

汪克林 戚伯云 张泰永 编

近代物理学展望

1988

中国科学技术大学出版社

近代物理学展望

汪克林 戚伯云 张泰永 编

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号)

中国科学技术大学教务处激光照排实验室排版

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 14 字数: 360千

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷

印数: 1—3000册

ISBN7-312-00086-X/O·39 定价: 4.40元

序

这册论文集是由中国科学技术大学物理学教师们在教学过程中探讨关于近代物理学前沿的一些问题的成果，并在1987年利用暑假在黄山开设讨论班公开发表后编写而成的。

大学教师在教学之际，探讨并研究该学科前沿问题使自己和当前学术动态紧密接触不断丰富自己的知识，并且把这些新知识纳入教学之中，使学生也能窥测到这一学科前沿动态，激发他们求知欲望。这样做对教师与学生、教学与科研都有极大益处，是学校的教学与科研得到不断发展的重要途径。

论文集收集了十一篇当今物理学中的前沿学科。现在人们喜欢把一学科分成基础和应用两类。什么叫应用学科呢？在生产实践中能产生实际效果获得经济效益并且立竿见影。什么叫基础学科呢？提高人类对自然的认识，掌握自然界规律，一时间看不出在生产实践中有任何应用价

值。诚然科学的价值观在于“有用”。上面所说的两种科学分类不能断言哪类有用，哪类无用。从总体来看，科学是人类获得力量的途径，是了解自然、支配自然的手段，从而改变我们的物质与精神两方面的生活。一位真诚的科学家必须无条件地欣赏他自己所从事的工作，恰如一位真诚的艺术家在创作过程中，心中只有对他的艺术品的醉心欣赏而没有其它。试问一位真诚的科学家在埋头工作中还会计较他的工作是基础的或应用的吗？

科学的永恒价值在于给人类以知识。

我不知道这十一篇论文是属于基础的还是应用的。但衷心祈求读者展读此卷能获得当今物理学前沿知识，而乐此不疲。

钱临照

1988年9月4日

前 言

1987年8月，中国科学技术大学基础物理中心在安徽屯溪举办了题为《近代物理最新进展》的讲习班。主讲人都是在科技大学从事科研和教学多年、并取得一定成绩的教师。他们就各自熟悉的一些物理学前沿领域，概括了新的研究进展情况，评述了这些进展的意义，并且展望了它们的前景。参加这次讲习班的同志来自全国一百多所高校，研究所和部分重点中学，他们对报告内容产生了浓厚的兴趣，反应十分热烈，并希望将报告整理出版。我们也觉得这些内容对于广大科技工作者、高等院校师生以及中学物理教师了解物理学的最新发展会有所帮助，因此请报告人对报告内容进行了整理和必要的补充，组成了现在与读者见面的这本书。

本书虽定名为《近代物理学展望》，但所涉及到的前沿领域还是有限的，我们希望今后还能把这项有意义的工作继续作下去，撰写者的范围也能扩大。

今年正值中国科学技术大学成立三十周年，我们谨以本书作为向校庆的献礼。

参加本书讨论和审校的还有程福臻、谢行恕、曹烈兆、李福利、谢建平、付竹西、顾一鸣等同志，在此向他们表示谢意。

汪克林 戚伯云 张泰永

目 录

序	I
前言	II
超新星 1987A 及中微子	方励之 1
基本粒子物理学.....	朱栋培 25
核物理的进展和现状.....	叶云秀 张永德 75
蓬勃发展的等离子体物理学.....	朱士尧 109
高临界温度氧化物超导体.....	张其瑞 151
准晶态物理进展.....	汪克林 杨金龙 183
凝聚态物理的一大发明——量子化霍尔效应...	戚伯云 219
半导体超晶格.....	金怀诚 247
原子物理和分子物理.....	夏宇兴 335
光场的相干性、非线性和量子性.....	郭光灿 375
同步辐射及其应用.....	刘文汉 415

超新星 1987A 及中微子

方励之

1987 年春，是物理学家难忘的。当时，固体物理及材料科学界几乎每天都被高温超导体的新记录所激动，而同时，天体物理学界则被一个罕见的天象所吸引，每天注视着它的变化，这个天象即 1987A 超新星(SN1987A)。



图 1 银河及其周围的矮星系，SN1987A 就在大麦哲伦云中

被命名为 1987A 的超新星，位于南天的大麦哲伦云中（见图 1），住在北天的我们是看不到它的，它的爆发首先被加拿大的天文学家注意。在 1987 年 2 月 24 日散发的国际天文联合会的

第 4316 号天文电讯中，有一则消息：

据 *Las Campanas* 天文台的
W.Kunkel 及 *B.Madore* 报告，多伦多大
学的 *I.Shelton* 发现了一颗星等为 5 等的
天体，它在大麦哲伦云中，看上去是颗超
新星……

随后的两天，至少有九个望远镜指向这颗星，证实它的亮度继续增加，成为 4 等星，是一颗超新星。它的精确位置是：赤经 $5^{\text{h}}35^{\text{m}}50^{\text{s}}$ ；赤纬 $-69^{\circ}17'59''$ ，在爆发之前，它可能只是一颗 12 等的暗星。

目前，许多天文台取消了原订的观测项目转而跟踪这个爆发。国际天文紫外卫星 (IUE)，日本银河 X 射线卫星等地外观测设备，也对准 SN1987A。明年将召开的国际天文联合会大会，已把 SN1987A 列为重要议题，不少理论天体物理学家企图一显身手。甚至，公众的传播媒介也不遗余力渲染超新星的神秘，例如美国《时代》周刊，以一个大大“BANG!”来形容这个事件。为什么 SN1987A 有如此的轰动？

历史上的超新星

超新星之所以受到重视，首先是由于它很稀罕。超新星爆发是一颗暗星突然变得非常亮的现象。利用望远镜后，也已记录到不少次这种爆发，但那都在很远的距离上，肉眼是看不见的。肉眼可见的超新星爆发，也就是距离很近的超新星爆发，是很难得的。查遍两年来中国的历史记载，大概只有过 8 或 9 次肉眼可见的超新星，它们都列在表 1 中。

可见，上一次的可见超新星是在 1604 年。也就是说，SN1987A 是 384 年以来距地球最近的一颗超新星。从表 1 还可看到，有的超新星是极亮的。例如，AD1006 的星等达到 -9.5，与满月差不多。据记载，夜间在这颗超新星照耀下，可以看书。

超新星存在的时间不长，短则几个月，长则几年，然后就消失了。

表1 历史上的超新星

爆发年代	位置(星座)	星 等	肉眼可见时间
AD 185	半人马	-8	20月
AD 386	人马	?	3月
AD 393	天蝎	-1	8月
AD 1006	豺狼	-9.5	数年
AD 1054	金牛	-5	22月
AD 1181	仙后	0	6月
AD 1408	天鹅	-3	?
AD 1572	仙后	-4	18月
AD 1604	蛇夫	-2.5	12月

这种稀奇的现象，自然很引人注目。特别，在中国古代，对天象记载更十分重视，留下了不少富有价值的记录。例如，对AD 1054超新星，有以下的记载：

1. 《宋会要》：“至和元年七月二十二日守将作监致仕杨惟德言：‘伏睹客星出现，其星上微有光彩，黄色’”

2. 《宋会要》：“嘉祐元年三月，司天监言：‘客星没’，初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日”。

3. 《续资治通鉴长编》：“至和元年五月己丑客星出天关之东南可数寸，岁余消没”。

4. 《续资治通鉴长篇》：“嘉祐元年三

月辛未司天监言：自至和元年五月，客星
晨出东方，守天关，至是没”。

这些记录的确相当生动，“昼见如太白”“凡见二十三日”。一颗星，白天都能看见，亮了二十三天，怎能不令人惊异呢？

所以，在古代超新星就是非同寻常的事件。当然，古代人注意它，并不全然出于科学，相反，有些是出于迷信——占星术。在表 2 中我们列举了古代占星家对这些超新星所做的占卜。

当然这些占卜本身是没有意义的，但从其占卜涉及的事情之大，可以知道古代人对这种现象有多么重视。

表 2 关于超新星的占卜

超新星	占曰	“应验”
AD 185	为兵	大将军部曲吴国攻杀车骑将军何苗，死数千人
AD 386	有兵有敌	寮、兖，冀常有兵役十二年正月大敌
AD 393	燕兵有丧	慕容垂息宝伐魏，为所破，死者数万人
AD1006	兵凶之兆	天下饥，众庶流亡去其乡
AD1054	主崩	兴宗其死乎至是果验
AD1181	以外变异	不能左右天下大事，举足可待云云
AD1572	上于宫中见之，	微惧，夜露溽于丹陛
AD1604	利玛窦来华，	徐光启改用西法

物理学中的超新星

超新星虽然是少见的天文现象，但是关于超新星的理论却讨论多年了。通行的理论是，超新星爆发是恒星演化晚期的现象。图 2 表示各种质量的天体的演化过程。从中看到，凡是质量约大于 0.1 太阳质量的天体，都要成为恒星，即自身可发光的天体。

光的能源是恒星内部核聚变反应提供的。当恒星核心部分的核能源用尽之后，恒星就进入晚期。这时，由于失去维持恒星平衡的热压力，结果将发生大塌缩。塌缩之后形成致密的天体，即白矮星、中子星及黑洞。对于质量大于5个太阳质量的恒星，在形成致密天体之前，要有一次大爆发，这是由于引力塌缩能变成光能和动能引起的。这就是超新星的来源。所以，超新星其实并不是新生的星，而是临终的星，是临终之前的一次回光反照。同时，超新星的关键也并不是爆发，而是核心的大塌缩。

这种观点最早由 W.Baade 和 F.Zwicky 在 1934 年提出，当时，他们在一篇题为《超新星与宇宙线》的论文中说过：

在每个星系中每几百年要发生一次超新星爆发。一个超新星的寿命大约是二十天，当它们的绝对亮度为极大时……大约为我们太阳辐射的 10^8 倍……我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通星到中子星的过渡。所谓中子星，就是星的最终阶段，它完全由挤得极紧的中子构成。

五十年来，这种超新星学说，已经发展成为相当定量的理论，可是，这些理论都未全面检验过。原因是缺乏机会，“每个星系中每几百年要发生一次超新星爆发”，太稀少了。

当然，利用望远镜可以看到成千上万个星系，也可以看到这些星系中的超新星。根据这些观测也可以检验超新星理论。但是，这些超新星终归太远，只能进行光学观测，而光学方法只能看到超新星外部的爆发，而不能探知内部的塌缩。所以，用光学方法并不能检验有关超新星的关键过程——核心的引力塌缩。

探知星体内部的有效方法，是利用中微子。因为中微子是弱作用粒子，它有极强的穿透本领。哪怕在星体核心产生的中微子，也有可能不经碰撞地穿透到星体之外。因此，这些中微子携带着丰富的有关星体核心的信息。探测太阳中微子工作已二十多年了，已证明它是研究星体内部现象的极为有效的方法。因此，

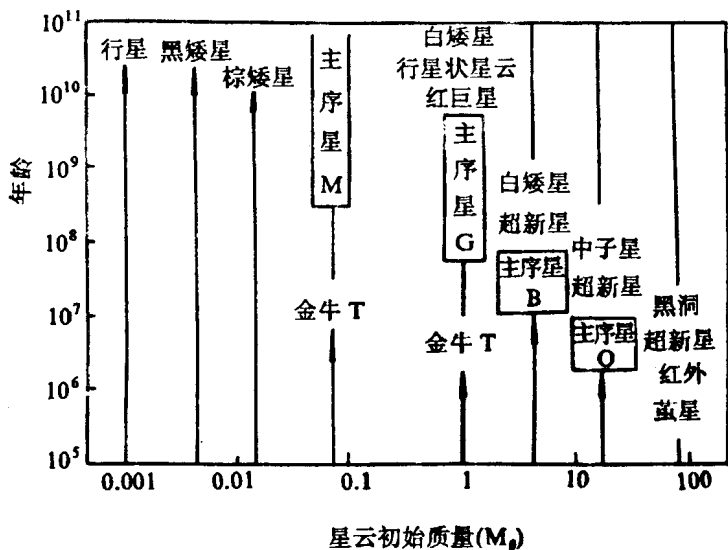


图2 各种质量的星体的演化

大家预期，只有用中微子才能最终检验有关超新星塌缩的理论。

超新星的中微子发射

一个质量为 1 太阳质量的星体核，塌缩到 10 公里大小时所释放的总引力能为

$$E \approx \frac{GM^2}{R} \approx 10^{53} \text{ 尔格} \quad (1)$$

其中 $M \approx 10^{33}$ 克， $R \approx 10$ 公里。但是，由光学测量可知，超新星放出的总光能和总动能都约为 10^{51} 尔格，即比引力小两个量级。因此，超新星塌缩能主要并不是以光能和爆发动能形式放出的。

超新星的能量主要是以发射中微子方式释放的。在引力塌缩过程中，有大量中微子生成。生成中微子的方式有两种，一种是星体物质在变成中子的过程中，有如下的中子化反应



即质子 (p) 与电子 (e^-) 变成中子 (n) 及电中微子 (ν_e)，质量为 $M \approx 10^{33}$ 克的塌缩核中，质子数约为

$$N \approx 10^{33} / 1.6 \times 10^{-24} \approx 10^{57}$$

每个质子在变成中子过程中约放出能量 1MeV。因此，过程 (2) 的中微子带走的能量约为

$$N \cdot 1\text{MeV} \approx 10^{52} \text{ 尔格}$$

另一种形成中微子的方式是热中微子。当塌缩的核心密度变得很高，如高到 10^{11} 克/厘米³ 时，在中心区，即约半径 10 公里的范围内，对中微子也是不透明的。这时，由于电子与中微子之间有以下反应



所以，中微子将参与热平衡。即中微子的密度及能量的分布将由费米分布描写，其温度与电子相同，大约是 5MeV。

热中微子的发射规律与光的黑体辐射规律是完全一样的。黑体辐射强度比例于 T^4 ，T 是黑体，即热平衡的温度。在塌缩核中，中微子温度为 5MeV，即相当于 $T \approx 10^{11}$ 度，比一般星球中光的温度高得多。例如，太阳表面的黑体温度只有 6×10^3 度。因此，热中微子的发射强度极高，绝大部分的引力塌缩能就是被这种中微子带走的。按照 (1)，可以求出，如果每个中微子的能量约为 5MeV (即等于中微子的温度)，则一颗超新星放出的中微子总数可达

$$n_\nu \approx 10^{53} \text{ 尔格} / 5\text{MeV} \approx 10^{58} \quad (4)$$

尽管中微子如此之多，它们的总能量极大，但是，一般不可能在地面探测到中微子，因为它们的截面太小。只有极近的超新星的中微子，才有可能被探测到。

SN1987A 正是这样一颗距离相当近的超新星，它距地球只有 16 万光年。因此，它射到地球上的中微子极多。平均而言，地球上每单位面积上通过的中微子总数为

$$\text{地面通量} \approx \frac{n_\nu}{4\pi L^2} \approx 10^{10} / \text{厘米}^2 \quad (5)$$

其中 n_ν 用 (4) 的值, L 取 16 万光年。

更详细的计算结果列于表 3 中, 其中有 SN 1987 A 发射的各种中微子 (即电中微子 ν_e , μ 中微子 ν_μ , τ 中微子及它们的反粒子) 的平均能量及在地面的通量。这样大的通量, 有可能观测到了。

表 3 SN 1987A 发射的中微子

中微子类型	能量 (MeV)	地面通量 ($10^{10} / \text{厘米}^2$)
ν_e	4.7	1.6
$\bar{\nu}_e$	5.0	1.1
ν_μ	10.0	0.8
$\bar{\nu}_\mu$	10.0	0.8
ν_τ	10.0	0.8
$\bar{\nu}_\tau$	10.0	0.8

SN1987A 中微子的观测结果

我们的确收到了来自 SN1987A 的中微子。

在 1987 年 2 月 28 日的天文电讯上, 意大利都灵宇宙地球物理研究所所长 C.Castagnoli 宣布:

在世界时二月 23.124, 勃朗峰中微子观测站探测到中微子信号。信号由 5 个脉冲构成, 能量都高于 7MeV 的阈能, 前后历时 7 秒。

1987 年 3 月 6 日, 他在天文电讯上进一步说

勃朗峰中微子观测站所探测到的 5 个

中微子脉冲的时间及能量分别为

- 二月 $23^d 02^h 52^m 36^s.792$, 7MeV
- 二月 $23^d 02^h 52^m 40^s.649$, 8MeV
- 二月 $23^d 02^h 52^m 41^s.007$, 11MeV
- 二月 $23^d 02^h 52^m 42^s.696$, 7MeV
- 二月 $23^d 02^h 52^m 43^s.800$, 9MeV

这五个中微子可能是人类首次宣称来自超新星的中微子。

表 4 观测到的 SN1987A 中微子

观测站	中微子到达时间	中微子能量范围	中微子数	历时
勃朗峰	$23^d 02^h 52^m$	6—10 MeV	5	7 秒
日本神冈	$23^d 07^h 35^m$	7—35 MeV	11	13 秒
美国 IMB	$23^d 07^h 35^m$	20—40 MeV	8	4 秒
苏联 Baksan	$23^d 07^h 35^m$	12—17 MeV	3	10 秒

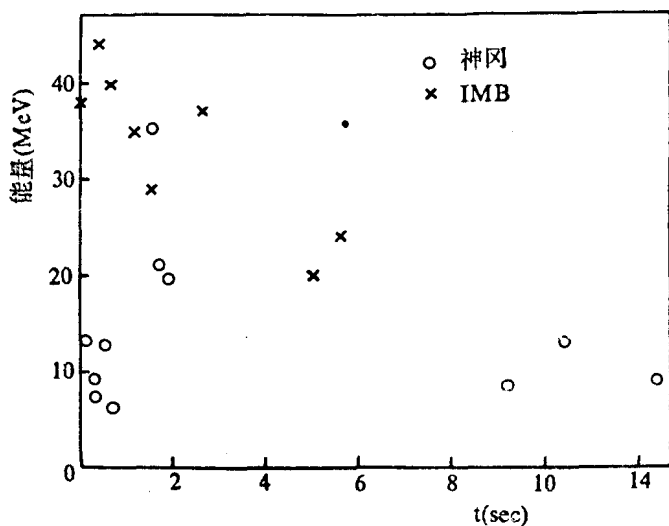


图 3 神冈及 IMB 各中微子的能量及到达时间

随后，日本神冈，美国 IMB，苏联 Baksan 等观测站也都收到了中微子信号。表 4 中列举了有关的数据。图 3 是神冈及 IMB 各中微子能量及其到达时间的分布。

表 4 中总共有 27 个中微子，这个数目虽小，但意义非常重大，它表明太阳系外的中微子天文学从此诞生了。在分析这些数据的意义之前，先来看一看这些中微子是如何被记录到的。

中微子观测站

神冈、IMB、Baksan 等观测站，原来的目的并不是为了观测超新星的中微子，而是为了测量质子的寿命。自从大统一理论预言质子并不绝对稳定以后，有许多小组企图去测量质子的衰变。由于质子的寿命非常长，只有在很深的地下实验室才有可能进行这种实验。这种实验室里排除了绝大部分宇宙线的干扰，可以进行“干净”的测量。然而，这种实验室并不绝对“干净”，因为中微子可以穿透整个地球，所以，也可以干扰地下实验室的测量。正因此，对于测量质子寿命而言，中微子信号一直被看做不受欢迎的东西。至今，质子寿命实验尚无定论，但这些“不受欢迎”的中微子信号却已开创了一个新时代——中微子天文时代。无心插柳柳成荫了！现在世界上的各个地下实验室，都已调正了研究方向，反客为主，把探测天外中微子作为主要任务之一了。

图 4 中画出地球上现有的地下观测站的位置。它们大都设置在一些废弃的矿井里。如日本神冈是铅锌矿，印度 Kolar 是金矿，美国 IMB 是盐矿，Soudan 是铁矿，Siverking 是银矿，Homestake 是金矿。欧洲的几个观测站不在矿井下，而是在山洞里，Frejus 及 Nussex 都在阿尔卑斯山底。意大利的 Grand Sasso，是在亚平宁最高峰 Corno 峰（2914 米）下的山洞里，目前这个实验室正在建设。亚平宁山的最高峰不象阿尔卑斯山的最高峰勃朗峰（Mont Blanc）那样出名，但它也是一个有名的历史事件发生地。1943 年春天，墨索里尼被废黜后就拘禁在这山

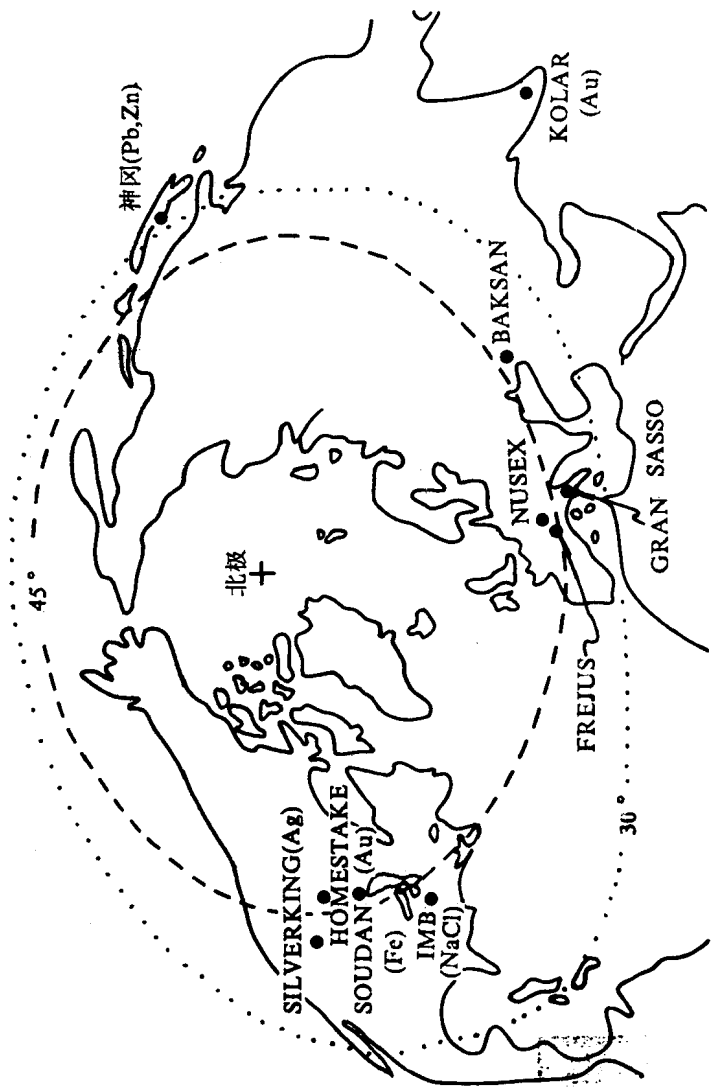


图 4 中微子观测站在地球上的分布