μm 厚的Si-Li探测器和一个反符合探测器组成。靶和望远镜之间的飞行距离为18m，时间信号由SSC2的射频信号和 ΔE 提供。因此碎片通过两次Z鉴别 ($\Delta E_1, \Delta E_2, \text{TOF}$) 和一次A鉴别 (ET, TOF)，便可得到0.2—1%的时间分辨和1%的Z分辨。为了保证彻底的剥离，在两个二极透镜之间的色散焦平面上放置了一个20 μm 厚的铝箔，以避免遗留的 13^+ 和 14^+ 态被记录。

在近十几个小时的寻找²²C的实验中， $B\rho$ 值调在3.10Tm。图5是对所有事件积累所得到的飞行时间TOF和电荷Z的双维图。对于一给定的磁刚度，相同A/Z的粒子具有相同的速度 ($B\rho \sim (A/Z)v$)，也就有相同的飞行时间。图中，A/Z=3的核素 (¹⁵B, ¹⁸C, ²¹N) 清楚地时间方向形成一条线。已知

不稳定核素 ^{18}B 没有出现,这加强了观察到新核素 ^{22}C 的可靠性。

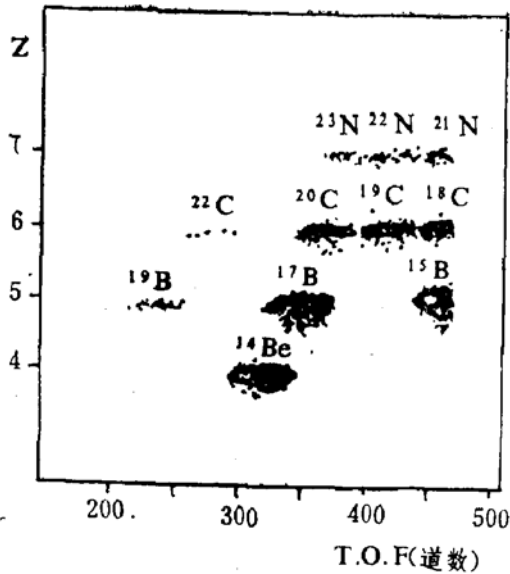


图5 LISE束流线上用 $44\text{MeV/A}^{40}\text{Ar}$ 轰击 ^{181}Ta 产生的产物的核电荷数 Z 和飞行时间的二维散布图。 ^{22}C , ^{23}N 和 ^{19}B 是实验中发现的新同位素

LISE还能提供类H, 类He的重束流,以进行原子物理研究。同时可利用LISE把前方向反应产物和主束流分离,产生放射性次级束流供实验研究使用。

三、大靶室NAUTILUS

随着入射总能量的提高,重离子反应中带电粒子的多重性也增加。在GANIL能区

($20\text{--}100\text{MeV/A}$) 多体反应占主导地位,单举测量已不能满意地描述反应,需要进行多重符合测量,继而推出一批新型的探测系统。

NAUTILUS是适合GANIL能区重离子反应研究的一个大靶室,如图6所示,它是一个体积 35m^3 的圆柱形空腔,直径3米,长度4.5米。用这一靶室研究各种反应过程时探测器的位置可灵活安排,它的长度也适于提取飞行时间的探测器在前角区工作,其中最有代表性的探测器是装于该靶室后盖上的塑料多重探测器(plastic multidetector),它可以在大立体角范围内同时测量多个粒子或轻核,常用于和其他重离子探测器符合。共96个单元,每个单元由2mm厚的快塑料NE102薄片通过边缘接弯曲型光导和靶室外的光电管相连接。该探测器覆盖角为 $3^\circ\text{--}30^\circ$ 。通过 ΔE 和飞行时间来鉴别核电荷 Z 。

利用该探测器进行的一个典型实验是研究中能重离子反应中转移和碎裂的竞争⁽⁷⁾。利用 $35\text{MeV/A Ar} + \text{Ag}$, $\text{Ar} + \text{Au}$ 实验,探测器的安排如图(6),类弹碎片用 $\Delta E\text{--}E$ 望远镜测量,剩余靶核由 $\Delta E\text{--}E$ 望远镜的第一个单元或TOF望远镜探测,裂变碎片通过TOF望远镜和平行板探测器进行符合测量;前方向发射的轻粒子由塑料多重探测器来测量。

转移反应对应于0多重性事件,对从多重探测器中心孔和大于 30° 处逃逸的粒子进

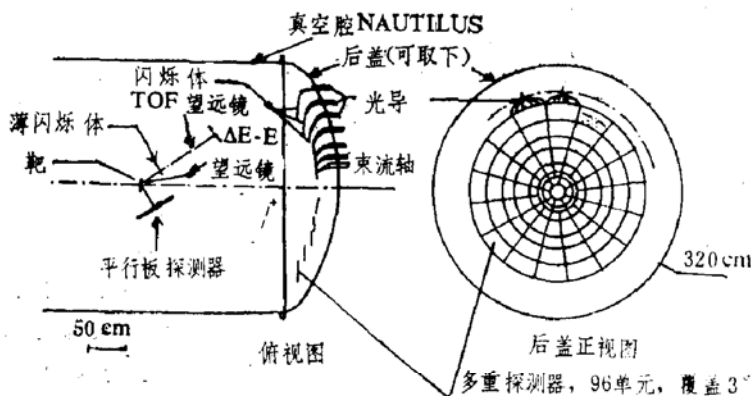


图6 GANIL大靶室NAUTILUS。其中探测器是为 $35\text{MeV/A Ar} + \text{Ag}$, $\text{Ar} + \text{Au}$ 转移和碎裂过程竞争的研究布置的

行修正后, 可以从原始数据得到转移几率的角分布。从这个实验和另外一些实验的结果看出, 在中能区离弹核相差三个电荷以内转移反应对“碎裂峰”的贡献仍十分重要。

GANIL加速器目前已在用 ECR 离子源。并准备在1989年初对加速器进行改造, 使加速器能更充分利用 ECR 源的优点, 使得能量更高, 束流更强。改进后的加速器将会使上述实验装置发挥更大作用。

参 考 文 献

[1] A. CHABERT and the GANIL Group

GANIL P.86-05

[2] X. Gampi, H. Flocard, A. K. Karman, S. Koonin, Nucl. Phys A251 (1975)193

[3] W. Mittig. et al GANIL P.86-03

[4] Alex. C. MUELIER GANIL P.84-10

[5] Dominique GUILLEMAUD-MUELLER
GANIL P.86-25

[6] F. POUGHEON. et al. Europhys. Lett., 2(7), PP.505-509(1986)

[7] G. Bizard. International Conference on Heavy Ion Nuclear Collisions in the Fermi Energy Domain