

六、结 语

从上面的介绍可以看出,这方面的研究工作是很意义的,它和天体演化、宇宙演化的问题都有密切的关系。近年来,通过实验与理论两方面的努力,人们在确定天体核反应截面的工作上获得了不小的成绩,从而丰富了人类对天体核反应规律的认识。

但是,到目前为止,人们对宇宙间所进行的规模巨大的核反应的了解还只是初步的,还存在着大量问题有待于进一步的探索。例如,对于恒星演化晚期所进行的许多核反应,至今还未曾在实验室里研究过。除了低能区域的核反应实验外,为了研究形成锂、铍、硼等轻元素的 β 过程,还需要在高能区域进行散裂截面的测量。总之,还有着大量的工作等待着人们去

做。

本文承赵忠尧先生审阅,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] E. M. Burbidge, et al., *Rev. Mod. Phys.* **29** (1957), 547.
- [2] D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, McGraw-Hill, New York, (1968).
- [3] C. A. Barnes, *Adv. Nucl. Phys.*, **4**(1971), 133.
- [4] B. J. Allen, et al., *Adv. Nucl. Phys.*, **4**(1971), 205.
- [5] C. Rolfs et al., *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **28**(1978), 115.
- [6] R. N. Clayton, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **28** (1978), 501.
- [7] D. N. Schramm, et al., *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **27** (1977), 37.
- [8] M. R. Dwarakanath, *Phys. Rev.*, **C9**(1974), 805.
- [9] C. Rolfs et al., *Nucl. Phys.*, **A235**(1974), 450.
- [10] C. Rolfs et al., *Nucl. Phys.*, **A250**(1975), 295.

正电子湮没发射断层照相

袁 观 俊

(中国科学院原子能研究所)

Robertson 等人于1964年首先提出了关于正电子湮没发射断层照相问题^[1]。近十年来,由于这方面的研究工作深入开展,同时有一大批中、小型回旋加速器用于应用物理的研究,能方便地生产应用放射性同位素,所以正电子湮没发射断层照相得到了明显的发展。

一、基本原理

介质中的高能正电子与原子周围的电子会发生湮没作用,湮没的结果,将它们的全部能量转化为电磁辐射。正电子与原子的外壳层电子(不是K壳层)或自由电子相湮没时,主要产生双 γ 发射。由能量守恒定律可得双 γ 光子的总能量:

$$E_{\gamma} = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \sim 2m_0c^2 = 1.022\text{MeV}, \quad (1)$$

式中 m_0 为正负电子的静止质量, c 为光速, $E_+ + m_0c^2$ 和 $E_- + m_0c^2$ 各为正负电子的总能量, E_+ 和 E_- 与 m_0c^2 相比较小可略去。根据动量守恒定律,可判断出双 γ 光子几乎以相反方向射出,动量绝对值相等,因此每个 γ 光子的能量为 m_0c^2 即511keV。正电子照相是利用某种具有生物活性的化合物,例如一种发射正电子的放射性同位素或含有某种放射性同位素的药剂,被人体吸收,产生正电子湮没,同时以相反方向射出两束 γ 射线,射线穿过周围组织后被探测器记录,再利用计算机通过数学方法将记录的讯号重建被测客体的图象,最后使图象在荧光屏幕上清晰地显示出来^[2-3]。用于

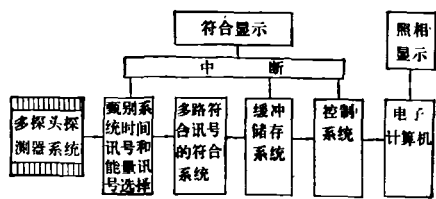


图1 正电子照相机原理方块图

正电子照相的系统称为正电子照相机，它的工作原理如方块图1所示。正电子照相机显示的图象不仅是解剖性的，而且是生理过程在体外的显示，所以正电子照相机是在体外定量分析生理病理变化的仪器。正电子照相机不同于一般 γ 照相机，它由于是生物机体自显影，能显示三维平面图象，且可精确定位。另外，由于放射性同位素寿命短，可让人体接受较大的剂量，以便在最短时间内有足够的计数，这样在人体所允许的剂量范围内，可获得较清晰的图象。如果两束 γ 射线之间呈 180° ，这种情况很有意思，在正电子照相中它可作为探测器的“自然准直器”而被利用^[4]。

两束 γ 射线穿越人体组织的总厚度（不管放射源置于人体何处）总是相等的，所以吸收衰减容易校正，空间分辨率和灵敏度不受放射源放置深度的影响。

进行正电子湮没发射断层照相，要求发射

正电子的同位素的寿命要短；系统的分辨率高；系统的灵敏度高。

二、正电子放射性同位素和试剂

我们知道，生物系统主要是由碳、氮、氧和氢化合物组成的，前三种元素分别具有发射正电子的短寿命的同位素 ^{11}C ， ^{13}N ， ^{15}O 。在正电子照相中选择它们作为生物学重要的示踪化学元素不会影响其生物活性，易于标记各种代谢产物。通常使用的放射性同位素有两类：一类是加速器生产的短寿命的放射性同位素，如 ^{11}C ， ^{13}N ， ^{15}O 和 ^{18}F 等；另一类是放射性同位素发生器（母体半衰期足够长，子体半衰期短的放射性元素）产生的 ^{82}Rb 和 ^{68}Ga 等。现将一些用于正电子照相的主要的放射正电子的同位素和试剂列于表1^[5]。生产这类放射性同位素的源主要是中小型回旋加速器，它的氘离子束能量 $E_d \geq 8\text{MeV}$ 或质子束 $E_p \geq 12\text{MeV}$ 即可。

目前已掌握了把示踪剂引入到有用的化合物中去的快速化学方法，这对进行正电子照相研究是很有意义的。在进行测试人体代谢的正电子照相时，希望要示踪的物质与人们跟踪的未加示踪的物质以同样的方式、同样的速度运输和进行代谢；测试期间被代谢的示踪药剂能

表1 放射性同位素及其试剂

放射性同位素	半衰期 $T_{1/2}$ (min)	主要产生方式	放射性同位素及其试剂
^{15}O	2.04	$^{16}\text{O}(n, 2n)$, $^{14}\text{N}(d, n)$, $^{12}\text{C}(\alpha, n)$	C^{15}O , C^{15}O_2 , $^{15}\text{O}_2$
^{13}N	9.96	$^{12}\text{C}(d, n)$, $^{13}\text{C}(p, n)$, $^{16}\text{O}(p, \alpha)$, $^{10}\text{B}(\alpha, n)$	$^{13}\text{N}_2$, $^{13}\text{N}_2$ -谷氨酸, $^{13}\text{NH}_3$, $^{13}\text{N}_2\text{O}$
^{11}C	20.4	$^{14}\text{N}(p, \alpha)$, $^{11}\text{B}(p, n)$, $^{10}\text{B}(d, n)$, $^{10}\text{B}(p, \gamma)$	^{11}CO , $^{11}\text{CO}_2$, ^{11}C -葡萄糖
^{18}F	109	$^{18}\text{O}(p, n)$, $^{19}\text{F}(n, 2n)$, $^{19}\text{F}(p, n)$, $^{20}\text{Ne}(d, \alpha)$	$^{18}\text{F}^-$, ^{18}F 甾族化合物, $^{18}\text{F}(\text{FDG})$
^{68}Ge ↓ ^{68}Ga	68	^{68}Ge 衰变子核, $^{68}\text{Zn}(p, n)$, $^{68}\text{Zn}(d, n)$, $^{65}\text{Cu}(\alpha, n)$,	^{68}Ga 乙二胺四乙酸, ^{68}Ga 微球 ^{68}Ga 二乙三胺五乙酸
^{82}Sr ↙ ^{82}Rb	1.3	^{82}Sr 衰变子核	^{82}Rb 离子
^{77}Kr	71	$^{77}\text{Br}(p, 3n)$	Kr 气体

停留在感兴趣的器官中，而且示踪药剂中未被代谢的量应是很少的，或者在测量时可以估计出来。为此应该正确选择放射性同位素试剂。

三、探测器及其几何

采用何种类型的探测器以及探测器应设计成什么样的形状，这直接关系到照相质量的优劣。在发表的一些工作报告中^[6]，针对这类问题进行了深入的研究。

图 2 中的 A 是球形围绕几何探测器，它的效率最高。但是实际上并不采用这种几何。因为它结构复杂，造价昂贵，而且用蒙特卡罗方法对约 20cm 大小的人头进行了计算，得出结果表明，非散射光子对的数值仅为 0.25。虽然增加了探测器的探测立体角，增加了探测效率，但是偶然符合计数率和散射因子也随之增加了。显然，这对获取高质量成象是不利的。B 是双 γ

照相几何，C 是平面列阵几何，D 是环形几何以及 E 是圆柱形几何。一般是多晶体分组对称列阵排列，例如美国贝克莱试验研制的照相机就有 280 块晶体组成。表 2 中仅列出了几家设计的环形探测器系统的性能。

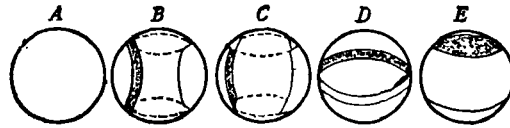


图 2 正电子照相机探测器通用的几种几何安排

以往使用的探测器多数是 NaI(Tl) 晶体，近些年来研究出一种铋锗探测器 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ，与 NaI(Tl) 相比，这种探测器具有高的原子序数，较高的密度和较高的 γ 探测效率等特点，但是缺点是闪光产额较低以及时间分辨率较差。主要性能比较列在表 3。有一种称谓多丝正比室的大面积灵敏正电子照相机是很有前途的，但

表 2 环形探测器系统性能

主要性能	研制单位		
	布鲁海文国立实验室	加利福尼亚大学辐射实验室	贝克莱 Donner 实验室
晶体个数	32 块	64 块	280 块
晶体表面积	32mm 直径	23mm 直径	8mm × 30mm
晶体(中心)间距离	39mm	23mm	10mm
分辨 (FWHM)	~24mm	17mm	10mm
投影数	2 × 270	2 × 864	14000
环直径	400mm	470mm	900mm
视野	~300mm	~300mm	500mm
灵敏度(计数/s · μCi)	240	~125	140

表 3 NaI(Tl) 和 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 的比较

主要参数 晶体	原子序数	密度 (g/cm^3)	相对闪光产额	波长 (\AA)	折射指数	闪烁衰变时间 (ns)	分辨率对 662keV FWHM	时间分辨 (ns FWHM)	探测器效率(%)		
									20mm	8mm	4mm
NaI(Tl)	11, 53,	3.67	1.0	420	1.8	230	7%	3.4	59* (41)	48(31)	42(25)
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	83, 32, 8,	7.13	0.08	480	2.15	300	15%	7.1	90(88)	82(80)	72(70)

* 无括号的能量阈是 100keV，有括号的能量阈是 511keV。

还处在研制阶段,目前只限于较低计数率的使用。

四、几个参数

描述正电子照相机的主要参数是分辨率、偶然符合率和灵敏度等^[7]。

1. 分辨率

它是正电子照相机的主要物理量,影响它的因素比较复杂,整个系统的分辨率不是各个贡献因子的简单线性迭加,而是它们平方和的平方根,可写为

$$R_{\text{系统}} = \sqrt{R_1^2 + R_k^2 + R_A^2 + R_\theta^2 + R_D^2}, \quad (2)$$

式中 R_1 是固有分辨率,它主要是由于光在闪烁体内的相互作用和光在光电倍增管中传输特性所决定的。设探测器 a 和探测器 b 进行符合测量,则有

$$R_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{2} R_a\right)^2 + \left(\frac{1}{2} R_b\right)^2}. \quad (3)$$

对 1 英寸厚的晶体和 3 英寸的光电倍增管,在能量为 511keV 的 γ 射线, R_1 值约为 7.7mm 左右。

R_k 是正电子在生物体组织中的射程对空间分辨的影响,它是电子能量的函数,如 ^{14}C 衰变能量为 0.96MeV 的 β^+ 射线, R_k 值约等于 0.33mm (FWHM) 是比较小的。

R_A 是由于正电子湮没时,产生双 γ 发射夹角不是严格的 180° 所引起的,其角散度一般在 0.6° 左右,特别是当两探测器相距较远时,其影响应该考虑。一般当探测器相距 50cm 时, R_A 值约为 1.3mm。

R_θ 是由于探测器对射线源张一定的立体角,使得射线穿过晶体的厚度不同而引起的分辨率损失:

$$R_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\gamma t}{D}, \quad (4)$$

(4)式中的 γ 和 t 分别是晶体半径和厚度, D 是探测器对源的距离。由上式可知,当 D 愈大时,所得空间分辨率损失 R_θ 愈小。所以使用较

大的空间几何时,可获得较好的分辨率。

至于 R_D 是由照相机的扭曲引起的,粗略估计它约为 3mm。

为了改善线性空间分辨,往往要牺牲探测效率,不过进一步提高空间分辨是可能的。

2. 偶然符合率

偶然符合计数率 N_{CR} 与单个探测器的计数率以及分辨时间成正比,写为

$$N_{\text{CR}} = 2\tau N_a N_b, \quad (5)$$

式中 N_a 和 N_b 分别是探测器 a 和 b 的单个计数率, τ 是符合分辨时间。由于采用快电子学线路,实现了 τ 值仅为十几毫微秒的量级,另外对小立体角的装置,在远离活性场的地方加适当的屏蔽,可减少 N_{CR} 。对大面积灵敏探测器,在探测器之间加一准直器,同样可降低 N_{CR} 。为了对符合率进行修正,必须在一定时间间隔内测定 N_{CR} ,并从总符合计数中减去 N_{CR} 值,从而得到真符合计数。值得注意的是,使用多探头的多路符合系统的偶然符合率和采用双探头符合的偶然符合率相当。所以使用多探头和多路符合的系统,既提高了探测效率又不增加偶然符合率,这也是正电子照相机独特之处。

3. 灵敏度

在正电子照相中,对较长寿命的放射源如 ^{86}Rb , ^{68}Ga 和 ^{18}F 等,一般只使用 1—4 μCi 的剂量,对较短寿命的放射源如 ^{15}O 和 ^{13}N 等,即使用的放射源剂量比长寿命的放射源大,但是为了获得较好的对比度,通常还是要将这种大剂量的短寿命的放射源冷却一至几个物理半衰期,以消除本底干扰。由于所采用的放射性药剂对人体是很灵敏的,所以正电子湮没发射断层照相与其它照相方法(像 X 射线照相)比较,其灵敏度偏高。不过,在正电子照相机的视野中灵敏度是有变化的,在两个探测器的视野横截面中心灵敏度最大,沿径向减小。在垂直于探测器的横截面方向灵敏度也有变化。不过在实际应用中,由于射线通过的人体组织器官是较厚的物质,使得灵敏度变化较缓慢。如果用焦点控制 (Depth-of-Focus Control),可使灵敏度与射线穿过的深度无关。从图 3 中的 B 和 A 比较就可看

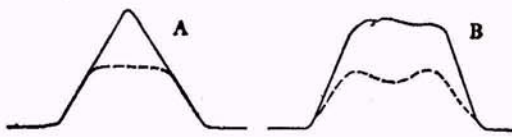


图3 灵敏度的变化

A. 在空气中; B. 穿过人体组织; 虚线是有 DOF; 实线无 DOF

表4 不同空间位置灵敏度

放射源	空间位置	
	50cm	75cm
点源(计数/s·μCi)	395	190
6英寸直径薄片源(计数/s·μCi)	230	105

出,在空气中灵敏度变化十分尖锐,穿过人体组织后,灵敏度变化较平缓。表4中所列数据是正电子照相机在空气中测量到的灵敏度。

五、应用

正电子照相理论及其设备的研制都有了较迅速的发展。目前,在国外某些单位和医院已建立了几十台这类装置。它不仅可用于形态学的研究,例如研究人体的生化生理病理状况,而且可用于临床诊断学。下面略举几例。

1. 确定人脑横剖面中区性血容量。让被检查者吸入含有微量¹⁴C的一氧化碳空气,这种试剂与血红蛋白结合成¹⁴C-羰基血红蛋白。

把照相得到的脑图象中的¹⁴C-羰基血红蛋白的量,与在发射扫描同时取得的静脉血样中测定出来的全部血液中的¹⁴C-羰基血红蛋白量,两相比较,就可以迅速确定出在脑中的区域血容量。

2. 对血小板示踪,研究动脉粥样硬化过程。

3. 确定血管中被示踪的化合物(麻醉剂和其它药物等)的浓度。

4. 研究人体组织器官的功能,生化病理过程以及人体组织器官对各种药物的反应、分布以及代谢过程等。如对精神病理学的研究,可揭示精神分裂症患者由药物治疗所显示的逆转的区域性代谢变化等。

5. 测定人体组织器官的新陈代谢,组织化学成分以及血液流动等,其中对人体大脑新陈代谢和心肌的代谢研究极为重要,例如用它研究出测定脑的任一点的葡萄糖代谢作用的方法。图4是正常人脑用¹⁸F标记的脱氧葡萄糖的二维(左面2幅)和断层(右面12幅)照相。这种分布反映了大脑区域葡萄糖代谢比。明亮区(高葡萄糖代谢区)显示大脑皮层灰质,暗区显示大脑皮层白质,利用它可以研究大脑内区域性葡萄糖代谢过程。由于脑的功能活动与血流量密切相关,而且同葡萄糖的消耗量直接相关,因此,测定葡萄糖作用的代谢方法可提供活脑各组成部分的活动情况。

6. 研究病理过程、诊断和治疗,观察恶性

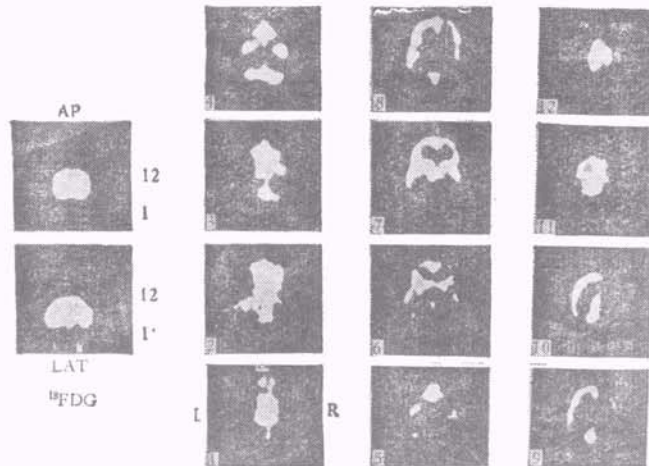


图4 正常人脑用¹⁸F标记的脱氧葡萄糖照相^[27]:左面是二维照相,右面(12幅)是断层照相

肿瘤的代谢和治疗效果。

7. 由它测量到人体组织器官的辐射分布数据,再通过某些数学模型计算,就可推断出人体生理学的某些参数。

正电子湮没发射断层照相方面的工作还很年轻,但很实用,它要求物理医疗研究中心同加速器、探测器和计算机相结合,需要物理学、化学、生理学工作者与医生、工程技术人员进行广泛的协作。正电子照相机本身存在的一些问题如结构和使用复杂等,有待进一步改善,成本也有待降低,它的线性空间分辨率还应继续提高。

参 考 文 献

- [1] Michel M. Ter-Pogossian, Marcus E. Raichle and Burton E. Sobel, *Scientific American*, 243-4(1980), 170.
- [2] C. A. Burnham and G. L. Brownell, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS19-3 (1972), 201.
- [3] T. F. Budinger and G. T. Gullberg, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS21-3(1974), 2.
- [4] Z. H. Cho, J. K. Chan, L. Eriksson, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS23-1 (1976), 613.
- [5] J. A. Correia et al., Proc. 5th Int. Conf. Positron Annihilation, Japan, (1979), 391.
- [6] Stephen E. Derenzo, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS24-2 (1977), 881.
- [7] G. Muehlechner, M. P. Buchin, J. H. Dudek, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS23-1 (1976), 528.

实验技术简讯

液体中 He-Ne 激光布里渊散射的实验研究

雷印生 王 诺 张镇西
(西 北 大 学)

一、 引 言

布里渊散射是入射光与介质内的弹性波相互作用而产生的一种光散射现象。对于普通布里渊散射(非受激布里渊散射),其频率位移 $\Delta\nu$ 满足下列关系式:

$$\Delta\nu = \pm 2\nu_0 \frac{v}{c} n \sin \theta/2, \quad (1)$$

这里 ν_0 是入射光的频率, n 为散射介质的折射率, v 为介质中的声速, c 为光速, θ 是散射角。关于液体中的布里渊方程和散射光强,在 Mountain 的文章中已有详细讨论^[1]。

二、实验装置与测试方法

我们研究液体中布里渊散射所用的实验装置如图 1 所示。激光光源是自制的多模 He-Ne 激光器。输出功率为 8mW。该激光首先

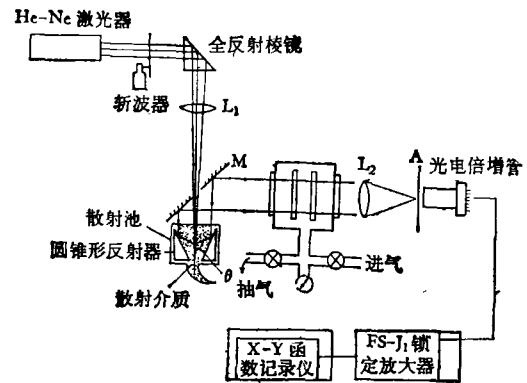


图 1 观察布里渊散射的实验装置

经过频率为 288Hz 的 125 型斩波器斩波,透镜 ($f = 200\text{mm}$) 把经过转向的激光束会聚射入液体散射池中。该散射池为一圆锥形反射器^[2],它可以收集与人射光成 θ 角的散射光。如果 ϕ 是圆锥形反射器的全顶角,那么,散射角 $\theta =$