

核技术应用

九十年代的新一代多重探测器

贺智勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文主要描述了新一代多重探测器的组成结构、粒子鉴别原理和能量定标方法。在粒子鉴别中,详细介绍了利用 phoswich 快慢成分 $\Delta E-E$ 望远镜和 CsI 快慢鉴别图三种方法。

关键词 多重探测器, 粒子鉴别, 能量定标。

1 引言

探测器的研制已有几十年的历史,早在1968年,法国的 G. Charpak 等人^[1]研制了简单的多丝正比室来探测带电粒子,后来这种探测器被广泛应用于医学和生物学等领域, G. Charpak 为此获得了1992年诺贝尔物理学奖。随着对核物理学研究的深入,探测器的研制也不断向更复杂、更精确的方向发展。80年代中期,随着中能重离子反应机制的研究,需要用

近 4π 的探测器进行符合测量,从而出现了第一代多重探测器。例如, G. Bizard 等人研制的塑闪墙 MUR^[2] 和 A. Péghaire 等人研制的塑闪桶 TONNEAU^[3], 是用若干薄的快塑料闪烁体制成的,它们能探测轻碎片; R. Bougault 等人研制的大面积电离室 DELF^[4] 能探测重碎片。这一类多重探测器的特点是只用一种材料制成,其优点是:探测面积大,能定位和能鉴别粒子;缺点是:粒子鉴别范围小和探测的粒子

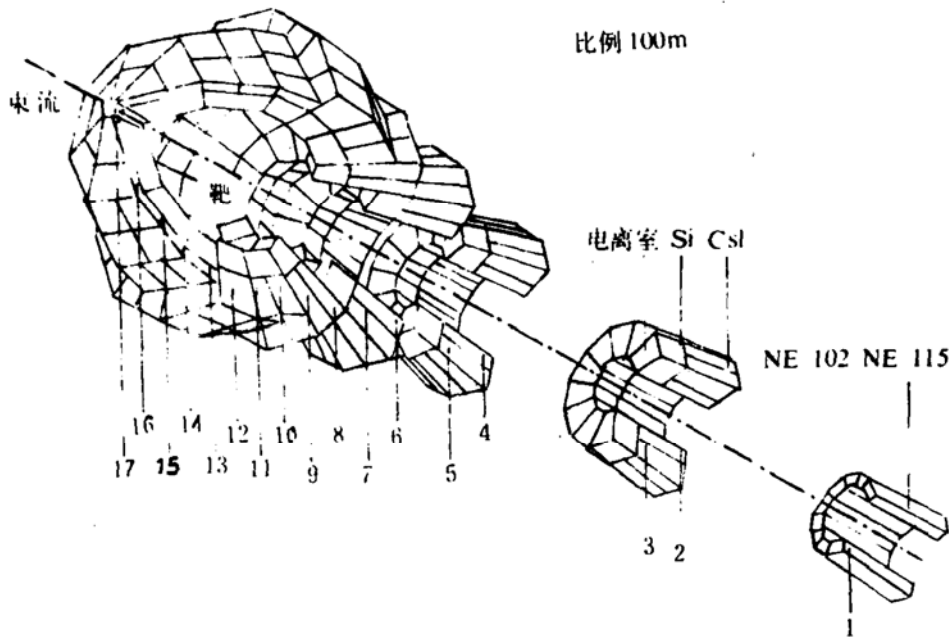


图1 INDRA 多重探测器的结构

能量范围窄. 随着核物质集体流、多重碎裂及干涉学等研究的开展, 需要的探测器能量范围更广, 粒子鉴别区域更宽. 新一代多重探测器通常是由几种材料叠成几层组成的, 从轻至重的碎片几乎全能被鉴别. 例如, 美国 MSU 研制的 Miniball^[5] 是由 188 个探测器单元组成, 每个单元均由一块薄的塑料闪烁体和厚的 CsI (Tl) 晶体组成 phoswich, 它的探测面积达 4π 的 89%, 粒子鉴别可达 $Z=18$. 最近, 法国 GANIL 新研制的 INDRA^[6,7] 也属这种类型. 它是目前国际上中能重离子物理研究中最复杂, 探测的立体角最全、能量范围最广、粒子鉴别区域最宽的多重探测器. 本文以 INDRA 为例, 介绍这类多重探测器的结构, 粒子鉴别原理以及能量定标方法.

2 多重探测器 INDRA 的结构

INDRA 由 336 个探测器单元组成, 沿 θ 方向分成 17 环, 每环又分成 24 个单元, 如图 1 所示. INDRA 包括三部分: 补充部分 (第一环), 前角部分 (第 2~9 环), 中后角部分 (第 10~17 环). 补充部分置于前角 $2^\circ\sim 3^\circ$ 间, 由 12 个单元组成, 每个单元均为用 $500\mu\text{m}$ 厚的 NE102 快塑料闪烁体薄片和 15cm 厚的 NE115 慢塑料闪烁体厚片组成的 phoswich. 前

角部分覆盖了 $3^\circ\sim 45^\circ$ 间的 θ 角, 共八环. 每环分成 24 个探测器单元, 每个单元均是由电离室 (作 ΔE_1) $300\mu\text{m}$ 厚的硅片 (作 ΔE_2) 和 10cm 厚的 CsI (作 E) 组成的多叠层望远镜. 中后角部分覆盖了 $45^\circ\sim 176^\circ$ 间的 θ 角, 共八环. 每环的单元数有 24、16 和 8 个不等, 根据环的大小而定. 每个单元均由电离室 (作 ΔE) 和 CsI (作 E) 组成. 粒子的 θ 和 φ 角由每个单元所处的位置来确定. 整个装置的探测效率可达 4π 的 90%.

3 探测器的粒子鉴别方法

INDRA 利用 phoswich、电离室、半导体硅和 CsI 等探测器, 其粒子鉴别法主要有三种.

3.1 phoswich 快慢成分方法

第一环为 NE102 + NE115 组成的 phoswich, 将光电管出来的信号送入短门 (约 30ns, 对应信号的前沿) 和长门 (约 $1\mu\text{s}$, 对应信号的全宽度) 得到 phoswich 的快、慢成分. 利用该快慢成分即可鉴别粒子.

3.2 ΔE - E 鉴别方法

INDRA 的前角探测器是由电离室 + 硅 + CsI 三层组成, 中后角是由电离室 + CsI 两层组成. 根据粒子种类和能量的不同, 采用不同的组合鉴别粒子.

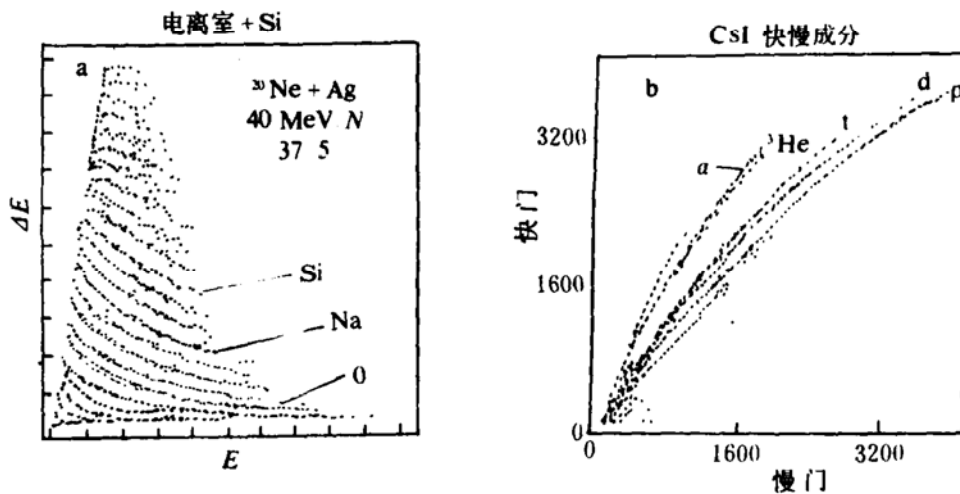


图 2 a 用电离室 (作 ΔE) 和 Si (作 E) 测得的粒子鉴别图, b 用 CsI 快慢成份测得的轻粒子

1) 电离室(ΔE)+Si(E)

电离室对轻粒子不灵敏,这种组合主要是鉴别重碎片.当粒子能量为 $0.8 \leq E/A \leq 15\text{MeV/u}$ 时,它穿透电离室后被阻止在硅探测器内.利用电离室作 ΔE 和硅作 E 测量便可清楚地分辨出重碎片.图 2(a)为电离室加硅探测器在 37.5° 处测得的 $40\text{MeV/u } ^{20}\text{Ne} + \text{Ag}$ 反应的粒子分辨谱.

2) Si(ΔE)+CsI(E)

当粒子能量 $E/A \geq 15\text{MeV/u}$ 时,它穿透电离室和 Si 进入 CsI,利用 Si 作 ΔE 和 CsI 作 E 测量可鉴别粒子.这种组合既能探测轻粒子,又能分辨重碎片.图 3a 为测得的轻粒子的粒子鉴别图, $p, d, t, ^3\text{He}, \alpha$ 能清楚地分辨出.图 3b 为测得的轻粒子的鉴别图.图 3b 为测得的重碎片的粒子鉴别图. $Z=2$ 至 18 的粒子均能清晰地分开.

3) 电离室(ΔE)+CsI(E)

对于 $\theta \geq 45^\circ$ 的中后角部分,当粒子能量 $E/A \geq 0.8\text{MeV/u}$ 时,它穿透电离室进入 CsI,利用电离室作 ΔE 和 CsI 作 E 测量可以鉴别重碎片的电荷.

3.3 CsI 短门长门鉴别方法

大量高能轻粒子迅速穿过电离室和 Si 进

入 CsI,从而利用单个 CsI 信号便可分辨粒子.和 phoswich 一样,利用不同宽度的门将 CsI 出来的信号分成快慢两种成份,根据快慢成份的二维谱来鉴别粒子.图 2(b)为利用 CsI 快慢成份得到的粒子分辨图.由图可见, $p, d, t, ^3\text{He}$ 和 α 等轻粒子均能被分开.

4 探测器的能量定标

该装置使用了四种探测器,有 336 个探测单元,能量定标相当复杂.现有如下三种标定方法.

4.1 利用脉冲发生器加 α 放射源

该方法适用于电离室和硅探测器.这两种探测器的能量响应具有线性关系.利用脉冲发生器给出一系列不同倍数的脉冲,测量探测器测到的相应道数,再利用 α 源照射得到一个精确的能量点,这样便可得能量定标的线性公式: $E(\text{MeV}) = aE(\text{道数})$.在定标硅探测器时,应注意在电离室充气和无气两种情况下定标.

4.2 利用能量已知的粒子

1) 质子、 α 粒子的弹性和非弹散射

人们已详细地研究了质子、 α 粒子轰击各种靶产生的弹性散射和非弹性散射的能谱和角分布.例如, A. I. Yavin 等人利用 40MeV 的

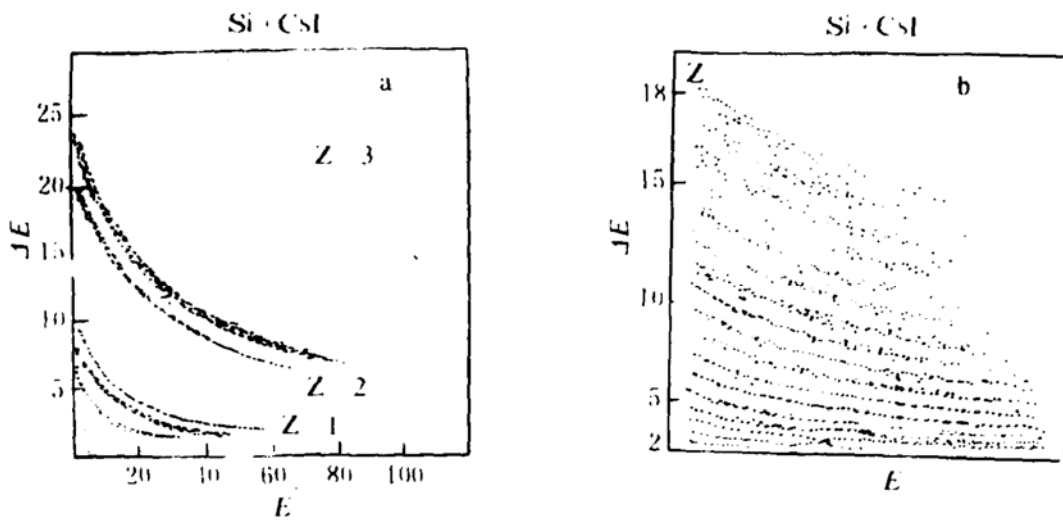


图 3 用 Si(作 ΔE)和 CsI(作 E)测得的轻离子和重碎片分辨图

α 粒子轰击 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 和 ^{40}Ar 等靶^[8],在实验室系 0° 至 180° 均清楚地观测到了弹性散射峰和非弹性散射峰以及峰对应的能量.同样,利用类似的 α 粒子在INDRA多重探测器中轰击以上这些靶,便可定标它的前角和后角探测器.由于只有当粒子完全被阻止在探测器里时,才能复原出这些散射峰及其能量值,这种方法直接应用于CsI和phoswich的定标中.

2) 次级束流

加速出来的初级束流经碳膜阻止后产生各种次级粒子,经磁谱仪筛选后具有单一能量,用这些能量已知的次级粒子便可进行定标^[9].这种方法适用于前角探测器,前角的phoswich、电离室、硅和CsI均能定标.中后角探测器次级粒子无法到达而不能用该方法.

3) 低能弹核在重靶下的弹性散射

在低能($E < 10\text{MeV/u}$)下,轻弹打重靶的擦边角较大,例如, 7MeV/u 的 ^{40}Ar 轰击 ^{197}Au 靶的擦边角为 72.9° .因此,前角内的所有探测器都能用这种反应的弹性散射事件来定标.对于CsI,如果弹散粒子能量过低而被阻止在前面的Si中,则无法用它来定标.

4) 中能轻弹打重靶的弹性散射

在中能区,反应的擦边角较小.但是,利用轻弹轰击重靶,例如, ^{16}O 轰击 ^{197}Au ,在前角的1~4环(θ 角在 $2^\circ \sim 10^\circ$)的探测器仍能探测到弹性散射事件.这类粒子定能进入CsI厚片,实现对它进行定标的目的.

4.3 利用定标探测片Si(Li)

CsI的光输出与能量成非线性关系,需用不同能量的各种粒子来进行定标.这种方法是专为CsI的定标而设计的.每一环中的若干单元中,专有一个单元在CsI探测器前安插了

2mm厚的Si(Li)定标片.在同一环中,由于 θ 角相同,每个单元探测到的粒子能量是完全相同的.当某种粒子入射到无Si(Li)片的单元上时,CsI便测到一能谱;当同种粒子入射到另一有Si(Li)片的单元上时,CsI同样能测到一能谱.找出粒子在2mm厚的Si(Li)中损失的能量值(MeV),再比较有无Si(Li)时CsI的两能谱的道数差,便可对CsI进行定标.

5 结束语

综上所述,该多重探测器能精确地鉴别粒子、能探测粒子的能量及确定出粒子的位置和方向.根据这些量,便可导出粒子的其他物理量,如质量、速度、飞行时间、动量和能量等,从而满足重离子物理研究中的各种需求.毫无疑问,这种类型的探测器由于其粒子辨别的精确和能量探测范围的宽广,不久将会广泛应用于生物、医学、天文学及工农业生产中的各种精密分析测试技术.

参 考 文 献

- 1 Charpak G, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1968, 62: 262
- 2 Bizard G, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1986, A244: 483
- 3 Peghair A, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1990, A295: 365
- 4 Bougault R, et al. Nucl. Inst. and Meth. 1987, A259: 473
- 5 De Souza R. T, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1990, A295: 109
- 6 GANIL-INDRA Report, Mars, 1989
- 7 GANIL-INDRA Report, Juin, 1991
- 8 Yavin A I, et al. Nucl. Phys., 1959, 12: 1
- 9 He Zhiyong, et al. Annual Report of IMP, 1992

New Generation Multidetector in 1990s

He Zhiyong

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The construction, particle identification principle and energy calibration method of new

generation multidetector are described. In the particle identification, three methods are presented; phoswich fast-slow composition, $\Delta E-E$ telescope and CsI fast-slow identification matrix.

Key Words multi detector, particle identification, energy calibration.

世界上最大的高能物理实验组

对粒子物理实验来说,最重要的目标是找到那些理论上没有预料到的新现象和新粒子,突破现有的理论,使理论和实验都发展到一个新的阶段

近年来的研究表明,构成物质的基本粒子是夸克与轻子。已知有 u、d、s、c、b 五种夸克。 π 介子、 κ 介子、质子、中子,以及质量约为 1GeV 的普通短寿命粒子,是由 u、d、s 三种夸克组成的。 J/ψ 等质量约为 3GeV 的长寿命粒子是由 c 夸克组成的。 τ 、 r' 等质量约为 9GeV 的长寿命粒子,是由 b 夸克组成的。至于轻子,已知有电子、 μ 子、 τ 子和中微子(ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ)等。电子的质量约为 0.5MeV, μ 子的质量约为 100MeV, τ 子的质量约为 2000MeV,中微子的质量有多大,目前还不清楚。

目前研究的问题,有多少种夸克?能否找到顶夸克(t)?夸克有多大?夸克能不能再分成更小的粒子?有多少种轻子?除电子、 μ 子、 τ 子外,还有那几种带电轻子?轻子有多大?轻子能不能再分成更小的粒子?一个需要研究的根本问题是:质量的本质是什么?

加速器是研究基本粒子的实验工具。目前已兴建许多能量越来越高的加速器;美国 AGS 加速器和欧洲 PS 加速器的能量为 400GeV。欧洲核子研究中心的 LEP 对撞机的质心系能量相当于入射能量为 70TeV。德国 HERA 的对撞机质心系能量相当于入射能量为 50TeV。LEP 中 100GeV 的电子和 100GeV 的正电子对撞产生许多新粒子,对撞时温度是太阳表面温度的 4000 亿倍,相当于宇宙初始 10^{-19} s 时的情景。

L3 实验组是目前世界上最大的高能物理实验组。在 LEP 对撞机上进行高能物理实验的有 4 个实验组:Opal 组、Aleph 组、L3 组和 Delphi 组。其中 L3 组是包括美国、欧洲、中国和前苏联的国际合作组,也是目前世界上最大的高能物理实验组,共有 14 个国家的 43 个单位、581 位物理学家参加。中国参加 L3 组的单位有中国科学院高能物理研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科技大学和中国台湾组。

L3 探测器把精确测量 μ 子的动量和电子及光子的能量作为主要目标。在 Z^0 能区,测量到 μ 子对的不变质量分辨率 $(\Delta m/m)_{\mu\mu}$ 为 1.4%。测量到的电子和光子的能量分辨率 $\Delta E/E$ 在能量大于 2GeV 时,为 1%;在 100MeV 时,为 5%。

L3 实验组有 150 位物理学家进行数据分析工作。1989~1991 年 L3 组共收集到约 50 万个 Z^0 事例。预计在 1992~1994 年还将收集到 500 万个 Z^0 事例。用这些数据将能对弱电统一理论进行非常精确的检验。在一年半时间内,L3 组共发表论文近 60 篇。

到本世纪末,L3 实验组期望获得下列物理结果。(1)L3 探测器测量到的电子、 μ 子和光子的动量分辨率 $\Delta p/p$ 均为 1%,使可能收集到 1000 万个 Z^0 ,这样就能与上述测量精度相匹配的统计误差,去探索新的物理现象和检验弱电统一理论。(2)已知 J 粒子是 c 夸克的束缚态 $c\bar{c}$,它是 1974 年通过 $J \rightarrow e^+e^-$ 的过程探测到的。1976 年通过 $\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的过程探测到 γ 是 b 的束缚态 $b\bar{b}$ 。重轻子 τ 是 1975 年在 e^+e^- 湮灭中探测到非共线的 μe 对(因为有中微子)而找到的。传播弱作用的中间玻色子 Z^0 和 W^\pm 是 1982 年通过 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 和 $W \rightarrow \mu\nu$ 的衰变过程发现的。LEP 研究 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$, $Z^0 \rightarrow e\tau$, $Z^0 \rightarrow \mu\tau$, $W^\pm \rightarrow \mu^\pm\nu$ 等反应,另一个重大物理课题是 Gauge Cancellations。(3)测量 W^\pm 的磁矩是对标准模型的另一个重要检验。

建造新的大型加速器的目的,往往与结果并不一致。美国 AGS 质子加速器(28GeV)在建造时是打算研究 πN 相互作用的,但实际上,AGS 上的实验证实了 ν_e 和 ν_μ 两种中微子的存在,发现了 CP 破坏,找到了 J 粒子。美国 FNAL 质子加速器(400GeV)建造时的目标是研究中微子物理,但其实验却发现了 γ 粒子。欧洲核子研究中心的 ISR(交叉储存环)是束流能量为 63GeV 的 p-p 对撞机,它建造时的目标是寻找 Z^0 和 W^\pm 粒子,但其主要物理结果是测量高质子反应的总截面。德国的正负电子对撞机 PETRA 质心系能量范围为 12~46.7GeV,它建造时的物理目标是寻找新的夸克(如顶夸克 t),但实际上,它最主要的成果是发现了胶子。LEP 对撞机在建造时的主要目标是寻找希格斯粒子和研究 Z^0 物理,但它究竟能发现什么新的物理现象和新粒子呢?我们无法预料,正拭目以待。

(中国科学院近代物理研究所 吴国华供稿)