

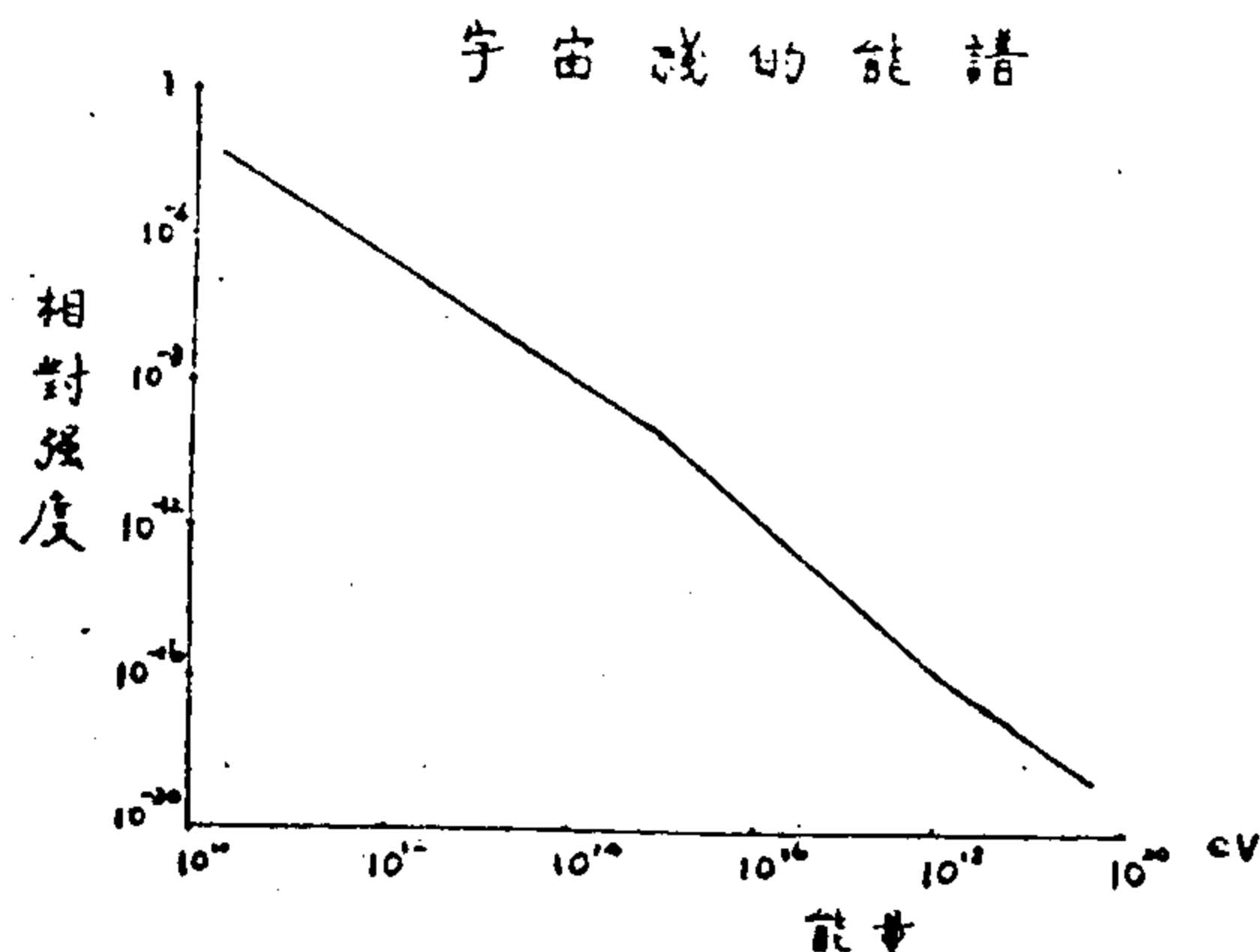
宇宙線的由來

• 廖國賢 •

宇宙線¹(泛指一些從外界某些地方進入我們大氣層的粒子)最顯著的現象是它所繫帶的驚人的能量,第一代宇宙線通常含有能量 $10^8 \sim 10^{20} \text{ev}$ 。而現在人造的最好的加速器只能將粒子加速到大約 $3 \times 10^{10} \text{ev}$ 。因此,任何一個要解釋宇宙線由來的理論,必須首先提供一種作用(Cosmic mechanism)能够使粒子(大部份是光子、電子、及較重的原子核)得到如此巨大的能量。今日一般人接受的觀點是:大部份的宇宙線是由於銀河系裏的超新星²而來,只有一些特高能量的宇宙線才源於外星雲。可是近來有些天文學家認為很可能極大部份的宇宙線是由非銀河系空間的強烈無線電源——無線電星雲(radio galaxies)和最近發現的似星體(quasi-stellar sources)所產生。

最起先,大家會認為宇宙線是由太陽而來。因為,太陽火焰(solar flares)能够將粒子加速到很大的速度。而且,每在太陽火焰興起時,在大氣層上的宇宙線亦隨之增加。可是,不久由於下列的原因,我們知道太陽並不是宇宙線的主要來源:

(1)宇宙線粒的能譜(energy spectrum)顯示當能量增高時,宇宙線粒的數目成均勻的下降。而能譜曲線的斜率有不連續的現象。(如下附圖)這告訴我們宇宙線粒是由於許多種不同的作用(mechanism)的結果。



(2)宇宙線不是由太陽的方向射入,而是四面八方一樣強弱的進入地球³。有人認為這是由於帶電粒子受到星際間磁場以及地球磁場的影響作螺旋前進,因此,宇宙線各方強弱一樣,而不朝同一方向。可是,事實上,我們知道,除了較低能的粒子外,大部份的宇宙線粒都含有足夠的能量,這些弱磁場是無法使其偏折的。由上,我們知道宇宙線不可能全來自太陽,而是外來的。

假使說宇宙線不可能由太陽產生,那麼,它當然也不可能由一些和太陽類似的星球所產生。(我們決不說某些有特殊性質的星球,沒有產生宇宙線的可能)既然如此,那麼宇宙間能够找到某些地方,有適當的條件,以加速粒子到如許高的能量嗎?

30多年前,當超新星(supernovae)被發現時,貝蒂(Walter Baade)曾經提出:超新星毀滅性的大爆炸時,星體的大部份質量爆裂,被激射而出,這很可能是宇宙線的來由,而另外有些科學家指出;在我們銀河系裡,有其他種類的星如——焰星(flare stars)(它的電磁爆發electromagnetic eruptions比太陽的火焰更強);新星(novae)(它是一種較小的星體爆炸)——也都能够產生高能粒子。另一方面,費爾米(Enrico Fermi)却認為宇宙線的高能量不是由於單一的爆炸所產生,而是由於被星際間的物質所產生的磁場不斷的加速所致⁴。

然而,這些假設都缺乏明顯的證據來支持他們。到了1950年新發展的無線電天文學(radio astronomy)告訴我們:在銀河系裡和銀河系外的大部份非熱輻射源(nonthermal radiation source)都利用同步作用(synchrotron mechanism)以放出能量。(有相對效應的電子relativistic electrons在磁力作用下做螺旋狀前進,發出輻射波。其波長在無線電波長範圍內)。從這事實,顯然的,假使電子能够被這些無線電源加速到趨於光速,那麼質子與一些較重的原子核也應該可以被同

樣的作用，變成高能的質子或原子核才對。同時，我們更發現這些高能電子的能譜和宇宙線的能譜很類似。因此，我們很自然就懷疑這些無線電源是否是宇宙線的主要供應者？

在我們的銀河系裡，非熱輻射源大部份都是超新星的殘餘物。例如蟹狀雲氣 (Crab Nebula) 就是西元1054年爆炸的中國超新星 (Chinese Supernovae) 的殘餘。這些殘餘物的存在說明超新星會激射出許多極高能量的粒子到星際裏。要估計它們對於宇宙線的產生的影響，我們必須首先要知道超新星到底產生了多大的粒子通量，以及隔若干時間有超新星爆發。

如今，我們利用觀測，可以估計超新星殘餘物中，存於電子的總能量：例如，我們對於蟹狀雲氣的估計。不過現在距它爆炸的時間已過了900年；而且我們只能觀測到電子在做同步輻射，而無法測得其他較重原子核的活動情形。此外，對於超新星的出現率，我們也只能靠觀測外星雲以估計之。由於超新星的出現率幾乎個個星雲個個不同質量的星雲都不相同。因此，我們利用外星雲的觀測結果所做的估計必定有很大的差距。大約是每100~500年出現一次。

讓我們從另一個角度來看：到底這些粒子要以怎樣的速率 (rate) 射入星雲，才能够維持宇宙線的能量密度在 $1\text{ev}/\text{cm}^3$ 左右呢？(指大氣層上端的密度) 這當然得取決於粒子們消失的快慢——由於和星際物質、塵埃碰撞，或逃離銀河系。在每次碰撞中 (可能是和穩定的原子核或高能質子以及其他宇宙線的碰撞) 都會有一大羣的第二代粒子如介子 (mesons) 核子及反核子對 (nucleon-antinucleon) 產生。而這些都會蛻變得到最終穩定的產物——電子、正子、 γ 射線、微中子和反微中子。微中子和反微中子，只與其他物質起弱作用 (weak-interaction 比電磁作用弱 10^{10} 倍) 不易再被吸收，往往逃離星雲。 γ 射線較易被吸收，但也有少部份逃脫。只有電子、正子留下來。而留下來的電子以同步作用 (在星際間的磁場中輻射) 或其他各種碰撞消失能量。因此，計算整個能量的消失必須首先要清楚宇宙線粒的生活過程，以及在它各生活階段中，星際物質的密度，銀河系裡及其週圍的磁場強度等。

現在，我們來看看外星雲的可能性。顯然的，

無線電源也可能是宇宙線的根源。我們發現外星雲的無線電源，以含有趨於光速粒子，有著極大的能量。根據同步理論 (Synchrotron theory) 我們可算出最強的無線電源的電子總能量可達 10^{50} 爾格以上。大於我們銀河系中所含宇宙線的總能量 10^{56} 爾格數千倍。雖然，沒有直接的事實知道它們有多少能量成光子和重核的形式存在。但是，大多數能產生趨於光速粒子的效應，它所放出的所有光子所含的能量都應大於電子所得能量。因此，我們估計其大約在 10^{60} 爾格以上。

假使這些粒子能够逃脫無線電源的區域而進入我們星雲的話。我們來看看這些粒子對宇宙線的生成有怎樣的貢獻。可是，我要強調，這兒所指的粒子只是光子和較重的核子而不是電子流。因為，任何逃離的電子流，由於和星雲際物質相撞，會消失其大部份能量，轉換成 X 射線或 γ 射線。這就是反康普登輻射 (Inverse Compton radiation)。因此宇宙線中，那一小部份存於電子的能量，大概是由核子和我們星雲中的原子相撞，或由於超新星的殘餘而來。

如果我們知道無線電源的生命期，它們的出現率，以及它們所產生的能量，則我們就能算出它們對於星際宇宙線的貢獻。讓我們沿著這路徑來看一看室女座星雲羣 (Virgo Cluster 我們的銀河系就在其外圍) 的無線電源。我們發現目前約有 6 個無線電源含有總能量在 10^{60} 爾格的粒子。假設在有宇宙以來 (約 2×10^{10} 年)，室女座星雲羣的無線電源每隔同樣的時間出現，而且每一個無線電源的生命期為 100 萬年。那麼，所產生的粒子總能量當為 2×10^{64} 爾格。如果，大部份逃離無線電源，而平均分佈於整個星雲羣中。那麼，空間所含的能量密度約為 $1\text{ev}/\text{cm}^3$ 和我們大氣層上的宇宙線能量相當。

我們說這些能量要平均分佈於整個星雲羣，那需要多少時間呢？如果，這些宇宙線粒以趨於光速直線進行的話，那只要 500 萬年的時間就够了。(因為室女座星雲羣的直徑約為 500 萬光年)。但是，我們知道，星雲際空間絕不是真空的，它必定含有很稀的物質以及磁場。而宇宙線粒受它們的影響必只能以滲透及非直線的方式前進，因此所需的時間當不止此數。如果這星雲羣在 100 億年前形成，則很有可能，這些宇宙線粒仍未能平均分佈於整個

星雲羣中。可是另一方面，由於這些宇宙線粒不斷的進入，在星雲際間產生的壓力越來越大，使得滲透加速。如此，在100多億年內也許能逃離星雲羣而充塞於空間。也只有在此情況下，我們才能假設真的有星雲際宇宙線。

1963年所發現的似星體無線電源 (quasi-stellar radio sources)，對於宇宙線的貢獻將視他們的個數和無線電星雲的比較。根據統計學估計，似星體大約為其30%，因此它們所發出的能量，對我們剛才的估計影響不大。可是，很可能將來有更多的似星體被發現，則他們的影響就會增加。

「強烈無線電源，對於宇宙線的形成有極大的貢獻」。這觀點如今仍未被普遍接受。雖然大家都承認宇宙線中特高能量的部份，很可能是源於外星雲。可是，大多數的天文學家仍堅持絕大部份的宇宙線是源於超新星。

如果，宇宙線是由於外星雲產生，則宇宙線粒應該分佈於整個宇宙。有人反對說：宇宙線的能量，既然分佈於整個宇宙，怎麼無法被察覺出來呢？這可解釋如下：因為宇宙間物質的密度約為 10^{-29} gm/cm³ (即 10^{-5} atom/cm³) 如果以 $E = mc^2$ 的公式換算，則宇宙間能量密度約為 10^{-6} 爾格/cm³ $\approx 10^4$ ev/cm³。這麼大的能量密度，使得宇宙線的能量密度 10^4 ev/cm³被忽視，而不易察覺。

另一個引起爭論的是這些能量如何產生的。假如說，這些能量是來自氫熔合成氦的話，那麼，宇宙中的氫應該大部份已變成氦才對。而實際上，氫和氦的存量比值仍很大(6.6:1)，產生矛盾的現象。因此，有些人開始考慮能量非由核融合而來。而可能是由於星質量的一部份經由重力崩潰作用 (gravitational collapse)，而轉換成相對效應粒子 (relativistic particle) 的能量。我們可以想像是由於一個超質量的星球受重力影響而崩潰，發出極大的能量。雖然，這假設如今還有困難，可是

，這樣的能量轉變應該是可能的。

總之；由於強烈無線電源的發現，以及它們含有很多極高能量的粒子，說明了它們和宇宙線的生成似乎有某種關係，雖然，我們還無法肯定這外星雲中的能源對於宇宙線的貢獻有多少。如果，我們接受這個觀點，那麼，某一些宇宙線將是我們所能得到，唯一的外星雲中的物質，值得吾人重視。

註：

1. 宇宙線的成份

元 素	原 子 序	百分比(%)
氫	1	93.0
氦	2	6.3
鋰、鈹、硼	3—5	0.14
中等重量元素	6—19	0.53
重元素	≥20	4×10^{-2}

上表元素皆以核子方式存在，而電子數目約佔核子數目1/100，此外尚有r射線、正子及介子(mesons)。

2. 超新星 (supernovae) 是一種星球，它的死亡方式轟轟烈烈。一旦爆發，在幾秒鐘之內放出來的能量超過太陽一輩子放出之能：被炸毀的外殼以幾千公里的秒速四散飛射，發出光為太陽的萬萬倍。
3. 雖然，在觀測時有所謂東西效應 (East-west effect)；即從西方來的宇宙線比從東方來的宇宙線要多些。但這只是因為宇宙線多是帶正電的，受到地球磁場的影響，從東方來的不容易達到地球表面而已。
4. 這就是所謂費爾米作用 (Fermi mechanism)：在星雲裏，星與星際的太空有物質存在；大部份是氫原子，但是也有一部份是帶電的質子和電子，形成電漿 (Plasma)。這些電漿四處移動，產生強弱不同的磁場跟著電漿移動。宇宙線在太空間遊蕩，受到這些移動磁場的撞擊，能量遂逐漸增加。

博 士 班 簡 介

本校物理研究所博士班，開國內授予物理博士學位的先河。民國五十六年開始招生，現有二名高級研究生。為了保證國產博士水準決不遜於外國一流大學，除了一再增強師資與設備外，並規定攻讀年限為五年至七年，且在最後一年可隨師至國外進修。在學期間，比照講師待遇，以期在安定的生活下，發揮最大潛力。今年所開的課有「量子場論」、「弱交互作用」以及其他選修課程。