



天文学中的暗物质和暗能量问题之由来和困惑

武向平[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

1 宇宙起源

今天的宇宙学研究早已经冲破了“九重天”的空间尺度和“七天创世纪”的宗教信仰，21世纪的宇宙学已经是最精密的自然科学之一。

为现代宇宙学研究带来革命性进展的天文学家无疑是哈勃，他在1929年发现了银河系周围星系的退行速度与其相距银河系之距离成正比。此观测事实给了后来的物理学家伽莫夫以启示：既然所有的星系都彼此相互远离，那么若沿着时间的长河逆向追溯，它们就必将在有限的时间内汇聚在一起；反之，若沿着时间发展的箭头，宇宙则就像发生过一次爆炸一样，从致密高温的状态膨胀散开。1948年，伽莫夫成功地预言了宇宙大爆炸的“火球”膨胀至今遗留下的温度应为50 K (1956年修正为6 K)，并锁定在微波波段。而在1965年，两位Bell实验室的工程师Penzias和

Wilson无意间得到了震惊世界的发现，尽管他们当时并未意识到所获得的与方向无关的天空噪声就是宇宙大爆炸的遗迹。虽然星系的退行和大爆炸火球的发现及其高度的各向同性，的确给宇宙大爆炸学说奠定了最坚实的观测基础，但人们很快就意识到，一个高度各向同性的大爆炸火球并不是人们所期望的。今天，浩瀚的宇宙中充满了以星系为基本单元的成员，它们并非均匀地分布于宇宙空间中，而是形成了有规则的结构：既有成千上万星系组成的“长城”，也有空空如也的“空洞”。一个过于均匀的大爆炸火球作为“种子”是无法形成我们今天所看到的有结构之宇宙。所以，大爆炸的遗迹(今天称之为宇宙微波背景辐射)被发现后，人们就一直致力于寻找它上面是否存在不均匀的成分。终于，1992年由George Smoot领导的一个小组借助于COBE卫星发现了大爆炸火球上的十万分之一的温度起伏，且这些起伏正是人们期望看到的造就今天宇宙万物的“种子”！随后，诸多宇宙微波背景辐射探测卫星如WMAP和PLANCK以及南极的大量天文实

2015-05-19收到

[†] email: wxp@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150610

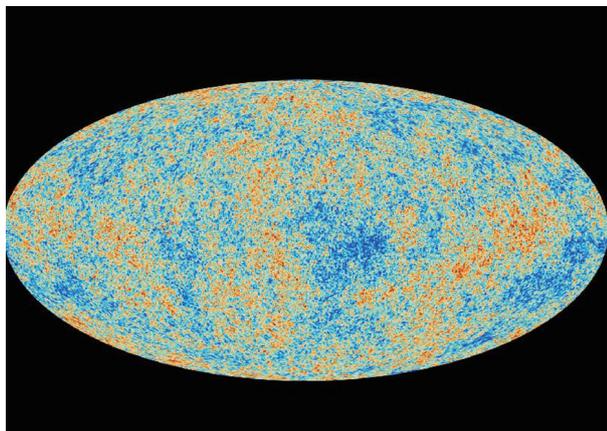


图1 PLANCK 卫星绘出的宇宙微波背景辐射的温度起伏
(来源: PLANCK 网页)

验, 已经把大爆炸火球的脸谱勾画得越来越清晰, 其测量精度甚至达到了百万分之一!

除了宇宙中的基本成员星系之外, 宇宙大爆炸演化的过程也自然地造就了世间的基本元素: 宇宙大爆炸早期, 宇宙温度很高, 电子、质子和中子在大爆炸背景光子的作用下无法结合形成稳定的原子, 只有当大爆炸火球的温度随着宇宙的膨胀降低到 10 亿度时, 宇宙中的核合成才得以进行, 而核合成仅仅持续了很短时间就又因宇宙温度过低而终止。所以, 宇宙中仅仅合成了最轻的元素氢和氦, 其他元素几乎没有机会产生。由于中子质量略大于质子质量(差别为 1.293 MeV), 宇宙早期的热平衡保证了宇宙中有一个中子, 大约就有六个质子, 所以宇宙中大量的质子和电子结合, 最先形成了氢, 两个质子、两个中子和两个电子结合就形成了氦, 其各占宇宙总重子物质的比例为: 氢 77% 和氦 23%。今天对宇宙各地, 比如太阳、银河系、其他星系等的天文观测, 都证实了这一比例。甚至, 我们人体以氢为主的基本元素构成无不体现着宇宙大爆炸的痕迹。这的确是大爆炸宇宙学的又一巨大成功! 那么我们熟知的化学元素周期表中的其他元素又是从哪里来的呢? 其实, 除了最重的几个人工合成元素, 它们也都来自宇宙空间。比如锂、铍、硼就来自宇宙射线, 而恒星演化的终结(如超新星爆发)造就了其他重元素, 包括人们熟知的金、银、铜、钴

石等。

2 宇宙的命运和暗物质

今天的宇宙正在膨胀, 那么未来的宇宙是会继续膨胀还是会停止膨胀进而收缩回来呢? 问题的答案取决于宇宙中所有物质产生的引力是否能阻止宇宙的膨胀。只要将牛顿第二定律和万有引力定律应用于我们的宇宙, 我们就会发现: 如果宇宙今天的平均密度超过一个临界值 ρ_c , 它将来就会停止膨胀并收缩回来; 反之, 平均密度若比 ρ_c 小, 则宇宙将永远膨胀下去。临界密度 ρ_c 的值仅仅由万有引力常数 G 和哈勃常数 H_0 决定, 且 $\rho_c \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3$, 这一数值仅仅相当于每一立方厘米的体积内存在百分之一电子! 可见, 要求宇宙停止膨胀的物质密度其实很低。人们习惯性地定义一个密度参数 $\Omega_M = \rho/\rho_c$, 若 $\Omega_M > 1$ 则宇宙将会收缩回来, 反之则会永远膨胀下去。

应用爱因斯坦的场方程于宇宙, 则可以给出类似的结论, 只不过增加了牛顿引力论中无法描述的能量项。事实上, 引力场方程把时空(宇宙)的性质和其中存在的物质能量完美地结合起来, 即宇宙的时空由其中的物质能量唯一决定, 而时空的特性也反映了其中物质和能量的存在形式。这样, 在广义相对论框架下的宇宙动力学方程就简化为: $\Omega_k = 1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda$, 其中 Ω_k 反映宇宙的几何性质, Ω_M 是宇宙的物质密度参数, Ω_Λ 是宇宙的能量密度参数(又称宇宙学常数项)。我们既可以用宇宙中物质和能量来描述宇宙的演化性质, 也可以等价地使用宇宙的几何性质来描述宇宙未来演化的行为。若宇宙未来停止膨胀转为收缩, 反映在几何性质上则是 $\Omega_k > 0$, 或宇宙中三角形内角之和大于 180° , 引力主导引起时空弯曲; 若宇宙永远膨胀下去, 则 $\Omega_k < 0$, 或宇宙中三角形内角之和小于 180° , 引力不足以抵抗膨胀; $\Omega_k = 0$ 的宇宙则处于临界状态, 此时宇宙将永远膨胀下去, 但三角形内角之和正好是 180° , 欧几里德几何可以适用。这样, 宇宙的命运就有两种等价的描述方式: 我们既可以通过测量宇宙中的物质能量密度

也可以通过测量宇宙的几何性质来预知未来。

现在让我们看一看宇宙中到底有多少物质，这些物质是否足以让宇宙将来收缩回来，这就引出了宇宙学中的暗物质问题。我们的游戏从数星星开始：一个星系里大概有1千亿颗恒星，而宇宙中大约有1千亿个星系，所以宇宙中大概有 10^{22} 颗恒星。我们可以把单位体积内这些恒星转化成质量即密度，然后与 $\rho_c \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ 的临界值作对比，结果这个值仅有0.005。也就是说，宇宙中所有的恒星加起来所贡献出的物质仅能达到让宇宙未来停止膨胀的0.5%。所以，若浩瀚的宇宙中仅仅只有恒星，那么宇宙将要永远膨胀下去。

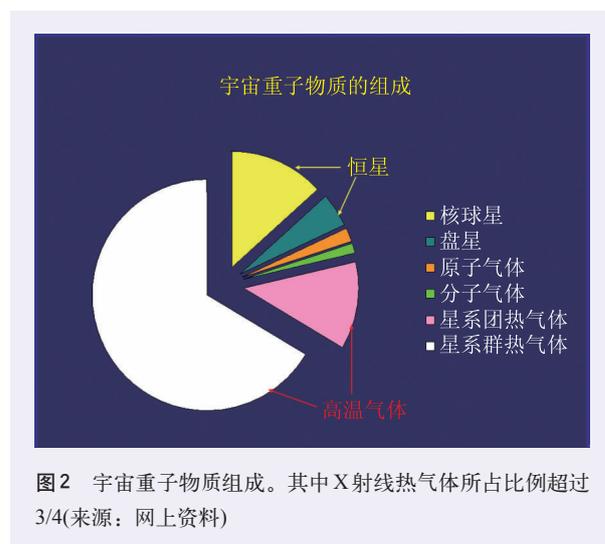
宇宙中是否只有闪闪发光的恒星呢？答案显然是否定的。当天文学家把宇宙的所有已知物质汇聚在一起，就会发现恒星只占大约五分之一的比例，宇宙的主要物质竟然在可见光波段是看不见的！1961年，当意大利科学家Riccardo Giacconi把一枚用于X射线探测的火箭送上天空，才意外地发现，宇宙竟然在X射线波段如此明亮。随后，大量的X射线探测卫星揭示出了人们意想不到的结果：宇宙中可以发射电磁辐射的物质主要是以热气体的形式存在，温度甚至可以高达上亿度，许多星系、星系群、星系团和大尺度结构都被炙热的X射线气体所包围，它们的质量要比其中的恒星大好几倍！当我们利用X射线探测卫星把这部分质量统计在内，一下子就可以把宇宙中的所谓重子物质密度提高了几乎10倍，达到宇宙临界密度的4%。然而，即使这样，仅包含热气体和恒星的宇宙仍然还是要继续膨胀的！

的确，人们是借助电磁波来观测宇宙的，任何一个波段(如光学)都只能揭示出宇宙中某一特定的物质成分(如恒星)，我们也许会丢失没有电磁辐射的那部分物质，即不发光的暗物质。对此，第一个做出肯定结论的是瑞士天文学家Fritz Zwicky，他在1937年观测了一个由数百个星系组成的巨大集团(称之为Coma)的运动学效应，他发现，由星系动力学给出的星系团质量比其中所有恒星光度给出的质量大了400倍。这是天文学中第

一次发现宇宙中可能存在不发光的暗物质成分！

今天，存在暗物质更直接的证据包括：(1)中性氢测量表明，星系(包括银河系)的旋转曲线在远离恒星的星系晕里仍然保持几乎不下降的趋势，违背了仅有恒星起作用的开普勒定律，暗示星系存在巨大的暗物质晕；(2)经过引力场的光线会发生弯曲，产生所谓的引力透镜效应，光线偏折的大小仅与其中产生引力场的质量有关，不管其是否发光。自1979年观测到遥远类星体的引力透镜现象以来，引力透镜效应已经普遍应用于各类宇宙天体的质量测量，人们发现，引起引力透镜的引力质量远超出透镜天体的发光质量。比如在典型的星系团里，引力质量比发光的光学总质量大几乎300倍；(3)宇宙大尺度结构形成理论和观测表明，要形成今天宇宙中各种结构，仅靠重子物质远远不足以使其“成型”。比如，银河系由大约1千亿颗恒星组成，在137亿年的宇宙年龄内，仅靠恒星自身的引力完全无法聚集成今天的银河系，因为重子物质需要有效耗散其内能才能收缩为星系，而暗物质的存在造就了巨大的引力势阱，帮助重子物质紧密“团结”在一起，组成了今天庞大的银河系；(4)我们曾经提及，星系群和星系团都存在高温热气体，温度可达上亿度。若无巨大暗物质引力场的束缚，那么如此高温高能的热气体则早已经逃逸瓦解。

当我们把动力学、引力透镜效应等一些不依



赖于发光物质特性的测量手段用于宇宙各系统的质量测量中，然后再与宇宙的临界密度 ρ_c 去对比，结果发现， Ω_M 已经提高至0.27，比恒星和热气体的贡献高出大约7倍。但是，包含了全部暗物质在内的宇宙平均密度也只达到27%的临界值，故仍然不足以使得宇宙封闭——有朝一日停止膨胀而收缩回来。此刻，我们很茫然，如果在宇宙中再找不到其他的物质成分，我们就只能眼睁睁地看着宇宙永无止境地膨胀下去，人类就只能“冻”死在温度逐步降低的冰冷宇宙中。看来，我们真的别无选择！

3 宇宙的命运和暗能量

也许，我们对宇宙命运的结论还下得太早或过于武断。毕竟，由爱因斯坦场方程给出的宇宙动力学演化方程包含了三个参数，而我们至此仅仅测量了其中的一个——物质密度参数 Ω_M ，还剩下能量参数 Ω_Λ 和空间曲率参数 Ω_k ，只有把后面两个参数再确定至少一个，我们才能真正预测宇宙的命运。

测量能量密度参数 Ω_Λ 并不是一件容易的事，若 Ω_Λ 代表着真空能或宇宙学常数，则它在宇宙空间和时间尺度上都是一个不变化的参数，对于一个仅在宇宙大尺度才显现的常量，我们几乎找不到有效的测量途径。所以，人们的注意力转向了测量宇宙的几何性质，即宇宙曲率参数 Ω_k 。诚然，人们也无法在宇宙空间构造一个三角形去测量其内角之和是否小于、等于或大于 180° 。

大爆炸遗留的火球即微波背景辐射的光子传至地球，经历了漫长的旅途，是人类目前所能接收到的来自最遥远宇宙的信息，它必然携带了宇宙几何的信息。微波背景上面分布着斑斑点点的温度不均匀区域(见图1)，尽管其幅度不超过十万分之一，但只要我们知道微波背景辐射上这些斑斑点点温度不均匀区域之间间距的统计性质，就可以得到宇宙的几何特性。比如，一个开放的、未来永远膨胀的、三角形内角之和小于 180° 的宇宙，单位面积上斑点的数目就会比较多；相

反，若宇宙是闭合的、未来转为收缩并且三角形内角之和大于 180° ，由于光线的弯曲，单位面积上斑点的数目就相对较少。自1992年发现微波背景辐射的起伏以来，人们进行了大规模的微波背景辐射各向异性的测量，试图获得宇宙的几何性质。经过三十多年的努力，天文学家终于给出了所谓宇宙微波背景辐射角功率谱的精准测量，得出的结论使得我们多少有点惊奇：宇宙的宏观几何形式是平坦的($\Omega_k=0$)，三角形内角之和正好等于 180° 。于是，宇宙将永远膨胀下去。

宇宙几何如此的简单，简单得让我们雀跃——因为我们似乎再也不用学习复杂深奥的黎曼几何了！但是，我们也为之不解：引力主导下的宇宙时空竟然不是弯曲的，这怎么可能？是谁抵消了引力的作用让空间变得如此平坦？三十多年前，物理学家 Alan Guth 和 Andrei Linde 先后提出并完善了暴涨宇宙的理论，试图诠释宇宙的平坦性问题：宇宙在大爆炸之后的 10^{-35} — 10^{-32} s之间，宇宙的尺度按照指数形式暴涨了 10^{50} 倍，从而造就了在任何有物理联系的可见宇宙中，时空都将是平直的，即时空弯曲的所有信息都被抹平了。暴涨理论的确能够解释宇宙的平坦性问题，也能解释微波背景辐射两个相距 1° 以上的区域如何建立物理联系的所谓“视界问题”。但暴涨理论也预言，由于早期宇宙的剧烈时空膨胀，必然会产生引力辐射，留下类似与微波背景辐射相同的宇宙原初引力波背景。不过，宇宙暴涨产生的引力波背景要比宇宙微波背景辐射早得多，故而必然“穿越”宇宙光子的最后散射面——微波背景辐射。所以，若宇宙暴涨真的存在，我们应该会在微波背景辐射上找到它的痕迹。目前，一些雄心勃勃的探测计划正在或将要实施，虽然2014年南极 BICEP2 公布的结果最终是一场乌龙，但在不久的将来，我们很有可能给出原初引力波存在的强有力证据。

决定宇宙命运的参数我们已经确定了两个，物质密度参数 Ω_M 和宇宙曲率参数 Ω_k 。这样，可以算出今天宇宙的平均能量密度参数 $\Omega_\Lambda=1-\Omega_M-\Omega_k=0.73$ 。虽然我们并不知道 Ω_k 的真正含义，但已经

能够勾画出宇宙的整体物质能量组成，即大家熟知的重子物质成分是4%，暗物质成分是23%，两部分组合的宇宙物质的总体比重仅为27%，而占宇宙主导地位(73%)的是所谓的能量密度 Ω_Λ ，宇宙将在此神秘能量的主导下永恒地膨胀下去。

1998年，三组独立的天文观测为宇宙永远膨胀的图画进一步奠定了基础：作为标准烛光的Ia型超新星在不同宇宙尺度上的视亮度，可以被当作测量宇宙膨胀行为的最佳“灯塔”，因为任何物体的视亮度都随距离平方反比下降，若Ia超新星的视亮度比均匀膨胀宇宙的平方反比规律预言看起来亮，则暗示宇宙在减速膨胀，反之，宇宙会加速膨胀。1998年，三组独立测量Ia超新星的观测结果同时发现，Ia超新星的亮度比均匀膨胀宇宙预言的要暗，预示着目前宇宙正处于加速膨胀状态。此重要发现在获得2011年诺贝尔物理学奖的同时，也与上面通过微波背景各向异性测量得到的 $\Omega_\Lambda=0.73$ 之结论相吻合，即造成宇宙加速膨胀的推动力就是宇宙的暗能量 Ω_Λ 。

如果今天的宇宙中 $\Omega_\Lambda=0.73$ ， $\Omega_M=0.27$ 和 $\Omega_k=0$ ，则主宰未来宇宙命运的唯一参数就是所谓的暗能量了，因为物质密度毕竟会随宇宙的加速膨胀而迅速下降。爱因斯坦场方程给出的宇宙动力学演化，预示在遥远的未来，宇宙将遵循 $\exp[H_0(\Omega_\Lambda t)^{1/2}]$ 的膨胀规律，宇宙中所有星系彼此迅速远离，甚至光线的波长也都被巨大地拉长，天空将变得越来越暗淡，宇宙终将死气沉沉，再也没有了今日之生机。这些听起来荒诞的推论，都源于一个神秘参数 Ω_Λ 的存在！

4 困惑与希望

主宰宇宙命运的是暗物质和暗能量，揭开其神秘的面纱也就构成了对今天物理学和天文学的最大挑战。

当天文观测排除了一切重子物质作为暗物质的候选者后，人们的目光转向了最有可能的弱相互作用粒子WIMPs，甚至人们天真地认为，

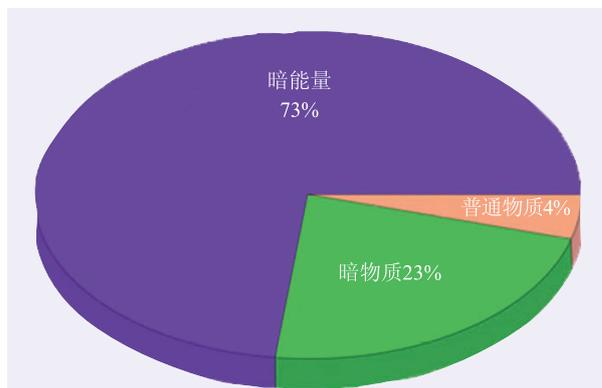


图3 宇宙的物质能量组分：暗能量73%，暗物质23%，普通物质4%(来源：WMAP网页)

WIMPs仅参与弱相互作用而不参与其他(如电磁)作用。这样我们也许有几种在宇宙中直接或间接捕获它们的手段：一是在地下建造巨大的探测器(如我国的锦屏山地下实验)，排除本底，以增加探测器体积，从而提高WIMPs与探测器靶体的作用概率；二是若WIMPs发生湮灭，则可以探测到高能光子或背景电子谱的超出，从而间接探知暗物质的存在(如丁肇中先生领导的阿尔法磁谱仪实验)；三是在加速器中直接寻找新的粒子。目前，全世界已经投入巨额经费，在庞大的技术和科学队伍支撑下开展了诸多“上天入地”的实验，但至今仍一无所获。一个有趣的问题是，既然大家都深信暗物质粒子仅参与弱相互作用，但若其不与重子物质作用，而仅仅是暗物质粒子间的弱相互作用，那么我们就永远无法直接探测到它，因为探测器都是重子物质组成的！

当我们对暗物质的属性揣摩了几十年仍然显得无尚迷茫之际，今天对暗能量的纠结则更胜一筹：天文观测是无法区分爱因斯坦场方程之中，由爱因斯坦引入的宇宙学常数 Λ 和粒子物理学家深信不疑的真空能 ρ_v ，所以天文观测给出的 $\Omega_\Lambda=0.73$ 其实反映的是两者之和： $\rho_{\text{eff}}=\rho_v+\Lambda$ 。如果采用自然单位制， $\Omega_\Lambda=0.73$ 意味着 $\rho_{\text{eff}}=10^{-47} \text{ GeV}^4$ ，而真空能量密度理论计算给出 $\rho_v=10^{74} \text{ GeV}^4$ ，所以我们将需要面对物理学最具戏剧性的一个方程或等式： $10^{-47}=10^{74}+\Lambda$ ，即物理学的理论必须解释为何自然界会选取一个基本常数 Λ ，使得它在120位小数点后的“微调”作用保持着宏观宇宙和微观世

界的微妙平衡？这大概是物理学目前面临的最具挑战性的难题。

由于暗能量仅在宇宙大尺度(超过星系团的尺度)才能显现,与暗物质粒子的寻找不同,天文观测是目前测定暗能量性质的唯一手段。宇宙大尺度结构、微波背景辐射、星系团的特质、微引力透镜效应等,都被认为对确定和鉴别暗能量的状态方程、时间演化和区分不同暗能量模型有积极的帮助。特别是,正像 Ia 型超新星可以用作标准“烛光”探测宇宙膨胀一样,宇宙中也存在自然的“量天尺”可以用于暗能量的研究,这把“量天尺”就是重子声波振荡(BAO)——宇宙早期一种由物质的引力和气体的压强相互平衡而产生的涟漪,就像一块石头落入水面产生的涟漪一般,其荡漾在微波背景辐射和物质分布之中,测量其空间尺度在宇宙各个时期的变化,将会揭示出宇宙暗能量的基本性质,为今天研究暗能量性质之首选实验。

然而,当诸多粒子物理学家热衷于“上天入地”地寻找暗物质的时候,当诸多天文大设备以探测暗能量的“旗号”争相上马开张的时候,也有些科学家坚信暗物质和暗能量也许根本就不存在。任何理论都有其适用的范围,把牛顿动力学和广义相对论没有束缚地推广到浩瀚的宇宙中所导致的暗物质和暗能量困惑,也许才是真正的罪魁祸首。

例如,早在 1983 年,以色列物理学家 Milgrom 就提出修改牛顿的动力学(modified Newtonian dynamics, MOND):牛顿的第二定律仅在加速度很大的场中才适用,当我们走出太阳系至银河系尺度时,重力加速度已经变得极其微弱,牛顿的第二定律也就不再适用,应该修正为 $f=ma^2$ 而不再是 $f=ma$ 。这种形式上的修改,的确能够解释星系旋转曲线为何在大距离上呈现平坦趋势的观测事实,同时也可推广至广义相对论情形。虽然 MOND 历经 40 年而不衰,仍然有人孜孜不倦地将其用于各天体系统,但多数天文学家并不看好此理论的发展前景。

1970 年,生于德国的澳大利亚物理学家

Buchdahl 提出了著名的 $f(R)$ 引力理论,试图把最小作用量中的线性 Ricci 标量 R 推广为一般形式 $f(R)$,从而通过修改广义相对论而不再需要引入暗能量。目前, $f(R)$ 引力的研究极其活跃,由于 $f(R)$ 具有多样的选择,我们似乎可以给出一切与暗能量性质类似的宇宙大尺度结构特性。下一代的大型天文巡天计划(如 Euclid, SKA 等)才有可能区分广义相对论和 $f(R)$ 引力的真伪。

也有一些物理学家试图建立暗物质和暗能量的统一理论,如所谓“膜”理论。代表人物如荷兰的物理学家 Erik Verlinde,他提出所谓“熵力”的概念:我们生活在“膜”上,浮在“膜”上得以显现的是我们熟知的发光物质,而淹没在“膜”下面的则是暗物质,其贡献引力,故而我们仍可以感受到它的存在,而“膜”被巨大的暗能量托起。此幅图画犹如我们是大海上的一叶小舟,露出水面的岛屿是发光物质,水面以下托起岛屿的和淹没的礁石都是暗物质,“大海”本身就是暗能量。

找到了主宰宇宙命运的暗物质粒子和确定了暗能量性质,无疑是这个世纪物理学最重大的发现,而建立新的物理学以代替广义相对论,从而驱散笼罩在物理学天空的暗物质和暗能量这两朵“乌云”,同样也会引起物理学的又一次革命。我们已经走到了物理学发展史上一个新的转折点,一场新的变革和革命即将在物理学发生。我们期待,我们也为之而奋斗。

以上报告内容引起了与会者的极大兴趣,也引发了热烈的讨论。为了尽量保持讨论的原貌,笔者不打算考证其中引用事实的可靠性和精确性,请读者将下列文字材料当作随意漫谈,而不应将其当作公开报道的事实加以引用(以下录音由《物理》编辑部整理)。

1. 很多科学研究包括一些重大的实验,都建立在理论未可的基础上,我们把所有暗物质、暗能量探索,都押在爱因斯坦场方程可以在宇宙中无穷推广的这样一个假设的基础上,现在进行量子信息,把很多宝架在很多物理学家都有争议的,甚至一个概念的基础上,去做很多很多实

验。现在要问这样一个问题，我们去做这样的实验，这么大的投入，到底安全不安全？

2. 一种是相当于在现有框架下修正，这是一条路，也可能走得通；还有一条路就相当于一场革命，要把现在在很多物理概念拓展到新的尺度完全是不同的规律，类似于原来量子革命的那么一种路。天体物理，应该讲是21世纪最有挑战的，而且最会引起物理学根本性革命的东西。第一要观测，第二不要拘泥于用现有理论去解释这些观测。我觉得，现在天体物理总的来讲，投入的条件跟美国没法比。包括目前做观测的，当然现在天体、天文学也投入了很多力量，造了很多大仪器，但我自己觉得没有一个主攻方向。

3. 现在天文投资相当多的、在建的都是上亿的设备，但(有一些)不是科学目标主导的，而是设备主导的，这是非常糟糕的事情。

4. 有一个目标是明确的，我看了一下国内现在受到大家关注的很多问题都是世界纪录，这个世界纪录是在数量上能做多少，而不是去问，做这个东西要干什么？我经常问一个问题，我们量子信息他们说做多少比特，我在问，做12个比特和10个比特有什么区别？在物理上它有什么重大的突破？这个东西做的越多越好，有没有一个东西我做了能干什么？我觉得做科学无非是两个，做最基础、最基本的重大问题，比如我做10到12个，这中间会发生一个相变的问题，看到了一个完全不同的东西，这是一个；第二个，这个东西有用，在技术上非常有用，但我们往往对有用的东西反而投入的比较少。我发现，我们经常喊的一些重大的科学目标，在我们看来解决不了太多实际问题。我们现在中间的东西做的比较多，而真正最基础、最有用的，却花的功夫比较少。

5. 不管怎么样，这个研究领域从物理来看是非常有意思的一个领域，主要有三点：第一点，它挑战的是广义相对论；第二点，挑战的是物质结构；第三点，挑战的是天体演化。这三个方面的任何一点进展，都是了不起的进展。

(Mind Concert Academic Salon 是“中关村科学沙龙”系列活动之一，由《物理》编辑部主办，得到了中国科学院科学传播局的大力支持。本期沙龙由孙昌璞院士主持，参加成员有：成会明院士、韩秀峰研究员、姜晓明研究员、姬扬研究员、林惠民院士、李丽研究员、李明研究员、欧阳颀院士、武向平院士、王晋军教授、翁羽翔研究员、向涛院士、杨国桢院士、袁亚湘院士、朱邦芬院士)



微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7124
精密锁相放大器

低温物理
设计极致



Model 5186
差分前置放大器



生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10
Email: info@ametec.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三冠阳光科技发展有限公司
电话：010-65202180/81 传真：010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net