

## 于淦院士科学故事传奇 ----现代科学发展在中国之一

巴川

Recommended: 王德奎 (Wang Dekui), 绵阳日报社, 绵阳, 四川 621000, 中国, [y-tx@163.com](mailto:y-tx@163.com)

**摘要:** 于淦院士说, 科学工作者离不开社会、历史的大环境, 在一些重要的节点上, 是时代提供了机遇。不管于淦院士是留学苏联, 还是在物理所搞研究; 不管是出国进修, 还是到意大利国际理论物理中心任职, 个人的成长总是与国家命运紧紧联系在一起。他鼓励年轻人, 不管遇到什么困难, 都要坚定信念, 心怀感恩, 奋力前行。

**[巴川. 于淦院士科学故事传奇----现代科学发展在中国之一. *Academ Arena* 2026;18(5):18-26].** ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online). <http://www.sciencepub.net/academia>. 03. doi:[10.7537/marsaaj180526.03](https://doi.org/10.7537/marsaaj180526.03)

**关键词:** 于淦院士; 科学故事; 传奇; 量子调控; 爱因斯坦

### 【0、引言】

量子世纪年指 99 年前的 1925 年 7 月, 海森堡发表了论文《运动学和动力学关系的量子理论新释》。此后的近百年里, 物理学界量子群星璀璨, 薛定谔、波尔、狄拉克、费曼、杨振宁等一众大师闪亮登场, 量子力学不断颠覆着人类对科学和世界的认知, 不断引导着人类的科学技术革命。为了庆祝量子科学技术给人类带来的进步, 由美国物理学会与德国物理学会发起, 国际物理学界和科学史界联合筹划, 将 2025 年确立为“量子世纪年”。

《物理与工程》杂志是高校物理教育研究领域中国科技核心学术期刊, 由教育部主管、清华大学主办, 创办于 1981 年。

2025 年在联合国“国际量子科学与技术年”到来之际, 《物理与工程》期刊将以特刊或专栏的形式, 参加量子世纪年的活动, 发稿选题包括量子计算、量子精密测量、量子通信等研究领域的原创或综述论文, 量子理论的教学研究或经验分享、量子力学发展历史、量子科技产业化的综述等。由此, 《物理与工程》编辑部请求中科院院士、中科院物理研究所研究员于淦教授作重刊序, 在《物理与工程》上重新刊发, 他欣然答应。这引起我们早想写的《于淦院士科学故事传奇》, 有了开始动笔的念头。

### 【1、于淦院士科学传奇简介】

作为老一辈科学家, 于淦院士主要从事高温超导、强关联电子系统、低维量子系统等方面的研究, 为我国凝聚态物理的发展做出了突出贡献。他的人生故事, 书写在我国理论物理的研究史上, 激励着年轻一代科研人员心怀感恩, 奋力前行。

于淦院士几十年来, 在理论物理研究领域积极探索, 攻坚克难, 把个人理想同国家发展相结合, 始

终坚定信念, 以宽广的胸怀面对一切难题和挑战, 为中国理论物理的发展进步做出了重要贡献, 在促进我国凝聚态物理领域的学术交流和人才培养发挥了重要作用。

于淦院士的科研生涯, 也并非一帆风顺----三年困难时期, 于淦院士温饱问题难以得到保障, 但他和他的课题组, 干劲十足, 一讲就是半天, 大家相互讨论、相互批评, 只是讲稿迭起来就超过一尺。

就是过着这样艰苦奋斗的日子, 他们终于迎来了改革开放, 也迎来中国科技发展的春天。于淦院士曾经留学海外, 也曾遭遇学业中断、研究受阻, 是他始终不忘初心, 到最后迎来柳暗花明。

### 1、促进凝聚态物理的学术交流和人才培养

在磁性杂质对超导体影响的研究中, 于淦院士做出了开拓性贡献, 在促进凝聚态物理的学术交流和人才培养方面发挥了重要作用。

于淦院士在从事的高温超导、强关联电子系统、低维量子系统等方面的研究, 他从理论上预言含顺磁杂质超导体中存在束缚态, 开拓了磁性杂质对超导体影响的系列理论与实验研究。

他参与倡导闭路格林函数研究, 给出了描述平衡与非平衡统计物理的统一理论框架; 提出导电高分子准一维系统中, 孤子型元激发应满足的拓扑性边界条件; 研究了准一维导体中, 局域性元激发的动力学和物理效应应用自洽方法; 研究了空穴在反铁磁背景上的运动; 研究并预言电阻在转变温度附近有极大值用规范场理论; 研究了高温超导体的理论, 用规范场理论研究高温超导问题, 研究低维量子系统中的新奇量子现象。研究生培养情况少而精, 硕士 3 名, 博士 4 名。

### 2、与郝柏林院士等合作共赢研究及发表论文

于淦院士与郝柏林院士合作, 用骨架图展开方

法计算了连续相变临界指数，准到小参量  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 4 - d$ ,  $d$  是空间维数) 的 3 阶。

于淦院士与苏肇冰院士合作，发展黄昆院士的晶格弛豫理论，研究了准一维导体中局域性元激发的动力学和物理效应；用自洽方法研究了空穴在反铁磁背景上的运动；研究并预言电阻在转变温度附近有极大值；用规范场理论研究了高温超导体的理论。

于淦院士参与倡导闭路格林函数研究，给出了描述平衡与非平衡统计物理的统一理论框架。提出导电高分子准一维系统中孤子型元激发应满足的拓扑性边界条件。在超导理论、相变和重正化群、非平衡统计物理方法、一维有机导体理论、低维量子系统等多个领域进行大量的研究工作，发表学术论文 200 篇，从理论上预言含顺磁杂质超导体中存在束缚态，推动了磁性杂质对超导体影响的理论与实验研究。

## 【2、于淦院士年谱故事传奇】

### 1、从“学物理”到“做物理”

于淦院士 1937 年 8 月 22 日出生于我国南方水乡——江苏镇。

1956 年，于淦院士 19 岁；上个世纪五六十年代，有 8000 余名中国留学生远赴苏联学习。于淦院士作为其中之一，被送到前苏联国立哈尔科夫大学学物理。优质的平台，为他提供了丰富的学习资源、锻炼了他的学习能力。本科毕业后，他本打算继续攻读博士学位，然而，好景不长，由于中苏关系破裂，他只能中断博士学习，提前回国。

1961 年，24 岁；于淦院士从原苏联国立哈尔科夫大学物理系毕业，回国后被分配到中国科学院物理研究所工作。当时物理所理论研究室的主任李荫远院士很开明，对年轻人很支持。

于淦院士大学毕业论文的题目是《自旋波共振》，李荫远院士原本希望于淦院士和他一起做磁学方面的研究工作，但当李荫远院士发现于淦院士对超导理论等新出现的课题更感兴趣时，就要于淦院士自己组织一个新的课题组，研究超导理论，并担任组长。

于淦院士说：我当时 24 岁，这是一个很大的挑战。幸好，当时研究室里还有几个年轻人，有的从苏联留学回来，像莫斯科大学的陈春先和哈尔科夫大学比我高两届的郝柏林院士（1961 年再次去苏联做研究生，1963 年回国）；有的从国内大学毕业，像复旦的陈式刚和北大的霍裕平。大家志同道合，组织起富有成效的互教互学活动。

### 2、三年困难时期受益多

1959 年至 1961 年我国处在三年困难时期，肚子还填不饱。

于淦院士说：但大家的劲头十足，每周要组织三

四次学术报告会，一讲就是半天。在会上，大家纷纷提出自己的看法和观点，互相讨论、互相批评，自由讨论的学术氛围使大家受益匪浅。

郝柏林院士在《怀念陈春先》的文章中说：1953 年初秋，陈春先被国家派到俄罗斯西伯利亚之窗、乌拉尔矿业之都斯维尔德洛夫斯克学习地球物理探矿。1956 年暑期，我国驻苏使馆作为个例，分别批准了两名本科留学生的转学申请：即陈春先转入乌拉尔大学、后来到莫斯科大学物理系，1959 年初陈春先在学制 5 年半的莫斯科大学物理系毕业。1959 年暑期以后，来了北京大学毕业的霍裕平院士；还有几位各省“科学院”派来的实习生，都是大学没有毕业的本科生。陈春先来到这样的理论室，立刻成为最主要的骨干。

原因是陈春先在苏联玻格留博夫院士的组里从事过真正的前沿研究，当时在量子场论方法成功地用于多体问题和统计物理的大背景下，超导理论刚刚突破。玻哥留博夫发展了自己的一套超导理论形式，陈春先在超导理论、多体问题和统计物理几个方面都有所贡献，在著名的苏联《实验和理论物理杂志》上发表了好几篇论文。陈春先立即把陈式刚、霍裕平这些国内大学毕业的高才生带到研究前沿。因陈春先、陈式刚、霍裕平、郝柏林（五人小组）在 1950 年代末大学毕业后，被国家分配到刚刚成立的中科院物理研究所理论室做研究实习生。

1961 年于淦从苏联回来，也进入了这个集体。国内物理界曾戏称陈春先和郝柏林院士是“陈春先学派”。于淦院士在边干边学中，迈出了超导研究的第一步。因为在上个世纪 50 年代末、60 年代初，量子场论方法广泛地运用到凝聚态理论，取得了许多重要的成果，巴丁--库柏--施里弗的超导微观理论是最杰出的例子。

于淦院士说：陈春先在玻格留博夫的研究组工作过，是他们学习、研究量子多体理论的带头人。当时讨论的问题非常广泛，从多体形式理论，包括格林函数方法、输运过程理论和趋向平衡问题等，到凝聚态物理中的具体应用，涉及超导、铁磁现象和共振弛豫过程等。他自己在这个过程中受益非常多，在边干边学中迈出了超导研究的第一步。

研究杂质对超导体性质的影响，是当时的一个热门课题。苏联专家们当时只用微扰论分析了杂质散射的影响，但出于好奇，于淦院士当时做了个“大练习”，用广义正则变换，把含磁性杂质超导体的哈密顿量近似对角化了，发现在能隙中会产生一个束缚态。

经过陈春先小组里同事们推敲，觉得没有错误，于淦院士写的此论文被就送到《物理学报》，1963 年投稿，1965 年就发表了。

于淦院士说：后来才知道，日本与苏联已有人分

别在 1968 年和 1969 年也发表了类似的工作。由于这个束缚态离能隙边很近,实验检验比较困难,直到上世纪 80 年代初才在隧道谱中被定性观察到;扫描隧道显微镜发明后,90 年代才在实验上得到定量检验。

高温超导体的能隙具有 d-波对称性,有节点,对杂质散射更敏感,上世纪 60 年代的这个工作,又引起了一定的注意。当时于淦院士做这个“大练习”,与物理所当时宽松的研究氛围有非常密切的关系。当时的“五人小组”,除陈春先因特殊的历史原因外(非常令人惋惜的是他已过世),其他四人都先后被选为中科院院士。

### 3、好景不常:文革开始后的幸存研究

1965 年后,研究工作受到外界环境的很大干扰。

以于淦院士为代表的的老一辈的科学家们,充分利用物理所当时的“局部小气候”,并没有中断科学研究。好景不常,在 10 年“文革”期间,也有过“反复”“回潮”,他们利用“局部小气候”,尽力做了点研究工作。特别是 1971 年杨振宁院士第一次回国访问,以后几乎每年都来。1972 年周恩来总理见杨振宁时,周培源院士在座。

1972 年,于淦院士 35 岁;因杨振宁回国访问,杨振宁院士强调基础研究的重要性,得到周总理的认可。周培源院士就在《光明日报》上发表了长篇文章,阐述基础研究的重要性。

于淦院士等,凭借知识分子敏锐的“嗅觉”,将研究的侧重点从“应用型”问题,转向“基础型”问题。通过对国际期刊的浏览,他们发现,在我国“闹革命”的那些年,国际物理界对相变和临界现象的研究有了突飞猛进的发展。我国落后了,没有别的办法,他们只有老老实实地补课,组织讨论班分工阅读重要文献,用互教互学的办法“强补”,把所有重要的文章,一篇一篇地看,一篇一篇地算,一篇一篇地讲,几个人的讲稿迭起来超过一尺。

于淦院士说:那时他们是边学边干,一方面“啃”K.G.威尔逊在《物理评论》发表的两篇长文,一方面用自己熟悉的方法独立地推导别人的一些结果。那时他们边学边干,一方面“啃”着国外学者发表在国际刊物上的长篇文章,一方面用自己熟悉的方法独立地推导别人的一些结果。他们当时的一些研究,虽然由于种种原因没有得到发表,但后来在促进我国与国际科学界交流方面,发挥了很好的作用。

于淦院士说:当时的核心问题是计算连续相变的临界指数,就是找出各种热力学量在临界点的奇异行为。他们抓紧计算高阶效应,经过近半年的奋斗,终于将临界指数的计算推到了  $e$  的三阶。这时他们看到了 E.布雷津等人在《物理快报》A 上发表的同样结果。当然这很遗憾,但稍感欣慰的是,计算正确性得到了验证。

1973 年底,于淦院士等把文章投到《物理学报》,1975 年才刊登出来,连英文摘要都没有。但这是在几乎与世隔绝的情况下,用几乎相同的时间、不同的方法,得到了和国际水平同步的重要结果。

1975 年美国物理学会,组织了一个高层次代表团到中国访问,成员包括巴丁、施里弗、布鲁姆贝尔格等多位诺贝尔奖得主,他们事先作了认真的准备,在日本开了预备会,要深入了解“文革”期间中国物理学发展的真实情况。他们在物理所召开了不同形式、不同规模的座谈会。于淦院士等介绍了我国的这项研究成果,给美国专家们留下很好的印象,在他们正式出版的调查报告中,得到了很好的评价。

1977 年郝柏林院士到法国访问,见到 E.布雷津,给他看了我国 1975 年在《物理学报》发表的文章,他对在几乎与世隔绝的中国还能取得与他们相同的研究成果很惊讶。

### 4、共产党员的于淦院士奋力前行

1978 年,于淦院士 41 岁;6 月,于淦院士加入中国共产党。

1978 年于淦院士参加在布鲁塞尔召开的、专门讨论相变有关问题的索尔威会议,接触到许多重要的科学家。

1979 年于淦院士转到中科院理论物理研究所,他在 1979 年至 1981 年期间,作为访问学者,先后造访了美国的哈佛大学和加州大学圣巴巴拉理论物理研究所,这段经历无疑丰富了他的学术视野和研究深度。这是改革开放和科学的复兴,我国恢复高考、制定科学的发展规划,开始实行改革开放,科学研究的发展,迎来的一次春天。而改革开放伊始,于淦院士得到了访问哈佛大学的机会,也是在接受了真正意义上的“再教育”,在近两年的“回炉”里帮他找到了感觉。

1986 年,49 岁,于淦院士受到联合国(意大利)国际理论物理中心学术委员会主席、凝聚态活动创始人之一隆德奎斯特的邀请,到意大利国际理论物理中心任职;主持凝聚态物理部的工作。任凝聚态物理部主任。于淦院士在该中心任职的 17 年里,使于他获益匪浅。

就在于淦院士在中心任职的近 17 年里,我国科学家有 3600 多人到中心访问,一批优秀的中青年科学家通过该组织走向学科前沿。

1987 年,于淦院士获中国科学院科技进步一等奖。

1990 年,于淦院士当选为发展中国家科学院院士。

1999 年,于淦院士当选为中科院院士,获国家自然科学一等奖。

2000 年,于淦院士获国家自然科学二等奖;获 ISI 经典引文奖。

2002-2003年，于渌院士全时回国工作，任中科院交叉学科理论研究中心主任。自2002年来，于渌院士在推动中国与亚太地区物理学家的合作方面，付出努力并取得了进展。于渌院士领导的中国科学院交叉学科理论研究中心，得到了国际同行的认可和支持。

2005年，于渌院士当选为美国物理学会会士；还在世界物理年科普系列报告会（第四场）做题为《从千奇百怪的相变现象说起》的讲座；于渌院士还以“爱因斯坦和固体量子论”为题作报告。

2007年，于渌院士获国家科技进步二等奖。

2008年，于渌院士获得美国物理协会颁发的2007年度国际物理学领导才能奖，这是对他在全球物理学领域中领导力的极高赞誉。

2019年，于渌院士82岁；中科院物理研究所党委在4月18日开展“不忘初心，牢记使命”主题党课活动，于渌院士作了《时代变迁和个人成长——从亲身经历说起》的党课报告。

2025年，于渌院士88岁，在联合国“国际量子科学与技术年”到来之际，在重新刊发的《物理与工程》上，先作重刊序。

### 【3、于渌院士论科学理论高地之一】

量子论和相对论的建立，是二十世纪物理学的两大革命性突破。

量子力学的发现，彻底改变了人类对微观世界的认识，揭示了原子、分子的内部运动规律，奠定了化学键和化学反应的理论基础，导致了固体电子论的建立。

半导体晶体管的发明、集成电路的大规模应用、激光器的发明和广泛应用、计算机和信息技术的进步，从根本上改变了人类的生活方式。新技术渗透到社会、生活的每一个角落，大到国家的安全，小到日常生活，甚至儿童玩具。没有量子理论，没有基于量子理论的物理、化学和材料科学的革命性变革，这场技术革命是不可思议的。

#### 1、量子调控与强子对撞机爆裂问题

2007年4月10日欧洲核子研究中心发言人，詹姆斯·吉利斯在日内瓦说：这个中心在建的大型强子对撞机，一块磁体在3月27日进行的局部试验中爆裂，未能通过高压试验。

这使由美国费米实验室设计、在美国和日本制造的20多块相同磁体，将被重新检查。这次试验，是在地下100米深处的环形隧道内进行的，磁体爆裂发出的巨响。欧洲核子研究中心，在4月22日举行评审会，确定解决方案，研究磁体爆裂是否影响大型强子对撞机，在2007年11月如期完工运行的可能性？

欧洲核子研究中心的大型强子对撞机，是目前

世界上在建的最大的粒子加速器。建成后它长达27公里的环形隧道，可被用来加速粒子，使其相撞，创造出与宇宙大爆炸万亿分之一秒时类似的状态，可帮助科学家研究银河系、行星以及当今地球上生命的形成过程。

物理学研究物质的基本结构和物质运动的普遍规律，它的研究前沿涉及物质的微观结构、宇宙的结构和演化、凝聚态和生命物质，以及原子、电子、光子、量子等量子体系。原子、分子物理、光学和凝聚态物理，是物理学中涉及面广、影响深远的领域。

一方面，它们为微观、宇观世界的研究和化学、生命科学、环境科学等学科提供理论概念、方法和实验手段；另一方面，它们为半导体、激光、超导、纳米、信息、能源、材料等科学技术提供科学基础。如何认识和调控电子、光子、原子、分子及凝聚态中的量子现象，是将这些重要领域联系起来，孕育和推动新一代技术革命的前沿课题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》，已将“量子调控研究”列为基础研究的四项重大研究计划之一。

美国科学院联合会发布的原子、分子物理和光学委员会2010年的前瞻报告，标题就是“调控量子世界”。从1977年到2005年，与“量子调控”有关的诺贝尔物理和化学奖有16项：

包括整数（1985）和分散（1998）量子霍尔效应、氦3超流的发现（1996）、高温超导（1987）、超导和超流理论（2003）、激光俘获和冷却原子（1997）、玻色-爱因斯坦凝聚（2001）、电子和扫描隧道显微镜（1986）、量子光学和激光光谱学（1981、1999化学、2005）、电子态计算（1998化学）等。

尽管如此，量子理论的概念，与我们日常生活习惯的、宏观世界形成的直观理解格格不入。

按照量子力学，微观世界的粒子具有“波粒二重性”，就是又像粒子，又像波。微观粒子没有轨迹可言，速度和坐标不能同时确定，它们的“不确定程度”要满足所谓的“测不准关系”。

“自旋”是量子特性，但粗略地可以把它设想成一个小磁矩，或一个小陀螺。经典的小磁矩有确定的指向，而一个量子自旋有可能指向任意方向，只有通过“测量”，才能知道它在给定方向的“概率”。但“测量”，却破坏了自旋本身的状态，它的“相干性”。

在很多人看来，量子力学是人们为了克服上世纪初物理学面临的危机，在经典理论不能解释的实验现象“逼迫”下，发挥人脑的超乎寻常的想象力构造出来的，看来正确、很有用的理论，但秘不可测，是一种“自在之物”。然而，现代科学技术的发展改变了这种状况，我们现在借助各种“显微镜”可以直接观测这些微观粒子，确定它们的状态，使原子、电子、光子等量子世界的对象，变成可以“看得见”、

“摸得着”，可以调控的“为我之物”。

从这个意义上说，100年前提出的量子力学，又进入了一个更新的发展阶段，它渗透到科学、技术，乃至日常生活的每一个角落，更深入地影响一切，也受到更严格的检验。

## 2、精密测量：量子调控进展与展望之一

自然界基本规律的确立或推翻，最终靠的是精密测量。

量子论建立的实验基础，是原子光谱的精确测定，而相对论对“以太论”的“最后一击”，来自迈克逊用光干涉仪对光传播速度的多普勒效应测量。2007年底建成的欧洲联合核子研究中心欧洲大型粒子加速器LHC，检验粒子物理的“标准模型”（相当于粒子物理的“元素周期表”）是否正确？重要的目标之一是，寻找所谓的“超对称”粒子。令人意想不到的：精密的原子物理实验，通过测量微小的电偶极矩，也可检验“超对称”理论。

根据通常的理论，包括“标准模型”，原子中正负电荷的重心重合，不会有电偶极矩；而按照“超对称”理论，正负电荷的重心不重合，沿自旋方向产生一个非常微小的电偶极矩。但是，要测出这么小的偶极矩，实验要求的精度是惊人的：如果把原子放大到地球那么大，需要测量的正负电荷相对位移不到千分之一纳米。

为了测出如此微小的电偶极矩，要精确地测量磁共振的频移，准到1纳赫兹，也就是30年进动一周。原子能级或频率的精密测量，是另一个巨大的挑战。现在世界上最精确的铯原子钟，放在美国科罗拉多州的国家标准局，它的精度达到亿亿分之一，也就是6千万年才差1秒。为了达到如此的精度，不仅要把原子冷却到极低的温度，还要用量子力学的原理，把相当大数量的原子（如1000个）“纠缠”起来，变成“超原子”，减少“散粒噪声”。

达到这样高的精度，不是为了纯粹追求记录，而是具有重要的实际意义，涉及国家的安全和重大的技术应用。精密的时钟是发展全球定位系统(GPS)的关键技术，发展小型化的精密原子钟对GPS、精密磁强计、导航等技术至关重要。

## 3、向绝对零度进军量子调控进展与展望之二

物理学有一条定律，叫热力学第三定律，说明“绝对零度”（相当于摄氏负273.16度）是不可能达到的，但这不影响我们无限地接近它。这样低的温度下，会发生一系列我们意想不到的奇妙现象。

1924年印度科学家玻色和爱因斯坦，预言了所谓的“玻色--爱因斯坦凝聚”现象。这个现象与量子力学的“粒子全同性原理”有关。

由于微观粒子没有轨迹，不能“标记”，也就无法区分。微观粒子可分两类，自旋为半整数的叫费米子，每个状态只能由一个粒子占据；自旋为整数的叫

玻色子，每个状态的粒子数不受限制。

非常低的温度下，玻色子都向最低的能态聚集，量子的相干波长超过粒子间的平均距离，产生“玻色--爱因斯坦凝聚”现象。

爱因斯坦本人并不太相信他们预言的这个现象真的能观察到，因为要求的温度太低了。朱隶文院士等人，利用激光技术俘获、冷却原子气体（因此获得1997年诺贝尔物理学奖）达到了极低的温度，为观察这一现象铺平了道路。1995年在理论预言70年后，“玻色--爱因斯坦凝聚”这一令人惊异的奇妙现象终于被观察到了。当时达到的最低温度是50纳K，现在的记录是10纳K。

这里说的是，几乎没有相互作用的稀薄气体。其实，在有相互作用的体系中，类似的现象早已被观察到。1938年前苏联的卡皮查发现了液态氦4在2.19K以下的“超流”（即零阻尼）现象，实际上是一种有相互作用体系的“玻色--爱因斯坦凝聚”。

1941年朗道提出了超流现象的理论。1911年昂纳斯发现的超导（零电阻）也是一种“玻色--爱因斯坦凝聚”，不同的是两个电子（费米子）由于吸引作用组成“库柏对”，从费米子变成玻色子，而这种玻色子的凝聚形成超导现象。与稀薄气体不同，这些库柏对构成的玻色子很大，远超过它们之间的平均距离，每个库柏对与很多其它的库柏对有交叉。这些特点导致了许多的困难，直到1957年，即超导现象发现46年以后，才建立了比较完整的超导微观理论---BCS理论；再经过15年，到1972年才获得诺贝尔物理学奖。

得奖被推迟的重要原因，是BCS理论突破了量子力学的传统框架，允许体系的粒子数不守恒，引入了“对称破缺”的重要观念。

这一观念不易被人们接受，但对微观和宇观世界的认识产生了深刻的影响。1986年发现的高温超导现象，又对凝聚态理论提出了新的挑战。看来，20世纪50年代以来建立的凝聚态理论的范式，包括元激发的概念、朗道的费米液体理论等，都需要有重大的变革。

令人意想不到的是：冷原子的研究，可能对阐明高温超导机制，探索凝聚态理论的新范式发挥重要的作用。利用激光束形成的驻波，可以构造人工的光晶格，把冷原子束缚于其中，位阱的深度可以调节，可以用来研究超导--绝缘体转变和其它复杂的物理过程，为在“清洁”的、人工可控条件下，研究凝聚态物理的基本问题，提供了前所未有的机遇。对玻色子可以研究超流到绝缘体的转变，而对费米子可以利用磁场调节原子间的有效相互作用，研究从BCS态到“玻色--爱因斯坦凝聚”的转换过程。从潜在的应用角度看，被束缚的原子或离子可作频率标准，可存储量子信息，用这样的凝聚原子团簇，可以实现

“原子激光”，用的不是光，而是原子团簇。

#### 4、激光技术新极限量子调控进展与展望之三

激光技术的发展，深刻地影响了整个人类社会：从光纤通讯到激光手术刀，从激光武器到日常生活中大量应用的光盘。

未来的激光技术要向新的极限进军：超高频率、超高功率、超大能量密度、超短脉冲。首先是提高激光的频率，从可见光到紫外，再到 X 射线，各国正在加紧研制的“自由电子激光”，就是要建立比现有同步辐射光源强数十亿倍的 X 波段的相干光源。激光功率可以达到千兆瓦（10<sup>15</sup>）瓦，相当于全世界的发电总功率，它所产生的电场强度，远超过原子内的电场强度，可以把分子、原子打成碎片。

利用激光形成的超大的能量密度，可以模拟早期宇宙的演化和恒星内部的物理过程，可以为可控核聚变过程“点火”。

激光脉冲的宽度，可以短到一个飞秒（10<sup>-15</sup>秒），甚至几十个阿秒（10<sup>-18</sup>秒）。用这样短的脉冲可以拍“分子电影”，甚至“原子电影”，直接观察分子和原子内部的电子过程，可以测量单个分子的动态瞬时结构，甚至控制化学反应的路径。

半导体集成电路的发展，可用“摩尔定律”描述：每 18 个月，芯片上集成的晶体管数目大体翻一番，这是现代信息革命的一个最重要的推动力。过去，常有人“预言”，立足于硅工艺的大规模集成技术“快到头了”。事实上，硅工艺表现了异乎寻常的生命力，一次又一次地打破这些“预言”。现在，这样的发展真的快走到尽头了：

一个是实际问题，散热不能解决，即使最大限度地发挥工程师的想象力，也想不出新的“绝招”；一个是原理问题，晶体管的尺寸太小（几十个纳米），电子的运动不能用经典理论描述，基于经典理论的电子学已不再适用，必须用量子力学，探索全新的器件原理。

针对第一个困难，要寻找新的信息载体：除了电荷外，可以运用电子的自旋，开发自旋电子学，还可以利用各种分子和纳米结构。

更重要的是，除了半导体和通常的磁性材料外，还需要开发更广泛的其它材料，如金属氧化物等，探索它们的新奇特性。

#### 5、呈展现象量子调控进展与展望之四

著名的理论物理学家，诺贝尔奖获得者 P.W. 安德逊 1972 年曾在《科学 (Science)》期刊上发表了一篇文章；他的基本观点是：由大量子系统组成的高一个层次的复杂系统会呈现新的规律，“不能依据少数‘粒子’（指这些子系统）的性质，作简单外推来解释由大量‘粒子’构成的复杂集聚体的行为。正好相反，在复杂性的每一个层次，会呈现全新的性质，而为理解这些新行为所需要作的研究，就其基础性

而言，与其他研究相比毫不逊色”。

凝聚态就是这样的复杂系统，它的结构基元是原子核和电子，但它的运动基元，却是各种“准粒子”或“元激发”，这些“元激发”表现出许多奇异的性质。由于相互作用和电荷、自旋、轨道等自由度的相互制约和竞争，凝聚态会呈展出一系列新奇的量子现象：

如超导、铁磁、反铁磁、铁电、反铁电现象，电荷、自旋、轨道有序，整数和分数量子霍尔效应、庞磁阻、巨热电效应、巨磁光效应、庞电致电阻等。这些新奇量子体系的低能激发态，也会具有许多奇特的性质，例如，分数量子霍尔效应态的元激发，具有分数电荷，遵从分数统计。要能对复杂的凝聚态系统实现“量子调控”，就必须了解这些新奇量子态的本质、研究不同有序相的竞争和转变（量子相变）以及相应激发态的特性。

举两个例子，说明这类“呈展现象”和它们可能的应用。

第一个例子，是在钙钛矿结构的锰氧化物中，观察到所谓的“庞磁阻”效应，即磁有序相变附近，磁场中的电阻可差几十倍，这当然是一种有重要应用前景的磁存储材料，但加磁场有一定的技术困难。

后来发现了一种更有趣的现象，在掺镱的材料中，相变温度以上，用一个很小的驱动电压，就可以使系统在高电阻和低电阻两个状态间可逆地变化，称为“庞电致电阻”效应，它的应用价值不言而喻。

由于可用电脉冲激活，它的响应时间比磁存储元件快得多。它的另一个重要的优点，是与现有的硅工艺可以兼容。

第二个例子，是所谓的“拓扑量子计算”。前面已经提到分数量子霍尔效应和相应元激发的分数电荷，以及它们遵从的分数量子统计。

一般说来，这些元激发是“阿贝尔”型的，可以互相交换。然而，后来的研究表明，分数量子霍尔效应的填充数为 5/2 和 12/5 时，元激发是“非阿贝尔”的，不可对易。同时可以证明，运用这种系统进行量子计算非常稳定可靠，因为有拓扑性质保证。微软公司已经在圣巴巴拉成立了一个“Q”团队，专门研究这种拓扑量子计算的原理和方案，并大力支持若干单位有关分数量子霍尔效应的实验研究。

#### 6、量子信息量子调控进展与展望之五

量子理论和信息技术在 20 世纪创造了辉煌，导致了信息技术的革命。可以预期，这两者在 21 世纪的结合，会产生一个全新的学科——量子信息科学，它可能导致一场更新、更深刻的革命。

经典的信息用二进制的 0、1 来存储，信息本身与存储介质完全无关。例如，一个二进制数 101 代表 5。量子信息存储在量子态中，同样 3 个量子比特可以存储 8 个状态。以此类推，300 个量子比特

可存储的状态是 2 的 300 次方，相当于整个宇宙中的原子数，这就奠定了运用量子计算机进行海量并行运算的基础。

早年爱因斯坦用“隐形传输”的佯谬，来质疑量子力学的正确：

按照量子力学，如果两个自旋处于“纠缠态”中，不管它们相距多远，对其中一个自旋进行“测量”，发现自旋向上，那另一个自旋就一定也是向上。按“常理”看，这是绝对不可能的，这是当年爱因斯坦质疑量子力学的一个重要论据。

然而，光子的“隐形传输”现在已经观察到，并可以用来开发保密通讯，表明这位上一世纪最伟大的科学家在这件事情上没有说对。

量子信息的载体，有许多潜在的竞争对手：被束缚的冷原子、冷离子，或用量子点、约瑟夫逊结等实现的固体量子比特。究竟“鹿死谁手”，还要看未来技术的发展。由于测量对量子态的破坏，量子信息不能“克隆”，所以传统的“中继”站的办法行不通。

一个可能的出路，是把光子与相干原子耦合起来，通过对原子团簇的“纯化”，来实现量子通讯的“中继”。人类一定能够超越“摩尔时代”，继续引领信息革命，但下一代的技术究竟在哪里突破，谁也不能准确预言。因此，在战略上必须有一个比较全面的布局，在有可能实现突破的方向，包括冷原子、冷离子、各类固态量子器件、光存储和光通讯、新奇量子现象和呈展材料的探索等，都不能放过。

有些方面，我们有较强的队伍和较好的积累，但在另一些方面，我们与国际先进水平有很大距离。由于未来的技术还不确定，从一定的意义上说，大家还都在一个起跑线上。

我们应该抓住当前这个机遇，从战略高度安排和组织研究队伍，经过艰苦的摸索、积累，逐步找到自主的创新之路，在这场关系全局的竞争中，赢得一块有利的阵地，做出自己的贡献。

#### 【4、于渌院士论科学理论高地之二】

##### 1、爱因斯坦“革命性的”论文固体量子论

2005 年 9 月 26-28 日，香山科学会议召开了第 263 次学术讨论会，于渌院士以“爱因斯坦和固体量子论”为题，做的报告高度评价了爱因斯坦，在处理固体热容量时，在方法论上的一个创造。

即首先引入了演生的思想；演生论的思想，当年算是旁逸斜出，今天已经枝繁叶茂，成为整个物理学中主要的思想方法，遍布物理学的各领域。当然，爱因斯坦对量子论的根本性贡献，不如相对论那样为人所共识。通常提到的是：光电效应公式、固体比热、受激发射、玻色---爱因斯坦凝聚，和因质疑量子力学，而提出的量子纠缠态。

实际上 20 世纪初，爱因斯坦是一位最坚定、最

彻底的量子论者，是量子论的主要奠基人之一。在 1905 年这个“奇迹年”，他发表的 5 篇著名论文中，爱因斯坦自己认为，只有 3 月份发表的关于量子假说的论文，即“关于光的产生和转化的一个试探性观点”，是具有“革命性”的。重读这篇经典著作，不难理解他为什么这样说。

1900 年普朗克提出了著名的黑体辐射率，开创了量子纪元。

但是，物理学家很快意识到，量子假说与基于牛顿力学的经典分子运动论、麦克斯韦的经典电动力学和光的波动理论是不相容的。

有人，包括普朗克自己，试图修补牛顿经典力学和麦克斯韦电磁理论。对他自己提出的辐射率，普朗克给出了几个不同的推导，最多承认机械振子与辐射场交换能量时只能取  $h\nu$  的整倍数( $\nu$  是辐射场频率， $h$  是普朗克常数)，但辐射场本身是连续的波。

爱因斯坦却认为，黑体辐射、光电效应、荧光等实验与经典力学和麦克斯韦经典电磁理论的矛盾，是不可调和的。这篇论文中他从高频辐射场与理想气体熵的类比，做出大胆的“光量子”(即光子)假设，认为光传播时“能量不是连续地分布在不断扩展的空间，而是由有限数量的能量量子构成，在空间局域，运动时不能被分割，只能作为一个整体被吸收或发射”。这句话，被称为 20 世纪物理学家所做的，“最具革命性”的论断。爱因斯坦的这个论断，大大超越了他的时代，无法得到同行的支持和认可。

多数物理学家同意辐射场与物质交换的能量是“量子化”的，爱因斯坦也因光电效应的理论获得了 1921 年度的诺贝尔物理学奖，但他关于辐射场本身是由“光量子”构成的假说，则被多数物理学家看成一个“大逆不道”的“错误”，以至于十多年后，当普朗克推荐爱因斯坦担任普鲁士科学院重要职位时还念念不忘，他要“原谅”爱因斯坦的这个“错误”。直到 1923 年康普顿效应的发现，才使多数物理学家接受光子的概念，而对光的波粒二重性的真正理解则来得更晚。

##### 2、于渌院士说固体比热的困惑

19 世纪初，杜隆和皮提总结实验规律，提出固体的比热与固体的组成以及温度无关，是一个常数。1876 年玻耳兹曼，运用统计物理原理计算固体中原子的比热，从理论上论证杜隆和皮提的经验规律。

早期的实验似乎与理论符合，但进一步的实验，发现有些固体(如金刚石)比热比预期值小很多。更重要的是，低温下许多固体的比热迅速减小，根本不是常数。这一结果，虽然不如迈克逊和摩勒的干涉实验那样引人注目，但确实是对经典物理的严重挑战。

19 世纪末的著名物理学家，对此各有自己的看法：玻耳兹曼自己担心固体中的原子受约束，他推导的简化假定不成立；凯文则怀疑玻耳兹曼的推导有

错;瑞利意识到这是真实的危机,他认为实验和理论都正确,必须要有新的“领悟”。

面对比热的困惑,爱因斯坦又是一个坚定的量子论者,1907年他发表了著名的论文《普朗克的辐射理论和比热理论》。从文章标题就可看出,这是爱因斯坦关于辐射的量子理论的直接应用。

在先后两篇文章中,爱因斯坦证明只要假定辐射场或带电谐振子的能量是量子化的,利用玻耳兹曼的分子运动论,就可严格推导出普朗克的辐射定律。他深信普朗克的辐射理论涉及物质的根本性质,分子运动论和实验在其他方面的矛盾,也应按类似的思路解决。

这篇论文中,爱因斯坦很自然地把辐射理论推广到固体中的原子振动。爱因斯坦在文中,尖锐地指出了经典分子运动论与实验的矛盾,除前面提到的有些固体比热很小及很强的温度依赖关系外,他还特别指出,按特鲁德的自由金属电子论,电子也应对比热有贡献,但实验上看不到。他作了一个简化假定:固体中的原子按同一频率振动,就可以直接使用玻耳兹曼分布来计算振子的平均能量,从而得到比热与温度的依赖关系。按照这个理论,自由电子特征频率很高(在紫外频率),常温下对比热没有贡献。现在知道,更本质的原因是电子遵从费米统计,在简并状态下费米能量很高,常温时对比热贡献很小。

爱因斯坦不停留在一般的讨论上,还与实验结果进行了具体的比较:有些固体有红外吸收数据,可以根据特征频率来估算温度关系。

金刚石没有红外数据,爱因斯坦从比热数据估出红外特征波长(11  $\mu\text{m}$ ),在整个温度区间拟合实验数据(来自他大学毕业论文的导师韦柏教授),结果很好。1910年能斯特,在更多固体上测量了比热的温度变化关系,证实了爱因斯坦的比热量子理论。

值得提到的是,这是量子论最早直接实验检验。密里根关于光电效应公式的定量检验,是1914年完成的。爱因斯坦运用辐射的量子理论描述晶格振动,开辟了用量子理论研究固体的新纪元,确实是固体量子论的奠基人,2005年正好纪念固体量子论的100周年。

### 3、于淦院士说“自下而上”研究方法的“发起人”

爱因斯坦奠定的固体量子论,后来沿着两条互补的道路前进:

一方面按还原论的精神,从第一性原理出发,预言固体的各种物性,量子力学的运用导致固体能带论的建立,为半导体电子学奠定了基础。计算技术的进步、密度泛函等有效理论方法的发展,使得从薛定谔方程出发,对物性做预言成为现实的可能。

现在不仅可以预言晶体结构、计算晶格振动谱,甚至可以估算出电声子机制下的超导转变温度。但

是,固体中有许多新奇的现象,如超导、超流、量子霍尔效应等,无法从第一性原理中直接推导出来。

根本的原因,是大量粒子组成的体系会表现出单个粒子所不具备的、新奇的性质,展示一些全新的现象。对于这些现象,最有效的研究方法不是按还原论的“自上而下”,而是按“演生论”的方法“自下而上”,就是在总结实验规律的基础上,从唯象到“微观”,逐步揭示新的现象和规律是如何“演生”的。

追溯历史,爱因斯坦是这种“自下而上”方法的“发起人”,虽然他自己可能并没有充分意识到这一点。

固体中原子间有很强的相互作用,它们的振动不是相互独立的。

爱因斯坦当时讨论的简谐振子,不是原子的孤立振动,而是多个原子的集体振动模式,在粗略的近似下,可认为频率相同(后来德拜用连续模型作了改进)。用现在的语言说,这些量子化的晶格振动就是“声子”。爱因斯坦把描述“光子”的普朗克辐射定律,用到固体中的“声子”(两者同为玻色子,都没有静止质量)的确是很“自然”的。基于对自然界运动规律的深刻洞察,和对客观世界规律同一性的坚信,爱因斯坦大胆地迈出了这具有深远意义的一步。

于淦院士把爱因斯坦称为“发起人”,也许不能算强加于人。

声子是固体中最早被认识的“准粒子”,它是运动基元,不是结构基元,离开了固体就不存在,对描述低能行为,如低温比热非常重要。知道固体的结构和原子相互作用,可以算出声子谱,但反过来从声子谱不能推出固体的微观结构和相互作用。

从这个意义上说,爱因斯坦引入的“声子”(他没有这样称呼),是认识演生现象最早的突出例子。演生论的研究方法,在固体理论的研究中发挥了日益重要的作用,相变和临界现象、各种元激发--声子、等离子基元、自旋波激子、极化子……朗道费米液体理论、玻色--爱因斯坦凝聚、超流、超导、约瑟夫逊效应、量子霍尔效应、量子相变,等等,都是演生现象的例证。

当然,“自下而上”和“自上而下”的研究方法是互补的,而不是互相排斥的。令人深思的是,爱因斯坦,作为还原论的最杰出代表,一生追求包罗万象的大统一理论的大师,在年轻时还做了演生论的“发起人”。看来,把“自下而上”和“自上而下”的研究方法结合起来,是研究多层次物质结构的有效手段。也许,固体物理学家先意识到这一点,但现在已得到科学界越来越多同行的认可。

### 【5、结束语】

生命物质和生命过程,充满了演生现象,连超弦理论学家也承认,空间维数是“演生的”,时间是“演

生的”，宇宙本身“也许也是呈演生的”。于渌院士说，科学工作者离不开社会、历史的大环境，在一些重要的节点上，是时代提供了机遇。

不管于渌院士是留学苏联，还是在物理所搞研究；不管是出国进修，还是到意大利国际理论物理中心任职，个人的成长总是与国家命运紧紧联系在一起的。于渌院士鼓励年轻人，不管遇到什么困难，都要坚定信念，心怀感恩，奋力前行。

#### References

1. Baidu. <http://www.baidu.com>. 2026.
2. Cancer Biology. <http://www.cancerbio.net>. 2026.
3. Google. <http://www.google.com>. 2026.
4. Journal of American Science. <http://www.jofamericanscience.org>. 2026.
5. Life Science Journal. <http://www.lifesciencesite.com>. 2026.
6. Marsland Press. <http://www.sciencepub.net>. 2026.
7. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. 2026.
8. Nature and Science. <http://www.sciencepub.net/nature>. 2026.
9. Stem Cell. <http://www.sciencepub.net/stem>. 2026.
10. Wikipedia. The free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org>. 2026.
11. ChatGTP. <https://chat.openai.com/auth/login>. 2026.