

放射性核束的物理研究及放射性核束加速器

——北京串列加速器国家 实验室一个发展方向的建议

姜承烈

(中国原子能科学研究院)

摘要: 结合当前国际上核科学发展的潮流和趋势,本文着重介绍了放射性核束的意义及其设备。在此基础上,为北京串列加速器国家实验室提出了一个既合乎国际上的发展趋势,又经济可行的发展新方向;为实现这一新方向提出了一个独具特色的新方案。

一、引言

关于放射性核束(以下简称放射性束)的加速问题,从国际上讲,只是近几年的事。追溯得远一点,1984年和1985年各有一次国际会议^{[1],[2]}。但是,真正引起国际上重视,而形成为一个极受重视的发展方向,则是1989年10月在Berkely召开的第一次放射性束国际会议^[3]。此后,1990年4月,在Los Alamos召开了一次放射性束的工作会议^[4],接着,1990年12月,又在比利时的Bruxelles召开了一次放射性束工作会议及一次核天体物理会议^[5]。1991年,将在比利时召开第二次放射性束国际会议^[6]。作者介绍以上情况,是想强调指出:关于放射性束的加速问题热起来,是1989年才开始的。我们如果现在去抓这个新的发展方向,正是一个很好的楔机。1989年,美国核科学顾问委员会应能源部和核科学基金会的要求起草了一个发展核科学的长期计划^[7]。为准备起草该计划,曾召开了八个预备会议,其中有三个预备会议(低能核物理,高能核物理和天体物理)就分别建议建造一台放射性束加速器。同时除美国外,很多国家也纷纷在提建造放射性束加速器的方案。由此可见,现在已掀起了一个筹建放射性束加速器的热潮。

早在数年前,作者注意到:放射性束的实验是一个引人瞩目的发展方向。它对核物理研究很有意义。兰州近物所的同志提出,在他们的加速器上建立放射性束管道,我个人很支持这个想法。原子能科学研究院及近物所都已派人到日本RIKEN去进行合作和学习。还请了RIKEN的Taniguchi来中国访问,介绍他们搞放射性束实验的情况。其目的是想以次级放射性束来进行核物理研究。这可以做不少有意义的工作,但有很大的局限性。近年来,作者还意识到:核天体物理学已成为核物理学的一个重要组成部分,我们应该密切注意放射性束和核天体物理学这两个方向的发展。当然,还有一个新问题需解决,即所建的串列加速器实验室今后向何处去?搞后加速,还是什么别的呢?

1990年,作者应邀赴日访问,乘此机会,主动参加了日本INS的核天体物理研究和RIKEN的放射性束实验。实际上,核天体物理研究也要求使用放射性束(见作者的“核天体物理学”一文)。放射性束的实验和核天体物理学这两个方向可以结合起来。结合调研和这些实践,作者仔细地考察分析了我们实验室的HI-13串列加速器加速放射性束的可能性,认为是可行的。因此,提出了一个新的加速放射性束的方案。如果我们实验室沿着搞放射性束实验这个新方向发展的话,

这既合乎当前国际上发展的趋势,又花钱不多,也符合国情、搞得起,还有特色。

从国际上核物理发展的趋势来看,这种选择是合适的,而且再也找不到别的更好的选择。有一个情况值得注意:美国当局决定关掉其三个低能核物理装置中的一个,以便将这部份人员转向新的方向。这三个装置是:LBL的88"的回旋加速器;Oak Ridge的HHIRF,即一台串列加速器加一台回旋加速器;Argonne的ATLAS,即一台串列加速器(FN)加一台超导直线加速器。另一个情况是国际原子能机构的核数据科遇到了困难,当局也希望其转向新的方向。也就是说,传统核物理虽仍有意义,但已渐渐失去了前沿的意义。那么,这些新的方向和前沿是什么呢?在美国核科学发展的长期计划中,提出了九十年代核科学发展的九个前沿课题。从这些课题的内容来看,它们很少涉及或不涉及传统核物理学。这些课题的题目是:

- (1)核内核子;
- (2)核介质中的强子;
- (3)核和强子中的夸克;
- (4)核的味物理;
- (5)极端条件下的核;
- (6)核碰撞的动力学和热力学;
- (7)核物质的禁闭相和开禁相;
- (8)基本相互作用的精确检验;
- (9)核物理和宇宙。

这些,就是今后核科学发展的潮流和趋势。为研究这些前沿课题,美国及美国和其它国家合作,正在建四个大的装置,它们是:

- (1)美国在Brookhaven建的相对论重离子碰撞机,1997年建成,简称RHIC;
- (2)美国在Virginia州建的4GeV的连续电子束加速器,1994年建成,即CEBAF;
- (3)加拿大三校联合介子装置TRIUMF,正在尽全力和美国及其它国家合作兴建K介子工厂,即KAON;
- (4)美国在Texas州建的超—超导对撞机,即SSC。但这一台机器主要是为粒子物

理研究用的。还值得指出的,其它有关国家也正在兴建的大型加速器有:

- (1)西德GSI的SIS—ESR;
- (2)西德Julich的COSY;
- (3)西德Mainz的MAMI;
- (4)荷兰和法国合作的AGOR—KVI;
- (5)日本在考虑中的JHP强子计划。

作者认为,以上说的那些新情况,概括起来就是(见文献[8]):

- (1)RHIC方向;
- (2)CEBAF方向;
- (3)KAON方向;
- (4)中能重离子物理;
- (5)核天体物理学;
- (6)放射性束实验扩充传统核物理研究。

关于头三个方向,都是花钱很多的,我国搞不了,只能选择其中的一部份,走国际合作的道路。中能重离子物理,国际上指的是能量甚至高于兰州近物所的加速器的能量,或者是能量精确度更高的设备。我国有没有财力来搞这方面的工作还很难说。但是,我们有串列加速器,可以挤身于放射性束实验,包括核天体物理学这些好的方向上来发展。这样,我们的串列加速器国家实验室,在以后的国际核科学发展中,才可能有一席之地。现在,我们必须考虑今后实验室向何处去的问题,作出合适的布局。否则,在以后的国际核科学发展中,我们将要丧失位置。

到目前为止,以放射性束来进行实验,是指直接用核反应产生的放射性产物来做实验。这样做有根本的弱点:流强弱、束流含有诸多杂质和束流品质很差等。下一阶段的目标是获得品质好、强度大和含杂质少的放射性束。这就需要引入放射性束加速的办法(指寿命为数十毫秒到分的放射性核素)。下面首先讨论好的放射性束的意义,其重点不是指目前在开展的那些放射性束的工作;然后再讨论放射性束的产生和加速问题。

二、优质放射性束用于核物理实验的意义

优质放射性束对核结构、核反应、核天体物理学以及核技术应用的意义,下面就目前情况举例作些一般介绍。

在核结构和核反应研究中,有一个重要的概念,就是核的中子数 N 和质子数 Z 的比值 N/Z 。迄今为止,积累的核反应知识,来自入射核的 N/Z 的范围主要是 $1 < N/Z < 1.4$ 。如果用放射性束做实验,则可以大大扩展 N/Z 的范围,如可以小到 0.9, 0.8, 0.7 (对于缺中子的核),也可以比 1.4 大 (对于丰中子的核)。这样,可以扩展核结构和核反应的研究范围,研究那些过去没有研究的物理问题。也许,这是对传统核物理研究的扩充最本质的部份。

1. 核结构研究

(1) 合成新核素

合成新核素的工作,还是一个我们远远没有做完的工作。现在,对于 $N/Z=1$ 的核,在质量数 A 小的方向,已合成了 ${}^{80}_{40}\text{Zr}$, 同时也可研究更重的核,如合成 ${}^{100}_{50}\text{Sn}$ 。从 ${}^{80}_{40}\text{Zr}$ 到 ${}^{100}_{50}\text{Sn}$ 是一个链。还可研究这些核的形状,剩余的质子—中子相互作用数值等等。现在设计了一些有可能合成这些核的实验,如:

对于 ${}^{100}_{50}\text{Sn}$, 反应 ${}^{40}\text{Ca} ({}^{70}\text{Se}, 2\alpha, 2n)$ 和 ${}^{39}\text{K} ({}^{68}\text{As}, \alpha, 3n)$;

对于 ${}^{92}_{46}\text{Pd}$, ${}^{58}\text{Ni} ({}^{37}\text{K}, p, 2n)$;

对于 ${}^{88}_{44}\text{Rn}$, ${}^{38}\text{Ni} + {}^{30}\text{S}$,

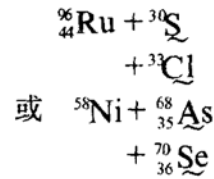
其中核素符号下划有波浪线的核素是放射性核素,如 ${}^{70}\text{Se}$, ${}^{37}\text{K}$, ... 等。最后一个反应的库仑位垒 $V_b \sim 145\text{MeV}$, 我们的串列加速器如果加速放射性束 ${}^{30}\text{S}$ 的话,那么这个反应是可以做的。

${}^{208}_{82}\text{Pb} ({}^{78}\text{Ni}, n) {}^{285}_{110}$ 等。

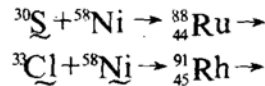
也有人建议用 ${}^{46}\text{Ar}$ 和 ${}^{50}\text{Ca}$ 束来合成该超重核。

(2) 形变和超形变的新区域

理论预言: $Z=56-82$ 的轻同位素,有 β 大到 0.32 的新形变区。用下列反应:



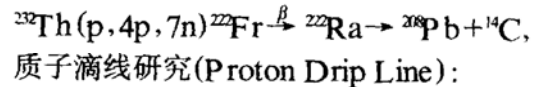
可能达到该区域。此外, $Z=39-42, N=30-47$ 可能存在超形变区,用放射性束可能更易进入此区域,如用下列反应:



可能接近此区域。

(3) 新的衰变方式研究

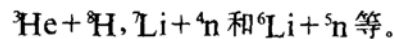
例如 ${}^{14}\text{C}$ 衰变,过去是用 Th-U 放射性族来研究的,其强度只有 α 衰变的 $10^{-10} - 10^{-12}$, 研究起来较困难。如果用放射性束产生 ${}^{22}\text{Ra}$, 则可观察:



质子滴线研究 (Proton Drip Line):

在核素图中,质子在核内的结合能为零的线,称为质子滴线。对于相邻的丰质子同位素,当放射粒子的衰变分别为束缚态或非束缚态时,就找到了滴线边界。现在 $Z=1-11$ 已研究清楚了。如果用放射性束,则可向 Z 大的方向推进。如可用反应 ${}^3\text{He} ({}^{33}\text{Cl}, {}^{33}\text{Cl}), {}^4\text{He} ({}^{30}\text{S}, {}^{28}\text{S})$ 来研究 ${}^{30}\text{Cl}$ 和 ${}^{27}\text{S}$ 等。

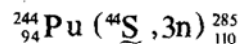
还可用放射性束研究轻的很丰中子的核。例如,



如用 ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{Be}$ 和 ${}^7\text{Li} + {}^7\text{Li}$, 人们甚至想把这类研究进一步扩展到 ${}^{13}\text{n}$, ${}^{16}\text{H}$ 及 ${}^{17}\text{He}$ 。

合成超重核:

目前已合成了 $Z < 109, N < (185-25)$ 的超重核。苏联人宣称已合成了 $Z=110$ 的超重核,但不能作定论。如果用丰中子的放射性核素,则有可能合成 $Z=110$ 的超重核。有人建议用下列反应来合成:





就可进行仔细的研究了。

(4) Coulomb Redistribution

人们一直认为核内部的密度是饱和不变的。现在有人用 laser spectroscopy 测核的电荷半径, 从而预言: 对于 N/Z 小的核 (缺中子的核), 可能出现核内部质子密度下降, 中子密度上升的现象。即质子相互排开了, 形成了空洞。如果用放射性束合成 N/Z 小的核, 则可进行这方面的研究。

(5) 可获得更多的高自旋态核

用放射性束的实验, 可以获得更多的高自旋态核。

2. 核反应研究

(1) 核—核相互作用

在核—核相互作用中, 存在核相互作用及库仑相互作用间的竞争。如果用 N/Z 变化大的不同的放射性核作入射束, 来研究核—核相互作用, 再采用一些近似, 就可以将这两种相互作用分开。

在用熔合反应合成超重核和新的核素中, 人们已在采用 Cold Fusion 的路子。可以用变化 N/Z 入射, 去研究其机制。

(2) 转移反应和电荷交换反应

重离子转移反应截面和 Q 值关系很大。

下列三个核的质子结合能 B_p 和双质子结合能 B_{2p} 很小, 分别是:

$$^{17}\text{F} \quad B_p = 0.60\text{MeV};$$

$$^{37}\text{K} \quad B_p = 1.86\text{MeV};$$

$$^{10}\text{Q} \quad B_{2p} = 6.57\text{MeV}.$$

如果用它们做单质子转移反应和双质子转移反应就很有利, 截面很大, 可以把问题研究得清楚一些。过去做转移反应研究受到了较大的限制。也有人建议用 ^8He 做弹核来研究转移反应。

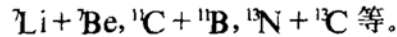
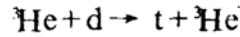
用 $p (^2_{Z}A_N, ^2_{Z+A_{N-1}})n$ 反应来研究电荷交换反应。其探测效率是 100%, 而且只需测前角区。这与过去用 $^2_{Z}A_N (p, n)^2_{Z+A_{N-1}}$ 反应, 通过测量出射中子来研究这个问题是不同的。大家知道, 测中子较难, 其效率和分辨都不如测

带电离子准。这类反应所需的能量为 $10 - 12\text{MeV}/A$ 。

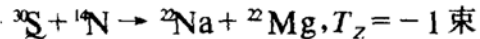
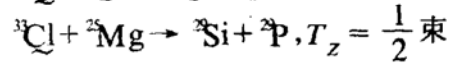
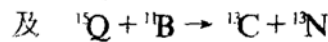
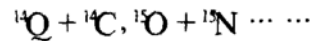
用放射性束可合成高 Q 值 β 衰变的核素, 去研究 Gamow—Teller 强度分布等等。

(3) 验证同位旋不变性

过去已做了下列反应:



现在用放射性束可以设计如下新实验:



即扩展了这方面的研究范围, 不仅可以研究 $T_z = -1/2$ 的, 而且可以研究 $T_z = -1$ 的。

(4) 大自旋束反应

^{20}As 基态为 4^+ , 到现在为止, 其它核的基态自旋为 $1/2, 1, 3/2$ 。如果用 ^{20}As 作弹核, 可研究其内禀角动量 4^+ 是怎样耗散到整个复合体系中去的。而其它的核的核反应, 带到复合体系中去的角动量主要是轨道角动量。

(5) 研究放射性核的高激发态性质;

(6) 研究放射性核的反应截面大小;

(7) 研究放射性核的碎裂反应等。

3. 核天体物理学对放射性束的需要

关于核天体物理学对放射性束的需要, 详见作者同栏的: “核天体物理学”一文。这里只列举一些目前核天体物理学研究中急需的一些核反应截面:

对于热 CNO 循环: $^{13}\text{N} (p, \gamma)$

$^{14}\text{O} (\alpha, p)$

$^{15}\text{O} (\alpha, \gamma)$

$^{17}\text{F} (p, \alpha), (p, \gamma)$

.....

对于热 Ne—Na, Mg—Al 循环等等:

$^{23}\text{Na} (p, \gamma)$

.....

太阳中微子问题: ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$

γp 过程: $(p, \gamma), (\alpha, \gamma) \dots$ 对于丰中子的核素

${}^{26}\text{Al}$ 之谜 ($T_{1/2} \sim 7 \times 10^5 \text{ y}$) ${}^{26}\text{Al}(p, \gamma){}^{27}\text{Si}$

Ne-E 问题(天体上含有纯的 ${}^{20}\text{Ne}$, 大致由 ${}^{23}\text{Na}$ 衰变而来, $T_{1/2} \sim 2.6 \text{ y}$)

${}^{23}\text{Na}(p, \gamma){}^{23}\text{Mg}$

${}^6\text{Li}(\alpha, n)$

.....

以上反应的靶核都是放射性核素, 如果有放射性束, 则将靶核和弹核互换一下, 就可以得到上列反应的截面了。一般认为, 对于靶核质量 $A > 40$ 的那些核的核反应截面, 可以用理论来算出。对于 $A < 40$ 的那些核的核反应截面, 理论算的则不可靠, 只能靠实验测量。

4. 核技术应用

先介绍对凝聚态物质的研究。

放射性核素对材料科学的研究, 一个主要的方法是应用放射性核素的示踪。例如研究陶器、塑料和铝等轻材料的磨损情况。图 1(a) 给出了所有半衰期大于 20d, 而且衰变中放 γ 射线的那些核素。显然, 在核素的质量 $A < 40$ 的区域只有 ${}^7\text{Be}$ 及 ${}^{23}\text{Na}$ 用于磨损学研究。在所研究的材料中产生放射性核素, 可以用表面层活化法, 即利用束流和材料引起的核反应来产生。但是, 这种方法有两个问题: 一是所研究的材料中往往不具有所需要的靶核, 即产生上述条件的放射性核素的靶核; 二是即使具备这种靶核, 其反应也是沿着整个入射粒子的路程来产生, 不能控制示踪核素的位置。图 1(b) 给出了不同能量的 ${}^{16}\text{O}$ 离子轰入 Si 材料后, ${}^{16}\text{O}$ 在材料中的丰度分布。显然, 20MeV ${}^{16}\text{O}$ 离子, 在 Si 中只分布在一个很窄的区域。那么, 如果把放射性核素注入到材料中, 就可以很精确地控制放射性核素在材料中的位置。而 ${}^7\text{Be}$, ${}^{23}\text{Na}$ 等放射性束是颇易获得的。目前, 国际上已经在发展三维半导体器件。

即同一材料上, 很多层都是器件。这需要将核探针注入到不同的层中去, 再用穆斯鲍尔谱学和扰动角关联等方法对它进行分析研究。

还应提到, 将 ${}^{15}\text{O}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{19}\text{Ne}$ 和 ${}^{21}\text{Na}$ 等注入到固体中去, 再用 β 核磁共振技术研究注入核的周围环境(场)的特性等等。

再提一下放射性医学治疗。人们一直从事重离子束辐照治疗的研究工作。因为重离子束的能量大部份沉积于射程末端, 可有效

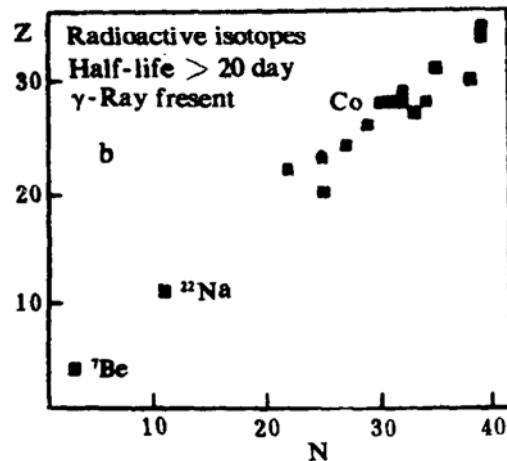
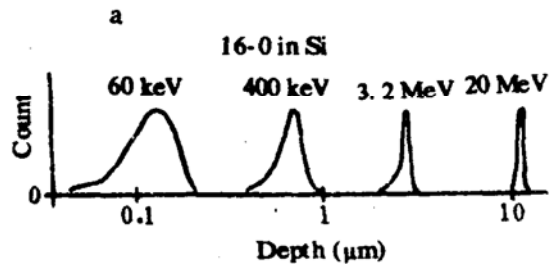


图1 a. 不同能量的 ${}^{16}\text{O}$ 离子注入到 Si 材料中的浓度分布。

b. 半衰期大于 20d, 而且衰变中放出一个 γ 射线的核素图

地杀伤癌组织, 而其它区域则损伤较小。但是, 这种辐照之前, 必需精确地确定需要辐照的位置, 否则癌组织没有被杀伤, 其它部位反而要受到很大伤害。现在人们认为, 在真正辐照前, 先必需用小剂量的放射性束去做定位检查。显然, 只有用好品质的放射性束, 才能进行这种工作。所以, 放射性束在诊断和

治疗方面,将会有很重要的应用。

三、已有的及计划中要建的 初级放射性束设备

大致有二种办法可获得初级放射性束,并进行实验。

1. 用中能或高能重离子束

用中能或高能重离子束打靶,弹核因碎裂反应,可产生放射性束。如用 ^{12}C 打轻靶核,得到的 ^{11}C 产物,其效率竟可达 $\sim 1\%$ 。例如,已有下述设备:

- 美国,LBL — BEVALAC,有二根管道, B42 和 B44;
- 法国,GANIL — LISE;
- 日本,RIKEN — RIPS;
- 法国,Saturne — Mimas — SPESI;
- 法国,CERN — 同步回旋加速器;
- 美国,MSU — RPMS 等。

这些国家都是用这种办法来获得初级放射性

束,并用这种束进行实验,研究反应机制等问题。图 2a 是 LBL — BEVALAC 的 B42 管道。对于磁偏转系统,

$$B\rho = PA / Z \quad (1)$$

式中 P 为每核子的动量, A, Z 为粒子的质量和电荷(由于能量高,讨论全剥离情况)。在弹核碎裂反应情况下,各种出射粒子的 P 近似为常数。因此,

$$B\rho \propto \text{Const} \times A / Z \quad (2)$$

用 $800\text{MeV}/A$ 的 ^{12}C 轰击 ^9Be 靶,在 F2 窄缝处测量产物的话,得到图 2c。而图 2b 是把 F2 置于“O”处测得的各种粒子谱。也就是有 A/Z 的粒子分辨。

GANIL 和 LISE 设备,在二个二极磁铁之间的窄缝后放置一个楔形吸收体,见图 3。由于在中能情况下,能量为 E 和 A, Z 核的射程可以近似的表示为:

$$R = kE^r A / Z^2 + CA \quad (3)$$

这里 k, r, C 都是常数,它们只与吸收体的物质有关。对于第二个二极磁铁有

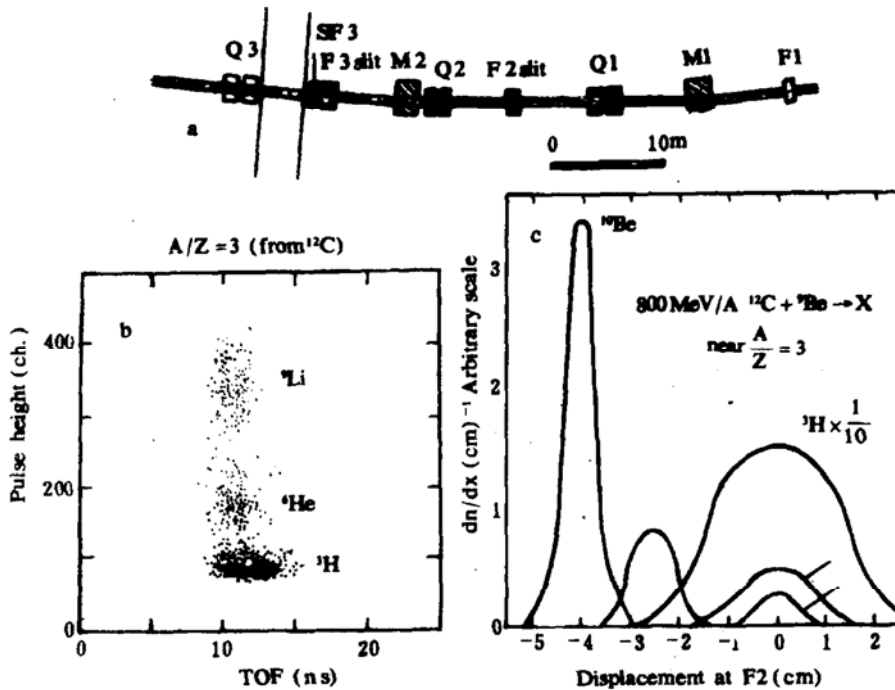


图 2 LBL 的放射性束管道 B42

$$(B\rho)_2 = (B\rho)_1 \left(1 - \frac{dA^{2r-1}}{kZ^{2r-2}} (B\rho)_1^{-2r}\right)^{1/2r} \quad (4)$$

式中 d 为吸收体物质的厚度。显然,对第二个磁铁,无法分辨 $A^{2r-1}/Z^{2r-2} = \text{Const}$ 的各种粒子。结合第一个磁铁,分辨 A/Z ,就可以更有效地选出放射性束,见图 4。

这样做的优点是简单。其缺点是:流强很弱, $10^4 - 10^6$ n/s,能散极大,在束流中混有诸多杂质。这种办法只能做一些比较粗浅的工作。

为了弥补上述办法的缺点,沿这条道路的发展方向是:在上述设备上加一个储存环,使束流增强;并用冷却的方法,使束流的能散减小,使束流单色化。后一类设备都处于在建阶段。例如,

西德, GSI — SIS — FR — ESR;

日本, INS — TARN II。

2. 用低能核反应

利用 (p, n) , (d, n) …… $H(HI, xn)$ 等反应,获得放射性产物。再把这些产物直接用于实验。已有下述设备:

美国, Ohio State University — RISOR;

美国, LLNL — QSBTS;

美国, Dotre Dame University;

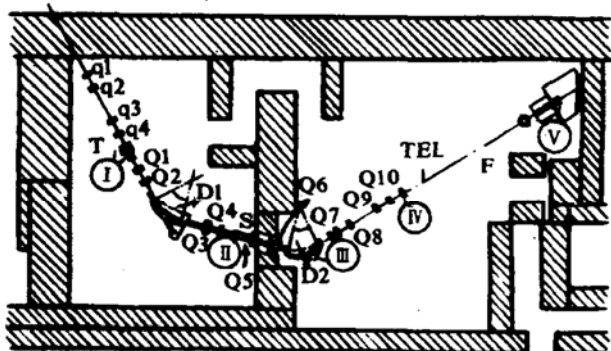


图 3 GANIL 的 LISE 管道

美国, Univ. of Rochester — RMS;

美国, Yale Univ. 等。

可以用 Lawrence Livermore 国立实验室的装置 QSBTS (四极 — 六极 — 束流传输系统) 来说明这类设备的工作情况,见图 5。 ^7Li 束

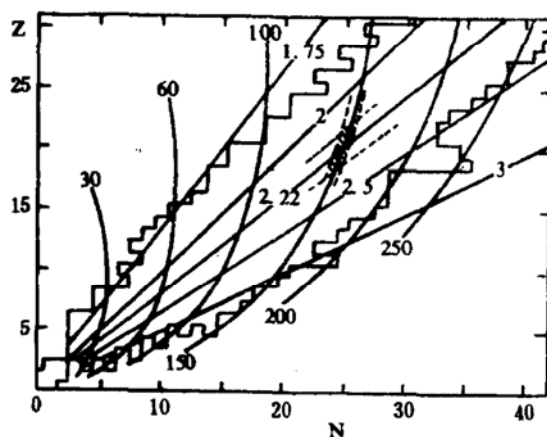


图 4

打含氢靶,即用 $H(^7\text{Li}, ^7\text{Be})n$ 反应产生 ^7Be 。未产生反应的 ^7Li 束止于后面的 Faraday 筒里。前角区的大部份 ^7Be 产物由磁、电系统聚焦偏转,然后打到第二个反应区,研究 $^7\text{Be}(p, r)^8\text{B}$ 反应。由于此系统是有色散的,有助于纯化 ^7Be 束,对于 23MeV ^7Li 束入射的情况,得到的次级束为 18.6MeV ^7Be ,流强的转换效率约为 3×10^{-6} 。用类似的办法,可得到 ^8Li , ^{13}N 和 ^{15}O 束。这类设备得到的放射性束大都是用来研究核天体物理学的。例如上述的 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应,对于研究太阳中微子问题就是很重要的。目前, Oak Ridge 的 HHIF 和 Argonne 的 ALTAS 都采用了低能核反应加上反冲质量谱仪(RMS)获得放射性束来进行实验的建议,其能量较高,亦可进行核结构和核反应的研究。这一类设备也是有如下的缺点:流强很弱、能散太大和束流中混有诸多杂质等。

四、放射性束加速器及一个新的方案

直接用初级放射性束进行实验,有流强很弱和束流品质很差(包括能散、角散、束斑面积与杂质等方面)的缺点。因此,近年来人们就在考虑,先用核反应产生放射性核素,然后再进行加速,以此来获得品质好和有足够

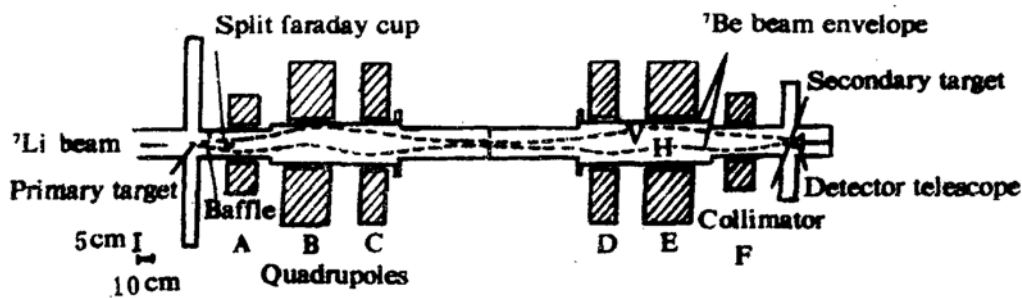


图5 GSI的SIS—FR—ESR

束流强度的放射性束。

目前已提出了好多方案和建议书, 计划书, 但真正在着手做的就只一家, 即欧洲共同体的项目。在比利时的 Louvain-la-Neuve, 由三个大学 (Université Catholique de Louvain) (U.C.L.), Université Libre de Bruxelles (U.L.B.) 和 Katholieke Universiteit Leuven (K.U.L.) 联合兴建。这个项目的目的是产生 ^{13}N 束, 用于研究核天体物理学。他们采用的设备是二台现有的回旋加速器。由 Cyclone 30 引出 15—30 MeV, 500 μA 的质子流, 轰击多孔的 ^{13}C 石墨靶, 以 $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$ 反应获得 ^{13}N 放射性核 (半衰期约为 10 min)。用通入氮气的办法, 以 $^{13}\text{N}^{13}\text{N}$ 方式把 ^{13}N 核带出来, 经过传输进入一个 ECR 源, 从而得到 $^{13}\text{N}^+$, 并加速到 6 keV。然后轴向注入第二个回旋加速器, 利用高次谐波方式加速, 得到低能 ^{13}N 束。目前, 他们已获得了 1.5×10^8 pps 的 ^{13}N 束, 但是, 束流中有极强的 ^{13}C 杂质, $^{13}\text{C}/^{13}\text{N} = 1000!$ 下一步的目标是把 ^{13}N 流强提高到 6×10^{10} pps。把 $^{13}\text{C}/^{13}\text{N}$ 降到 $1^{[9]}$ 。

更多的建议, 不是用低能质子, 而是用中能或高能质子束轰击靶, 产生放射性核。这是沿着过去用中能质子束 (数百 MeV 以上) 加在线同位素分离器, 进行不稳定核素研究的经验。可以用靶的碎裂反应产生丰中子核素; 靶核的裂变反应产生丰中子的中重核; 和靶的散裂反应产生缺中子核素。这样产生的核素同样要离子化, 同位素分离和引入到第

二个加速器加速。目前比较引人注目的计划有:

- 日本, INS—JHP;
- 加拿大, Triumf—ISAC;
- 法国, CERN—PRIMA;

苏联, 核研究所——莫斯科介子工厂。

苏联的计划最庞大, 还加入了化学分离环节。而后面的加速器是: 一台 $K=208$ 的回旋加速器, 再加一台 $K=600$ 的回旋加速器, 最后还有一个储存环, 见图 6。另外三个计划都准备用不同类型的直线加速器去加速放射性束。这些计划目前都还没有获得最后批准。

作者在 1990 年 3 月提出了一个新的方案。利用已有的 HI—13 串列加速器来加速放射性束, 其框图见图 7。需建造一台 50 MeV (或能量高到 100 MeV) 的强流回旋加速器 (主要是质子, 如能加速氦及 α 粒子更好), 用该加速器加速的粒子轰击多种合适的厚靶, 以便产生需要的放射性核素。经离子源、在线同位素分离器分离后, 选出所需要的核素, 再通过负离子源 (表面电离型和电荷交换型) 产生负离子, 再引入 HI—13 加速器去加速。

这个方案的弱点是, 在同位素分离器后还需负离子化。这样, 会降低加速放射性束的效率。但是, 串列加速器的优点可以弥补这个损失 (作者还在考虑另一种变通办法: 在同位素分离器前就成负离子, 同位素分离即分离负离子, 这样可以避免第二次电离损

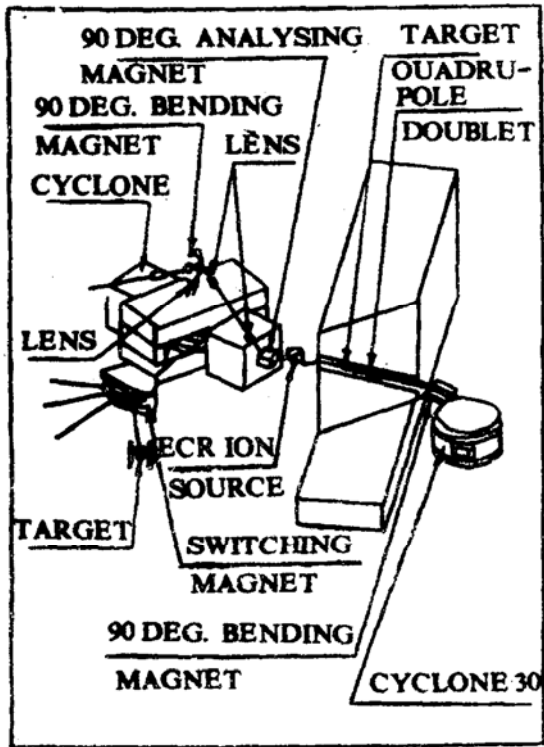


图6 Louvain-la-Neuve的放射性束加速器

失)。所需建的强流回旋加速器,对能量稳定度等多方面要求甚低,主要是要流强大。中国原子能科学研究院目前正在建一台30MeV的强流质子回旋加速器,其经验对再造一台50MeV的质子回旋加速器是十分有利的。主加速利用串列加速器,就可获得高品质的放射性束,而且可以利用现有的所有实验设备,这样对降低投资等都是十分有利的。

图中标有方框II。如果再加一台小串列加速器,那么只需增加少量投资,就可使核天体物理学的研究得到长足的发展。这样可以经常有二台器处于工作状态(HI-13仍可有一部份时间处于开展稳定核束的工作状态)。

实际上这台“前”加速器,因其流强大,还可兼作白光中子源;也可生产一些国内其他加速器不能生产的短寿命放射性同位素,供医疗等方面使用,做到一器多用的目的。

由于本方案是用串列加速器对放射性束进

行加速,所以在减少束流中同量异位素杂质方面很有利。因在加速过程中,需在头部进行电荷剥离,由负离子变为正离子;另外,还可以让束流通过第二个剥离器(位于高能端,距离其头部1/4电压的地方)。通过这些剥离器后,不同的同量异位素的电荷态分布不一样,再加速后的能量亦不一样,在经过后面的分析器时,就可很干净地去掉杂质。用这种方案,估计可产生的某些放射性束的情况见表1。

作者曾仔细地比较过:发展本方案和在和HI-13加速器后加一个后加速器的方案。由于已经有兰州近物所的大加速器等原因,使得后一方向的意义不大。但是,在有了放射性束的情况下,增加任何后加速器(大、中、小)则都是有意义的。这就是图7的方框III。当然,这还不是目前需要仔细研究的部份。

如果把本方案与目前已有的初级放射性束的路子相比较,则有如下优点:总的流强可提高 10^3-10^4 倍;另外,能散小、束斑小、能量易变化和束流中杂质少。这些对核物理研究、核天体物理学研究和核技术应用都有很大的意义。

最近获悉,美国Oak Ridge National Lab.也在考虑用串列加速器加速放射性束。他们的HHIRF是将一台25MV串列加速器的束流注入到一台等时性回旋加速器,后者是能量增强器。现在他们也准备反过来,提出的方案和我们几乎完全一样:用等时性回旋加速器先获得放射性核素、电离、同位素分析和负离子化,再引入25MV串列加速器加速。提出的负离子化方法也和我们的一样,采用表面电离型和电荷交换型两种负离子源。这就事论事而言,一是增强了我们的信心,二是增加了我们的竞争者。据悉,美国能源部(DOE)准备关闭HHIRF。那对我们是有利的。

用低能粒子获得放射性核素,然后再加速的路子,据悉,目前还有一些国家在进行计

表 1 回旋—串列级联加速装置可产生的某些放射性束的参数

核反应	寿命	入射质子能量 (MeV)	产生率 (原子/s · pμA)	离子源类型	正离子效率 (%)	负离子转换率 (%)	串列输运率 E > 5MeV / A (%)	放射性束产生率 (离子数/s pμA)	最大初级束流强度 (pμA)	最大放射性束强度 (离子数/s)
$B^{10}N(p,n)^{10}O$	1.18m	18-33	0.23×10^{10}	CE	8.5	45	35 (G)	1.7×10^7	61	1.0×10^9
$B^{10}N(p,n)^{10}O$	2.03m	1-22	0.41×10^{10}	CE	8.5	45	35 (G)	2.7×10^7	91	2.5×10^9
$Si^{16}O_2(d,n)^{16}F$	64.5s	13-29	0.86×10^{10}	SI		100 (50)**	32 (G)	6.9×10^8	69	4.7×10^{10}
$Si^{18}O_2(p,n)^{18}F$	1.83h	8-15	0.26×10^{10}	SI		100 (50)**	32 (G)	2.1×10^8	100	2.1×10^{10}
$^{70}Ge(p,3n)^{68}As$	2.65m	36-43	0.28×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	1.8×10^8	47	8.7×10^9
$^{70}Ge(p,2n)^{69}As$	15.2m	23-31	0.24×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	1.6×10^8	65	1.0×10^{10}
$^{72}Ge(p,3n)^{70}As$	52.6m	38-40	0.31×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	2.0×10^8	51	1.0×10^{10}
$^{72}Ge(p,2n)^{71}As$	2.7d	20-27	0.20×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	1.3×10^8	74	1.0×10^{10}
$^{72}Ge(p,n)^{73}As$	1.08d	11-15	0.72×10^{10}	CE	26	60	8.5 (F)	4.8×10^7	100	4.8×10^9
$^{74}Ge(p,2n)^{73}As$	80.3d	18-24	0.18×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	1.2×10^8	83	1.0×10^{10}
$^{76}Ge(p,3n)^{73}As$	17.8d	25-31	0.19×10^{11}	CE	26	60	8.5 (F)	1.3×10^8	65	8.2×10^9
$^{76}Ge(p,n)^{77}As$	1.1d	9-10	0.18×10^{10}	CE	26	60	8.5 (F)	1.2×10^7	100	1.2×10^9

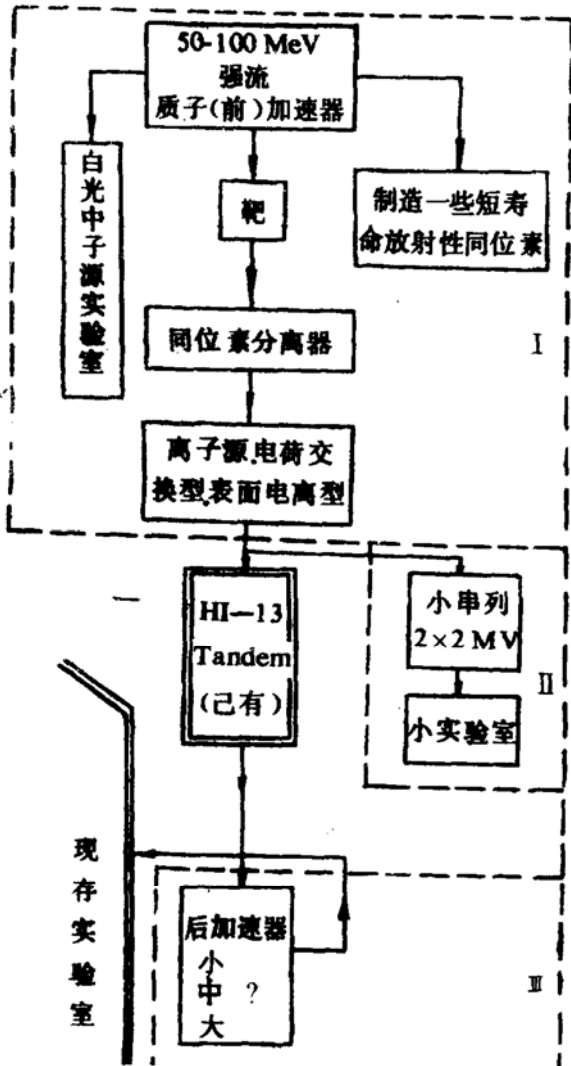


图 7 一个新的放射性束加速器建议方案

划工作,如美国的 LBL,就想建一个小的质子直线加速器加在他们的 88 回旋加速器前面。

总之,放射性束的核物理实验及其应用研究是很有意义的新方向。在介绍了放射性束加速的国际概况后,提出了一个用 HI — 13 串列加速器加速放射性束的新方案。当然,这个方案还需要深化,作者将进一步在这方面开展工作,并向各有关领导部门宣传和反映,以求获得实现。

本文在成文过程中,得到程业浩同志大力协助,在此深致谢意。

参考文献

- [1] Proc. of the Workshop on Prospects for research with Radioactive Beams from Heavy Ion Accelerators Washington D. C. April 1984 LBL-18187 (1984)
- [2] Proc. of the Accelerated Radioactive Beam Workshop, Parksville, Canada, Sept 1985 Triumf Report TRI-85-1 (1985)
- [3] Proc. of the First Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams, Berkeley, Oct. 1989
- [4] Proc. of the Workshop on the Science of Intense Radioactive Beams, Los Alamos, April 1990
- [5] Proc. of the Workshop on the Production and Use of Medium-Energy Radioactive Ion Beams The AR-ENAS project, Dec. 1990 Univ. Libre de Bruxelles. 8th meeting

between Astrophysicists and Nuclear Physicists,
Dec. 1990, Univ. Libre de Bruxelles

[6] Second International Conference on Radioactive Nuclear Beams Aug. 19-21, 1991, Louvain-la-Neuve, Belgium

[7] Nuclei, nucleons, Quarks, Nuclear Science in the

1990's, a Long Range Plan by the DOE/NSF
Nuclear Science Advisory Committee Dec. 1989

[8] 姜承烈, 石宗仁, 加快核物理基础研究的战略问题研究,
内部报告(核工业部软科学研究), 1991

[9] D. Darquennes et al., Phys. Rev. C42, R804
(1990)