

ISSN 1000-8349

天文学进展

PROGRESS IN ASTRONOMY

第 8 卷

第 2 期

Vol. 8

No. 2

1990

天文学进展编辑部编辑

科学出版社出版

天 文 学 进 展

第 8 卷 第 2 期

目 录

述 评

太阳活动预报简论.....王家龙(89)

* * *

PSR 0535-69——新发现的 SN 1987A 亚毫秒光学脉冲星.....陆 捷(99)

分光双星视向速度研究.....沈良照(109)

银河系中的暗物质与短缺质量.....吕克华(130)

星系的红外观测研究.....陈培生(131)

* * *

各种地球模型的章动序列.....朱耀仲(141)

天体力学中的数值积分方法.....张 捷 何妙福(150)

前 沿

欧洲 X 射线天文卫星(EXOSAT)资料的利用杭恒荣 臧志云 韩海洋(159)

研究简讯

1987 年 9 月 23 日日环食的 6cm 波长射电观测

结果.....季德盛 梁世光 秦德昌(173)

学术活动

首次太阳磁场与速度场观测与资料分析讨论会(1989 年 9 月 15—20 日,承德)(175); 中国天文学会学术会议(序号 103); 第三次恒星和行星物理学术讨论会(1989 年 5 月 24—29 日,大同)(176); 中国天文学会学术会议(序号 90); 天体测量、天体力学和大地测量中的相对论问题(1989 年 8 月 1—6 日,肇庆)(176)。

太阳活动预报简论

王家龙

(中国科学院北京天文台)

张柏荣

(中国科学院云南天文台)

提 要

本文对太阳活动预报的目的、方法以及预报的现状和发展趋势作了简评, 特别对太阳活动的长期、中期和短期预报作了论述。文章最后总结了各类太阳活动预报面临的改进问题, 并简单讨论了太阳活动预报和空间环境服务组织的工作问题。

一、引 言

自 1928 年 G. Ferrie 在法国开始做太阳活动和地球物理资料的日常广播服务以来, 随着人类对无线电通讯的广泛应用和日地关系研究的开展, 特别是随着近二十多年人类对日地空间的开发利用, 太阳活动预报已经逐步发展成为一种具有相对独立的研究特征和用途日益扩大的太阳服务工作。

观测表明, 地磁活动和气象、水文等方面都有与太阳黑子活动相关联的变化。爆发性的太阳活动, 如太阳耀斑, 对地球环境的影响也已逐渐为人们所熟知。太阳活动影响着人类对日地空间的开发, 它能够改变人造卫星的轨道、缩短人造卫星的寿命, 损伤宇航人员及损毁飞行器上的装备, 如传感器和计算机。太阳活动对通讯和导航等的影响在生产和国防上可能带来的损失是显而易见的。另一方面, 太阳活动对人类生活环境可能产生的影响也是人们普遍关注的一个问题。

常规的太阳活动预报主要服务于地球空间环境和地球物理现象预报, 也服务于相应的研究工作。因此, 世界上不同的预报组织做预报工作的方式和发布的预报内容不尽相同。

虽然在国内外还没有专门的杂志介绍太阳活动预报, 许多有关的文章或报告零散地发表于各种期刊中, 但是由于日地预报的重要性与日俱增, 国际上专门召开过几次大型日地预报讨论会。作为会议内容的反映, 于 1972、1979—1980 年和 1986 年出版的三个专集^[1-3], 包含了大量的预报论文。这三个文集的内容, 大体上反映了近二十多年来太阳活动预报工作和研究的进程。

本文对太阳活动预报的分类、预报方法、效果及预报工作现状和发展趋势作概括性介绍和评论。

国家自然科学基金及科学院太阳峰年基金资助课题。

1989年6月27日收到。

1989年8月27日收到修改稿。

二、太阳活动预报的分类、方法和简评

对于太阳活动预报可以根据它的方法、对象等作种种分类,较常用的是按预报的时间提前量来分类预报。按预报提前时间的长或短可分为长期、中期和短期预报等三类。在相邻的两类之间没有公认的严格界限。一般认为,长期预报是指提前量为一年或几年以上至几十年或更长时间的预报,中期预报是指提前量为半个或一个太阳自转周以上至几个月的预报,而短期预报是指提前量为几天或更短至几十分钟的预报。太阳活动预报的这三种分类,主要是依据太阳上各种活动过程的时间尺度,预报技术方法的差别以及预报使用者的工作要求。

1. 太阳活动的长期预报

主要预报内容是太阳黑子数的长期变化,特别是黑子数的太阳周变化。黑子数或称黑子相对数虽然是一个缺乏物理意义的统计量,但是由于它已有二百多年的观测历史,积累的资料多而完整^[4],作为一个统计量它能清楚地表征太阳活动的周期性^[5],受到了广泛的重视。下面我们把太阳黑子周或更长期的黑子活动的预报按其方法分为四种叙述。

(1) 时间序列法:这种方法将黑子数作为时间的函数进行统计预报,其中比较典型的是把黑子数的观测值或某种平滑值看成一个非平稳随机时间序列^[6-8]。为研究太阳黑子活动的周期性,使用了包括古代极光及黑子目视记录的历史资料。至今已发现太阳黑子活动具有 11 年、22 年、80 年左右以及 200 年左右的周期^[9-12]。

与上述方法相类似的是时间曲线拟合法。Wilson^[13]曾提出长短太阳黑子周的概念,他用三条正弦曲线相加来拟合黑子数曲线,外推预报值。也有的作者用其他曲线或多条线回归法预报黑子数^[14,15],布鲁塞尔黑子指数中心则用一种简单易行的规范曲线法做预报^[16]。

(2) 活动周参量法:此法是利用不同活动周或活动周内部各参量,如极值、上升或下降段的时间长度之间的经验关系做预报。主要预测未来太阳周黑子相对数极大值及其时间位置。这是长期太阳活动预报的重点工作之一。这种预报所使用的经验公式,多是由概率统计法(如文献[17—19])和相关分析法(如文献[20, 21])所得到的。在文献[20]中,作者引入高值周与低值周的概念,对不同的周使用不同的预报公式。在文献[21]中,作者对奇数和偶数周分别给出预报方程。

另一种利用太阳活动周内部性质之间关系的预报方法可以称为太阳活动现象先兆法。此法是基于这样的认识,即太阳活动实际上主要是磁活动,强的中低纬磁场活动必然是由太阳周开始时出现在极区或高纬的弱磁场或弱磁场的某种活动形式演化来的。因此,根据极小期的某种测量,如极区光斑的数目、新周黑子的纬度、极区磁场强度等,应能预报极大期黑子活动情况。文献[22]曾用下式做太阳周黑子数极大值预报。

$$R_m = 110|B|$$

其中 B 为极小期极区磁场强度, R_m 为黑子数极大值。

(3) 地球物理现象先兆法:此法利用极小期或太阳周下降期的地球物理量的测量来预报下一个太阳周黑子数极大值。例如, Kane^[23]在 1987 年用 21 周地磁指数平滑极小值预报第 22 周黑子数,极大年均值为 185 ± 40 。这个预报值可能与实际值很相近,但预报提前量不

多。

在地球物理先兆法中, 值得特别提到的是异常磁静日法^[24]。研究发现, 异常磁静日(AQD)事件的幅度与静日 $S_q(H)$ 幅度之差、AQD 事件的平均幅度及 AQD 数目的变化率等在极小期的数值与其后的活动周黑子数极大值彼此相关^[25,26]。Brown^[27]在 1979 年发表的用异常磁静日法预报的第 21 周黑子数极大年年均值(155 ± 31)与实际观测的峰年年均值(155.3)相符极好。

这种地球物理现象先兆预报法, 在物理上是说得通的, 它把极小期地磁场的活动状况, 通过极小期的太阳磁场与极大期太阳的磁活动状况联系起来了。

(4) 行星位置法: 行星或其集体在太阳上的潮汐力对太阳活动的影响究竟有多强, 能否用行星的作用来预报太阳活动等等, 是一直在争论的问题^[28,29]。我国也有人作过这方面的工作^[30,31]。近些年以 Landscheidt 为主力, 将行星位置预报方法的研究又推进了一步。他们计算太阳绕太阳系质心运动的转矩, 并探讨与黑子活动周期的关系等^[32,33], 对太阳活动做预报。当前, 用行星位置预报太阳活动还处于研究多于应用的阶段。

(5) 简评太阳活动的长期预报方法: 容易看出, 前述各种太阳活动长期预报方法具有不同的指导思想。时间序列法及第二种方法的第一部分的基本假设是未来的太阳黑子数的变化遵从以往太阳黑子数的变化所显示出的统计规律。这类方法比较简便, 受到广泛的应用。但是给出的预报, 就上一个太阳周(第 21 周)来看, 普遍偏低。大部分预报值与实测值相差 20% 以上。这类方法的优点是既能预报幅度又能预报时间位相。急待改进的是提高预报值。

太阳活动现象先兆法和地球物理现象先兆法虽然也是用统计公式, 但其物理思想比较明确。先兆法对上一个太阳周(第 21 周)黑子数极大值的预报比较正确, 预报值非常接近实测值 165^[34]。这类方法一般是在极小期出现后, 才能做预报, 时间提前量较小, 至于能否预报位相还有待研究。第 22 周太阳黑子活动水平将是对这类方法的重要检验。

行星位置预报法的主要问题是其物理机制尚需明确。应该肯定, 行星(特别是大行星)的位置通过引力机制对太阳会有影响, 而且行星的位置适于做预报因子。但是从效果上看, Landscheidt^[33]用这种方法对第 22 周黑子数极大值及其时间位置所做的预报($R < 60$ 和 1995 年)显然与实际情况相差甚远。行星位置这个外在因素究竟对太阳活动的幅度能有多大的控制作用或影响? 这是需要进一步探求的。近期有人^[34,35]试用模糊数学方法做预报, 文献^[35]的预报值较其它预报似乎更接近实际值, 但其预报提前量也较短, 预报发表的时间已接近峰年。Brown^[36]对长期预报作过讨论。

关于长期预报中的预报量问题, 除黑子相对数外, 太阳在 2800MHz 射电波段的辐射流量密度、日面上每天的黑子总面积及其分布以及各波段的太阳爆发, 可望成为未来的主要的长期预报量。这些量具有明确的物理意义, 是预报使用者关心的量。但这些量的资料积累时间短, 不够完整, 用经典方法观测比黑子数观测麻烦, 改用现代化手段观测则需要相当大的投资。

2. 太阳活动的中期预报

中期预报内容以太阳耀斑为主。中期预报实质上是要预报新太阳活动区的产生及其活动性, 预报已有的日面上的活动区将在什么时候有多大幅度的活动。因为缺乏对活动区演化的

物理过程和规律的了解,中期预报是目前最困难的太阳活动预报。现在的中期预报方法是综合经验预报法,该方法主要根据以下几个方面的考虑做出预报:(1)长期预报所提示的活动水平和位相,(2)活动经度的分布特征,(3)各活动经度的统计性质,(4)黑子群的类型在时间—经度图上的分布,(5)活动区回转能力及活动能力的估计,(6)活动的周期性,如三个自转周或 80 天左右的周期,(7)行星位置的考虑,(8)日冕增强辐射区的出现等等^[36-46]。如果要直接预报地球物理效应,还应该考虑冕洞的存在及回转以及质子事件的东西不对称性等。图 1 是根据文献[44]的资料画出的在地球附近观测到的质子事件(1977.9—1982.12)所对应的耀斑的日面分布。从图 1 容易看出分布的东西不对称性。

中期预报的经验数值化无疑是中期预报的改进方向之一^[39,48]。在用单指标数学模型做中期预报这方面也有进展,例如文献[49]的工作。但是在预报量(如黑子数)变化的关键处即峰与谷处与实际偏差较多。今后的中期预报工作,在继续积累和总结经验方法的同时,应该在较明确的物理思想指导下研究活动区的产生和演化规律。太阳大尺度磁场的剪切、挤压及太阳大气较差自转的监测及其与活动区关系的研究,是个有希望的领域。对活动区做适合于预报工作的分类是中期预报的另一项基础性工作。中期预报还应不断用新的研究成果,如文献[50, 51]给出的结果,改进技术方法。总之,需要从经验知识的数值化和活动区演化的物理研究诸方面向客观预报改进。

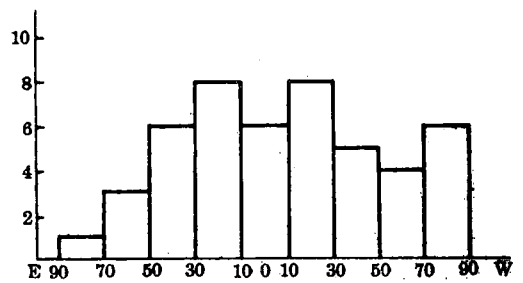


图 1 1977 年 9 月至 1982 年 12 月质子耀斑的日面分布

当然,一颗能对太阳“背面”进行观测监视的人造行星,会极大地有助于中期预报水平的提高。

3. 太阳活动的短期预报

短期预报的时间提前量为几十分钟至两、三天,预报内容也以耀斑为主。其预报方法大致可分为三种,概述如下。

(1) 先兆法:在耀斑发生之前,常可在光波段、射电波段或 X 射线波段观测到该活动区的某些异常现象,这些现象超前于耀斑发生的时间是不同的,因此可利用它们做不同提前量的预报。常用的先兆现象有色球的暗条活动及纤维规整排列^[62-67]、不同层次预热现象— H_{α} 、UV 或 X 射线亮点及射电先兆爆发或短波辐射增强^[68-61]、黑子群呈特强活动类型^[62-68]、黑子群有特殊运动或变化^[67-72]、活动区纵磁场中性线的变化^[66,73-76]等。有经验的预报员利用先兆现象可以给出相当准确的短期预报。这种预报的水平与预报者的主观经验密切相关,它应朝客观预报的方向改进。

(2) 经验公式法:此法使用活动区参量与耀斑产率的统计关系做预报^[77-79],大量的工作在于定出统计公式。Kumagai^[80]曾用 32GHz 太阳射电亮温度的增长与耀斑日产率的关系做预报。波兰人曾将十几个参量用计算机筛选,对 C 级、M 级和 X 级的 X 射线耀斑做统计预报^[81]。

这类预报的时间提前量一般为一至三天。其提前量、预报水平都与导出经验公式时所依

据的资料和预报时使用的资料有关。因此, 每个预报单位应该有自己的预报经验公式, 不断改进这些公式, 并设法与其他预报单位的公式相联系。只有在统一设备、统一方法的前提下, 才能使各预报单位的预报规范化。

(3) 物理预报法: 用物理方法做太阳活动短期预报主要是基于对耀斑储能过程的认识而逐渐发展起来的^[72-84], 现在还没有达到应用的阶段。有相当多的工作试图通过无力磁场能量和无力因子的研究来做耀斑预报^[75,76,85-88]。观测表明, 耀斑的位置与活动区速度场视向分量的反变线有关, 理论上认为活动区速度场与磁场的相互作用的观测和研究会有助于对耀斑物理过程的了解^[89-96]。近期发现, 由磁场观测所确定的电流核的位置与耀斑亮核的位置相符^[97], 因而由磁场的观测所推算出的电流核来预报耀斑可能是一条耀斑物理预报的途径。虽然物理预报尚不能给出常规方法和投入常规应用, 作为一种潜在有力的预报方法正日益受到重视^[88]。

4. 预报的检验与评价

预报的检验与评价无疑是太阳活动预报中的一项重要工作, 预报的客观检验和是否满足预报使用者的需求应该是评价预报工作的两个标准。事实上要比较不同预报系统的预报水平是很困难的, 因为不同预报系统预报的内容和描述方法往往不同。国际上常用列表或画图的方法, 把预报的情况与实际发生的情况作比较来进行预报检验。

在讨论预报的检验或者评价太阳耀斑和质子事件预报的水平时, 常需用下面定义的几个指标:

$$\text{报准率} = \frac{\text{报准的事件数目}}{\text{事件的实际发生数目}}, \quad \text{漏报率} = 1 - \text{报准率},$$

$$\text{预报准确程度} = \frac{\text{报准的事件次数或时段}}{\text{预报事件发生的数目或时段}}, \quad \text{虚报率} = 1 - \text{预报准确程度},$$

显然可知, 用任何一个单一指标都不能完整地衡量预报水平。理想的预报方法应该有较强的报准率和较低的虚报率。实际上不容易同时得到低漏报率与低虚报率, 报准率较高的方法常常有较高的虚报率。

与预报的检验和评价有关的另一个量是预报事件发生的次数或时段与总的预报次数或时段之比, 称为相对预报次数或相对预报时间。报准率与相对预报时间之比是一个重要的评价预报的量, 可称为单位相对预报时间的报准率。文献[99]提出用质子事件预报和安全期预报的单位相对预报时间的报准率之积来衡量预报。文献[100]提出用信息论指标评价预报水平。如果在某种预报任务中, 用户允许预报者在一定时期内任选预报时段, 那么除上述各种衡量指标外, 还应考虑拒报率问题。可定义拒报率为:

$$\text{拒报率} = 1 - \frac{\text{做预报的时段或次数}}{\text{用户给定可以做预报的时段或次数}}$$

应注意的是, 不同的预报用户对上述不同的指标会有不同的要求或偏爱。总之, 预报的衡量与评价不但关系到预报者, 也关系到使用者。

三、国际太阳活动预报工作概况

国际太阳活动预报工作是通过国际无线电联盟快速日地物理资料交换计划和全球联合观测组织(IUWDS)进行协调的。IUWDS 是国际无线电科联协同国际大地测量与地球物理协会、国际天文学联合会设立的指导全球性日地物理研究工作的组织,它指派有关国家的研究单位作为它的国际性组织,其中包括地区性警报中心和辅助性警报中心。这些中心的大致情况是^[101]:

Boulder 中心——设在美国科罗拉多州的 Boulder 市,是美国海洋与大气管理局和空军合办,作空间环境研究与服务的组织。每天发布太阳地球物理资料及其情况的总结和预报。这个中心同时兼作世界警报局,它的短期预报也是用经验法,有经验的预报员能有 70% 以上报准的把握。

巴黎中心——设在法国巴黎墨东天文台,做日地资料交换,情况总结和预报。

莫斯科中心——设在苏联莫斯科地球物理研究所,每天发布太阳和地球物理资料,做太阳和地磁、电离层扰动预报。

东京中心——除类似的资料及预报外,每半周发布七天的无线电通讯预报。

悉尼中心——设在澳大利亚悉尼的电离层预报服务中心,每天除发布日地资料外,还向世界警报局发信息,有时也向新西兰、南极和境内发预报。

达姆斯塔德中心——设在西德的 Darmstadt,发布日地资料,做资料的快速交换。

除上列区域性中心外,还有设在斯德哥尔摩、布拉格、新德里和伊尔库茨克的辅助性中心。这样,全世界已形成较完整的太阳活动的观测、预报研究及服务网。

苏联在太阳活动和地球物理扰动的观测和研究方面有相当的实力,在太阳活动预报领域主要从事活动指标、一年半或更长的长期预报、一周至几个太阳自转周的中期预报和几个小时至几天的短期预报等四种研究^[102]。对耀斑预报水平的估计是“还不能做出可信程度大于 75% 的超过 3 日到 5 日的预报”。

太阳活动预报之所以受到国际上的重视,不仅在于它具有太阳物理的意义,更主要的是它具有强烈的应用性和服务性。各国为了提高预报及环境服务工作的质量和水平,除大力探求预报方法外,仍然强调加强空间观测、加强地面与空间的联合观测、扩大观测网和资料交换工作。这些是预报工作的基础和保障。

四、结论和讨论

当前各类太阳活动预报均以经验预报方法为主。较好的长期预报值与实际观测值之差可小于 20%,甚至 10%。长期预报的改进方向应该是在明确的物理思想指导下探讨新的预报方法或经验公式。太阳周的理论研究还未能处于直接做预报的地位。中期预报是当前最困难的预报,它面临把经验知识合理地数值化的问题。有关活动区演化的研究可能给中期预报带来突破性进展。短期预报的准确程度强烈地依赖于预报员的主观经验,应该大力向客观化改

进。同时, 长、中、短期太阳活动预报面对的一个共同问题, 是寻求或合理地规定评价预报水平的方法, 以便预报者和预报使用者提高他们即独立又相关的工作。

太阳活动预报组织应该是日地空资料与环境预报服务中心的一个重要组成部分。太阳活动预报服务于日地空的状态预报和研究工作, 是它得以发展的主要原因。只有太阳物理、空间物理和地球物理工作的结合才能做出更适合用户使用的预报。太阳活动预报组织一方面要保持已投入使用的预报方法的相对稳定性, 另一方面也要与相应的研究机构有良好的合作关系, 不断收集新的有关的研究成果, 如近年发现的硬X射线爆发的周期性^[103]等以改进预报工作, 同时还要注意到一些潜在的有重要意义的研究工作, 例如太阳常数的观测与分析。虽然太阳总辐射的长短期变化及其与黑子总面积的关系仍然在研究或争论之中^[104-106], 但这种工作可能涉及到有关人类生存环境的预报问题。

随着观测、资料和研究工作的进展, 随着用户对预报的需求的多样化和明确化, 太阳活动预报水平必然会有较大的提高。大力发展空间观测, 加强和扩大地面观测网, 加强地面与空间的联合观测和分析以及提高快速交换的资料的质量, 将会特别有助于预报水平的提高。太阳活动预报及空间环境服务工作的开展, 要求有较多的人力、物力和财力的投入, 这也正是促进国内和国际上大力开展联合观测与合作研究的一个动力。

参 考 文 献

- [1] McIntosh, P. S. and Dryer, M. (eds.), *Solar Activity, Observations and Predictions* (1972), NOAA, Boulder.
- [2] Donnelly, R. F. (ed.), *Proc. of Solar-Terrestrial Predictions* (1979, 1980), NOAA, Boulder.
- [3] Simon, P. A., Heckman, G. and Shea, M. A. (eds.), *Proc. of Solar-Terrestrial Predictions*, NOAA and AFGL, (1986).
- [4] Waldmeier, M., *The Sunspot Activity in Years 1610—1960*, Schulthess and Co., Zurich, (1961).
- [5] Bray, R. J. and Loughhead, R. E., in *Sunspots*, p. 240, Chapman and Hall Ltd., London and New York, (1984).
- [6] 张建中等, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 59.
- [7] 王家龙等, 北京天文台台刊, (1975), No. 5, 47.
- [8] 曹振华等, 紫金山天文台台刊, 7 (1988), 166.
- [9] 丁有济等, 天文学报, 23 (1982), 287.
- [10] Schöve, D. J., *JGR*, 62 (1955), 127.
- [11] 邹仪新, 北京天文台台刊, (1978), No. 2, 87.
- [12] Bray, R. J. and Loughhead, R. E., in *Sunspots*, Ch. 6, Chapman and Hall Ltd., London and New York, (1984).
- [13] Wilson, R. M. et al., in *STP Proc.*, ed. by P. A. Simon et al., p. 26, (1986).
- [14] 张桂清, 地球物理学报, 32 (1989), 116.
- [15] 张桂清, 天体物理学报, 8 (1988), 131.
- [16] Koeckelenbergh, A., in *STP Proc.*, ed. by P. A. Simon et al., p. 113, (1986).
- [17] 徐振超等, 天文集刊, 第1集 (1978), 73.
- [18] 范岳华, 北京天文台台刊, (1978), No. 13, 39.
- [19] 赵爱娣, 紫金山天文台台刊, 7 (1988), 310.
- [20] 王家龙等, 地球物理学报, 28 (1985), 641.
- [21] 董士伦, 天文学报, 27 (1986), 53.
- [22] Schatten, K. H., in *STP Proc.*, ed. by P. A. Simon et al., p. 92, (1986).
- [23] Kane, R. P., *Solar Phys.*, 108 (1987), 475.
- [24] Brown, G. M., *Nature*, 251 (1974), 592.
- [25] Brown, G. M. and Butcher, E. C., *Planet. Space Science*, 29 (1981), 73.

- [26] Brown, G. M., in STP Proc., ed. by P. A. Simon et al., p. 4, (1986).
- [27] Brown, G. M., in Solar-Terrestrial Predictions Proc., ed. by Donnelly, R. F., p. 284, NOAA, Boulder, Vol. 2, (1979, 1980).
- [28] Wood, K. D., *Nature*, 240 (1972), 91.
- [29] Dingle, L. A. et al., *Solar Phys.*, 31 (1973), 243.
- [30] 董士仑、林柏森, 北京天文台台刊, (1973), No.2, 55.
- [31] 杨志根、赵 铭, 天文学报, 29 (1988), 297.
- [32] Landscheidt, T., *J. Interdisc. Cycle Res.*, 12 (1981), 3.
- [33] Landscheidt, T., in STP Proc., ed. by P. A. Simon et al., p. 48, (1986).
- [34] 赵福民、蒋明汉, 空间科学学报, 5 (1985), 237.
- [35] 宋 谊、紫金山天文台台刊, 7 (1988), 46.
- [36] Brown, G. M., in STP Proc., ed. by P. A. Simon et al., p. 1, (1986).
- [37] Warwick, C. S., *Astrophys. J.*, 141 (1965), 500.
- [38] Verma, V. K. et al., *Solar Phys.*, 112 (1987), 341.
- [39] 范岳华等, 北京天文台台刊, (1976), No. 7, 51.
- [40] 王家龙等, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 34.
- [41] Guo, Q, in Solar-Terrestrial Predictions Proc., ed. by R. F. Donnelly, p. 168, NOAA Boulder, Vol. 1, (1979).
- [42] 艾国祥等, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 27.
- [43] Tang, F., *Solar Phys.*, 89 (1983), 43.
- [44] Gaizauskas, V., *Adv. Space Rev.*, 2 (1983), 11.
- [45] 曹天君等, 天文学报, 21 (1980), 349.
- [46] Musman, S. A. and Altrock, R. C., *J. Geophys. Res.*, 83 (1987), 4817.
- [47] 李 威, 北京天文台台刊, (1984), No. 4, 42.
- [48] Zhang Bairong et al., in STP Proc., ed by P. A. Simon et al., p. 324, (1986).
- [49] 张桂清, 天文学报, 27 (1986), 327.
- [50] Verma, V. K., *Solar Phys.*, 114 (1987), 185.
- [51] Bai, T. and Sturrock, P. A., *Nature*, 327 (1987), 601.
- [52] Martin, S. F. and Ramsey, H. E., in Solar Activity Observations and Predictions, ed. by P. McIntosh and M. Dryer, p. 371, NOAA, Boulder, (1972).
- [53] Martin, S. F., *Solar Phys.*, 68 (1980), 217.
- [54] 云南天文台太阳色球观测组, 云南天文台台刊, (1977), No. 1, 26.
- [55] 罗葆荣, 天文学报, 23 (1982), 95.
- [56] 王家龙等, 天体物理学报, 6 (1986), 26.
- [57] 王家龙等, 空间科学学报 7 (1987), 247.
- [58] Cheng, C. C. et al., *Astrophys. J.*, 298 (1985), 887.
- [59] Wang, J. L., Chinese SGD, Special Issue 2 (1989), 42.
- [60] 尹其半, 北京天文台编, 太阳物理中若干问题调研报告, p. 1, (1972).
- [61] 朱祖彦等, 天文学报, 25 (1984), 401.
- [62] Krivsky, L., in Solar Activity Observations and Predictions, ed. by P. McIntosh and M. Dryer, p. 389, NOAA, Boulder, (1972).
- [63] 董士仑等, 北京天文台台刊, (1979), No. 1, 8.
- [64] 中国科学院北京天文台太阳室, 天文学报, 15 (1974), 40.
- [65] 张柏荣、张 衡, 云南天文台台刊, (1981), No. 3—4, 70.
- [66] Vorpahl, J. A., *Solar Phys.*, 28 (1973), 115.
- [67] 丁有济等, 天文学报, 17 (1976), 60.
- [68] Ding Youji and Zhang Bairong, in Solar-Terrestrial Predictions Proc., ed. by R. F. Donnelly, p. 40, Vol. 1, (1979).
- [69] 张桂清等, 天文学报, 25 (1984), 31.
- [70] Guo Quanshi et al., in Proc. Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanet. Travelling Phenomena, ed. by de Jager, C. and Chen Biao, p. 642, Science Press, Beijing, (1985).
- [71] Wang Jialong et al., Chinese SGD, Special Issue 1 (1986), 10.
- [72] 朱祖彦, 紫金山天文台台刊, 7 (1988), 151.
- [73] Severny, A. B., *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, 22 (1960), 12.
- [74] Severny, A. B., *Ann. IQSY*, 3 (1969), 11.
- [75] 马 驷、艾国祥, 天文学报, 20 (1989), 374.

- [76] 艾国祥, 孔繁熙, 天文学报, 23 (1982), 211.
- [77] 杨自强等, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 46.
- [78] 张柏荣, 云南天文台台刊, (1979), No. 3, 18.
- [79] 董士仑等, 北京天文台编, 太阳物理和射电天文座谈会报告选编, 第 32 页, (1973).
- [80] Kumagai, H. in STP Proc., ed by P. A. Simon et al., p. 170, (1986).
- [81] Paszkiewicz, E., Ibid., p. 306.
- [82] Gold, T. and Hoyle, F., M. N. R. A. S., 120 (1960), 8.
- [83] 胡文瑞, 中国科学, (1977), No. 1, 69.
- [84] 吴林襄, 胡文瑞等编著, 太阳耀斑, 北京, 科学出版社, (1983).
- [85] Ding, Y. J. et al., Chinese Astron., 2 (1978), 218.
- [86] Yang, H. S. et al., Solar Phys., 84 (1983), 139.
- [87] 王家龙, 中国科学, (1985), No. 9, 840.
- [88] 林元章, 天文学进展, 4 (1986), 91.
- [89] Marters, M. J. et al., in IAU Symposium, No. 43, p. 435, (1971).
- [90] Zirin, H. and Tanaka, K., Solar Phys., 32 (1973), 173.
- [91] 李 京, 太阳联测资料会议文集, (1989), 待出版.
- [92] 李 威, 同上.
- [93] 胡文瑞, 空间物理论文集, 第 88 页, 科学出版社, (1980).
- [94] Su Qingrei, Solar Phys., 75 (1982), 229.
- [95] Gu Xiaoma et al., Solar Phys., 87 (1983), 155.
- [96] Ding Youji et al., in Proc. Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanet. Travelling Phenomena, ed. by de Jager, C. and Chen Biao, p. 673, Science Press, Beijing, (1985).
- [97] Lin Yuanzhang and Gaizauskas, V., Solar Phys., 109 (1987), 81.
- [98] 范大雄, 天文学进展, 5 (1987), 272.
- [99] 崔振兴, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 70.
- [100] 张柏荣, 云南天文台台刊, (1978), No. 1, 8.
- [101] Sawyer, C. et al., in Solar Flare Prediction, p. 99, Colo. Assoc. Univ. Press Boulder, (1986).
- [102] Kuklin, G., in STP Proc., ed. by P. A. Simon p. 154, et. al., (1986).
- [103] Kiplinger, A. L. et al., Bull. A. A. S., 16 (1984), 891.
- [104] Hudson, H. S., Adv. Space Res., 4 (1984), No. 8, p. 113.
- [105] Frohlich, C., Adv. Space Res., 4 (1984), No. 8, p. 117.
- [106] Frohlich, C. and Eddy, J. A., Adv. Space Res., 4 (1984), No. 8, p. 121.

(责任编辑 林一梅)

On Solar Activity Predictions

Wang Jialong

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Zhang Bairong

(Yunnan Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

A brief review of solar activity predictions is presented in this paper. In addition to a short description of solar prediction methods, improvement problems of these kinds of solar forecastings are discussed. Pointed out are that (1) for long-term solar predictions the improvement should be done by developing new methods under help of clear physical ideas rather than doing more so called pure statistics, (2) for medium-term predictions the improvement should be done firstly by digitizing the known rules and knowledge about solar active regions and (3) obviously, short-term solar predictions are now faced to transform predictional skill of individual forecasters into an objective forecasting method. It is believed that, on the other hand, space and multi-wavelength observations and physical research of solar cycles, active regions and flares are strongly needed for solar predictions with a high quality. In the second part of the paper the evaluation of a prediction, the present situation of solar predictions over the world and what should be done in a forecasting centre are discussed briefly.

PSR 0535-69——新发现的 SN1987A 亚毫秒光学脉冲星

陆 谈

(南京大学天文系)

提 要

本文对最近(1989年1月)在大麦哲伦云中著名超新星 SN1987A 内发现的一颗亚毫秒周期的光学脉冲星及其引起的研究热潮作了比较系统的评述。首先比较详细地给出了这颗脉冲星的基本观测事实和数据,然后分析了两类可能的理论模型——自转模型和振荡模型。也讨论了这颗脉冲星究竟是不是在这次超新星爆发时产生的问题。并且还讨论了这颗脉冲星对 neutron 星物态所能给出的信息,以及它的 γ 射线光度的理论估计。

一、PSR0535-69 的发现

1987年2月23日, Shelton, Nelson 和 Jones 在大麦哲伦云中发现了一颗超新星爆发^[1], 它被命名为 SN1987A。虽然每年都可以发现若干颗超新星爆发事例, 但这样的近距离超新星爆发却是近四百年来的第一次。超新星爆发包含有十分丰富的物理过程, 但只有近距离事例才能提供详细的数据资料。然而, 四百年前的科学技术水平是十分低的。因此, 人们对 SN1987A 的观测研究给以极高的热情。

SN1987A 的前身是一颗蓝超巨星 Sk-69 202(还有两个暗伴星), $m_V \sim 12.24$ 。爆发后一天, V 星等达到 4.5, 三个月后达到峰值, 成为一颗三等星。随后, 光度开始下降, 到 1989 年 1 月 17 日, 已经降到 11.5 等^[2,3]。

实际上, 在光学上发现超新星爆发前几个小时, 日本的 Kamioka^[4] 和美国的 IMB^[5] 两个小组几乎同时记录到中微子暴。在 1987 年 2 月 23 日 7 时 35 分(世界时), 前者在 13 秒钟内观测到 11 个中微子, 后者在 6 秒钟内观测到 8 个中微子。实际上, 宣称观测到中微子暴的还有苏联的 Baksan 小组以及较之早 4 个多小时记录到中微子暴的意大利 Mt. Blanc 小组^[6], 不过这两个小组的数据不如前两个小组的可靠。中微子暴是在星体坍缩到 neutron 星的过程中释放出来的。计算也表明, 坍缩到 neutron 星所释放的引力能, 与中微子暴带走的能量相一致^[7]。一则表明中微子带走的确实是能量的主要部分, 二则表明确实形成了 neutron 星。

从光谱观测分析也表明 SN1987A 是属于 II 型超新星的, 含氢量很高, 应当有 neutron 星形成。

这些都有力地暗示 SN1987A 爆发时应当生成一颗脉冲星。日本 X 射线卫星“银河 (Ginga)”观测了 SN1987A 的低能 (6—16keV) 流量, 似乎也暗示存在一颗脉冲星^[8]。

正因为种种迹象均表明 SN1987A 内应当有一颗脉冲星, 人们就一直在试图寻找这颗星。终于在 1989 年 1 月 18 日, 在 SN1987A 位置上, 发现了一颗亚毫秒光学脉冲星。^[9,10] 这颗脉冲星的基本观测事实为:

1. 这是一颗光学脉冲星, 是用智利托洛洛山美洲天文台 (Cerro Tololo Inter-American Observatory) 的 4 米望远镜观测到的。观测时间为 1989 年 1 月 18.1 日 (世界时) 起的 7 个小时。这时, SN1987A 的年龄为

$$\tau = 695 \text{ 天} = 6.0 \times 10^7 \text{ s} \quad (1)$$

其 V 星等为 11.5。

2. 光学脉冲的频率为

$$f = 1968.629 \text{ Hz} \quad (2)$$

即周期为

$$P = 0.5079677 \text{ ms} \quad (3)$$

3. 7 小时的观测数据分成 15 个组, 除 3 个组不完全外, 其他每组均为半小时, 每个数据取样时间为 0.2ms。每组数据均独立进行分析。发现脉冲频率经地球自转和绕日运行的 Doppler 效应修正后存在着很好的正弦调制 (见图 1)^[10]。图的上部为观测到的频率的原始数据, 图的下部为经地球自转和绕日运行修正后的结果, 显现出好的正弦调制。最小二乘法拟合给出:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{频率调制幅度 } \delta f = (1.5 \pm 0.3) \times 10^{-3} \text{ Hz} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{调制周期 } P_0 = (8 \pm 1) \text{ h} \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{周期变率 } \dot{P} < 3 \times 10^{-14} \text{ s/s} \end{array} \right. \quad (6)$$

4. 光学脉冲的亮度在 7 小时的观测时间内就有明显变化, 从 19 等上升到 18 等 (见图 2^[10]), 与超新星亮度相比, 约相差 7 个星等。作为对照, 蟹状星云和其脉冲星的亮度分别为 8.6 和 16.6, 相差 8 个星等。除图 2 中所示的误差之外, 还可能有 ± 0.5 等的系统误差。

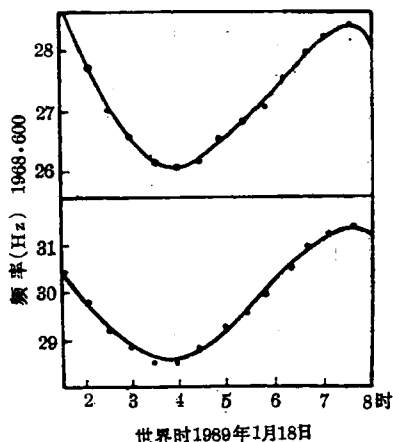


图 1 频率随时间变化

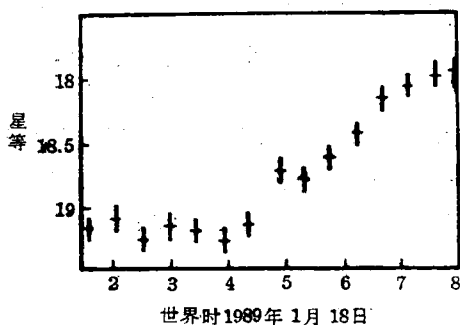


图 2 亮度(星等)随时间变化

5. 头三个谐频(f , $2f$, $3f$)处之幅度比约为 1:1.8:1.6, 可见谐波含量颇为丰富。不存在高于基频幅度 3% 的子谐频含量。作为参照, 蟹状星云脉冲星的头三个谐频处的幅度比为 1:1.8:1.1, 两者相近。

6. 12 天后(1989 年 1 月 31 日)用 2.5 米望远镜却没有观测到这颗脉冲星。2 月 14 日和 15 日欧洲南方天文台(ESO)用 3.6 米望远镜, 以每秒 10^4 次(取样时间 $\sim 0.1\text{ms}$)的测量速度, 也没有发现它^[11], 也就是说, 亮度当比 20 等更暗。以后还用不同望远镜作过多次观测, 也还没有发现它。

由于观测到的信号很强, 而且经反复检验不是仪器的差错, 应是来自 SN1987A 的真实信号。别的望远镜在别的时间没有观测到它, 通常被认为是信号被超新星膨胀气壳(包括尘埃)吸收的缘故。超新星爆发不过两年, 浓重气壳远未走散, 构成了近于阴天的“多云天气”。1 月 18 日的发现可能是碰巧遇上了云缝露光。事实上, 7 个小时的观测时间内亮度竟变化了一个星等($19^m \rightarrow 18^m$), 很可能就是这种多云天气的反映。

二、自 转 模 型

所有已知的四百多颗脉冲星, 脉冲周期都是中子星自转的反映。所有单个脉冲星的周期都在变长, 就是说自转都在减慢。因此, 早期脉冲星的周期往往是很短的。人们自然地也把 0.5ms 看作是脉冲星的自转周期, 而其发现的那一天的年龄 $\tau = 695$ 天。

用简单磁偶极模型来估算脉冲星表面磁场, 应有

$$B_{12} \approx (P \dot{P}_{16})^{1/2} \quad (7)$$

其中 B_{12} 为以 10^{12}G 为单位的脉冲星表面磁场强度, $\dot{P}_{16}$ 为以 10^{-15}s/s 为单位的周期变率 $\dot{P}$ 。据(3)和(6)可知

$$B \lesssim 1.2 \times 10^{11}\text{G} \quad (8)$$

这是据 P 和 $\dot{P}$ 的观测限算出的。可以认为, 这是观测给出的磁场上限的估值。

然而, 中子星磁偶极辐射功率为

$$W_d \approx \frac{32\pi^4 B^2 R^6}{3c^3 P^4} \approx 4 \times 10^{31} B_{12}^2 / P^4 \text{erg/s} \quad (9)$$

这里已取中子星半径 $R = 10^8\text{cm}$, 而其时(1989 年 1 月)光电测光观测表明, 整个 SN1987A 的 V 星等为 11.5, 相当于光度

$$L_{\text{SN1987A}} \approx 2 \times 10^{38} \text{erg/s} \quad (10)$$

我们知道, 蟹状星云自身已无能源, 其全部辐射的能量均来源于其脉冲星的磁偶极辐射。计算与观测的比较也证明, 蟹状星云的总光度基本上等于其脉冲星的磁偶极辐射功率。(10)式给出的只是光学光度。不过, 从 SN1987A 的 V 星等曲线来看(见图 3), 其从 HJD 2446980 至 2447285 期间的曲线是一条直线, 其斜率正好与 Co^{56} 的蜕变一致。这表明, 光学光度主要从 Co^{56} 放出的 γ 射线经多次 Compton 散射热化而来。就是说, (10)式所示的光学光度基本上代表了 SN1987A 的总光度, 脉冲星提供的能量应当小于它, 即

$$W_d < L_{\text{SN1987A}} \quad (11)$$

由此, 可以确定这颗脉冲星表面磁场的上限

$$B < 6 \times 10^8 \text{ G} \quad (12)$$

然而, 至今所知四百多颗脉冲星, 它们年轻时的磁场都高达 10^{12} G 量级。为什么这颗新生脉冲星的磁场竟会如此之弱? 这是难以理解的。有关自转模型的其它问题, 后面还要讨论。

三、振荡模型

为了使这颗新生脉冲星的磁场达到一定强度, 比如仍取

$$B \approx 10^{12} \text{ G} \quad (13)$$

王青德等提出了一个新设想(简称 WCHRS 模型)^[12], 把 0.5 ms 看作中子星的径向振荡周期, 而不是自转周期。这样, 只要其自转周期

$$P_s > 20 \text{ ms} \quad (14)$$

就不会有上述矛盾。

有趣的是, 对于典型中子星, 如 $M \sim 1M_\odot$ 和 $R \sim 10^6 \text{ cm}$, 其径向振荡周期(基波)

$$P \sim (G\rho)^{-1/2} \sim 0.4 \text{ ms} \quad (15)$$

正好与观测值符合得相当好。至于径向振荡的高阶模式和非径向振荡, 由引力、中微子和电磁的辐射引起的衰减时标往往很短, 约短于 1 年^[13-15], 应当衰减掉了。径向振荡基波模式的衰减时标视不同过程而异: 比如, 夸克物质的弱过程引起径向振荡衰减的时标可以短达毫秒级^[16-17]; π 凝聚态弱过程引起的衰减^[16, 18], 时标长些, 但仍甚短, 由小时至天, 远短于 PSR0535-69 发现时的年龄; URCA 中微子发射过程引起的衰减, 时标可以长达 $\sim 10^2$ 年^[19]。由此可知, 振荡模型不仅可以解释 0.5 ms 周期的大小, 而且只要此中子星内没有夸克物质和 π 凝聚态, 超新星爆发刚形成中子星时激发起来的径向振荡(基波)模式至今还可以完全没有衰减掉。

中子星的自转与径向振荡相耦合, 可以产生非径向振荡模式, 因而会引起引力辐射。这种引力辐射引起的振荡衰减时标为 $\sim 2 \times 10^3 P_s^4 \text{ 年}$ ^[20], 这里 P_s 为以秒为单位的自转周期。为不使径向振荡通过这种方式被衰减掉, 就要求其自转周期

$$P_s \gtrsim 0.1 \text{ s} \quad (16)$$

当振荡传播至密度和声速陡然下降的星体表面薄层时, 会形成激波波前。在激波加速下, 粒子会达到很高能量。如果观测到的光学脉冲来自电子的同步加速辐射, 为使这种辐射在光波段, 磁场必须很低。事实上

$$B \sin \alpha \sim 2.4 \times 10^7 \epsilon_{\text{eV}} E_{\text{MeV}}^{-2} \text{ G} \quad (17)$$

式中 α 为电子运动与磁场的夹角, ϵ_{eV} 为以 eV 为单位的峰值光子能量, E_{MeV} 为以 MeV 为

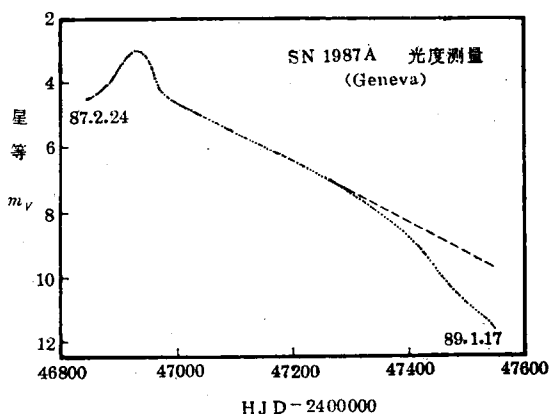


图 3 SN1987A 的 V 星等曲线

单位的电子能量。一般说来, 电子能量是十分高的。为使有足够的辐射落在光学波段, ε_{ev} 不能比光学光子能量高很多, 因而磁场必须十分弱。可见, 光学脉冲不可能来自电子的同步辐射。

有趣的是, 王青德等指出, 对于重离子, 如 Fe^{+26} , 由于仍处于非相对论情形, 其辐射主要是回旋辐射, 磁场与光子能量 ε 的关系为

$$B = Mc\varepsilon/\hbar Q \\ \sim 0.3 \times 10^{12} (A/2Z) \varepsilon_{\text{ev}} \text{G} \quad (18)$$

这时, 磁场就可以很强, 可以取 $\sim 10^{12} \text{G}$ 。式中 M 为重离子的原子质量单位, Q 为其电荷。因此, 在 WCHRS 模型中, 中子星的磁场在 10^{12}G 量级, 而铁离子的回旋辐射正好可以提供产生光学脉冲的机制。

由于光学脉冲中含有丰富的谐波, 脉冲一定很窄。在 WCHRS 模型中, 这是通过假设发射区域很小(星体表面薄层)来实现的。由于头三个谐波幅度观测比值为 1:1.8:1.6, 与蟹状星云脉冲星的相应比值 1:1.8:1.1 接近, 表示其波形很可能具有类似的双峰结构^[10]。这一点可能在振荡模型中不易解释。

后来, Tsuruta 也在振荡模型的基础上提出了另一种设想^[21]。这种设想基于如下考虑: 超新星爆发时早期抛出的一些物质, 速度低于逃逸速度的还会再掉回来。假设这种下落吸积发生于 Eddington 极限附近, 吸积流内区处于双温相, 有均分磁场。这种磁化吸积流中会有电子回旋辐射。由于涉及的是电子, 这个模型仍然要求低磁场。

四、老中子星模型

迄今所知所有脉冲星的脉冲周期都是中子星自转的反映。对于 PSR0535-69, 把 0.5ms 视为它的自转周期的主要问题在于要求其磁场很弱, 而弱磁场的年轻脉冲星, 至今还未见到过先例。但是, 自然界确实存在着一类快速自转的弱磁场脉冲星, 这就是双星起源的毫秒脉冲星。这是一类老年脉冲星。要把 PSR0535-69 归入这一类, 除非放弃它形成于 SN1987A 爆发过程的观点而假设它在 SN1987A 爆发前早就存在。由于这一类可以自然地解释弱磁场, 我们认为这个假设是值得认真研究的。其实, 我们在 1989 年 3 月份就研究了这个问题^[22]。就是说, 我们假设 1987 年 2 月爆发的超新星 SN1987A 并不是形成了 PSR0535-69 这颗脉冲星, 而是形成了它的伴星。下面简略地讨论这个问题。

首先讨论这个假设是否与现有观测事实矛盾。比如, 既然它是一颗老年脉冲星, 为什么 SN1987A 爆发以前未观测到它? 这是因为以前没有取样时间短于 0.5ms 的测光技术, 脉冲星的存在只能提供一个 18—19 星等的平均亮度, 远暗于蓝超巨星 (Sk-69 202, 12 星等), 难以观测到, 更无法证认为一颗脉冲星。又比如, 这颗脉冲星与蓝超巨星构成的系统可能是一个 X 射线源, 为什么爆发前人们未发现? 究其原因, 是因为这种系统一般吸积较弱, 且系较远的河外源, 其附近又存在着强 X 射线源 (LMC X-1 和 PSR0540-693), 因而极难发现。

在这个模型中, 8 小时正弦频率调制自然可以解释为 PSR0535-69 与 SN1987A 爆发时形成的新生中子星之间的轨道运动的反映。由于 8 小时调制是很好的正弦调制, 双星轨道应