

洛斯阿拉莫斯的核化学研究

洛斯阿拉莫斯的LAMPF设备是它的介子物理工厂的英文的首字母缩写。本文首先简单地介绍一下LAMPF的加速器、实验区及核化学研究的实验装置，然后报告一下两个方面的研究工作：薄靶计划——远离 β 稳定线核的研究； π 核反应研究，最后简要介绍氦喷嘴在线同位素分离器计划。

一、加速器及实验设备

注入器是750KV的高压倍加器，共有三台。其中一台是加速高流强的 H^+ 离子，流强可达1mA，是非极化束。另一台用来加速极化的 H^- 离子束，流强为 $10\mu A$ 。从注入器出来的离子经过漂移管后能量达到200MeV。然后经过称为边耦合的主加速器，最终达到800MeV的能量。利用高频加速电压的正负半波，加速器可以同时加速 H^+ 和 H^- 两种离子。

高能质子穿过薄靶后到达 π 核反应研究区，那里共有两条 π 介子通道。一条是低能的，能量为0—300MeV，流强是 $8 \times 10^8 - 7 \times 10^9$ /秒。另一条是高能的，能量为100—600MeV，流强也在 $10^8 - 10^9$ 量级。还有两个靶位分别用来做 π^0 谱仪和停阻 π 介子(stoped π)实验的。

放射性探测设备主要有标准的 $3'' \times 3''$ NaI、Ge(Li)探测器和 $\beta-\gamma$ 、 $\gamma-\gamma$ 符合装置。数据获取系统是PDP-11/44计算机。

从1974年开始的在LAMPF的核化学研究计划包括： μ 介子俘获的化学效应，薄靶计划，主要是在丰中子边寻找粒子稳定态的边缘及 π 介子核反应研究计划。目前，把薄靶计划称为质量核谱学研究，是用TOF技术测量丰中子同位素的质量， π 核反应工作继续进行。另外还提出一个氦喷嘴在线同位素分离器计划。

二、薄靶研究计划

如前所述，这一研究在目前主要是寻找丰中子边粒子稳定态核的边缘，这一边缘对理论是一个很好的检验。用800MeV的质子轰击铀靶产生散裂反应，将轻的散裂产物偏转引出。这些产物在它的飞行途中穿过两个沟道板探测器以确定局部的飞行时间，然后用 ΔE 、 E 探测系统测定产物。这样，从整个飞行时间及 ΔE 和 E 信息可以确定产物的质量和 Z 值。用这种技术测定了元素Ne、Mg、Al、P的一些同位素，发现原来预言的一些粒子发射核实际上是粒子稳定的，并没有超出中子滴线。随着加速器流强的提高，质量分布峰的统计改善，这样就可以从已知的核推向未知核，例如 ^{29}N 和 ^{24}F ，以前是未知的，现在被鉴别出来了。但是用这种技术得到的核质量数据误差比较大，因此又研制了磁弯曲质量谱仪。其目的是测量 $A < 70$ 的丰中子核的质量。这种技术的优点是有很好的质量分辨， $M/\Delta M = 2000$ ；大的立体角以及一次同时测量等量异位素链的全部同位素。此外，用这种技术测定的核质量是直接的，不需要核能级的数据。由反应产物的反冲体直接进入谱仪，因此测量速度快，寿命在 $2\mu s$ 以上的同位素都可以被测量。目前使用铀靶，以后还可能用钍靶。用这套设备测量 $A = 40 \sim 70$ 的丰中子核，根据产生几率的不同，能量测量精度为30KeV至1MeV。我们希望用测量结果来研究一些感兴趣核的结构，如能隙、闭壳性质等。由于所得到的结果是直接的质量测量，因此有较大的精度与各种质量公式作比较。该质量谱仪目前正在建造，两个月后即可建成开始获取数据。预计今年可以获得大量的实验数据。

三、 π 介子核反应

在LAMPF产生 π 介子的方法是用800 MeV的质子轰击碳靶。下面介绍若干较新的和有兴趣的 π 核反应的研究工作。

1. 停阻 π 介子实验, 即 π 介子被靶原子核吸收。当 π 介子被核吸收时, 它必定是被一对核子所吸收。在这一过程中 π 介子消失, 它的静止质量转化为核子对的动能, 后者向相反方向发射出去, 每个核子带有约70 MeV的动能。如果吸收过程发生在核较深的部位, 则被发射的核子对在核内经受多次碰撞把能量损失在核内, 这时发射的核子数将大于2。所以发射一对核子的过程是很有选择性的。它发生在核的表面并损失在核内的能量小于下一对核子的蒸发能 ~ 8 MeV。以 ^{26}Mg 靶为例, 如果 π^- 介子被核子对np吸收, 则质子转换为中子, 结果是发射一对中子, 剩余核是 ^{24}Na 。如果 π^- 介子被核子对pp吸收, 发射一对np, 则剩余核是 ^{24}Ne 。用活化方法测量 ^{24}Na 和 ^{24}Ne 的比率可以得到 π^- 被np对和pp

对吸收几率之比。因为在核表面中子密度和质子密度不一样, 所以这一比值并不等于1。表1是对若干靶核测得的结果。

2. 单电荷交换反应, 例如 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$, 产物 ^{13}N 的半衰期为10分钟, 只有基态是束缚态。这一反应称为相似态跃迁, 因为 ^{13}N 和 ^{13}C 的基态是相似态。还有一些是非相似态跃迁, 例如 $^{12}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{12}\text{N}$ 反应, 也是居留到 ^{12}N 的基态, 产物的寿命仅有11ms。 $^{14}\text{N}(\pi^+, \pi^0)^{14}\text{O}$ 产物寿命70秒, 比较容易测量。还有一些反应是多重终态的, 过程比较复杂。如 $\text{Al}(\pi^-, \pi^0)^{27}\text{Mg}$, $^{45}\text{Sc}(\pi^+, \pi^0)^{45}\text{Ti}$ 和 $^{65}\text{Cu}(\pi^-, \pi^0)^{65}\text{Ni}$ 。这些反应都用活化方法测量产物的 γ 或 β 射线, 后两种情况下还对产物作了化学分离。

测量半衰期为11毫秒的 ^{12}N 需要特殊的装置, 其方法是将靶子装在一个转盘上, 让束流穿过靶子。转盘以每秒34.7周的速度旋转使带活性的靶子依次经过若干 ΔE , E望远镜, 寻找能量为16.3 MeV的 β^+ 粒子。

表1 π^- 介子吸收后, 两核子出射产物的核性质及比率

靶核	产物 ^a	E_x (keV)	γ/dis	产额 ^b	比率	
					实验	理论 ^c
^{26}Mg	15-h ^{24}Na	1369	1.00	12.3	6.8 ± 0.5	6.5 ± 1.1
	3.38-m ^{24}Ne	472	1.00	1.79		
^{74}Ge	14.1-h ^{72}Ga	834	0.956	2.8	11.0 ± 0.6	11.7 ± 2.9
	46.5-h ^{72}Zn	144.8	0.83	0.26		
^{97}Mo	86.6-h $^{95}\text{Nb}^{\text{m}}$	236	0.261	12.1	12.1 ± 1.2	11.0 ± 2.7
	34-d $^{95}\text{Nb}^{\text{s}}$	766	1.00			
	64-d ^{95}Zr	724/756	0.422/0.546	1.00		
^{114}Cd	3.13-h ^{112}Ag	617	0.42	2.5	12.4 ± 1.0	12.8 ± 3.3
	21.0-h ^{112}Pd	(617)	0.49	0.27		
^{142}Ce	40.2-h ^{140}La	487/1596	0.425/0.955	2.7	16.2 ± 0.9	16.5 ± 3.5
	12.79-d ^{140}Ba	537	0.236	0.167		
^{174}Yb	63.6-h ^{172}Tm	1094	0.06	3.1	18.2 ± 1.1	18.7 ± 4.5
	49.3-h ^{172}Er	407/610	0.431/0.452	0.17		

a. 对每个靶子, nn出射产物列为第一, np出射产物列为第二。在 ^{97}Mo 靶情况下, nn出射产物由两个同质异能态组成。

b. 在 ^{97}Mo 靶的情况下, 只测了相对产额。其余均以每停阻一个 π 介子的百分数产额表示。

c. 理论值比率的误差(只计统计误差), 是由于使用有限级联数目引起的。

在单电荷交换反应研究中，测量过程的激发函数，一般说这些激发函数变化比较平缓。但是 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 反应的激发函数在能量小于100MeV时有一很深的极小值，这是很有意思的。洛斯阿拉莫斯的理论家计算了这一过程的截面，在 π 介子能量为60MeV时得到一极小值，而实验得到的极小值大约在70MeV。

对前面提到的多重终态的三个反应，用费米气体模型计算的激发函数中有一些涨落，但我们实验测量到平滑的曲线，没有观察到涨落。

用 π^0 谱仪测量 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 的激发函数，也发现在入射介子能量为50MeV时截面急剧下降，与理论的预言相一致。对这种现象的解释是 π^+ 入射时P波是排斥的而S波是吸引的，在50MeV时两者的净作用趋于零。他们对这种激发函数中的极小值现象进行进一步的研究发现从氢开始，出现最小值的能量为40MeV。随着靶核的变重，这一能量增加。这可以用库仑效应来解释。

3. 用 π 产生 π ，即 $(\pi, 2\pi)$ 反应。根据LAMPF-2计划未来的 π 介子能量可达到GeV量级，这时 $(\pi, 2\pi)$ 反应变得很重要。已研究了反应 $^{27}\text{Al}(\pi^+, 2\pi^+)^{27}\text{Mg}$ ， $^{51}\text{V}(\pi^+, 2\pi^+)$

^{51}Ti ， $^{45}\text{Sc}(\pi^-, 2\pi^-)^{45}\text{Ti}$ 和 $^{65}\text{Cu}(\pi^-, 2\pi^-)^{63}\text{Zn}$ 。在这些比较重的靶子上做 $(\pi^\pm, 2\pi^\pm)$ 反应在洛斯阿拉莫斯还是第一次。这种反应的截面是很小的，因此必须加厚靶子，此时就会出现一些干扰反应，如 $(\pi^+, 2\pi^+)$ 相当于 (n, p) 反应而 $(\pi^-, 2\pi^-)$ 相当于 (p, n) 反应。对这些干扰反应作修正的方法是测量不同厚度靶子的活性然后外推到零厚度。因为当靶子厚度趋于零时 (n, p) 反应的产物亦趋于零。用这种方法得到在能量为350MeV时 ^{27}Al 靶的 $(\pi^+, 2\pi^+)$ 反应截面为 $\sim 14\mu\text{b}$ ，对 ^{51}V 靶为 $\sim 13\mu\text{b}$ 。 $(\pi^-, 2\pi^-)$ 反应的情况比较复杂。因为它相当于 (p, n) 反应，而质子的射程是很短的，因此在靶厚外推到零时 (p, n) 反应产物的贡献不能被忽略。

四、氦喷嘴在线分离器计划

目前已提出一个氦喷嘴在线同位素分离器计划，主要目的是用来研究800MeV质子在铀靶引起的裂变或散裂产物中寿命比较短的同位素。图1是LAMPF的同位素分离器布局。氦喷嘴靶室A-6靶位，反应产物通过20多米长的毛细管传到分离器的离子源。氦喷嘴靶室采用标准的技术。充氦反应室的深度可以调节以适应射程不同的产物。用NaCl蒸气作为添加剂，氦为载气。表2和表3分别是

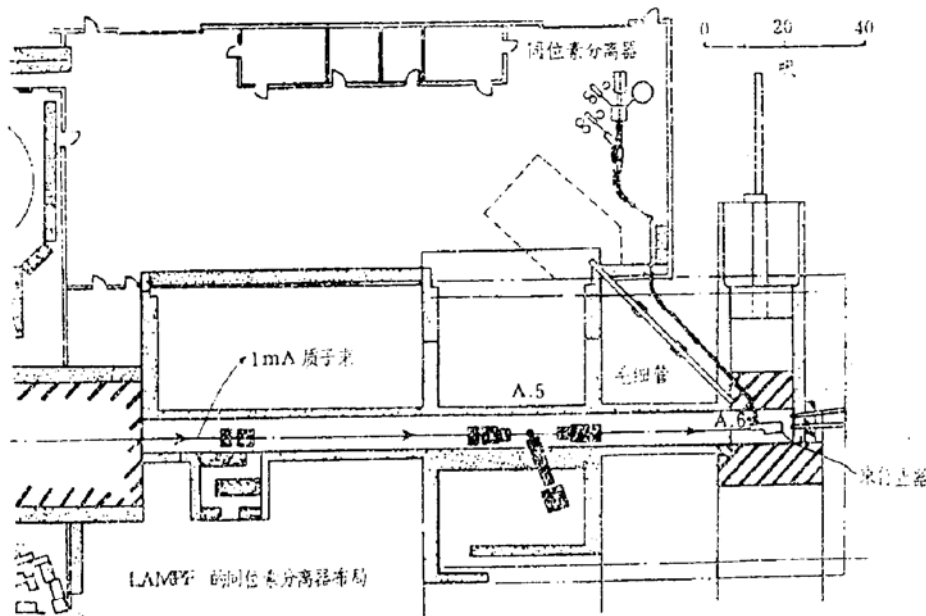


图1

1	H																	2	He																
3	Li	4	Be											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne										
11	Na	12	Mg											13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar										
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac	104		105		106		107		108		109																			

镧系

57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

锕系

89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----

在LAMPF可以测到的元素
 在CERN的ISOLDE已测到的元素
 在BNL的TRISTAN测到的元素

图2

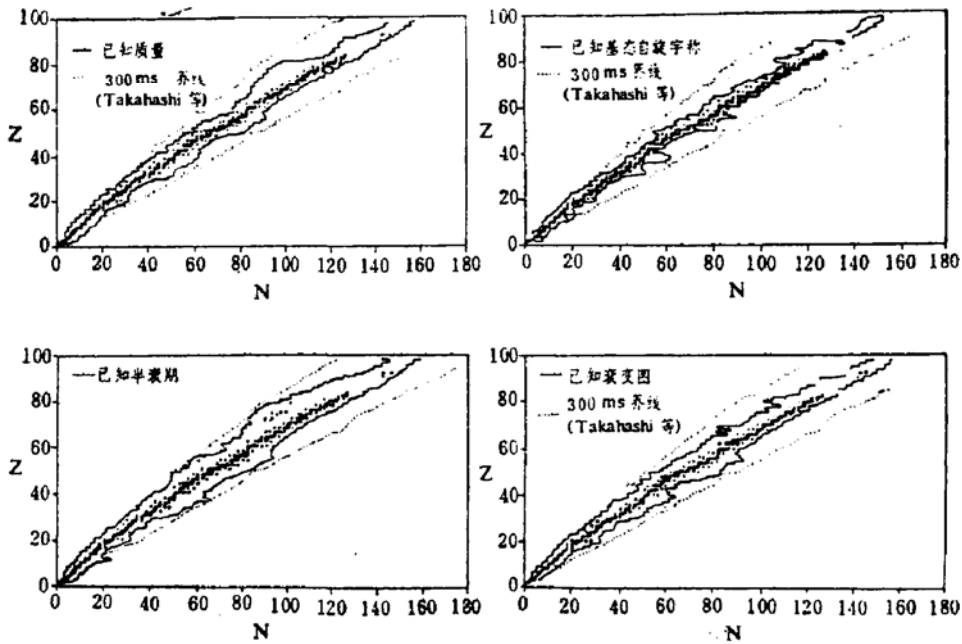


图3

用氮喷咀技术传输铀靶的某些裂变产物和散裂产物的传输效率。可以看出对大部分产物的传输效率均在50%左右。实验测定的传输时间约为300毫秒。

图2是周期表的元素。表下部的图例分别表示预期在LAMPF可测到的元素、在CERN的ISOLDE已经测到的元素和BNL的

TRISTAN测到的元素。可以看出在ISOLDE和TRISTAN可以测到许多元素，但是对于一些难熔的金属，LAMPF可以测量而ISOLDE不可能测量，因为他们使用了热离子源。

图3是一些核素图。每幅图上都标出了半衰期为300毫秒的核的位置以及对各种核

表 2

氦喷咀传输效率 (裂变产物)

U 靶					
NaCl 炉 - 660℃					
Z	鉴别出的A 值	效率	Z	鉴别出的A 值	效率
Ga	72,74	0.38±0.12	Pd	109,111	0.41±0.12
Ge	77,78	0.43±0.03	Ag	113,115	0.49±0.05
As	78	0.40±0.05	Cd	111,117,118	0.51±0.02
Se	81,83	0.50±0.07	In	116,117,118,119	0.53±0.08
Br	84	0.28±0.04	Sn	127,128	0.49±0.06
Rb	88,89,90,91	0.26±0.04	Sb	129,130,131,132	0.49±0.08
Sr	91,92,93	0.51±0.04	Te	131,133,134	0.54±0.10
Y	90,91,94,95	0.47±0.03	I	134,135	0.42±0.03
Zr	97	0.47±0.02	Cs	138	0.24±0.06
Nb	98	0.50±0.04	Ba	139,142	0.45±0.09
Mo	99,101,102	0.54±0.07	La	142	0.46±0.09
Tc	101,102,104,105	0.51±0.04	Ce	146	0.56±0.08
Rh	106,107,108	0.52±0.04	Pr	146,147	0.51±0.09
Ru	103,105,108	0.54±0.07	Nd	149	0.64±0.10

表 3

氦喷咀传输效率 (散裂产物)

Ta 靶			Rh 靶		
NaCl 炉 - 660℃			NaCl 炉 - 600℃		
Z	鉴别出的A 值	效率	Z	鉴别出的A 值	效率
Nd	136	0.38±0.02	Se	73	0.58±0.13
Tb	147—151,154	0.41±0.02	Br	75	0.067±0.012
Dy	152,153,155,157	0.41±0.01	Rb	81, 82, 84	0.47±0.05
Ho	155,159	0.42±0.01	Sr	81	0.34±0.02
Er	158,159,161	0.42±0.01	Y	84, 86	0.44±0.02
Tm	161,163	0.37±0.02	Zr	85	0.49±0.03
Lu	167	0.36±0.02	Nb	88	0.47±0.03
			Te	92—94	0.40±0.05

性质我们目前知识所达到的位置。可以看出,用我们提出的氦喷咀在线同位素分离器装置(传输时间为300毫秒)可以研究大量的未知核或未知核性质。

最后给出LAMPF的氦喷咀在线同位素分离器可以进行的科研工作及其特色。

LAMPF ISOL/He-喷咀设备

科学目的

- 鉴别和研究新的丰中子和缺中子同位素。
- 测定在其他地方不可得到的核素的核基态性质(J^π , 矩, 质量)。
- 通过对激发态系统性($E, J^\pi, B(L, \lambda), \log ft$)的扩展检验核模型。
- 为核数据基础增加新的信息。

- 研究延迟粒子发射。
- 扩充800MeV同位素产额分布知识。
- 为次级反应研究生产同位素靶。

新数据的应用

- 核理论; 超对称性概念
- 天体物理
- 反应堆工艺
- 表面物理

LAMPF 氦喷咀系统的特色:

1. LAMPF的流强是最高的($\sim 1\text{mA}$)
 2. 使用薄靶避免了扩散和再吸附损失
 3. 可处理全部元素
 4. 可研究稳定谷两边的核素
 5. 寄生运行保证了高的可利用性
- (孙锡军根据Dropsky教授的报告整理)