

# 天体粒子物理——天文学与粒子物理学的交叉\*

顾以藩

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 天体粒子物理是一个正在迅速成长中的交叉领域.文章介绍了这个学科的若干近期进展.限于篇幅,选择讨论的内容涉及暗物质与残骸粒子、中微子天文学、 $\gamma$ 射线天文学、宇宙线、宇宙微波背景与暴胀、早期宇宙等.

**关键词** 天体粒子物理,暗物质,中微子, $\gamma$ 射线,宇宙线,宇宙微波背景

## ASTROPARTICLE PHYSICS——THE INTERFACE BETWEEN ASTRONOMY AND PARTICLE PHYSICS

GU Yi-Fan

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract** Astroparticle physics is a rapidly growing interdisciplinary area which has seen dramatic breakthroughs and spectacular discoveries in the past few years. Recent advances in this area are reviewed, but due to length limits only selected topics are covered, including dark matter and relic particles, neutrino astronomy,  $\gamma$  astronomy, cosmic rays, cosmic microwave background and inflation, and the early universe.

**Key words** astroparticle physics, dark matter, neutrino,  $\gamma$  rays, cosmic rays, cosmic microwave background

### 1 引言

天文学和物理学的交互作用有着十分悠久的历史.天文学的产生远远早于物理学.天文学通过展现星体运动的简单性之美孕育了物理学,物理学是从理解星体之间的运动规律而发端的.在物理学诞生以后的数百年里,我们见证了它与天文学在交互作用中的蓬勃发展.20世纪以来的前几十年里,物理学与天文学(天体物理、宇宙学)似乎渐行渐远:天体物理和宇宙学研究恒星、星系和宇宙本身的起源、性质与演化,面对的是自然界中的最大尺度的物质形态,物理学则迈进了物质世界的更深层次,相继出现了原子核物理和粒子物理,后者以自然界的最小物质单元作为研究对象.然而到了20世纪50年代前后,天文研究中宇宙大爆炸模型——宇宙学的标准模型发展起来,由于获得强有力的实验佐证而被广泛承认.20世纪60—70年代间,粒子物理研究也出现了重大转机,建立了粒子物理标准模型,其惊人的成功为随后的大量实验所反复展示.人们开始认识到,两个如此极端的研究领域竟有着紧密的联系,彼此之间日益表现出了相互依存的性质.到了20世纪80年代,天体粒子物理或称粒子天体物理作为一门

崭新的交叉分支学科基本形成.

天体粒子物理将天文学与粒子物理在研究的对象、内容以及实验方法等方面结合起来.粒子物理的理论成果和观测手段帮助天文科学工作者以新的思维和方法去认识和推断宇宙(特别是早期宇宙)现象,天体物理和宇宙学则把粒子物理工作者从加速器实验室引向了浩瀚空间,大大纾解了粒子物理在发展过程中近年来日益增长的危机感.

不可否认,自从标准模型建立以来,粒子物理学继续取得了很大成绩.实验上,在20世纪70年代 $J/\psi$ 和 $\tau$ 轻子发现以后,新的重要成果不断出现,诸如确认了第三代夸克( $b, t$ ),完成极化电子在氦核上的散射实验,证明了 $SU(2) \times U(1)$ 是电弱理论所需要的规范群,证实中间玻色子( $W^\pm, Z$ )的存在,等等;但是,所有这些结果都只是检验了标准模型却非真正独立的实验发现,新物理久盼不至.理论上,虽然许多超出标准模型的精彩思想已经提出来了,例如

\* 2002-03-07收到

本文是作者在1998年全国高能物理大会报告<sup>[1]</sup>“天体粒子物理展望”内容的基础上写成的,根据美国Snowmass 2001 P4工作组的总结报告<sup>[2]</sup>以及其中所引文献提供的资料作了相应补充与更新.

基本相互作用的进一步统一(所谓大统一)费米子与玻色子之间的对称性质(即超对称性)和基本粒子非类点结构(弦理论及 M 理论)等。但是,所有这些思想还没有一个得到了实验事实的验证和支持。

粒子物理面对的隐忧基本上可以归因于高能粒子加速器不确定的发展前景。粒子物理长期以来的发展主要依赖于加速器提供越来越高的能量条件并保证从事精细实验的环境,高能物理早已成为粒子物理的同义词,高能也始终是粒子物理向前发展的一个主要前沿。但是,我们目前正在进入的只是 TeV 即  $10^3 \text{ GeV}$  ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) 能区,而理论上预期相应于量子引力的能量尺度是普朗克能量,即  $10^{19} \text{ GeV}$ 。 $10^3$ — $10^{19} \text{ GeV}$  能区的实验条件需要落实。专业人士指出,自从回旋加速器发明以来的 70 年间,高能前沿基本上是按照指数曲线上升的;循此外推,到 2086 年左右可以达到普朗克能量。可是沿用已知的加速方法,能量超出  $10^5 \text{ GeV}$  将是困难的。因此,在一些人中间甚至出现了这样的悲观论调:如果没有新的加速方法发明出来,粒子物理将在 2025 年宣告终结。

粒子物理学的未来发展很可能会证明此类担忧并无必要,然而我们必须加紧开展关于新加速器原理的探索性研究。正是在这种前景很不明朗的情况下,宇宙实验室的意义就格外凸现出来。与 20 世纪 30 年代在宇宙线中发现正电子和  $\mu$  子的时候相比,今天宇宙间多种多样的粒子源与辐射源在宽广的能量范围里被揭示出来,人们更有条件也必将更加自觉地利用这个天然实验室,把握它所提供的探索新物理的极好机会。

本文尝试对天体粒子物理领域的现状做一个简单的介绍,重点放在最近出现突破的若干研究课题以及近期有望取得重要进展的实验项目。鉴于这个领域涉及的内容十分丰富,限于篇幅,难免主观偏废,一些重要的方面例如引力辐射、宇宙参数及结构形成等实验与理论研究课题均未涉及。有兴趣的读者不妨在本文的基础上,根据所引参考文献中提供的有关资料对相应课题作进一步的深入了解。

## 2 暗物质与残骸粒子

自从 20 世纪 30 年代因星系团的观察而首次提出暗物质的问题以来,有关暗物质的证据稳步增加。暗物质是指既不发射也不吸收电磁辐射而仅能通过引力效应推断其存在于宇宙空间的物质。这类引力

效应可以在广泛的距离尺度上观察到:从个别星系,到超星团,到在极大的可观察尺度上的质量流。暗物质区分为两种:重子暗物质,由看不见的重子组成(包括恒星坍缩形成的黑洞);非重子暗物质,可以包括有质量的中微子或尚未发现的粒子或场(包括原初黑洞)。直接测量暗物质并确定它的本性是当前宇宙学遇到的最重大挑战之一。这同时也有可能向粒子物理提供奇特物态的新信息。

迄今为止,已经积累了许多重子暗物质的证据。宇宙质量密度最可靠的测量来自可以观察到的最大的平衡结构——星系团。采用多种方法(引力透镜,维里分析、来自星团内气体的 X 射线)的测量都显示质量密度无法仅用大爆炸核合成和氦(及其他轻元素)的原初丰度测量结果所得出的重子密度给以解释。遥远超新星与宇宙背景辐射的近期观测结果合在一起指出宇宙是平坦的,其中 30% 的能量密度来自非相对论性物质,而仅有 4% 来自重子。这同星团以及大爆炸核合成的测量结果是一致的。

现在还没有任何观测能够确定暗物质的具体成分,只是提出了若干可能的候选者。除了少数重子暗物质其候选者可能是称为大质量天体物理致密晕物体(MACHO)的各种物质外,非重子暗物质依其在宇宙水平线封闭足够物质而形成星系之际是否为相对论性而区分为热冷两类暗物质。中微子被考虑为热暗物质的一个候选者,设想中的冷暗物质候选者则是具有弱作用的有质量粒子(WIMP),其中讨论较多的是轴子和最轻的超对称性粒子——中性微子(neutralino)。这两种暗物质候选者均来自粒子物理的理论假设,任何一种的确认都会成为超出标准模型的重大发现。

WIMP 产生在早期宇宙的热等离子体的热平衡中,作为大爆炸后的残骸可能处于星系晕中。具有质量  $10$ — $1000 \text{ GeV}/c^2$  以及弱尺度截面的 WIMP 会以足够数目脱离平衡而具有今天可与临界密度相比较的残骸密度。在这类粒子中主要的而且研究得最多的候选者是最轻的超对称粒子——中性微子。标准模型的最小超对称延伸(MSSM)预言了超对称粒子的存在。中性微子应当是自旋为  $1/2$  的粒子,由于电中性及色中性而与普通物质发生弱作用。理论预期它的质量在几十 GeV 至几百 GeV 之间。发现中性微子并证实超对称性思想对于粒子物理理论发展无疑是重要的。

轴子是一种假设的对称性——Peccei - Quinn 对称性自发破缺的结果,Peccei 和 Quinn 为了解释强相物理

相互作用中不出现 CP 不变性的破坏而建议了这种对称性. 这种粒子也在超对称性及超弦理论中出现. 轴子以玻色凝聚物形式存在于早期宇宙间而始终不能进入热平衡, 在星系形成过程中它布居于星系晕中.

探测 WIMP 的方法可以是寻找这种粒子在银晕中的湮没产物(例如宇宙线中  $\bar{p}$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$  及  $\nu$  等), 也可以测量其在太阳(或地球)中湮没而形成的高能太阳中微子流 ( $E_\nu \geq 1\text{GeV}$ ); 最直接的一种探测方法则是利用 WIMP 在探测器介质原子核上的弹性散射测量反冲核在探测器中的沉积能量(若干 keV). 当前两个最灵敏的实验所得到的结果看来是不一致的. 有中国学者参加的 DAMA 合作组声称在 NaI(Cl) 闪烁体大阵列中观测到中性微子因地球相对于银心(即银河系中心)的微分速率而引起事例率的年调制效应. 但是, CDMS 实验采用更为灵敏的低本底探测器的较小的阵列却未能观察到预期的事例率. 按照理论估计的质量范围, WIMP 还可以在新建的高能加速器上寻找, 这将成为今后一些年里人们关注的实验课题. 已经结束的 LEP 实验给出其质量下限为  $23\text{GeV}$  (95% 置信水平).

轴子是量子数  $J^P = 0^-($ 自旋及宇称)的玻色子, 作为冷暗物质的候选者, 质量应当大约为  $10^{-5} \text{eV}$ ; 由红巨星及白矮星等天体观察结果给出其衰变常数  $f_a$  的下限  $f_a > 10^9 \text{GeV}$ , 根据其质量  $m_a$  成反比的关系, 相应于  $m_a < 0.6 \times 10^{-2} \text{eV}$ . 设想中的这种轴子看来只能到宇宙中寻找. 现在能考虑到的探测轴子的最佳方案是利用其赝标耦合到两个光子的性质. 在强磁场中, 轴子通过 Primakoff 过程转换成为光子, 然后收集在一个可调频的非均匀高  $Q$  微波谐振腔中, 当频率与轴子质量匹配时(16Hz 频率相应于  $4\mu\text{eV}$  质量), 应出现微波功率信号. 实验已对预期质量为  $2.9 < m_a < 3.3\mu\text{eV}$  的轴子模型作出检验并将之排除, 尚未排除的质量范围恰好符合解释暗物质所要求的量级大小. 看来可以预期, 在未来若干年里, 轴子作为暗物质应当或者被观测到或者被确定地排除掉.

### 3 中微子天文学

在地球上可以接受到来自天外各种来源的中微子(neutrino), 它们覆盖了广阔的能谱范围( $10^{-6}$ — $10^{18} \text{eV}$ ), 其中有充塞宇宙间的来自大爆炸的低能“化石”中微子, 有从恒星内部不断产生的约  $1\text{MeV}$  中微子, 有超新星爆发引力坍缩产生的约  $14\text{MeV}$  中

微子, 还有来自非热点源的大于  $1\text{GeV}$  高能中微子、几百 MeV 以上的大气中微子以及 WIMP 在太阳(或地球)中湮没产生的大于  $1\text{GeV}$  中微子等(见图 1). 鉴于中微子的本身性质, 主要是它和物质的作用截面小而穿透能力强, 利用不同来源的中微子开展天文学与粒子物理研究已经成为迅速生长、有着广阔前景的实验领域.

在中微子的各种性质当中, 中微子质量是一个具有重要意义的基本问题. 理论上不排除“最小图像”即不存在右手中微子, 没有超出标准模型的左手中微子相互作用, 因而中微子质量为 0, 混合为 0, 磁矩为 0. 但是, 理论上也没有必定的理由要求中微子质量为 0, 在超出标准模型的若干大统一理论中, 中微子质量不等于 0. 长时期内, 实验上一直未能肯定地排除中微子质量为 0 的可能性. 1998 年日本超级神冈(英文名称 Super-Kamiokande)实验宣称发现了中微子振荡与非零中微子质量的确凿证据.

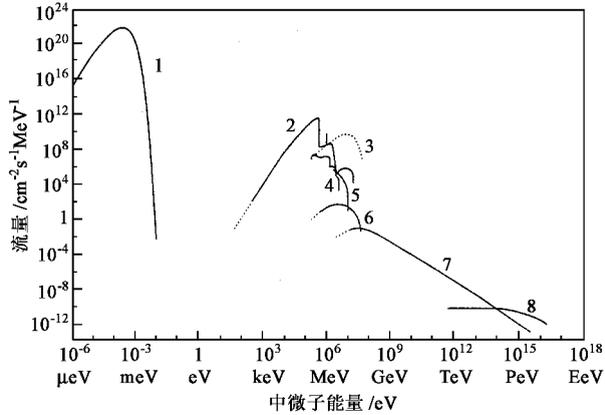


图 1 各种中微子源以及预期到达地球的流量  
 (1 宇宙中微子 2 太阳中微子 3 超新星爆中微子;  
 4 地面反中微子 5 反应堆中微子 6 来自古老超新星的中微子;  
 7 大气中微子 8 来自活动星系核的中微子)

超级神冈实验以其大气中微子信号的天顶角测量提供了中微子不寻常性质的清楚证据. 这个实验把早先水契伦科夫实验所及的中微子测量范围扩展到 GeV 能区, 利用大气中产生的  $\mu$  子中微子与电子中微子的角度关系, 得到了  $\mu$  子中微子振荡转变成  $\tau$  中微子的清晰特征, 其数据精确到可以区别振荡成为  $\tau$  中微子还是成为不活泼(sterile)中微子(理论假设的一种中微子, 因不具有正常的弱相互作用而不与  $Z_0$  粒子耦合)的程度. 不久前, SNO 合作组将中微子引起氦的带电流崩裂与其在电子上的弹性散射数据结合起来, 给出了太阳中微子流中电子中微

子成分的首次测量结果. 他们发现太阳中微子流量是由大约 1/3 的电子中微子和 2/3 的其他味道的活泼中微子所组成的. 通过测量总的太阳中微子流量, 他们还证实了太阳标准模型的预言.

将超级神岗和 SNO 的测量结果结合起来, 可以推断中微子的混合角是相当大的, 不同于夸克之间的混合. 这两个实验还分别对第一代与第二代中微子之间以及第二代与第三代中微子之间的混合角给以相当强的约束; 与此同时, 第一代与第三代之间的混合角大小(用以检验中微子混合矩阵么正性)以及是否存在不活泼中微子并与活泼中微子混合都仍是尚未得到解决的问题. 将许多实验室寻找中微子质量及其混合的结果汇集起来可望对广泛的质量-混合参数空间作出强的约束. 进一步的大气中微子与太阳中微子实验以及其他天体物理源如超新星和河外源的实验也都将有助于对中微子性质作出新的约束.

虽然大气中微子和太阳中微子近年里在中微子天文研究中扮演了中心角色, 在宇宙学与天体物理其他领域里的中微子也发挥了重要作用. 例如, 轻元素丰度观察值和大爆炸核合成的预言相结合, 严格约束了轻中微子的数目; 核合成与超新星中冲激波重加热的资料约束了中微子的质量与混合; 宇宙微波背景与结构形成也有可能对中微子的性质作出约束.

有必要提到超新星中微子的观测. 恒星坍缩理论预言: II 型超新星的引力坍缩过程产生大量中微子, 形成中微子爆发. 1987 年 2 月 23 日超新星 SN1987A 爆发, 4 个分布在亚、欧、美三大洲的地下粒子物理实验装置(神岗, IMB, Baksan 及 Mt. Blanc 探测器)在相同时间内分别记录到了 2—11 个瞬时的中微子事例. 这个历史性事件首次验证了恒星坍缩理论, 宣告了星系中微子天文学的诞生.

从 SN1987A 极其有限的实验数据得出了有关超新星爆发的一系列信息, 包括中微子的流量、平均能量、温度、时间衰减常数、总能量以及超新星爆发辐射总能量等, 均与理论预言较好地一致. 根据这些数据也推导出了以中微子性质为主的若干粒子物理结果, 如表 1 所示. 这些结果生动地反映了超新星中微子观测的很大潜力. 但是, 这次观测毕竟事例数太少, 并且缺乏中微子信号的能谱、时间结构以及不同味道中微子的温度差别等重要数据. 正如 B. Pontecorvo 所说: SN1987A 是一次排练. 它为以后的超新星观测作了准备.

为了开展未来超新星研究, 有必要建立起全球性的中微子天文台观测网, 同时实现中微子与红外线、射电、X 射线、 $\gamma$  射线以及引力辐射的协同监测. 事实上, 这样一个超新星观测计划正在国际范围内逐步实施中. 已经建成和正在建造一批新一代的探测装置, 其测量能力得到完善(多味中微子测量、能谱测量)而工作体积(重量)显著增大. 预期未来银河系中心的一次超新星坍缩在新一代探测器中可以记录最高达到 5000 到 10000 个中微子事例数, 在这种情况下, 可望大大推进 SN1987A 已有测量限值并扩展研究范围. 至于下一次类似 SN1987A 的超新星爆发的时间, 一种比较合理的估计认为产生率大体上是 20 年一次, 有人甚至给出具体年份为公元(2003  $\pm$  15) 年.

表 1 超新星 SN1987A 观测获得的粒子物理结果

中微子质量	$m_{\nu e} < 23\text{eV}; m_{\nu \mu}, m_{\nu \tau} < 25\text{keV}$
$ (v - c)/c $	$< 1 \times 10^{-8}$
中微子磁矩	$\mu < 10^{-12} \mu_B$
辐射衰变寿命	$\tau_{\nu}/m_{\nu} > 2 \times 10^{15} \text{s/eV}$
右手费米常数	$G_{\text{th}} < 0.3 \times 10^{-4} G_F$
轴子质量	排除 $10^{-3} < m_a < 2\text{eV}$

最近几年来, 高能天体物理中微子研究也有了长足进步, 其能量范围从若干 GeV 到 PeV(1PeV =  $10^{15}$  eV). 大洋的水或极地的冰都被直接用来作为体积庞大的中微子望远镜. 高能中微子在这类探测器下面的岩石中发生相互作用, 产生上行的  $\mu$  子, 然后在当作探测器介质的水层或冰层中引发契伦科夫辐射而被记录下来. 近两年来, 运作在南极的 AMANDA 实验已经观察到了大量事例(  $\sim 1$  个事例/天 ). ICECUBE 实验不久将在这个成绩的基础上发展公里级(  $\text{km}^3$  )尺寸的探测器. 高能中微子天文学成为现实的时间已经不远.

高能中微子望远镜对于来自太阳或地球的王IMP 湮没形成的中微子具有一定的灵敏度(在  $\sim 100\text{GeV}$  范围里), 因而提供了寻找暗物质的间接方法. 此外, 任何加速高能粒子的源都应当能够产生高能中微子, 例如来自银河宇宙线或河外超高能宇宙线的高能质子与光子或其他质子发生作用, 产生  $\pi$  介子, 随后衰变成为中微子. 所以, 除了各种大气中微子源以外, 高能中微子源还可能包括活动星系核和  $\gamma$  射线爆发. 高能中微子天文学也因此而提供了观察宇宙的一个独特窗口. 鉴于 TeV 以上中微子能区只是刚刚开发, 未来完全可能出现令人惊奇的重大发现.

## 4 $\gamma$ 射线天文学

$\gamma$  射线天文学是一个正在迅速变化中的领域, 在过去 10 年里取得了大量新的观察结果, 提供了有关宇宙的许多重要信息. 一般地说,  $\gamma$  射线发射和粒子加速场址或大质量态的衰变有着密切的关系.

鉴于  $\gamma$  射线涉及的能量范围很宽, 不能依靠单一的探测技术. 能量小于 10GeV 的  $\gamma$  射线虽然可以从可见宇宙的边缘毫无困难地来到地球, 但是它们在上层大气中发生相互作用而始终不能到达地面, 这就要求以空间为基的探测器, 测量采用(电子)对转换技术获得直接的信息, 并与很大的宇宙线本底分离开来. 对于很高能量的  $\gamma$  射线, 则由初始光子引发空气簇射给出的信息到达地面, 可用以地面为基的设备进行测量. 有两种基本形式的地基探测器: 空气簇射契伦科夫望远镜探测器和空气簇射粒子探测器. 鉴于天体  $\gamma$  射线流量随着能量的增加而急剧跌落(一般表现为按照  $E^{-2}$  关系跌落), 为了在高能量处保证足够的统计性就要求有较大的收集面积. 大面积空基探测器在实验技术上是一项挑战. 所以当前一轮和今后一轮实验的主要目标是要向上推进空基仪器的高能前沿( $\sim 10\text{GeV}$ )以及向下推进地基仪器的低能阈值( $\sim 200\text{GeV}$ ), 从而使其覆盖的能量搭接起来. 地基与空基探测器具有互补的能力. 地基空气簇射契伦科夫探测器通常具有良好的角分辨、低的占空系数、庞大的收集面积、小视野以及良好的能量分辨. 地基空气簇射粒子探测器具有相对差的能量分辨, 但是有大得多的占空系数与视野. 空基探测器具有好的角分布、优异的占空系数、相对小的收集面积、非常好的视野、好的能量分辨和相对小的系统不确定性. 鉴于  $\gamma$  射线天空是极端变化的, 并且横跨了 7 个数量级的能区, 因此这些探测器的同时投入使用是非常必要的. 图 2 表示现有的和计划中的  $\gamma$  射线实验及其覆盖能量与相应灵敏度.

感谢 BATSE, EGRET 和 IACT 等探测器的观测, 迄今已经探测到了 271 个能量在 10GeV 以下的  $\gamma$  射线源, 13 个能量在 200GeV 以上的  $\gamma$  射线源. 需要指出, 这 13 个 200GeV 以上的  $\gamma$  射线源具有不同的确定性, 而 271 个 10GeV 以下的  $\gamma$  射线源中大约有 2/3 尚未与已知的天体对应起来, 这些“EGRET 未证认源”遂成为今后  $\gamma$  射线实验的一项主要研究目标.

河外背景光的测量给出有关星系形成的重要信息, 也是  $\gamma$  射线实验的重要课题. 河外背景光主要产

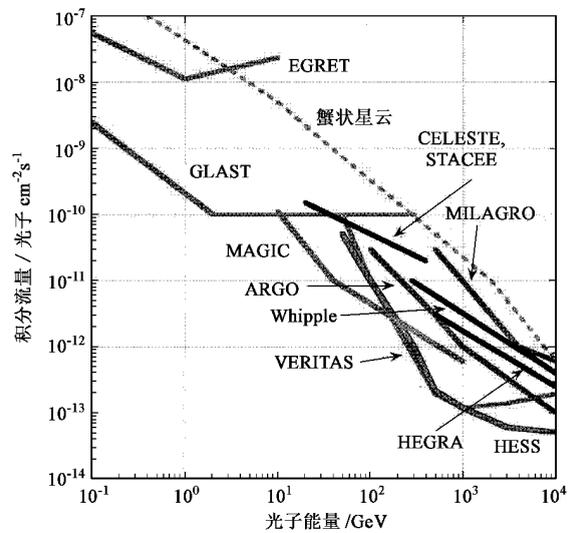


图 2 现有的以及计划中的  $\gamma$  射线实验及其覆盖能量与相应灵敏度

(EGRET——已完成的实验; CELESTE, STACEE, Whipple, HEGRA——运行中的契伦科夫探测器; ARGO, MILAGRO——空气簇射实验; GLAST, MAGIC, VERITAS, HESS——未来的实验)

生于星爆活动, 包括紫外、可见和红波段, 其弥漫场使 10GeV 以上的光子流量由于(电子)对产生而衰减. 不同的模型预言了截然不同的河外背景光密度. 在应用各种能量已知的  $\gamma$  射线点源进行研究时, TeV 能量的  $\gamma$  射线用于研究相对说来处于局部空间的河外背景光, 而 1—100GeV 能量的  $\gamma$  射线则用于研究宇宙距离上的河外背景光密度. 后者正是中间能段探测器 STACEE 及 CELESTE 的主要研究任务.

$\gamma$  射线天空包括一个明显弥漫的、推测为河外的各向同性的流量. 这个流量的起源是一个谜. 不清楚它是否确实是各向同性的, 或是在某个很早的年代产生于星系际空间的, 或是来自大量未能分辨开来的点源的积分流量. 正在建造中的 GLAST 具有大的有效面积和明显改进的角分辨, 应当有能力对此作出回答.

对于这些点源来说, 活动星系核是很好的一个候选者, 它在非常致密的体积内产生出大量功率(某些耀斑据信可达  $10^{45}$  erg/s). 当前一种流行的看法是活动星系核由于吸积到超重量( $10^6$ — $10^{10}$  个太阳质量)的黑洞上而被赋予功率, 可以把它设想成为 TeV 量级高度准直的粒子喷注, 发射出极其多变的  $\gamma$  射线. 下一代空气簇射契伦科夫望远镜(如 VERITAS)具有庞大的收集面积, 因此有能力分辨 15min 以下的这种多变性质, 从而获取有关  $\gamma$  射线发射区域特征大小的信息. 为了检验活动星系核的这种高能发

射模型并对其作出约束,需要联合各种实验装置的能力,以便观察所有波长。

$\gamma$  射线爆发是宇宙间已知最强大的爆发,其起源始终是个谜。现今关于低能下  $\gamma$  爆的表现已经有了比较细致的研究,对其在高能下的表现则知之甚少。这种情况可望在未来几年里明显改进。空气簇射实验 Milagro 已经观察到一个爆发的 TeV 发射,而 GLAST 观测站将能看到数以百计的爆发,其所覆盖的能量范围为 10eV—300GeV。

$\gamma$  射线天文学其他有兴趣的物理课题涉及银河系暗物质、脉冲星、超新星遗迹及宇宙线起源(能量在  $10^{14}$  eV 以下),光子的小速度色散,银河星团发射,原初黑洞蒸发,拓扑缺陷与大爆炸的其他大质量残骸的衰变,以及大额外维数的特征,等等。这里列出的只是我们已经知道的和能够设想到的一些内容。人们预期下一个 10 年里的  $\gamma$  射线天文观测将会出现惊人的意外发现。

## 5 宇宙微波背景与暴胀

Penzias 和 Wilson 发现于 1965 年的宇宙微波背景提供了在未来一些年里了解超高能尺度上新物理的极好机会。在过去两年里,在宇宙微波背景的温度涨落测量方面出现了引人注目的进展,使我们在描述宇宙最大尺度结构、密度扰动起因以及早期宇宙方面的能力有了很大提高。预期今后几年里,最近发射的 MAP 卫星会提供许多改进的结果,而计划在 2007 年发射的欧洲空间局实验 Planck 卫星则会带来更加精确的数据。这两个实验的首要目的是测定宇宙微波背景的功率谱  $C_l$  与多极矩  $l$  的函数关系。结构形成理论预言了功率谱中在  $l$  为 50—1000 范围内一系列凸起结构,其起因是宇宙微波背景光子最后散射之前在重子-光子流体内振荡的结果。这些丰富的结构可以用来同时测定宇宙几何、重子密度、哈勃常数  $h$ 、物质密度、宇宙常数以及原初扰动的谱及其本性(例如绝热、等曲率或拓扑缺陷)。

在过去一两年内,应用不同技术的 3 个独立实验各自以足够的精确度测量了  $l$  在 50—1000 范围内的功率谱,清楚地看到了第一和第二个峰,还看到了第三个峰迹象,如图 3 所示。这些实验堪称为宇宙学中的一个分水岭事件:它们首次指出宇宙是平坦的,而结构是从原初密度扰动的近标度不变谱产生出来的。这两个性质是对暴胀的有力预言,暴胀指的是很早的宇宙受到与超高能物理相联系的真空能

量驱动而加速膨胀的时期。

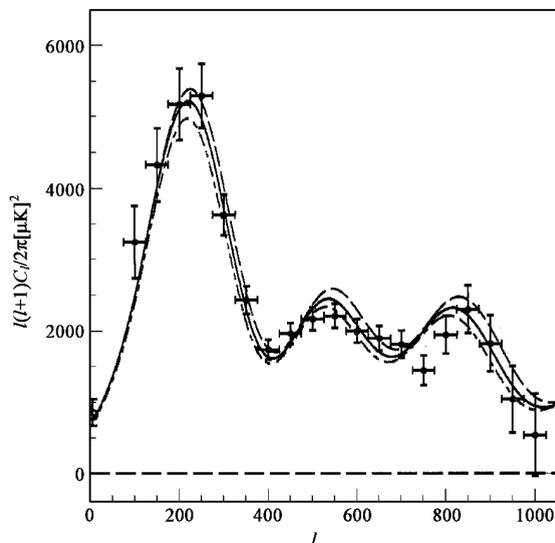


图 3 宇宙微波背景的功率谱测量结果

· 测量结果,曲线代表不同的最佳拟合模型,三家独立的实验得到相似结果

虽然宇宙微波背景的这些近期检验显示我们正走在关于暴胀的正确道路上,我们却仍旧不知道是什么样的新物理使暴胀发生的。各种看起来可能的理论模型可以将暴胀的能量尺度设置在 Planck 尺度和电弱尺度之间任意一处,使其(决定暴胀的标量场)与出现在弦理论、大统一理论、Peccei - Quinn 机制、超对称性破缺以及电弱尺度物理中的新的场联系起来。

为了进一步检验暴胀并测定其能量尺度,引力波背景或许是最有希望的一条途径。暴胀理论预言:暴胀期间在时空度规中的量子涨落导致随机引力波背景的产生而表现为接近标度不变的谱;同时,引力波背景的振幅应与暴胀的能量尺度平方成正比。

这些引力波将在大角度上产生温度涨落。大角度温度涨落振幅的上限已经将暴胀的能量尺度限制到小于  $2 \times 10^{16}$  GeV。但是,由于密度扰动也能产生这样的温度涨落,因此温度涨落不能单独用于探测引力波背景,而需代之以测量宇宙微波背景的偏振。引力波和密度扰动两者在宇宙微波背景中产生线偏振,而各自产生的偏振图样是互不相同的。具体地说,引力波产生带有旋度图样的偏振(密度扰动则与之迥异),而暴胀理论确定地预言这个偏振旋度与暴胀的能量尺度平方相关。

如果像许多理论工作者相信的那样,暴胀与大统一之间存在着一定的关系,则可以设想偏振信号

能够被下一代的宇宙微波背景实验所探测(如果暴胀的能量尺度明显低于大统一尺度,则偏振信号可能因太小而无法测量)。虽然 MAP 卫星未必具有足够的灵敏度探测来自暴胀引力波的旋度分量,但是只要暴胀的能量尺度大体上大于  $5 \times 10^{15}$  GeV 的话, Planck 卫星应当具有足够的灵敏度来探测宇宙微波背景的旋度分量。何况在 Planck 卫星之后,在实验方法与探测器的灵敏度方面都还有足够的改进空间(估计 1—2 个量级的改进),完全有可能在 10 年(如果不是更早)的时间尺度上实现探查暴胀能量尺度到  $10^{15}$  GeV 以下的宇宙微波背景实验,从而进入到有利于大统一理论的参数空间。

## 6 宇宙线

历史上,粒子物理和宇宙线研究之间有过十分密切的联系。当粒子加速器发展到可以获得高能量与高强度的粒子束流时,宇宙线研究的重点便从作为天然粒子束的研究转移成为对其所传递的宇宙信息的分析与研究。

宇宙线的能量谱如图 4 所示。今天我们面对的问题是(1)宇宙线的起源是什么?这仍旧是一个未解决的谜(虽然对于局部能谱已有很好的解答方案)。(2)宇宙线从源到达地球的传播过程是什么?(3)是什么造成了图 4 中显示的特征,特别是“膝”和“踝”是怎样形成的?(4)是否有来自宇宙之间奇特源的宇宙线反物质?举例来说,拓朴缺陷或超质量的残骸(以及其他可以用来解释超高能宇宙线的来源)可以产生等量的粒子与反粒子,从而造成宇宙线反质子或正电子。虽然理论上认为宇宙间的广大区域由反物质构成的可能性极小,然而即使一个反核(例如反碳)也可以表明存在大的反物质区域。此外,在某些超对称模型中,银晕中的湮没 WIMP 能够产生可探测的宇宙线反质子与(或)正电子流量。在未来几年里,有两个实验可望回答这些问题:一是 AMS 实验,1998 年已在航天飞机上成功地进行了工程飞行,2005 年将在空间站上正式运作;另一个是 PAMELA 实验,将于 2003 年初运作,从事极轨道上的反质子与正电子流量测量。

一系列气球测量在过去 10 年里提供了大量新的信息,有助于解答从传统天体物理源来的宇宙线以及奇特宇宙线的相关问题,包括:寻找反粒子,研究同位素组成、重元素组成、元素谱以及高能宇宙线谱等。

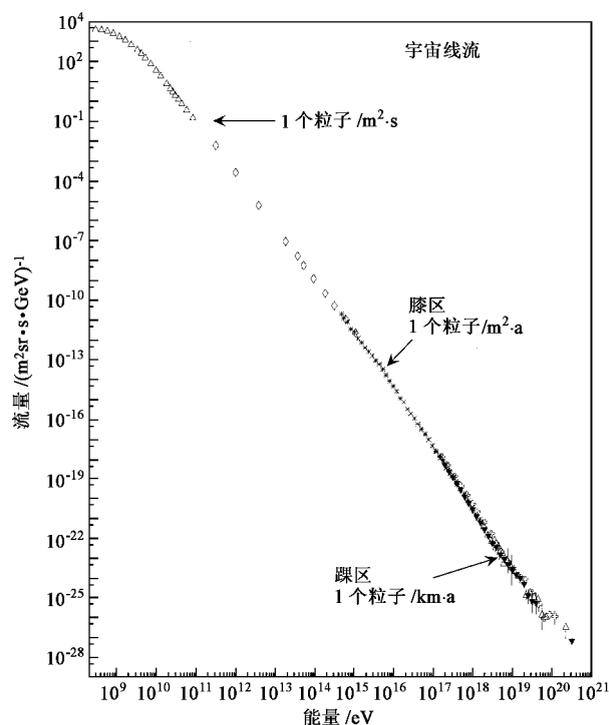


图 4 宇宙射线能谱



特别有趣的一个问题是超高能宇宙线的起源和本性。超高能宇宙线是指能量大于  $3 \times 10^{19}$  eV 即超出 Greisen - Zatsepin - Kuzmin (GZK) 阈值的宇宙线。此类宇宙线如果是质子,则它将由于宇宙微波背景光子散射引起的光致  $\pi$  子产生而被衰减,因而具有平均自由路程  $\sim 30$  Mpc。因此,如果这些超高能宇宙线的源是均匀分布的宇宙源,则预期看到流量在能量高于 GZK 截断处出现跌落。但是,来自 AGASA 和 HiRes 的观察都表明不存在这种跌落,实际上甚至出现流量在 GZK 阈以上的增加。另外一个问题是这些宇宙线看来并不来自 30 Mpc 以内的任何明显的提供加速机制的源,因为在银河系 30 Mpc 范围以内的任何地方都不存在这样的源,即使在大距离上,也没有任何这样的源处在宇宙线回指的方向上。

对于这个谜,还没有令人信服的单一解释。有一些引起人们兴趣的想法,例如:明显的超出是因为实验误差与(或)统计涨落,初始粒子是重核,因而可能行进更远,源位于天体物理源(例如星系际冲击或半人马座 A)的附近。但是,这些囿于常规天体物理的解释看来都有问题。另外一种可能的解释就是新的物理,例如,超重质量宇宙残骸或拓朴缺陷的衰变,某些不相互作用的新粒子,超高能中微子与 1.9K 宇宙中微子本底相互作用产生的质子。答案可能是这些解的某种组合,但也可能完全是另外一回事。这个

问题现已成为许多理论与实验研究的焦点,在下一个 10 年里可望取得重大进展.

## 7 早期宇宙研究

早期宇宙研究明显地表现出了粒子物理和宇宙学之间的联结.

大爆炸模型作为一个框架,在与粒子物理标准模型结合时,给出一些量的确定预言,各种粒子的残骸丰度就是这样的一个例子.将这些预言和观察结果进行比较,可以给出标准模型成功抑或不足的关键性信息.一个典型的例子是重子与反重子之间的不对称性.对此,Sakharov 曾经指出:在一个初始对称的宇宙里,这个不对称性只有在重子数、C 和 CP 对称性及热平衡出现可以觉察到的破坏时发生.虽然在最小标准模型里原则上已经包含了所有这些内容,但实际上只有标准模型的非最小延伸才给出定量上可以接受的重子数.因此,宇宙间物质相对于反物质占有优势是需要新物理的一个重要征兆.

另外一个例子是非重子暗物质的存在.初始核合成与宇宙微波背景两者均与重子的密度参数  $\Omega_b = 0.04 \pm 0.01$  一致,而质量密度的动态测量给出  $\Omega_m = 0.3 \pm 0.1$ ,因此要求非重子物质的存在.在最小标准模型里没有非重子暗物质的合理候选者.有质量的中微子很容易纳入标准模型的最小延伸,原是可以贡献于暗物质的,但是它们的质量作为热暗物质看来嫌低,已被大尺度结构以及宇宙微波背景研究所排除.因此,必须考虑更加奇特的可能性,例如我们在第 3 节中所提到的轴子及中性微子.

对于早期宇宙的全面认识最终需要对于量子引力以及 Planck 尺度上的物理的了解;反过来,宇宙学提供了 Planck 物理的惟一窗口.将量子力学与广义相对论协调起来的主要候选理论是弦理论.弦理论预言了一系列饶有兴趣的宇宙学特征,包括超对称性、扩展物体(膜)和额外维数,但是理论尚未发展到能够说出早期宇宙或者宇宙背景的任何肯定的东西.在这个方向上作出的一系列理论尝试看来都是猜测性质的,而且为现时实验检验所不能及的.但是继续这些思路是重要的,期望由此找到解开早期宇宙中长期疑难的适当方案.

另外一种探索量子引力的途径是尽量独立于一

切特定的理论来分析在 Planck 尺度下偏离低能物理的可能效应.近来循此方向的一种努力是研究无质量粒子的修正色散关系,其中包含了为 Planck 能量所压制的一些新项.这些项在实验室条件下是确定地可以忽略不计的,宇宙学则提供了可以用来研究这些项的两种方法:一种是利用光在宇宙距离上传播的渐进效应;一种是利用波模的畸变,其波长在早期短于 Planck 长度,随后因暴胀而提升从而引起密度扰动,结果形成了当前宇宙中的大尺度结构.这两个例子可以用来说明宇宙观察如何能够导致与量子引力物理有关的直接实验数据的.

额外维数和新的轻标量场都是弦理论所竭力建议的.因此有必要制订一个寻找偏离广义相对论的广泛计划.轻标量场通过 Planck 压制的相互作用耦合到通常物质,导致第五种力效应以及等价原理的明显破坏.在实验室里的研究已对这些现象给出了严格的界值,而建议中的卫星及雷达测距检验可望作出更大改进.这些实验与引力波天文台、双脉冲星、新的人造卫星以及实验室中的检验结合起来,将使我们在掌握引力性能的精细知识方面达到一个全新的水平.

## 8 小结

天体粒子物理在广阔的理论实验研究前沿提出了一系列激动人心的挑战.一些研究取得了突破性进展,一些研究正处在突破的前夜.新一代观测装置的建造无疑将大大拓宽发现的视野;许多神秘的天体与宇宙现象几乎可以肯定需要新的物理.预期未来一些年里,这个领域大量重要研究成果的出现,既有助于对极端条件下天体物理的认识,也将有助于粒子物理超出标准模型的实验努力,发展的前景是令人鼓舞的.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 顾以藩.见:中国高能物理学会编.全国高能物理大会会议集.1998.124[ GU Y F. In :Ed. Chinese High Energy Physics Society Proc. National Conference on High Energy Physics. 1998. 124 ( in Chinese ) ]
- [ 2 ] Akerib D S , Carroll S M , Kamionkowski M *et al.* hep-ph/0201178