

物理学和天文学*

邓祖淦

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 历史上,物理学和天文学的发展是密切联系的.它们在整个现代科学的发展和技术的发达上起到了先锋的作用.物理学的基本规律和天文学提供的广袤的实验室构成了理想的科学发展的基础.20世纪的一系列科学上的重要突破正是这种优良结合的产物.今天,天文学和物理学又共同面对着更新的前沿问题,并一道酝酿着新的科学上的重大进展.它们所取得的每一个进展也必然伴随着技术的创新和提高,也不断更新着人类的认识和文明.

关键词 物理学,天文学

PHYSICS AND ASTRONOMY

DENG Zu-Gan

(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Historically, developments in physics and astronomy were closely linked to each other. Both played a pioneer role in the development of modern science and technology. Fundamental laws provided by physics plus the vast experimental laboratory provided by astronomy constitute together an ideal base for the development of science. A series of important breakthroughs achieved in the 20th century were due to this perfect combination. Today, they are again facing together even newer frontiers, and both hold promise for major new scientific developments. Every advance they make will certainly bring about higher and technologies, and will also push the civilization of mankind to a new level.

Key words physics, astronomy

在科学发展的历史中,也许物理学和天文学是两门关系特别紧密的学科.这可能也是至今在许多国家的大学里物理与天文仍然同属一个系(物理天文或天文物理系)的原因.这种紧密的关系不仅存在于它们发展的历史中,在今天,它们在一些重大的科学前沿问题的研究上仍然是相互密切联系的.虽然其他学科也许并不像天文学那样与物理学有如此密切的联系,但是,科学的目的是对自然界和自然规律的认识,科学可以按照其研究现象的范围被划分为不同的领域,可是,无论人类怎么将其划分,自然界却是一个整体.因此,学科之间的交叉和相互推动是必然的,而对此给予应有的重视就十分必要.《物理》自创刊以来的30年中,对物理学和其他学科和高技术发展的交叉领域给予了特别的重视.从而在这方面成为了一个很有特点、倍受欢迎的刊物.

在本文中,我们将从物理学与天文学的发展来简单地回顾这两门学科怎样相互结合创造了一个个科学上的重要突破,也简单地介绍它们在今天共同面对的前沿问题.回顾这些问题的时候,我们发现,许多重要的问题在以往的《物理》中大都有所介绍.

需要更详细了解这些问题的读者可以阅读相应的文章和其中的参考文献.

1 历史的简短回顾

众所周知,现代科学的起源与物理学和天文学的发展是分不开的.行星运动的观测、牛顿万有引力定律的发现和牛顿运动定律的确立导致了经典力学的发展和完善,也第一次对行星运动给予了科学的解释.当然,我们也不能不看到,正是行星的运动在当时提供了检验经典力学理论的最好的实验室,而天文学家长期的观测和积累的资料是证实理论正确的基本实验数据.在这期间,科学的发展造就了一批科学巨匠,如伽利略和牛顿等.他们究竟是物理学家还是天文学家呢?也许最好的回答是他们既是物理学家又是天文学家.他们的研究在当时看来是并无直接“经济效益”的,可是如果长远地去看,从这些并无经济效益的研究中开创和形成的经典力学,不正

* 2002-03-28 收到

是人类开始大规模用机器代替手工劳动的工业革命的先声吗?这些研究的“经济效益”从今天看来应是怎么估计都不过分的.我们也知道,这些基础研究的结果在改变人们对世界的认识上也起到极大的作用.人们第一次看到了事物的运动在我们周围和“天上”服从着同样的规律.人们从此开始不太相信众神居住的“天”与我们生存的“地”是完全不同的世界了.也许,常常被忽略的是这些科学成果是出现在文艺复兴之后,那时,神的至高无上的权威已经大大衰落.而这种环境却是如哥白尼、布鲁诺那样的天文学家经过长期的努力甚至付出生命才换来的.没有他们的努力和牺牲所换来的这种环境,后来者怎么可能去研究星球的运动呢.

也是牛顿最早发现棱镜可以将白光分解为光谱.夫琅和费首先对太阳和恒星的光谱进行了仔细的研究.他发现太阳和恒星的光谱中存在着分离的谱线,并发现这些谱线对应着我们周围的各种化学元素.这使得大多数人都相信了太阳和恒星等天体都是由地球实验室中同样的化学元素构成.从那以后,天体的光谱观测就成为天文研究的重要手段之一.这是物理学给天文学提供观测手段和基本观念的很好的例子.物理学和天文学的结合在这里改变着人类的宇宙观.

2 科学迅速发展的 20 世纪中的物理学与天文学

20 世纪上半叶,物理学发生了以量子论和相对论的确立为标志的前所未有的革命.这些重要发展同样导致了天文学的巨大进步.在量子论基础上发展起来的核物理和粒子物理基础上,天文学家和天体物理学家正确地解释了长时间未能解释的恒星的能源问题,在此基础上建立起了恒星结构和演化的标准模型并取得了极大的成功.恒星标准模型的建立和成功是天文学在 20 世纪所取得的重大成就之一^[1,2].

不止于此,20 世纪 30 年代,在将量子论和相对论应用于恒星演化时发现,在恒星核反应结束后会形成所谓简并星.它们不是由核反应提供的能量产生的热压与引力平衡达到稳定,而是由量子效应所产生的简并压维持平衡^[4,5].按恒星最后残存的核的质量,简并星可能是白矮星或中子星.它们分别是由电子简并压和中子简并压支撑的.钱德拉塞卡从相对论的考虑得出这种由简并压支撑的星具有质量上

限,他得出白矮星的质量上限是 1.4 倍太阳质量.任何恒星在用完可用的核燃料后如果残存核的质量超过这一质量,将会继续坍缩.朗道、巴德和兹威基分别提出了中子星存在的可能性.中子星的质量也有上限,当恒星残存的核的质量超过这一质量时,将没有任何力量能够支撑其平衡.它们将在引力作用下一直坍缩最终形成黑洞.这些在当时无论天文学家还是物理学家看来都是十分奇异的结论,是不可能实验室里被检验的.它们只可能存在于宇宙中.然而,这些乍看十分怪异的天体后来的确相继被天文学家发现,进一步证实了量子论和相对论在宇宙中的普适性,也说明了物理规律在与其他学科结合时的作用^[3].

20 世纪物理学的另一项重要成就是相对论的建立.爱因斯坦建立了狭义相对论后,接着又建立了引力的相对论性理论,即广义相对论,并在此基础上讨论了宇宙学解.出乎意料的是广义相对论的宇宙学解所给出的不是定态的宇宙而是膨胀宇宙.这在当时造成了很大的困惑.20 世纪 20 年代,天文学家哈勃通过对星云光谱的观测作出了两个重要的发现.他发现,原来这些星云并非都是银河系中的天体,许多是远在银河系以外和银河系类似的由无数恒星组成的星系.我们所在的银河系仅仅是众多星系中的一员.同时他还发现,这些星系的谱线都较之实验室中测定的相同元素的对应谱线有不同程度的红移.这表明这些星系都在离开我们退行,并且距离愈远的星系红移愈大,或说退行速度愈快.这正是膨胀宇宙的图像.哈勃的观测提供的证据表明,宇宙整体在膨胀.在此之后,尽管经历了各种曲折,在 20 世纪后半叶,建立在膨胀宇宙基础上的热大爆炸宇宙学模型逐渐形成并完善起来.它关于宇宙微波背景和轻元素丰度的预言也被天文观测所证实.标准热大爆炸宇宙模型的建立,是天体物理学在 20 世纪所取得的又一重大成就^[4].

上述的事实充分说明了物理学的发展为天文学提供了用于理解天文现象和规律的基础.物理学上的突破也势必导致天文学的重要进展.同时,我们也看到,天文学为物理学的重要发现提供了独特的实验室,在许多情况下是惟一的实验室.伴随物理基础理论在天文学研究中取得的成就,人们已经坚信宇宙是由统一的自然规律所支配的,而物理学所提供的正是其中最基本的规律.天体物理学正是在这种认识的基础上蓬勃发展起来的.当人们用物理学的规律去理解天文现象和天体的本质时,就为物理学

的应用和发展提供了又一个广阔的天地。

脉冲星的发现和研究也许是一个极好的例子。中子星存在的可能性虽然在 20 世纪 30 年代就被提出,但是,如何发现这种天体,却长期没有可靠的方法。直到 20 世纪 60 年代射电天文学发展起来后,观测到了一类来自太空的极其规律的射电脉冲。根据观测,人们才了解到,这是一类非常致密而且具有强磁场的天体,它们只可能是中子星。某些脉冲星与已知的超新星遗迹相关更说明了它们是恒星死亡的产物。对脉冲星的研究表明,它们具有极高密度,其密度高达原子核的密度,但却是宏观物体。这种状态是实验室中不可能产生的。这就提出了高密物质状态的研究课题。观测也表明,脉冲星表面磁场强度高达 10^{12} — 10^{13} Gs,比实验室中能够达到的最强的磁场要高出许多量级。这又导致了人们对强场中物理现象的研究。人们还发现,脉冲星所发射出的射电脉冲非常有规律,有的远比我们今天所能作出的最好的时钟更准确。如果这些脉冲星中有的存在或大或小的伴源,我们就可以用这些精确的时钟来探测伴源所引起的细微的运动,或将它们作为引力辐射源以验证广义相对论。科学家们在这两方面都获得了巨大的成功。对双星脉冲星的长期监测提供了爱因斯坦广义相对论预言的引力辐射存在的证据。而最早证实太阳以外的天体存在行星的也正是用这样的方法探测到的脉冲星的行星。这说明了由于天文学所研究的对象和现象浩如烟海和变化无穷,它常常能提供在实验室内不可能实现的对物理学基本规律十分重要的观测证据。

宇宙学的研究提供了物理学与天体物理学结合将物理规律的应用推到极至的又一很好的例子。热大爆炸宇宙学的基础是膨胀宇宙。而膨胀宇宙的早期物质将处于高温、高密度状态。基于这一模型,天文学家和物理学家可以预言宇宙今天存在约 3K 的微波背景辐射,其辐射谱为黑体谱,此外,还可以得到宇宙中原初轻元素的丰度。这些预言均与观测一致,成为热大爆炸宇宙学的重要观测证据。这也是将物理学的基本规律外推到极至并取得成功的典型例子。

3 新世纪的物理学和天文学

20 世纪物理学与天文学均取得了重大进展,在新的世纪开始之际,它们也面临着一些重大的共同的前沿问题。这些问题的解决将标志着物理学与天

文学的新的突破。下面我们将简单地介绍一些今天物理学与天文学面临的共同的前沿。

3.1 相互作用的统一与极早期宇宙

基于爱因斯坦场方程解的热大爆炸宇宙学虽然能给出为观测证实的结论,但是,也存在着一系列疑难问题。如,平直性问题、因果性问题、初始扰动谱问题等。20 世纪 80 年代,Guth,Linde 等人借鉴粒子物理中对称性破缺的观念,相继提出了暴胀宇宙学模型。在极早期存在暴胀的热大爆炸宇宙模型不再存在上述的一系列疑难。而且,从观念上将宇宙的早期演化与基本相互作用的统一相联系,这就形成了物理学与天文学的共同的前沿。它把物理学的基本相互作用的统一问题与天文学中的宇宙极早期演化这两个最基本的问题联系在一起,成为今天倍受关注的科学前沿。

虽然,基本相互作用的统一问题本质上是物理学的基本问题,天文学在此问题的解决中却起着特殊的作用。因为,四种基本相互作用统一所涉及的能量将不可能从加速器获得,因而,地面实验已不可能为检验理论提供观测证据。但是,由于宇宙早期处于极高温高密的状态,宇宙本身为我们提供了一个最好的实验室。前苏联著名的物理学家和天体物理学家 Zel'dovich 不无风趣地称宇宙是“穷人的加速器”。今天,物理学与天文学正一起共同对这一前沿领域进行探讨。

3.2 暗物质问题

宇宙学的研究中一个基本问题是宇宙中物质的组分和密度,以及它们的演化。天文学家从旋涡星系旋转曲线的观测发现,仅从星系中的恒星质量和气体质量不可能解释其旋转曲线。而且,许多星系的旋转曲线在距中心较远处趋向平坦。这是出乎意料的结果。它表明,星系中可能存在着大量的不发光的暗物质。经过近 20 年的研究发现,无论是小质量恒星、气体、简并星和小黑洞等均不可能是这种占星系质量大部分的不发光的物质。而且,从宇宙原初元素丰度的研究对宇宙中重子物质含量给出的限制表明,这种暗物质只可能是非重子物质^[5]。

在物理学中,当试图统一引力与其他三种相互作用时必然会出现大批的未知粒子。暗物质粒子是否是这些未知粒子呢?这又成为物理学与天体物理学的共同问题,并且都是涉及这两门学科的基本问题。除理论研究外,目前,在物理学和天体物理学中,也在试图用各种方法探测暗物质或探讨它们的性质。

3.3 宇宙学常数和暗能量问题

爱因斯坦曾在他的场方程中加入了宇宙学项(或称 Λ 项), 试图获得定态的宇宙解. 当天文学的观测表明宇宙的确是在膨胀之后, 宇宙学项在一段时期中被忽视. 在宇宙学研究中, 为了确定宇宙的演化模型, 需要确定一些宇宙学参量, 如宇宙膨胀的速度或哈勃常数 H_0 、宇宙减速参数 q_0 和宇宙物质密度参数 Ω 等. 为此, 科学家要对遥远天体的距离和谱线红移进行精确的测定. 通过这种测定以确定这些基本宇宙参量. 为了能够进行这种测量, 天文学家必须寻找一类天体作为所谓“标准烛光”. 这种天体必须非常亮, 这样我们才能在很远处看到它们; 它们还必须有几乎相同的光度, 这样我们才能通过观测到的亮度得出它们分别与我们的距离. 可以说在 20 世纪中的大部分时间里, 天文学家一直在为寻求这样的标准烛光而努力. 经过长期努力和仔细选择, 天文学家发现一类超新星是非常好的标准烛光. 这种被称为 I_a 型的超新星满足上述的所有要求. 于是, 几个小组开始了超新星的巡天. 经过对 I_a 超新星巡天资料的分析, 天文学家意外地发现, 今天宇宙是在加速膨胀. 如果, 宇宙中只有一般的重子物质和暗物质, 由于物质间的引力作用将阻止宇宙的膨胀, 宇宙膨胀应当是减速的, 而宇宙学常数项却是使宇宙膨胀加速的项. 虽然宇宙学常数项可以使我们得到今天加速膨胀的宇宙, 但 Λ 究竟在物理上是代表了什么意义呢? 一种解释是, Λ 是真空能量. 如果从现在粒子物理的标准模型估计, 得到的 Λ 的值将比从观测得到的大数十个量级. 也有的科学家认为 Λ 是由其他原因产生的. 因此, 关于 Λ 是什么目前存在着各种各样的解释. 迄今为止它仍然是一个未知的谜, 而它却是涉及到我们对宇宙能量和真空的本质等的基本物理规律的认识.

3.4 太阳中微子问题

这可以说是一个由天体物理研究引出的具有重要意义的物理学基本问题的典型例子. 自 20 世纪 60 年代后期, 科学家开始建造大型设备探测宇宙中的中微子. 离我们最近的中微子源是太阳. 它在进行核反应时会释放出大量中微子. 在对太阳中微子进行观测后发现, 接收到的太阳中微子数明显地少于由恒星模型计算出的太阳中微子流量. 尽管中微子的接收设备有了很大的改进, 太阳中微子流量缺少这一情况并未改变. 为什么探测到的太阳中微子流量会低于理论模型计算的结果呢? 这就是所谓太阳中微子问题^[6].

当然有两种可能, 一是太阳, 或说恒星的模型有问题; 另一种可能是关于中微子的粒子物理理论有欠缺. 为解决太阳中微子问题, 一时间各种不同的理论模型被提出, 包括非标准的太阳模型, 中微子振荡理论等等. 最近的实验表明, 很可能是由中微子振荡造成的. 也就是说, 由于三种中微子间会发生相互的转变, 观测到的某一种中微子的流量就可能随距离变化. 存在中微子振荡无疑是我们了解基本物理中的一个重要进步.

除上述之外, 在进入新世纪之际物理学与天文学的共同前沿问题还有很多. 它们大都涉及基本的物理和天体物理问题, 如黑洞的形成和与黑洞有关的强引力场中的物理^[7], 引力波的产生和探测也是对广义相对论的一个重要检验等等. 所有这些前沿问题既是量子物理与相对论这 20 世纪基础科学的两大发现的继续, 又是对它们的某种挑战. 这些前沿问题的解决势必推动基础科学的进展.

由上述的物理学与天文学的相互影响和推动的关系, 我们看到, 物理学提供了了解天文现象的基本规律, 物理学的每次重大进展都推动着天文学的重大发展; 天文学的研究又为物理学提供了一个惟一的又是丰富多彩的实验室. 二者就是这样相互依存又相互促进.

4 物理学和天文学研究与高技术

和物理学研究中的其他实验室一样, 物理学和天文学在基于宇宙这一巨大实验室中的研究对技术有着特别高的需求. 正是这种需求有力地推动着高技术的发展. 在所有上述的物理学与天文学的共同前沿问题的研究上, 需要有大型地面和空间望远镜以观测尽可能遥远的宇宙天体; 要有最高灵敏度的探测器以探测到最微弱的从远处传递来的信号; 需要有尽量高的分辨率, 以区分相邻的天体和观测尽可能遥远的天体的形态和结构; 需要有光学以外的其他波段的探测器和探测技术, 以使得从全波段对天体和天文现象的了解成为可能; 它还需要高速度大容量的计算机, 以采集、处理大量的观测数据和进行理论上的模拟计算. 所有这一切需求, 无一不是对现今的高技术提出的更高的要求.

为此, 在 20 世纪中, 特别是 20 世纪后期发展出了一系列新设备和新技术. 例如, CCD 接收器, 它把探测的灵敏度提高到了单光子的探测; 光干涉技术将探测器的分辨率提高到毫角秒, 并进一步将提高

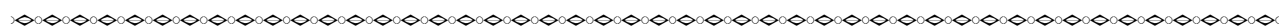
到微角秒量级,一个接一个的工作在各波段上的空间天文卫星的发射,将空间技术一步步地提到更高的高度。

物理学和天文学研究除了对高技术提出愈来愈高的要求外,它们在高技术发展中还提供高技术设备可用性的检验.而且,这种检验是最严格的检验.也许,这就是发达国家不惜投入巨额资金发展基础研究的原因吧。

参 考 文 献

[1] 俞允强等.物理,1984,8:486[Yu Y Q. Wuli(Physics),1984,8:486(in Chinese)]

[2] 王荣平等.物理,1992,1:3;1992,2:67[Wang R P et al. Wuli(Physics),1992,1:3,1992,2:67(in Chinese)]
[3] 乔国俊.物理,1984,9:562[Qiao G J. Wuli(Physics),1984,9:562(in Chinese)]
[4] 方励之.物理,1987,8:481[Fang L Z. Wuli(Physics),1987,8:481(in Chinese)]
[5] 俞允强.物理,1989,3:145[Yu Y Q. Wuli(Physics),1989,3:145(in Chinese)]
[6] 杜九林.物理,1998,10:609[Du J L. Wuli(Physics),1998,10:609(in Chinese)]
[7] 卢炬甫.物理,1998,9:529[Lu J F. Wuli(Physics),1998,9:529(in Chinese)]



·物理新闻·

比金刚石还要硬的锇(Osmium is Stiffer than Diamond)

金刚石一向被认为是最硬的金属,它给出的坚硬刻痕是众所周知的,因此它经常作为机械工具的端头被工业界所应用.但理论科学家通过对材料的体积弹性模量进行计算去寻找更坚硬的材料,因为体积弹性模量要比坚硬度容易计算.他们发现金属锇要比其他的材料更能经受压缩.由于金属锇在一般情况下要比金刚石软得多,虽然它的体积弹性模量要高于金刚石,但是大多数人对理论学家们的预言并不以为然。

位于美国加州的 Livermore 国家实验室的三位科学家 Hyunghae Cynn, John E Klepeis 和 Choong-Shik Yoo 却开始了对金属锇的研究.他们利用金刚石砧,这是一个由二片金刚石组成,在金刚石的中间放上一块垫片,垫片中间具有一个 $60\mu\text{m}$ 直径的小孔.在小孔处注入金属锇粉末和氩气,然后对其进行均匀加压,把压力加大到 $600,000\text{atm}$ (即 60GPa),从而获得了一根细细的金属锇的样品.X 射线衍射图显示出了不同压强下锇原子间的间距,它的体积弹性模量可达到 462GPa ,而金刚石能达到 443GPa .

这个研究报告表明,可以用完全不同的方法来获得高强度材料,过去金刚石和一些氧化物金属都是轻金属,它们的原子是以共价键结合形成立方晶格,一般很难对它们进行压缩,而金属锇是重金属,它的原子排列是六角形结构,在高压下能保持原子间距,并可注入其他原子如碳、硼、氮和氩等.这些成分都是使材料坚硬的要素,它们使锇原子间产生更高的电子密度.

H. Cynn 教授在报告中说:“理论学家们的预言是一回事,而实验科学家必须对这类预言进行论证和评估。”

位于美国华盛顿的 Carnegie 研究所的 David Mao 教授认为:锇金属的发现将会在固体物理领域形成一系列新的研究课题,许多新颖的材料将会对金刚石的霸主地位进行挑战,而体积弹性模量是一个寻找超硬材料的好指标,当然研究者也要充分注意各类材料的结合键和晶格结构的特性.他相信在不久的将来,就会开拓出一个发展坚硬材料的新时期。

(云中客摘自 Phys. Rev. Lett., 1 April 2002)

热门的纳米管(Nanotubes are Hot)

纳米管现在非常热门,因为它有可能成为一种纤维状的微型新光源。

实际上,相当于纳米尺度的碳纤维光源早在 100 年前就已有过,但近年来位于法国里昂的 Claude Bernade 大学有一群科学家,他们以 S. Purcell 教授为首一直在研究碳纳米管.当电压较高时,管内的电子将快速地由阴极飞向阳极,形成场致发射.这种效应的纳米管将来可以成为平板型展板的部件。

最近这个研究组在对纳米管的端点作温度调控时观测到了一系列有趣和很有用的特性.首先他们改变纳米管一端的温度,这时纳米纤维管就能发射出电子、光或热.与此同时,他们测定了纳米管的电阻,发现它满足欧姆定律,而热流也服从焦耳定理.如果将纳米管端点的温度提高到 1500K 时,管子就会发光,而且这种光是白炽光而不是荧光.综合起来看,纳米碳纤维管体积很小,端点控温技术简便,因此有可能成为一种新型的热源、光源和电源.这样一来,纳米管就成为了一种热门的元件。

(云中客摘自 Phys. Rev. Lett., 11 March 2002)