

# 宇宙 $\gamma$ 射线暴

黄永锋 陆 燊

(南京大学天文系 南京 210093)

$\gamma$  射线暴(以下简称  $\gamma$  暴)是来自宇宙空间的一种短时标的高能  $\gamma$  射线爆发现象。它的发现颇有戏剧性:60 年代中期,为了监督关于禁止在大气层中进行核试验的条约的执行情况,美国发射了一些卫星,以监测核爆炸中的  $\gamma$  射线事件。1967 年开始, Vela 卫星真的不时记录到一些  $\gamma$  射线爆发现象,使美国政府十分紧张。军方花了几年的时间终于搞清楚它们均来自于宇宙空间,证实只是一场虚惊。由于军事保密的原因,该现象直到 1973 年才由美国洛斯阿拉莫斯实验室的 Klebesadel、Strong 和 Olson 在 ApJ(美国《天体物理杂志》)的一篇快报中以“对源自宇宙空间的  $\gamma$  射线爆发的观测”为题发表出来。 $\gamma$  暴现象很快得到了苏联卫星的证实,但在当时,除了知道它们既非来自地球,也非来自太阳之外,其他完全是一无所知。

在  $\gamma$  射线波段的这种神秘爆发是完全出乎人们意料之外的,理所当然地受到了广泛关注。理论天体物理学家对此尤为感兴趣。仅在两三年之内,被提出的  $\gamma$  暴理论模型就达上百个之多,涉及到的天体可谓五花八门,包括:超新星爆发、中子星、黑洞、耀星、反物质、相对论性尘埃、白洞甚至其他许多更古怪的天体。

当时出现这么多理论模型是完全可以理解的,原因在于取得的观测资料既粗糙又极其有限,以至许多完全依赖于观测的基本问题都没有弄清楚。一个最典型的问题就是  $\gamma$  暴离我们到底有多远?由于  $\gamma$  射线探测器的定位能力很差,地面上的天文学家根本就无法找到  $\gamma$  暴在光学、红外和射电等波段的对应天体,也就无法确定其距离。

人们对  $\gamma$  暴几乎一无所知的这种现状维持了整整 30 年。1997 年观测上终于取得了里程碑性的重大突破:借助于 X 射线望远镜,意大利和荷兰合作研制的 BeppoSAX 卫星成功地对少数几个  $\gamma$  暴事件进行了快速和高精度的定位,终于使人们找到了  $\gamma$  暴在 X 射线、光学和射电波段的对应体(即余

辉),并观测到了它们的寄主星系,初步揭开了  $\gamma$  暴的神秘面纱。这一进展被美国《Science》杂志评为当年度十大科技成就之一。今天我们已经确定,至少有相当一部分持续时间较长的  $\gamma$  暴是来自遥远的宇宙边缘的,涉及到极其巨大的能量,其激烈程度仅次于 100 多亿年前宇宙诞生时的那次大爆炸!距离问题虽是基本解决了,理论天体物理学家们却面临着更大的挑战。1999 年,科学家进一步发现  $\gamma$  暴可能与大质量恒星的塌陷和黑洞形成有关,使得有关  $\gamma$  暴的研究再次入选《Science》评出的年度十大进展。

本文试图采用通俗的语言,对  $\gamma$  暴的观测特征、距离问题、余辉以及一些理论问题作一简明而又尽可能全面的介绍。

## 一、观测特征

1991 年美国的康普顿  $\gamma$  射线天文台(CGRO 卫星)发射升空,上面携带有一个高灵敏度的  $\gamma$  射线探测器 BATSE,是专门用来研究  $\gamma$  暴的。CGRO 的设计寿命只有四五年,实际上一直以良好的状态运行到 2000 年 6 月才销毁。1997 年之前人们对  $\gamma$  暴的认识主要就来自 BATSE 的观测资料。在排除了太阳耀斑和地面干扰等众多因素后, BATSE 平均每天都可以记录到一两次  $\gamma$  暴,表明这种事件是很常见的。下面介绍  $\gamma$  暴的一些主要观测特征。

(1) 持续时间。一次典型的  $\gamma$  暴一般持续几秒到几十秒钟,最长的可达上千秒而最短的甚至只有几毫秒。大致说来,以 2 秒为界,  $\gamma$  暴可分为长暴和短暴两种,长暴持续时间大多集中在 20 秒附近,短暴多集中在 0.2 秒附近,长暴的数目大约是短暴的 3 倍。

(2) 光变曲线。天体的辐射强度随时间的变化情况称为光变曲线。 $\gamma$  暴的光变曲线有的很光滑,有的很复杂,起伏很快且变化幅度很大。特别值得注意的是很多  $\gamma$  暴的光变时标很短,有些  $\gamma$  暴的光子流量甚至在 0.2 毫秒的时间内由背景直接上升到

现代物理知识

了极大值。根据光变时标,天文学家可以用一个很巧妙的方法对天体辐射区的大小给出一个限制:设一个静止或低速(指运动速度远小于光速)运动着的天体的光变时标为  $\Delta t$ ,那么该天体的尺度一定小于光在  $\Delta t$  时间内走过的距离,这是狭义相对论的要求。由此可以知道,如果  $\gamma$  暴辐射区相对于我们的整体运动速度远小于光速的话,其尺度一般应当小于几百千米,有的甚至不超过 60 千米!

(3) 能谱特征。 $\gamma$  暴光子的典型能量在 100keV 到几个 MeV 之间,100MeV 的高能端未见明显切断,有的光子能量甚至高达 20GeV。有些  $\gamma$  暴也观测到伴随有 X 射线爆发,但在 X 波段辐射的能量占总能量的比率还不到 2%。在典型能段, $\gamma$  暴的能谱表现出明显的非热辐射特征,一般可用幂律谱或分段幂律谱拟合。80 年代末,曾有报道称日本的 Ginga 卫星观测到一些  $\gamma$  暴能谱在几十 keV 附近有吸收线,刚好可解释成电子在中子星的强磁场中运动形成的回旋吸收线,这被看做是  $\gamma$  暴起源于银河系内中子星的有力证据,在当时曾异常轰动。另外曾有报道称还发现了 400keV 附近的发射线,也正好可解释成正负电子对在中子星表面湮灭再经引力红移形成。然而后来更灵敏的众多卫星均未证实这些吸收线和发射线的存在,现在人们对这些谱线的真实性普遍持怀疑态度。

(4) 空间分布。 $\gamma$  暴在空间中的分布是高度各向同性的。换句话说,不论你朝哪个方向看过去,单位面积的天空中曾经发生过的  $\gamma$  暴次数基本上都是一样的。这个结果早在 1991 年 CGRO 上天之前人们就已得到,CGRO 上天之后,BATSE 的结果进一步证实了其正确性。如果认为  $\gamma$  暴产生于银河系内的恒星的话,由于地球离银心有两万多光年远,那么  $\gamma$  暴一定是发生在离银心 30 万光年以外的银晕中,这样在地球上看过去它们才会显得如此高度各向同性。此时一次典型的  $\gamma$  暴辐射的能量大约是  $10^{36}$  焦耳,即大致相当于太阳在 1000 年内辐射的总能量。但这种银晕  $\gamma$  暴模型面临着一个明显的困难:位于南天的大麦哲仑云和小麦哲仑云是离银河系最近的两个星系,距离大约是 15 万光年,按理这两个星系应当像银河系一样,也有很多  $\gamma$  暴发生。因此我们应该在大、小麦哲仑云方向看到较多的  $\gamma$  暴才对,但事实并非如此。实际上,更自然的想法是认为  $\gamma$  暴产生于遥远的宇宙学距离上(即 100 亿光年之外)。宇宙中的物质是均匀分布的,这很自然

地解释了  $\gamma$  暴的各向同性。另外如果认为所有  $\gamma$  暴的峰值辐射功率彼此相差不大的话,那么我们可以根据观测到的  $\gamma$  暴峰值强度来判断它们的相对距离:越弱的  $\gamma$  暴离我们应当越远。接受这一合乎逻辑的假定后,BATSE 的资料还表明:距离越远,单位体积空间中产生的  $\gamma$  暴次数似乎越少。而这一点恰好可以解释成宇宙膨胀的影响。高度各向同性以及弱源数目偏少,这是 BATSE 取得的最重要的两个成果,它们使得  $\gamma$  暴的宇宙起源学说在 90 年代逐渐流行起来。

(5) 总能量。 $\gamma$  暴在  $\gamma$  射线波段辐射到地球的总能流一般介于  $10^{-9}$  焦耳/米<sup>2</sup> 到  $10^{-6}$  焦耳/米<sup>2</sup> 之间,典型值可取作  $10^{-8}$  焦耳/米<sup>2</sup>。如果产生于宇宙学距离上,那么一次典型的  $\gamma$  暴释放的  $\gamma$  光子总能量将高达  $10^{45}$  焦耳;如果  $\gamma$  暴起源于银晕中(约 30 万光年),辐射总能量是  $10^{36}$  焦耳;而如果产生于银盘内(约 1000 光年),能量则只有  $10^{31}$  焦耳;特别地,要是  $\gamma$  暴就发生在太阳系外围的奥特云中的话,能量将不到  $10^{20}$  焦耳。在这 4 种情况下产生  $\gamma$  暴的天体和机制必将是完全不同的,由此也可以看出距离对  $\gamma$  暴研究的重要性。然而不幸的是很长时间内人们对  $\gamma$  暴的距离一点概念也没有,甚至连它们到底是“远在天边”,还是“近在眼前”都完全不知道。

## 二、距离之争

长期以来围绕着  $\gamma$  暴距离的争论是异常激烈的。关键的困难在于  $\gamma$  射线探测器对  $\gamma$  暴源的定位精度很差,误差一般在 1 度甚至几度以上,而且像这种粗糙的定位也通常要在  $\gamma$  暴发生十几天甚至几十天之后才能得到。这样一来,地面上的天文学家根本就无法去找到  $\gamma$  暴在光学、红外和射电等波段的对应体,也就无法确定其距离。70 年代人们就已经注意到  $\gamma$  暴是各向同性地发生的,为此有人提出  $\gamma$  暴应当是产生于遥远的宇宙深处,但也有人认为  $\gamma$  暴来自银河系的银晕或银盘中,甚至还有人相信  $\gamma$  暴就发生在太阳系里。这些想法都能满足各向同性的要求,但除此之外大家都没有更充足的证据,谁也说服不了谁, $\gamma$  暴也因此而显得更加神秘起来。

80 年代末情况似乎出现了一点转机,日本的科学家利用他们的 Ginga 卫星观测到几个  $\gamma$  暴的 X 射线辐射,从中找到了一些吸收线的证据,并把它们解释成电子在强磁场中的回旋吸收。据此他们提出  $\gamma$  暴来自银盘内的中子星,是中子星表面的局部过

程,这一观点很快被绝大多数人所接受。在1990年的一次关于 $\gamma$ 暴的国际学术会议上,除了Paczynski一个人仍坚持宇宙学起源的观点外,几乎所有其他科学家都认为 $\gamma$ 暴是银河系起源的,并且相信即将发射的灵敏度更高的CGRO/BATSE会给出更进一步的证据:即随着总数目的增加, $\gamma$ 暴会表现出向银道面和银心集中的趋势。然而1991年CGRO/BATSE投入运行后,新结果完全出乎人们意料:虽然观测到的 $\gamma$ 暴数目迅速上升了一个数量级,但其各向同性的特征却更加明显了。另外BATSE还揭示出 $\gamma$ 暴弱源偏少的重要特点。相当一部分的科学家开始转而支持 $\gamma$ 暴的宇宙学起源,但同时有很多科学家提出银晕起源的可能性仍不能被排除。这样一来, $\gamma$ 暴的距离之争顿时又空前激烈起来。

20世纪天体物理领域中曾经有过两次影响深远的大辩论,都是关于距离的。第一次大辩论是20年代Shapley和Curtis关于“星云”本质的争论:Shapley认为当时人们所称的星云只是银河系内的气体和尘埃团,银河系就是整个宇宙;而Curtis认为星云是位于银河系之外的其他星系,银河系则只是宇宙中极为普通的一个星系。1925年,两人曾在华盛顿自然历史博物馆中进行了一场著名的公开辩论。由于观测手段的进步,几年之内人们就用大望远镜将某些星云分解为恒星集团,Curtis获胜。这次大辩论使得人们的视野由银河系内拓展到了银河系之外,天文学也因此向前迈进了一大步。第二次大辩论是60年代人们关于类星体红移是否是宇宙学红移的争论,最终宇宙学红移的观点占了上风,人们的视野也因此扩展到了宇宙的边缘。关于 $\gamma$ 暴距离问题的激烈争论现在通常被人们称为20世纪天体物理领域的第三次大辩论。人们期待着现在这场大辩论同样会给天体物理带来令人振奋的进步,但不知道这次辩论何时会有一个完美的答案。

### 三、余辉的发现

最终的突破性进展来自1997年初BeppoSAX卫星的杰出贡献。BeppoSAX是意大利和荷兰合作研制的,它独创性地集X射线和 $\gamma$ 射线探测器于一体,即上面除了有一个对全天空敏感的 $\gamma$ 射线探测器外,还有一个 $40^\circ \times 40^\circ$ 视场的X射线望远镜,随时都监视着一块面积占全天5%的天空。如果某个 $\gamma$ 暴刚好在这块天空内发生,那么 $\gamma$ 探测器和X射线望远镜就会同时但各自独立地记录到一次爆发事件,且X和 $\gamma$ 的光变曲线将高度相关,于是X射线

望远镜就可对该暴给出误差在3角分之内的精确位置来。这种守株待兔的方法取得了巨大成功。1997年2月28日的一次 $\gamma$ 暴(依爆发日期记为GRB970228)在发生之后不到4小时,BeppoSAX小组就在互联网上发布了一个误差约3角分的定位,8小时之后定位误差进一步降到50角秒。地面上和空间中的许多大型光学、射电和X射线望远镜都以空前的热情投入了对该事件的观测,最终在误差范围内发现了一个正在迅速变暗的光学弱源,并观测到了与之相伴的暗弱寄主星系(星等只有25),还测得其红移为0.695,证实了GRB970228的宇宙学起源。

到2000年11月底,像这样被观测到光学余辉的 $\gamma$ 暴已有将近40个,其中约有20个找到了寄主星系(一般都暗至24到25星等)并测出了红移(一般介于0.4到3.4之间),有几个 $\gamma$ 暴还观测到射电余辉,个别甚至观测到了与 $\gamma$ 暴相伴的光学闪。这些事实充分证实了 $\gamma$ 暴的宇宙学起源。不过需要指出的是BeppoSAX卫星对持续时间小于2秒的短 $\gamma$ 暴缺乏定位能力,因此到目前为止观测到余辉的都是些长 $\gamma$ 暴。至于短 $\gamma$ 暴情况如何,现在下结论尚为时过早。另外,受仪器的限制,目前还只能对极少数的长 $\gamma$ 暴定位,虽然被定位的事件绝大多数都有余辉,但据此就说所有的长 $\gamma$ 暴都是宇宙学起源的还难免武断了点。不过我们至少可以这样说:相当一部分的长 $\gamma$ 暴是宇宙学起源的。即使这样一个保守的结论,亦足以将天体物理学带进一个引人入胜的新天地。

余辉的发现使得 $\gamma$ 暴的研究在观测时间上从秒扩展到了月甚至年量级,在定位精度上从度改进到角秒甚至毫角秒,波段范围则从 $\gamma$ 射线扩大到了光学甚至射电。特别重要的是余辉所提供的距离信息,使人们真正认识到了 $\gamma$ 暴所涉及的惊人能量及爆发的猛烈程度。例如GRB971214的红移是3.4,该暴在其所持续的50秒内释放的 $\gamma$ 射线能量竟相当于2万亿个太阳1年的辐射总能量。而它在头2秒钟内的功率甚至等于宇宙中所有恒星辐射功率之和,即和整个宇宙的其余部分一样亮! GRB990123释放的 $\gamma$ 射线能量居然还要高上10倍,达到 $3 \times 10^{47}$ 焦耳,相当于将两个太阳的静止质量按爱因斯坦的著名方程完全转化为能量辐射出去!前面已经讲到, $\gamma$ 暴光变曲线的快速变化表明暴源的原始尺度很小,应在100千米之内。在这样小的尺度内如

何产生如此巨大的能量,这对理论家无疑是一个巨大的挑战!

#### 四、火球模型

产生一次典型的  $\gamma$  暴,需要在短时间里在不到 100 千米的范围内释放出至少  $10^{45}$  焦耳的辐射能量,这必然会形成一个光学深度高达  $10^{14}$  以上的极高温火球。从火球表面直接辐射出的光子还不能解释我们观测到的  $\gamma$  暴,一是因为功率不够,另一原因是其能谱一定是热辐射谱,与  $\gamma$  暴的幂律谱不符合。但我们知道,这个小小的原始火球内部的辐射压非常大,会使火球极快地加速膨胀。如果火球不存在重子的“污染”,也就是说其成分以正负电子和光子为主而质子和中子总质量小于  $10^{-5}$  太阳质量,那么当膨胀到半径为  $10^5$ — $10^8$  千米时,火球物质的速度将非常接近光速,比如说达到  $0.9999c$ ,形成一个极端相对论性的薄壳层。当进一步膨胀到  $10^{11}$  千米时,壳层会受到星际介质的急剧减速,形成极端相对论性的强激波,称为外激波。外激波的辐射就可以产生  $\gamma$  暴。

不过这种外激波机制给出的  $\gamma$  暴光变曲线一般比较平滑,难以形成快速的起伏。但我们可以设想, $\gamma$  暴源完全有可能在几十秒钟内像喷泉一样间歇性地释放出它的能量,这样就可在  $10^5$  千米处形成若干个彼此速度略有差异的薄壳层,这些壳层在  $10^8$  千米处相互碰撞,就会形成一系列极端相对论性的强激波,从而产生光变曲线很复杂的  $\gamma$  暴。这种激波因为是由火球内部的物质相互作用形成的,称为内激波。现在比较流行的观点是认为内激波先产生  $\gamma$  暴,然后外激波再在较长的时间中持续发生作用,形成余辉,这就是标准的火球模型。

火球模型的概念早在 1986 年就被提出。Meszaros 和 Rees 是火球模型的主要奠基人,有趣的是就在 BeppoSAX 发现余辉之前的 20 天,他们正好发表了一篇论文预言了余辉的存在。观测到的 X 射线和光学余辉一般随时间呈幂律衰减,与火球模型的预言基本一致,余辉的能谱特征也得到了很好的解释。对几个  $\gamma$  暴余辉的射电观测甚至还发现了极端相对论性运动的证据。

#### 五、未解之谜

火球模型对余辉的解释是令人满意的。余辉的物理已可说是相当清楚了,但我们对  $\gamma$  暴的能源机制仍是知之甚少。原始火球经过辐射压的加速后,对其前身天体完全失去了“记忆”,我们很难从余辉

中找到有关  $\gamma$  暴源本身的能源机制的直接线索。根据火球模型,我们只知道  $\gamma$  暴的前身星必须满足如下条件:①能释放出  $10^{45}$  焦耳的辐射能量,有时这一能量甚至高达  $10^{47}$  焦耳;②能量是在不足 100 千米的范围尺度内释放出来的;③能量释放过程要能持续几秒到几十秒的时间,且具有间歇性;④不存在重子污染,即掺杂在辐射能中的重子质量小于  $10^{-5}$  太阳质量。⑤为使地球上的观测者差不多每天都可观测到一两次事件,还要求宇宙中每个星系平均在 100 万年到 1 亿年内发生一次  $\gamma$  暴。

上述条件非常苛刻,只有很少几种天体能满足。目前最有希望的模型主要有 3 种:①致密天体的碰撞,包括中子星与中子星或中子星与黑洞的碰撞,最终的产物是一个黑洞;②大质量恒星塌陷形成黑洞;③中子星向夸克星的相变。这些都是天文学家们十分感兴趣的课题,在解释  $\gamma$  暴时各有各的优缺点。

到目前为止,很多讨论都隐含了一个假定,即认为  $\gamma$  暴发生时,它在各个方向发出的辐射强度都是一样的,就像炸弹爆炸一样。但真实  $\gamma$  暴的辐射完全有可能像手电筒光一样只在对着我们的方向上有辐射而在其他方向上没有,这样一来我们就会大大高估了它的能量,天文学上称之为喷流效应。显然,存在喷流效应时,对  $\gamma$  暴前身星的要求将会有很大不同。

能源机制是  $\gamma$  暴的最终之谜,余辉的观测和理论研究虽不能直接给出谜底,但至少可为我们提供宝贵的线索。例如喷流效应对  $\gamma$  暴的余辉会有显著影响,它使得光学余辉会在一个特定时刻突然衰减加快,有好几个  $\gamma$  暴的余辉似乎就表现出这种喷流特征。又如 GRB980425 的光学对应体可能就是一次特殊的超新星爆发(不过 GRB980425 是个很特别的长  $\gamma$  暴,其红移非常小),其他还有几个  $\gamma$  暴的光学余辉中好像也有超新星爆发的成分。这些都暗示着  $\gamma$  暴可能与某种特殊超新星有关,强烈地支持了大质量恒星塌陷模型。此外对余辉的细致研究还有助于我们了解  $\gamma$  暴离寄主星系中心的远近以及周围的介质是否致密、是否与恒星形成区成协、是否产生于大质量恒星的星风环境中等一系列问题,从而对能源机制给出很好的限制。目前,由于观测到余辉的  $\gamma$  暴数目很有限,而且余辉和寄主星系一般都很暗弱,本段中提到的喷流效应、与超新星的关系、 $\gamma$  暴产生的环境等一系列问题都还没有定论。但毫无疑问,这些都是我们在破解能源机制这一最

# 核能应用的物理学基础

仇 九 子

(中国人民武装警察部队学院基础部 廊坊 065000)

能源是维持人类生存和发展的重要物质条件。随着世界人口的不断增加、人类生产和生活条件的不断改善,人类对能源的需求量也在不断地上升。然而,目前世界上的常规能源,如水力、风力、煤炭、石油和天然气等资源都是有限的,煤炭、石油和天然气的世界储量最多还可开采 100 到 200 年,到 21 世纪中叶,世界将面临能源匮乏的严重局面。因此寻找和开发新能源一直是人类的一项重要任务。在 20 世纪 30 年代,随着人们对原子核研究的深入,人们认识到在原子核内蕴藏着巨大的可开发的能量,并开始了和平利用原子核能的研究。现在世界上已建成的裂变核电站有 300 多座,其发电量约占世界总发电量的  $\frac{1}{4}$ 。聚变核电站的研究正在进行之中,相信在不远的将来可控热核聚变电站就会成为现实。到那时,能源危机就会彻底得到解决,因为地球上有着丰富的、可开发利用的聚变能,它足以让人类永世享用。与火电相比,核能还是廉价、洁净和安全的能源。核能的发现和利用,为人类的持续生存和发展提供了保障,它是未来人类赖以生存和发展的

终之谜之前必须首先解答的问题。

$\gamma$  暴能量巨大,而且是宇宙中已知的最为极端相对论性的天体,也是自然界中惟一能再现宇宙极早期环境的事例。它与恒星的死亡、超新星爆发、黑洞、中子星、白矮星、恒星形成、引力波、引力透镜、宇宙学等天体物理中最基本的课题密切相关,是天文学上最神秘的问题之一。1997 年以来,关于  $\gamma$  暴的新发现层出不穷,使得这一领域的研究异常活跃。仅 1997 年和 1998 年在重要的国际学术刊物中发表的  $\gamma$  暴论文总数就接近 1000 篇,而近 3 年中在《Nature》和《Science》上发表的相关论文也超过了 20 篇。2000 年 6 月 CGRO 卫星的销毁对  $\gamma$  暴的研究是一大损失,但同年 10 月顺利发射升空的美国 HETE - II 卫星,有着比 CGRO/BATSE 和 BeppoSAX 更强的对  $\gamma$  暴的观测和定位能力,人们期待

着它能带来一系列的新发现。

## 一、核能应用的物理学基础

### 1 原子核的质量亏损和结合能

原子核是由质子和中子组成的。质子和中子都叫做核子。原子核的质量总是小于组成它的核子的质量和。把组成某一原子核的核子的质量和与该原子核质量的差值叫做原子核的质量亏损,用  $\Delta m$  表示。

由相对论的质能关系式  $E = mc^2$  可知,质量和能量是相互联系的。当一个系统的质量减小时,系统向外界释放能量;反之,系统吸收能量。

原子核的质量亏损说明,在核子组成原子核的过程中有能量放出。放出的能量  $\Delta E$  由质能关系式可得,为:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

把这种自由核子结合成原子核时放出的能量叫做原子核的结合能,用  $B$  表示。相反,若要让原子核分解为单个核子,原子核要从外界吸收相应的能量。如果一个原子核是由  $Z$  个质子和  $N$  个中子组成,其质量为  $m$ ,则这一原子核的结合能为:

着它能带来一系列的新发现。

近年来,国内在  $\gamma$  暴领域的研究也很活跃,主要有 5 个单位:高能物理所、北京天文台、紫金山天文台、香港大学物理系和南京大学天文系。南京大学和香港大学主要从事理论研究,提出了从极端相对论到非相对论的普遍性火球动力学演化模型和从中子星到奇异星的相变能源机制,在喷流效应等方面他们也作出了比较详细的研究。北京天文台参加了  $\gamma$  暴光学余辉的国际联测。高能物理所在高能观测数据的分析方面作出了很有意义的工作,并与紫金山天文台合作研制了空间探测器,正在进行  $\gamma$  暴宽波段的卫星观测。我们期待着更多的学者和青年人能以不同的方式加入我们的行列,共同为祖国的科技进步作出贡献。