

# 发现4100多年前的超新星遗迹——尧帝景星 (PKS 1209-52)

武家璧<sup>†</sup>

(北京师范大学历史学院 北京 100875)

**摘要** 《竹书纪年》记载尧“元年丙子帝即位”，“四十二年景星见于翼”。《论衡》记载“尧时景星见于轸”。这可能是出现在翼宿和轸宿之间的超新星。由已知的干支纪年推算尧帝四十二年是公元前2164年。把足够宽的范围( $180^\circ \pm 23^\circ$ )作“翼、轸”之间的过渡区域，在格林(Green)超新星遗迹表中搜索到20颗超新星，只有高银纬遗迹PKS 1209-52 (G296.5+10.0)符合尧帝景星“状如半月”的亮度和年龄限制，它是尧帝景星(SN-B.C.2164)的唯一候选体。依据超新星的表面亮度 $\Sigma$ 与线直径 $D$ 之间的 $\Sigma \propto D^{-\beta}$ 演化关系和绝热膨胀理论，算得其绝热相年龄( $t = 4165$  yr)与尧帝时代符合。又据景星亮如“半月”的限制，得到距离 $d = 1-1.2$  kpc；按谢多夫(Sedov)关系 $D = 0.94t^{2/5}$ 计算超新星遗迹的年龄，得到尧帝景星的年龄为距今( $4450 \pm 900$ ) yr，也与尧帝时代符合。这是天文学史上记录的最早超新星之一，把中国文献记载并经科学证实的历史提前到4100多年前。

**关键词** 天文学史, 恒星: 超新星, 恒星: 距离, 恒星: 演化, 星际介质: 超新星遗迹

**中图分类号**: P144; **文献标识码**: A

## 1 引言

中国古代文献记载一类突然出现在天空的明亮新星叫做“景星”。《史记·天官书》记载“景星者德星也，其状无常，常出于有道之国。”《晋书·天文志》载“景星如半月，生于晦朔，助月为明。”《<天官书>正义》载曰“景星状如半月，生于晦朔，助月为明。见则人君有德，明圣之庆也。”意思是说新出的景星非常明亮，在没有月亮的夜晚，可以取代月亮照明；古人相信它的出现是上天对有德之君的奖赏，所以又叫“德星”。《宋史·天文志》的“景星”栏目记载了北宋景德三年(公元1006年)出现的“周伯星”，说它“状如半月，有芒角，煌煌然可以鉴物。”现代望远镜在周伯星的位置发现了著名的超新星遗迹SN1006 (PKS 1459-41)，由此可知“景星”可能就是历史上记录的超新星。

中国古代最著名的有道明君是四千多年前的尧帝，他以禅让帝位而名垂青史。传说他的高尚道德感动了上苍，在他统治时期天空两次呈现“景星出翼”的壮观景象，诸多文献都有记载。这一著名天象是否在尧帝时代真正发生过？关键在于能否找到对应的超新星遗迹(SNR)。本文依据尧帝景星出现的位置，利用现代天文望远镜观测到的SNR数据，找到了对应于景星位置和亮度的超新星遗迹唯一候选体，依据天体物理学有关超新星遗迹演化的理论计算其年龄，论证“尧帝景星”是4100多年前出现在半人马座的一次超新星事件(PKS 1209-52)，以科学依据证明尧帝存在的真实性和中国古书记载的可靠性，从而把中国文献记载的信史提前到4100多年以前。

2021-11-22收到原稿, 2022-05-17收到修改稿

<sup>†</sup>wujiabi@sina.com

## 2 尧帝景星的记载及相关发现与研究

关于“尧帝景星”的记载, 汉代以前文献有两个独立来源, 一个是战国时期(B.C.475-221)魏国的史书《竹书纪年》, 由晋朝盗墓贼盗掘汲冢(魏襄王墓)时出土, 朝廷派官员进行了收集和整理, 此书宋代以后散佚, 明代出现传世本俗称《今本竹书纪年》, 还有学者从古书引文中辑出的本子称为《古本竹书纪年》. 另一个来源是流行于两汉之际(公元前后的)纬书《尚书·中候》, 此书虽已失传, 但自东汉以后有多种文献引述了该书对“尧帝景星”的记录. 有关记载略引如下:

(1) 战国魏《竹书纪年》: “(帝尧)四十二年, 景星出于翼”. (如图1)

(2) 西汉末《尚书·中候》: “帝尧即政七十载, 景星出翼”. (见《开元占经》卷七七, 《太平御览》卷八十、卷八七二, 《纬书集成·尚书中候编》)

(3) 东汉《尚书·中候》: “尧时景星见于轸”. (王充《论衡·是应》引)

(4) 南朝梁《宋书·符瑞志》: “尧在帝位七十年, 景星出翼”.

(5) 北宋《尚书·中候》: “尧即政七十载……景星出翼轸”. (罗泌《路史》卷二十《后纪十一》(罗莘)注引)

(6) 清《尚书·中候》: “尧即政七十载……景星出翼轸”. (马骥《绎史》卷九引)

传世本《竹书纪年》旧题梁沈约注, 但沈约所著《宋书·符瑞志》记载“景星出翼”在尧帝七十年, 与《竹书纪年》记载的四十二年不一致, 他可能依据的是《尚书·中候》或其他古书. 两次记录的景星在同一地点, 有可能是一颗异常超新星的两次爆发, 中间间隔28 yr.

关于尧帝的年代, 我们采用“夏商周断代工程”专家组(2000)公布的《夏商周年表》推定夏朝约开始于公元前2070年左右, 又据《史记·五帝本纪》记载尧帝在位100 yr, 舜帝在位39 yr, 然后夏禹王即位为夏朝, 那么尧帝在位的年代应当在公元前2210年左右. 《隋书·律历志》“案《竹书纪年》‘尧元年丙子’”. 相传上古有传授

《帝系》谱牒的传统, 尧帝元年的干支纪年很可能是《竹书纪年》的作者依据古谱系列推算出来的结果. 如果这个干支纪年是可靠的, 由已知的干支纪年(汉武帝太初元年丁丑、公元前104年)向上推算, 那么尧帝元年应是公元前2205年, 尧帝四十二年是公元前2164年, 尧帝七十年是公元前2136年. 对于计算超新星遗迹的年龄而言, 只需要限定在公元前2200年至前2100年(年龄  $t = 4200 - 4100$  yr)的一个世纪以内就足够了. 为了便于表述, 本文统一规定自标准历元J2000.0起算为“距今”年龄( $T$ ).

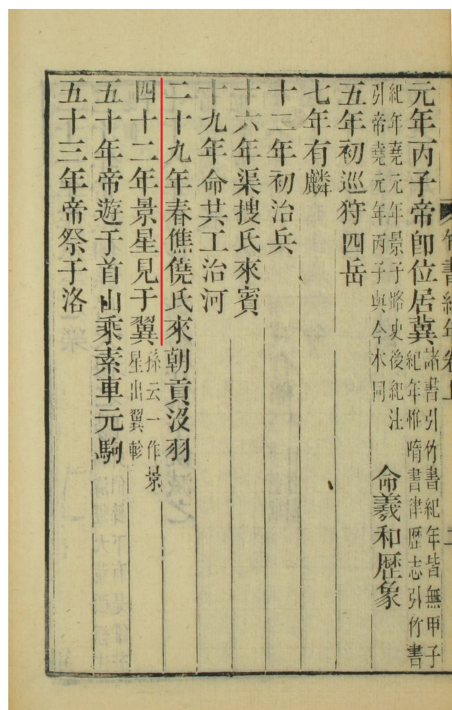


图1 传世本《竹书纪年》书影. 战国《竹书纪年》记载尧帝“元年丙子帝即位”, “四十二年景星见于翼”. 由已知的干支纪年(太初元年公元前104年丁丑)向上推算, 尧帝四十二年是公元前2164年, 这年新出现的“景星”可能是一次超新星爆发事件.

Fig. 1 A photograph of the Bamboe Annals of handed down version. The Bamboe book annals of the Warring States period records that “Emperor Yao ascended the throne in the first year of Bingzi” and “In the forty-second year, the Jingxing appeared on the Yi xiu (constellation)”. According to the known Gan Zhi chronology, the 42nd year of Emperor Yao is 2164 BC. The new “Jingxing” in this year may be a supernova explosion.

景星出现的位置, 文献有3说, 一在翼宿, 一在轸宿, 一在翼、轸. 实际上这3个说法并不矛盾, 翼、轸是二十八宿中相邻的两个星宿, 当景星出现在翼宿和轸宿的交界处时, 如果不去定量地描述它与距星(标准星)的距离(经度差), 粗略地说它在翼宿或者轸宿, 都是允许的. 这两种说法并存, 恰好限制了景星的位置只能在“翼、轸之际”(见图2).

二十八宿是中国古代测量天体经向位置的坐标框架, 其规则是按照标准星(距星)东升西落的先后顺序、从西往东度量经度, 以先中天的标准星为某宿初度(0°), 到下一个标准星(距星)之间的赤经

差为该宿距度, 天体位于这一距度范围内多少度就称为入某宿多少度. 例如翼、轸两宿升上天空时, 翼宿在西、轸宿在东, 因此“翼、轸之际”指翼宿之末、轸宿之初的那个窄小区域, 即翼宿已基本结束而靠近轸宿或者刚进入轸宿范围内的南北向窄条区间. 4000多年前的中国天文学是否已进入定量观测的时代, 现在还没有确切证据, 但定性地观察某星位于翼、轸之间, 应该是没有问题的. 为了找到尧帝景星对应的超新星遗迹, 我们把翼、轸两宿的对应星<sup>[1-2]</sup>及其在标准历元(J2000.0)的位置数据列如表1.

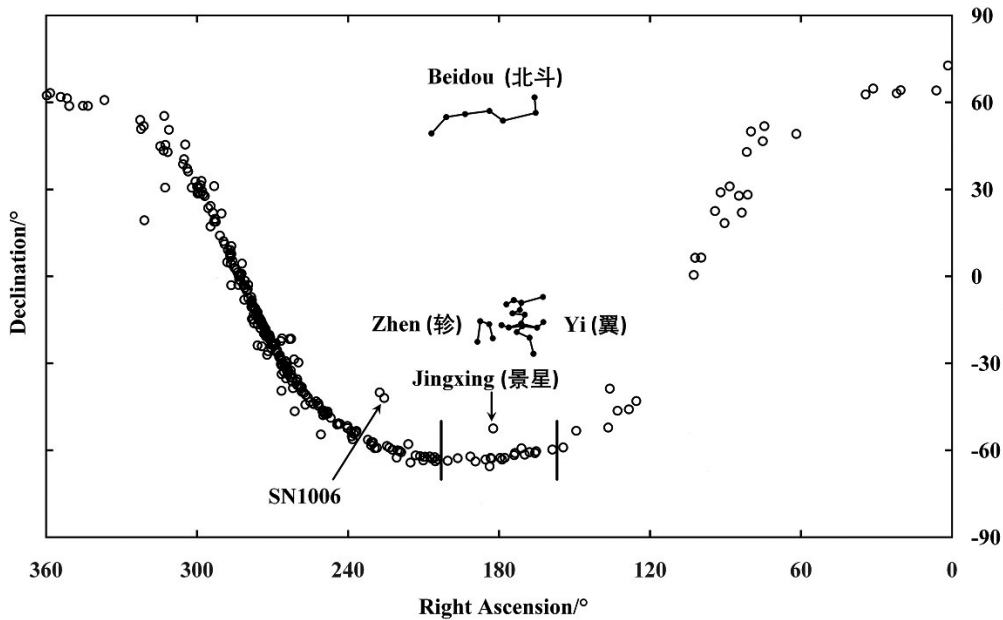


图2 银河系超新星遗迹分布图. 空心圆点表示超新星遗迹, 实心圆点加连线表示中国古代的星座(宿), 两竖线表示宽泛的翼、轸宿之间. 受景星“状如半月”的亮度限制, 只有唯一高银纬的超新星遗迹PKS 1209-52 (G296.5+10.0)是尧帝景星(SN-B.C.2164)的候选体.

Fig. 2 Distribution of supernova remnants in the Galaxy. Hollow dots represent supernova remnants, solid dots and connecting lines represent ancient Chinese constellations, and two vertical lines indicate the width between the Yi and Zhen. Limited by the brightness of the Jingxing “like a half moon”, only one high silver latitude supernova remnant PKS 1209-52 (G296.5+10.0) is a candidate of Emperor Yao’s Jingxing (SN-B.C.2164).

迄今最完备的银河系超新星遗迹统计由Green<sup>[3]</sup>自1984年公布以后不断更新, 目前最新版本是2019年修订本《294颗银河系SNR的修订目录》. 依据格林(Green)表制作超新星遗迹分布图(图2), 并把翼、轸等星宿标明在其中, 很容易找到位于翼、轸之际的超新星. 图2中的空心圆点表示

超新星遗迹, 实心圆点加连线表示中国古代的星座(宿), 绝大部分SNR沿银面(曲线)分布, 只有极少数遗迹远离银面±5°以上(高银纬). 现代星图上的翼、轸分界线恰好在180°经线附近, 我们选择足够宽(赤经差46°)的范围(180° ± 23°)作为“翼、轸之间”的过渡区域, 即图2所示的两条竖线之间, 在此范

围内搜索到20颗超新星遗迹, 19颗分布在银面附近(银纬 $b = +1.8^\circ - 2.9^\circ$ ), 只有唯一一颗G296.5+10.0 (PKS 1209-52)远离银面,  $b = +10.0^\circ$ , 赤道坐标( $182.4167^\circ$ ,  $-52.4167^\circ$ )与肉眼可见的 $\rho$  Cen ( $182.9^\circ$ ,  $-52.4^\circ$ )非常靠近<sup>[4]</sup>, 或称为半人马座超新星<sup>[5]</sup>. 19颗银面超新星中只有G296.1-0.5的视直径最大, 天区范围为 $37' \times 25'$ , 而高银纬G296.5+10.0的形状尺寸为 $90' \times 65'$  (一般作直径 $81'$ )<sup>[6-7]</sup>, 这需要通过超新星爆发时的视亮度以及由亮度所限制的距离, 并结合历史年龄来检验它们是否适合成为尧帝景星的候选体.

表 1 翼、轸两宿的位置数据(J2000.0)

Table 1 Position data of constellations Yi and Zhen (J2000.0)

Chinese Name	English Name	Right Ascension/ $^\circ$	Declination/ $^\circ$
翼宿一	$\alpha$ Crt	164.9407	-18.2978
翼宿二	$\gamma$ Crt	171.2201	-17.684
翼宿三	$\zeta$ Crt	176.1909	-18.3508
翼宿四	$\lambda$ Crt	170.8392	-18.7801
翼宿五	$\nu$ Hya	162.4067	-16.1930
翼宿六	$\eta$ Crt	179.0037	-17.1509
翼宿七	$\delta$ Crt	169.8348	-14.7777
翼宿八	$\iota$ Crt	174.6673	-13.2013
翼宿九	$\kappa$ Crt	171.7891	-12.3566
翼宿十	$\varepsilon$ Crt	171.1523	-10.8592
翼宿十二	GC15173 Crt	162.5752	-8.8978
翼宿十三	$\theta$ Crt	174.1701	-9.8022
翼宿十四	GC16178 Crt	177.0973	-10.3138
翼宿十五	HD100219 Crt	172.9473	-20.7762
翼宿十六	$\beta$ Crt	167.9145	-22.8262
翼宿十七	$\chi_1$ Hya	166.3316	-27.2936
轸宿一	$\gamma$ Crv	183.9510	-17.5419
轸宿二	$\varepsilon$ Crv	182.5309	-22.6198
轸宿三	$\delta$ Crv	187.4653	-16.516
轸宿四	$\beta$ Crv	188.5969	-23.397

取半月亮度为 $m = -9.5 \pm 0.5$ 星等<sup>[8]</sup>, 超新星极大亮度为 $M = -19 - 20$ 星等, 依 $(m - M) - A = -5 + 5 \lg d$  ( $m$ 为视星等, 此处表示半月亮度;  $M$ 为绝对星等, 此处表示超新星极大亮度;  $d$ 为距离, 此处表示超新星的距离)计算距离. 银河系星际消光( $A$ )比较复杂, 为简化起见, 粗略地取银面附近每kpc消光1星等, 高银纬每kpc消光0.5星等<sup>[9-10]</sup>, 估算半月亮度限制的超新星距离如表2.

表 2 半月亮度限制的超新星距离

Table 2 Supernova distance limited by half moon brightness

Supernova Position	$M$	$m$	$(m - M)$	Distance $d$ /kpc	Extinction $A$
	-19	-10	9	0.5	0.5
Near the Silver Surface	-19	-9	10	0.72	0.72
	-20	-10	10	0.72	0.72
	-20	-9	11	1	1
	-19	-10	9	0.56	0.28
High Galactic Latitude	-19	-9	10	0.82	0.41
	-20	-10	10	0.82	0.41
	-20	-9	11	1.2	0.6

19颗银面超新星遗迹的视直径( $\theta \leq 37'$ )为已知, 线直径 $D = 2 \tan(\theta/2)d$ 与绝热相年龄 $t$ 之间有谢多夫(Sedov)关系<sup>[6]</sup>:

$$D = 0.94t^{2/5}, \quad t = \left[ \frac{2 \tan(\frac{\theta}{2})d}{0.94} \right]^{5/2}. \quad (1)$$

算得半月亮度的银面超新星( $d = 0.5 - 1$  kpc)的 $t \approx 556 - 3146$  yr. 这与尧帝时代相差1000多年以上, 即使补足自由相年龄也达不到尧帝时代, 因此19颗银面超新星都不能成为尧帝景星的候选体.

高银纬超新星PKS 1209-52 (G296.5+10.0)的 $\theta = 81'$ , 半月亮度限制 $d = 0.56 - 1.2$  kpc, 算得年龄 $t \approx 738 - 4962$  yr, 包含尧帝时代在内, 因此只有它才是“尧帝景星”的唯一候选体.

银河系内近距离、肉眼可见的超新星数量十分有限, 银面附近尘埃很厚, 星际消光效应使得“状

如半月”的明亮超新星很难在银面附近产生. 例如著名的半月状超新星SN1006 (G327.6+14.6)就在银纬 $b = +14.6^\circ$ 处发现, 正是因为它远离银道面的缘故, 才使它成为历史上最明亮的超新星之一.

PKS 1209-52的位置( $\rho$  Cen附近)现在(J2000.0)只能上升到地面最高约 $9.5^\circ$ . 使用通用历史天象演示软件(SkyMap, Stellarium), 将地理位置设置为尧都平阳(约北纬 $36^\circ$ ), 年代设置为公元前4150年, 发现半人马座 $\rho$ 星( $\rho$  Cen)最高能上升到地面 $22.8^\circ$ , 经天8时35分; 而翼、轸之间的银面只能上升至 $12^\circ$ 左右, 经天约6时46分. 显然高银纬的PKS 1209-52更适合在夜空中扮演月亮(助月为明)的角色.

基于以上分析我们得出结论, 尧帝景星对应唯一一颗高银纬SNR—半人马座 $\rho$ 星附近的超新星, 即Green超新星遗迹表(1984)<sup>[11]</sup>的G296.5+10.0(银道坐标), 帕克斯(Parkes)射电源表(1964)<sup>[12]</sup>的PKS 1209-51/52(赤道坐标), 米尔恩(Milne)超新星遗迹表(1970)<sup>[13]</sup>的Milne 23. 我们以《竹书记年》记载的尧帝四十二年(B.C.2164)“景星见于翼”为参考依据, 或可称其为SN-B.C.2164.

大多数超新星遗迹都是非热射电源. 1961年Mills等<sup>[14]</sup>发表的第1份南天射电源表中在半人马座的1208-52 (J1950.0)位置上有一处很强的射电源, 并且注明可能是两个源. 1964年Bolton等<sup>[12]</sup>发表的射电源表中明确编号为PKS 1209-52和PKS 1209-51两个源, 并且说明它们可能是同一个复合体的组成部分. 现在已经搞清楚它是一个大直径两边对称结构的射电源. 1968年Whiteoak等<sup>[5]</sup>首次详细研究了半人马座SNR, 测得其视直径为 $1.5^\circ$ , 并通过分析射电强度和极化随频率的分布, 得到光谱指数为 $-0.5$ 的幂律谱, 证实为非热源的超新星遗迹. 后来权威的射电源表(克拉克(Clark)表<sup>[6]</sup>和Milne表<sup>[7]</sup>)以及Kellett等<sup>[15]</sup>、Roger等<sup>[16]</sup>的工作均确认PKS 1209-51/52的角直径为 $81'$ , Green表<sup>[11]</sup>中为 $80'$ . 这为计算该遗迹的距离提供了基本参数.

1979年Tuohy等<sup>[17]</sup>使用高能天文台设备(High-Energy Astronomy Observatory A2)首次检测到PKS 1209-52的X-射线. 1984年Helfand等<sup>[18]</sup>利用爱

因斯坦空间天文望远镜(Einstein Telescope)在PKS 1209-52的 $81'$ 直径中心偏离 $6'$ 处发现X-射线点源(1E 1207.42-5209). Kellett<sup>[19]</sup>依据欧洲X-射线观测卫星(European X-ray Observation Satellite)拍摄到此处遗迹及其点源的光谱, 拟合其平均功率谱(Power Spectral Density)符合热辐射Raymond-Smith模型<sup>[20]</sup>, 认为这是超新星爆炸后的中子星残留物. Mereghetti等<sup>[21]</sup>和Vasisht等<sup>[22]</sup>分别对伦琴号(Röntgen Satellite)和“飞鸟”号(Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics)天文卫星拍摄的1E 1207.42-5209的X-射线光谱进行分析, 指出它们符合黑体谱并且来自中子星的表面辐射.

Giacani等<sup>[23]</sup>在X-射线点源的相同位置发现有一个HI柱密度的空洞, 这个空洞的视向速度与PKS 1209-52遗迹相同, 因此认为这个X-射线源与SNR具有物理上的相关性. Zavlin等<sup>[24]</sup>利用钱德拉X-射线望远镜先进的CCD成像测得PKS 1209-52中心点源具有脉冲周期 $P = 0.424$  s, 从而证实1E 1207.4-5209是一颗中子星. 中心点源即中心致密天体(Compact Central Object, CCO), 这种天体十分罕见, 目前仅发现10例(Halpern等<sup>[25]</sup>). 这类天体的证认, 使得利用脉冲星的有关性质讨论遗迹的距离和年龄成为可能.

### 3 尧帝景星的距离与年代

超新星的距离与其表面亮度有关, 依据距离和遗迹的膨胀直径可以计算其膨胀年龄. 超新星遗迹本身有两个可观测量, 即单位频率间隔 $\nu$ 下的射电辐射流量密度 $S_\nu$ 和遗迹的 $\theta$ , 从而可以计算射电源的表面亮度 $\Sigma = S_\nu/\theta^2$ . 1960年Shklovskii<sup>[26]</sup>首先指出SNR的表面亮度 $\Sigma$ 和线直径 $D$ 间存在着 $\Sigma \propto D^{-\beta}$  ( $\beta$ 为演化指数)的演化关系, 并准确地预言了仙后座A (Cassiopeia A)射电源流量密度随时间递减的规律, 1976年他给出 $\beta \approx 4$ <sup>[27]</sup>. 上个世纪70年代有研究者对银河系SNR的射电表面亮度与其线直径之间的关系进行了统计分析, 得到射电亮度呈指数下降的关系:  $\Sigma = \alpha D^{-\beta}$  (其中 $\alpha$ 为射电表面亮度与线直径之间函数关系的系数), Milne<sup>[7]</sup>给出:  $\alpha = 3.4 \times 10^{-15}$ ,  $\beta = 3.8$ , 得到公式

$$\Sigma = 3.4 \times 10^{-15} D^{-3.8}.$$

Clark等<sup>[6]</sup>、Caswell等<sup>[28]</sup>给出408 MHz频率下  $\alpha = 10^{-15}$  和  $\beta = 3$ , 得到射电亮度

$$\Sigma_{408} = 10^{-15} D^{-3}.$$

即遗迹演化指数  $\beta = 3.8$  或者  $\beta = 3$ . 由于  $\beta$  的取值不同, 各家给出的经验公式各有差异. Caswell等<sup>[28]</sup>在1979年通过统计分析指出靠近银道面的SNR表面可能更亮(银面距离  $z$  效应), 建议由  $\Sigma - D$  关系所得  $D$  须经过银面距离  $|z|$  校正, 然后方可计

算SNR的距离:

$$d = \frac{D/2}{\tan(\theta/2)},$$

各家采用的计算公式不同, 这里仅给出Milne<sup>[7]</sup>的距离校正公式:

$$\frac{D}{D'} \equiv 1.5 \exp(-|z|/219),$$

$D'$  表示未经银面距离  $|z|$  校正的线直径. 下面将两位知名学者(Clark, Milne)利用  $\Sigma - D$  关系计算PKS 1209-52距离的结果, 列如表3.

表 3 PKS 1209-52距离的两组校正参数表  
Table 3 Two sets of calibration parameters of PKS 1209-52 distance

$\theta/'$	$S_v$		$\Sigma$	$\Sigma - D$ Relationship			$ z $ Correction			Author
	408 MHz	1 GHz		$D'$	$d'$	$z'$	$D_c$	$d_c$	$z_c$	
	/Jy		$AD^{-\beta} = S_v/\theta^2$	/pc	/kpc	/pc	/pc	/kpc	/pc	
81	85		$0.194 \times 10^{-20}$			314	42.3	1.8		Clark et al. <sup>[6]</sup>
81.0		55.0	$0.13 \times 10^{-20}$	47.9	2.0	353	26.1	1.1	192	Milne <sup>[7]</sup>

表中  $D'$ 、 $d'$ 、 $z'$  分别表示遗迹未校正前的直径、距离和银面高度,  $D_c$ 、 $d_c$ 、 $z_c$  分别表示经过银面距离校正后的直径、距离和银面高度. 为简化计算可采用近似方法, 按照Milne<sup>[7]</sup>给出的数据,

$$\frac{d_c}{d'} = \frac{D_c}{D'} = \frac{z_c}{z'} \approx \sin 33^\circ,$$

校正距离  $d_c \approx \sin 33^\circ \times d'$ .

利用  $\Sigma - D$  关系进行计算, 因各家对  $\beta$  参数的取值不同, 使得距离结果具有很大的不确定性. 其他各种测量和计算SNR距离的方法<sup>[11]</sup>也在遗迹PKS 1209-52和脉冲星1E 1207.42-5209的研究上得到应用. 利用X-射线光谱拟合热辐射的等离子体Raymond-Smith模型<sup>[20]</sup>, Tuohy等<sup>[17]</sup>得到PKS 1209-52遗迹在0.25–1.0 keV的发射通量  $\sim 1.4 \times 10^{-10} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 有效温度  $1.9 \times 10^6 \text{ K}$ , 氢(HI)柱密度  $3.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ; Kellett等<sup>[15]</sup>得到在0.14–1.2 keV的有效温度  $1.7 \times 10^6 \text{ K}$ , HI柱密度  $1.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 等, 由上述参数可得  $d \sim 1\text{--}2 \text{ kpc}$ <sup>[16, 24]</sup>.

利用中心源的X-射线光谱拟合热辐射的黑体模型, 得到黑体温度为3–4 MK, CCO的半径为1–2 km,  $d = 2 \text{ kpc}$ <sup>[21–22, 29]</sup>. 利用运动学方法测定SNR的距离, 由光学和射电光谱估计SNR周围星际物质的视向速度, 借助银河系旋转模型(例如施密特(Schmidt)模型<sup>[30]</sup>)将它转换为距离, 对于大多数银河系旋转模型, PKS 1209-52的距离范围为1–2 kpc<sup>[16]</sup>. Giacani等<sup>[23]</sup>利用澳大利亚综合孔径射电望远镜(Australia Telescope Compact Array, ATCA)观测PKS 1209-52方向的中性氢分布与特征, 得到激波的膨胀速度下限为  $\sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 动能下限为  $\sim 2 \times 10^{49} \text{ erg}$ , 从而估计距离  $d = 2.1_{-0.8}^{+1.8} \text{ kpc}$ . 下面将各种距离估算的结果列为表4.

表4中所列的距离范围  $d = 1\text{--}3.9 \text{ kpc}$ , 尤其是最小距离1 kpc, 为我们计算PKS 1209-52的年龄提供了一个适当的约束条件.

对尧帝景星进行年代计算, 需要观测距离与亮度峰值等相关数据作为计算条件, 下面首先来讨论这两个问题, 然后进行年代估算. 中国古代文

献中明确记载了两颗“状如半月”的景星, 即尧帝景星和北宋景德三年(AD1006)的周伯星, 前者的遗迹是PKS 1209-52 (G296.5+10.0), 后者就是著名的SN1006 (PKS 1459-41/G327.6+14.6). Roger等<sup>[16]</sup>在843 MHz下对这两个超新星遗迹进行了新的射电观测, 发现它们在发射强度和径向轮廓上都显示出高度的双边对称性, 两者都位于相对较高的银纬区域, 在已知的遗迹中, 它们可能是离银道面最远的遗迹之一. 因此SN1006的距离对于估计PKS 1209-52的距离具有参考意义.

表4 景星遗迹(PKS 1209-52)的距离  
Table 4 Distance of Jingxing remnants (PKS 1209-52)

Author and Publishing Year	Distance/kpc	Literature
Roger et al. 1988	1-2	[16]
Milne 1979	1.1	[7]
Celnik et al. 1979	1.3	[31]
Kellett et al. 1987	1.5	[15]
Clark et al. 1976	1.8	[6]
Caswell et al. 1979	1.9	[28]
Tuohy et al. 1979	2.0	[17]
Mereghetti et al. 1996	2.0	[21]
Vasisht et al. 1997	2.0	[22]
Zavlin et al. 1998	2.0	[29]
Giacani et al. 2000	2.1 <sup>+1.8</sup> <sub>-0.8</sub>	[23]
Mills 1983	3.9	[32]

1965年Gardner等<sup>[33]</sup>指出历史超新星SN1006的遗迹就是Bolton射电源表(1964)的PKS 1459-41(即G327.6+14.6), 具有超新星遗迹典型的壳层结构. 1976年van den Bergh<sup>[34]</sup>发现PKS 1459-41的光学对应体是暗弱的细丝状云, 位于最外层的射电等温线内, 外形尺寸为32' × 38'. 与此同时Winkler等<sup>[35]</sup>探测到了该遗迹的X-射线辐射. 1977年Stephenson等<sup>[36]</sup>评述了中国、日本、阿拉伯以及欧洲古代文献有关SN1006的记载, 确认PKS 1459-41就是历史超新星SN1006的遗迹. 1986年Hamilton等<sup>[37]</sup>确认SN1006的遗迹(PKS 1459-41)为I型超新

星遗迹. 现在将它划归为Ia型超新星.

Ia型超新星的前身是普通质量恒星, 当白矮星吸积物质超过Chandrasekhar极限 $1.4 M_{\odot}$ 时就发生热核爆炸而炸毁整个躯壳, 因此它爆发时的亮度极值非常稳定(-19等, 峰值亮度 $10^{43} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 弥散不超过0.5等<sup>[38]</sup>, 其所释放的能量按膨胀壳层的动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 计算(取 $m = 1 M_{\odot}$ ,  $v = 10^4 - 2 \times 10^4 \text{ km/s}$ )为 $10^{51} \text{ erg}$ <sup>[39]</sup>. Ia型超新星的前身星被彻底炸毁, 中央没留下任何致密天体, 而本文所讨论的PKS 1209-52遗迹中央有一个中子星, 可以排除是Ia型超新星的可能性, 而可能是大质量恒星的塌缩型超新星(Ib/c或II型).

理论上大质量恒星的铁核( $M_c = 1.4 M_{\odot}$ ,  $R_c = 5000 \text{ km}$ )塌缩为中子星( $R_n = 20 \text{ km}$ ), 释放的引力势能为<sup>[37, 40]</sup>

$$E_{\text{gc}} = GM_c^2 \left( \frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_c} \right) \approx \frac{GM_c^2}{R_n} \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg}.$$

假定塌缩时被抛射物质外壳的质量 $M_e = 10 M_{\odot}$ , 所需能量的上限为

$$E_e = \int_{M_c}^M \left( \frac{Gmdm}{r} \right) \ll \frac{GM_e^2}{R_c} = 5 \times 10^{52} \text{ erg}.$$

被抛射出去的外包层形成超新星遗迹, 其典型的膨胀速度 $v = 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 得到包层的动能为

$$E_{\text{ke}} = \frac{1}{2} M_e v^2 \approx 10^{52} \text{ erg}.$$

假设抛射出去的拱星物质的距离位于内边界1个量级的范围内, 则其引力束缚能为

$$E_{\text{ge}} = \int_{M_c}^M \left( \frac{Gmdm}{r} \right) \approx \frac{GM_e^2}{10R_c} \approx 5 \times 10^{51} \text{ erg}.$$

实际炸开外壳物质所需能量远小于上述值, 仅需 $10^{50} \text{ erg}$ 量级就够了<sup>[41]</sup>. 理论上释放的势能与壳层的质量和推开距离有关, 而推开壳层的动能与其运动速度或环境密度相关, 因此核塌缩型超新星的极大亮度有比较大的不确定性. 观测表明核塌缩超新星(Ib/c或II型)的亮度峰值分布自-15至-20等之间相差5等<sup>[42]</sup>. 这种亮度的不确定性对我们估算尧帝景星的爆发年代极为不利, 有必要进行合理的限制.

我们进行适当限制的依据主要是将尧帝景星与宋代周伯星(SN1006)相比拟, 因为两者都是高银纬地区半月亮度的超新星. 据《宋史·天文志》和《续资治通鉴》记载公元1006年(景德三年) 5月6日(戊寅)到11月26日(壬寅)周伯星保持“状如半月”的状态约205 d, 又据薄树人等人研究SN1006的可见期一直持续到1009年9月之前, 长达3 yr之久<sup>[43]</sup>. 对于极亮达-19星等的Ia型超新星而言, 看到亮如半月的超新星是正常的; 但对于峰值低于-18等的大多数Ib/c或IIL/P型超新星而言, 看到亮如半月的超新星几乎是不可能的. 就本例来看, 如果景星爆发时“状如半月”, 依据Sedov关系( $D = 0.94t^{2/5}$ ) 在4000年之后的今天我们应该观测到它的遗迹有大于100'的视直径; 然而在我们选定的“翼、轸间”足够宽的范围( $180^\circ \pm 23^\circ$ )内, 发现20颗超新星遗迹的最大视直径仅为81', 造成这一疑难的原因应该是尧帝超新星的峰值亮度必定高于-18等. 也就是说尧帝景星不大可能是普通的Ib/c或IIL/P型超新星, 而可能是II型中极亮达到-19至-20等并且较长时间保持峰值的奇异超新星.

这种奇异超新星与常规塌缩星的不同之处, 除了高亮度之外, 就是长时间持续保持峰值亮度不下降, 这与非塌缩星的北宋周伯星长期保持“状如半月”的状态十分相似. 著名的例子有OGLE-2014-SN-073<sup>[44]</sup>和iPTF14hls<sup>[45]</sup>. 后者由“中等帕洛玛暂现源星厂(Intermediate Palomar Transient Factory, iPTF)”于2014年9月发现, 被认为是非常IIP型超新星, 它连续保持高亮度600 d(最大亮度-19等), 先后5次周期性爆发. 考虑到典型IIP型超新星在100 d之内变暗, 故把高亮度或可见期超过100 d的II型超新星称为“非常IIP型”. 更为称奇的是, 研究者翻查纪录发现1954年在iPTF14hls星所在位置发生过一次爆发事件, 因此60 yr后的爆发被戏称为“僵尸超新星”的再次“复活”. 这说明尧帝景星有42 yr、70 yr两次记录可能是重复爆发. 超新星前后两次爆发的现象近些年来在河外星系的核塌缩超新星中已观测到多例<sup>[42]</sup>, 如SN 1993J (Iib)、SN 2006aj (Ic-bL)、SN 2007fz (IIL)、SN 2008D (Ib)、SN 2011dh (Iib)、SN 2011fu (Iib)、SN 2013df (Iib)、SN 2016gkg (Iib)、SN 2017iuk

(Ic-bL)等, 两次爆发平均间隔20 yr左右, 后一次爆发的亮度一般达到或超过前次. 文献记载SN1006也有两次爆发<sup>[46-47]</sup>, 如《宋史·真宗纪》载大中祥符九年四月庚辰(1016年5月16日)“周伯星见”, 《续资治通鉴·宋纪(三十二)》记载同一天“周伯星再见”, 与前次爆发(1006年)间隔10 yr. 尧帝景星两次爆发的间隔28 yr, 位于周伯星(间隔10 yr)和帕洛玛源星iPTF14hls (间隔60 yr)爆发间隔的中间, 是合理的.

至此, 我们可以总结出尧帝景星可能有3大特征: 首先是亮度峰值达到或超过-19等, 其次是持续保持“状如半月”约100 d以上, 最后是间隔28 yr前后两次爆发. 基于此我们将尧帝景星的最大亮度设为-19至-20等(表2).

已知超新星的年龄 $t$ , 根据Sedov关系可估计距 $D = 0.94t^{2/5}$ ; 超新星爆炸的极限星等 $M$ 为已知, 其视亮度 $m$ 如“半月”(弦月)相当于 $-9.5 \pm 5$ 星等, 可由距离模数 $(m - M) - A = -5 + 5 \lg d$ 经过星际消光( $A$ )改正得到距离. 还可由表面亮度和线直径之间的 $\Sigma - D$ 关系和X-射线发射模型估算距离. 下面将SN1006的距离计算值列如表5.

表 5 SN1006遗迹(PKS 1459-41)的距离  
Table 5 Distance of SN1006 remnants (PKS 1459-41)

Author and Publishing Year	Distance/kpc	Literature
Winkler 1977	0.9-1.3	[48]
马駟等1979	0.93	[9,10]
Stephenson et al. 1977	$1.0 \pm 0.3$	[36]
Schweizer et al. 1980	1.1 (+1.4, -0.6)	[49]
Minkowski 1966	1.3	[50]
蒋世仰等2007	1.56	[47]
Hamilton et al. 1986	1.7	[37]
Kirshner et al. 1987	$1.8 \pm 0.3$	[51]
Caswell et al. 1979	2.2	[28]

表4与表5中的距离数值 $d$ 在1-2.1 kpc范围内是重合的, 上文所考半月亮度限制的超新星距离0.56-1.2 kpc即与此大部分重叠. 3种不同来源的距离数



据(周伯星、尧帝景星、半月亮度超新星)大部分互相重叠, 这不大可能是偶然的巧合, 而应该是高银纬区域视亮度达到半月的超新星适宜出现的距离范围. 我们在计算年代时选取半月亮度限制的最大距离(1.2 kpc)为上限, 实测计算的最小距离(1 kpc)为下限, 框定尧帝景星的距离范围为 $d = 1-1.2$  kpc.

关于超新星遗迹的演化, 理论上一般采用Woltjer<sup>[52]</sup>的流体动力学模型把超新星遗迹的演化分为自由相、绝热相、辐射相、消失相4个阶段. 大多数超新星处在绝热相阶段, 自由相年龄 $t_0$ 较短, 距今年代主要集中在绝热相年龄 $t$ . 绝热相激波驱动的壳层膨胀与爆炸波的绝热膨胀过程相类似, 可用流体力学中的谢多夫-泰勒模型(Sedov-Taylor Model)<sup>[53-54]</sup>的自相似解来描述. Clark等<sup>[6]</sup>、Vasisht等<sup>[55]</sup>等给出标准绝热冲击波模型

$$D = 4.3 \times 10^{-11} \left( \frac{E_0}{n} \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{2}{5}},$$

其中 $E_0$ 是超新星的初始爆发能,  $n$ 是星际介质的初始数密度. Clark等<sup>[6]</sup>依据已知年龄的历史超新星的 $D-t$ 值, 推出平均值 $E_0/n = 5 \times 10^{51}$ , 从而得到Clark-Caswell经验公式

$$D = 0.94t^{\frac{2}{5}}.$$

利用这一公式, 可以进行两种方式的年代计算, 一种依赖于射电亮度而与距离无关, 另一种是依赖距离的计算. 第1种方法, 利用射电数据进行遗迹演化年龄的计算: 在Clark-Caswell公式中代入射电演化 $\Sigma-D$ 关系:  $\Sigma_{408} = 10^{-15} D^{-\beta}$ , 得到表面亮度随时间递减的 $\Sigma-t$ 关系:

$$\Sigma = 1.2 \times 10^{-15} t^{-\frac{2\beta}{5}}.$$

按Shklovskii<sup>[27]</sup>取值 $\beta = 4$ , 再据表3中的Clark等<sup>[6]</sup>取值 $\Sigma = 0.194 \times 10^{-20}$ , 算得

$$\begin{aligned} t &= \left( \frac{1.2 \times 10^{-15}}{\Sigma} \right)^{\frac{5}{2\beta}} = \left( \frac{1.2 \times 10^{-15}}{0.194 \times 10^{-20}} \right)^{\frac{5}{8}} \\ &= 4165 \text{ yr}. \end{aligned}$$

此与尧帝时代基本符合. 如图3所示遗迹演化年龄示意图( $\beta = 3.8$ 或 $\beta = 4$ ), 因 $\beta$ 取值不同, 演化年龄差异很大, 故此有必要参考依据距离计算的年龄.

统计数据表明 $\Sigma-D$ 呈近似线性关系<sup>[6, 28, 56]</sup>, 但在 $\Sigma_{408} = 3 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 线直径 $D = 32$  pc处,  $\Sigma-D$ 直线的斜率由-3变陡为-10, 这个转折点可以看成是对年轻超新星的限制, 年龄上限 $t_{\max} = 7000 \text{ yr}$ <sup>[6]</sup>. 人类文明产生以后, 肉眼可以看见的超新星均在此年代范围之内.

第2种方法, 利用距离计算遗迹的线直径进而推算膨胀年龄. 遗迹的线直径由 $D = 2 \tan(\theta/2)d$ 算得, 然而利用Sedov关系计算年龄时需要考虑无量纲常量 $E_0/n$ 的取值. 对于超新星遗迹PKS 1209-52, Roger等<sup>[16]</sup>取 $E_0 = 6 \times 10^{50} \text{ erg}$ ,  $n = 0.08 \text{ cm}^{-3}$ ,  $d = 1.5 \text{ kpc}$ , 由 $D = 1.02t^{2/5}$ 得到绝热膨胀年龄 $t = 7000 \text{ yr}$ . 这个结果与尧帝景星(SN-B.C.2164)的年龄在数量级上相符合, 但仍然要大近3000 yr, 我们认为是在计算Sedov年龄时所取参数不当造成的. 首先距离 $d$ 值偏大, 其次 $E_0$ 和 $n$ 值也偏离平均值较远. 关于后者,  $\Sigma-D$ 线性关系表明 $E_0/n$ 近似为常数, 这意味着密度大的物质需要更大的动能将其推开, 两者大致按比例同时变化, 因此Clark等<sup>[6]</sup>取 $E_0/n$ 的平均值是合理的, 而分别调整 $E_0$ 和 $n$ 值的做法不是很恰当.

超新星前身星的星周物质密度 $n$ 对计算自由相和绝热相的年龄密切相关, 然而对PKS 1209-52的初始数密度, 采用不同观测手段和方法得到的 $n$ 值不尽相同, 其中X-射线观测数据偏低, 而光学观测数据偏高(表6).

关于自由相年龄 $t_0$ , 汪珍如给出近似计算公式<sup>[60]</sup>

$$t_0 \approx 200 \left( \frac{M_e}{M_\odot} \right)^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{1}{3}}.$$

考虑到本例是大质量恒星( $M > 8 M_\odot$ )塌缩的遗迹, 为简化计算, 这里取抛出物总质量 $M_e = 8 M_\odot$ , 星际介质平均粒子数密度 $n = 1$ , 则自由年龄

$$t_0 \approx \frac{400}{n^{\frac{1}{3}}} = 400 \text{ yr}.$$

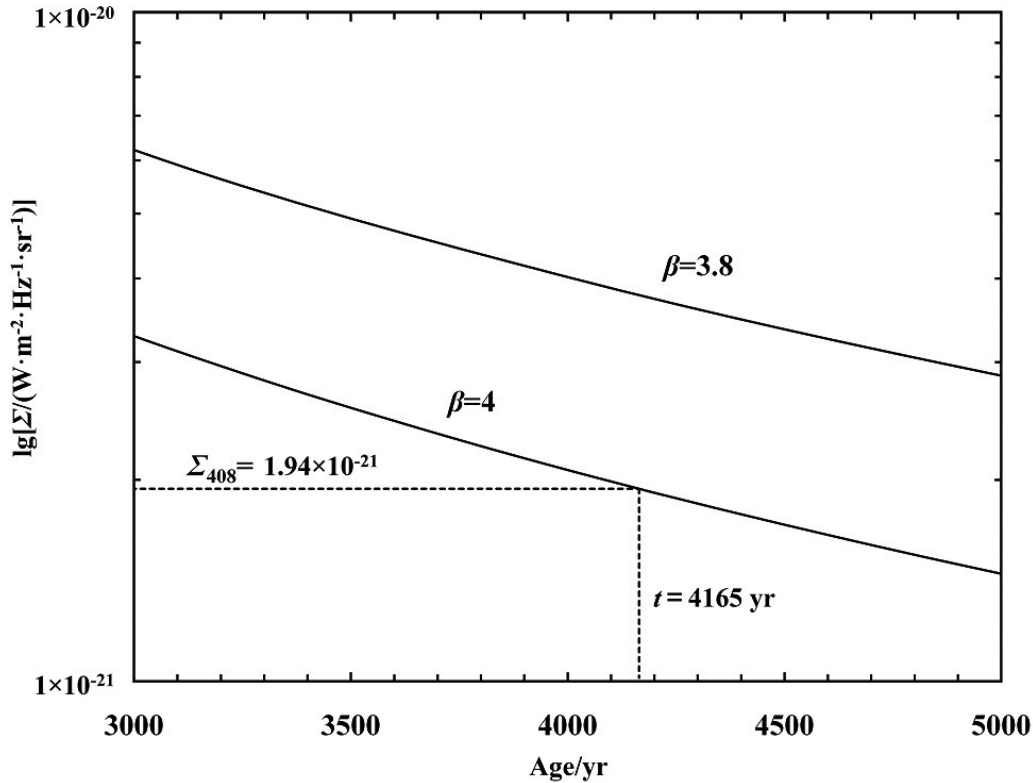


图 3 射电遗迹演化年龄. 实线表示超新星遗迹的射电亮度与时间的演化关系:  $\Sigma = 1.2 \times 10^{-15} t^{-2\beta/5}$ ,  $\beta$  为演化指数. 虚线表示遗迹 PKS 1209-52 的射电亮度及其对应年龄. 取  $\beta = 4$ , 当实测  $\Sigma = 0.194 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  时, 绝热膨胀年龄  $t = 4165 \text{ yr}$ , 与尧帝时代符合.

Fig. 3 Evolution age of radio relic. The solid line represents the evolution relationship between radio brightness and time of supernova remnants:  $\Sigma = 1.2 \times 10^{-15} t^{-2\beta/5}$ ,  $\beta$  is the evolution index, the dashed line indicates the radio brightness of the relic PKS 1209-52 and its corresponding age. Take  $\beta = 4$ , when measured  $\Sigma = 0.194 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , the adiabatic expansion age  $t = 4165 \text{ yr}$ , which is consistent with the era of Emperor Yao.

表 6 景星遗迹(PKS 1459-41)的星周介质密度  
Table 6 Ambient density of Jingxing remnants (PKS 1459-41)

Author and Publishing Year	Number Density/cm <sup>-3</sup>	Observation Bands	Literature
Tuohy et al. 1979	0.4	Radio	[17]
Dubner et al. 1986	0.13	X-ray	[57]
Kellett et al. 1987	0.26	X-ray	[15]
Matsui et al. 1988	0.08	X-ray	[58]
Ruiz 1983	5	Optics	[59]

表中的光学观测是指对遗迹周围丝状物进行的观测, Ruiz<sup>[59]</sup>特地指出它不是超新星的抛射物质, 而是前身星的组成部分. 我们认为X-射线观测看到的肯定不是星际介质的全部, 因为大量气体

可能不发射X-射线. 综合射电与光学数据, 取星际介质的平均数密度  $n = 1$ , 不失为合理选项.

历史年龄  $T = t_0 + t$ . 有关计算遗迹年龄的公式和基本参数列如下:

$$D = 4.3 \times 10^{-11} \left( \frac{E_0}{n} \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{2}{5}}, \quad \frac{E_0}{n} = 5 \times 10^{51},$$

$$D = 2 \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \times d, \quad \theta = 81',$$

$$t_0 \approx 200 \left( \frac{M_e}{M_\odot} \right)^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{1}{3}}, \quad M_e = 8 M_\odot,$$

$$n = 1, \quad T = t_0 + t.$$

下面基于PKS 1209-52不同 $d$ 值和初始密度 $n = 1$ 计算得到尧帝景星的历史年龄 $T$ , 结果列在表7中,

图4是图示.

表 7 尧帝景星(PKS 1209-52)的年龄计算表  
Table 7 Age calculation of Emperor Yao's Jingxing (PKS 1209-52)

Calculation Item	$d$ /kpc	$t_0$ /yr	$t$ /yr	$T$ /yr
Upper Limit	1	400	3146	3546
Emperor Yao Jingxing	1.0744	400	3764	4164
Lower Limit	1.2	400	4962	5362

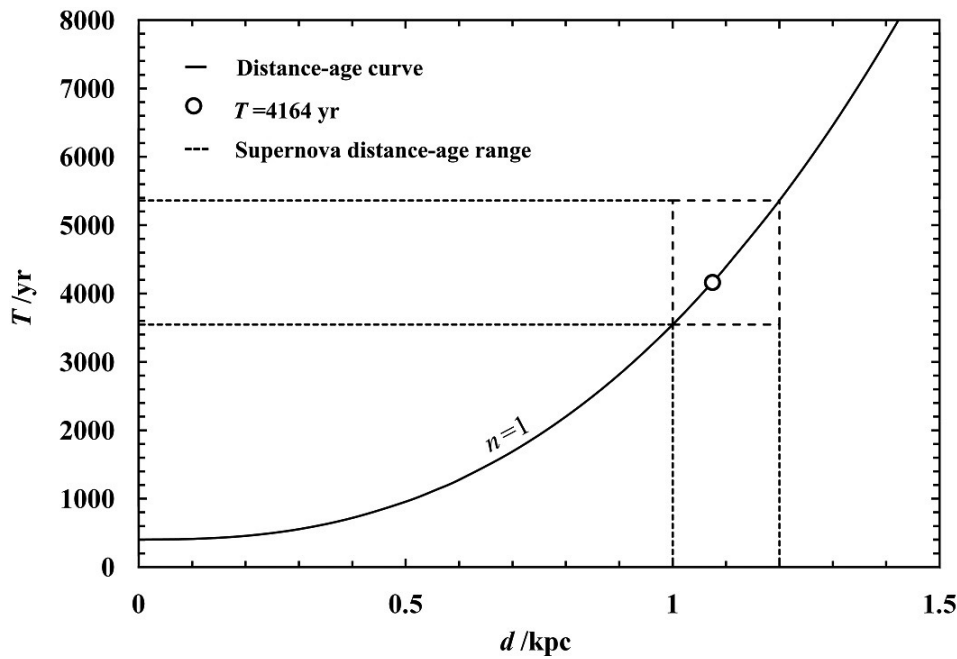


图 4 尧帝景星的年龄计算. 超新星遗迹的年龄 $T = t_0 + t$ , 其中 $t_0 \approx 400/n^{1/3}$ ,  $t$ 由Sedov关系 $D = 0.94t^{2/5}$ 得到, 遗迹的线直径 $D = 2 \tan(\theta/2) \times d$ , 角直径 $\theta = 81'$ . 计算表明由半月亮度及测算距离(1-1.2 kpc)限定的年龄为 $T = (4500 \pm 900)$  yr, 尧帝四十二年( $T = 4164$  yr, B.C.2164)位于合适的“距离-年龄”方框内.

Fig. 4 Age calculation of Emperor Yao's Jingxing . The age of the supernova remnant  $T = t_0 + t$ , where  $t_0 \approx 400/n^{1/3}$ ,  $t$  is obtained from the Sedov relationship  $D = 0.94t^{2/5}$ , and the linear diameter of the remnant  $D = 2 \tan(\theta/2) \times d$ . Angular diameter  $\theta = 81'$ . The calculation shows that the age defined by the half moon brightness and the measured distance (1-1.2 kpc) is  $T = (4500 \pm 900)$  years, and the 42nd year of Emperor Yao ( $T = 4164$  yr, B.C.2164) is located in the appropriate “distance-age” box.

依据Sedov理论的Clark经验公式以及汪珍如的自由相膨胀理论, 可以把超新星遗迹的 $D \propto t^{2/5}$ 关系与历史年代相联系, 转化为直观的“年代-距离” ( $d - T$ )关系图(图4). 在此图上以半月亮度限

制和测算距离的可能范围为上下限, 得到一个距离区间(1-1.2 kpc), 在 $d - T$ 曲线上对应一个年代区间(距今3546—5362 yr), 从而形成“年代-距离”方框, 这就是尧帝景星适合的年代-距离范围. “距

今年代”以标准历元(J2000.0)起算,得到超新星爆发的公元年代为B.C.1546–3362. 计算表明,尧帝景星(B.C.2164)正好位于超新星遗迹(PKS 1209-52)的“年代-距离”方框内,即尧帝景星的年龄为距今( $4450 \pm 900$ ) yr,年代中值约B.C.2450,误差 $\pm 900$  yr.

## 4 问题讨论

关于尧帝超新星(PKS 1209-52)的证认,我们认为有较多的观测和理论依据,但也存在一些不确定因素,有必要进行讨论.

### 4.1 证认尧帝超新星的有利条件

(1)文献记载的权威性. 汲冢(魏襄王墓)出土的《竹书纪年》记载尧帝时“景星见于翼”,这可能是司马迁没见过的史料,还有《尚书·中候》、《论衡》等汉代文献作为佐证,基本可以确定尧帝时发生过一次肉眼可见的明亮超新星爆发事件;

(2)景星位置的准确性. 《竹书纪年》记载景星位置在“翼”,《论衡》记载在“轸”,而《尚书·中候》记载在“翼轸”,这就把“景星”的位置严格限定在翼、轸之间的交界处. 由于超新星沿银道面呈带状分布,翼、轸的跨区大致与银面平行,因此翼、轸交界线大致与银面垂直,可以十分准确地找到超新星的位置;

(3)景星有明确的亮度. 文献记载“景星如半月”,“人君有德”才会出现. 尧帝是中国历史上著名的有道明君,所以在他统治期间出现了“景星”这样的“明圣之庆”. “半月”亮度为估算超新星的距离提供了约束条件,即只有 $< 1.2$  kpc距离的超新星才能达到半月亮度;

(4)超新星遗迹分布的特殊性. 超新星遗迹沿银道面分布,主要集中在银纬 $\pm 1^\circ$ 的扁平空间内,超出银纬 $\pm 1^\circ$ 的高银纬超新星十分罕见. 然而在银道面密近的超新星受银河系尘埃消光的影响,产生半月亮度的超新星几乎是不可能的,因此尧帝景星最有可能如宋代的周伯星(SN1006)一样,是极其罕见的高银纬超新星. 在翼、轸之间只有唯一的一颗超新星遗迹PKS 1209-52 (G296.5+10.0)远离银面, $b = +10^\circ$ ,它是尧帝景星的唯一候选体;

(5)遗迹距离与景星亮度符合. 景星候选体(PKS 1209-52)是十分明亮的著名超新星遗迹,天文学家们对其做过很多研究,各家估算的距离大致在1–2 kpc之间,与半月亮度限制的距离( $< 1.2$  kpc)相兼容;

(6)计算年龄与文献年龄符合. 有两种方法计算年龄:第1种方法是避开距离而进行的计算,依据射电观测的遗迹表面亮度与线直径的演化关系( $\Sigma \propto D^{-4}$ )和绝热膨胀的经验公式( $D = 0.94t^{2/5}$ ),计算其绝热膨胀年龄 $t = 4165$  yr,与尧帝时代符合,这是目前能够得到的比较好的结果. 第2种方法是依据距离推算遗迹直径,进而利用绝热膨胀的Sedov关系( $D \propto t^{2/5}$ )计算膨胀年龄. 计算表明遗迹PKS 1209-52的年龄距今( $4450 \pm 900$ ) yr,尧帝景星距今4164 yr (B.C.2164)正好位于理论计算的“距离-年龄”框架内.

### 4.2 证认尧帝超新星的不利因素

(1)前身星质量的不确定性. 超新星的初始爆发能 $E_0 = \frac{1}{2}M_e v^2$ ,观测到速度 $v = 6000$  km $\cdot$ s $^{-1}$ [61],那么由前身星质量 $M$ 限定的抛射壳层质量 $M_e$ 决定了 $E_0$ 值的大小. 关于塌缩型超新星的前身星,理论认为前身星质量 $M > 8 M_\odot$ 塌缩为中子星或黑洞,具体到某一颗超新星的前身星质量,则需要观测抛射壳层的质量加上中心致密天体的质量来确定. 本例PKS 1209-52的前身星质量目前还无法确知;

(2)初始数密度的不确定性. 前身星星周环境的密度一般来说可以取星际介质的平均数密度 $n = 1$ ,但恒星晚年有强烈的星风或者红巨星阶段的遗留物质等,都有可能改变平均密度. Ruiz<sup>[59]</sup>观测到的光学丝状物即可能是PKS 1209-52前身星的遗留. 一般来说恒星的质量越大星风越强,从而使星周介质的密度越大,因而采用( $E_0/n$ )的平均值,可以在一定程度上抵消上述两种不确定性的影响;

(3)射电遗迹演化指数的不确定性. 射电观测的超新星遗迹表面亮度与线直径之间存在演化关系( $\Sigma \propto D^{-\beta}$ ),其中统计分析得到的 $\beta$ 指数具有不确定性. 本文选取Shklovskii<sup>[26]</sup>采用的遗迹演化指数 $\beta = 4$ ,得到绝热膨胀年龄与尧帝时代符合;

(4)距离的不确定性. 目前对遗迹PKS 1209-52

距离的测算仅在kpc (千秒差距)量级, 各家估算大致在1–2 kpc之间, 而半月亮度超新星的距离 $< 1.2$  kpc, 两者只有1/5的重叠. 这个问题需要通过提高距离测量的精度来加以解决, 如果能将测量精度提高一个量级, 问题将迎刃而解, 但对于PKS 1209-52的距离测量而言, 目前还达不到;

(5)年龄误差较大. 采用射电遗迹演化关系计算的年龄, 误差多出整个自由相年龄(约400 yr). 采用亮度限制距离计算年龄, 误差高达 $\pm 900$ 多年, 其准确度比 $^{14}\text{C}$ 测年降低将近一个量级. 这方面的改进, 有赖于理论模型的修正.

### 4.3 降低误差的可能途径

尧帝景星的年龄为距今( $4450 \pm 900$ ) yr, 是目前理论得到的比较理想的结果. 未来降低误差的途径主要有以下几种可能:

一是依据更多样本准确地限定“非常IIP型”超新星的初始爆发能( $E_0$ );

二是更准确地测算前身星的星周密度( $n$ );

三是更准确地测定遗迹的距离( $d$ );

四是采用射电观测统计样本, 计算得到更精确的 $\beta$ 值, 并利用已知年代样本进行检验. 此外, 另辟蹊径, 通过改进脉冲星年代的理论模型来缩小小尧帝景星的年代误差, 可能会有意想不到的收获.

关于脉冲星的年龄. Zavlin等<sup>[24]</sup>首先据X-射线的CCD图像测得PKS 1209-52中心点源(1E 1207.4-5209)具有脉冲周期 $P = 0.42412924 \text{ s} \pm 0.23 \mu\text{s}$ . Gotthelf等<sup>[62]</sup>分析超新星遗迹PKS 1209-52的X-射线数据, 测得中心脉冲星的周期导数 $\dot{P} = (9.6 \pm 9.4) \times 10^{-17} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ , 推算脉冲星的特征年龄 $\tau \equiv P/(2\dot{P}) > 35 \text{ Myr}$ . Gotthelf等<sup>[63]</sup>又据该脉冲星2015年跳变(glitch)前(2002—2014)的数据得到周期导数 $\dot{P} = 2.216(12) \times 10^{-17} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ , 算得特征年龄 $\tau = 303 \text{ Myr}$ . 显然脉冲星的特征年龄大于遗迹年龄几个数量级, 这个问题迄今未能很好地解释, 尧帝景星提供了准确的年龄, 为创立新的理论模型解决脉冲星年龄问题创造了条件.

目前已经确认的中心致密天体有10个, 仅有3个测定了自旋周期<sup>[25]</sup>, 尧帝景星遗迹中的脉冲星(1E 1207.4-5209)就是其中之一. 它的壳层具

有非热射电辐射(幂律谱), 而中心发生热辐射(X-射线黑体谱), 这表明它的膨胀既有激波供能驱动, 又有中心供能驱动. 传统的Sedov理论更适合激波驱动, 现在需要考虑持续稳定的中心供能驱动对壳层膨胀所造成的影响, 也就是说针对CCO的具体情况, 有必要修正传统的标准模型理论. 由于增加了中心驱动因子, 修正后的理论膨胀速度更快, 对于同样的距离和半径, 理论计算将缩小其膨胀年龄, 使目前较大的年龄范围缩小到更加接近尧帝时代. 这将对超新星遗迹演化理论的重要补充. 另外, 新发现的X-射线脉冲跳变现象, 对已有的制动理论提出了挑战.

Kellett等<sup>[15]</sup>最早发现PKS 1209-52的X-射线辐射时, 通过热辐射等离子体Raymond-Smith模型得到距离2.0 kpc, 估计遗迹年龄约20000 yr. Roger等<sup>[16]</sup>取距离为1.5 kpc, 得到绝热膨胀年龄7000 yr. 本文认为肉眼可见半月亮度限制它的距离不得超过1.2 kpc, 年龄在5400 yr以下. 研究表明, 随着距离范围越来越明确, 遗迹的年代也越来越接近尧帝时代. 当我们确认它是尧帝景星之后, 反过来将对现有的距离测量方法和理论计算模型提供检验标准和改进契机. 明晰的年龄约束, 势必为修正标准绝热模型、射电遗迹演化指数等提供新的依据, 也为计算脉冲星的实际年龄创造了条件. 如此等等, 可以预见由尧帝超新星引发的科学问题, 将引起科学家们的研究兴趣.

尧帝景星(PKS 1209-52)的位置、亮度、距离、年龄等与历史记载相符合, 并且具有唯一性, 使我们相信射电源PKS 1209-52就是尧帝景星(SN-B.C. 2164)的超新星遗迹. 这一工作的重要意义是证认了天文学史上有记录的最早超新星, 为一颗年轻的超新星遗迹和脉冲星提供了参考年龄. 中国历史文献记载的4100多年前的尧帝景星, 被证实确有其事, 这一发现把中国文献记载的可靠历史提前到4100多年前. 相信尧帝超新星同样会引发历史学家和人文学者的研究兴趣, 乃至引起普通民众的好奇心和广泛关注.

**致谢** 感谢审稿人和编辑对本文提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著提高. 感谢北京师范大学

历史学院研究生储佩君、孟珂珂提供《竹书纪年》书影、星图数据等相关资料。

### 参 考 文 献

- [1] 伊世同. 星图//中国大百科全书·天文学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1980
- [2] 杜升云. 北京师范大学学报, 1982, 56: 81
- [3] Green D A. JApA, 2019, 40: 36
- [4] Irvine N J, Irvine C E. ApJ, 1974, 192: L111
- [5] Whiteoak J B, Gardner F F. ApJ, 1968, 154: 807
- [6] Clark D H, Caswell J L. MNRAS, 1976, 174: 267
- [7] Milne D K. AuJPh, 1979, 32: 83
- [8] 克拉克D H, 斯梯芬森F R. 历史超新星. 王德昌, 徐振韬, 译. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982: 154-155
- [9] 马骐, 陈秉乾, 尹其丰. 天文学报, 1979, 20: 393
- [10] Ma E, Chen B Q, Yin Q F. ChA, 1980, 4: 384
- [11] Green D A. MNRAS, 1984, 209: 449
- [12] Bolton J G, Gardner F F, Mackey M B. AuJPh, 1964, 17: 340
- [13] Milne D K. AuJPh, 1970, 23: 425
- [14] Mills B Y, Slee O B, Hill E R. AuJPh, 1961, 14: 497
- [15] Kellett B J, Branduardi-Raymont G, Culhane J L, et al. MNRAS, 1987, 225: 199
- [16] Roger R S, Milne D K, Kesteven M J, et al. ApJ, 1988, 332: 940
- [17] Tuohy I R, Mason K O, Clark D H, et al. ApJ, 1979, 230: L27
- [18] Helfand D J, Becker R H. Nature, 1984, 307: 215
- [19] Kellett B J. SSRv, 1985, 40: 475
- [20] Raymond J C, Smith B W. ApJS, 1977, 35: 419
- [21] Mereghetti S, Bignami G F, Caraveo P A. ApJ, 1996, 464: 842
- [22] Vasisht G, Kulkarni S R, Anderson S B, et al. ApJ, 1997, 476: L43
- [23] Giacani E B, Dubner G M, Green A J, et al. AJ, 2000, 119: 281
- [24] Zavlin V E, Pavlov G G, Sanwal D, et al. ApJ, 2000, 540: L25
- [25] Halpern J P, Gotthelf E V. ApJ, 2010, 709: 436
- [26] Shklovskii I S. AZh, 1960, 37: 256
- [27] Shklovskii I S. SvAL, 1976, 2: 95
- [28] Caswell J L, Lerche I. AuJPh, 1979, 32: 79
- [29] Zavlin V E, Pavlov G G, Trumper J. A&A, 1998, 331: 821
- [30] Schmidt M. JRASC, 1961, 55: 149
- [31] Celnik W, Rohlf K, Braunsfurth E. A&A, 1979, 76: 24
- [32] Mills B Y. The Radio Properties of SNRs in the Magellanic Clouds//Danziger J, Gorenstein P. Supernova Remnants and Their X-ray Emission. Dordrecht: Springer, 1983: 551-558
- [33] Gardner F F, Milne D K. AJ, 1965, 70: 754
- [34] van den Bergh S. ApJ, 1976, 208: L17
- [35] Winkler P F Jr, Laird F N. ApJ, 1976, 204: L111
- [36] Stephenson F R, Clark D H, Crawford D F. MNRAS, 1977, 180: 567
- [37] Hamilton A J S, Sarazin C L, Szymkowiak A E. ApJ, 1986, 300: 698
- [38] 陆焱. 现代天体物理(上). 北京: 北京大学出版社, 2014: 331
- [39] 阿弗雷特E H. 天体物理学前沿. 李致森, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 172-173
- [40] 李焱. 恒星结构演化引论. 北京: 北京大学出版社, 2014: 253-254
- [41] 黄润乾. 恒星物理. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 303-304
- [42] Modjaz M, Gutiérrez C P, Arcavi I. NatAs, 2019, 3: 717
- [43] 薄树人, 王健民, 刘金沂. 公元1006年超新星及其遗迹//中国天文学史整理研究小组. 科技史文集(1). 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 79-85
- [44] Terreran G, Pumo M L, Chen T W, et al. NatAs, 2017, 1: 713
- [45] Arcavi I, Howell D A, Kasen D, et al. Nature, 2017, 551: 210
- [46] 华同旭. 广州大学学报, 1990: 90
- [47] Jiang S Y, Zhao F Y. ChJAA, 2007, 7: 325
- [48] Winkler P F Jr. ApJ, 1977, 211: 562
- [49] Schweizer F, Middleditch J. ApJ, 1980, 241: 1039
- [50] Minkowski R. AJ, 1966, 71: 371
- [51] Kirshner R, Winkler P F, Chevalier R A. ApJ, 1987, 315: L135
- [52] Woltjer L. ARA&A, 1972, 10: 129
- [53] 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论. 沈青, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 237-241
- [54] Taylor G I. RSPSA, 1950, 201: 192
- [55] Vasisht G, Kulkarni S R, Frail D A, et al. ApJ, 1994, 431: L35
- [56] 李宗伟. 北京师范大学学报, 1985, 21: 65
- [57] Dubner G M, Colomb F R, Giacani E B. AJ, 1986, 91: 343
- [58] Matsui Y, Long K S, Tuohy I R. //Roger R S, Landecker T L. Supernova Remnants and the Interstellar Medium. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 157
- [59] Ruiz M T. AJ, 1983, 88: 1210
- [60] 汪珍如. 超新星遗迹、射电脉冲星的X射线辐射//王绶琯, 周又元. X射线天体物理学. 北京: 科学出版社, 1999: 312-377
- [61] 艾伦C W. 物理量和天体物理量. 杨建, 译. 上海: 上海人民出版社, 1976: 267
- [62] Gotthelf E V, Halpern J P. ApJ, 2007, 664: L35
- [63] Gotthelf E V, Halpern J P. ApJ, 2020, 900: 159

## The Supernova Remnant of More than 4100 Years Ago Was Discovered—Emperor Yao’s Jingxing (PKS 1209-52)

WU Jia-bi

(School of History, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**ABSTRACT** According to Bamboo Annals, “The year Emperor Yao ascended the throne was the year of Bingzi” and “In the forty-second year of his reign, Jing star appeared on the Yi xiu (constellation)”. LunHeng says that “during the era of emperor Yao, Jing star was seen in the Zhen xiu (constellation)”. This star may be a supernova between Yi xiu and Zhen xiu. Calculated by already known years that was designated by Heavenly Stems and Earthly Branches, the 42nd year of Emperor Yao’s reign was B.C.2164. If we take a wide range ( $180^\circ \pm 23^\circ$ ) as the transition area between ‘Yi’ and ‘Zhen’, we can find 20 supernovae in the Green Supernova Remnant Table. Among them, only the high silver latitude remnant PKS 1209-52 (G296.5+10.0) conforms to brightness and age limitations of Emperor Yao’s Jing star that appeared “like a half moon”. It is the only candidate of Emperor Yao’s Jing star (SN-B.C.2164). According to the relationship between the surface brightness of supernovae and the line diameter that  $\Sigma \propto D^{-\beta}$ , as well as the adiabatic expansion theory, the adiabatic phase age ( $t = 4165$  yr) is calculated to be consistent with the era of Emperor Yao. In addition, according to the limitation that the Jing stars are as bright as “half moon”, the distance  $d = 1\text{--}1.2$  kpc can be figured out. Then according to the Sedov relation  $D = 0.94t^{2/5}$ , the age of Emperor Yao’s Jing star was  $(4450 \pm 900)$  years ago. It is also in accordance with the times of Emperor Yao. This is one of the earliest recorded supernovae in the history of astronomy, which advances the history recorded in Chinese literature and confirmed by science to more than 4100 years ago.

**Key words** history of astronomy, stars: supernovae, stars: distances, stars: evolution, interstellar medium: supernova remnants