

空间 γ 射线谱(I)

方正知

(中国科学院空间科学中心,北京 100080)

空间 γ 射线谱的探测研究已由发射源搜寻发展到天体物理环境的探索. 太阳耀斑 γ 射线谱发现最早, 观测和研究已较丰富深细, 目前较多的注意力开始转向非太阳的领域, 其中以超新星爆发和 γ 射线暴最为活跃. 该文扼要介绍了空间 γ 射线谱的特征、发射机理过程、所载有的物理信息和研究现状, 着重叙述了太阳耀斑 γ 射线谱的类型和特性及其在太阳物理问题中的多种具体应用. 作者也提出了一些新见解.

一、空间 γ 射线谱研究的意义和作用

空间 γ 射线谱所包容的物理内容亦称之为 γ 射线天体物理学.

γ 射线谱是宇宙空间的新窗口之一^[1], 有许多天体物理部位所发生的核过程的特征标志, 用它来探索宇宙中所存在的潜隐现象, 其功效相当于或者超过了原子、分子光谱和 X 射线谱. 由于它不带电荷, 不受磁场所偏转, 故可由探测方位推溯其源区. 由于它的穿透力强, 故可用来研究其他射线所不能观测到的过程和区域, 能直接揭示以前只能间接研究的许多天体物理过程; 可提供元素核合成的所在部位及其模式的直接信息. 此外, 它的谱线宽度和能移涵有发射部位的物理环境的单义信息. 例如: 用 γ 谱的引力红移量来探测中子星和黑洞表面的性质; 通过长寿命放射性核的合成 γ 射线及其衰变的测量来揭示银河系中超新星爆发的动力学过程; 弥散 γ 射线谱可给出其他方法所不能观测的宇宙线低能成分源的强度和空间分布; γ 射线谱还有助于测定银河系尺度上的星际介质的成分而不须预知其物质的电离态和分子态. 线宽只有几 keV (几 MeV 的谱线) 的非常窄的 γ 谱线可用来直接探测星际尘的成分、大小和空间分布. γ 射线的衰减系数小, 使人们有可能研究星际云深处的用其他波段的射线所不能观测

到的星体形成中的最早星态, 总之可以用来研究宇宙空间普遍存在的现今和远古的环境状态.

最近几年有人根据观测提出, 宇宙中可见的亮物质仅占全宇宙质量的百分之十, 尚有百分之九十的物质为观察不到的暗物质 (Dark Matter)^[35], 现有的宇宙学理论和引力观测也确认应有大量暗物质的存在. 目前的问题是怎样才能弄清暗物质的存在形态, 用什么方法予以探测? 1991 年已有人提出^[36]应用暗物质的正反粒子湮没 γ 谱的设想, 认为质量为 30—80 GeV 的重中微子可能是暗物质的候选粒子, 其湮没截面相当大, 生成的 50 GeV γ 射线信号明显地高于银河 γ 本底, 已有理论预估和高能 γ 射线的望远镜的设计.

在月球和太阳的观测中亦已展示了 γ 射线的巨大功效, 例如 Appollo 月轨 γ 射线谱仪对月球表面作了全球观测, 发现了异常富集的 Fe, 放射性 K, Th 和 U 的区域. OSO-7 卫星探测器首次发现了 1972 年 8 月 4 日和 8 月 7 日耀斑的 γ 射线谱. 由于它不受磁场的影响, 带有加速粒子特征及其所作用的环境介质中同位素成分的未经改变的信息, 故其强度首次给出了耀斑区含能核的加速时间、能谱和总核数, 这些数据对太阳耀斑含能粒子的加速和逸出模型, 以及耀斑的全过程给予了新的重要的制约和限定, 至今太阳耀斑 γ 射线谱的观测仍方兴未艾, 容另分述.

总之由于激发核能级的寿命远小于 1s(同质异能核除外),所以研究耀斑或其他宇宙源中退激核所生成的 γ 射线谱的强度、能谱以及强度随时间变化的特征,可提供生成这些核激态的核反应的时间历程数据,而这些数据又直接反映了太阳含能粒子与太阳大气互作用时其能谱随时间变化.因此通过瞬发 γ 射线谱的观测研究可望对耀斑粒子加速过程有一深入剖析.

二、 γ 射线的发射过程

100keV 至几十 MeV γ 射线谱的主要发射过程有:核退激、辐射性俘获和正反粒子湮没.

1. 核退激的瞬发 γ 射线

核能级的激发方式有:直接来自质子、 α 粒子、中子的非弹性散射,如 $^{12}\text{C}(\text{P}, \text{P}')^{12}\text{C}^*$, $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha')^{12}\text{C}^*$, $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}^*$; 间接来自散裂反应,留下激态散裂核,如 $^{16}\text{O}(\text{P}, \text{Pa})^{12}\text{C}^*$, $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}^*$, 或来自放射性衰变到非基态的能级,如 $^{12}\text{N}(\beta^+)^{12}\text{C}^*$, 这些激态核退激时生成瞬发 γ 射线谱.

辐射性俘获的 γ 射线(以中子的辐射性俘获为主),若环境密度足够高,例如, $10^{16} \text{H} \cdot \text{cm}^{-3}$ 或更高,中子在衰变掉以前就有够多的机会被质子俘获,故 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反应的 2.223MeV γ 射线谱最强,中子亦可被重核俘获,如 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \gamma)^{57}\text{Fe}$ 的 1.646, 7.632MeV γ 射线也很重要,此类 γ 射线还包括质子、 α 粒子的俘获辐射,如: $^2\text{H}(\text{p}, \gamma)^3\text{He}$ 的 5.494MeV γ 射线, $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}$ 的 1.944MeV γ 射线.

2. 正反粒子湮没的 γ 射线

正电子与电子直接湮没,亦称自由态湮没,在天体物理环境中不大可能直接湮没为 1.02MeV 单个 γ 光子,而以两个相距 180° 的 0.511MeV γ 光子为主.正电子又可形成电子偶素(positronium, $e^+ \cdot e^-$, PS, 亦称类 H 原子)后再进行湮没,称之为束缚态湮没.束缚态有自旋相反的单态和自旋平行的三态.单态湮没时生成两个相距 180° 的 0.511MeV γ 光子,三态湮没时则生成 $<0.511\text{MeV}$ 的三个 γ 光子.三

态的形成几率为单态的三倍,而三态湮没速率为单态的 1/1115(两者的寿命值比),这样三光子湮没发生的几率为二光子湮没的 $\frac{3}{1115} = \frac{1}{372}$,但束缚态二光子湮没的几率只及直接二光子湮没的 $\frac{1}{4}$.在 $T < 10^6\text{K}$, 和密度 $< 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 的环境中,PS 湮没为正电子湮没的主要方式.若 $T \sim 10^6\text{K}$, 密度 $> 10^{15}\text{cm}^{-3}$, PS 与环境介质碰撞而分解,此时自由态正电子湮没速率正好等于 PS 形成速率.

在一些天体物理环境中,如活动银心、 γ 爆源、黑洞或中子星上的吸积盘和类星体中存在有相对论性热的等离子体,其中粒子的平均能量超过了电子的静止质量能. $m_e c^2 = 0.511\text{MeV}$, 相当于 $5 \times 10^9\text{K}$, 于是生成了电子对(e^+, e^-). γ 射线在此被吸收,也生成 e^+, e^- ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+, e^-$), 这样就有大量的自由态 e^+ 湮没过程发生.

正反质子如能直接湮没,它生成的 γ 射线光子能量应有 $2m_p c^2 = 2 \times 1838.63 \times m_e c^2 = 1.879\text{GeV}$, 但实际并无直接湮没的而是相互作用生成的 π^0 介子衰变所产生的 γ 射线,其光子能量决定于 π^0 介子的能量分布,因而又决定于天体物理的环境状态. $p - \bar{p}$ 静态湮没时最低的 γ 射线能量为 $\sim 5\text{MeV}$, 最高能量为 $\sim 919\text{MeV}$, 强度极大值所对应的光子能量为 $m_\pi c^2 / 2 = 68\text{MeV}$.

正反粒子湮没过程在宇宙的稳态学说中具有重大的意义,为了保持宇宙膨胀时的平均密度不变,假设了宇宙中自发生成正反粒子的速率为 $10^{-22}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$. 此学说的结论之一就是应有大量的反物质迄今仍然存在,它们会与正物质发生湮没而产生 γ 射线,故只有 γ 射线可以用来探索宇宙中的反物质.因此近年来有正电子天体物理学新分支学科出现.

3. 热核分裂反应^[4,5]

在有些天体物理的相对论性等离子体中,由于温度高达 1MeV 以上 ($> 10^{10}\text{K}$), 热的质子、 α 粒子和光子可以直接分裂其中的轻核和

较重核,如: $p+{}^2\text{H}\rightarrow p+p+n$, $p+{}^4\text{He}\rightarrow {}^3\text{He}+d$, $p+{}^{12}\text{C}\rightarrow {}^9\text{B}+\alpha$, $p+{}^{16}\text{O}\rightarrow {}^{13}\text{N}+\alpha$, $p+{}^{24}\text{Mg}\rightarrow {}^{21}\text{Na}+\alpha$,这样就改变了等离子体中原有元素核丰度,因而会改变核退激的 γ 和俘获性 γ 的发射度,故在大于 0.5MeV 的高温等离子体中必须考虑热核分裂反应的重要性及其与天体物理环境的关系和应用前景,此时应首先考虑这些反应对 γ 射线发射谱产生的影响.热核分裂反应比之散裂核反应、俘获核反应以及退激核反应,相形之下重视不够,80年代起才予以应有的注意.在70年代,研究星体演化和核合成中的p-p链和CNO热核反应时仅考虑了俘获质子的 γ 射线,但未论及热核分裂反应及其对 γ 射线发射度的影响.正电子湮没和热核分裂已成为相对性等离子体天体物理中两大重要研究领域.

4. 超高能的 γ 射线^[6]

VHE($10^{10}-10^{14}\text{eV}$), UHE($10^{14}-10^{17}\text{eV}$), EHE($10^{17}-10^{20}\text{eV}$)(其中 $\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$, $\text{PeV}=10^{15}\text{eV}$, $\text{Eev}=10^{18}\text{eV}$)的 γ 谱的发射过程计有:(1)逆康普顿效应,例如在天鹅座X-3X射线源中PeV高能电子与X射线光子的逆康普顿相互作用而生成PeV γ 射线.(2)磁韧致辐射亦称同步辐射当电子或正电子的运动方向与磁力线成一定角度时,即投掷角不为零时,由于洛仑兹力使之绕磁场方向而螺旋加速,不断辐射出连续谱的电磁能,与同步加速器中由磁场偏折使加速的电子束不断产生的连续谱辐射生成机理相同,故称为同步辐射.若高能电子的投掷角为零,即沿着磁力线而运动时,由于磁力线的弯曲,产生电子的角加速度而辐射电磁能,称之为曲率辐射.以上这些过程均属非核的机理,都是由超高能加速的电子所产生的.粒子竟然加速到我们人类粒子加速器尚不能达到的能量(目前正拟建造的世界最大的超导超级对撞机为 10^{13}eV),在高等天体物理中这确是一件令人惊奇而又令人鼓舞、十分激动人心的特殊现象.尽管目前尚无满意的机理足以从理论上予以合理的阐述,但 $\text{TeV}-\text{PeV}$ 的观测数据是可信的, $\text{TeV}-\text{PeV}$ 过程是公认存在的.故 γ 射物理

线天体物理学所论及的问题乃是有关最大能量粒子在宇宙中的发生和传输问题.用无线电、光学或X射线望远镜来观测上述高能过程,我们固然可以得到宇宙中最大能量过程的非同一般的细致的观貌,但是这些光子都是远离这些粒子本身而发射,副产物除外,唯有当我们用 γ 射线来观察时,才能直接深入到过程的真实核心,开始感觉到它的功效.用低能光子,就如同我们只能看到燃烧的烟雾,而用 γ 射线我们就可以看到它的真正的火焰,因而有可能来了解爆燃的本质.近年来在太阳耀斑、超新星^[7]、新星、脉冲星、天鹅座X-1和X-3,银河中央、银河外,巨分子云的 γ 射线谱, γ 射线爆^[8],高温相对论性等离子体核裂与 γ 射线发射,超高能 γ 射线谱, γ 射线受激辐射, γ 射线探测技术等方面均有许多新成果、新进展,大大丰富发展了 γ 射线高能天体物理新学科.

三、太阳耀斑的 γ 射线谱

1. γ 射线谱的特性

太阳耀斑中被加速的粒子(质子、 α 粒子)与太阳大气(其温度密度随高度的分布如图1^[9])相互作用产生中子、正电子、 π 介子、放射性核及激发核能级,他们相应地产生被俘获、湮没、衰变和退激过程,生成可被观测的 γ 射线谱.

(1) 2.223MeV γ 射线

它是俘获性 γ 射线谱中最重要的谱线,又是所有太阳耀斑 γ 射线谱中最强线,是由于中子被H俘获, ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ 反应所生成的.中子主要来自He,C,N,O,Ne-Fe核的(p,n),(α ,n)散裂反应(spallation),如: ${}^{13}\text{C}(p,n){}^{13}\text{N}\cdots$ ${}^{56}\text{Fe}(p,n){}^{56}\text{Co}$, ${}^{13}\text{C}(\alpha,n){}^{16}\text{O}$, \cdots ${}^{56}\text{Fe}(\alpha,n){}^{59}\text{Ni}\cdots$,有时质子-质子碰撞和质子- α 粒子碰撞,生成高能中子和 π 介子,见表1和图2^[10].高能中子可在近地球空间直接探测得到,1982年Chupp教授对此已有报道,但当时并不知道生成这些中子的核反应发生于太阳大气层的何处.根据计算,其起始速度矢量朝着太阳光球层

的大部分中子在光球层中慢化,接着被 ^1H 或 ^3He 所俘获.前者生成 2.223MeV γ 射线,后者生成氦(^3H),称为无辐射的俘获,不产生 γ 光子 ^3He 俘获中子的截面为 ^1H 的 1.7×10^4 倍.慢化的中子存在和迁移的时间依赖于光球层中 ^1H 俘获中子的几率,也以同样程度依赖于光球层中的 ^3He 丰度($^3\text{He}/^1\text{H}\sim 5\times 10^{-5}$),故观测此 γ 射线谱可测出光球层 ^1H 或 ^3He 丰度.由于

2.223MeV γ 射线较之瞬发 γ 射线生成于太阳大气中的更深层次,因此对于靠近太阳圆面(即大气高度 $H=0$)的耀斑,其 2.223MeV γ 射线被太阳大气所衰减比瞬发 γ 射线多. 2.223MeV γ 射线谱由于温度引起的增宽极小,在光球层温度为 6000K 时,其线宽只有 100eV ($1/2\times 10^4$).

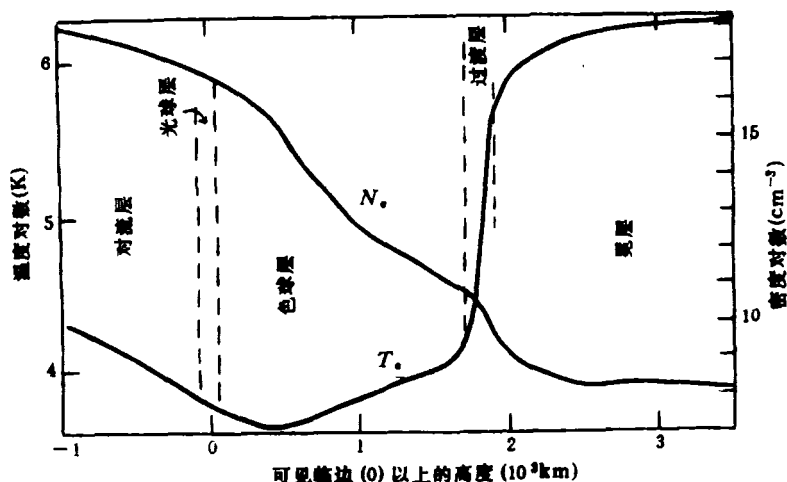


图1 太阳外层平均温度和密度随高度的变化^[9]

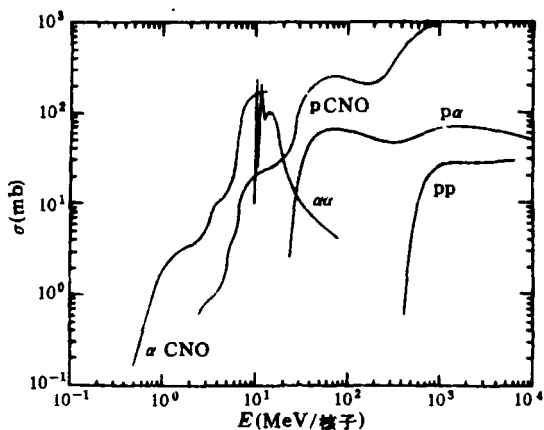


图2 几种反应的中子生成截面^[10]

中子亦可被重核所俘获,如被 Fe 核俘获, $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}$,所生成的 7.632MeV γ 射线也很重要,其强度视 Fe 核的丰度而定,见表2^[11].

(2) 瞬发 γ 射线谱

它们来源于本文第二节中所列激发方式的

激态核的退激过程.最重要的有: ^{16}O 核的 6.129MeV , ^{12}C 的 4.438MeV , ^{14}N 的 2.313MeV , ^{28}Si 的 1.779MeV , ^{20}Ne 的 1.634MeV , ^{24}Mg 的 1.369MeV , ^{56}Fe 的 1.238MeV 和 0.847MeV γ 射线,主要由质子和 α 粒子直接激发核而生成.另外 $^7\text{Li}^*$ 的 0.478MeV 和 $^7\text{Be}^*$ 的 0.431MeV γ 射线谱乃由 $^4\text{He}(\alpha,p)^7\text{Li}^*$ 和 $^4\text{He}(\alpha,n)^7\text{Be}^*$ 聚变反应所产生,见表3^[12].这些 γ 射线谱在天体物理中都是很重要的,有两类谱线^[13]:一类是窄的谱线,属于加速的质子和 α 粒子激发耀斑环境重核所退激的 γ 射线,因激发导致重核的反冲速度小,其多普勒宽度只有 $\sim 100\text{keV}$,发射强窄线的核素有 ^{56}Fe , ^{28}Si , ^{24}Mg 等;另一类是宽的 γ 线,它是耀斑中加速的重核与环境元素丰度最高的 H 和 He 相互作用、被激发和退激时所生成的.因与轻元素相互作用,重核虽被激发,但失去能量

较小,仍有相当大的速度,于是出现运动的 γ 发射体,致使 γ 射线有较大的多普勒频移,形成宽的谱线,有的甚至宽化到与连续本底辐射相汇没.大于4MeV的 γ 射线来自C,N,O核,小于3MeV γ 射线来源于更重的核,而且1-2MeV γ 带中大部分来自耀斑加速粒子中比环境丰度有所增高的那些核反应,如表4^[14](3)栏中的Ne, Mg, Si, Fe. 瞬发 γ 射线的计算相对强度如表3.

表1 生成中子的含能粒子反应^[10]

	反应	阈能(MeV)
1.	$p+{}^1\text{H} \rightarrow n+p+\pi^+$	292.3
2.	$p+{}^4\text{He} \rightarrow {}^3\text{He}+p+n+(\pi)$	25.7
	$\rightarrow {}^2\text{H}+2p+n+(\pi)$	32.6
	$\rightarrow 3p+2n+(\pi)$	35.4
3.	$p+{}^{12}\text{C} \rightarrow n+\dots$	19.6
	$p+{}^{13}\text{C} \rightarrow n+\dots$	3.2
4.	$p+{}^{14}\text{N} \rightarrow n+\dots$	6.3
5.	$p+{}^{16}\text{O} \rightarrow n+\dots$	16.6
	$p+{}^{18}\text{O} \rightarrow n+\dots$	2.5
6.	$p+{}^{20}\text{Ne} \rightarrow n+\dots$	15.9
7.	$p+{}^{56}\text{Fe} \rightarrow n+\dots$	5.5
8.	$\alpha+{}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}+n$	9.5
9.	$\alpha+{}^{12}\text{C} \rightarrow n+\dots$	2.8
	$\alpha+{}^{13}\text{C} \rightarrow n+\dots$	$Q=+2.2$
10.	$\alpha+{}^{14}\text{N} \rightarrow n+\dots$	1.5
11.	$\alpha+{}^{16}\text{O} \rightarrow n+\dots$	3.8
	$\alpha+{}^{18}\text{O} \rightarrow n+\dots$	0.21
12.	$\alpha+{}^{20}\text{Ne} \rightarrow n+\dots$	2.16
	$\alpha+{}^{22}\text{Ne} \rightarrow n+\dots$	0.15
13.	$\alpha+{}^{56}\text{Fe} \rightarrow n+\dots$	1.37
14.	$\alpha+{}^{25}\text{Mg} \rightarrow n+\dots$	$Q=+2.6$
15.	$\alpha+{}^{26}\text{Mg} \rightarrow n+\dots$	$Q=+0.04$
16.	$\alpha+{}^{28}\text{Si} \rightarrow n+\dots$	0.43
17.	$d+{}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He}+n$	$Q=+3.25$
18.	$d+{}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}+n$	$Q=+17.6$

由于大多数激态核能级寿命比太阳耀斑的任何特征时间都短,故核退激产生的 γ 射线是太阳耀斑中含能核(如质子)与环境核相互作用速率的一种特有的跟踪媒体,可供作此速率的直接而又灵敏的测度.通过线形和多普勒频移的方向性信息,瞬发 γ 射线谱还可给出 γ 发射核和激发粒子的聚束化的几何分布形态.

(3)0.511MeV γ 射线谱

太阳耀斑中的 e^+ 来源于 π^+ 介子的衰变物理

($\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$)以及加速质子和核与环境介质相互作用生成的各种放射性核的衰变,如表5^[15]. 太阳 e^+ 还可来自加速的电子对(e^+e^-). 重要的 e^+ 发射核的寿命为大于20min到小于1s. e^+ 生成的反应方式和反应阈值能量见表5.

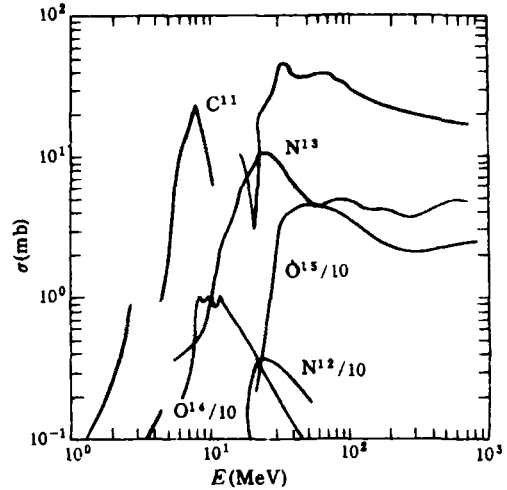


图3 放射性 e^+ 发射核的生成截面^[16]

发射 e^+ 的放射性核的生成截面如图3^[16]. 生成0.1-几十MeV的 e^+ 与环境太阳大气相互作用而减速到几百eV,减速所历时间依赖于湮没的介质密度和磁场强度. e^+ 的湮没特征已述于本文第二节.0.511MeV γ 射线强度不仅依赖于 e^+ 发射核的数密度,而且也依赖于发射核的衰变速率和 e^+ 湮没速率,故在耀斑粒子加速的早期阶段以及在 e^+ 发射核生成20min以内,短寿命(1-2min) e^+ 发射体 ${}^{14}\text{O}$ 和 ${}^{15}\text{O}$ 为主导.在 e^+ 生成反应明显地停止之后, ${}^{11}\text{C}$ 核提供迟发的 e^+ .此外 e^+ 湮没速率依赖于耀斑环境介质的密度、温度和离化度.如本文第二节所述,在低密度中性介质中, e^+ 总是以PS形式进行湮没,只有当环境密度 $>10^{15}\text{cm}^{-3}$ 时,相互碰撞迅速破坏PS束缚态,致使自由态 e^+ 湮没超过了PS湮没.实际的观测也证实了这一点,因太阳耀斑的0.511MeV γ 观测谱形是对称的,对称线形是自由态湮没的标志,而PS湮没的75%为三态湮没,其 γ 谱为不对称形.若耀斑环境介质完全离化,有相当高的电场存在,使 e^+ 动能大大超过了PS结合能(6.8V),则PS生成速率大大减小.在H等离子体介质中,以温度为函数的每

一个 e^+ 的 PS 生成速率和自由湮没速率如图

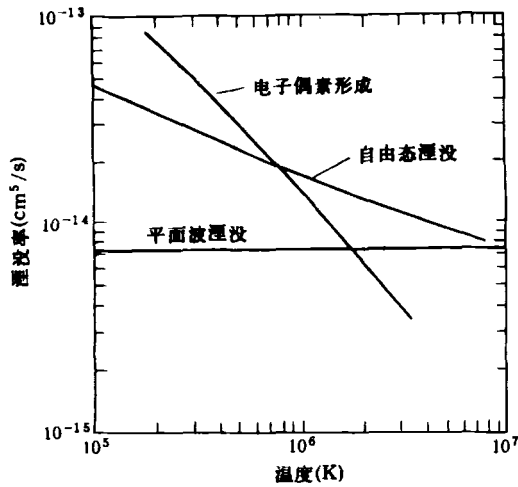


图 4 氢等离子体中 e^+ 自由态湮没率和电子偶素形成率^[17]

4^[17]所示. 由图 4 可见, 若 $T > 10^6 K$, 绝大部分 e^+ 都不是束缚态湮没. 对湮没区来说, 假定的这个温度是合理的, 0.511MeV γ 谱的观测宽度也证明了这一点. 从其宽度的上限值来看, 湮没区的温度应小于 $10^7 K$. 在 $T = 10^6 K$, 0.511MeV γ 线宽为大于 10keV. 在低温区, 宽度只有几 keV, 例如在太阳大气的过渡层以下, 即 $< 10^5 K$ 部位, 0.511MeV γ 线宽应 $< 3.5 keV$.

相对论性电子与耀斑环境质子碰撞由于带电粒子场的作用而生成的电子对(e^+e^-)湮没时产生瞬发 0.511MeV γ 射线. 对 1972 年 8 月 4 日耀斑, 求得电子对湮没生成的 0.511MeV γ 光子为 $8 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-4}$ 光子 $cm^{-2} \cdot s^{-1}$, 比观测到的 0.06 光子 $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 通量小 $10^2 - 10^3$ 之一, 故 0.511MeV γ 线强度观测值中电子对的贡献小于 1%.

除 γ 射线和中子之外, 太阳大气中的核反应还生成许多含能核: $^2H, ^3H, ^3He, Li, Be, B$, 而且也观测到太阳大气中 3He 丰度异常. 由于有许多复杂因素混在其中, 以致不能用 3He 的观测数据来说明耀斑中核反应问题. 目前只有 γ 射线谱和中子观测结果才是太阳大气中核反应特性的唯一可以令人置信的例证, 因所测两方面数据与几 MeV 以上的含能粒子所产生的核反应充分一致. 因此 2.223MeV 中子俘获 γ 射线谱, 0.511MeV e^+ 湮没 γ 射线谱, Fe-K 系等离子体 X 射线谱和 H 复合微波谱属于有名的四大特征线, 构成了太阳的作用神奇的射线谱.

(未完待续)

表 2 高丰度元素的俘获中子的 γ 谱线^[11]

元素	A	天然同位素分数丰度	截面 $\sigma(n, \gamma)^a$	E_γ (MeV)	$\eta(E_\gamma)^b$
H	1	~1	.33	2.23	1
C	12	.99	.0034	4.95	.75
				3.68	.25
N	14	~1	.075	1.26	.25
				2.52	.06
				1.88	.21
				1.68	.12
				3.53	.09
				3.68	<.23
				4.51	.15
				5.30	.21
				5.27	.32
				5.53	.21
O	16	~1	<.0002	5.56	.11
				6.32	.18
Na	23	1	.534	10.82	.14
				6.40	.26
				3.98	.22
				3.59	.17
				2.52	.17

续表

元素	A	天然同位素分数丰度	截面 $\sigma(n, \gamma)^a$	$E_\gamma(\text{MeV})$	$\eta(E_\gamma)^b$
Mg	天然		.063	2.03	.20
				2.75	1.0(²⁴ Mg)
				1.38	(²⁴ Mg)
				.87	.25
				.47	.69
				3.92	.47
Al	27	~1	.235	2.28	.24
				7.72	.16
Si	28	.92	.16	1.78	.88(²⁸ Si)
				4.94	.61
Ca	40	.97	.44	3.54	.64
				6.42	.42
				4.42	.16
				3.61	.07
Fe	56	.92	2.55	2.00	.29
				1.94	.99
				7.64	.44
				7.28	.05
				6.02	.085
				5.92	.08

表3 瞬发 γ 射线谱^[12]

光子能量(MeV)	源	生成反应	近似相对强度
0.431	⁷ Be * 0.431 → 基态	⁴ He(α, n) ⁷ Be * 0.431	1
0.478	⁷ Li * 0.478 → 基态	⁴ He(α, p) ⁷ Li * 0.478	
		⁴ He(α, n) ⁷ Be $\xrightarrow{12\%}$ ⁷ Li * 0.478	1
0.72	¹⁰ B * 0.72 → 基态	¹² C(p, 2pn) ¹⁰ B * 0.72	0.1
0.845	⁵⁶ Fe * 0.845 → 基态	⁵⁶ Fe(p, p') ⁵⁶ Fe * 0.845	0.2
1.24	⁵⁶ Fe * 2.08 → ⁵⁶ Fe * 0.845	⁵⁶ Fe(p, p') ⁵⁶ Fe * 2.08	0.2
1.38	²⁴ Mg * 1.37 → 基态	²⁴ Mg(p, p') ²⁴ Mg * 1.37	0.1
1.63	²⁰ Ne * 1.63 → 基态	²⁰ Ne(p, p') ²⁰ Ne * 1.63	
		¹⁴ N * 3.94 → ¹⁴ N * 2.31	
2.31	¹⁴ N * 2.31 → 基态	¹⁶ O(p, 2pn) ¹⁴ N * 3.94	0.2
		¹⁴ N(p, p') ¹⁴ N * $\frac{3.94}{2.31}$ ¹⁴ N * 2.31	
		¹⁴ N(p, n) ¹⁴ O → ¹⁴ N * 2.31	
4.43	¹² C * 4.43 → 基态	¹⁶ O(p, 2pn) ¹⁴ N * 2.31	0.3
		¹² C(p, p') ¹² C * 4.43	
		¹² C(α, α') ¹² C * 4.43	
~5.3	¹⁵ N * 5.31 → 基态	¹⁶ O(p, pa) ¹² C * 4.43	1
		¹⁶ O(p, 2p) ¹⁵ N * 5.31	0.3
6.14	¹⁶ O * 6.14 → 基态	¹⁶ O(p, p') ¹⁶ O * 6.14	
		¹⁶ O(α, α') ¹⁶ O * 6.14	0.5
6.33	¹⁵ N * 6.33 → 基态	¹⁶ O(p, 2p) ¹⁵ N * 6.33	0.5
7.12	¹⁶ O * 7.12 → 基态	¹⁶ O(p, p') ¹⁶ O * 7.12	0.2

表 4 元素同位素丰度^[14]

同位素(1)	环境粒子(2)	加速的粒子(3)
¹ H	1.00	1.00
⁴ He	0.07	0.15
¹² C	4.15×10 ⁻⁴	1.07×10 ⁻³
¹³ C	4.64×10 ⁻⁶	1.28×10 ⁻⁵
¹⁴ N	9.00×10 ⁻⁶	2.14×10 ⁻⁴
¹⁵ N	3.46×10 ⁻⁷	8.57×10 ⁻⁷
¹⁶ O	6.92×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻³
¹⁸ O	1.38×10 ⁻⁶	4.28×10 ⁻⁶
²⁰ Ne	9.00×10 ⁻⁵	2.14×10 ⁻⁴
²² Ne	1.00×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻⁵
²³ Na	2.28×10 ⁻⁶	4.28×10 ⁻⁵
²⁴ Mg	3.11×10 ⁻⁵	6.42×10 ⁻⁴
²⁵ Mg	4.01×10 ⁻⁶	8.14×10 ⁻⁵
²⁶ Mg	4.43×10 ⁻⁶	8.49×10 ⁻⁵
²⁷ Al	3.18×10 ⁻⁶	5.35×10 ⁻⁵
²⁸ Si	3.46×10 ⁻⁵	6.42×10 ⁻⁴
²⁹ Si	1.80×10 ⁻⁶	3.21×10 ⁻⁵
³⁰ Si	1.18×10 ⁻⁶	2.14×10 ⁻⁵
³² S	1.80×10 ⁻⁵	1.07×10 ⁻⁴
³⁴ S	7.61×10 ⁻⁷	4.71×10 ⁻⁶
³⁶ Ar	3.39×10 ⁻⁶	2.14×10 ⁻⁵
³⁸ Ar	6.23×10 ⁻⁷	4.28×10 ⁻⁶
⁴⁰ Ca	2.28×10 ⁻⁶	4.28×10 ⁻⁵
⁵² Cr	4.15×10 ⁻⁷	2.14×10 ⁻⁵
⁵⁴ Fe	1.94×10 ⁻⁶	6.85×10 ⁻⁵
⁵⁶ Fe	3.11×10 ⁻⁵	1.07×10 ⁻³
⁵⁷ Fe	7.61×10 ⁻⁷	2.57×10 ⁻⁵
⁵⁸ Ni	1.25×10 ⁻⁶	2.14×10 ⁻⁵
⁶⁰ Ni	4.84×10 ⁻⁷	8.57×10 ⁻⁶

表 5 含能粒子反应生成的 e⁺发射核^[15]

e ⁺ 发射核	半寿命	最大 e ⁺ 能量(MeV)	e ⁺ 生成反应	阈能(MeV)
μ ⁺	1.5×10 ⁻⁶ s	53	p+ ¹ H→π ⁺ ...	292.3
			p+ ⁴ He→π ⁺ ...	185
			π ⁺ →μ ⁺ +ν	-
¹⁰ C	19s	1.9	p+ ¹⁶ O→ ¹⁰ C+...	41.4
			p+ ¹⁴ N→ ¹⁰ C+...	17.1
			p+ ¹² C→ ¹⁰ C+...	34.4
¹¹ C	20.5min	0.92	p+ ¹⁶ O→ ¹¹ C+...	27.5
			p+ ¹⁴ N→ ¹¹ C+...	3.1
			p+ ¹² C→ ¹¹ C+...	17.9
¹² N	0.011s	16.4	p+ ¹² C→ ¹² N+n	19.6
¹³ N	10min	1.19	p+ ¹⁶ O→ ¹³ N+...	5.5
			p+ ¹⁴ N→ ¹³ N+...	9.0
¹⁴ O	71s	1.8(99.4%) 4.1(0.6%)	p+ ¹⁶ O→ ¹⁴ O+...	30.7
			p+ ¹⁴ N→ ¹⁴ O+n	6.3
¹⁵ O	2.06min	1.74	p+ ¹⁶ O→ ¹⁵ O+...	14.3
			α+ ¹² C→ ¹⁵ O+n	2.8
¹⁹ Ne	17.4s	2.2	α+ ¹⁶ O→ ¹⁹ Ne+n	3.75