

圆桌论坛：对21世纪物理学的愿景展望

编者按

2021年9月22—23日，清华大学携手中国物理学会和香港中文大学，在清华大学大礼堂举行了庆祝杨振宁先生百年华诞学术思想研讨会。大会特别设置了“圆桌论坛”环节，邀请物理学界几位非常具有代表性的学者，围绕21世纪物理学的发展趋势展开深入讨论。此次论坛一共邀请了6位嘉宾，由中国物理学会理事长张杰院士担任主持人，其他5位嘉宾按照发言顺序分别是：中国科学院高能物理研究所陈和生院士、香港中文大学杨纲凯教授、美国犹他大学吴咏时教授、中国科学院物理研究所向涛院士、中国科学院理论物理研究所蔡荣根院士。嘉宾们以其精湛的物理学功力和深厚积累，围绕物理学未来发展的趋势进行了深入的观点交锋和激烈的思想碰撞，所论及物理问题的深度和广度充分体现了中国物理学界对于物理学未来发展的见识和愿景。清华大礼堂现场气氛热烈，当天通过直播平台观看会议的超过10万，参会者都为圆桌论坛的精彩纷呈和深刻洞见而赞叹，堪称中国物理学家一次高水平的思想交流。

或许在未来的某一天，当我们回忆这次圆桌论坛的观点和预言时，也许会更加深刻地体会其深刻意义。《物理》编辑部经活动主办方授权，根据圆桌论坛视频整理成文，并经受邀嘉宾审阅定稿，刊登于此，以期更多华人读者领略当日圆桌讨论的精髓，尤其希望更多的青年读者能够从本次圆桌讨论的观点和展望中获益。



清华大礼堂“圆桌论坛”6位嘉宾风采(2021年9月23日)

DOI: 10.7693/wl20220501



圆桌论坛，扫码观看

张杰(中国物理学会理事长):

大家好!我是中国物理学会理事长张杰,按照会议安排,由我来主持今天的圆桌讨论。

圆桌讨论的主题是对21世纪物理学发展的展望,因此,我们今天从杨先生关于20世纪物理学发展的文章谈起,可能是一个比较好的开场白。

杨振宁先生在2002年曾经写过一篇文章,谈20世纪理论物理学发展的主旋律。杨先生说:“每首交响乐都是有主旋律的,而这个主旋律是由几个不同但又相互关联的主旋律相互纠缠、相互作用形成的”。物理学至少在物理学家的心目中,是一门非常美的学科;当然音乐,显然也是一门非常美的艺术,所以物理学与音乐是有相通之处的,相通之处可能就在于我们人类对于美的理解,对于美的追求。因此,既然每首交响乐都有其主旋律,那么物理学发展当然应该也有它的主旋律。20世纪物理学发展的主旋律是什么呢?杨先生总结,20世纪的物理学发展主要是三个主旋律的相互作用、相互渗透以及相互的耦合。

第一个主旋律是量子化。量子化是20世纪物理学发展的主旋律,这个是非常显然的。1900年,普朗克为了解释黑体辐射的紫外灾难提出了能量是量子化的观点,但是在最初,普朗克只是为了避免黑体辐射的数学表达式在极高能极限下发散而做的一个假设。1905年,爱因斯坦第一次深刻地揭示了量子的真正含义,提出了光子的概念,尤其是提出了光的能量辐射不是连续的,而是以光子的形式辐射的。8年以后,1913年,玻尔把普朗克的量子概念用在了原子结构的解释上,于是创造了量子化的第一个高潮。后来,在玻尔、海森堡和薛定谔三个人的共同努力下,形成了量子力学的基本框架和群星灿烂的量子化时代。量子力学革命性地影响了物理学的发展,也使得人类第一次有了认识和研究微观世界的工具。

20世纪物理学发展的第二个主旋律,杨先生总结为对称性。对称是20世纪物理学发展的主旋律之一,当然也是比较显然的。1905年,爱因斯坦发表《论动体的电动力学》论文,提出了狭义相对论。两年之后,有个数学家写了一篇论文,

指出狭义相对论中的那些公式,用数学的眼光来看,其实就是一个对称的结构。狭义相对论的基本意义就是对称的观点,这个观点对于20世纪物理学的发展有决定性的影响。杨先生的成就里面也有相当大的部分是在探讨对称性的追求中产生的。

20世纪物理学发展的第三个主旋律是相位因子。相位因子最早在1918年由数学家Weyl提出。后来,人们在研究很多大科学问题的研究当中,发现相位因子在里面都扮演着非常重要的作用,包括广义相对论和引力的关联,以及麦克斯韦的电磁学理论。电磁学理论是实数,但是杨先生谈到,假如在当时研究电磁学理论就意识到它也可以有虚部的话,那么我们对电磁学的理解就会深刻得多。

杨振宁先生已经非常精辟地总结了20世纪物理学发展的主旋律。今天我们沿着这个思路一起来思考,21世纪的物理学发展有没有一些根本的规律?当然在21世纪刚过了五分之一就预言未来发展的规律,无疑超出了我们的能力,但是,我还是想请几位物理学家从各自的专业角度出发,来谈谈对于物理学的认识,谈谈对未来本领域发展的看法,我以为是有益的。

下面有请各位嘉宾移步台上,首先是陈和生先生。陈和生先生是实验高能物理学家,他领导了北京正负电子对撞机重大改造工程和东莞散裂中子源工程,使我国高能实验物理研究走到了国际前沿。我们请他谈一下对粒子物理学未来发展的展望。

陈和生(中国科学院高能物理研究所):

我主要想谈对粒子物理未来发展的展望。粒子物理是物质结构研究的最前沿,研究物质结构的最小单元及其相互作用的规律,一个世纪以来一直是物理学研究的一个主旋律。20世纪,名副其实是物理学的世纪,在这个世纪,物理学从原子深入到原子核,从原子核深入到质子和中子,然后又深入到夸克,实现了三个层次的跨越,对物质结构的观点有了巨大的贡献。它的科学研究

成果，也成为了大量的变革性创新的基础，对我们的生产、生活、政治和国际关系都产生了极为深刻的影响。

谈到粒子物理，肯定会谈到20世纪后半期提出并且得到实验充分验证的标准模型。它取得的巨大成功，使我们对微观世界的认识前进了一大步。但是粒子物理依然面临着巨大的挑战，这个挑战来自于粒子物理对宇宙论，也就是宇宙的起源和进化以及天体演化过程的分析。粒子物理和宇宙学、天体物理交叉而产生的粒子天体物理，是一个非常活跃的交叉前沿！天文观测表明，宇宙中只有4%—5%的物质是标准模型所描述的物质，其他95%以上都是暗物质和暗能量。这两种新的物质都是标准模型所不能够解释的。所以我们感觉到，尽管人类有高度的文明，科学技术非常发达，但是到现在为止，仅仅认识了宇宙中5%的物质。有人形容我们不过是井底之蛙，仅仅看到了很小的一部分宇宙；也有人认为现在的物理学对这个宇宙的了解，好比哥白尼提出太阳学说之前的地心学说，就是说我们对宇宙的认识是局限且片面的。

如果说20世纪初期由迈克尔逊—莫雷实验和黑体辐射这“两朵乌云”，带来了20世纪物理学量子理论和相对论的突破，那么在21世纪，我们现在就面临着暗物质和暗能量对物理学严峻的挑战。它们就是21世纪物理学天空的“两朵乌云”。我想这“两朵乌云”，不仅是对物理学的挑战，也是物理学前进的动力，表明物理学又一次处于一个新的重大历史性发现的前夜。值得注意的是，寻找和研究暗物质是个非常活跃的领域，有若干模型得到大家的高度重视。实验研究有深地实验，比如锦屏深地实验室、格兰萨索实验室等世界上很多这样的实验室；有地面的对撞机实验，比如欧洲核子研究中心的大型强子对撞机；有宇宙线的观测实验，坐落于四川稻城的高海拔宇宙线观测站——“拉索”；还有在空间的实验阿尔法磁谱仪和“悟空”号探测卫星，都是在寻找暗物质。希望中国的科学家能够在21世纪物理学发展的突破中做出重大贡献。特别强调，我们从

地下、地面和天上去寻找暗物质，暗物质到底是什么？现在还说不清楚，并不知道。我常用辛弃疾的诗句“众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处”来形容这个局面。可能现在大家叫得很响的未必是真正的突破口；我觉得，我们在充分发挥中国的资源、地理条件、技术人才优势开展暗物质实验的同时，还要考虑部署下一步研究。

我希望理论物理学家要做超前研究：一旦这些实验当中的某一个得到了比较明确的信号，怎样证明它就是在宇宙中占有百分之二十几的暗物质？怎样去测量它的质量和耦合常数？怎么能够在不同的实验中，比如地下实验、宇宙线观测、对撞机实验和空间探测实验中，证明它就是这样的粒子。我认为这是一个需要理论物理学家和实验物理学家深入思考，并开始做超前研究的任务。一旦发现了某个候选粒子，做进一步的实验分析这个粒子，必然成为国际竞争的热点。“凡事预则立”，我们如果有适当的理论研究准备和适当的实验预案，也许我们就能够在这场竞争中抢得先机，为21世纪物理学的重大突破做出重大贡献。我衷心希望有更多的中国青年能够献身物理学研究，献身科学，热爱祖国，为即将到来的物理学的变革和突破做出我们中华民族应有的贡献。

张杰(中国物理学会理事长):

陈和生先生在结尾提出了非常美好的期待，他谈到19世纪末物理学的天空中出现了“两朵乌云”，对这“两朵乌云”的深入探索带来了20世纪物理学发展的群星璀璨。作为对比，在20世纪末21世纪初，物理学的天空中同样出现了“两朵乌云”，一个是暗能量，另一个是暗物质。所以陈和生先生的演讲提出了非常好的问题。

下面有请理论物理学家杨纲凯先生。杨纲凯先生主要研究基本粒子、场论、高能唯象、耗散系统和本征态展开，以及对光学和引力波等开放系统的应用。我们请他谈一下对理论物理学未来发展的展望。

杨纲凯(香港中文大学):

对物理学的未来发展做展望，其实是不容易

的。下面我抛砖引玉提出自己的观点以及猜想。今天台上几位先生的看法必然在多方面一致，重复的观点不拟重复，更多强调一些较少提及的角度。

第一，物理发展的一个主线是各个作用力进一步的大统一，包括万有引力。借用杨振宁先生关于另一个议题时的话语，“这个统一大业已露曙光，初现晨曦，我们可以期盼天之光亮”。而且，在未来几十年内，“天大亮”的进展肯定是要建立在Yang—Mills的框架上，这可能是送给杨振宁先生百年华诞一件很好的礼物。

第二，虽然未来的发展很难预料，但我大胆做出预言：未来几十年的物理学发展，将会出现很多我们意料之外的事情。为什么这么说？回想50年前大家关心的物理问题，从现在来看，很多问题都没有问对，更不必说答对。在我读研究生的时候，老师常问，宇宙膨胀加速度是多少？没有人质问它的符号，原来想当然的符号是错的。那时候大家思考太阳中微子“丢失”的 $2/3$ ，都一头栽到核物理或者星体模型去找答案，没有人提到中微子的振荡。这在当时绝对意想不到。还有很多其他的例子。所以我相信在未来几十年的发展中，会有很多现在想不到的事情发生，这和陈和生先生说的有点相关。我想年轻朋友值得注意的是，意想不到的事情包括从小问题引出的大突破。众所周知，“ θ - τ 之谜”带来宇称不守恒，在具体粒子的特性上引出大突破。今天，我们不妨仍以杨一米尔斯规范场为例。理论自1954年提出以后，多年不受重视，直至发现电子深度非弹性散射呈现渐近自由。这也是一个具体实验引发大道理的例子。

第三，杨振宁先生提出二十世纪理论物理学发展的“主旋律”，今天好几位先生也有所论述。然而，物理学作为一门学问已经非常成熟，广泛应用于不同领域，比如生物物理、材料等，让年轻的物理学家有更多的机会在不同的方向发展。主旋律固然重要，可是在主旋律以外，我想还有很多的机会可以发展。

第四点，不是任何预言或展望，而是我自己

感觉的困惑。随着物理学分支增加，应用更广，引申出物理学在某个意义上是分化的现象。几十年前，看《物理学报》和*Physical Review*等期刊至少知道文章的主旨，现在完全看不懂的文章有很多，因为物理分化成许多关系不是那么密切的分支。这个趋势有利有弊，好处是年轻人有可能更早参与比较窄的研究方向，更快走到前沿。如今优秀的大学中，本科二年级学生起步参与研究工作并不稀奇。反过来是学生可能基础还未学透，就参与比较窄的研究项目。作为一个教育工作者，我常在思考如何取得平衡？这不是杞人忧天，而是值得各个物理系深入思考的问题。

张杰(中国物理学会理事长):

杨纲凯先生从他的角度讲了21世纪物理学发展的趋势，他谈到的第一个方面是“大统一理论”。这是20世纪物理学没有解决的问题，因为自然界中的四种相互作用力在20世纪有三种已经得到统一，但是引力到现在还没有能够与另外三种相互作用相统一，所以这是20世纪留下来的一个大问题，因此杨纲凯先生讲到的“大统一”，或许是我们这个世纪主要的一个研究方向。

第二个方面，杨纲凯先生讲到物理学的发展有很多是意料之外的。在上个世纪，确实有很多科学发现都与意料之外是相关的。杨纲凯先生特别强调，意料之外的研究一定要见微知著。就是说一个小的细节性的问题，不要觉得它是个小问题，或许它隐含的是一个大的科学问题。

第三个方面，杨纲凯先生讲到对我们目前物理学教育的一点思考，同时也寄托了一些希望。这不单是杨纲凯先生的希望，也是我们大家的期望，希望我们大家在给学生讲授或传授物理学之道的时候，能够让学生在关注大问题的同时，还要打下非常坚实的基础。只有这样，我们下一代的物理学家，才可能会有更大的建树。

下面有请理论物理学家吴咏时先生。吴咏时先生在粒子物理理论、统计力学、凝聚态理论和数学物理等多个领域均有卓越建树，我们请他对理论物理的未来发展做个展望。

吴咏时(美国犹他大学):

我今天主要想对国内年轻一代的理论物理/数学物理爱好者和工作者,谈谈个人对基础物理学的展望,抛砖引玉。现在有一种趋势是基础物理学逐渐成为物理学中重要的分支之一,虽然研究的人员没有很多,但是所讨论的问题都与基础物理学的基础问题紧密相关。基础物理学的未来发展与实验也有密切联系,甚至将来计算物理也有可能进入基础物理学的范围。

当前物理学的粒子物理标准模型中, Yang—Mills 场部分在数学上非常完美,物理实验上也得到了完美的检验。从理论物理或量子场论的角度看, Higgs 场部分还有若干很不满意的地方。例如,微扰论缺乏预言性。做微扰论的高阶计算,每计算一阶就要重新调节模型的原始参数,所以 Higgs 场的理论还是不甚完美,缺乏预言性。对称性破缺的观念解决了弱作用 Yang—Mills 规范粒子的质量问题,但遗留了若干基础问题,包括作用强度的层级问题(Hierarchy Problem)等,尚待加深理解。

此外,万有引力,特别是量子引力,依然存在挑战。现有的引力理论和时空理论有一个很重要的谜是黑洞的信息悖论,它表明引力(即时空弯曲)与信息密切相关。现在开始有一些迹象表明有可能解决这个谜,但我认为这只是引力和时空与信息关联的一个方面。即使黑洞信息悖论可以比较理想和彻底地解决,但时空和信息关联的其他方面(如量子纠缠)仍然是很深刻的谜。

此外,陈和生先生刚刚讲的暗物质和暗能量该如何理解?这是实验上提出来的重大挑战。类比于19世纪末放射性的发现对20世纪物理学的影响,超过了1900年 Kelvin 爵士“两朵乌云”的著名演讲。因为“两朵乌云”提出的问题,在1930年之前就已解决,而放射性提出的问题一直延续至今。对暗物质和暗能量的深入探索,必然对21世纪物理学发展产生长期的重大影响。就像当年量子力学取得重大突破后,放射性的研究对物理学的影响还在持续下去。

现在看来,量子信息在基础物理当中发挥着

基本作用。简言之,量子信息就是相干和纠缠,这是经典理论没有的概念。现在种种迹象表明,纠缠将发挥很重要的作用,特别是拓扑物态的研究,所以后者未来在物理学中的作用很可能变得非常基本。

数学物理,新的物理期待新的数学。众所周知,牛顿为了在物理上表达牛顿力学,发明了微积分; Einstein 从等价原理出发解释广义相对论,1907年后,广义相对论的发展停顿,直到1913年,发现引力和几何有很大的关系,所以 Einstein 在物理学中引入黎曼几何,成功地发展了广义相对论。Hilbert 空间是量子力学最简洁的表述,总结了 Heisenberg 的矩阵力学和 Schrödinger 的波动力学,所以 Hilbert 空间理论成为了量子力学的数学基础。杨振宁先生的规范场理论不仅是物理学中的一种结构,而且是数学上很微妙的结构。物理上规范场理论是粒子物理的标准模型的一个基础,数学上和陈省身先生纤维丛联络论实际上独立发展。新的物理学要求量子信息会起中心作用,那新的物理学会对数学有什么样的要求?假如现在数学家已经发展,那可以像 Einstein 应用数学家的成果。假如数学家没有发展,那就像杨振宁先生和牛顿一样要独立发展新的数学。

最近凝聚态物理拓扑物态的研究,特别是内禀拓扑物态,它由拓扑量子场论描写,有数学家和物理学家两种版本。这两种版本都是用群表示作为动力学的自由度。从物理学的角度来讲是比较新颖的做法,实际上是联络论某种新的数学表达形式。拓扑量子场论的拓扑性质、整体性质和纠缠有非常大的关系。所以无论哪种版本,实际上都是规范理论的某种新的形式或推广。我猜测,量子信息和规范场理论有密切关系。Weyl 最早的规范理论是尺度变换,不是位相变换,因为他提出最早版本的时候,量子力学还没有建立。那时候, Einstein 非常尖锐地指出 Weyl 规范理论毛病,尺的长度会依赖于尺的历史。量子力学建立以后, Weyl 规范理论修改成 $U(1)$ 规范理论, $U(1)$ 规范理论确实有记忆关系。所以我的粗浅感觉,规范理论的记忆性实际上必然和量子信息有

很大关系，总是和信息的流动密切相关。

另外相关的话题是时空的演生，这是一个新的概念，我猜测也很可能和规范场理论有密切联系。从数学的角度讲，某种意义上可以合理地猜测，几何是从代数演生出来的。对于经典几何，流形上的复值函数(即场)的代数就包含了流形的几何(和拓扑)的性质。相应的量子场的算子代数，看来应该包含时空的量子(非交换)几何的信息。

最后我愿意大胆预测：在未来科学发展中一个跨学科新的“铁三角”关系，将对基础物理的发展起重大作用。如图1所示，底下两个角分别是物理学和数学，上面的角代表信息(计算)科学。从现在的发展趋势看，理解这三个学科的上述关联，将会推动我们深入理解如何从量子比特的“网络”中信息的耦合和流通，演生出具有“长程量子纠缠”的物理时空。而为达此目的，预期需要新的数学工具，如范畴论和拓扑量子场论等。当然我们可能还需要准备，出乎意料的新实验结果和被人忽视的观念可能带来新的颠覆和突破。国内年轻一代，希望寄予你们，勇于接受物理学基础问题的挑战，做出超越前人的创新和突破。

张杰(中国物理学会理事长):

吴咏时先生首先讲了基础物理的重要性，同时强调了现在的基础物理已经不完全是理论物理，很多时候也包括一些基础性的实验，还有大量的计算物理相关的内容，这可能对于年轻的老

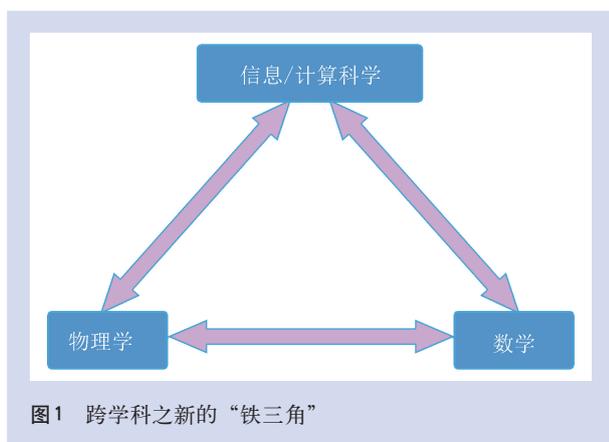


图1 跨学科之新的“铁三角”

师和同学来讲特别重要。接下来吴咏时先生又讲到了黑洞内部信息是否丢失的问题，这也是这些年物理学家们探讨非常多的一个问题。我想我们物理学家在做物理学研究的时候，可能不是特别关注信息本身的研究，而黑洞是一个非常好的两门不同学科的交叉点，因为要回答黑洞内部信息是否丢失的问题，所以，这是信息学和物理学非常重要的一个交叉点。

接下来吴咏时先生又讲到了量子信息，量子信息在现在非常重要，量子信息其实在某种程度上是上个世纪讲到的三个主旋律里面相位因子的体现。我们在研究物理学的很多时候，没有太多关注相位因子，但是所有相干的现象，以及很多的量子信息里面发生的现象，其实恰恰是相位因子在起作用，这也是吴咏时先生建议我们要多关注量子信息的原因。

另外，吴咏时先生还讲到了数学物理，这其实是在提醒我们，数学和物理学一方面是独立发展的，但另外一方面，在历史很多重要的发展阶段，这两个学科相互扶持、相互支撑、相互交融，产生了巨大的突破。数学本身是唯美的，追求美，研究对称性，研究很多自然界中的奥秘。很多时候它的问题的确是来自物理学，但是它本身也有其自身的发展规律。数学独立发展的一些理论，恰好可能就在物理学发展的某个阶段，缺乏合适的表达工具的时候，恰好被人发现，数学已经在那个地方，所以这也是吴咏时先生建议我们要特别注意的。

最后，吴咏时先生用一幅图把他所说的内容表述出来，图中既包括信息学，也包括讲到的量子信息，还包括物理学的主干以及数学的主干。

下面我们有请凝聚态物理学家向涛先生。向涛先生主要从事凝聚态强关联量子理论研究，研究方向包括：高温超导机理；密度矩阵重正化群与张量重正化群。我们听一下他对凝聚态物理学未来发展的展望。

向涛(中国科学院物理研究所):

凝聚态物理是物理学研究中一个非常基本的

分支，同时有广泛的应用背景，现代半导体及信息技术的基础就是凝聚态物理。我将从基础理论和应用两个方面来谈一下这个领域的两个重要发展方向。

在基础理论研究方面，非微扰的多体量子理论的发展，是今后物理学需要解决的一个基本问题。做出这个判断的依据或背景是什么呢？如果大家学物理，看教科书，就会发现现在所学的量子力学方法都是用来处理单体问题或者能化成单体问题来处理的物理问题。很多不能用单体来处理的问题，也是假设能在单体问题的基础上，通过微扰的方法来处理。量子场论就是一种微扰方法，但实际上，很多物理问题是不能用微扰方法来处理的。例如，强相互作用问题，这是粒子物理研究的基本问题，就是一个非微扰问题；凝聚态物理理论研究的高温超导机理问题，这是21世纪需要解决的基本问题之一，也是一个非微扰问题。事实上，大多数物理问题，以及量子化学问题都是非微扰的多体问题。解决这些问题，是物理学深入发展的必然趋势。杨振宁先生在这方面做出过很多很好的工作，例如他提出的杨—Baxter方程，解决了一类有特殊量子结构的量子可积多体问题。另外，他在超导研究中提出的非对角长程有序以及磁通量子化的理论证明，也都是量子多体问题。这方面研究的发展不光会帮助我们解决高温超导机理问题、强相互作用问题，而且有助于我们发现更多微观世界的运动规律。

教科书介绍的物理学的规律，很多都是在解决单体或者少体问题的研究过程中发现的。虽然到目前为止基于解决多体问题所发现的规律不是很多，但也有一些。例如，超流和超导的宏观量子规律就是在凝聚态物理系统的研究中发现的。我相信随着对非微扰量子多体问题研究的深入，更多的规律会被揭示出来，并指导我们解决一些新的物理问题，这是今后凝聚态物理发展的一个必然趋势。

非微扰量子多体问题是一个重要但也很难的问题，我们现在是不是到了可以解决这个问题的阶段呢？我觉得是。原因是，在过去的四五十年

期间，有大量的实验结果的积累，为解决这个基本的理论问题提供了线索，使得我们解决这个问题的思路在逐渐走向成熟。做出这种判断的一个标志性的现象，是凝聚态物理研究发现了越来越多我们所不理解的现象，局面上很混乱，但实际上是一种信息的积累过程。尤其是最近10年，信息的快速积累显得尤其突出。信息的积累就是一种熵的积累过程。众所周知，在热力学中，如果熵积累得特别快的时候，通常就是接近或者非常接近临界点的过程，相变就不会太远。因此这个非微扰量子多体问题的研究在今后几十年可能会取得重大突破，希望这种突破能够早日到来。

从应用的角度讲，凝聚态物理今后在量子计算或更广义讲是量子科技的发展方面将起到关键作用。量子计算和凝聚态物理相关，这是因为量子计算要做到大规模、可集成化的量子计算，离不开高性能材料和器件的研发。现在量子计算的方案很多，粗略地可分为固态方案和非固态方案。非固态方案包括离子阱量子计算、光子量子计算等。但是，量子计算要真正做到大规模和集成化，固态方案从技术角度看可行性是最高的。现在并不知道量子计算能解决多少问题，其研究状态和刚刚发明计算机的时候很相似。在计算机刚出现的时候，我相信没人能想到它能够成为改变人类生活方式的一项伟大发明。量子计算技术可能是再次改变人类生活方式的一项技术，因为它的计算能力要远远大于现在基于半导体芯片的计算技术。假设能够实现，100个量子比特的量子计算机的计算能力就会远远大于现在全世界所有计算机加起来的计算能力。因此可以想象，如果这样的技术一旦出现，我们的社会将发生根本性变化。同样，非微扰的量子多体问题用现在的计算技术很难研究，但量子计算机研制出来后，这个问题的研究会变得相对容易。

量子计算的研究还有很长的路要走，但不管怎么样，量子计算技术的发展是一个趋势，受到了包括中国、美国在内的世界各国的高度重视。最近几年，量子计算的研究，进展非常快。例如，与十年前相比，单个超导量子比特的量子退

相干时间提高了5个量级，从纳秒提高到了百微秒的量级。估计在不远的将来，会提高到毫秒量级甚至秒的量级。等到那个时候，量子计算机的发展速度会更快。

总之，从凝聚态物理发展角度来讲，我刚提到的两个方面都是非常重要的。在基础理论研究方面，非微扰量子多体问题的研究，不光是对凝聚态物理研究非常重要，对整个物理学甚至化学也都会产生非常大的影响；在应用方面，基于固态的量子计算技术的发展，也是凝聚态物理研究的重要方面，其发展可能会改变人类的未来！

张杰(中国物理学会理事长):

向涛先生对凝聚态物理未来发展的展望点讲得非常清晰到位，一方面是非微扰的多体量子场论，这可能是凝聚态物理基础理论方面要实现重大突破的一个重要方面。非微扰的多体量子场论为什么重要？其实我们仔细想想，量子力学是一个非常美妙的理论，对我们理解微观世界产生了非常重要的影响，但是我们学的量子力学，它应用的对象是极其有限的。我们除了学习了波函数的计算方法以外，真正可以精确求解的只有两个问题，一个是谐振子问题，另一个是氢原子问题。那除了这两个精确求解的问题之外，我们还学到了什么？其实就是学的微扰论，但强相互作用系统中将强相互作用作为微扰处理，本身就有疑问；对于多体问题，严格求解最多也就只能做到两体。“More is different”，多体问题十分复杂，而非微扰的多体强关联系统就更是挑战。正如向涛先生指出，凝聚态物理未来发展必须要突破多体的、非微扰的量子场论。

第二个方面是凝聚态物理的应用，也是实践。他讲到量子计算，既讲到量子计算本身有很多难关需要突破，又讲到量子计算的发展，这很有可能为解决凝聚态物理中遗留的很多重要问题提供非常有力的帮助。

下面有请宇宙物理学家蔡荣根先生。蔡荣根先生主要研究方向是黑洞物理、引力的基本性质、超弦理论和宇宙学等。我们请他谈一下自己对宇宙学发展的展望。

蔡荣根(中国科学院理论物理研究所):

宇宙学是物理学研究中最大的一个研究对象，宇宙学研究宇宙的起源、演化和它的命运。20世纪宇宙学有两个非常重大的发现。其中一个是在1929年哈勃发现宇宙是膨胀的，在当时完全颠覆了人们的想法；另外一个是在1998年发现宇宙不仅仅在膨胀，还在加速膨胀当中，这也完全颠覆了物理学家以及天体物理学家当时的想法。因为引力相互吸引，宇宙膨胀越来越慢才对。宇宙的加速膨胀，就导致了所谓的暗能量问题。自从20世纪80年代开始，以COBE卫星、WMAP卫星和Planck卫星等对宇宙微波背景精确测量为代表的天体物理实验，极大地推进了宇宙学的研究。现在建立了宇宙学标准模型：在宇宙的极早期，宇宙有一个突然加速膨胀的过程，称为暴涨，类似于现在的加速膨胀的过程，暴涨之后是以辐射为主的时期，然后是物质为主时期，现在是宇宙加速膨胀暗能量为主的时期。宇宙是由什么组成呢？陈和生先生讲到，5%的普通物质，也就是粒子物理标准模型所描写的物质，通常叫做发光物质，27%的物质是暗物质，还有68%是暗能量。暗物质和暗能量都不参与电磁相互作用，是看不见的。那它们有什么区别呢？暗物质和普通物质一样，它会成团，而暗能量弥漫在整个宇宙当中。这个宇宙学的标准模型是非常成功的，与现在所有的天文观测基本上相符。但是这个宇宙学标准模型存在两个重大的问题。

第一个问题，与其说它是一个模型，不如说是一个配方：5%，27%，68%配起来和观测是相符的。因为这个配方主要的成分，例如暴涨模型，暗物质，暗能量，我们现在都不知道。宇宙极早期的暴涨阶段非常重要，它不仅能够解决热大爆炸模型里面一些无法解决的问题，更重要的是为宇宙大尺度结构的起源提供了一颗“种子”。现在宇宙中有许多大尺度结构，比如说银河系、星系团，这些结构是怎么来的？起源于宇宙极早期暴涨时期的量子涨落。宇宙结构是经典的，它的起源是量子的，那么什么时候宇宙暴涨？什么驱动了宇宙的暴涨？现在还无法回答，这也是非

常重要的问题。我们还没有从基础理论构造出一个成功的暴涨模型。

我们不知道暗物质是一类粒子还是其他的宏观物体。暗物质探测也有很长时间了，粒子物理学家比较喜欢弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particles, WIMP)。不管是直接探测，还是间接探测，还是加速器探测，现在还没有看到肯定的迹象。暗物质到底是什么？除了WIMP，还有许多其他候选者，例如类轴子这种超轻的暗物质，引起了大家极大的兴趣，是非常值得研究的。国际上开展了许多相关的探测，国内也有一些实验在探测。另外一个候选者是黑洞。这个黑洞不是现在天体物理所说的黑洞，而是宇宙极早期通过引力坍塌所形成的原初黑洞。目前还没有观测到原初黑洞，但原初黑洞理论上是存在的。即使不能作为暗物质，从理论上和观测上研究它们也都是非常重要的。根据天体演化理论，如果黑洞是恒星演化最终形成的，那么这样的黑洞质量必须大于三个太阳质量；如果有小于三个太阳质量的黑洞存在，那么这些黑洞就是来自于宇宙极早期演化时所形成的原初黑洞。这是非常重要的一件事。

那么暗能量是什么呢？最简单的模型是1917年Einstein引进的宇宙学常数。这个常数是不是物理学可以计算的，还是一个纯粹的几何量？如果可以计算的话，那么要回答宇宙学常数为什么那么小？这叫新宇宙学常数问题。以前物理学家普遍认为宇宙学常数应该是零，为什么等于零？这个称为老宇宙常数问题。而现在我们需要回答新宇宙学常数问题，它为什么那么小？如果它不是一个可计算量的话，那它是不是一个几何量，几何量为什么那么小，是人择原理决定的吗？暗能量问题是一个很重要的问题，首先应该确定暗能量是不是一个宇宙学常数，它的状态方程是不是等于-1？如果不是常数的话，那它就随时间演化，我们要通过观测来确定暗能量的性质如何随时间演化。对于这个动力学场，我们现在还不知道，这是宇宙学标准模型存在的一个问题。

第二个问题，随着观测精度的提高，最近发

现的宇宙学标准模型， Λ CDM模型，即含宇宙学常数的冷暗物质模型(Lambda-cold-dark-matter model, Λ CDM)，与现在的哈勃常数的观测是有矛盾的。根据微波背景辐射，即宇宙高红移观测推算出来，现在宇宙膨胀常数在68左右，而局域观测、近距离观测的低红移超新星观测达到了72，它们的偏差达到了 4σ — 5σ ，这个叫做Hubble tension。与这个问题相关的一个物理学参数是S8，它是指800万的秒差距范围内物质密度的涨落。天文的观测和理论的预言，根据 Λ CDM标准模型给出的也有 2σ — 3σ 的偏差。怎么解释这个偏差呢？要么在观测方面，存在还不知道的系统误差；要么还有超出 Λ CDM模型的新物理。作为研究理论物理的物理学家而言，当然是更希望是后者，因为 Λ CDM模型太简单，尽管完全遵循朱邦芬老师讲的Einstein统一派的美学观点，非常简单，非常美。但是宇宙的演化一般不会那么简单，可能还是会稍微复杂一点。但是不管怎么说，我个人的观点是， Λ CDM模型至少抓住了宇宙演化领头阶的效应，次阶效应可能蕴藏着更加丰富的物理。

讲到黑洞，大家知道黑洞的理论研究和实验观察获得了2020年诺贝尔物理学奖。黑洞对于量子信息是非常重要的，从20世纪70年代开始，霍金就提出黑洞存在辐射，Bekenstein提出黑洞具有熵，建立了所谓黑洞热力学。这个研究方向一直是理论物理非常重要且活跃的领域，黑洞热力学具有半经典的量子引力性质，因此它是广义相对论、热力学统计物理、量子论以及量子信息纠缠等领域的交叉领域，所以我认为黑洞的物理研究可能是未来的量子理论和基础理论的突破口，因为这涉及到引力的本质问题。我们的时空是不是由量子信息构造？除了这个非常基本的问题之外，黑洞物理还存在一个观测上的问题。根据广义相对论，黑洞非常简单，只有质量和角动量两个参数，现在已经观测到宇宙中存在的黑洞，是否与广义相对论预言的黑洞一致，黑洞外面的引力场，是否由广义相对论克尔几何描述呢？这个有待检验。2020年诺贝尔物理学奖评选

委员会主席提到，这个颁奖提出了很多问题。例如，以前通常研究黑洞的外部，黑洞的外部 and 内部因果不关联，现在确实是观测到了黑洞，那黑洞的内部结构到底是怎么样？根据广义相对论，黑洞的内部一般会有奇点的存在，所以，Penrose 2020 年获得诺贝尔奖的一个非常重要的工作，就是证明了宇宙中的奇点在广义相对论中是不可避免的。那么黑洞内部真的有奇点吗？其内部结构到底是什么样？现在必须认真思考这个问题。另外与此相关的地面引力波探测也获得了诺贝尔物理学奖，但由于地球引力梯度、地震等影响，地面上引力波的观测只能是 10 Hz 以上的引力波。在宇宙整个演化过程中，有大量的不同频率的引力波，不同频段引力波的探测需要有不同的技术。地面上 LIGO、VIRGO 探测，被称为第二代地面引力波探测，现在科学家也在设计第三代引力波探测。毫赫兹引力波的频段必须放在空中去探测。纳赫兹的探测必须要用脉冲星测时阵列探测。像我们国家的 FAST，以及刚刚启动的 SKA 等都可以做这些事情。2020 年北美纳赫兹引力波观测站(NANOGrav)宣称观测到了随机引力波背景的信号，但是尚未完全证实，这是非常非常重要的。起源于暴涨期间更低频段的引力波，如果观测到随机引力波背景是非常重要的，所以不同

频段的引力波的科学意义不一样。宇宙引力波的观察发现为探测宇宙的起源和奥秘提供了一种非常强大的新的探测方式。对宇宙学而言，20 世纪是提出问题的世纪，21 世纪是要回答宇宙学相关问题的世纪。

张 杰(中国物理学会理事长):

蔡荣根先生的报告作为压轴，的确起到了非常好的承前启后的作用，前面几个报告提出来的很多问题，都在这个报告里有所回应。但是在回答前面问题的同时，蔡荣根先生又提出了更多的问题，当然，这也才是我们面临的真实宇宙，一个充满了疑问的宇宙和一个令人神往的宇宙。蔡荣根先生特别强调了物理学家近来对不同频率引力波的观察，对于引力理论，乃至对于宇宙标准模型中很多问题的深入理解，都提供了非常好的借鉴。

最后，蔡先生给今天在座和不在座的物理学家，尤其是年轻一代物理学家提出了一个希望：上个世纪物理学发展中提出来的问题，在这个世纪我们是应该回答的。正所谓：江山代有才人出，各领风骚数百年。



现场与会人员合影