

现代物理学基础的思考之五:量子力学的思考

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

摘要 (Abstract): 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, 量子力学, 供参考。[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之五: 量子力学的思考. *Academ Arena* 2017;9(13s): 317-393]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 5. doi:10.7537/marsaaj0913s1705.

关键词 (Keywords): 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学

目录

第一章: 量子力学的产生

- 1、电磁学发展的历史回顾
- 2、量子力学的产生
- 3、光电效应
- 4、爱因斯坦对于光电效应的解释
- 5、爱因斯坦光子假设的困难
- 6、康普顿效应
- 7、光的波粒二象性

第二章: 量子力学基础的诠释

- 1、量子力学基础的争论
- 2、哥本哈根解释的基本要点
- 3、哥本哈根解释的发展
- 4、量子力学的隐变量解释
- 5、量子力学的随机解释
- 6、量子力学的经典或半经典解释
- 7、盖尔曼关于量子力学的新解释
- 8、对量子论的 Copenhagen 解释的批评和反建议
- 9、Copenhagen 学派与实验事实之间的矛盾

第三章 爱因斯坦对于量子力学基础的批判

1. 爱因斯坦的实在论
2. 爱因斯坦与因果律
3. 爱因斯坦对于互补原理的批判
4. 爱因斯坦的辩证唯物观

第四章: 原子物理学与核物理学的现状

- 1、从独立粒子核壳层模型到原子核集体模型
- 2、核结构与核动力学的新进展——IBM 理论
- 3、核内非核子自由度的研究
- 4、基本粒子结构认识的进展
- 5、核物质新形态的探索

第五章: 量子力学的困难

- 1、量子力学基础理论的困难
- 2、量子场论中的量子真空概念
- 3、现代量子力学的几个疑难问题

第一章 量子力学的产生

1、电磁学发展的历史回顾

早在公元前 770 年的春秋时代，中国人就发现了天然磁石，在东汉时代中国人发明了指南针，公元前 120 年前西汉刘安等编篆的《淮南子》中描述了“阴阳相薄为雷，激扬为电”。北宋时期陈微显描述了磁屏蔽现象，并有磁石治疗耳病的记载。17 世纪(牛顿年代)法国旅行家卡·戴马甘兰游离中国后对中国的避雷针进行了描述“中国屋宇顶上龙头中有伸出的金属龙舌，舌根有细铁丝直通地下，使房屋不受雷电的破坏作用”。虽然中国人发明较早，却无人去深入总结。在我们的教科书里全是洋名，不见华名，因为中国人注重发现，但不大注重理论总结与宣传。

1800 年伏打给英国皇家学会会长班克斯写信介绍了电池的原理和构造。使之成为至今众所周知的伏打电池。

1820 年初奥斯忒发现电流的磁效应，并进行了深入研究和总结，而且首先传到德国和法国，在电磁学领域里，无人不晓奥斯忒这个大名。

1820 年 10 月毕奥和萨伐尔发表了关于载流长直导线的磁场的实验结果，经过数学家拉普拉斯的帮助，

$$dB = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2} e_l \times e_r$$

总结出电流元在空间某点处产生的磁感应强度的规律，称之为毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律，简称毕-萨定律。

1824 年 12 月安培发现两传导电流之间的相互作用，并从毕-萨定律出发，描述了磁场环路公式

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_L I$$

，称之为安培环路定律。

1832 年法拉第发现磁铁与导体之间的感应，并认为是在导体中产生了感生电动势 $dU = -\oint \frac{\partial \Phi}{\partial t} d\mathbf{l}$ 。法拉第还在静电测量方面和电镀领域作出了显著贡献。

1834 年楞次却认为是在导体中产生了感生电流 I 。由于感生电动势 ΔU 与感生电流 I 体现在欧姆定律 $\sigma s dU = -Idl$ 方程的两端，哪一个是因？哪一个果？这正如当时哲学界所争论的鸡蛋与小鸡的因果关系一样，谁也说不清楚。

1840 年法拉第做了静电感应实验，麻绳系着一电量为 Q 的带电体，并放入金属桶内，结果发现，金属桶外壁的电量为 Q ，然后，他用多个较大的金属桶套在外层，测量结果是：最外层桶的带电量仍为 Q ，这是著名的桶实验。当时被认为电是分布在以太空间的。爱因斯坦曾充满感情的说：“对于我们，法拉第的一些概念，可以说是同我们母亲的奶一道吮吸来的。他的伟大和大胆是难以估量的”。

1856 年麦克斯韦在《论法拉第力线》一文中指出：当磁铁运动时，自由空间的磁状态发生改变，在以

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = e$$

太空间产生了电动力 \mathbf{E} （后来称 \mathbf{E} 为电场），沿 \mathbf{E} 的环线积分便是感生电动势 $\int \mathbf{E} d\mathbf{l}$ （或 dU ）；对 \mathbf{E} 求取欧姆定律的微分形式，便是感生电流(密度) $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 。因此，他认为感应中的本质是在以太空间产生了 \mathbf{E} ，感应电动势和感应电流只是电动力 \mathbf{E} 的表现形式。这样似乎平息了楞次定律与法拉第定律之间“原因”与“结果”的哲学争议。

1862 年麦克斯韦提出漩涡电场的概念，对感生电动力强度是 $\mathbf{E} = -\frac{\nabla A}{\nabla t}$ （当时 A 称为磁紧张态，后来

称 A 为矢量磁位），两边取旋度运算便有 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\nabla \times A}{\nabla t} = -\frac{\nabla B}{\nabla t}$ ，从此感生电场是漩涡场。

1865 年麦克斯韦根据法拉第的桶实验，提出：电性既不是点也不是面或体，而是分布在整个空间的电位移，可见的介质和不可见的以太被电动力扭拉之后形成了电位移，电位移是位移电流的先兆，总结法拉第的桶实验得知，所谓电，它是分布在整个自由空间的物理量，流入金属球 a 中的电流并没有结束，而是继续流向四面八方，球 a 中的电量即没增加也没减少，因电荷守恒而使得 S 面上的电流连续；改造安培环流定律，引入空间电连续定律，并把泊松方程推广到整个自由空间而得到 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_D$ 。从此麦克斯韦的旋度方程组形成，意指：时变电场感生出磁场与时变磁场感生出电场，同生共死的交替传播，预言以太空间有电磁波存在。

1888年赫兹通过一对放电球的实验证实了电磁波的存在，即证实了麦克斯韦的预言，使麦克斯韦的“互生场”理论一举成名。于是人们承认了麦克斯韦旋度方程组，因为当时没有其它理论讨论自由空间的电波问题。

1892年洛伦兹在他的有关电子论的论文中首先提出了电荷在磁场中运动时受磁力 $F = eV \times B$ 的作用，当时他是通过理论推导而得到的，后来被大量物理实验所证明。

从1895年起，物理学中又产生一种发人深思的新情况。汤姆生（J.J. Thomson）把原子分解为更微小的质点，这些质点更分解为带电的单位，其质量被解释为仅是电磁动量的一个因子而已。“电”真仿佛可以对物理科学中的一切现象给予最后的和充分的解释了。

1896年洛伦兹提出电子论，创建了金属电子理论。相应地在导体内金属电子切割磁力线时受洛伦兹磁力而沿着导线漂移，形成感应电流，其感生电流的密度 $J = nev$ （这里 n 是单位体积中的电子数， e 是电子电量， v 是金属电子在磁力 F 作用下的漂移速度）。洛伦兹还批评麦克斯韦而指出“麦克斯韦从不相信电荷体，总是以他的电位代替电荷，人们也很难理解他指的电荷是什么，他也从不问及电磁场是怎么产生的，在他的理论中，似乎电磁场来自无穷远处，一种不需要源的场，……电荷的运动才是产生一切电磁场的根源”。

[再根据欧姆定律的微分形式 $J = -\sigma \frac{dU}{dl}$ ，便得到导体内感生电动势 $dU = -\frac{J}{\sigma} dl$ 。其本质是受力。]

1897年（麦克斯韦去世后的第18年，亥姆霍尔兹和赫芝去世后的第3年），J·J汤姆逊发现电子，证实了洛伦兹的电子论的正确性。

1905年爱因斯坦总结麦克斯韦电动力学，以麦克斯韦的旋度电场理论为依据而论述相对论，在他发表的首文中写道：根据麦克斯韦电动力学，当线圈禁止而磁铁运动时，空间磁场随时间改变，在线圈中产生了电流；而当磁铁禁止而线圈运动时，空间磁场并没有随时间改变，但线圈中仍然产生了电流，可见，空间本不该对称，它是相对的。

1905年，爱因斯坦根据洛伦兹电子论、J·J汤姆逊对电子的发现，考察光电二极管并联想到黑体辐射中的量子假设而提出波粒二象性。人们开始研究光电效应的应用。在18世纪，人们关于电只知道存在电荷，它们相互吸引或排斥跟它们的距离的平方成反比。在引力学说领域，实质上，我们知道某种与此相似的东西——重物的相互作用定律，仅此而已。但是，电的学说在一个半世纪内已经得出了电磁场概念。

爱因斯坦说：‘相对论是从场的问题兴起的。由于旧理论的矛盾与不一致，迫使我把新的性质归之于自然界的一切现象的舞台——时空连续区。’‘场，用来描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场，这需要很大的科学想象力才能理解。’对于电磁场，‘现在唯一的出路，便是认定空间具有一种发送电磁波的物理性能，而不过分顾虑这句话有何真正意义。’（《物理学的进化》）

2、量子力学的产生

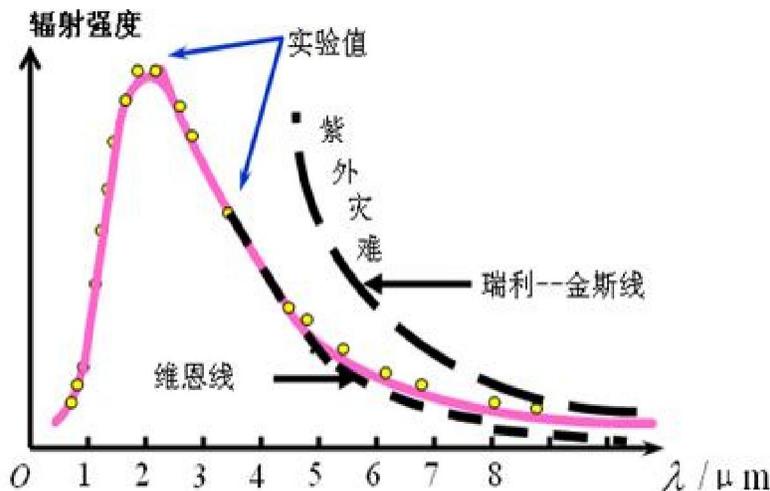
杨振宁教授：“二十世纪物理学的主旋律是：量子化、对称性和相因子”。在自然哲学观上，量子论带给了我们前所未有的冲击和震动，甚至改变了整个物理世界的基本思想。它的观念是如此地革命，乃至最不保守的科学家都在潜意识里对它怀有深深的惧意。

如果光波具有电的性质的话，它们就必定是从运动中的电荷出发的，初看起来，只要新发现的电子是按照牛顿的动力学运动的，我们就可以得到一个令人满意的物质本源于电的学说。但是，如果电子围绕着原子核而运动，就象行星围绕着太阳运行一样，它们就应该放射出一切波长的辐射，能量就应该随着波长的缩短按可以计算的方式增加。但是，事实并不是这样；为了解释这个事实，普朗克（Planck）就假定辐射是按确定的单位，即量子，而射出和吸收的，每一个量子都是一定量的“作用”，这个量相当于能量乘时间。

普朗克希望通过分析热辐射，能够解开热学和电磁学之间联系的奥秘。他想通过自己的研究，将物理学中这两个领域彼此不相矛盾地统一起来。突然，他当时面临一个事实，发现某些辐射过程具有不连续量子的特性，这一点无法纳入经典物理学世界观中去。1900年，普朗克抛弃了能量是连续的传统经典物理观念，导出了与实验完全符合的黑体辐射经验公式。在理论上导出这个公式，必须假设物质辐射的能量是不连续的，只能是某一个最小能量的整数倍。普朗克把这一最小能量单位称为“能量子”。普朗克的假设解决了黑体辐射的理论困难。普朗克还进一步提出了能量子与频率成正比的观点，并引入了普朗克常数 h 。量子理论现已成为现代理论和实验的不可缺少的基本理论。普朗克量子假设构成物体的分子、原子可视为在各自平衡位置附近振动的带电线性谐振子，这些振子既可以发射辐射能，也可以吸收辐射能。谐振子发射和吸收辐射能量是某些分立状态，是最小能量单位 $h\nu$ 的整数倍，即发射或吸收电磁辐射只能以量子方式进行，每个量子能量为 $\varepsilon = h\nu$ ，其中 h 是普朗克常量， ν 为谐振子的振动频率。能量不连续的概念与经典物理学是完全不相

容的！

普朗克在 1900 年 10 月 19 日，提出一新的黑体辐射公式（普朗克公式），它与实验惊人符合。



$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1}$$

$$\rho_{\nu} d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

h 叫普朗克常数 单位： 6.62559×10^{-34} 焦尔·秒。

我们还是引用一段库珀书上的话：在普朗克的作用量子的假设中，并没有考虑到电子那样的实物和光的相互间的关系，所以普朗克的关系式可以说是凭空想出来的、毫无根据的东西，它对于经典物理学来说也是大逆不道的。甚至普朗克本人，还有其它人，都希望能有某种方式是这个关系式消失掉。

普朗克写道：他“试图将和纳入经典物理学的范畴，但是一切试验都失败了，这个量显得非常顽固。”他又写道：“想越过这个泥潭的一切尝试都失败了，这使人们毫无疑问地很快意识到，作用量子在原子物理学中将起重大的作用……”最后，他说：“在好几年时间内，我花费了很大的劳动，徒劳地去尝试如何将量子作用引入到经典理论中去。我的一些同事把这看成是某种悲剧。但我自己有不同的看法，因为我从深入的剖析中获得极大的好处。要知道，起初我只是倾向于认为，而我现在确切地知道，做用量子将在物理学中发挥巨大的作用……”。

1901 年，Planck 关于普适作用量子的出现，形成了物理学发展中的一个转折点；这一发现揭示了原子过程中的一种整体性特色，这是完全超出于经典物理概念之外的，甚至是超越了物质有限可分性这一古代学说的。

量子力学对经典物理学的冲击：在原子模型中起作用的原则上连续的概念被说成是错误的，尽管在某一个事实领域中的过程能用旧的模型很好地描述，它的基本概念严格说是不合法的。

Bohr 认为为了实验性地建立一门新的、更广泛的力学，使它也能适用于原子内部的运动。不妨假设在古典理论所考虑的所有无限多种运动类型当中，只有少数几种特定的类型才能在自然界中实现，这些许可的运动类型（轨道），应该根据一定的数学条件，即根据 Bohr 理论中所谓量子条件来选择，一个绕核公转的电子角动量只能为 $h/2\pi$ 的整数倍。这些条件的选法，使得它们所施加的一切限制，在运动粒子的引力质量比我们在原子结构中所碰到的引力质量大得多场合下，实际上是没有意义的。在分析现象的一切阶段中，所涉及的作用量都要远远大于普适量子。【1】这样以来，这种新的微观力学在应用到宏观物体上时所得到的结果，完全与旧的古典理论完全相同了（这就是对应原理）；只有在细微的原子机器中，这两种理论的分歧才具有重大意义。在最一般的形态上，对应原理可以这样表述：其正确性对于一定范围的现象来说，已由

实验所确立的理论,随着新的理论的出现,并没有被抛弃,而是保持自己对于原来现象领域的意义,把自己作为新理论的极限形式和局部情况。新的理论的结论在旧的“经”理论成立的地方,过渡到经典理论的结论,包含某种特征参量(这种特征参量的意义在旧的和新的现象领域中是不同的)的新理论的数学工具。在特征参量具有适当数值的情况下,过渡到旧理论的数学工具。不是微观物理与宏观不同,而是用于微观世界的量子力学用到宏观世界其效应就几乎没有了。对应原理的产生,用 Bohr 的话来说:“在定态之间较少区别的边界领域内,在光谱和原子体系运动间达到简单的渐进对应的意图。”“根据这个原理,同辐射的发射或吸收相联系的任何一个跃迁过程的实现,是有体系运动的一定相应和谐成份的存在所决定的、、、。至于涉及到辐射的结构,那么直接这个原理的涵义就应该预料到,辐射将反映震动相应成份的性质,这些成份将以某种方式被经典电动力学的要求所决定,后者提供电子体系的辐射同它的运动方向之间的直接联系。”

自 1932 年发现中子以来,原子核物理学取得了举世瞩目的长足进展。近几十年来,随着核探针能量和种类的增加,核物理学在新的自由度和新的层次上不断取得新成果。对非核子(特别是夸克)自由度、更高能量自由度、质子-中子比自由度、角动量自由度的研究,将是今后的一个重要方向。特别是 80 年代末出现的放射性核束,使核反应探针在核素图上从稳定核素发展到不稳定核素。远离稳定线的新核素,特别是滴线核以及超重核、奇特核的合成和研究,将会对原子核物理学的发展起到积极的推动作用。

以研究复杂多体系统为主的凝聚态物理学,是当代物理学中内容最丰富、应用最广泛的一门分支学科;也是当前物理学研究中最活跃、最能激发人的创造智力的研究领域。这一领域的一系列发现,已经并正在对其他学科(包括化学、生物学、数学等)产生了重大影响;并通过它所诱发的高新技术进展,对人类生活产生了巨大影响。凝聚态物理前沿研究此起彼伏,发展迅速,使人目不暇接。它的发展大趋势将是现有分支领域强化研究,又不断开拓出新的领域,制备出更多更高性能的新材料,发现令人意想不到的新现象。超导电性物理、晶体学、磁学、表面物理、固态发光物理、液态物理、生命现象中的物理问题、极端条件下的物理等研究内容,成为当前凝聚态物理学广阔的前沿领域。其中低维凝聚态物理与以发现新的有序相、有序相的对称破缺、以及这些新相的物理性能为主要目标的研究工作,更是这一学科中最具活力的重要发展前沿。在今后十多年,可以期望凝聚态物理的研究取得新的重大发现和进展。等离子体物理是物理学中一个年轻的分支学科。等离子体物理的研究已经成为人类认识宇宙、控制地球环境变化、以及最终解决能源问题的基础和保证,同时它还开辟了很多新技术与新应用的发展途径。热核聚变等离子体、空间等离子体、天体等离子体和技术与高技术等离子体的研究,愈来愈受到重视。原子分子物理是微观世界的第一个层次,它的基础性强,应用面广,其发展直接或间接地推动了电子学和电子产业、光电子学和激光产业的诞生和发展,还形成了量子化学、分子反应动力学、分子生物学和分子天文学等一批交叉学科。原子分子激发态结构和动力学理论的研究,是当前原子分子物理学中最活跃的领域。这一学科的发展,在推动科学技术发展、社会进步和提高国防能力方面,将发挥重要作用。

量子力学的创立,揭示了微观世界的基本规律,为原子物理学、固体物理学、核物理学、粒子物理学和半导体物理学的发展奠定了理论基础。量子能带理论的建立,使人们对半导体的性能有了认识,导致了晶体管和大规模集成电路的产生,引导了 20 世纪微电子技术、激光技术、通信技术等现代高新技术的空前发展。同时,也为超导电性的研究、液晶研究和介观物理研究打开了一扇大门。

相对论和量子论,不仅是现代物理学而且也是整个自然科学的两大基石。玻尔、爱因斯坦、普朗克被称为量子论的三大教父之一,是量子论最主要的奠基人。

参考文献:

【1】Einstein 著 方在庆 韩文博 何维国 译。《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。

3、光电效应

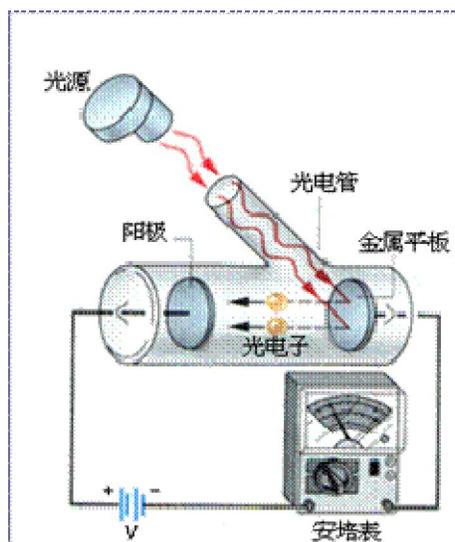
1887 年赫兹在研究电磁波性质时发现,如果用紫外光照射电极,那么电极间的放电就变得容易“点着”了。演示这种现象时,将一个阴极置于真空管内,并用光照射它。这时就开始有电子从阴极飞出。这些电子向正电极(方向)运动,产生很微弱的电流。研究这些电流与入射光的颜色和强度间的关系是很有意思的。像图 7 所示的那样测量出电流和电压,就能够确定释放出的电子的数目和能量。根据麦克斯韦理论我们可以期望,光源的功率越大,释放出的电子所具有的能量也越大。但这却与实验观察到的完全不同。

总电流的大小表征着放出的电子数目的多少,它与入射光的强度有关。但对于阴极来说,单个电子的能量只与入射光的颜色(即它的频率)有关。即使是很很弱的光源,只要它的频率足够高,也能引起很大能量的电子的发射。另一方面,低频率的光,不论,不论光源的功率多大,无论如何也不能引起电子的发射。这样的结果是与麦克斯韦理论相矛盾的,因为根据麦克斯韦理论,光也好,电场矢量或者是振动的电磁波也好,

都是依靠电场作用于的力而传递能量的。如果光源很弱，则分布于整个空间的电场矢量也很弱。对于这样弱的电场来说，要打出足够能量的电子将需要很长的时间。可是在实验中看到的事实是：不管紫光的强度如何，只要它以射到阴极上，立刻就发出光电子。

光照射到某些物质上，引起物质的电性质发生变化。这类光致电变的现象被人们统称为光电效应。从微观看来，不管什么光电效应，归根结底，乃是光与电子相互作用带来的结果。二者相互作用，各自产生了相应的变化：对于光而言，它或被吸收，或改变频率和方向；对于电子而言，发生了能量和状态的变化，从束缚于局域的状态转变到比较自由的状态，从而致使物质电特性发生了变化。

1887年，德国物理学家赫兹在证实麦克斯韦所预言的电磁波的存在实验中，发现了一个奇妙的现象：当用紫外光照射他的装置时，电极之间发生电火花要容易一些。赫兹作了进一步研究，但没有坚持下去。一年后，霍尔瓦克斯证明，这是由于出现了带电粒子的缘故。后来，人们知道这种粒子就是电子，紫外线可以从金属中“照出”电子，可见光等也有这种本事。至今，人们把由于光照射固体而从表面逐出电子称为外光电效应，或光电发射效应，被光逐出的电子称为光电子。



B: 光电效应实验图像

通过以上实验证明：光是一种粒子。

B: photoelectric effect experiment image

外光电效应是把两个金属电极即阴极 K 和阳极 A 安装在抽成真空的玻璃泡中，在阳极和阴极之间加上直流电压并串联一个灵敏电流计 G。当光不照射阴极 K 时，玻璃泡内阴极 K 和阳极 A 之间的空间无载流子，如果不顾及暗电流的话电阻为无穷大，没有电流流过 G。当有光照射阴极 K 时，便有光电子从阴极飞出，在电压作用下，飞向阳极 A，G 中便有稳定的光电流流过。

1899—1902 年赫兹的助手勒纳德利用各种频率和强度的光，对光电效应进行了系统的实验研究，发现了三条实验规律。

- 1、当一定频率的光照射金属阴极 K 时，只要阴极与阳极之间有足够加速电压，光电流正比于光强。
- 2、每种金属各自存在一个足以发生外光电效应的最低频率；当光的频率大于这个频率时，不管光多么弱，都会立刻发射光电子，不存在时间滞后。当光的频率小于这个频率时，不会逸出光电子；
- 3、光电子从金属表面刚逸出时的最大初动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 与光的频率有线性关系，与入射光的强度无关。

光电效应三条实验规律，除了第一条能用波动说解释以外，其它两条实验规律与光的波动学说发生了剧烈冲突。

理论天体物理学的第一个成熟的方面——恒星大气理论，就是在量子理论和辐射理论的基础上建立起来的。爱因斯坦关于光的新理论，究竟超过他同时代自然科学家的思想境界有多远，这从 1913 年柏林第一流的物理学家们的评论中可以一目了然。当爱因斯坦被任命为柏林科学院院士时，他们在赞扬了他在科学上的多方面成就后，要大家特别重视他的光量子假说：“他在探索过程中，往往会超出预想目标，比如在光量子假说方面就是这样，因而对他作出评价不会太困难；在精密自然科学中，一次冒险也不作，便不会有真正

的创新。”

虽然爱因斯坦对光电效应的解释是对 Planck 量子概念的极大支持，但是 Planck 不同意爱因斯坦的光子假设，这一点流露在 Planck 推荐爱因斯坦为普鲁士科学院院士的推荐信中。“总而言之，我们可以说，在近代物理学结出硕果的那些重大问题中，很难找到一个问题是爱因斯坦没有做过重要贡献的，在他的各种推测中，他有时可能也曾经没有射中靶的，例如，他的光量子假设就是如此，但是这确实并不能成为过分责怪他的理由，因为即使在最精密的科学中，也不可能不偶尔冒点风险去引进一个基本上全新的概念”。

4、Einstein 对于光电效应的解释

Einstein 在思想方法上没有任何保守性，他很少顾及权威和因袭的教条，因而进一步发展了普朗克的思想，迈出了勇敢的第一步。他认识到，正确运用普朗克假设之后，光的学说便焕然一新：虽然光是在空间连续传播的一种波动现象，但光仅能集中于特定地点，产生物理作用。因此，光具有不连续的颗粒特性，它可以是一束光量子，即“光子”。

1905年，Einstein 的第一篇著作《有关光的产生和转化的一个试探性观点》问世了。他在论文中写道：“在我看来，如果假定光的能量不连续地分布于空间的话，那么，我们就可以更好地理解黑体辐射、光致发光、紫外线产生阴极射线以及其它涉及光的发射与转换的现象的各种观测结果。根据这种假设，从一点发出的光线传播时，在不断扩大的空间范围内能量不是连续分布的，而是一个数目有限地局限于空间中的能量量子所组成，它们在运动中并不瓦解，并且只能整个地被吸收或发射。”“根据这里的假设，当一束光从点光源发出时，它的能量不是随着体积增大而连续分布，而是包含一定数量的能量量子，这些能量量子在空间上局域，不随运动而分裂，并只能作为一个整体被吸收和发射。”然而，令人不可思议的是，人们至今仍未能理解量子理论的含义，并一直为此争论不休，一些科学家甚至认为这个理论根本没有意义。

在光的新理论中，Einstein 以普朗克 1900 年提出的假设为基础，认为在热辐射过程中能量的放出和吸收都是以不连续方式进行；能量的最小数值叫量子，它的数值取决于基本作用量 h ——“普朗克常数”。每次放出和吸收的辐射能都是这个数值的整数倍。普朗克的这一发现与当时普遍认为正确的光的波动理论是不相容的。光的波动学说认为光是以波动状态连续传播的。19 世纪初，这一学说战胜了牛顿的微粒说。后来，麦克斯韦和赫兹还在实验和理论上证实了这个学说。

Einstein 用下面的比喻解释过光子假说和普朗克理论的相互关系：“如果啤酒总是装在可容一品脱的瓶子里出售，由此完全得不出啤酒是由等于一品脱的不可分割的部分所组成的结论。”为了检验小桶里的啤酒是否由不可再分割的部分所组成，我们可以把小桶里的啤酒分别倒进一定数量的容器中，比方说十个容器中。我们用完全任意的方式将啤酒分份，听任偶然去确定每一个容器中倒进多少。我们测量一下在每一个容器中啤酒有多少，然后再把啤酒倒回小桶里。我们多次重复这种*作。如果啤酒不是由不可分割的部分所组成的，那么在每个容器中啤酒的平均分量 and 所有这些容器的平均分量将是同样的。如果啤酒是由不可分割的部分组成的，那么在各容器之间就会出现不同的啤酒的平均分量。设想一种极端的情况，小桶里只能容纳一份不可分割的啤酒。这时，整个一份啤酒每一次只能倒进一个容器，在这些容器里面所装的东西之间的区别就十分巨大了：一个容器中装了小桶里所有的啤酒，剩下的容器将空无一物。如果小桶是由两份、三份……这种不可再分割的份额组成的，那么偏离平均分量将越来越小。因此，按照偏离平均分量的大小，即按照起伏的大小，可以判断啤酒的不可分割的份额的大小。我们转回来研究电磁波。让电磁波占满一个被限定的“桶”壁——由许多单个胞格所组成的某个空间容积。是否可以把这些波的能量分为随便多大数量的部分，或许我们将碰到不可进一步分割的“份额”？并且，如果辐射的电磁场是间断的，那么它的最小“份额”的大小又是怎样的呢？测量一下胞格中能量的分量对于平均分量的偏离——这个分量在由一个胞格转到另一个胞格时的变化，就可以解答这些问题。如果最小“份额”大，那么这种变化就大；如果“份额”小，那么变化也小。Einstein 的光量子学说，以最简炼的方式阐明了“光电效应”，这种效应的基础是光与电子之间进行能量交换。这样便解释了光束打到金属上时，能把电子从其表面拉出来。这些电子在脱离金属表面之后的动能，与光源的强度无关，而完全取决于其颜色，在紫外光的情况下，电子的动能最大。1886年，赫兹发现了这个现象，尽管许多物理学家对此作过进一步的深入研究，但是运用光的波动学说无论如何也解释不清。然而，借助 Einstein 的光量子理论却可以把光电效应阐述得清楚。紫外光是由能量高的光子、亦即冲击力大的光粒子构成，而红光是由能量较低的光量子构成，所以紫外光打出的电子比红光打出的电子的动能要大。10 年之后，美国实验物理学家密立根的研究证明，Einstein 对于光电效应的解释是正确的。密立根是这样评价光电效应的：“它把普朗克通过研究黑体辐射而发现的量 h 物质化了，并且使我们完全相信，普朗克的著作所依据的主要物理概念是同现实相符的。

Einstein 关于光的新理论，究竟超过他同时代自然科学家的思想境界有多远，这从 1913 年柏林第一

流的物理学家们的评论中可以一目了然。当 Einstein 被任命为柏林科学院院士时，他们在赞扬了他在科学上的多方面成就后，要大家特别重视他的光量子假说：“他在探索过程中，往往会超出预想目标，比如在光量子假说方面就是这样，因而对他作出评价不会太困难；在精密自然科学中，一次冒险也不作，便不会有真正的创新。”光量子假说在学术上具有划时代的意义，是整个原子物理学进一步发展的基础。不论是 1913 年玻尔提出的赫赫有名的原子模型，还是 20 年代初期法国物理学家德布洛伊天才的假说“物质波”，没有光量子假说都是难于设想的。

这样在 Einstein 的观念中，一束频率为 ν 的光便是一束单个粒子能量为 $h\nu$ 光子流，在光与物质相互作用时，就是这些光子与物质微粒之间的事情了。利用光子概念和能量守恒定律，对于外光电效应可以写出下列方程式， $h\nu = m\nu^2/2 + E$ ，这个方程被称为 Einstein 方程。就是这方程，成功地解释了外光电效应的实验规律，使外光电效应的机理变得简单而清晰。式中 E 为金属逸出功或功函数。金属中的自由电子在金属内部可以自由游荡，但它们并不能随意地越过金属表面，因为表面附近的金属正离子要拽住它们，不让它们外逃，好似有一堵墙阻挡着。我们可以用能的“势阱”来表示金属表面对电子的这种约束作用。不同金属的逸出功不相同，红限频率也不相同。金属中的电子如果不能从获得等于或大于 E 的能量，它就无法外逃。这也就是外光电效应存在的红限频率的小能包，当它与电子碰撞并为电子所吸收时，电子获得光子的能量，一部分用于克服金属的束缚，也就是逸出功。余下的便成为外逸光电子的动能了。既然光子的能量是一份份的，电子吸收光子的能量也就是一份份的了。

密立根是这样评价光电效应的：“它把普朗克通过研究黑体辐射而发现的量 h 物质化了，并且使我们完全相信，普朗克的著作所依据的主要物理概念是同现实相符的。【1】1914 年，密立根用实验完全确认了 Einstein 的光量子理论。

爱因斯坦关于光的新理论，在哲学上从两个方面说来是重要的：其一，证明了普朗克在热辐问题上发现的量子现象并非是辐射现象所特有，而在一般物理过程中都有表现。这样，由于普朗克的发现而动摇了的旧的形而上学观念，即大自然不作飞跃的观点彻底垮台了。其二，爱因斯坦的研究结果，揭示了光的两重性。原来光既是微粒，又是波动。于是，光的辩证矛盾得以证实。爱因斯坦的发现使惠更斯和牛顿彼此对立的光学理论统一起来，在更高一级上成为天才的假说。

参考文献

【1】(美) R·埃斯伯格, R·瑞斯尼克. 量子物理学. 吴伯泽, 暴永宁, 黄惠英译. 北京工业学院出版社 1985.

5、Einstein 的光子假设的困难

德布罗意说：“我们任何时候都不应忘记（科学史证明了这一点），我们认识的每一成就提出的问题，比解决的问题还要多；在认识的领域内，新发现的每一片土地都可使我们推测到，还存在着我们尚未知晓的无边无际的大陆。”

Einstein 的光子假设和 Einstein 方程成功地解释了外光电效应。几十年来，人们没有看到什么事情偏离 Einstein 方程。但是，随着强度大、单色性好的激光器的问世，新的情况出现了。1905 年爱因斯坦(Albert Einstein)用光量子理论成功地解释了光电效应，使光的粒子性得到了空前的发展。然而，随着科技的进步、更深入研究和新的实验，陆续出现了光量子理论也难以解释的与光学有关的物理现象。例如，碱金属单峰值和铅的多峰值选择性光电效应特性曲线、原子核外不同壳层轨道具有不同逸出功、以及超强激光在空气中传输出现频谱展宽的连续光谱、锥角辐射等，又使光量子理论束手无策，到目前为止，还没有文献应用量子理论完整地进行解释。

(1)、刘元震等编著《电子发射与光电阴极》一书中指出了在碱金属和极少数逸出功大的金属（如钷、钼、镍、钨等）中发现了光电效应存在选择性峰值^[4]（见图 1）。图中单峰值曲线明显不同于 $h\nu$ 线性曲线，尤其是铯、铷、钾的曲线在波长缩短的方向有形成另一峰的趋势，其中钾最为明显。对选择性光电效应产生的原因，书中作了如下论述：“在一定频率范围内，金属中吸收了光量子能量后激发到真空能级以上的自由电子数目随着频率的增高而增大，而自由电子吸收光量子的概率在频率较高时将随着频率的增高而减少，这两个因素共同作用，造成了在某频率时光电子发射的峰值。”仔细分析这段话，对单峰曲线也缺乏说服力，然而对多峰值曲线，就更缺乏说服力了。

(2)、袁铮等《金阴极的选择性光电效应》论文中测出了非碱金属、且在空气中十分稳定的 Au 阴极在 200~340nm (3.66~6.22eV) 紫外波段与线性单调递增有突出偏离的单峰选择性光谱响应特性曲线(图 2)，由图可知，“Au 阴极光谱响应并不是单调递增，而是在 5.72eV 处呈现一个峰值，光子能量大于 5.72eV 时，

光谱响应迅速衰减^[5]。”由于袁铮等的实验光源频带窄，没能测出多峰值选择性光电效应曲线，但这单峰值曲线明显不同于 $h\nu$ 线性曲线。

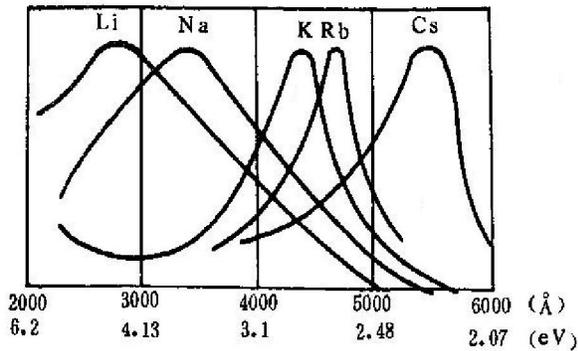


图1 几种碱金属的选择性光谱特性曲线

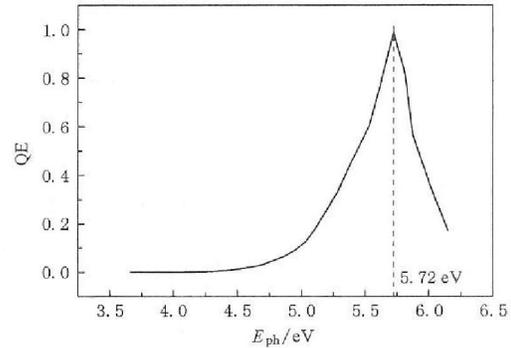
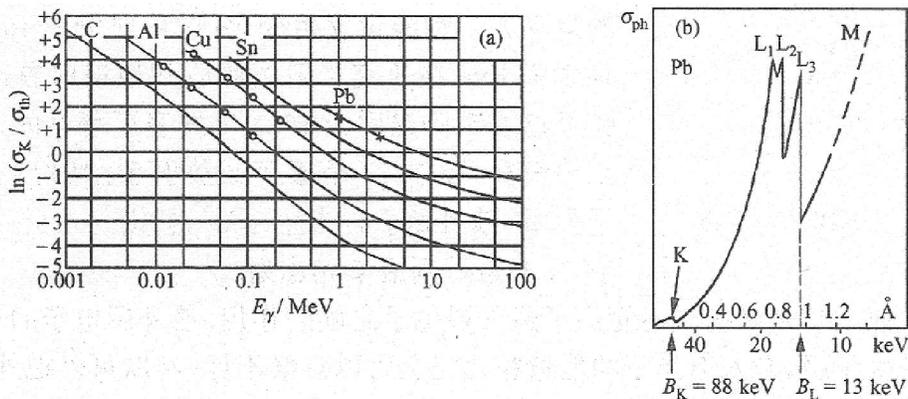


图2 Au 阴极的单峰选择性光谱响应特性曲线

(3)、丁富荣等编著的《辐射物理》一书在讨论光电效应的段落中提供了两幅图，明显显示出多峰值选择性光电效应曲线(图3)，不过书中是以多吸收限的文字表述的。众所周知，吸收能量是产生光电效应的前提条件，不吸收光能就不会产生光电效应。因此，吸收能量的峰值隐含着光电效应的峰值。书中指出：

光电截面 σ_{ph} 随光子能量的增加而减小，并非线性增加。图3(b)“给出了铅的光电截面在 L 吸收限附近的变化情况。铅中 K 壳层的吸收限为 88.3keV，而 L、M 层电子能级存在子壳层结构，各子壳层能级稍有差异，因而光电截面在 L 吸收限和 M 吸收限附近存在着精细结构。例如，铅的 L 层有三个吸收限： L_3 吸收限为 13.06keV， L_2 吸收限为 15.26keV， L_1 吸收限为 15.91keV^[6]。”察图可知，这种尖锐突变的吸收限是 σ_{ph} 的峰值点，隐含的是光电效应的峰值点。图中的三个吸收限有可能形成选择性光电效应曲线的三个峰值点，“在 L 吸收限和 M 吸收限附近存在着精细结构”则可能是精细的更多的峰值结构。

关于 γ 截至点，图3(a)“显示了在几种不同吸收物质中的光电截面与 γ 光子能量的关系。 σ_{ph} 随光子能量 E_γ 的增大而减少，随靶物质 Z 的增加而增大。当光子能量 $E_\gamma < 100keV$ 时，光电截面随 E_γ 的变化出现特征性的突变，这种尖锐的突变点称为吸收限^[7]。”从图3(b)上还可以看出当光子能量 $E_\gamma > 100keV$ 时，出现了光电截面 σ_{ph} 的截止点，也就是光电效应的截止点，本文将之称为 γ 截至限。按照爱因斯坦 $h\nu$ 线性关系，怎么能出现 γ 截至限？



$$\sigma_{th} = 6.651 \times 10^{-25} \text{ cm}^2 \text{ (汤姆孙散射截面)}, \sigma_K \text{ 为 K 层电子的光电截面}$$

图3 光电截面 γ 截至限和多峰值选择性光电效应

(4)、徐克尊等主编的《近代物理学》一书中提供了“铅的吸收系数与入射光子能量关系”图(图4),由图可见,“有明显的吸收峰,称为吸收边,图上有K吸收边、L吸收边、M吸收边对应于不同壳层的吸收。…L吸收边又精细地分为三个: L_I , L_{II} 和 L_{III} ; M吸收边分为5个^[8]。”这种多峰吸收有可能形成多峰值选择性光电效应,图中还可以看出 γ 截至限。

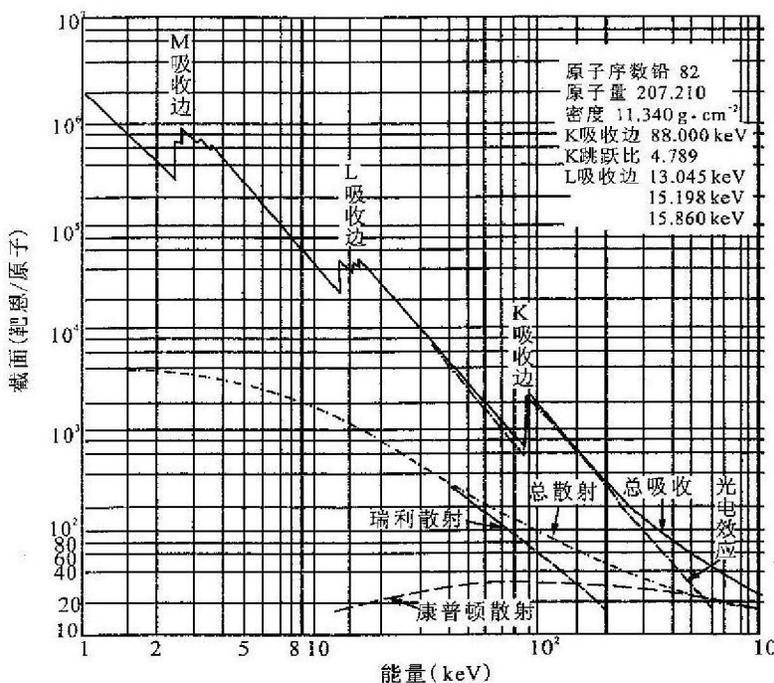


图4 铅的多峰值选择性光电效应和 γ 截至限

(5)、黄昆著《固体物理学》^[9]第九章“固体中的光吸收”中“激子光吸收”一节提供了“Cu₂O 的激子吸收光谱”也显示出多峰吸收现象(图5)。

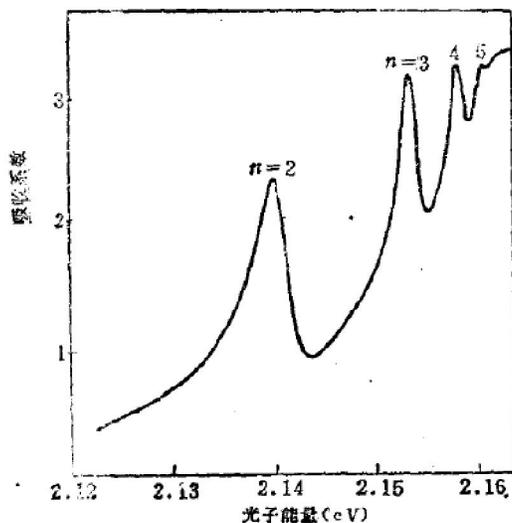


图5 77K 下 Cu₂O 的激子多峰吸收谱线

以上例子可以说明一些金属光电效应具有单峰和多峰值选择性特性及 γ 截至限,这用量子学说是难以

解释的。

1963年 Ready 等人用激光作光电发射实验时，发现了与 Einstein 方程偏离的奇异光电发射。1968年 Teich 和 Wolga 用 GaAs 激光器发射的 $h\nu = 1.48\text{eV}$ 的光子照射逸出功 $\phi = 2.3\text{eV}$ 的钠时，发现光电流与光强的平方成正比。按 Einstein 方程，光子的频率处于钠的红限频率以下，不会有光电子发射，然而新现象却发生了，不但有光电子发射，而且光电流不是与光强成正比，而是与光强的平方成正比。于是，人们设想光子间进行了“合作”，两个光子同时被电子吸收得以跃过表面能垒，称为双光子光电发射。后来，进一步的实验表明，可以三个、多个、甚至 40 个光子同时被电子吸收而发射光电子，称为多光子光电发射。人们推断， n 光子的光电发射过程的光电流似乎应与光强的 n 次方成正比。

因此，光电效应的粒子的解释有如下两个困难：1、电子是如何吸收光子的能量的，它的物理过程是怎样的？光子的频率是如何转化成电子的速度？2、为什么某些激光不遵循 Einstein 方程？为什么非激光光源不会产生多光子光电发射？钠原子的价电子吸收了 GaAs 激光器发射的 $h\nu = 1.48\text{eV}$ 的光子，齐步到达一个亚稳的激发态，再吸收第二批光子，越过逸出势垒，发生光电流。从而光电流不是与光强成正比，而是与光强的平方成正比。对于，吸收 n 光子的光电发射过程的光电流应与光强的 n 次方成正比。如果不用激光，而用普通白光，由于是宽频光，各个价电子吸收了，是杂乱地进入激发态，这些杂乱步调的电子相互影响、干扰，从而谁也无法越过逸出势垒，不能发生光电流。是光子的能量扣除越过逸出势垒所需的能量（相当于势能）后，余下的就成了光电子的动能了。不是光频转化为电子速度！

围绕原子核作高速运动的电子，究竟是在光量子的作用下，突然产生轨道偏离（向着原子核方向），同时，又在电子本身惯性力的作用下，电子被弹出原子的？还是在光量子的作用下，电子自动向着远离原子核的方向运动（跃迁）的结果？这个问题，过去的理论尚未作出明确的答复。因此，光电效应的内部机制有待进一步的探讨，以使理论趋于统一【1】。

参考文献：

【1】解恩泽等编，《简明自然科学史手册》，山东教育出版社，1987年出版，P241。

6、康普顿效应

1923年，康普顿的 X 射线散射实验证实了辐射的粒子性；在康普顿的“X 射线在轻元素上的散射的量子理论”中写道：“这个实验非常令人信服的指出，辐射量子确实既带有能量，也带有定向的动量。”“康普顿效应”是以发现者的名字命名的一种散射现象，这是波长极短的 x 射线跟原子中结合得很松散的电子发生作用时产生的一种现象。1923年，这一效应证实了光子的实在性，给人的印象极为深刻，从此以后量子学说成为现代物理学的当然组成部分。

在 1922—1923 年间，康普顿做实验发现：散射线中有与射线波长 λ 相同的射线，也有波长 $\lambda' > \lambda$ 的射线。这种改变波长的散射称为康普顿效应。1923年，康普顿利用 Einstein 的光量子理论，提出了合理解释。但是，大家知道传统的理论认为一份光量子 $h\nu$ 是不能再分小的，同时，又根据 Einstein 的真空光速不变原理，光子的运动速度既不能增加，也不能减小；所以，康普顿认为：“……入射光子的一部分能量传递给了电子，所以，‘反冲光子’具有较低的能量……”，这种解释与传统理论是相矛盾的，这个矛盾有待进一步的探讨，以使理论趋于统一【1】。

设原来静止的自由电子与光子碰撞后吸收了光子而以 u 的速度运动，则由能量守恒定律有：

$$h\nu + m_0c^2 = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \quad (1), \text{ 式中 } m_0 \text{ 和 } m \text{ 分别是电子的静止质量和运动质量, } \nu \text{ 为入射光子}$$

$$\text{的频率。又由动量守恒定律有: } \frac{h\nu}{c} = mu = \frac{m_0u}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \quad (2), \text{ 由 (1) 式得:}$$

$$u = \frac{c\sqrt{h^2\nu^2 + 2h\nu m_0c^2}}{h\nu + m_0c^2}, \text{ 由 (2) 式得: } u = \frac{h\nu c}{\sqrt{h^2\nu^2 + m_0^2c^4}}. \text{ 显然, 分别由能量守恒定律}$$

和动量守恒定律决定的电子运动速度不相同。假设碰撞前电子的运动速度与入射光子的速度相互垂直，光子

$$hv + m_1c^2 = m_2c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-u_2^2/c^2}}$$

与处于运动状态的自由电子碰撞后被吸收，则由能量守恒定律应有：

(3)，式中 m_0 为电子的静止质量， m_1 为电子碰撞前的动质量， m_2 为电子碰撞后的动质量。又由动量守恒

定律有：X 方向： $\frac{hv}{c} = m_2u_2 \cos \theta = \frac{m_0u_2 \cos \theta}{\sqrt{1-u_2^2/c^2}}$ ；Y 方向： $m_1u_1 = m_2u_2 \sin \theta = \frac{m_0u_2 \sin \theta}{\sqrt{1-u_2^2/c^2}}$ ；将两式

$$\left(\frac{hv}{c}\right)^2 + (m_1u_1)^2 = \frac{m_0^2u_2^2}{1-u_2^2/c^2} \quad (4)$$

取平方并相加，得：

$$u_2 = \frac{c\sqrt{h^2v^2 + (m_1^2 - m_0^2)c^4 + 2hvm_1c^2}}{hv + m_1c^2}, \quad \text{由式(4)得: } u_2 = c\sqrt{\frac{h^2v^2 + m_1^2u_1^2c^2}{h^2v^2 + m_0^2c^4 + m_1^2u_1^2c^2}}$$

决定的速度不同。量子电动力学（量子规范场论的一种）中的基本问题，一个电子吸收一个光子后，无论如何都不可能只有一个电子而没有别的副作用产物，这是四维时空中的能量动量守恒所要求的。“电子从低能级向高能级跃迁时”这种情况只有在束缚态中才存在，而在束缚态中，电子不是自由的，所以不单单是“一个电子吸收一个光子”，还要考虑原子核的参与。在自由态，一个电子和一个光子的相互作用，最简单的情况下，产物还是一个电子和一个光子，在束缚态中可以只有一个电子，而是最基本的能量动量守恒的要求。康普顿总结道：“现在，几乎不用再怀疑伦琴射线（注：即 X 射线）是一种量子现象了……实验令人信服地表明，辐射量子不仅具有能量，而且具有一定方向的冲量。”

参考文献：

【1】解恩泽等编，《简明自然科学史手册》，山东教育出版社，1987年出版，P242。

7、光的波粒二象性

Einstein 多次强调：“物理学的目前局面可以概括如下：有一些现象可以用量子论来解释，但不能用波动说来解释，光电效应就是这样一个例子，此外还有已被发现的其它例子。又有一些现象只能用波动说来解释而不能用量子论来解释，典型的例子是光遇到障碍物会弯曲的现象。还有一些现象，既可用量子论又可用波动说来解释，例如光的直线传播。到底光是什么东西呢？是波呢，还是光子“雨”呢？我们以前也曾经提出过类似的问题：光到底是波还是一阵微粒？那时是抛弃光的微粒说而接受波动说的，因为波动说已经可以解释一切现象了。但是现在的问题远比以前复杂。单独的应用这两种理论的任一种，似乎已不能对光的现象作出完全而彻底的解释了，有时得用这一种理论，有时得用另一种理论，又有时要两种理论同时并用。我们已经面临了一种新的困难。现在有两种相互矛盾的实在的图景，两者中的任何一个不能圆满地解释所有的光的现象，但是联合起来就可以了！怎样才能够把这两种图景统一起来。我们又怎样理解光的这两个完全不同的方面呢？要克服这个新的困难是不容易的。我们再一次碰到一个根本性问题。我们以前问过，光是什么？它是一阵波还是一阵粒子？现在我们又问，电子是什么？它们是一阵粒子还是一阵波？电子在外电场或外磁场中运动时的行为像粒子，但在穿过晶体而衍射时的行为又像波。对于物质，我们又遇到了在讨论光子时所遇到的同一困难。”

Einstein 关于光的新理论，在哲学上从两个方面说来是重要的：其一，证明了普朗克在热辐问题上发现的量子现象并非是辐射现象所特有，而在一般物理过程中都有表现。这样，由于普朗克的发现而动摇了的旧的形而上学观念，即大自然不作飞跃的观点彻底垮台了。其二，Einstein 的研究结果，揭示了光的两重性。原来光既是微粒，又是波动。于是，光的辩证矛盾得以证实。Einstein 的发现使惠更斯和牛顿彼此对立的光学理论统一起来，在更高级上成为天才的假说。

普朗克和爱因斯坦的理论揭示出光的微粒性，但并不否定光的波动性，因为光的波动理论早已被干涉、衍射等现象所完全证实。这样，光就具有微粒和波动的双重性质，这种性质称为光的波粒二象性。

在物理学中，对于光子可以用两个重要的公式进行描述，即 $\lambda = h/P = h/mc$ 与 $\varepsilon = mc^2 = hv$ ，其中各符号的物理意义分别是： c 为光速， λ 为光子的波长， ν 为光子的频率， m 为光子的动质量， ε 为光子的能量， P 为光子的动量 (mc)。且其中 c 、 λ 、 ν 的关系有： $c = \lambda\nu$ 。这两个公式的发现应归于普朗克和 Einstein.1924

年，法国青年物理学家德布罗意（*L. de Broglie*），凭其独创精神把这两个公式推广到光子以外的实物粒子，认为质量为 m ，并以速度 V 运动的粒子，也有一定的波长 λ 和频率 ν 与之相应，这些量之间的关系也与光子的情况类似： $P=mV=h/\lambda$ ， $E=mc^2=h\nu$ ，或用相对论关系表示为： $\lambda=h/P=h/mv=h(1-v^2/c^2)^{1/2}/m_0v$ ， $\nu=E/h=mc^2/h=m_0c^2/h(1-v^2/c^2)^{1/2}$ ，其中， E 为粒子的总能， m_0 为粒子的静质量， P 为粒子的动量， C 为光速， ν 为粒子的频率等等。这种理解应该是公认的。德布罗意波公式后来为电子等粒子的衍射实验所证实，并且成为量子力学发展的基础，这也是物理学史的事实。最早验证德布罗意公式的实验是于 1927 年戴维孙（*C.J. Davisson*）和革末（*L.H. Germer*）做的电子在镍单晶体上的衍射实验。实验中安排 $\Phi=65^\circ$ 。当加速电势差为 $U=54V$ 时测得出现电子流的峰值。镍的晶格常数 $d=9.1\times 10^{-11}$ （ m ）用布拉格公式： $2d\sin\phi=k\lambda c$ （ $k=0, 1, 2, 3, \dots$ ）求得波长 $\lambda=1.65\text{Å}$ 这与用德布罗意的波长公式 $\lambda=h/P=h/mv=h(1-v^2/c^2)^{1/2}/m_0v=h/(2em_0U)^{1/2}$ 求得的 $\lambda=1.67\text{Å}$ 很接近。

Einstein 说：“按照麦克斯韦或任何一种关于光的波动理论，一个点光源发出的一束光的能量，可以分成任意小的部分，连续地分布在一个不断增大的体积之中。我们不能从光的波动说中推出为什么光照射在金属上打出的电子的能量和光的强度无关。因此，我们就试用其他理论。我们假定单色光是以光速 c 穿过空间的能量的粒子组成，它们是能量的最小单元，我们把它们叫光量子或光子。各种波长的光有各种不同的光子【5】。整整 50 年有意识的思考，还没有使我更接近光量子是什么的答案，当今许多人认为他们知道答案了，其实他们是欺骗自己。我坚定地相信，有人会找到比我的命运所能找到的一种更加符合实在论的方法，说得妥当点儿，是一种明确的基础。【1】现在有两个光理论，都必不可少，而且，尽管 20 年来理论物理学家在这方面付出了巨大的努力，我们今天还是必须承认，还没有发现它们之间有任何逻辑联系。【2】”

威切曼：当我们考虑电磁波时，自然会问，是什么东西在振动。一个十九世纪的物理学家会说，是以太在振动。今天，我们夸张地谈到真空，表明我们对波在其中传播的介质缺乏兴趣。当我们研究电磁波或德布罗意波时，我们不再提问：是什么样的东西在真正地振动？【3】阿尔明·赫尔曼：在 Einstein 看来，物理量尤其是能量的连续分布，是根本站不住脚的一种虚构【4】。

简明不列颠百科全书：波长单一的单色光实际上并不存在，一定波长的光，总是包含一定的波长范围。注：从波长或频率不同的光已知就有成百万种看， hf 或光子有成百万种。从成百万种光可以互为原料互相转化看，一般的 hf 或光子不可能是能量的最小单元。可以查明，只有与单位频率 f' 相对应的 hf' 或光子，才是能量的最小单元。唐孝威：包括所有的电磁辐射在内的广义的光，都是光子流【6】。注：光子假说不能回答光为何存在被称为频率和波长的现象？为何存在普朗克常数 h 和速度常数 c ？

参考文献：

- 【1】阿伯拉罕。派依斯著，方在庆等译 《上帝难以琢磨》p443-p444 广东教育出版社。
- 【2】阿伯拉罕。派依斯著，方在庆等译 《上帝难以琢磨》p480 广东教育出版社。
- 【3】威切曼。量子物理学。北京：科学出版社，1978.484~485。
- 【4】阿尔明·赫尔曼。量子论初期史。北京：商务印书馆，1980.53；54。
- 【5】Einstein，英费尔德。物理学的进化。上海科学技术出版社，1962.190~193。
- 【6】唐孝威。同步辐射及其应用。北京：人民教育出版社，1986.1~2。

第二章 量子力学基础的争论

1、量子力学基础的争论

在科学史上，从来没有一种完备的理论得到广泛的实验结果支持而从未发现一个反例，并且在实际应用中取得巨大成就之后，仍然受到长期而广泛的质疑——但是，量子理论除外。量子物理实际上包含两个方面。一个是原子层次物质理论：量子力学，正是它我们才能理解和操纵物质世界；另一个是量子场论，它在科学中起到一个完全不同的作用。作为一个基本理论，量子力学原则上，应该适用于任何大小的物理系统，也就是说不仅限于微观系统，那么，它应该提供一个过渡到宏观「古典」物理的方法。量子现象的存在提出了一个问题，即怎样从量子力学的观点，解释宏观系统的古典现象。尤其无法直接看出的是，量子力学中的叠加状态，如何应用到宏观世界上来。在量子力学中，一个物理系统仅通过同时可以被测量的可观察量来定义，是它与古典力学最主要的区别。只有通过彻底地使用这样的状态定义，才能够理论性地描写许多量子物理现象。量子力学与古典力学的另一个主要区别，在于测量过程在理论中的地位。在古典力学中，量子世界除了其线度极其微小之外（ $10^{-10}\sim 10^{-15}m$ 量级），另一个主要特征是它们所涉及的许多宏观世界所对应的物理量往往不能取连续变化的值，（如：坐标、动量、能量、角动量、自旋），甚至取值不确定。许多实验事实表明，量子世界满足的物理规律不再是经典的牛顿力学，而是量子物理学。

量子力学可以算作是被验证的最严密的物理理论之一了。至今为止，所有的实验数据均无法推翻量子力学。大多数物理学家认为，它「几乎」在所有情况下，正确地描写能量和物质的物理性质。虽然如此，量子力学中，依然存在着概念上的弱点和缺陷，除上述的万有引力的量子理论的缺乏外，至今为止对量子力学的解释存在着争议。

20 世纪初建立的量子力学是对经典物理学的革命性的突破，它是研究微观世界的科学，需要建立起崭新的概念和思想方法，也就是需要有新的哲学观点来解释它，也引发了一场空前的物理学和哲学上的大争论，波函数、不确定关系等量子力学中的主要概念和原理，各学派之间有着不同的看法和观点，这场争论也推动了量子力学的发展。纵观历史，量子力学数学形式体系的诠释总体看可分为两大派系，一是哥本哈根主流学派非决定论几率解释，一是薛定谔、德布罗意、Einstein 非主流学派决定论解释。有一次，玻尔对他的朋友说：“谁第一次听到量子论时不发火，说明他根本就不理解量子论，我就从来没懂过它。”“对待量子力学基本概念和原理诠释，一直存在着持续的争论”，“……在进一步的探索中，人们对自然界物质存在的形式和运动规律的认识或许还有更根本的变革”（见《量子力学》曾谨言 著 第四版序言）。

1927 年 10 月，第五届索尔维国际物理学讨论会上，Einstein 针对玻恩提出的量子力学中波函数的统计解释提出了诘难，与玻尔、海森堡等一大批物理学家发生了激烈的争论。Einstein 认为，上帝不是掷骰子，微观粒子的运动应该存在是确定的决定论的描述。Einstein 还认为测不准关系的存在是观察手段不完备造成的，因此，测不准关系的实在性是值得怀疑的，不应该把它看成一条真实的起作用的原理。Einstein 精心设计了一些理想实验，企图驳倒测不准关系，并说服玻尔。但是 Einstein 并没有找到统计解释和测不准关系在理论上的缺欠。而 Einstein 的决定论观点却遭到了玻尔等哥本哈根学派的有效反击。1930 年，第六届索尔维国际物理学会议上，Einstein 精心设计了一个光子箱实验，力图证明时间和能量可以同时准确测量，以推翻测不准关系。玻尔当时没有考虑出反驳的道理。但第二天一早，玻尔用 Einstein 的广义相对论原理也设计了一个相反的实验，巧妙地指出了 Einstein 理想实验中的矛盾，恰恰是违反了自己所创立的广义相对论。而且证明了在 Einstein 的思想实验中，只有引进测不准关系才能使矛盾顺利解决。Einstein 无话可说，只好承认统计解释和测不准关系以及整个哥本哈根派对量子力学的解释并无内在矛盾。但是 Einstein 仍然以十分怀疑的目光注视着哥本哈根派的物理学研究和哲学解释。始终认为量子力学的统计方法在认识论上是无法接受的，在美学上更是不能满意的。1930 年，Einstein 仍然不断地设计理想实验，反驳以玻尔为代表的哥本哈根学派的观点。玻尔与哥本哈根学派的科学家也不断地发表文章予以论证和反击。1935 年，Einstein 与两位年青的助手合作发表了《能认为量子力学对物理学实在的描述是完备的吗？》一文。再次强调他的决定论观点，否认量子力学规律的完备性。直至 Einstein 去世，他仍然拒绝接受测不准关系【1】。在 20 世纪初的一场震撼经典物理学的狂风暴雨中，量子论和相对论先后诞生了，人们一直在作出把象征着 20 世纪科学的时代特征的这两大科学成就结合在一起的努力。Einstein 不倦地与玻尔争论，也是为了消除这种结合所面临二者理论基础不统一的障碍。但谁能料到，这场争论的结果却可能酝酿一场更大的风暴。一种新的理论，一种新的思维方式，甚至一种新的世界观都可能在这场风暴中诞生。科学家和哲学家都不能对此等闲视之。【2】

一个量子系统的波函数由系统的 Schrödinger 方程 $H\Psi = i\hbar\partial_t\Psi$ 所决定。方程式左边的 H 称为系统的 Hamiltonian (哈密顿量)，它是一个算符，包含了对系统有影响的各种外场的作用。这个方程对于波函数 Ψ 是线性的，也就是说如果 Ψ_1 和 Ψ_2 是方程的解，那么它们的任何线性组合也同样是方程的解。这被称为态迭加原理，在量子理论的代表述中作为公理出现，是量子理论最基本的原理之一。卢瑟福认为：“物理学家们陷入了矩阵力学和波动力学的迷雾，陷入了数学运算之中。他们可以保证结论的正确性，但同时却不理解这些结论后面的物理现实。”1925 年量子力学出现前的物理学中使用的复数仅是简化运算的辅助工具，在这以前的物理学在概念上仅使用实数【3】。量子力学中使用复数则成为正确理解物理现象的必要【4】。

参考文献：

- 【1】解恩泽等编，《简明自然科学史手册》山东教育出版社，1987 年出版，P322。
- 【2】殷正坤著，《探幽入微之路》人民出版社 1987 年出版 P275。
- 【3】杨振宁，《对称性与 20 世纪物理学——对称决定力》，1982 年学术报告。
- 【4】杨振宁，《对称性与相互作用》，1979 年学术报告。

2、哥本哈根解释的基本要点

玻尔 (N. Bohr, 1922 年诺贝尔物理奖) 说：“没有什么量子世界，只有一种抽象的量子物理的描述。如果认为物理学家的任务是发现自然是什么，那就错了。物理学关心的是我们关于自然能说什么。”哥本哈根学派的解释在定量方面首先表述为海森伯的不确定关系。这类由作用量子 h 表述的数学关系，在 1927

年9月玻尔提出的互补原理中从哲学得到了概括和总结,用来解释量子现象的基本特征——波粒二象性。所谓互补原理也就是波动性和粒子性的互相补充。该学派提出的量子跃迁语言和不确定性原理(即测不准关系)及其在哲学意义上的扩展(互补原理)在物理学界得到普遍的采用。因此,哥本哈根学派对量子力学的物理解释以及哲学观点,理所当然地是诸多学派的主体,是正统的、主要的解释。根据 H.Primas 的系统总结,Copenhagen 解释的概要如下:①量子力学考察单个客体;②几率是基本的;③被测客体与测量仪器之间的边界由观察者选择;④观察方式必须用经典物理来说明;⑤观察是不可逆的,它产生一个记录;⑥测量时所发生的量子跃迁是由可能到实际的转变;⑦互补性质不能被同时观测;⑧只有测量结果可以被认为是真实的;⑨纯量子态是客观的但不是真实的。

对于第一条,量子力学考察单个客体,它清楚地说明了量子力学是关于个体的理论,而不是关于由大量个体所组成的系综的理论。因此 Copenhagen 解释排除了系综解释的可能性,这在量子运动看来是正确的,因为量子力学就是描述单个客体的量子运动的理论。另一方面,量子运动还提供了量子力学所描述的单个客体的客观运动图像,这为上述 Copenhagen 解释的第一条断言提供了证明,而 Copenhagen 解释本身无法提供这样清晰的说明。

对于第二条,几率是基本的,它意味着量子力学的最小解释,即 Born 几率解释中所出现的几率并不是由观察者的无知或理论本身的无能所导致的,而必须看作是自然本身的一种本质特征,同时,我们也因此无法预测比几率更多的东西,并且当理论可以预测这些几率时它就应当被看作是完备的了。在 Copenhagen 解释的框架内理解第二条是极其困难的,这导致了人们不断求助于因果决定论信念来反驳它,并通过在理论中引入隐变量来恢复经典的决定论图像,从而将量子力学中几率的出现当作是理论本身的不完备,而不认为是自然的一种基本性质。这两种观点的正确性在我们发现真正的微观实在图像之前是很难判别的,实际上,人们关于这一问题一直争论不休。现在,我们已发现了量子力学所描述的粒子的真实运动——量子运动,它的存在将令人信服地证明几率是基本的这一结论,因为量子运动的规律本质上是非因果、非决定论的,这由量子运动的非连续本性所决定,而与观察者和理论无关,从而量子运动将为 Copenhagen 解释的第二条断言提供更本原的物理解释。

哥本哈根主流学派认为,原子世界,波粒二重性的表现矛盾是我们的宏观描述语言受到限制所引起的。我们从日常生活经验中总结出来的语言不能够描述原子内部发生的过程或微观客体的行为。因为日常生活中,我们能够从直接经验中形成思维图景,而原子看不见摸不着,不能形成直接的思维图景,借用宏观图景来描述微观世界电子的波性和粒子性,只能是不完全的“类比”或“比喻”。对微观客体的波和粒子性,我们不能用宏观概念去理解它,表达它。但数学具有极大的抽象性和灵活性,用数学语言表达,不受日常经验限制。矩阵力学和波动力学就是这样的语言。玻恩对这样的数学语言做了一个宏观“类比”翻译。他认为,波函数 $|\psi|^2 d\tau$ 量度了在微元体积 $d\tau$ 中找到粒子的几率, $|\psi|^2$ 称为几率密度。 ψ 既不代表物理系统,也不代表系统的任何物理属性,而只表示我们对系统的某种知识。这表明,波函数只具有客观性,而无实在性。在玻恩的认识中,微观粒子被“类比”为古典意义下的质点,波则是点粒子在时空中出现的几率的波动。玻恩的认识是哥本哈根学派几率解释生发的基础。

为了完善玻恩的几率诠释,实际上也就是回答为什么微观粒子在体积元 $d\tau$ 中具有统计意义,海森伯提出了一个原理,叫测不准原理。海森伯指出,在微观世界一个事件并不是断然决定的,它存在一个发生的可能性,这种不确定性正是量子力学中出现统计关系的根本原因,也是宏观语言不能描述的原由。电子波正是描述这种不确定性的,并被定量表述为几率。在海森伯看来,玻恩的几率波实际上是对微观世界事件发生的不确定性的认识。

对于第三条,被测客体与测量仪器之间的边界由观察者选择,它没有给我们一个严格的量化说明以确定这一边界,从而区分被测客体与测量仪器。尽管 Bohr 求助于将被测客体与测量仪器作为不可分的整体存在以避免这一困难,但他的观点仍是模糊的,因为宏观测量仪器可以被当作是一种独立的存在,而宏观测量仪器又由大量的微观粒子所组成,这样将微观粒子不当作是一种独立的存在只能是一种 ad hoc 的生硬规定。实际上,在微观粒子与宏观测量仪器之间必然存在一种过渡或边界,并且我们必须对此给出精确的量化说明,而这一说明在目前的量子理论和它的 Copenhagen 解释中是找不到的。现在,量子运动及其演化规律在理论上严格地提供这一量化说明,客观地解释了由被测客体与测量仪器相互作用所导致的测量投影过程,并且给出了微观世界与宏观世界的统一的实在描述,在这一点上它无疑比 Copenhagen 解释更令人满意。海森伯的测不准原理后来被具体为对微观粒子位置和动量的描述。海森伯认为微观世界电子的位置和动量是测不准的,而且位置和动量的测不准符合关系式 $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar$, 上式中,动量测准了($\Delta p=0$),位置就完全测不准($\Delta x=\infty$),位置测准了($\Delta x=0$),动量就完全测不准($\Delta p=\infty$)。一般情况下,微观粒子既无确定的动量,也无

确定的位置，电子的位置和动量只有统计意义。电子波正是描述这种统计意义的波。简言之，海森伯的微观粒子是一个天生就无确定行踪的质点，波是对电子无确定行踪的描述。显然，“不确定性”原理是海森堡为玻恩几率诠释提供的哲学基础。

玻尔对海森伯的测不准原理略有不同的理解。玻尔认为，在微观世界，一些经典概念的应用将排斥另一些经典概念的同时应用，如动量和位置、能量和时间、波和粒子等等，它们有互斥的一面，但二者又是互补的，只有其互斥的一面不能准确描述一个微观客体，必须使两者结合起来才能把关于客体的一切明确知识揭露无遗。这是玻尔试图不深究波粒二重性的物理本质，仅从实验事实角度，为微观粒子的波粒二重性提供的哲学认识。

以粒子的位置和动量这一对互补性质为例来讨论，首先，从客观运动图像上看，对于粒子的任何量子运动状态，粒子位置与动量的分布扩散之间都满足 Heisenberg 不确定性关系，即客观上就不存在粒子的位置和动量同时确定的状态，具体地说，对于粒子位置越确定的状态，粒子动量的测度密度分布就越趋于均匀分布，或者说，粒子的动量就越不确定，反之亦然。于是，在物理测量将真实反映被测状态这一合理前提之下，粒子的位置和动量不能被同时精确测量将是粒子的量子运动状态所导致的一个直接物理结果。应当指出，鉴于客观上不再存在粒子的位置和动量同时确定的状态，粒子的位置和动量不能被同时精确测量这一说法是不严格的，它隐含了粒子的位置和动量在测量之前可以同时处于确定的状态。其次，当考虑测量过程时，根据量子运动的规律，对粒子位置的测量将导致粒子位置态的动态投影过程，测量后粒子的量子态将投影为局域的位置态，在这一状态中，粒子动量的测度密度分布近似为均匀分布，而后继的动量测量将进一步导致粒子的局域位置态投影为确定的动量态，从而我们无法再测量出被测粒子真实的位置和动量情况，反之亦然。因此，测量投影过程也导致粒子真实的位置和动量情况不能被同时精确测量。

对于第四条，观察方式必须用经典物理来说明，它意味着即使我们所考察的微观实在是多么的奇特，即使经典物理已无法给出一致的说明，我们的观察方式仍必须用经典物理来说明，我们仍只能使用经典语言来描述实验事实，这一结论已被人们普遍接受。但是，我们认为 Copenhagen 解释对于结论中所出现的经典物理或经典语言并未解释清楚，经典语言到底指的是什么？它是经典力学体系中的概念还是关于实验事实的常识描述，但是无论它指什么，一切描述和概念本质上都是人类的自由创造，它们的有效性和适用性必须随时接受检验，不存在先验的一成不变的东西。因此，我们必须说明利用经典语言描述观察方式的有效性和完备性，尤其当出现新的(由这种语言无法一致解释的)实验事实的时候，这种说明就更加必要。另一方面，即使我们仍沿用现有的经典语言或经典概念体系，我们也必须在新的经验面前时刻准备着重新理解这些语言和概念的含义，事实往往是我们对于自己创造的语言和概念起初并未真正理解，而是随着新经验的不断积累而不断深入和完善。现在，量子运动的普遍存在让人们更加清晰地看到了经典语言和概念的局限性，它们对于宏观经验的描述也只是一近似，一种简单方便的理论抽象，它们的存在本身无法阻止我们去重新理解已有的概念和语言，并发现更真实、更接近实在的描述。

对于第五条，观察是不可逆的，它产生一个记录，由于这一结论不仅适用于对微观系统的观察，同时也适用于对宏观系统的观察，因此可以预计，观察中的不可逆过程实际上与量子力学的奇异特征并不直接相关。实际上，对于这一过程的解释完全可以建立在宏观经典理论的基础上，因此观察中的不可逆过程对于解释量子测量过程的特异性，例如对于解释测量投影过程的发生并无帮助。现在，量子运动的存在进一步证实了这一结论。

对于第六条，测量时所发生的量子跃迁是由可能到实际的转变，它断言了测量时量子投影过程的客观存在，并认为正是这一过程按照 Born 几率规则产生了确定性的测量结果。进一步地，Copenhagen 解释承认投影过程或量子跃迁用目前量子力学的演化规律无法说明，而是一种新的物理学过程，但它并未对这一过程的机制和实现进行分析，并认为这超出了目前理论的范围。然而，我们可以看出，正是对这一过程描述的缺乏导致了目前量子理论在物理上的不完备，并且由于这种缺乏 Copenhagen 解释本身同样不是一个完备的解释。现在，量子运动及其规律提供了对量子投影过程或量子跃迁过程的客观描述，因此它不仅形成了一个完备的量子理论，同时也为这一理论提供了比 Copenhagen 解释更完备、更客观的解释。

对于第七条，互补性质不能被同时观测，它无疑是 Copenhagen 解释的核心，同时也是最晦涩难懂的部分，它告诉我们单个微观客体的互补性质不能被同时精确测量，例如，粒子的位置和动量不能被同时精确测量。尽管这一结论是正确的，但是 Copenhagen 解释对它的论证却是不完善的，一方面，它将这一结论看作是测量扰动的一个不可避免的结果，但对测量扰动并没有提供一个清晰的说明，它的论证总是一种量子与经典的混和物。实际上，为了把测量过程说清楚，必须涉及量子态的耦合过程和测量投影过程。另一方面，Copenhagen 解释过分强调了测量扰动的影响，而忽略了粒子的客观运动状态是导致上述结论的更深刻的物理

原因,即互补性质不能被同时观测这一特征实际上反映了粒子客观运动状态的某种特异性,因为 Copenhagen 解释否认粒子客观运动状态的存在,因此它对上述结论的论证不可能是完备的。

Copenhagen 解释断言,对于微观客体不再存在独立的实在运动图景,我们只能通过互补的经典图像来描述它们。可以看出,在上述论证中,Copenhagen 解释不得不抛弃微观实在图景的原因是,用不同实验装置得到的关于微观客体的资料当结合成单独一种图景时将导致相互矛盾,那么,这些资料在结合成单独一种图景时为何导致相互矛盾呢?它们又是在结合成一种什么样的图景时导致相互矛盾的呢?Copenhagen 解释的回答是,它们在结合成一种经典粒子的图景或经典波的图景时导致相互矛盾,因为用一些实验装置得到的资料将显示微观客体的行为类似于经典的粒子,而用另外一些实验装置得到的资料却显示微观客体的行为类似于经典的波。于是很明显,Copenhagen 解释所拒绝的实在图景只是经典的粒子和经典的波,那么它有什么进一步的理由拒绝所有可能的实在图景呢?没有!如果有,那就是几乎所有人都默认的经典偏见,即认为经典的粒子和波图景是唯一可以存在的实在图景,或者说,粒子和波的经典连续运动是唯一可以存在的客观运动形式。应当承认,经典粒子和经典波对于描述微观过程的确是有帮助的,但是我们如何证明它们对于这种描述是必要的呢?我们为什么一定要用这些经典概念来直观地描述微观过程呢?经典连续运动的存在直接来自于我们的宏观经验,基于它的经典理论的确取得了一些巨大的成功,但是它明显不适于描述微观客体的行为,那么我们凭什么认为经典连续运动是唯一可以存在的客观运动形式呢?我们凭什么断定关于微观客体的实在运动图景不存在呢?互补性质不能被同时观测又如何?它恰好可以看作是微观实在本身的一种不同于宏观实在的独特性质,而丝毫不能成为反驳微观实在存在的证据。因此,互补性思想并不能禁止我们去发现不同于经典连续运动的微观实在图景,更不能禁止这种微观实在图景的存在,而观察的限制完全可以看作是这种微观实在的特殊本性。

对于 Copenhagen 解释的最后两条,只有测量结果可以被认为是真实的,以及纯量子态是客观的但不是真实的,它们具有更多的哲学味道,而无法单纯在物理范围内讨论。实际上,它们很难在物理范围内讨论清楚,因为对于“真实”与“客观”这两个概念的定义只能是哲学上的,在此我们将不进行这种讨论。总之,从上面的分析可以看出,由于微观实在图景的缺乏,Copenhagen 解释的诸多要点很难令人信服,并且相互之间也很难建立起有机的、内在的联系,而试图建立这种联系的互补性思想又被证明是不可靠的。实际上,只有量子运动这一真实的微观实在图景能够在 Copenhagen 解释的诸多正确看法之间建立起内在的、必然的联系,并为量子力学提供真实而客观的微观实在图景,但 Copenhagen 解释也因此不再存在,而代之以基于量子运动的量子力学的客观解释。(Bohr, 1963)不存在量子世界,存在的只是一个抽象的物理描述;认为物理的任务是揭示自然的想法是错误的;物理关心的只是针对自然我们能说些什么。(Bohr, 1934)孤立的物质粒子只是一种抽象,它们的性质只有在它们与其它系统相互作用时才可定义与观测。(Bohr, 1960)物理与其说是研究事先给定的事物,不如说是审视人类经验并赋予之秩序的方法的进展。(Heisenberg, 1958)我们必须牢记,我们所观察到的并非大自然本身,而是大自然呈现于我们的质询方法的面目。(Heisenberg, 1992)我认为现代物理已经决定性地倾向于了柏拉图;事实上,物质的最小单位不是通常意义上的物体,它们是只能用数学语言清晰表示的形式与思想。(Heisenberg, 2005)在把部分从整体中分离时有一个根本错误,即把不该原子化的东西原子化;统一性与互补性构成了现实本身。(Bell, 1971)理论物理学家生活在一个经典意义上的世界里,但双眼却瞄着一个量子世界;而后者只可以用经典领域内的程序与结果以主观的方式描述。(Bell, 1981)当我们仔细琢磨“测量”的含义时它变得如此模糊以至于我们很惊奇它为何出现在最基础的物理理论中。

3、哥本哈根解释的发展

在对‘EPR 实验’精神实质的了解方面,玻姆(Bohm),贝尔(Bell)还有 Aspect,都及不上玻尔(Bohr);玻尔完全认识到量子力学必定是非局域性的,而玻姆、贝尔和 Aspect 只是到后来才认识到这一点。量子测量中的不可逆改变,起因于量子力学的 Complementarity: 依据标准的“Copenhagen 解释”,物质运动具有粒子和波的双重属性——波粒二象性,但在同一个实验中二者是相互排斥的。例如在双缝干涉实验中,测量粒子通过了哪一个缝,等于强调了波粒二象性的粒子特性,与粒子性互补的波动性便被排斥了,干涉条纹便不再存在了。这种由于测量或其它影响导致相干性消失的现象也称为 Quantum decoherence。仅就量子测量而言,人们称之为 Wave packet collapse。玻恩相信:“量子理论诠释的关键在于,必须把彼此矛盾的波动与粒子这两种描述协调起来”,“波动—粒子二象性是辐射和实物粒子都具有的内禀的和不可避免的性质”,“波动和粒子描述是两个理想的经典概念,各自有其适用范围。在特定的物理现象的实验探索中,辐射与实物都可展现其波动性或粒子性。但这两种理想的描绘中任何单独一方,都不能对所研究的现象给出完整的说明”。Heisenberg 认为量子理论本身决定什么东西能被实验观测到?对于这种 Quantum decoherence 现象的进一步

解释是应用测不准关系：准确知道粒子通过路径 A 意味着垂直与 A 的方向上完全确定粒子的位置到一定精度，由测不准原理知测量将对垂直于路径 A 方向上的动量产生一定程度的扰动，从而干扰到达屏上粒子的位置，造成干涉条纹的模糊。测不准关系的解释表明，通过具有“粒子特征”的测量（如同时测量动量和坐标），去描述具有波粒二象性的物质运动，会带来测量的不确定性。【2】S.Bell 说，“缠结的量子系统表现出经典世界所不可能具备的行为，……，经典世界也不可能具备缠结量子系统的行为。”【5】科学家们已经对量子缠结做了许多实验，其中比较重要的有 1998 年，美国加州理工学院（CIT）的科学家利用纠缠态，使两个相距甚远的微观粒子竟如孪生，相互影响。2001 年 9 月 27 日，《Nature》杂志发表了引人注目的文章“宏观物体的量子纠缠态”，报道了丹麦物理学家把两个宏观物体（有数亿万个原子）形成纠缠状态。2001 年，中国科技大学郭光灿研究组取得了普适量子克隆实验成果。去年，澳大利亚国立大学华裔物理学家林平奎领导的研究小组把“在光学通信系统的一端把一束激光信息‘毁灭’，然后在一米外的另一端，将它重新现形。”【1】

对于一个实物粒子的正则坐标 q 和正则动量 p ，它们的不确定度满足 $\Delta q \Delta p \geq h/2$ ，这个关系给出了在微观世界中应用经典粒子的坐标和动量概念时应受到的限制。每一个单独粒子自身完全地以类似波动方式行为；从某种意义上讲，每个粒子一下通过两条缝隙并且和自身干涉，一个粒子可得到的不同选择的可能性有时完全相互抵消。费因曼质疑了“每个粒子只有一个特定的历史”，建议一个从某位置到另一位置的粒子沿着通过 space-time 的每一可能的路径运动。费因曼赋予每一轨道两个数，一个是大小——波幅，另一个是相位，粒子从 A 到 B 的概率是把通过 A 和 B 的所有路径的有关的波求和得到。Richard Feynman 认为：未来状态是由历史在空间和时间中前进时，有可能走过的所有路径取某种平均而决定的。有人认为量子力学的双缝问题，如果粒子通过缝隙，又穿越缝隙飞回原地那么发生干涉就是合理的，当然这个粒子不是光子，电子，而是组成光子，电子或者夸克的低层次“微粒”。

1964 年，贝尔从定域隐参数理论出发，采用定域实在论的三个基本假设（见下述），证明了一个不等式： $|P(a, b) - P(a, c)| \leq 1 + P(b, c)$ ，其中 $P(a, b)$ ， $P(a, c)$ 和 $P(b, c)$ 分别表示：（1）在 a 和 b 方向；（2）a 和 c 方向；（3）b 和 c 方向上分别测量粒子 A 和 B 的自旋投影的乘积 $A_a B_b$ ， $A_a B_c$ ， $A_b B_c$ 的平均值。这个关系式称为贝尔不等式。以 θ 表示 a 方向和 b 方向之间的夹角（取小于 π 的值），由于三维空间各向同性，记 $P(a, b) = P(\theta)$ ，可进一步求得 $|P(30^\circ)| \leq 2/3$ ， $|P(45^\circ)| \leq 1/2$ ， $|P(60^\circ)| \leq 1/3$ 。贝尔采用的定域实在论的三点基本假设是：第一，实在论，即认为所观察现象的规律性是由某种独立于观察者之外而存在的物理客体引起的；第二，归纳推理法，即认为可以自由运用归纳推理法从一贯的观察中得出合理的结论；第三，Einstein 可分隔性原理或 Einstein 定域性原理。到 70 年代，经过维格纳等人的简化推导，特别是斯塔普和德-埃斯帕纳等人的工作，人们清楚地认识到，贝尔不等式的本质在于 Einstein 定域性原理，而与是否具体引入隐参数无关。就是说，只要根据定域实在论的三个基本假设，引入量子力学的可观测量，就能导出贝尔不等式。如果按照量子力学理论，则可以求得如下的等式， $P(\theta) = |\cos\theta|$ 。这就是说，定域实在论断言实验结果满足贝尔不等式，而量子力学则预言实验结果必将违背这个不等式。到 1982 年为止完成了十二个实验，除两个外，十个实验的结果都不落在满足贝尔不等式的广大区域，而偏偏落在量子力学预言的曲线上。目前，物理学家们已经相当普遍地把违背贝尔不等式作为一个实验事实接受下来，明确地支持量子力学的普遍有效性，批判了 Einstein 在“EPR 论证”里提出的“定域实在性”的观点，反映了 Einstein 没有认识到量子力学里非定域关联的本质。【4】

量子力学中的波函数是一种几率波，代表着通过实验测量所获得的所有可能结果的几率情况。在量子力学中不能同时谈论粒子的位置和速度，它们受不确定关系的限制。粒子运动的这个问题没有意义。我们只能提供互补性的描述，而且这种描述与实验有关。Heisenberg 方程 $pq - qp = -ih$ 是量子力学的基础，微观粒子的运动状态用波函数来描写。Einstein 曾经把光波的振幅解释为光子出现的几率密度，从而使粒子和波的二象性成为可以理解的。这个观念马上可以推广到波函数 Ψ 上： $|\Psi|^2$ 必须是电子（或其它粒子）出现的几率密度”。波函数是时间和坐标的复函数，它由模和幅角两部分组成，模的平方描写在该点附近该时刻发现粒子的几率。由于在全空间发现粒子的几率为 1，波函数要满足归一化条件。玻恩的几率波解释第一次把几率概念引进基础物理学，“粒子的运动遵循几率定律，而几率本身按因果律传播”。这里，几率的出现并不是由观察者的无知或理论本身的无能所导致的，而必须看作是自然本身的一种本质特征。于是，量子力学一般只预言一个事件的几率，而对这个事件的发生不作任何决定论的断言。几个波函数的幅角间发生干涉，在实验中可以测量，近年甚至发现它有宏观观测效应。波函数满足 Schrödinger 方程，Schrödinger 方程包含波函数对时间的一阶微商和对空间的二阶微商。量子力学用 Schrödinger 方程：

$$i\hbar \frac{da_f(t)}{dt} = \sum_k H'_{fk} g(t) \exp\left[\frac{i(E_f - E_k)t}{\hbar}\right] a_k(t) \quad (2-1),$$

描述原子中电子从一种状态跃迁到另一种状态的过程。式中 $g(t)$ 是时间因子。量子力学含时微扰理论把 $a_f(t)$ 展开为级数

$$a_f(t) = a_f^{(0)}(t) + a_f^{(1)}(t) + a_f^{(2)}(t) + \dots + a_f^{(M)}(t) + \dots \quad (2-2),$$

这样(2-1)式变为近似方程 $i\hbar \frac{da_f^{(0)}(t)}{dt} = 0$ (2-3), $i\hbar \frac{da_f^{(M+1)}(t)}{dt} = \sum_k H'_{fk} g(t) \exp\left[\frac{i(E_f - E_k)t}{\hbar}\right] a_k^{(M)}(t)$ (2-4), 可惜到目前为止, 人们只找出这个级数的前几项(不超过 10 阶)。

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H \Psi$$

非相对论情形下由薛定谔方程

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = (-i\alpha \cdot \nabla + \beta m) \Psi$$

描述粒子演变规律, 相对论情形下需要用狄拉克方程

。玻姆最先提

$$U = \frac{-\hbar^2 \nabla^2 |\Psi|^2}{2m |\Psi|^2}$$

出“量子势”的概念,他认为作用于粒子不仅有经典势 $V(x)$ 还有量子势 U 。数学公式为它由波函数决定,具有非定义域的特性,高速运动粒子的波函数满足狄拉克方程,它包含波函数对时间和对空间的一阶微商。Schrödinger 方程和狄拉克方程都是关于波函数的线性齐次微分方程。对满足方程的波函数,幅角增加一个常数值,方程仍然满足,即狄拉克方程满足整体规范变换。把狄拉克方程中的普通微商改成协变微商,它在局域规范变换下保持不变,直接保证了电荷守恒。局域规范不变的狄拉克方程和 Maxwell 方程描写了相对论带电粒子与电磁场的相互作用,此方程组二次量子化后得到量子电动力学,它的预言在极高的精度下与实验惊人地符合,从而证明了用这种方法处理带电粒子与电磁场的相互作用是正确的。史蒂芬·霍金也指出:“也许就不存在粒子的位置和速度,只有波。只不过我们企图将波硬套到我们预想的位置和速度的观念中而已。由此导致的不一致乃是表面上不可预见性的原因”(《时间简史》P154)。量子力学的主要特征并不是非对易代数,而是几率振幅的存在,后者是全部原子过程的基础,它的物理内容由它的表述形式的统计规律的能力包罗尽,这种规律支配着在用平常语言指明的条件下得到的观察结果。由波动力学得到的物理推论在本质上是统计性的,这种统计性通过 Born 对普遍碰撞问题的光辉处理得到了澄清。【3】符号式量子力学表述形式的适当物理解释,只在于和个体现象有关的肯定的或统计性的预见,而这些个体现象是在用经典物理概念定义了的条件下出现的。当处理一个全新的经验领域中建立秩序的工作时,我们几乎不能对任何习见的原理有所信任,不论这种原理多么广阔,我们只能避免逻辑上的矛盾,而在这一方面量子力学的数学表述形式肯定应该满足这一要求。【3】

物理学总是预先假定:世界是存在我们之外的,不依赖于任何观测行为,但是量子力学认为世界并非存在于我们之外和独立于所有的观测行为。Bell 基于定域实在论和存在隐变量的观点,分析了自旋单态下的两个自旋为 0.5 的粒子,对于这两个粒子的自旋沿不同方向的投影的关联,他得出了一个著名的不等式(Bell 不等式)。根据这个不等式,可以在实验上检验究竟是正统量子力学正确,还是定域实在论正确。Aspect 等人的实验观测以及后来所有有关实验都证明,量子力学的预言是正确的,而定域实在论给出的不等式和隐变量的观点与实验相悖,笔者认为出现这一现象的根本原因在于观察者所用的测量仪器激发的场——相对 space-time 影响了绝对 space-time 的结构, Einstein 忽视了相对 space-time 的影响。粒子不会自主选择路径,而是由某个原因导致粒子选择一条路径,放弃其它路径。博姆的理论就是这样的理论,他把这个未知的原因叫作隐含序。博姆认为:粒子并不具有波粒两重性,而是真正的粒子。波动性是导引波作用于粒子的结果,而这导引波是由隐含序产生的。归根结底,粒子的运动特性是隐含序作用的结果。如此说来,粒子的运动都可在隐含序王国中找到原因。自然界中不再存在偶然事件,在显在序中发生的每一件事都是隐含序王国中序的表现。我们摒弃了粒子的形状、大小、自旋等客观实在性,选择了一定的数学模型,并且承认这数学模型

是正确的，那么，粒子的行为完全可以看成是数学的行为，并早就在人的心里有了记录。正如海森堡所说：这种数学不再代表基本粒子的行为，而代表了我们的关于这种行为的了解。

参考文献:

- 【1】杨教。不用飞船能上月球[N]? [N]。新晚报， 2002.6。22。
- 【2】《物理教学》 2001 年第 6 期 2—7 页 华东师范大学出版社。
- 【3】[丹麦] N.Bohr 著 戈革 译。《尼耳斯。玻尔哲学文选》 商务印书馆 1999 年。
- 【4】《物理》第 31 卷第 3 期 179 页。
- 【5】Michael A·Nielsen。量子信息学的奥秘[J]。科学，2003(1): 54。

4、量子力学的隐变量解释

1935 年 5 月，在 *Physical Review* 上 Einstein 和他的两位同事 B. Podolsky 和 N. Rosen 共同发表了一篇名为「Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?」(量子力学对物理世界的描述是完备的吗?) 三个人异口同声地回答:「不!」。在这篇著名的文章中，作者首先阐述了他们对物理理论的看法：一个严谨的物理理论应该要区别「客观实体」(object reality) 以及这个理论运作的观点。客观实体应独立于理论而存在。在判断一个理论是否成功时，我们会问自己两个问题：(1) 这个理论是否正确?(2) 理论的描述是否完备?只有当这两个问题的答案是肯定时，这样的理论才是令人满意的。理论的正确性当由实验来决定。而关于量子力学的描述是否完备则是这篇文章探讨的主题。在进一步讨论理论的完备性之前，我们必须先定义什么是完备性。作者们提出了一项判别完备性的条件：每一个物理实体的要素必须在理论中有一对应物(every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory)因此我们决定了什么是「物理实体的要素」，那么第二个问题就容易回答了。那么，究竟什么是「物理实体的要素」呢? 作者们以为:「如果，在不以任何方式干扰系统的情况下，我们能准确地预测(即 机率为 1)某一物理量的值，那么必定存在一个物理实体的要素 与这个物理量对应。」他们认为，只要不把这个准则视为一必要条件，而看成是一充分的条件，那么这个判别准则同样适用于古典物理以及量子力学中对实在的概念。举例来说，在一维系统中，一个以波函数 $\varphi(x) = \exp(ip_0x/2\pi\hbar)$ (其中 p_0 是一常数， i 表纯虚数， \hbar 为 Planck 常数)描述的粒子。其动量的算符为 $\hat{p} = -i\hbar \frac{d}{dx}$ ，因此： $\hat{p}\varphi(x) = p_0\varphi(x)$ ，所以动量有一确定的值 p_0 。因此在这种情形下动量是一物理实体。反之，对位置算符 \hat{q} 而言， $\hat{q}\varphi(x) = x\varphi(x) \neq a\varphi(x)$ ，因此粒子的位置并没有一确定的值。它是不可预测的，仅能以实验测定之。然而任何一实验的测定都将干扰到粒子而改变其状态，被测后的粒子将再也不具动量 p_0 了。对于此情况，我们说当一粒子的动量确定时，它的位置并非一物理实体。一般来说在量子力学中，对两个不可对易的可观察量(observable)而言，知道其中一个物理量的准确知识将排除对另外一个的准确知识。任何企图决定后者的实验都将改变系统的状态而破坏了对前者的知识。至此，作者们发现我们面临了如下的两难局面：(1)或者，在量子力学中波函数对物理实在的描述是不完备的。(2)或者，两个对应于不可对易算符的物理量不能同时是实在的(即具有确定的值)。因为，若两个不可对易的物理量同时具有确定的值，根据作者们对完备性的条件，在波函数的描述中应包含这些值。但事实上并非如此，因此波函数的描述是不完备的。在量子力学中，通常假设了波函数包含了描述物理系统一切完备的资讯。乍看之下，这样的假设似乎很合理。然而，Einstein 等人指出，在这个假设之下，配合他们对物理实体的判别准则，将导出(2)也是错的。因此这是一个矛盾。这就是著名的 EPR 悖论(EPR paradox 或 EPR dilemma)。

Einstein 等设计了一个理想实验来证实他们的观点。假设现在有两个粒子在 $t=0$ 到 $t=T$ 的时间之内相互作用，但在 $t>T$ 之后分开，不再有任何交互作用。根据 Schrodinger 方程式，我们仍然可以算出以后任何时刻两个粒子的状态。现在，注意到两个粒子动量和算符 $\hat{p}_1+\hat{p}_2$ 及位置差算符 $\hat{x}_1-\hat{x}_2$ 是可对易的。因此可以同时具有确定的值，即有共同的本征态(eigenstate)。例如 $\varphi(x_1, x_2) = D(x_1-x_2-a)$ ， D 是 Dirac 的 delta 函数。这代表了动量和为零以及位置差为 a 的本征态。现在假如我们去测量粒子 1 的位置，而得到结果 x_1 ，那么，我们可以同时地肯定粒子 2 的位置必定是 x_1-a 。换言之，在不扰动粒子 2 的情形之下我们便可确定粒子 2 的位置。因此，根据 EPR 的判别准则，粒子 2 的位置是实在的。同样的，若是我们去测量粒子 1 的动量而得到结果 p ，我们也能肯定粒子 2 具有动量 $-p$ 。因此粒子 2 的动量也是实在的。由于两个粒子已经足够地分开，而没有任何交互作用，粒子 2 不可能知道我们究竟要测量粒子 1 的位置还是动量，从而「决定」它要在位置 x_1-a 或具有动量 $-p$ ，这两个量必定是同时存在的(即使我们不能同时去量它们)。换言之，就是违反了前面 (2) 的条件。

在假设 (1) 错的情形之下, Einstein 等推出了 (2) 也是错的结论, 而这是不可能的。因此(1)一定是对的。所以 Einstein 等大胆的宣布, 量子力学的描述必是不完备的。在获得了这样的结论之后, Einstein 等同时期待了一个新而完备的理论将会出现。

纵观 Einstein 的论证, 我们发现他们的推论中隐含了两项假设: (1)物理实在是独立于观测者而客观地存在的。(2)两粒子间传递讯息的速度不能超过光速, 不存在超距作用(action-at-a-distance)。这项假设后来被称为 Einstein 定域性原理(locality principle)。

同年十月, Bohr 也在 Physical Review 上发表了一篇同名的论文, 反驳 Einstein 等人的观点。Bohr 首先批评了 EPR 对物理实体的判别准则。Bohr 以为一个物理量只有在当它被测量之后才是实在的。在 EPR 的理想实验中, 虽然我们对粒子的测量的确会得到预期的结果, 然而只有在我们安排此一实验测量之后, 该物理量(位置或动量)才是实在的。所以 EPR 的判别准则是有问题的。其次 Bohr 分析了 EPR 的理想实验, 认为两个粒子在分开之后, 仍然存在着某种关联性。因此在对粒子 1 做测量时, 仍应视为对整个系统的扰动。换言之, Bohr 并不赞同 Einstein 的定域性原理。量子力学是一个和谐的数学形式体系。它的预测与微观领域的实验结果都符合得很好。既然一个物理理论的预测都能够被实验所证实, 而且实验又不能得出比理论更多的东西, 那么, 我们还有什么理由对这个理论提出更高的「完备性」要求呢? 量子力学确实描述了微观客体对宏观仪器的度量表现, 这种巨观度量只能得出微观客体运动的统计结果。量子力学也只能透过这些巨观表现去猜测微观客体的某些属性, 它确实反映了以作用量子为下限的客体之运动状况。因此, 从它自身逻辑的相容性与和经验符合的程度来看, Bohr 认为, 量子力学是完备的。

提出隐参量解释的观点的主要是玻姆。这种观点认为, 量子力学只给微观客体以统计性的描述是不完备的, 需要引入一些新的附加参量, 以便对微观客体作进一步深入的描述, 这些新参量称做隐参量。玻姆把粒子看作是“客观实在的”结构, 就象牛顿力学中的质点一样。位形空间中的波在他的解释中也是“客观实在的”, 就象电场一样。位形空间是牵涉到属于系统的全部粒子的不同坐标的一个多维空间。玻姆又进一步规定恒波相面的法线是粒子的可能轨道。按照他的想法, 这些法线中哪一条是“实在的”轨道取决于系统和测量仪器的历史, 并且如果对系统与测量仪器的了解不比实际上能了解的更多的话, “实在的”轨道就无法确定。这种历史实际上包含了隐参量, 它就是实验开始以前的“实际”轨道。玻姆所主张的隐参量解释, 企图通过引入一些新的附加量——隐参量来对量子力学作进一步的深入描述, 从而弥补现有量子体系的不完备性, 与此同时, 该派还不满意概率表示和非因果性描述, 试图对微观客体作出决定论性的因果描述。到今天, 虽然还未从实验上验证隐参量是否真正存在, 但就其理论本身在当时科学界产生了强烈反响, 得到了许多科学家的赞同。

为了对 EPR 论证进行实验研究, 玻姆在 50 年代首先把 EPR 理想实验变成测量质子自旋和测量光子偏振关联的方案。这类实验早先由吴健雄等人做过, 结果与量子力学的预言相符。

综合上面三种经典或半经典解释, 很明显, 各派都力图从经典理论中找出量子力学的完备解释, 他们把经典理论中的一些概念与量子力学联系起来, 通过其中的一些相似性, 试图建立一条他们认为能够真正解释量子力学的新途径。

玻姆的量子势诠释是量子力学决定论诠释中影响较大的一派。玻姆一方面接受了 Einstein 关于量子力学对物理实在描述不完备的观点, 把探索对物理实在更精细的描述定为研究目标; 另一方面采纳了玻尔关于量子现象的整体性观点, 强调微观粒子对于宏观环境的全域相关性, 以协调同量子力学正统理论的矛盾。玻姆的作法避开了冯·诺意曼论证的制约, 只按经典哈密顿——雅可比理论的要求, 将薛定谔方程变形并赋义, 便顺利地提出了关于单粒子系统的量子力学因果解释。

首先, 玻姆把单粒子系统的波函数写成指数形式:

$$\psi = R(r, t) \exp\left[-i \frac{S(r, t)}{\hbar}\right] \quad (10.1)$$

式中 $R(r, t)$ 、 $S(r, t)$ 为实值函数。将 (10.1) 代入薛定谔方程:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi \quad (10.2)$$

方程中 m 为粒子质量, U 为经典势, 并分离变量即可得到哈密顿——雅可比方程

$$(10.3)$$

和位形空间中粒子几率密度 $\rho=R^2$ 的平衡方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \frac{\rho \nabla S}{m} = 0 \quad (10.4)$$

(10.3) 式中的 Q 是

$$Q = -\frac{\hbar^2 \nabla^2 R}{2m R} \quad (10.5)$$

玻姆称之为量子势。玻姆认为 (10.3) 和 (10.4) 两式启示人们：在微观领域，微观粒子具有实在论意义。

即理论中的粒子应视为实实在在的连续运动着的粒子，它具有动量 $p = \nabla S$ ，不仅受经典势 U 的作用，还受到量子势 Q 的作用。玻姆认为，量子势的存在是经典理论与量子理论之间差别的主要原由。量子势与薛定谔波函数 ψ 有关，任何具体情形，都由薛定谔方程的实际解确定。方程 (10.3) 使粒子具有连续径迹运动行为，而方程 (10.4) 又使粒子在量子力学中的统计预示成为可能。玻姆指出，量子势因果解释中，波函数有双重意义：第一，它表征常规意义中的玻恩几率波函数；第二，它确定非定域作用在粒子上的量子势。波函数表征与经典场有本质区别的实在常后来玻姆称这种场为量子信息场。

$$Q = -\frac{\hbar^2 \nabla^2 R}{2m R}$$

玻姆理论的关键是他的量子势，而量子势仅依赖于形式

因此，即使这个波由于大距离传播而扩散开来 $|\psi|^2 = R^2 \rightarrow 0$

$$\frac{\nabla^2 R}{R} \neq 0$$

量子势也可能仍有很强的效应，即

例如，当波通过双缝时，其干涉图样会产生一个复杂的量子势，它可以对远离双缝的粒子施加影响，使粒子在屏上的分布遵从几率密度方程。

有人对玻姆量子势理论进行计算机模拟，不仅双缝实验，而且在 A B 效应、势垒穿透和势阱散射等情形中，理论与实验都有很好的吻合。

玻姆的量子势理论在多粒子系统中亦有很好的应用，只是此时量子势

$$Q = -\frac{\hbar^2 \sum_{i=1}^N \nabla^2 R(r_1, r_2, \dots, r_N, t)}{2m R(r_1, r_2, \dots, r_N, t)} \quad (10.6)$$

式中 $R(r_1, r_2, \dots, r_N, t)$ 为 N 粒子系统波函数 $\psi(r_1, r_2, \dots, r_N, t)$ 的实幅部分。

玻姆的量子势诠释是决定论诠释派系中影响较大的分支。玻姆认为他的量子力学哈密顿—雅可比方程，通过经典势 U 和量子势 Q 确定了粒子在经典概念下的连续径迹运动，位形空间中的几率密度平衡方程使得量子力学的统计预示成为可能。在玻姆的理论中，作为质点的粒子，其运动具有经典的轨迹，并由其哈密顿—雅可比方程描述，但对于一个具体的粒子，它走哪一条通道却是随机的，每个通道中粒子密度的变化宏观上遵从几率密度平衡方程的描述。玻姆的量子势诠释取得了很大的成功，几乎所有的量子力学实验它都可以合理解释，但是由于量子势来源不清，也没有量子势依托的哲学基础，更由于 Einstein 认为他复活了以太假说，尽管玻姆本人认为量子势可解释为原子内的自组织力，但玻姆的量子势诠释还是被冷落在正统诠释之外。洪定国教授认为这一现状，近年来有比较明显的改观。

更深入的分析，波函数与量子势之间似乎还有循环论证之嫌。因为量子势由波函数的具体形式决定，而波函数又由包含量子势的运动方程的解决定，这就是一种逻辑循环论证。

玻姆的量子势概念的缺陷是物理意义不明确，也缺少相应的哲学背景，并有循环论证和引进以太之嫌。

$$\psi = \text{Re} e^{-i\frac{S}{\hbar}}$$

如果把玻姆波函数的形式

理解为曲率解释中的曲率函数，那么玻姆量子势的物理意义就很清楚了。量子势

$$Q = -\frac{\hbar^2 \nabla^2 R}{2m R}$$

中的 R，正包含有我们定义的曲率因子。量子势反映了电子运动过程中自身空间结构的变化，正是空间结构的这种变化，决定了“点”电子运动的状态。量子势就是曲率“势”。量子势的物理意义

更明确了。量子势不是以太，而是“空间是物质的延展性”哲学思想的物理化。当然把它理解为一种自组织力，原则上对的，但这种自组织力形成的势，不包含有能量的传播。因为波函数的基本形式在量子力学曲率解释中与玻姆的形式相同，电子在经典势 U 和曲率势的作用下运动，因此波姆描述电子运动的两个方程——径迹方程和概率方程可帮助曲率解释对一些量子现象作出说明。电子本来不是质点，当把电子抽象为质点之后，电子的形象转化成了曲率“势”。曲率大的地方，则是电子动量大或出现几率大的地方，反之亦反。这就为粒子在屏幕上出现的随机性开通了道路。德布罗意说电子骑在波上，多少是量子力学曲率解释的形象描述。而这与德布罗意的原意已完全不相同了。

1951 年，Princeton 大学教授 David Bohm 提出了一个新的版本的 EPR 悖论。Bohm 的方案是考虑一对处在单态(singlet state)的自旋 $1/2$ 粒子。意即，粒子的自旋态为：(这里读者可能需要一点量子力学自旋及角动量相加理论的基础。。)， $|\text{spin singlet}\rangle = (|z+\rangle|z-\rangle - |z-\rangle|z+\rangle)/\sqrt{2}$ ，两个粒子互相分开，并分别进入一探测器 A，B，探测器 A，B 是一 Stern-Gerlach 装置，可以安排成测量粒子任一方向自旋角动量的分量。现在假设 A 被安排成测量粒子 1 的 z 轴自旋分量 S_z ，B 也被安排成测量粒子 2 的 z 轴自旋分量。由于粒子对处于 singlet state，我们不知实验结果为何，只知道获得正负 $\hbar/2$ 的机率都是百分之五十。然而，若是 A 测量的结果是 $+\hbar/2$ ，那么我们可以确定 B 的结果必是 $-\hbar/2$ 。

这种情形有点儿像在袋子中放了黑白两球，我们伸手去拿一球，那拿到黑球或白球的机率各是 50%。但假如我们拿到了白球，那袋中剩下的球必是黑球！然而这样的类比还是太过简单了。量子系统可比这复杂多了！因为我们也可以安排 A，B 去测量自旋的 x 轴分量或是其它方向的分量。我们的量子球不但可以是黑和白的，也可以是红和绿的！

一个自旋 $1/2$ 粒子的 S_x 及 S_z 的本徵态有下面的关系： $|x+\rangle = (|z+\rangle + |z-\rangle)/\sqrt{2}$ ， $|x-\rangle = (|z+\rangle - |z-\rangle)/\sqrt{2}$ ， $|z+\rangle = (|x+\rangle + |x-\rangle)/\sqrt{2}$ ， $|z-\rangle = (|x+\rangle - |x-\rangle)/\sqrt{2}$ ，因此若将 singlet state 用 $|x+\rangle$ 和 $|x-\rangle$ 表示，则为 $|\text{singlet state}\rangle = (|x-\rangle|x+\rangle - |x+\rangle|x-\rangle)/\sqrt{2}$ 。所以同样地，如果我们量测粒子 1 自旋的 x 轴分量，得到的结果为正，那量测粒子 2 自旋的 x 轴分量结果必为负。(这并不奇怪，因为 singlet state 的自旋总角动量为零，因此两个粒子在任一方向的自旋分量必相反。)

现假设，让 A 量测粒子 1 的 S_x ，而 B 量测粒子 2 的 S_z ，那么即使我们得到 A 的结果为正，我们仍不知道 B 的结果为何。因为虽然我们知道粒子 2 的 S_x ，它的 S_z 仍然完全未定。我们得到的结果仍是正负各百分之五十。

根据以上讨论，我们有下面的结果：(1)如果 A 和 B 同时量测 S_z ，那么两者的测量结果有百分之百的相关程度(即符号完全相反)。(2)如果 A 量 S_x 而 B 量 S_z ，那么两者的结果将没有任何的相关。

看来，在 B 处测量的结果将和 A 处做何种量测有关。但是 A，B 可以相距几公尺，几公里，甚至几光年(原则上)！在 B 处的粒子 2 如何能「知道」我们将在 A 处做什么测量，进而「决定」它的行动呢？(若测同一轴就跳到和 A 相反的方向，若测相互垂直的方向就可以随机?)。所以在认为没有超距作用，即在 A 处的量测不可能影响在远方的粒子 2 的情形之下，我们只好认为，两个粒子在出发之时，就已经「想」好了要「告诉」侦测器何种结果。而且，两个粒子的「想法」是刚好相反的。

因此，两个不可对易的算符 S_x 和 S_z 将同时地具有「物理实在」(physical reality)。或者，我们可以把它叫做「密码」或「指令集」更恰当。我们可以将粒子的「思想」称为是「密码」或「指令集」。粒子也许并非想像中的无知，到了侦测器前面，才临时地「掷骰子」决定自己命运。冥冥之中正有一股力量在操纵一切：一种隐藏的，未知的参数控制了粒子的行为。这种「隐藏」的性质决定了我们观察的结果(spin up, spindown)。我们所见到的机率现象，只是统计的，平均的结果。这种观点称为「隐变量理论」(Hidden-variable theory)或是量子力学的「隐变量解释」。其实这样的观点并不陌生。例如在热力学中气体的温度，压力等巨观物理量，都可以用分子运动论，以大量分子作无规律热运动的统计平均效果加以说明。因此分子的质量，速度等可以看成是热力学中的「隐变量」，而分子运动论就是热力学的「隐变量解释」。然而，量子力学的隐变量理论将会遭遇严重的困难。粒子的密码或指令集就是 EPR 所谓的「物理实体(physical reality)」。然而这些实体是分别属于两个不对易算符 S_x 和 S_z 的。量子力学对自旋的描述(二维的 Hilbert 空间)显然不能(同时)包含这些实体，它们在理论中没有对应物。因此，不能认为量子力学的描述是完备的。

到此为止，可以根据 Einstein 和 Bohm 的理想实验，将 EPR 的推论过程总结如下：Einstein 定域性原则，无超距作用。 \implies 两个不可对易的物理量(如 p 及 x ， S_x 及 S_z 等)将同时具有确定的值。 \implies 这些值并未包含在波函数(或自旋态等)的描述中。 \implies 量子力学的描述是不完备的。可以看出争论的焦点在于定域性原则上。只要承认这个原则，似乎不可避免会得到 EPR 的结论。为了对 EPR 论证进行实验研究，

玻姆在 50 年代首先把 EPR 理想实验变成测量质子自旋和测量光子偏振关联的方案。这类实验早先由吴健雄等人做过，结果与量子力学的预言相符。

5、量子力学的随机解释

吉布斯是首创统计系综理论的美国物理学家。1873 年至 1878 年，他发表了被称为是“吉布斯热力学三部曲”的 3 篇论文，即“流体热力学的图示法”(1873)、“借助曲面描述热力学性质的几何方法”(1873)，以及“非均匀物质的平衡”(1876、1878)。由于他出色的工作，热力学成为一个完整严密的理论体系。1902 年吉布斯发表了巨著《统计力学的基本原理》，创立了统计系综的方法，建立起经典平衡态统计力学的系统理论，对统计力学给出了适用任何宏观物体的最彻底、最完整的形式。

爱因斯坦关于热运动的主要研究内容，是用统计方法分析原子、分子运动问题以及研究运动和热之间的关系问题。在这方面，爱因斯坦的工作超过了奥地利天才的物理学家玻尔兹曼和美国科学家吉布斯的研究成果，他在物理学方面的探索深度胜过数学的论证。同时，在玻尔兹曼的思想引导下，他把概率作为热学的数学演算基础。在《分子热运动论所要求的平静液体中悬浮粒子的运动》一文中，爱因斯坦以统计方法论证了悬浮粒子的运动速度及其颗粒大小与液体的粘滞系数之间存在着可用实验检验的数量关系。所有这些问题，都是爱因斯坦单独研究出来的，以致有人曾对玻恩说过，“统计力学的所有具有重要特点的新发现”全是爱因斯坦搞出来的。

有人说，根据量子力学的流体力学表象就可以知道，系综诠释对于量子力学来说是最自然的。多粒子系统的量子理论必然是量子场论的或系综诠释的；凡多粒子系统，凡相对论性理论，凡与经典场有关的量子力学，必然应当是系综诠释的。只有如此才合理，否则便不能自圆其说。但事情并不这样简单。众所周知，根据量子理论，光可视为波，光又可分为波不连续的微粒。对多粒子系统来说，量子具有波粒二象性是没有问题，但对于单个量子，波粒二象性中的“波”如果像流体或介质中的水波就有矛盾。因为流体或介质必然是多粒子系统，这和“单个量子”的前提是相悖的。为了解决这个矛盾，玻恩提出量子具有波粒二象性的“波”，是几率波而不是像水波。

对量子力学解释的统计观点认为，量子力学对客观世界的描述只能是统计性的，而不是决定论的，也不能描述单独发生的事件。最早提出这概念的是玻恩，1926 年他写了一篇不到 5 页的文章——“论碰撞过程的量子力学”，认为波函数服从统计原理，波函数模量的平方代表粒子出现的概率。值得说明一点的是，玻恩的观点最早也为玻尔、海森伯等人所接受，就其哲学思想来说和 Copenhagen 学派是一致的，但在量子力学解释的看法上却是有所差别的，尽管都承认概率的概念，但 Copenhagen 学派认为这种概率可以描述单个事件，而这里所说的统计解释则刚好否认这一点。在这一点上 Einstein 的观点是与玻恩一致的。关于光的波粒二象性，Einstein 从统计观点作了解释，即光的波动性可看作是大量光子运动时表现出的统计规律性，光波振幅大因而光强大的地方，光子到达的概率大，或者严格一点说，光子在该处单位体积中出现的概率大，即概率密度大。微观粒子遵从的规律是概率性的。Einstein 讲：“根据目前的量子理论，在辐射损耗的基本过程中，分子要经受一个数量上为 $h\nu/c$ 而方向上“随机”的反冲。”玻恩受 Einstein 思想的启发，认识到可以通过概率的途径将“粒子与波”合理地联系起来。“概率”一词意味着可能性程度，概率也叫几率、可能率、或然率，这许多名词都是同一个意思。要正确理解玻恩的概率解释，关键在于分清两个关系：一个是波与粒子(例如，电子)的关系，另一个是单个粒子(例如，电子)与粒子总体(例如，电子流)的关系。为了说明玻恩的概率的解释，我们可以结合具体的电子衍射实验。在这一实验中，可以得出电子-电子流-波三者之间的有机联系。在实验中，人们控制电子束，使电子一个一个地穿过薄片再射到照相底片上。实验结果是：单个电子虽然能绕射到几何阴影区内，却只能完全随机地形成一个斑点(一个电子对应一个斑点)，不能直接生成衍射图样；然而作为许多个电子累积的统计总和的粒子全体则可以得到衍射图样，这个图样显示出电子的波动性。从波动观点看，底片上衍射极大处，波的强度(即振幅平方)较大；从粒子观点看，单个粒子在某处的出现是随机的，但粒子总体则满足统计规律。在这里，可以用统计观点看待单个粒子与粒子总体的联系，并将波的观点与粒子观点结合起来，但这里的波是特殊意义的波，因而被称为“概率波”。这种对物质波衍射与实物粒子的波粒二象性的理解，称作统计解释或概率解释。

在量子力学中，不确定原理是根据“探测电子”的实验提出的，在今日大学教科书中都有如下描述：“追踪电子：……有人说了，你们这个办法不对！像康普顿散射那样，电子是与个别光子碰撞的，光源调暗只能减少光子的个数，并不减弱对碰上它们的电子的干扰。每个光子的能量正比于频率，应当降低照明光的频率，加大它的波长。好吧！照你说的办”。“我们不减弱照明的光，以免有电子漏网。但逐步改用较红的光，甚至红外线或微波(雷达)。随着照明波长的增大，起初还好，与上面描述的强光照明情况差不多，我们探知电子不通过孔 1 就通过孔 2，记录不显示出干涉现象。但是由于光的衍射效应，散射的闪光在显微镜中所成的

像实际上是一个扩展的艾里斑，它代表个别光子打在像面上的概率分布。当照明光的波长达到一定程度时，两孔的艾里斑严重地交叠起来，使我们无法分辨电子散射的光子来自哪个孔附近（见图1—25上部）。这样一来，我们再次丧失了电子怎样通过双孔的信息。回头来看记录，啊，干涉条纹又恢复了！”。“总之，要设计出一种仪器，它既能判断电子通过那个孔[这种仪器称为‘那条路检测器（which-way detector）]又不干扰干涉图样的出现，是绝对做不到的。这是微观世界里的客观规律。”（见《新概念物理学·量子物理》赵凯华、罗蔚茵 著 P26）。量子力学认为，微观世界可以用量子态，也就是波函数来描写，不是用位置、速度、动量等这些物理量来描写的。量子态的演化确定性地服从薛定谔方程。就像位置、速度这些经典物理量确定性地服从牛顿定律一样。用量子态描写虽然有些抽象，但更合理。说它抽象，是因为量子态是一种数学上的波函数，包含了虚数这样“无意义”的东西；说它更合理，是因为量子态包含了一个客体的“全部信息”。

世界著名理论物理第六册——《量子力学》【1】中著：“量子力学，可建立于数个基本假定上，大体上这些基本假定分属两大项……，两项的假定便构成一量子力学完整系统”。文献【1】在建立对易关系： $p q - q p = (\hbar / i) E$ ——（1）时说：“这是一基本假定”。就是说（1）式不能用任何数学——物理方法导出，然而，（1）式就是“波动方程”的基础，也就是量子力学的理论基础。

研究表明，量子力学所谓实验基础，首先在于德布罗意“物质波”理论，提出“波函数”（ Ψ ）概念，并且通过一种算符将其作用到一个基本假定即（1）式上，便铸成了著名的“波动方程”——量子力学的理论基础： $(\hbar^2/2m) \nabla^2 \Psi + (E - V)\Psi = 0$ ——（2）

对于“物质波”概念，量子力学【1】应用了三个基本假定：其一假定“对易关系”即（1）式，由此构成量子力学骨架；其二假定“测不准原理”，由此得到了电子“几率云”图像；其三假定“波粒互补原理”。

$$\frac{h}{m v}$$

量子力学【1】首先拿出： $2 \pi a = n \frac{h}{m v}$ （3）很明显式中 $2 \pi a$ 是粒子中心轨迹。于是说，物质波是粒子轨迹波动。量子力学认为（3）式系近代物理概念，对此不能用经典概念理解。量子力学给波函数 Ψ 做出完整的真实物理学定义：①波函数 Ψ 表示粒子中心轨迹波动；②波函数 Ψ 表示粒子出现几率；③波函数 Ψ 表示弥散物质波包三种概念。

物理学大师德布罗意在 1957 年的一段话，就是关于量子力学难以作为一个科学理论立足的最初萌芽：“不确定性是物理实质，这样的主张并不是完全站得住的。将来对物理实在的认识达到一个更深的层次时，我们可能对概率定律和量子力学做出新的解释，即它们是目前我们尚未发现的那些变量的完全确定的数值演变的结果。”

量子力学的随机过程解释，是力图通过研究薛定谔方程，海森伯关系式同扩散过程或布朗运动理论中的方程之间的相似性，将量子力学解释为一种关于概率过程或随机过程的经典理论。经典与量子在概念结构上是同构的，因而对经典物理学概念的任何摒弃和背离都是不必要的。1931 年 3 月 12 日，薛定谔在呈交给柏

$$D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial w}{\partial t}$$

林科学院的一篇论文中，首先发现了存在于波动方程与扩散方程 $D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial w}{\partial t}$ ，（其中 $w(x, t)$ 是粒子的几率密度， D 为扩散常数）之间的相似性，即若已知 $w(x, t_1)$ 和 $w(x, t_2)$ ，那么在时刻 $t(t_1 < t < t_2)$ 的分布几率与量子力学几率密度的表示式 $\Psi \Psi^*$ 极为相似。经典概率理论与波动力学之间的这种数学相似性是导致人们对随机过程解释感兴趣的最直接的原因。

1933 年，弗斯证明了海森伯关系式在随机过程方面也存在类似物。弗斯发现，对于作一维运动的自由粒子，不仅薛定谔方程在随机过程方面有类似性，而且关于位置与动量不确定关系式在随机过程方面也存在类似性。

弗斯首先用统计方法导出了海森伯关系式，然后，他定义了扩散过程的位置不确定度。由于每个粒子的运动是别的粒子无规则碰撞的结果，这个不确定度随着时间而线性增大。他先定义扩散流 Q ，即单位时间内单位面积的扩散量，再定义 Δx 与 Δv ，弗斯由此得到了与海森伯关系式相似的关系式 $\Delta x \Delta v \geq D$ 。

弗斯的这一发现，对于随机过程解释来说具有非常重要的意义。上世纪 50 年代玻普尔提出的量子力学统计系综诠释，就是建立在随机过程之上的相似诠释。

随机过程解释，后来经保加利亚的达泽夫、美国的内尔逊、波兰的加尔琴斯基及墨西哥的德拉佩尼亚——奥埃巴赫等人的发展，变成了一个世界性的研究课题，使随机过程解释在数学上有了相当深入的发展，尤其是德拉佩尼亚——奥埃巴赫 1970 年还将随机过程解释扩展到了无旋粒子以及自旋为整数或半整数的粒子的随机过程，并对它们作了相对论表述。

由于达泽夫对随机过程解释的发展需要引进物理场的承担者，因而量子力学随机过程解释忽视非连续作

用机制并将微观粒子描述成作某种布朗运动，都会涉及到粒子同类似于“以太”的相互作用问题，因而也就牵涉到了假想实体的存在问题。在目前，由于对类似的“以太”缺乏经验支持，随机过程解释在哲学上不能令人满意。随机解释认为，通过研究薛定谔方程与费曼积分、马尔科夫过程之间的联系，认为应把量子力学解释为一种经典的概率理论或统计过程理论。这些过程是随机的，例如，用布朗运动理论解释不确定关系。最早对量子理论作随机解释的薛定谔和随后的玻普通过对随机过程的研究认为，波粒二象性的矛盾是由于波被看作是一种独立的实在，如果波被看作是粒子系综的集体特性，例如声波那样，就不存在矛盾了。后来，他们借助量子场中的产生和湮没过程，建立起一种推广了的统计力学，由此推出量子力学的规律。他们进一步认为波函数只是表示时空中事件出现的次序。由于基本事件按其本性来讲是分立地产生和消失的，所以这些次序的规律具有统计的性质。随着统计电动力学的发展，发现经典随机体系与量子力学体系之间具有很大的类似性。薛定谔还认为，只能把“客观实在性”归属于波而不归属于粒子，并且不准备把波仅仅解释为“概率波”。因而他认为，只有位形空间中的波是通常解释中的概率波，而三维物质波或辐射波都不是概率波，但却有连续的能量和动量密度，就象麦克斯韦理论中的电磁场一样。薛定谔因此正确地强调指出，在这一点上，可以设想这些过程是比它们通常的情况更为连续。在通常的量子论解释中，它包含在从可能到现实的转变中。

参考文献:

【1】理论物理《量子力学》 吴大猷 著（台湾）。

附录:

2015 年荷兰和美国物理学家进行了第一个可以同时解决“探测漏洞”和“通信漏洞”的贝尔实验。该团队使用了一种称为“纠缠交换”的巧妙技术，可以将光子与物质粒子的优点结合在一起。在 9 天内，该小组总共产生了 245 对互相纠缠的电子，最终测量结果表明两个电子之间的相关性超过了贝尔极限，再一次支持了标准量子力学的观点。这也似乎宣告隐变量理论出局。

实际上，1985 年，现供职于美国西北大学的理论学家 Anupam Garg 和伊利诺伊大学的 Anthony Leggett 就提出了一条完全不同的解决途径：与其尝试“验证”量子理论，不如设法证明量子理论以外的所有解释都与实验观测相矛盾，因而排除它们。Leggett 和 Garg 发现在不同时刻对同一物体的测量只能在一定程度上具有统计学的相关性，并创立“莱格特-加格不等式”。

2011 年，White 和同事证实量子光子具有高强度相关性，尽管只是在平均值上，而且并非使用单光子。现在，麻省理工学院中微子物理学家 Joseph Formaggio 研究团队使用费米国立加速器实验室主注入器中微子振荡（MINOS）实验数据提供了证据。该实验让谬子中微子的束流穿过位于费米实验室的 MINOS 近程探测器，然后到 450 英里以外位于明尼苏达州的远程探测器。

中微子出现了 3 种类型。从费米实验室出发的是谬子中微子，在途中主要震荡成电子中微子。MINOS 并没有反复测量单个中微子，但每种中微子始于相同的状态，只是随着离开费米实验室的时间发生演变。

MINOS 没有测量距费米实验室不同距离的中微子，因此 Formaggio 等人无法直接将这与不同飞行时间所得的测量值进行对比。因此，该研究组分析了以不同能量到达明尼苏达州的谬子中微子数量的等值相关性。

研究人员观察到了 Leggett 和 Garg 预测的强相关性，并于近日将相关成果发表于《物理评论快报》。“正如我们所料，有很明显的效果。”Formaggio 说，该数据强调中微子没有“种类”直到它被实际测量出来。

Garg 表示，这一结论并不令人惊讶，正如中微子振荡是量子力学的固有机理。但他还指出，探索量子论和经典世界的冲突是一个新领域。

Formaggio 和 White 表示，下一步，研究人员将确定中微子能否以另外一种方式检验量子论。Garg 还希望有人能推动他与 Leggett 提出的原始理论：“宏观实在论”，即足够大的物体在同一时间只能在同一个位置（即宏观叠加态不可能存在）；人们可以准确测定这一物体的位置，而不会干扰它。

无论如何，正如澳大利亚昆士兰大学物理学家 Alessandro Fedrizzi 提到的那样，到底什么才是真正的事实？而真正令人激动的是设计出检验事实上是否有任何客观实体存在的测试。

6、量子力学的经典或半经典解释

经典或半经典解释是寻找量子力学与某种经典力学理论之间的联系，企图用类似经典理论的概念来解释量子力学。主要有下面的几种看法：①、薛定谔的经典波动解释 --- 在量子力学中，微观粒子的波粒二

象性，需要用薛定谔方程中
$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \Psi + U(r) \Psi$$
 的波函数 Ψ 来描写。薛定谔方程是（假定）建

立起来的，而不是从数学上将它推导出来的，它是量子力学中的一个基本假设，地位类似于牛顿力学中的牛顿方程，它的正确性是由在各种具体情况下，从薛定谔方程得出的结论与实验结果相比较来验证的。薛定谔是在德布罗意物质波的论文的启发下，把德布罗意波由自由粒子推广到处在势场中的粒子，最后得到以他命名的薛定谔方程式。薛定谔反对量子力学的哥本哈根解释，他用他的理论说明他所认为的波函数的概率解释的缺陷，认为物理实在是由波构成的。他甚至否认分立的能级和量子跃迁的存在。薛定谔的经典波动解释存在着一些问题，例如，他不能解释波包扩散问题，也不能解释在测量过程中波包的“编缩”问题。

②德布罗意的双解理论 —— 德布罗意认为，量子力学中的波函数 Ψ 不能表示真实的物理客体，而只能提供粒子各种可能运动的统计情况。他将自己的理论称之为“双解理论”。德布罗意一度曾放弃了自己的看法，他说是由于受到 Copenhagen“正统”解释的压力。60年代以来，德布罗意又重新阐述他的观点，并将他的看法与热力学和相对论的观点相联系，提出了所谓“单个粒子的热力学”或粒子的“隐热力学”，把粒子的运动和熵的变化联系起来，试图建立一条他认为能够真正解释目前量子力学的新途径。流体动力学解释——主张流体动力学解释的人把量子力学理论与流体动力学理论进行比较，发现二者非常相似。薛定谔方程推出后不久，有人就用流体力学方程推出薛定谔方程，并能反推。德布罗意认为，一个能在空间和时间中精确定位的物理实体，是由于时空图象本质上是静态的这一事实而被剥夺了其全部演化性质；而一个被赋予动力学性质的、正在演化着的物体，并不与空间和时间的任一点相联系。这是一种近似环量子三旋的思想。因为环量子三旋也联系芝诺悖论所揭示的真理：“居于一点则不处于运动或演化之中，处于运动和演化之中则不占据任何一点”，对此，德布罗意认为，芝诺悖论映射量子论的不确定关系，是可得到确认的。环量子作用量子，是标志着精确的时空定位与严格确定的演化运动之间相容性概念的极限；而球量子对无论是经典的波动概念，还是经典的粒子概念，对于描述的量子运动都是过度理想化的。但球量子与环量子，在不同条件下是互斥又互补的，因此，需要引进环量子的三旋，这样，环量子的体旋，就是一个球量子，而包容了球量子。所以本质上，球量子也可被环量子所代替。德布罗意当时的理解，当然不是环量子三旋思想，也不完全与哥本哈根学派一致。但德布罗意出于对波粒关系的考虑，不同意薛定谔简单否定粒子性而将粒子归结为波包的做法，这是正确的；但德布罗意又不接受玻恩用“几率波”概念消除波与粒的矛盾，这是不懂环量子三旋标记隐含了“几率波”，所以德布罗意才提出了双波理论的，它的核心是双重解原理，这也是正确的。因为通常意义上的波函数，是一个纯粹虚构的含有主观性质的东西，它只能用来提供关于粒子各种可能运动的统计信息；粒子的以及与这个粒子相缔合的波动现象的真实结构，是由环量子三旋奇异解表示的。因而这个环量子三旋奇异解，就是德布罗意意义下的真实物理指示者。这种结合在广延波动现象中的环量子三旋粒子，就像在经典图景中一样，会被明确定域在空间中，它服从严格的因果决定论。

吉布斯是首创统计系综理论的美国物理学家。1873年至1878年，他发表了被称为是“吉布斯热力学三部曲”的3篇论文，即“流体热力学的图示法”(1873)、“借助曲面描述热力学性质的几何方法”(1873)，以及“非均匀物质的平衡”(1876、1878)。由于他出色的工作，热力学成为一个完整严密的理论体系。1902年吉布斯发表了巨著《统计力学的基本原理》，创立了统计系综的方法，建立起经典平衡态统计力学的系统理论，对统计力学给出了适用任何宏观物体的最彻底、最完整的形式。大量性质完全相同、以一定的几率各处于某运动状态的、彼此独立的力学体系的集合谓之统计系综(简称系综)；所有态的几率构成一种几率分布，或称系综分布。理论系综是处在相同的给定宏观条件下的大量结构完全相同的系统的集合。它是统计物理的一个想象中的工具，而不是实际客体。系综理论的基本观点是，宏观量是相应微观量的时间平均，而时间平均等价于系综平均。系综的一个基本假设是各态历经假说：只要等待足够长的时间，宏观系统必将经历和宏观约束相应的所有可达微观态。系综理论主要是研究处于三种不同宏观条件下的平衡系统组成的三种稳定系综：即由能量 E ，粒子数 N ，体积 V 一定的孤立系统组成的微正则系综，由温度 T ，粒子数 N ，体积 V 一定的恒温封闭系统组成的正则系综和由温度 T ，化学势 μ 一定的开放系统组成的巨正则系综。微正则系综描述孤立系统的平衡性质，正则系综描述与大热源平衡的恒温系统的性质；巨正则系综描述与大热源，大粒子源平衡的开放系统的性质。而三种统计系综的关系是：它们是等价的，但应用的广泛程度不同，方便应用的条件不同。三种系综等价的含义为：虽然组成三种系综的系统所处的宏观条件有原则上的区别，但在热力学极限下用三种系综计算同一个宏观系统的热力学量时，会得到相同的结果。也就是，我们可以不管系统所处的实际系统，按照方便，采用任何一种系综进行计算，结果都是相同的。即从理论角度考虑，微正则系综是系综理论的基础，正则分布和巨正则分布是由微正则分布导出的；在应用上，三种系综是等价的，实际上，巨正则系综由于其巨配分函数计算最简单而应用最广。由于三种系综是等价的，我们可以从解决问题的难易情况上选择一种便于计算的系综，然后求相应的(巨)配分函数，再由前面相应系综的统计热力学公式直接计算系统的全部热力学量。

前苏联物理学家布洛欣采夫提出的实际是一种球量子统计系综解释,这与德布罗意皈依的哥本哈根学派不同,是把不确定关系理解为互补观察量之间的球量子统计弥散度,而不是每一测量的精确度;另是把测量的不精确性归结为观察仪器的球量子特性带来的不可控制的干扰。布洛欣采夫在 1944 年,1949 年和 1963 年先后出版的《量子力学原理》,提出在量子领域里,无法对同一球量子粒子重复进行实验,而且测量能使微观球量子粒子的状态发生改变,因此要重复进行大量完全相同的实验,就必须设想由大量球量子粒子彼此互不相关地处在相同的宏观条件之下。这样一组微观球量子粒子的集合,布洛欣采夫称之为球量子粒子的量子系综。如果这些宏观条件完全决定了微观球量子粒子的状态,那么这样的球量子粒子的态,就可以用一个波函数来表征。这种情况下的球量子系综本身,称为纯粹系综。从波函数计算出的所有几率和所有平均值,都是指这种系综中所进行的测量而言的。布洛欣采夫把测量仪器看作球量子系综的谱分析器,它根据仪器的本性,从给定的系综中选出一些子系统来,或把一个系综(纯粹态)分离成各系综的混合(混合态)。这样的一个个子系综各自具有一个新的波函数,这相当于通常所说的“波包收缩”。在物理上,波包收缩意味着,一个球量子粒子在测量之后从属于一个新的纯粹系综。即统计系综解释是对球量子形式体系作了最少的假定后得出的解释,但布洛欣采夫的统计系综解释,类似流体力学一样,没有说明单量子现象也有波动性和随机行为,所有其他的物理解释都需要更多的假定。1958 年,前苏联“第一届全苏自然科学哲学问题会议”在莫斯科召开,布洛欣采夫的系综诠释遭到严厉抨击。

有人说,根据量子力学的流体力学表象就可以知道,系综诠释对于量子力学来说是最自然的。多粒子系统的量子理论必然是量子场论的或系综诠释的;凡多粒子系统,凡相对论性理论,凡与经典场有关的量子力学,必然应当是系综诠释的。只有如此才合理,否则便不能自圆其说。坚持“单个量子”的系综诠释者说,在通常的量子力学中,担心系综诠释会抹杀对单个体系(或粒子)知识的了解(如认为“粒子没有了”)是完全多余的,“系综”的概念可以追溯到流体力学的两种描述方法:(1)将流体视为质点系,研究的是“点”;(2)以流体所占空间中固定点的流动状况为出发点,研究的是“场”;这相当于量子力学的系综观点。关于量子力学系综诠释中存在的问题,可举如,量子力学系综诠释中的基本方程是线性的,因而此理论中的量子(粒子或系统)都仅仅是数学点。其次,在系综诠释中,一些被其它各种诠释解释得较为合理的量子特征,如测不准原理和波粒二象性等,却变得模糊不清。第三,量子力学系综诠释仍然未能始终如一地服从相对论的要求。最后,系综诠释关于“无限大广延宇宙”的概念,也无法同广义相对论相协调。

微正则分布讨论最简单也最基本的情形是孤立系。1870 年玻尔兹曼 1870 年提出等几率假设,孤立系处于平衡态时,体系各可能微观状态出现的几率相等。由等几率假设可以导出各种分布,因此是统计物理最基本的也是唯一必要的假设。例掷骰子,如果六个面是均匀的,六种不同的点数出现的几率也相同;如果庄家作弊,在某面打眼灌铅,相对的一面出现的机会就会多得多。即等几率假设的合理性是,物体孤立,又处于平衡态,这时,从宏观上控制微观态的条件对所有微观态都相同且固定(如能量、粒子数、体积)。没有理由说某个或几个态出现可能性更大,故可假定各态的几率相同。从实践性上说,实践是检验真理的唯一标准,基本假设的正确性由其推论(热力学定律,具体的体系性质的结果)已验证,迄今为止,玻尔兹曼的等几率假设已经得起历史考验。

综合上面三种经典或半经典解释,很明显,各派都力图从经典理论中找出量子力学的完备解释,他们把经典理论中的一些概念与量子力学联系起来,通过其中的一些相似性,试图建立一条他们认为能够真正解释量子力学的新途径。量子力学分成两派:一派类似球量子,这是一种单曲率解释;另一派类似环量子,这是一种双曲率解释。单曲率对应的球面,而双曲率对应的环面;但在拓扑学上,不但球面与环面是不同伦的,而且拓扑不变量、亏格也不同。

③量子力学决定论诠释中还有一个马德隆的流体力学诠释,这种诠释能说明一些问题,但马德隆把原子中的量子行为,归结为一种非粘滞性流体在保守力作用下作无旋运动的流体行为是错误的。这种理想化的连续流体观念在原子内部显然行不通,因为这等于将一种有意无视原子性的理论用来说明原子的行为!

④自从 1927 年在第五届索尔维会议上提出了量子力学的统计系综解释后, Einstein 就一直坚持这种观点。他坚持认为, ψ 函数所描述的无论如何不能是单个体系的状态,它涉及的是许多体系,是统计力学意义上的“系综”。但是, Einstein 涉及较多的是统计系综解释的必然性问题,而没有具体阐述这种理论的物理内容。

在 20 世纪 30 年代,玻普尔提出了海森伯的测不准关系的统计系综解释。根据这种解释,测不准关系仅仅表示所包含的参量之间的统计散布关系。即一定的粒子聚合体(在物理分离的意义上),如果在某一瞬间

聚合体的位置弥散为 Δx , 则它们的动量 p_x 也显示出随机弥散,其散布范围为 Δp_x , 并且 $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$ 。在玻普尔看来,量子力学的哥本哈根解释颠倒了测不准关系与量子论的统计学解释之间的逻辑关系^[4]。希

尔伯特空间中矢量提供的是统计性断言，不是关于单个粒子行为的精确预示，量子力学的问题本质上是统计问题。“所有的反对问题和几乎所有现存困难都来源于对概率论的误解。”因而“对量子力学解释来说，最迫切需要的是对概率论的解释问题。”在 1953 年独立提出的量子力学统计系统解释中，玻普尔将“几率”诠释为一种“倾向性”，一种附属于进行重复测量的整个实验装置，几率是一种介于现实性和可能性之间的物理实在。

玻普尔对量子力学和物理学理论的主要观点可概括如下：

- (1) 量子力学像牛顿力学，玻尔兹曼的气体理论一样，包含客观的、实在的性质。
- (2) 量子力学本质上是统计的理论，它并没有超出经典物理学的任何新的认识论意义。同量子力学一样，经典物理学也是非决定论的。整个物理学都是非决定论的，统计性原则上是整个物理学的基础。
- (3) 量子力学解释中几乎所有现存困难，都来源于对概率论的误解，尤其是来源于物理学中自拉普拉斯至马赫、Einstein 及现今业已存在的对概率进行主观主义解释的古老传统，以及对相对的或条件概率计算的忽视。所以，哥本哈根学派不得不在概率的主观主义解释和客观主义解释之间摇摆。
- (4) 通常解释中的不确定关系没有任何特殊的认识论意义，它并不表征某种对我们的知识的局限性，它们只是一种统计的散布关系，海森伯对测不准关系的解释是错误的。
- (5) 迄今为止，波与粒子之间的关系还未得到充分的探讨，波与粒子之间的二象性，是一种不负责任的说法；波与粒子之间并不具有“互补性”的特征，“互补性”不应是一种科学理论应具备的特征，它最多是一种意识形态。我们应该放弃“互补性”这个概念。
- (6) 量子力学不是一个超距作用的理论，“波包收缩”不是量子理论应有的效应特征，它是某种在任何概率理论中都会发生的事件。

布洛欣采夫在他的《量子力学原理》（1949 年版）中，第一次给量子系综下了这样的定义：系综是从属于同一客观环境的“粒子（或体系）的集合”。这个定义受到了福克的批判。1963 年布洛欣采夫对量子系综概念作了重新表述。在他看来，由于作用量的量子性，闭合的孤立的微观系统是不存在的。任何微观客体 u 总是处于一定的宏观环境 M 中，并且一般说来，这一宏观环境 M 与观测仪器 m 也是不可分割的。所谓“量子系综”就是这些大量相互独立的 $M+u+m$ 组成的总和。在量子系综的观念中，“量子的统计性是微观与宏观环境相互作用的结果”，波函数“确定着原子对一定宏观环境的从属性。”

在他的测量理论中，布洛欣采夫把测量仪器看作量子系综的谱分析器，它根据仪器的本性，从给定的系综中选出一些子系综来，或把一个系综（纯粹态）分离成各个子系综的混合（混合态）。这样的一个个子系综各自具有一个新的波函数，这相当于通常所说的“波包收缩”。“在物理上，波包收缩意味着，一个粒子在测量之后从属于一个新的系统”。自从 1960 年代格劳伯（R. J. Glauber, 2005 年诺贝尔物理学奖）建立光的相干量子理论起，量子光学提供的许多方法成为检验量子力学基本问题和许多疑惑的重要途径。量子光学的许多实验展示了量子力学的成功，解决了若干争议。

玻普尔把整个物理学都划入非决定论，看来有些偏激。因为牛顿力学中的统计行为具有决定论基础是肯定无疑的。初始条件的无法把握是牛顿力学中统计行为的根本原因。统计系综解释，把量子力学中的统计行为看作与热力学完全一样，这无疑是混淆了非连续作用机制与连续作用机制的根本区别，忽视了量子测量在机制转换中的作用，轻易将统计系综解释划归非决定论的做法。

贝尔不等式的成立与否并不是量子力学姓“非定域统计”还是姓“定域因果关系”的试金石。阿斯佩克特的“量子纠缠”实验现象是在一个狭小的范围内的信息传递现象，并不能代表普遍规律，也就不能强硬地降低定域实在论在量子力学中的地位（同源的共轭粒子之间能够纠缠并不能决定不同源的广泛的粒子之间的相互作用和运动都是非决定论的）。2007 年 4 月阿斯佩克特在 *Nature* 上的一篇文章中也承认：否定爱因斯坦的定域实在论思想不是由实验结果得出的必然结论，其否定还需有别的理由。穆尔敏(N. D. Mermin)：“鲁道夫·佩尔斯爵士不相信贝尔定理证实了非定域性。”“对我来说，非定域性似乎为消除某些深深的困惑“太便宜地”提供了一条出路。”洛察克(G. Lochak)：“依我之见，贝尔不等式的实验违反无关于所谓的“非定域性”或“非分离性”。这种违反只不过表明量子几率不是经典几率！”佩雷斯(A. Peres)等：“贝尔定理并不意味着量子力学本身存在任何非定域性。特别是，相对论量子场论明显是定域的。简单而显然的事实是，信息必须被量子化或不量子化的物质携带。因此量子测量不允许任何信息传送快于实验中发射的粒子格林函数中出现的特征速度。”阿德尼尔(G. Adenier)：“虽然证明贝尔不等式违反的实验愈来愈准确和无漏洞，但必须强调，不管如何地准确和接近理想，它们能证明的不外乎量子力学的有效性，而不是那定理的有效性。”

7、盖尔曼关于量子力学的新解释

1、量子状态的“多世界解释”

1957 年，艾弗雷特（H·Everett III）提出“相对态表述”，被 M·盖尔曼称作是被测系统量子力学现代近

似法的解释。它的本义是为了处理整个宇宙的量子姿态，免除经典物理学的观察装置和系统外部的观察者的需要，变客体为主体，把"多世界"变成"多宇宙可选择的历史"。即如盖尔曼所说："一个给定的系统可以有不同的历史，每种宇宙历史有它自己的概率；没有必要使人们心神不安地去接受都具有相同真实性的多个'平行的宇宙'。"这种解释，有别于量子学的初始解释。因为这是盖尔曼向量子力学的"历史求和"解释的转变。关于薛定谔的猫，埃弗雷特提出了"多世界诠释"有一只活猫，有一只死猫，但它们位于不同的世界中。问题并不在于盒子中的放射性原子是否衰变，而在于它既衰变又不衰变。当我们向盒子里看时，整个世界分裂成它自己的两个版本。这两个版本在其余的各个方面都是全同的。唯一的区别在于其中一个版本中，原子衰变了，猫死了；而在另一个版本中，原子没有衰变，猫还活着。"

2、盖尔曼的新解释目的是为量子力学找到一种适当的哲学描述，以推进玻尔时代。

他1979年就说过，"玻尔对整整一代物理学家洗了脑"，而在他1994年《夸克与美洲豹》一书的"量子力学的当代观"中又写道："我们在努力建构量子力学的诠释的目的，是想终止玻尔所说的时代。"关洪认为，盖尔曼的新解释的继承性表现在费恩曼(R·P·Feynman)创立的路径积分方法里，运用空间-时间中的历史来表述量子力学的做法；亦发扬了在H·Everett III提出的多世界解释里，物理世界有多种可能选择的思想。但关洪只说对了一半，即费恩曼路径积分方法就是盖尔曼的"历史求和"思维。但盖尔曼的"历史求和"不是物理世界有多种可能选择的并列，即不是如生物进化选择的多种并列，而是每次只有一种选择存在。即"多世界"解释只是一种信息增殖，而"历史求和"是一种"交换信息"。

3、"路径积分"不是根本否定"互补原理"

关洪更认为费恩曼创立的"路径积分"，实际上已经从根本上否定了玻尔关于对微观对象不可能同时给出空时标示和因果描述的"互补原理"，他的路径积分，实质上是一种历史性的描述，不过，它描写的不是系统经历的一种真实的历史，而是各种可能历史的振幅的叠加。但恰恰相反，费恩曼的"路径积分"是对玻尔的"互补原理"的发展。类圈体对信息来说是确定性和不确定性的，观控相对界类似是一种类圈体，也具有确定性和不确定性，而互补原理，是支持不确定性原理的。互补原理也说明物质和信息类似复数=实数+虚数，是一种二重结构的互补，是各种可能历史复数振幅的叠加，而不是什么历史性描述。

4、多世界(空间的)解释，只是一种信息增殖

多世界解释由艾弗雷特首创，以后又经过惠勒、德威特、格拉汉等人作了发展。量子力学多世界解释又称为EWG理论。多世界解释旨在寻求一种量子力学诠释体系，它不仅要消除对经典的(宏观的)观察装置或外部(最终的)观察者的需要，而且还要消除对形式体系作先验的操作解释的需要。这一理论的独特之处在于，EWG明确宣布，那种认为物理世界在许多宏观可能性(含于展开式之中)中作出一个具体选择的看法，只不过是一种幻觉；这些可能性是全部实现了的，根本没有发生什么波包扁缩。EWG认为，整个宇宙分裂为两个或更多个彼此独立的"世界"，在其中的任何一个世界中都有一种可能的实验结果得以实现。

根据艾弗雷特的阐述和德威特的总结，量子力学多世界解释的基本点可概括如下：

- (1) 量子力学的数学形式体系是完备的，不需要给它增添任何形而上学的内容。
- (2) 不需要引入外在的观察者。
- (3) 谈论整个宇宙的态矢量具有物理意义，宇宙态矢量的概念在物理学上是必要的。
- (4) 这个态矢量从不塌缩，作为整体的宇宙遵循严格的决定论。
- (5) 尽管实验观测装置的各态历经特性得到了量子力学统计解释内在一致性的严格证，从根本上说，这一特征并不是绝对必要的。
- (6) 不需要对量子力学的形式体系作先验的操作解释，统计解释不再被认为是先验的，多世界解释与通常解释之间是元理论与理论的关系。

(7) 分立的经典实在是不存在的，我们必须对通常的实在观念作彻底的变革。宇宙本是一个观察者参与着的宇宙。

在量子力学形式体系中，包含着5个公设：态函数公设；力学量公设；测量值公设；时间演变方程公设和多体全同性公设。艾弗雷特对正统量子力学的修改是从第三公设开始。为了理论的自洽，他对波函数(态函数)的定义也作了相应调整。整个宇宙的波函数称为"宇宙波函数"。宇宙波函数中既包含观测者和各类测量仪器，又包含被测对象。于是，在多世界解释中既不需要旁观的观测者，也不需要导致宇宙波函数塌缩的"上帝"。

在量子力学通常解释的第一公设中，还包含态叠加原理，即当 ψ_1, \dots, ψ_n 是体系处于 ψ 的态时，它同时也部分地处于 ψ_1, \dots, ψ_n 态中。艾弗雷特在多世界解释中，将原先正统量子力学中的"状态"，换成了各种可能的"世界"；相应的"态叠加原理"到了多世界解释中就成了"世界叠加原理"。即当体系处在世界 $\psi = \sum c_n$

ψ_n 中时，它同时了部分地处于世界 ψ_1, \dots, ψ_n 中。多世界解释意味着，当猫有等量机会成为“活猫”或“死猫”时，宇宙波函数就分裂成两个世界分支；其中一个世界中猫是活的，同时这个世界中观测者看到“活猫”；而另一个世界中猫是死的，同时该世界中观测者看到“死猫”。

对多世界解释的批评有四点：（1）它依然是线性非定域的，而这种非定域性很容易由玻姆的量子势得出；（2）多世界解释假设宇宙分裂出现的实际点，就是作出测量的点，但是什么是一次“准确测量”却无法交待清楚。EWG 无法说清波函数，可观测量和经典极限的真正含义，无法说清“量子引力”场的涨落，包括“真空涨落”和“时间涨落”。此外，多世界解释的时间可逆性同测量历史的不可逆性也有矛盾；（3）多世界解释有滥用数学的现象，引入了远离现象世界的“其他世界”；（4）物理学家们大多喜欢使用“可能性”等表述方式，而不喜欢“多世界”之类的表述，EWG 解释中的其他世界对我们来说是不可观察和不可交流信息的，因而纯粹是一种理论虚构。

关洪引述 H·Everett III 的多世界（即多历史）其历史是潜在的而不是实现了的解释，并同意盖尔曼可能世界不等于现实世界新解释。但这里要作一个历史注脚：派斯在《一个时代的神话》一书中关于玻尔和 Einstein 的反思，他认为玻尔的主要力量不在于学识渊博，而在于他那种惊人的直觉和洞察力；即玻尔也有物质+信息=实数+虚数的直觉和洞察力。而从 Einstein 方面看，他不仅是旧量子理论的三位奠基人之一，而且也是波动力学的教父；即爱因斯坦是第一次以狭义相对论光速有极限的定性与定量形式，划分出物质与信息观控相对界的实数与虚数的界面，以广义相对论时空弯曲定性与定量的形式，确定了物质熵的实数界面。但是，当人们终于在 1925 年达成了他在 1909 年就已预见了的粒子和波的融合以后，Einstein 为什么不肯接受这种融合呢？《一个时代的神话》的译者戈革评论称：量子力学的观念构架绝不能看成德布罗意--Einstein 意义下的波和粒子的“融合”，而是二者的“互补”，不然二人的争论就不会出现。因为在 Einstein 的梦想理论中，波动和粒两图景，“不应该被看成互不相容的”；真能创造出那种“融合”性的理论，玻尔的互补哲学就将一垮到底。这就是 Einstein 至死不肯接受量子力学现状的原因。派斯百思不解，原因就在于他混淆了“融合”和“互补”的真实涵义。

这是戈革一种典型的前哲学时代思维，即不认识信息范型是一种虚数论。当然，Einstein、玻尔、德布罗意也处在类似的时代，但已作出了很好的描述，因为他们还不知道类圈体似的超弦观念，以及物质能向点内陷落，点内不但存在平面、球面，而且也存在环面；点内的虚数世界是一种虚拟生存；点也可是一个观控相对界，是一个类圈体。在类圈体似的超弦观念看来，Einstein 的相对论和玻尔的量子论的统一已经得了较好的解决。要等这种解决完全尘埃落地，中国人才参与、肯定，那么还要重演科研成果与中国擦肩而过的历史。

玻尔常常谈的“时空描述”（或时空图景）和“因果图景”（动量-能量描述）的密切结合，实际是经典物理学实数物质信息的本质特征。他不曾或极少提到物质类似进入点内（包括仪器）的“波动行为”和“粒子行为”的结合，是因为经典物理学类似算术，实数与虚数这两种“行为”是绝对互斥的，是根本谈不到“结合”的；只有在现在已经有了一点影子的 Einstein 梦想过的那种物质与信息联系在一起的理论中，才会有两者的“融合”。

玻尔强调：只有通过坚持用信息经典术语来描述观察结果，才能避免表观上由粒子和波的二象性所造成的逻辑悖谬，粒子和波本身就是两个经典定义的信息名词。二者行为彼此互斥，是因为复数和虚数运算不同于各种实数的运算。例如，经典物理学家会说：如果两种描述是互斥的，则其中至少有一种是错的；量子物理学家会说：一个客体表现像一个粒子或像一列波，取决于信息结构使用信息范型偏重实数还是虚数来观察它的那种实验装置的选择。这就不会否认粒子行为和波动行为是互斥的，而且还会断言，为了充分地理解客体的物质和信息特性，这两者都是必要的。即用信息范型虚数论的语言来说，波和粒不是一个客体系统的实数“结构信息”，而是客体系统与环境（观察实验装置）“历史求和”相互作用的某刻“交换信息”。故而玻尔要求把这两种历史求和“交换信息”--空时标示和因果描述，作为不同经典理论表征的联合，看作是对客体系统描述的实与虚互补而又互斥的两个特征，它们分别代表着观察和定义的理想化。

这样我们就可以重新诠释“多世界解释”：Everett III 提出“相对态表述”即“多世界解释”，是为了调和系统演化的连续性增殖和测量过程的突然跳跃增殖这两方面的矛盾，认为在某一测量结果实现的同时（信息的两重性：既是系统的结构信息，又是系统与环境相互作用的“历史求和”交换信息），也实现了其他所有可能的测量结果“历史求和”（交换信息 $1/n$ ）。因为，在这一瞬间，同原来状态对应的一个世界增殖（环境 n/n ）分裂成了多个同被测量变量的各个本征态相对应的那么多世界（与多层次多方位的环境结构信息 n 相交换），每一个世界对应着一个可能的信息增殖测量结果（“历史求和”交换信息 $1/n$ ）。在这里没有波函数的坍塌，而只有世界的分裂，即使每一个世界都是同样真实的。我们之所以看到某一个测量结果（主客体结构信息及

其交换)，是因为我们正好生活在同这一观察结果相对应的世界历史和里（主体结构信息与其同构），在其他的消息增殖世界（其他的客体结构信息），对应着其他的测量结果（与主体结构信息交换的结果），只不过是我們看到的信息虚拟生存罢了。

8、对量子论的 Copenhagen 解释的批评和反建议

我完全相信，终究有人提出一种理论，在这理论中用定律联系起来的对象，并不是几率，而是所考察的事实。——A·爱因斯坦。

狄拉克说：“它是到现在为止人们能够给出的最好的理论，然而不应当认为它能永远地存在下去。我认为很可能在将来的某个时间，我们会得到一个改进了的量子力学，使其回到决定论，从而证明爱因斯坦的观点是正确的。但是这种重新返回到决定论，只有以放弃某些基本思想为代价才能办到，而这些基本思想我们现在认为是没有问题的。如果我们要重新引入决定论的观点，我们就应当以某种方式付出代价，这种方式是什么，现在还无法推测。”

量子论的 Copenhagen 解释已经引导物理学家远远离开了盛行于十九世纪的自然科学中的朴素的唯物主义观点，因为这些观点不仅与那时的自然科学有着本质的联系，而且也在若干哲学体系中作了系统的分析，为什么有那么多人作了批评 Copenhagen 解释的尝试，为什么会有那么多的人企图用更符合于经典物理学的概念或唯物主义哲学的解释来代替 Copenhagen 的解释。

这些尝试可以分为三个不同的派别。第一派并不想在实验结果的预测方面改变 Copenhagen 解释；但它企图改变这种解释的语言，以便使它更类似于经典物理学。换句话说，它试图改变哲学，而不改变物理学。这一派的若干论文把他们对 Copenhagen 解释的实验预测的赞同仅限于所有今天已经实现的或属于普通电子物理学的那些实验。第二派认为，Copenhagen 解释只是一个适当的解释，如果实验结果处处与这种解释的预测相符合的话。因此这一派的论文试图在某些临界点上，把量子论作某种程度的改变。第三派表示了它对 Copenhagen 解释、特别是它的哲学结论的普遍不满，而没有作出明确的反建议。Einstein、冯·劳埃（Von Lane）和薛定谔就属于这第三派，这一派从历史上讲是三派中的最早的一派。由于 Einstein 的哲学观后半生发生了很大的变化，因此对量子力学产生了怀疑，Bohr 和 Einstein 关于量子力学的哲学基础进行了长达近 30 年的论争，其实他们都在不同程度上，企图运用经典物理学的概念去理解和在不同程度上，企图运用经典物理学的概念去理解或者说明量子力学的基本原理。

然而，所有 Copenhagen 解释的反对者在一个论点上都是一致的。在他们看来，回到经典物理学的实在概念，或者用一个更普通的哲学术语来讲，回到唯物主义的本体论，那是值得想望的。他们宁愿回到一个客观的实在的世界的观念，这个世界的最小部分，就象石头和树木一样，是客观地存在着的，与我们是否观测它们无关。

当人们分析第一派的论文时，重要的是从一开始就要认识到，他们的解释不能为实验所推翻，因为他们只是以不同的语言重复了 Copenhagen 的解释。按照严格的实证论观点看来，人们甚至可以说，我们这里所碰到的不是 Copenhagen 解释的反建议，而却是以不同语言表达出来的这种解释的严格的重述。因此，人们只能在这种语言的适用性方面发生争论。有一些反建议运用了“隐参量”的观念。因为量子论的定律一般只是统计地决定一个实验结果，从经典立场出发，人们会倾向于设想存在某些“隐参量”，它们在任何通常的实验中都观测不到，但它们以正常的因果方式决定着实验的结果。因此，有些论文就试图在量子力学的框架中构成这样的参量。

例如玻姆（Bohm）已沿着这条路线对 Copenhagen 解释提出了反建议。德布罗意也在某种程度上采纳了这种见解。玻姆的解释已经详细地作出。因此，这里可以拿它作为讨论的基础。玻姆把粒子看作是“客观实在的”结构，就象牛顿力学中的质点一样。位形空间中的波在他的解释中也是“客观实在的”，就象电场一样。位形空间是牵涉到属于系统的全部粒子的不同坐标的一个多维空间。这里我们遇到了第一个困难：说位形空间中的波是“实在的”，究竟是什么意协这个空间是一个很抽象的空间。“实在的”一词起源于拉丁字“res”（实体），它的意思是“物”；但物是存在于通常的三维空间中，而不是存在于抽象的位形空间中的。当人们想说位形空间中的波与任何观测者无关时，人们可以说这些波是“客观的”；但人们很难说它们是“实在的”，除非人们甘愿改变这个词的含义。玻姆进一步规定恒波相面的法线是粒子的可能轨道。按照他的想法，这些法线中哪一条是“实在的”轨道取决于系统和测量仪器的历史，并且如果对系统与测量仪器的了解不比实际上能了解的更多的话，“实在的”轨道就无法确定。这种历史实际上包含了隐参量，它就是实验开始以前的“实际”轨道。德斯派格纳（B.d'Espagnat，法国理论物理和哲学家）写道，“爱因斯坦断言：物理学中最基本的东西不是数学，而是基础概念集。。。。。。在我们这一代物理学家中，玻姆显然是第一个用自己的例子来阐明爱因斯坦这一格言的深刻真理的人。许多人（包括我本人）是通过阅读他的 1952 年论文之后从一种‘教条

的昏迷’中觉醒过来的。但玻姆比任何人都更强烈地告诫我们‘不要从一种教条跳进另一教条’。”贝尔(J.S. Bell, 理论物理学家)写道:“对我来说,玻姆 1952 年论量子力学的论文是一部启示录。他消除了非决定论。这是非常引人注目的。但是在我看来,更为重要的是消除了对于将世界暧昧地分成了一方为‘系统’与另一方为‘仪器’或‘观察者’的任何需求。从那时起,我总觉得在对量子力学意义的任何讨论中,那些没有掌握这些论文思想的人(遗憾的是,至今他们仍为多数)是智力不足的。。。。。。我认为,量子理论(具体的是量子场论)的常规解释是非职业地含糊与暧昧。职业理论物理学家应当能够做得更好;玻姆已为我做出了示范。”

如泡利(Pauli)所强调指出的,这种解释的一个结果是:许多原子中的一些基态电子应当是静止的,不环绕原子核作任何轨道运动。这似乎和实验相矛盾,因为对基态中电子速度的测量(例如,用康普顿效应的方法),总是显示出基态中有一个速度分布,它由动量空间或速度空间中的波函数数的平方所给出——这符合于量子力学定则。但是,这里玻姆能够辩解说,这时测量已经不能再用普通定律来估算了。他同意测量的正常估算确实会得出速度分布;但当考虑到关于测量仪器的量子论——特别是由玻姆在这方面引入的某些奇特的量子势时,那么,电子老是“实在地”静止着的陈述是讲得通的。在粒子位置的测量中,玻姆认为实验的通常解释是正确的;而在速度测量中,他拒绝了通常的解释。以此为代价,玻姆认为他自己有权利主张:“我们不必在量子论的领域中放弃单个系统的准确、合理和客观的描述。”然而,这种客观描述本身却象是一种“意识形态的上层建筑”,它与直接的物理实在关系很少;因为如果量子论保持不变的话,玻姆解释中的隐参量就是永远不能在实在过程的描述中出现的那样一种东西。

为了避免这种困难,玻姆实际上表达了这样一个希望:将来在基本粒子的领域的实验中,隐参量可能会起一部分物理作用,而量子论将因此被证明为错误的。在讲到这样一些奇怪的希望时,玻尔常常说它们在结构上就象是这样的一些句子:“我们可以希望以后会证明有时 $2X^2=5$, 因为这对我们的财务大有好处。”实际上玻姆希望的满足,将不仅从下面挖掉量子论的基础,并且也挖掉了玻姆解释的基础。当然,同时也必须强调指出,刚才所说的类比,虽然十分恰当,但并不表示将来象玻姆所建议的那样来改变量子论的论证,在逻辑上也是行不通的。因为这不是根本不可想象的,譬如说,未来数理逻辑的扩展,可能给在特殊情况下 $2X^2=5$ 这样的陈述以某种意义,并且这种扩展了的数学甚至可能在经济领域的计算中得到应用。然而,即使提不出令人信服的逻辑根据,我们实际上仍相信,数学中这样的变化在财务上对我们也毫无帮助。因此,很难理解,玻姆的著作所指出的那些可能实现他的希望的数学倡议如何能够用来描述物理现象。

如果我们不顾量子论的这种可能变化,那么,玻姆的语言,如我们所已指出的,在物理学方面没有谈到任何与 Copenhagen 解释有所不同的东西。于是,留下来的只是这种语言的适用性问题。在谈到粒子轨道时,我们已碰上一一种多余的“意识形态的上层建筑”,除了前面所作的反驳外,这里还必须特别指出,玻姆的语言破坏了量子论中隐含的位置与速度间的对称性;关于位置的测量,玻姆接受了通常的解释,关于速度和动量的测量,他否定了它。因为对称性常常构成一个理论的最主要的特征,所以很难看出,在对应的语言中忽略了它们,能得到些什么。因此,人们不能认为,玻姆对 Copenhagen 解释的反建议是一种进步。

对于玻普(Bopp)和芬尼斯(Fenyés)(沿着稍微不同的路线)所建议的统计解释,能够以稍微不同的形式提出类似的反对意见。玻普认为粒子的产生或湮灭是量子论的基本过程,粒子在词的经典意义上、在唯物主义本体论的意义上是“实在的”,而量子论定律被看作是这样一些产生与湮灭事件的相关统计法的特殊例子。这个解释包含了量子论教学定律的许多有意思的注释,它能够以这样一种状态出现,就是在物理学的结果方面,它能推导出与 Copenhagen 解释完全相同的结论。只要是这样,在实证论的意义上,它和玻姆的解释一样,与 Copenhagen 解释是同型的。但在它的语言中,它破坏了粒子与波之间的对称性,而这种对称性是量子论数学方案的独特的特征。早在 1928 年,约尔丹(Jordan)、克莱因(Klein)、维格纳(Wigner)已经证明,不仅能够把数学方案解释为粒子运动的量子化,而且也能把它解释为三维物质波的量子化,因此,没有理由认为这些物质波要比粒子不实在。只有当对于空间和时间中的物质波建立起对应的相关统计法,并且把究竟是粒子还是波应当被看作是“现实的”实在这个问题搁在一边时,波与粒子之间的对称性在玻普的解释中才能够得到保证。

在唯物主义本体论的意义上认为粒子是实在的这个假设,总是引诱人们认为,根本上,有可能背离测不准原理。例如,芬尼斯说:“测不准原理(他把它和某种统计关系联系起来)的存在,决不意味着以任意准确度同时测定位置和速度是不可能的。”然而,芬尼斯并没有叙述这样的测量在实践上应当如何实现,因此他的考虑仍象是一种抽象的数学。

瓦采耳(Weizel)对 Copenhagen 解释的反建议与玻姆和芬尼斯的反建议是相似的。他将“隐参量”与专门引入的、没有办法观察到的新型粒子“零子”(zeron)联系起来。然而,这样一种概念陷入了一种危险,那就

是实在的粒子和零子间的相互作用会消耗零子场的许多自由度中的能量，以致给整个热力学造成混乱。瓦采耳未曾解释过他希望怎样来避免这种危险。

凡是不满意 Einstein 否定以太、否定绝对空间和绝对时间的人都能发表如下的议论：狭义相对论无法证明绝对空间和绝对时间是不存在的。它只表明了，在任何通常实验中，真正的空间和真正的时间并不直接地出现；但是如果正确地考虑到自然律的这个方面，从而在运动坐标系中引入正确的“表现”时间，那就没有理由反对绝对空间的假设了。甚至假设我们的银河系的重心在绝对空间中是静止的（至少是近似地静止的），也是说得通的。狭义相对论的批评家还可以补充说：我们可以希望未来的测量将允许无歧义地定义绝对空间（即定义相对论的“隐参量”），这样相对论就会被驳倒。

立即可以看出，这种议论不能为实验所驳倒，因为这种议论并没有提出任何不同于狭义相对论的论断。然而，这样一种解释会在所使用的语言上破坏对相对论的具有决定意义的对称性，即洛伦兹不变性，因而必须认为这种解释是不妥当的。

很明显，这与量子论很相类似。量子论的定律是这样的，它使得专门创造的“隐参量”永远不能被观测到。如果我们把这些隐参量作为一种虚构的东西引进量子论的解释，那么，那些有决定意义的对称性也就遭到了破坏。

布洛欣采夫（Blochinzev）和亚历山德罗夫（Alexandrov）的著作在问题的陈述方面与前面讨论过的那些著作完全不同。这两位作者一开始就明确地把他们对 Copenhagen 解释的异议限制在问题的哲学方面。他们无保留地接受了这种解释的物理学。

然而，论战的表面形式却是如此尖锐，布洛欣采夫在他的引言中写道：“在当代物理学的各种唯心主义倾向中，所谓 Copenhagen 学派是最反动的。本文是要尽力揭露这个学派在量子物理学的基本问题上的唯心主义的和不可知论的投机。”论战的辛辣表明我们在这里不仅要和科学打交道，而且还要和信仰的表白打交道，要和某种信条的固守态度打交道。文章的末尾引用了列宁的著作以表明其目的：“不管没有重量的以太变成有重量的物质和有重量的物质变成没有重量的以太，从‘常识’看来是多么稀奇；不管电子除了电磁的质量外就没有任何其他的质量，是多么‘奇怪’，不管力学的运动规律只适用于自然现象的一个领域并且服从于更深刻的电磁现象规律，是多么奇异，等等，——这一切不过是再一次证实了辩证唯物主义。”后面这句话似乎已使得布洛欣采夫关于量子论和辩证唯物主义哲学的关系的讨论减少了意义，因为他已把这一讨论降低成一种戏剧性的审判，而在这个审判中，判决书还在审判开始以前就已经知道了。然而，彻底弄清布洛欣采夫和亚历山德罗夫所发表的论据仍然是重要的。

这里，由于他们的任务是在拯救唯物主义本体论，他们主要反对的是把观察者引入到量子论的解释中来。亚历山德罗夫写道：“因此，我们必须了解，在量子论中，‘测量结果’只是电子和适当客体的相互作用的客观效果。关于观察者的陈述必须加以避免，而我们必须处理的是客观条件和客观效果。一个物理量是现象的一个客观特征，而不只是一种观测结果。”根据亚历山德罗夫的意见，位形空间中的波函数表征了电子的客观状态。

亚历山德罗夫在他的表述中忽略了这样一个事实，即量子论的形式系统不容许有与经典物理学相同的客观化程度。例如，根据量子力学，如果一个系统和测量仪器的相互作用是作为一个整体来处理的，并且如果把两者都看作是和世界的其余部分相隔绝的，那么，量子论的形式系统一般并不能得出肯定的结果；例如，它不能得出照相底片将在一个既定点变黑的结论。如果人们试图拯救亚历山德罗夫的“客观效果”，说照相底片在作用后“确实”在一定点变黑了，那么，答辩是：由电子、测量仪器和照相底片组成的闭合系统的量子力学处理不再适用了。能用日常生活概念描绘的事件的“确实的”特性，在没有进一步说明的情况下，是不包含在量子论的数学形式系统之中的，它是通过引入观察者才在 Copenhagen 解释中出现的。当然，观察者的引入不能误解为暗示要把某种主观特征带进自然的描述之中。说得更恰当一些，观察者只有记录测定结果的功能，即记录空间和时间中的过程的功能，至于观察者是一个仪器还是一个人，那倒没有什么关系。但是，记录，即从“可能”转变到“现实”，在这里是绝对必要的，不能从量子论的解释中略去。在这一点上，就观测的每个动作本质上都是不可逆过程来说，量子论和热力学有内在的联系；只有通过这样的不可逆过程，量子论的形式系统才能和空间和时间中的实际事件前后一致地联系起来。而且，不可逆性——当纳入现象的数学表示时——是观察者对系统的知识不完全所引起的，就这一点而论，它不是完全“客观的”。

量子纠缠态是指多粒子体系不能写成单个粒子态的直积形式的物理状态，它具有的非局域性和测量斩断关联性的特征在量子信息科学里潜在广阔的应用前景。布洛欣采夫对问题作了稍稍不同于亚历山德罗夫的表述：“在量子力学中，我们所描述的不是粒子本身的状态，而是粒子属于这个或那个统计系综的事实。这个从属关系是完全客观的，并且不依赖于观察者所作的陈述。”然而，这种表述会使我们远离——或许太远了

——唯物主义本体论。为了弄清这一点，回忆一下这种对统计系综的从属关系如何应用于经典热力学的解释是有用的。如果一个观察者已经测定了系统的温度，并希望从他的结果得出关于系统中分子运动的结论，他可以说这个系统正好是从一个正则系综取出的一个抽样，因而他可以认为它可能有几个不同的能量。“在现实中”，——在经典物理学中我们可以这样作结论——系统在既定的一个时间只有一个确定的能量，而不可能得到其他值。如果观察者认为在那个时刻可能有不同的能量值，他一定是被欺骗了。正则系综不仅包含了关于系统本身的陈述，而且也包含了观察者对系统的不完全知识。如果布洛欣采夫试图在量子论中把一个系统对一个系综的从属关系说成是“完全客观的”，他所用的“客观的”一词同经典物理学中的意义就有所不同。因为在经典物理学中，如前所述，这个从属关系不仅意味着关于系统本身的陈述，而且也是关于观察者的知识程度的陈述。对于量子论中这个论断必须指出一个例外。如果在量子论中，系综只是由位形空间中的一个波函数来表征（而不是如通常那样由一个矩阵来表征），我们就遇到一种特殊情况（所谓“纯粹情态”），在这种情况下，描述在某种意义上可以称为客观的，并且知识不完全的因素不直接在那里出现。但是因为每种测量（由于它的不可逆特征）重新引入了知识不完全的因素，因而情况仍没有什么根本的不同。

尤其重要的，从这些表述中我们看到，当我们试图把新观念塞进一种属于早期哲学的旧的概念系统——或者，用一句古老的隐喻来说，当我们试图用旧瓶装新酒时——那是多么的困难。这样一些努力永远是令人苦恼的，因为它们将把我们引导到忙于应付旧瓶的接二连三的破裂，而无暇去品味新酒。我们不能期望一世纪以前那些提出辩证唯物主义的思想家会预见到量子论的出现。他们的物质和实在概念不可能适合于今天日益精巧的实验技术的结果。

关于科学家对一种特殊信仰的态度问题。或许人们在这里应当加几句一般性的评论；这种信条可以是宗教的或者政治的信条。宗教信条和政治信条之间的基本区别——后者涉及到我们周围世界的直接的物质实在，而前者以物质世界之外的另一个实在为对象——对于这个特殊问题并不重要；问题是在于信条本身。根据前面所述，人们或许会倾向于要求科学家决不要信赖一种特殊的教义，决不要把他的思想方法局限于一种特殊的哲学。他应当时刻准备着让他的知识基础为新的经验所改变。但这种要求又是我们生活状况的过分简化，其理由有二。第一，我们的思想结构在我们的青年时代就已经由那时我们接触到的观念或者我们求教的重要人物所决定了。这种思想结构将构成我们今后全部工作的中枢部分，并且它会使我们在以后难以适应完全不同的观念。第二个理由是我们属于一个社会或一个集团。这个社会是由共同的思想、共同的伦理标准、或人们谈论一般生活问题的共同语言联系在一起。共同思想可能为教会、政党或国家的权威所支持，即使不是如此，要违背这些共同思想而不与社会相冲突也还是困难的。然而，科学思考的结果可能和某种共同思想相矛盾。当然，一般地要求科学家不应当是他的社会的忠诚的成员，那是不明智的，因为要是那样，他就可能被剥夺掉从他所属的那个社会能够得到的幸福；然而盼望那些从科学观点看来总是简单化了的社会集团的共同思想会随着科学知识的进展而立即改变，同样也是不明智的，因为要是那样，这些共同思想就得象科学理论一样一定必须是可变的。因此，在这一点上，我们在今天甚至又回到了充满整个中世纪后期基督教历史的“双重真理”的老问题。有这样一种很可争论的教义，说什么“真正的宗教——不管它取什么形式——是人民群众不可缺少的需要，而科学人物所寻找的是宗教后面实在的真理，并且只能在那儿寻找这种真理。”它还这样说：“科学是秘传的，它只是为少数人的。”如果在我们的时代，政治学说和社会活动在某些国家中扮演了真正宗教的角色，问题本质上仍然相同。科学家的第一个要求永远是理智的诚实，而社会却常常要求科学家——鉴于科学的可变性——在他公开发表他的反对真正宗教的意见以前，至少得等待二、三十年。关于这个问题，如果单单靠忍耐还不够的话，或许就没有简单的解决办法了；但是，这无疑是属于人类生活的老问题，这个事实可能给我们某种安慰。

现在回到对量子论的 Copenhagen 解释的反建议。我们必须讨论第二派的建议了，这一派的建议试图改变量子论，以便作出不同的哲学解释。在这个方向上，雅诺西（Janossy）作出了最谨慎的尝试，他认识到了量子力学的严格有效性迫使我们背离经典物理学的实在概念。他因此企图把量子力学作这样的改变，使得许多结果仍然保持正确，但它的结构却接近经典物理学。他的着手点是所谓“波包的收缩”，即当观察者去认识测量结果时，波函数，或者更一般地讲，几率函数发生不连续的变化。雅诺西注意到这种收缩不能从数学形式系统的微分方程推导出来，他相信他能从这里作出结论说，在通常的解释中有自相矛盾的地方。如所周知，当从可能到现实的转变完成时，“波包的收缩”总是在 Copenhagen 解释中出现。由于实验得出一个确定的结果，由于实际上发生了一个确定的事件，其可能性的范围扩展得很广的几率函数就立即收缩到很窄的范围。在数学形式系统中，这种收缩要求所谓几率的干涉（这是量子论的最有特征性的现象）会被系统同测量仪器以及世界其余部分之间的部分不确定的和不可逆的相互作用所破坏。雅诺西现在试图在方程中引入所谓阻尼项以改变量子力学，这样，在有限时间以后，干涉项自行消失了。即令这符合于实在——从已完成的实验没

有理由可设想这一点——这样一种解释，正如雅诺西本人所指出的，仍然有若干惊人的后果（例如，会有比光速传播得更快的波，原因和结果的时间次序颠倒过来，等等）。因此，我们很难为了这种观点而甘愿牺牲量子论的简明性，除非实验迫使我们不得不这样做。

在有时被称为量子论的“正统”解释的其余反对者中，薛定谔采取了一种特殊立场，他把“客观实在性”归属于波而不归属于粒子，并且不准备把波仅仅解释为“几率波”。在他的题为《有量子跳变吗？》一文中，他还试图完全否定量子跳变的存在（人们可能会怀疑“量子跳变”一词在这儿是否适用，并且或许能用比较不刺激人的“不连续性”一词来代替它）。现在，薛定谔的工作首先包含了对通常解释的某种误解。他忽略了这样一个事实，就是只有位形空间中的波（或者说“变换矩阵”）是通常解释中的几率波，而三维物质波或辐射波却不是几率波。后者具有和粒子一模一样、不多不少的“实在性”；它们与几率波没有直接的联系，但却有连续的能量和动量密度，就象麦克斯韦理论中的电磁场一样。薛定谔因此正确地强调指出，在这一点上，可以设想这些过程是比它们通常的情况更为连续。但这种解释不能消除原子物理学中到处可以发现的不连续因素；任何闪烁屏或盖革计数器都会立刻显示出这种因素。在通常的量子论解释中，它包含在从可能到现实的转变中。薛定谔本人对于他究竟打算怎样以不同于通常解释的方式引入这种到处可以观察到的不连续因素，没有作出任何反建议。

最后，发表于几篇论文中的 Einstein、劳埃和其他人的批评，集中于 Copenhagen 解释是否允许对物理事实作出唯一的、客观的描述的问题。他们的主要论据可以叙述如下：量子论的数学方案好象是对原子现象的统计法的一种完全适当的描述。但即使这种解释关于原子事件的几率的陈述是完全正确的，它也没有描述那些独立于观测之外的、或者在两次观测之间实际发生的事情。但必定发生了某种事情，对此我们不能有所怀疑；这种事情不一定需要用电子或波或光子等术语来描述，但必须以某种方式描述它，否则物理学的任务就没有完成。不能承认物理学只和观测的动作有关。物理学家在他的科学中必须假设，他正在研究的是一个不是由他自己创造的世界，要是他不在，这个世界还是存在着，本质上也没有改变。因此，Copenhagen 解释对原子现象没有提供出真实的理解。爱因斯坦说：“我对统计性量子理论的反感，不是针对它的定量的内容，而是针对人们现在认为这样处理物理学基础在本质上已是最后方式的这种信仰”……“EPR 悖论”论证了在对体系 I 的测量不干扰体系 II 的情况下，不能同时确切测量的两个量，能同时具有确定的值，因此量子力学是不完备的，粒子的本性并非不确定的。爱因斯坦还论证了量子力学存在如下悖论：两个相互作用后在空间分离开来已不再互相影响的量子系统，对其中一个的测量将会影响到另一个的状态。他敏锐地指出，这是由于某些尚未发现的因素即“隐变量”引起的。否则“要么量子力学是不完备的，要么存在超距作用”。

很易看出，这种批评所要求的还是老的唯物主义本体论。但是，从 Copenhagen 解释的观点看来，能够作出什么样的答复呢？

我们可以说，物理学是科学的一部分，并且以描述和理解自然为目的。无论哪一种理解，无论是科学的还是非科学的理解，都依赖于我们的语言，依赖于思想的交流。对于现象、实验及其结果的任何描述，都靠语言作为唯一的传达信息的工具。这种语言的词代表了日常生活的概念，在物理学的科学语言中，可把它们提炼为经典物理学的概念。这些概念是无歧义地报道事件、实验部署及其结果的唯一工具。因此，如果要求原子物理学家对他的实验中真实地发生的事情作出描述，那么，“描述”、“真实地”和“发生”等词只能和日常生活或经典物理学的概念有关。一旦物理学家放弃了这个基地，他就会丧失无歧义的传达信息的方法，并且不能继续他的科学工作。因此，关于“实际发生”的事情的任何陈述都是使用经典概念来表达的陈述，并且，由于热力学和测不准关系，在涉及原子事件的细节方面，这样的陈述在本质上是不完备的。要求对两次相继观测之间的量子论过程中“所发生的事情”进行“描述”，那是自相矛盾的，因为“描述”一词涉及经典概念的使用，而这些概念不能应用在两次观测之间的间隙，而只能应用于观测的那个时刻。

应当注意，在这一点上，量子论的 Copenhagen 解释决不是实证论的。因为实证论所根据的是观察者的感官知觉，以此作为实在的要素，而 Copenhagen 解释却把可以用经典概念描述的（即实际的）事物和过程看作是哪任何物理解释的基础。

同时，我们看到，微观物理学定律的统计本质是不能避免的，因为关于“实际事物”的任何知识——根据量子论的定律——在其真正的本质上都是不完备的知识。唯物主义的本体论所根据的是这样一种幻想，即以为我们周围世界的直接的“现实”这种存在，也能够外推到原子领域中。

所有这些建议都已发现它们自己不得不牺牲量子论的必不可少的对称性（例如，波和粒子之间的对称性，位置和速度之间的对称性）。因此，如果这些对称性——就象相对论中的洛伦兹不变性一样——仍要被认为是自然的真正特征，那么，我们完全可以设想，Copenhagen 解释是无法回避的。每一个已作出的实验都支持这种观点。

狄拉克是哥本哈根学派的核心人物之一，但狄拉克对非决定论就非常不满意。狄拉克相信，量子力学的现有诠释不是最后的形式，总有一天，人们会回到爱因斯坦提倡的决定论。为了坚持实在论解释，冯·诺依曼建立了量子力学公理化形式体系，提出了波函数的态解释。他认为，波函数不只是量子算法系统的抽象函数，而是完全描述原子客体的状态函数。状态函数可看做希尔伯特空间的一个矢量，人们常称此为量子力学的一种几何化方法。冯·诺依曼的观点为大多数物理学家所采纳，直接将波函数称为量子系统的态函数^[2]，称量子系统的希尔伯特空间为态空间。如果把波函数视为态函数，量子系统就有两种不同的演化方式：

1. 在非测量过程中，态函数按薛定谔方程正常演化（态矢作幺正变换）；
2. 在测量过程中，态函数发生突变，即发生所谓波函数坍缩（态矢作非幺正变换）。

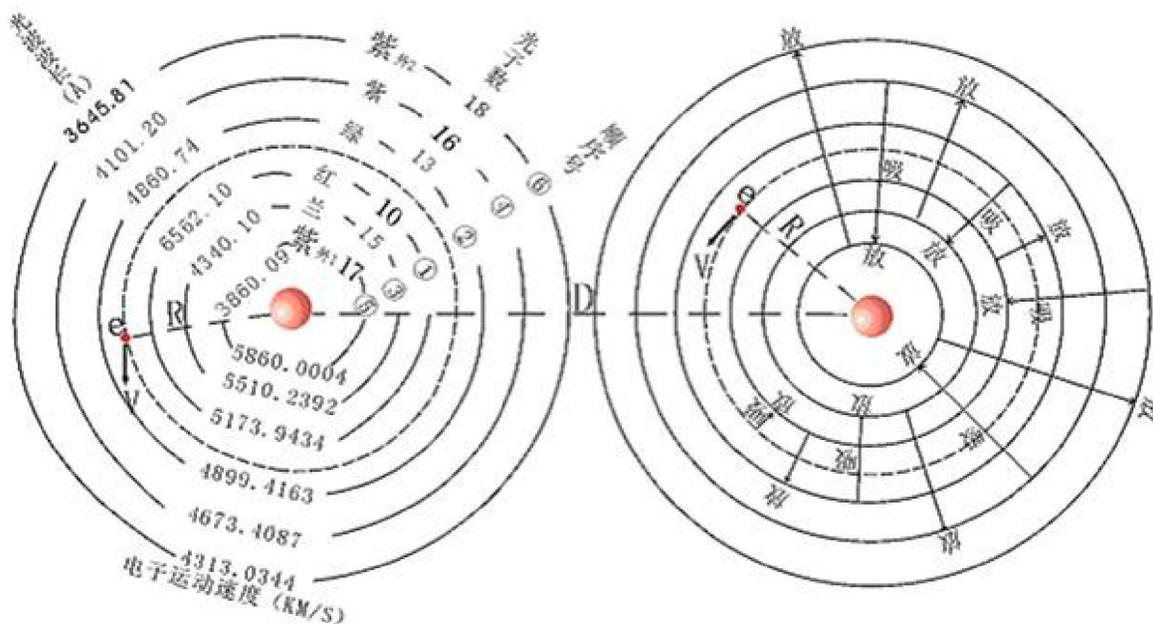
波函数坍缩带来了巨大的认识困难。首先，它除了需要无限长的仪器链之外，还需要人的思维或上帝的介入。这为大多数物理学家难以接受；其次，波函数突变坍缩，预示着一种超光速通讯存在，这为相对论所不容。为了解决冯氏理论带来的两大疑难，物理学家和物理学哲学家，仍在进行大量的艰苦探索。量子退相干解释就是新近的一种重要发展。

量子退相干解释承认量子理论的普适性，认为宏观客体乃至整个宇宙均可表述成符合薛定谔方程演化规律的纯态波函数。但宏观客体可以自动退相干。在微观被测系统与宏观仪器组成的总系统中，由于量子纠缠的存在和仪器的自动退相干，从仪器的状态就可以“读出”被测系统的状态。量子测量中，是仪器带着被测系统完成了退相干，实现了纯态到混合态的转化。

冯·诺依曼量子测量理论，承认波函数是对微观客体状态的描述，看来解决了波函数只有客观性而无实在性问题，但却没有解决微观客体的“不确定性”问题，也没有解决双缝实验中一个粒子如何同时通过双缝的问题。就我看，哥本哈根学派对量子力学的解释仍然留有許多讨论的余地。1. 微观客体是否真的可抽象成一个宏观的质点？而这是哥本哈根学派的一个肯定认识。2. 波函数描述了微观客体的状态，这个状态与微观客体本体论特征有何联系？3. 量子纠缠是相互作用的纠缠，还是几率的纠缠？亦或是空间的纠缠？4. 微观客体真的具有“天生的”不确定性？

9、Copenhagen 学派与实验事实之间的矛盾

1 氢原子内电子运动瞬时速度和轨道半径的实测结果：本实测结果是利用中华人民共和国国家知识产权局已授权的发明专利——原子内电子运动瞬时速度和轨道半径测量方法及其测量设备测得的结果。发明专利号：ZL00105041.9，发明人：冯劲松。氢光谱巴耳末线系（主线系）表1，图1。



氢分子结构示意图图 1

氢光谱巴耳末线系（主线系）表 1

实测波长(Å)	6562.10	4860.74	4340.10	4101.10	3860.09	3645.81
光子个数(个)	10	13	15	16	17	18
电子运动速度 (千米/秒)	5173.9740	4899.4164	5510.2393	4673.4087	5860.4100	4313.0330
电子轨道半径 10^{-12} (米)	9.464	10.554	8.344	11.600	7.377	13.620
电子位置序号	③	④	②	⑤	①	⑥

氢光谱赖曼线系 表 2

	实测波长数 入 _实 (Å)	实测里德伯常 $R_{实} \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	电子位置 序号	电子运动瞬时速度 $V_{实}$ 千米/秒	电子轨道半径 10^{-12} 米
1	1215.66	1.096797899	5	9706.004497	2.693123115
2	1025.83	1.096672938	1	10708.0992	2.212396330
3	972.54	1.096784365	4	9819482309	2.631204727
4	949.76	1.096768306	2	9952.451231	2.561328899
5	937.82	1.096768493	3	9950.913102	2.562121215

氢光谱帕邢线系 表 3

	实测波长数 入 _实 (Å)	实测里德伯常 $R_{实} \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	电子位置 序号	电子运动瞬时速度 $V_{实}$ 千米/秒	电子轨道半径 10^{-12} 米
1	18751.1	1.0970784595	3	6947.142015	5.258185740
2	12818.1	1.097081471	4	6911.978019	5.311837217
3	10938.0	1.097092704	5	6777.605847	5.524605652
4	10049.8	1.097036757	1	742.772429	4.605740461
5	9546.2	1.097057182	2	7193.492410	4.903487815

根据以上实测结果与过去用其它物理测量方法实测的氢原子核间距离的一半 32×10^{-12} 米进行比较分析, 可以断定, 根据本发明实测的有关元素原子内电子的运动瞬时速度和轨道半径是完全精确的。这标志着 Einstein 与玻尔关于对“测不准原理”长期争论的结束, Einstein 的决定论观点取得了根本性的胜利。

2、氢离子内电子的运动瞬时速度及轨道半径实测值: 本实测结果是利用中华人民共和国国家知识产权局已授权的发明专利——原子内电子运动瞬时速度和轨道半径测量方法及其测量设备测得的结果。发明专利号: ZL00105041.9, 发明人: 冯劲松。见表 4。

表 4

	实测波长数 入 _实 (Å)	实测里德伯常 $R_{实} \times 10^5 \text{cm}^{-1}$	电子位置 序号	电子运动瞬时速度 $V_{实}$ 千米/秒	电子轨道半径 10^{-12} 米
1	6567.20	1.096357656	11	12894.4400	3.045107379
2	5417.80	1.096274122	10	13414.0366	2.813555704
3	4831.50		13		
4	4546.30	1.096411452	12	12548.4132	3.215520410
5	4353.70	1.093760425	6	24306.3567	0.8549442599
6	4229.50	1.089850765	2	35042.2147	0.4098635245
7	4111.60	1.094464442	7	21813.3631	1.062213284

8	4040.90	1.093395198	4	25503.2681	0.7763200784
9	3983.50	1.093399160	5	25490.5876	0.7770954599
10	3947.80	1.090789831	3	32789.1033	0.46852992
11	3890.40	1.096716704	14	10368.1678	4.711354170
12	3868.90	1.094479628	8	21756.4221	1.067795434
13	3844.30	1.094553549	9	21477.0825	1.095826433
:	:	:	:	:	:
	3686.20	1.085128316	1	44660.1901	0.2512437639

3 氦原子内外层电子的运动瞬时速度及轨道半径实测值：用氦离子相同方法和设备测得的结果，见表 5。

光谱位置 序号 (n)	实测波长 入 _实 (Å)	实测里德伯常数 R _实 ×10 ⁵ cm ⁻¹	电子位 置序号	电子运动瞬时速度 V _实 千米/秒	电子轨道半径 R ×10 ⁻¹⁴ 米
1	7065.2	1.019079432	10	111207.5236	3.805392359
2	6678.1	0.889383798	1	175614.0727	1.331759836
3	5875.6	0.907708716	2	168471.0957	1.476899808
4	5047.7	0.987502305	8	130751.8099	2.667460695
5	5015.7	0.949399837	4	150346.3683	1.939628685
6	4921.9	0.936533414	3	156253.0763	1.771419631
7	4713.1	0.954785598	5	147778.9885	2.018997632
8	4471.5	0.988102573	9	130412.9162	2.682972039
9	4437.5	0.981533646	7	134064.0299	2.521947147
10	4387.9	0.981385195	6	134145.1157	2.518518251
11	4143.8	1.029650723	12	103685.7064	4.422903627
12	4120.8	1.027575285	11	105211.1375	4.286921662
13	4026.2	1.045102630	13	91422.4485	5.774422712
14	3964.7	1.055693305	14	81838.6149	7.279081061
15	3888.6	1.071508169	15	64705.4062	11.81869921

4、《自然》杂志最近报道，现在卡尔-赫斯和沃尔特-菲力浦提供了有力的证据证明 Einstein 的怀疑是正确的——在量子理论背后的确有另一套规律在起作用。在 1935 年，Einstein 与另外两个物理学家一起做了一个“思想实验”，通过这次试验他们发现，根据量子理论可以推导出一种奇怪的长距离作用——对于一个粒子的测量会影响到另外一个粒子，不论它们的距离有多远。由于这一奇怪的现象，Einstein 认为有更为基本的理论隐藏于量子力学背后。他提出了“隐藏变量”——那些可以改变量子的不确定性的量，但是这些量是不能被直接测量的。科学家现在发现，如果“隐藏变量”有随时间变化的性质而且相互关联，Einstein 的怀疑就是正确的。例如伦敦的钟表和纽约的钟表会同时旋转，并不相互影响，但是它们所显示的时间确实是相互关联的。

1997 年，由日内瓦大学 Nicolas Gisin 所领导的研究人员证明被扰乱的成对光子，即使经由光纤网路送到相距 10 公里外村庄中的两组侦测器中，仍会互相影响，他们目前已证明相距如此遥远的光已违反贝尔不等式至少九个标准误差 (9σ)？1998 年十月，在巴尔的摩所举行的美国光学协会会议中，Los Alamos 美国国家实验室的 Paul Kwiat 和他的同事们宣称他们已建立一个混乱光子对的超亮光源；藉着这个装置，在少于三分钟的时间内，他们得到一个违反贝尔不等式 242 个标准误差 (242σ) 的结果。同时，由 Anton Zeilinger 所领导的一个因斯布鲁克大学的研究组将侦测器相距 400 公尺远，且任意转换侦测器的速度快到侦测器间不可能以光速传讯（去掉因位置关系所产生的漏洞），此研究群得到 30 个标准误差 (30σ)。【2】

广义上说，量子计量是利用各种量子资源或者量子效应，实现对某些物理量超越经典的精密测量。一方面，阿罗什和瓦恩兰的实验发展了许多单粒子操控和测量的技术，这些技术直接会应用到精密光谱、灵敏检测和分析中。比如，对离子的控制在精密光谱，特别是光频率标准方面取得了巨大成功。霍尔 (J. Hall)

和亨施 (T.W. Hänsch) (二人与格劳伯一起获 2005 年度诺贝尔物理奖) 在这方面做出了卓越的工作。瓦恩兰小组利用冷却的铝离子, 得到了世界上最精确 (不确定度为 8.6×10^{-18}) 的钟。另一方面, 或许更重要的是, 在他们的实验中产生了大量的量子资源, 包括量子纠缠态、福克态等, 这些量子资源被证明在突破经典极限的测量中具有巨大的潜力。

阿罗什和瓦恩兰两个人都在各自的研究系统中奋斗了数十年。阿罗什用原子来研究光子, 而瓦恩兰用光子来研究原子。二者都是在单量子系统上为人们展示了量子世界丰富多彩的一面。他们当然不是在孤立地开展研究工作, 有相当一批人与他们在同时工作。比如在腔 QED 方面, 加州理工学院的金布尔 (H. J. Kimble) 小组、德国马普所的伦珀 (G. Rempe) 小组把微波与里德伯原子的耦合发展到光频区, 在常温下实现了光子与微光学腔的强耦合, 并完成了一系列精彩的实验。离子操控方面也有包括因斯布鲁克大学的布拉特 (R. Blatt) 小组, 哈佛大学的加布里埃尔斯 (G. Gabrielse) 小组等开展了卓有成效的研究。还有一些人把量子光学的系统和方法推广到其他类似的系统中, 在不同能量和时空尺度下发展了量子光学的许多方法和实验技术。

Planck 讲: “科学家全部活动的支柱是他们对世界图景的实在性深信不疑。由于这样一种无可怀疑的事实, 就很难不担心: 如果 Mach 的思维经济原理真的成为认识论的中心的话。。。。。。科学的发展就要受到致命的阻碍。” Roger Penrose 认为, 量子力学中两个基本过程 U 和 R 的非一致性 (U 服从完全决定性的方程, 而 R 为随机的态矢量缩减, 只要人们认为进行了一次“观测”, 则必须经历这样一个过程)。它只有在某种激进的新理论的框架中才能被解决, 而这两种过程 U 和 R 被认为是对于包容更广的、更精确的单独过程的不同 (而且非常优越的) 近似。其改变的性质的强烈暗示必须来自广义相对论。

人择原理可以释义作: “我们看到的宇宙之所以这样, 乃是因为我们的存在。”从相对论和量子力学基础上提出的人择原理也是实证哲学观的体现。实证哲学从形而上学出发, 但最终导致走向唯心主义的泥坑。从 space-time 的相对性与绝对性原理可知, 波粒二象性、量子力学中两个基本过程 U 和 R 的非一致性是绝对 space-time 与相对 space-time 共同作用的结果, 迄今为止场论还不能为物质的分子结构和量子现象提供解释。参考文献:

【1】Einstein 和英费尔德著 周肇威译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962 年。

【2】(W. Tittle et al., Phys. Rev. Lett. 81, 3563, 1998. P. G. Kwiat et al. G. Weihs et al., Phys. Rev. Lett., in press)。摘自 Physics Today 12 月号 1998 P。

第三章 爱因斯坦对于量子力学基础的批判

爱因斯坦和他的支持者, 认为有三大理论原则必须同时遵守, 即: (1) 是决定论的; (2) 是定域的; (3) 是实在的。三者缺一不可。决定论的 (也可以认为是因果论), 也就是说, 给定理论所需要的所有初始条件, 系统在将来任何一个时间的状态, 都可以被准确的预言; 定域的, 意味着发生在某个时空点的事件不能被相距类空间隔的另一个事件所影响, 也就是说信息传播的速度不能超过光速; 实在的, 意味着我们可以把一个系统孤立起来, 这个系统的状态只能由系统本身和周围类时间隔内的其他系统来决定。因为这三大理论原则是建立相对论理论的基础, 所以, 也可以说, 这也就是相对论理论的基本原则, 如果有实验证明这些原则不正确, 则意味着相对论理论有问题。

1、爱因斯坦的实在论

实在主义者 (1916 年——1955 年), Einstein 讲: “当我是一个学生的时候, 这本书正是在这方面给了我深刻的影响。我认为, Mach 的真正伟大, 就在于他的坚不可摧的怀疑态度和独立性; 在我年轻的时候, Mach 的认识论观点对我也有过很大的影响, 但是, 这种观点今天在我看来是根本站不住脚的。”在与马赫偏离和决裂的一段时间内, 爱因斯坦还在继续追求许多逻辑实证论者仍能接受的现象论的一种比较精致的形式。渐渐地, 他对马赫的哲学基础看得越来越清楚了, 并且有意识地把它颠倒过来。例如他批评马赫“不仅把感觉作为必须研究的惟一材料, 而且把感觉本身当作建造实在世界的砖块”的感觉论的或反实在论的立场; 批评马赫否认科学理论的“思辨性”、否认概念形成中“自由构造的元素”的实证论的或反形而上学的立场。这促使爱因斯坦把经验在科学中的地位加以限制, 并选取了一条理性论的实在论哲学。

在不知道玻耳兹曼和吉布斯 (W. GIBBS) 的已经发表而且事实上已经把问题彻底解决了的早期研究工作的情况下, 我发展了统计力学, 以及以此为基础的热力学的分子运动论。在这里, 我的主要目的是要找到一些事实, 尽可能地确证那些有确定的有限大小的原子的存在。……这些考察同经验的一致, 以及普朗克根据辐射定律 (对于高温) 对分子的真实大小、的测定, 使当时许多怀疑论者 (奥斯特瓦尔德 (W. Ostwald)、Mach) 相信了原子的实在性。这些学者之所以厌恶原子论, 无疑可以溯源于他们的实证论的哲学观点。这是一个有趣的例子, 它表明即使是有勇敢精神和敏锐本能的学者, 也可以因为哲学上的偏见而妨碍他们对事实作出正确

解释。相对论理论的另一个要点是它在认识论方面的观点。物理学中没有任何概念是先验地必然的，或者是先验地正确的。唯一地决定一个概念的“生存权”的，是它同物理事件(实验)是否有清晰的和单一而无歧义的联系。因此，一些旧概念，象绝对同时性、绝对速度、绝对加速度等等，在相对论中都被抛弃了，因为它们同实验之间不可能有单一而无歧义的联系。回到相对论的本身上来，我急于要请大家注意到这样的事实：这理论并不是起源于思辨；它的创建完全由于想要使物理理论尽可能适应于观察到的事实。我们在这里并没有革命行动，而不过是一条可回溯几世纪的路线的自然继续。要放弃某些迄今被认为是基本的，同空间、时间和运动有关的观念，决不可认为是随意的，而只能认为是由观察到的事实所决定的。

经验在物理理论结构中的作用，归根结底不是通过经验的“原子”，不是通过个别感觉或原始命题，而是通过对整个物理经验的某种创造性的融合或综合。“从逻辑的观点来看，相对论同 Mach 的理论之间似乎没有很大的关系。在 Mach 看来，要把两个方面的东西加以区别：一方面是经验的直接材料，这是我们不能触犯的；另一方面是概念，这却是我们能加以改变的。Mach 的体系所研究的是经验材料之间存在着的关系；在马赫看来，科学就是这些关系的总和。这种观点是错误的，事实上，Mach 所做的是在编目录，而不是建立体系。Mach 可算是一位高明的力学家，但却是一位拙劣的哲学家。他认为科学所处理的是直接材料，这种科学观使他不承认原子的存在。要是他还同我们在一起的话，他或许也会改变他的看法。但是我要说，对于另外一点，即概念是可改变的这一观点，我倒是完全同意 Mach 的。”换句话说，Mach 多少有点忽略了这样的事实：这个世界实际上是存在的，我们的感觉印象是以客观事物为基础的。“Galileo 的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。这个发现告诉我们，根据直接的观察所得出的直觉的结论不是常常可靠的，因为它们有时会引到错误的线索上去。人的思维创造出一直在改变的一个宇宙图景。Galileo 对科学的贡献就在于毁灭直觉的观点而用新的观点来代替它。这就是 Galileo 发现的重大意义。”【2】“在一个现代物理学家看来，电磁场正和他所坐的椅子一样地实在”。“记住人们已经实际观测到的东西，是很有启发的。但从原则上说，想只用可观测量去建立一个理论是完全错误的。在现实中发生的是相反情况：正是理论决定所能观测到的东西”。“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础。”“对科学的期望，我们已渐渐走向两极；你相信掷骰子的上帝，我则相信作为实体而存在的物质世界具有完美的规律，我力图用一种原始的揣测方式去领悟它。出现在量子力学基本规律的量不能指望描述物理实在本身，它们描述的只是物理实在显现的几率。”“因此，在某种意义上，正如古人所同意的那样，纯粹的思维能够把握实在，这是正确的。【1】”“理论物理学的实验基础不能从经验抽出而必须通过自由创造。【1】”“经验可以提供近似的数学概念，但这些概念当然不能从经验中推导出来。

【1】”“量子力学是令人印象深刻的。但是一个来自内部的声音告诉我，它还不是事物的真谛所在。该理论虽然富有成果，但是却几乎没有在接近古老的神秘方面使我们向前迈出一步。无论如何，我坚信：上帝不玩骰子。”他相信并努力探索物质世界的统一性，以及作为这种统一性的表现(反映的逻辑简单性或数学简单性)。

爱因斯坦说：“我相信在宇宙的有秩序的和谐中显露他自己的上帝。我相信理智在整个自然中处处展示出来。科学工作的基础是下述信念：世界是一个有秩序的和可以理解的实体，而不是偶然性的事物。”但是，爱因斯坦的实在论并没有停留在科学信念和科学预设的表层上，是从更深的层次对其加以阐释：“‘实在’决不是直接给予我们的，给予我们的只不过是我们的知觉材料，而其中只有那些容许用无歧义的语言来表述的材料才构成科学的原料。从知觉材料到达‘实在’，到达理智，只有一条途径，那就是有意识的或无意识的理智构造的途径，它完全是自由地和任意地进行的。……人们有被如下幻觉引入歧途的危险，那就是以为我们日常经验的‘实在’是‘真正存在的’，而物理学的某些概念只是‘单纯的观念’，它们同‘实在’之间被一条不可逾越的鸿沟隔开。但是事实上，断定‘实在’是独立于我们的感觉而存在的，这是理智构造的结果。我们恰巧相信这种构造，要超过用我们的感觉所做成那些解释。”爱因斯坦所言：“相信有一个离开知觉主体而独立的外在世界，是一切自然科学的基础。”这其中包含着两个基本点：①外部世界的性质独立于我们的观察，独立于其他的客体和环境，是可分离的；②外部世界的信息可以不失真地传达到认识者，在被观察时和未被观察时遵循同样的规律，认识的最终目的就是要达到客观实在本来面目的认识。

根据相对论，只有可以观测的东西才可以搬到物理学中来，从基本上无所谓尺，也没有普通测量，整个物理学不应当从 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ 出发，因为它不是最基本的。杨振宁(C.N. Yang)认为这个看法并不总是对的，把它看得太神圣了不好。Einstein认为，如果韦耳的不可积标度因子的想法是正确的话，则可取两个钟，且从同一点O出发，让它们分别沿不同的路径回到同一点O，那么它们的标度将会连续地变化。因此在它们回到O点时，由于它们经历了不同的历史，一般来说，它们将会有不同的大小，所以这两个钟的快慢将会是不同的。因此钟对时间的测量要依赖于它的历史，每个人都将有他自己的定律，就没有物理而言，而且将有

种种混乱。Einstein晚年工作的全部要点，在于不同的观察者应该感受到同样的物理实在的结构，从中总结出不因而异的真理。相对论天空存在着“两朵乌云”，这是Einstein发现的：第一朵乌云：在狭义相对论中，Einstein采用了“欧氏几何对于确定绝对刚体的空间位置是正确的”这个假设，并采用了惯性系和惯性定律，从而给出力学相对性原理。因此在力学相对原理的推论中起着基本作用的是绝对刚体的概念。1923年，Einstein提交哥德堡北欧自然科学家会议的报告中又意识到这种做法有着缺欠，而且这个缺欠存在于整个相对论中。是的，把全部的物理学研究建立在绝对刚体的概念上，然后又用基本的物理定律在原子论上再重新建立刚体的概念，而基本的物理定律又是用刚体的概念建立起来的，这在逻辑上是不正确的。同时他也承认，“由于我们还没有充分认识大自然的基本规律，以致不能够提出一个更为完善的方法来解脱我们的困境”。可惜的是，一直到他去世也没有找到解脱这个困境的办法。这个问题就这样挂起来了，而且一挂就是近百年。第二朵乌云：在狭义相对论中，任何事物都随观察者的不同而不同。它还包含下面两层意思：一个是每个观察者的结论都只承认自己的结论正确，其他观察者的结论不正确；另一个是所有观察者都对。想在两个观察者中决定谁是正确的，既没有经验上的方法，也没有理论上的方法。这就是相对论的相对性。很明显，这个观点与经典天体力学中的观念相矛盾。

从总体上看，爱因斯坦是一位实在论者。爱因斯坦所论及的实在概念主要包含两个方面的内容，即本体论意义上的实在和科学理论意义上的实在。如，他在与英费尔德合写的《物理学的进化》中说：“我们企图理解实在，多少有些像一个人想知道一个合上了表壳的表的内部机构。”这里的“实在”就是本体论意义上的实在。但是，爱因斯坦认为，我们不能从逻辑上证明外在世界的存在，因此他从科学研究基础和动力的意义上去认识这种本体论意义上的实在，把实在看作潜在于科学研究者的科学活动之中的强烈而又神秘的推动力。对于科学理论意义上的实在，爱因斯坦认为这种实在概念随着科学的发展而发展变化。他认为，牛顿体系中的物理实在是由空间、时间、质点和力等概念来表示的，质点是表示实在的唯一形式。在麦克斯韦以后，物理实在是由连续的场来代表的，它服从偏微分方程。在爱因斯坦看来，从牛顿到麦克斯韦的实在概念的变革，是物理学自牛顿以来的一次最深刻和最富有成效的变革，但同时这种变革不是最终的，实在的概念会随着科学的发展而发展。

对于理论与实在的关系问题，爱因斯坦并不十分注重理论与实在的简单对应关系，而是更偏重于理论体系的简单性与逻辑完备性。他认为，命题如果是在某一逻辑体系里按照公认的逻辑规则推导出来的，它就是正确的。例如，早在广义相对论被证实的五年前，爱因斯坦就对广义相对论表示“非常满意”，他说：“不管对日蚀的观测成功与否，我对于整个体系的正确性已经不再怀疑。这件事的道理太明显了。”关于科学目的和科学进步的实在论思想科学实在论认为，科学的目的在于追求真理，科学理论描绘的是世界的真实图像。著名的反实在论者范弗拉森简要地概括了实在论者的这一基本主张（他把这视为任何科学实在论者都能接受的定义）：“科学以其理论给我们一种字面上为真的关于世界是什么样子的描述，接受一个理论包含着它为真的信念。”加德纳把这种形式的实在论立场命名为意图实在论(purpose-realism)，爱因斯坦对科学目的的看法就大体持这种立场。爱因斯坦不赞成实证论的科学观，即科学的唯一目的是建立各种经验事实的联系。按照爱因斯坦的观点，科学的目的是双重的，一方面是尽可能完备地理解全部感觉经验之间的关系，另一方面是通过最少个数的基本概念和基本原理的使用建立起完整的理论体系(在世界图像中尽可能地寻求逻辑的统一)。也就是说，科学的目的“在于使我们的经验相互协调，并且把它纳入一个逻辑体系”；或者说“把我们杂乱无章的感觉经验同一种逻辑上贯彻一致的思想体系对应起来”。这种理论体系是想以最适当的方式勾画出一幅简化的和易领悟的世界图像，它近似地描述了自然过程的真实状况。在这里，爱因斯坦对于科学目的的看法是与他的物理实在观相通的。下面两句简短的言论进一步说明了这一事实：“物理学是从概念上把握实在的一种努力”“通过构思过程后验地来重建存在”。爱因斯坦坚定地认为，追求真理——或者比较谨慎地说，我们通过构造性的逻辑思维去理解可认识的宇宙的努力——应该成为我们工作的独立的目标。要是没有这个目标，一个有思想的人对待生活就不会有积极的态度。像任何一个实在论者一样，爱因斯坦坚持科学进步的观点。而且，他把直到量子力学之前的科学进步看作是实在论纲领的凯旋。这种凯旋并不是科学理论“相继地趋近于实在”，而是科学理论的本体论随时间的推移而发生根本性的转移(请回忆前面关于实在概念的变化的论述)。在爱因斯坦看来，当科学沿着已经开辟的思想路线前进时，科学的发展是自然进化的，当实验事实与已有的理论发生剧烈的冲突时，尤其是当不同的理论体系之间出现严重的不协调时，科学就陷入危机之中，从而引发革命；不过，这种革命并没有中断科学的继承性，它不过是迈向新的统一性的阶梯，达到了更高的逻辑简单性；因此，原来的理论的真理内容并不会消失，它只不过是融入具有更大统一性和更少逻辑基础概念的体系之中。爱因斯坦的这些观点有点接近博伊德(N. Boyd)的辩证实在论(dialectical realism)。

“Einstein 自从量子力学革新了物理学中的思想方法以后，到他逝世为止，一直想要保持经典天体力学中的观念，即一个系统的客观物理状态必须跟观察它的方式完全无关。虽然 Einstein 坦白地承认，他对这方面达成一个完整的解答的希望到目前为止尚远未满足，而且他还没有证明这一观点的可能性，他认为这是一个有待解决的问题。”【5】Einstein 对此指出，作为整个物理学体系之基础的概念和基本原理“都是人类理智的自由发明”，具有“纯粹虚构的特征”。这种特征即使是在牛顿力学那儿也是有的。【4】恩格斯也说，如果人们不发挥思维的创造性，进行大胆的思辨，而去“等待建立起定律的材料纯粹化起来，那么这就是在此以前把运用思维的研究停顿下来，而定律也就因此永远不会出现。”【3】1929年4月24日，纽约犹太教堂牧师戈尔茨坦(H. Goldstein)从纽约发了一个仅有五个英文字的海底电报到柏林，询问爱因斯坦“你信仰上帝吗？”并要求他也用电报回答。爱因斯坦当日就发了回电：“我信仰斯宾诺莎的那个在事物的有秩序的和谐中显示出来的上帝，而不信仰那个同人类的命运行为有牵累的上帝。”爱因斯坦说：“在我们这种新的物理学中，不容许有场和实物两种实在，因而场是唯一的实在。”《物理学的进化》第156页。爱因斯坦从实在论出发对海森堡的实证主义进行批评时说：“难道你是认真地相信只有可观测量才应当进入物理理论吗？”海森堡对此大吃一惊，说：“你处理相对论不正是这样的吗？”“你毕竟还曾强调过这一事实，说绝对时间是不许可的，仅仅因为绝对时间是不能被观察的；而只在运动的参照系中存在的时钟读数才同时间的确定有关。”爱因斯坦对这个诘问的回答是令人难以置信的，他竟然说出了这样的话：“可能，我是用过这种推理。但是这仍然是毫无意义的。一个人把实际观察到的东西记在心中，会有启发性帮助的。我这样说也许能够更加灵活地解释它。但是，在原则上，试图单靠可观察量建立理论，那是完全错误的。实际上恰恰相反，是理论决定我们观察到的东西。

由于所有负能态被填满的状态相当于真空，负能态上因跑掉一个电子而留着的空穴就 相当于出现了一个正能粒子，因此自然界只存在两种 electric charge。微观粒子的运动和宏观质点一样，在每个时刻都有确定的位置、速度、加速度。出现在量子力学基本规律的量不能指望描述物理实在本身，它们描述的只是物理实在显现的几率【5】。根据测不准关系，物理实在（绝对 space-time）永远测不到，因此二十世纪 Einstein 与 Copenhagen 学派之间的论争可以告一段落。现代量子力学除了对于定域性和测量问题进行争论外，量子现象的一些新领域仍然要进行探索和理解，例如量子传态(quantum teleportation)，量子计算，包括玻色——Einstein 凝聚在内的宏观量子系统，多粒子纠缠态等等，依然不断地提出一些新的数学方程式以及新的解释，例如包括用正算符取值测度(positive - operator valued measures)和最大对称算符(maximal symmetric operators)去描述观察量，消相干(decoherence)和超选择定则(superselection rules)等等。

一个逻辑的概念体系，如果它的概念和论断必然同经验世界发生关系，那么它就是物理学。无论谁想要建立这样一种体系，就会在任意选择中遇到一种危险的障碍(富有的困境)。这就是为什么他要力求把他的概念尽可能直接而必然地同经验世界联系起来。在这种情况下，他的态度是经验论的。这条途径常常是有成效的，但是它总是受到怀疑，因为特殊概念和个别论断毕竟只能断定经验所给的东西同整个体系发生关系时所碰到的某件事。因此他认识到，从经验所给的东西到概念世界不存在逻辑的途径。他的态度于是比较接近理性论了，因为他认识到体系的逻辑独立性。这种态度的危险在于，人们在探求这种体系时会失去同经验世界的一切接触。爱因斯坦认为，在这两个极端摇摆是不可避免的，这种“摇摆”实际上是在对立的两极之间力图保持必要的张力，即寻找微妙的平衡或恰当的支点。

爱因斯坦的综合科学实在论是一种别具一格的实在论。它是以理性论的实在论为主线，以约定论的实在论和经验论的实在论为辅线，把实在论的实在观、真理观和科学观融合在一起的“综合体”。其中还包含有形而上学实在论、实体实在论、因果实在论、理论实在论、近似实在论、内在实在论、意图实在论、辩证实在论、方法论的实在论、动机实在论诸种因素或成分。这些不同的乃至异质的成分，在爱因斯坦的思想中相互限定，相互补充，相互联络，形成了一个内部和谐、外部严整的综合体——综合实在论。

参考文献:

- 【1】许良英 等编译。《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，1976年版。
- 【2】Einstein 和英费尔德 著 周肇威 译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962年。
- 【3】恩格斯《自然辩证法》于光远等编译，第117页。
- 【4】《Einstein 文集》第一卷，许良英等编译，商务印书馆，1976年第1版，第314页。
- 【5】Einstein 和英费尔德著 周肇威 译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962年。

2、爱因斯坦与因果律

牛顿曾说：“自然哲学的任务，是从现象中求论证，……从结果中求原因，直到我们求得其最初的原因

为止。这个最初的原因肯定不是机械的。”

所有根据实证主义得到的物理理论都是建立在物理观测的基础上的，既然，每一次观测都具有统计性，那么所有根据实证主义得到的物理理论都不可避免地深深蕴涵着一种本性：即统计性。作为现代物理学的两大基础理论：量子力学和相对论，也都是建立在物理观测的基础上的，因此所有现代物理理论都蕴涵着统计性。可是爱因斯坦曾经讲过：“但愿牛顿方法的精神给我们以恢复物理实在和牛顿教导的最深刻的特征——严格因果性——之间的一致。在放弃严格的因果性以后，合理的科学也能存在，这种情况本身就很有趣。此外，不能否认，放弃严格的因果性在理论物理学领域里获得了重要成就。但是，我应当承认，我的科学本能反对放弃严格的因果性。我仍然相信可能有一种实在的模型——那就是说，相信有这样一种理论，它所表示的是事物本身，而不仅是它们出现的几率。”

爱因斯坦似乎从来也未使实在论与因果性(在他的非概率定律的意义上)分离，他坚持的是因果实在论。在评价爱因斯坦对量子论的态度时，我们不要过分强调实在论关于独立于观察者的实在的作用而贬低因果性。如果我们审查一下爱因斯坦拒绝接受量子论是根本理论的理由，那么其中就包括量子力学的统计方面。即使在他告诉我们实在比因果性更为中心的时候，他实际上也是把二者结合起来的：“中心问题不是‘因果性’问题，而是实在的问题，以及是否存在某种对于在理论上加以描述的实在严格有效的(非统计学的)定律的问题。”

他在谈到统计论同决定论的对立问题时还这样写道：“问题在于：对自然界的理论描述，究竟应不应该是决定论的。此外，特别存在着这样的问题：究竟是不是存在一个原则上完全非统计性的关于实在(就单个事件而论)的概念图像?只是在这一点上，人们的意见才有分歧。”总而言之，因果性和独立于观察者的实在是爱因斯坦实在论纲领的主要特征，而空时描述虽说也重要，但却是次要的特征。另外的两个次要特征是间隔性原理(principle of separation)和一元论(monism)。关于间隔性原理，爱因斯坦在“量子力学和实在”(1948年)一文中这样写道：“这些物理客体的进一层的特征是：它们被认为是分布在空时连续区中的。物理学中事物的这种分布的一个本质方面是：它们要求在某一时间各自独立存在着，只要这些客体‘是处于空间的不同部分之中’。”在“自述”中，爱因斯坦说：“照我的看法，我们应当无条件地坚持这样一个假定：体系S₂的实在状况(状态)，同我们对那个在空间上同它分开的体系S₁所采取的措施无关。”

量子力学非决定论诠释遭到了 Einstein 的强烈反对。Einstein 反对原子内部的不可知性，认为微观粒子不是上帝的骰子，它的行踪不靠上帝掷骰子确定。微观世界应与宏观世界一样，对物质的描述应是完全确定的，因果律在原子内部仍应成立。由于 Einstein 始终未能建立起与量子力学形式体系相容的公认一致的决定论物理模型，Einstein 的认识始终处于少数派。Einstein 说：“当我接受一个新理论之前，我会想上帝会不会这样来创造世界。”然而玻尔的回答却更巧妙和耐人寻味，他带有警告性的说：“上帝也许并不按照我们的意愿来创造世界。整个科学是建立在哲学实在论体系之上的。”

沈惠川教授说：根据量子力学的流体力学表象就可以知道，系综诠释对于量子力学来说是最自然的。多粒子系统的量子理论必然是量子场论的或系综诠释的。凡多粒子系统，凡相对论性理论，凡与经典场有关的量子力学，必然应当是系综诠释的。只有如此才合理，否则便不能自圆其说。在通常的量子力学中，担心系综诠释会抹杀对单个体系(或粒子)知识的了解(如认为“粒子没有了”)同样是完全多余的。“系综”的概念可以追溯到流体力学的两种描述方法：(1)将流体视为质点系，研究的是“点”；(2)以流体所占空间中固定点的流动状况为出发点，研究的是“场”。这相当于量子力学的系综观点。关于量子力学系综诠释中存在的问题，可举如，量子力学系综诠释中的基本方程是线性的，因而此理论中的量子(粒子或系统)都仅仅是数学点。其次，在系综诠释中，一些被其它各种诠释解释得较为合理的量子特征，如测不准原理和波粒二象性等，却变得模糊不清。第三，量子力学系综诠释仍然未能始终如一地服从相对论的要求。最后，系综诠释关于“无限大广延宇宙”的概念，也无法同广义相对论相协调。但“系综诠释”已逐渐演化成具有取代正统诠释力量的“王者之象”，对大多数“量子理论家”来说，具有心理上的安慰作用；有人称系综诠释是现有量子力学体制下各种诠释中最“苗条”的诠释。现在对许多理论还有争论。爱因斯坦的关于量子的理想实验就是其中之一。最近我国科技大学学生潘建伟博士在奥地利与他人合作证明了处于同一量子态的两个粒子，它们的影响可以瞬时传输。

光速可以无限大是量子力学的统计结果，没有因果关系的事，而量子力学对 EPR 实验的解释，却采用了量子纠缠概念，而不是统计解释。纠缠就是因果关系，它证明了 Einstein 所强调的因果律在微观也是存在的。就目前情况看，EPR 实验也许是相对论和量子力学的结合点，他们都各对一半。

爱因斯坦对量子力学是在鉴赏中反思，在肯定时批评，他完全承认量子力学在经验上非常成功，在逻辑和数学上无可怀疑，他反对的是对它的统理解释，并认为它不是一种根本性的、终极的理论，不能构成真

正的自然观。爱因斯坦“完全承认统计性的量子理论已经为理论物理学带来了极其重大的进展”，他多次肯定量子力学取得的“成功”和“伟大成就”，肯定它“标志着物理知识中的一个重大的进步，在某种意义上甚至是决定性的进步”。他不满意的只是量子力学对实在事态并未做出完备的描述，即是说它不是一种完全的、完整的、圆满的理论。爱因斯坦指出，他对量子理论的反感不是针对它的定量的内容，而是针对人们现在认为这样处理物理学基础在本质上已是最后方式的这种信仰。他设想：“量子力学的确让人印象深刻。但是我的内心却有一个声音告诉我，它还不是正确的理论。这个理论是说了很多，但它并没有引领我们更接近上帝的秘密。我，无论如何，深信上帝不掷骰子。这个理论很可能成为以后理论的一部分，就像几何光学现在合并波动光学里面一样：相互关系仍然保持着，但其基础将被一个包罗得更广泛的基础所加深或代替。”在1954年Einstein临终的几个月前与海森伯的一次谈话中所说的：“是的，我承认，凡是能用量子力学算出结果的实验，是如你所说的那样出现的，然而这样的方案不可能是自然的最终描述。”

3. 爱因斯坦对于互补原理的批判

根据量子力学Copenhagen解释，动量和坐标测不准关系是引起Quantum decoherence的一个重要原因，但最近德国Rampe小组的冷却原子布拉格散射实验表明，测不准关系不是Quantum decoherence的唯一起因，而测量仪器和被测系统通过相互作用，形成的量子Entangled state是问题的核心。在他们的实验中，原子质心的动量扰动，可以被降低到忽略不计的程度，只须用原子的内态标记原子的空间路径，原子的干涉条纹便消失了。Rampe小组的冷却原子布拉格散射实验从一个侧面表明，测不准关系只是物质固有属性——波粒二象性的一个方面的体现，而不是由“主观介入”引起的。Rampe小组的冷却原子布拉格散射实验进一步说明Copenhagen量子力学解释的局限性，Mach的实证哲学导致量子力学理论必须引入“主观介入”，微观概念不再具有“客观性”，从而量子微观世界不会独立于主体之外。有人甚至由此得出“月亮在无人看它时确实不存在”的荒谬结论。

量子力学几率解释的本质缺陷Einstein是看准了的，实验表明电子波是物理波，它有明显的衍射和干涉效应。只承认电子波是数学波，加上不可名状的“潜能”和“趋势”，对粒子的控制，这就很令人费解。“不确定性”原理是那般的深奥莫测，不确定性或是上帝赋予的天生本性，或是测量仪器的测量误差，或是测量仪器在宏微观的“翻译”中走了样，如此等等，反正人们对它的理解莫衷一是。原子内部电子的运动不可知，人们知道的只是系统的某种数学知识。玻尔的互补原理也无法解脱这一困境。承认电子身上波粒互补，对追究电子为何携波粒于一身的物理机制，实在难说说出了什么。承认互补原理，可以说是对深究电子波粒二重性的解脱。由于量子力学的Copenhagen解释已被人们广泛认可为量子力学的正统解释，它必有其诸多合理性的一面，因此研究量子运动与Copenhagen解释之间的关系将有助于人们理解和接受量子运动，同时也将使人们对Copenhagen解释有一个更加清晰的认识。

Einstein反对这样一种观点：如果一些测量仪器的目的是要规定现象的space-time参照系，那么对于客体和测量仪器间的动量交换及能量交换的控制就要被排除。Einstein提出了一种论证：当把相对论的要求考虑在内的话，这样的控制是可能的。爱因斯坦在文章中写道：“物理学是从概念上掌握实在的一种努力，至于实在是否被观察，则被认为是无关的。”“像物理体系的实在状态这样的事实是存在的它不依赖观察或度量而存在着。”爱因斯坦的实在观由于和经典物理学的理论、实验以及我们日常生活的经验部分的一致，因此有人称之为经典物理实在观。爱因斯坦的物理实在观概括如下：①爱因斯坦的物理实在观是关于一个观察者独立于客观世界图景的理论，也就是说一种实在不受观察者行为和观察者影响的观点；②物理实在具有决定论的特点，这种决定论是因果性的决定论。认为实在本身与因果性是不可分离的，因果性是实在的必要条件。爱因斯坦反对量子力学的主要原因就包括量子理论的统计方面。因果性是爱因斯坦物理实在观的绝对必要条件，爱因斯坦认为几率解释是一种主观的解释，从而几率说被爱因斯坦认为是无知的反映；③爱因斯坦认为物理实在提供空时描述也就是说物理实在是定域的。总而言之，爱因斯坦关于物理实在的观点是：物理实在是一个观察者独立的概念，它包含着因果决定论和定域性的特点，这是爱因斯坦物理实在观的核心所在，任何在这个方面和爱因斯坦看法对立的观点都是爱因斯坦所不能容忍的。

互补原理的提出只是概括了物理实验现象，却没有对现象的本质进行说明。正如爱因斯坦所指出的，互补原理不过是一种绥靖哲学。它只是根据实验现象的提示把两种互相排斥的概念无原则地硬拉在一起，却没有说明其统一起来的根据。它只能向它的信徒（哥本哈根学派）暂时提供了一个舒适的软枕，却并不能解除深思的人们内心深刻的不安。对于波粒二象性，许多人总是试图将其中的一个性质归结为另一个性质，如薛定谔就认为粒子性可以归结为波动性。这样粒子的实体应归结为是媒质的波动产生的，粒子的运动并不是粒子实体的移动过程，而仅仅是媒质波动的传播过程。因而也就会得到这样一个结论：我们所感觉到的物体的移动不过是一个假象，一切都是某个绝对的本体的显现过程。但是物理学还没发展到敢于正视这个结论的地

步。

爱因斯坦认为：“互补原理不过是一种绥靖哲学，它只是根据实验现象的提示把两种互相排斥的概念无原则地硬拉在一起，却没有说明其统一起来的根据。它只能向它的信徒（哥本哈根学派）暂时提供了一个舒适的软枕，却并不能解除深思的人们内心深刻的不安。”

Einstein 讲：“有一个独立于知觉之外的客观世界是一切自然科学的基础【1】。当有人试图把理论的量子描述看成单个物理系统或事件的完备描述时，他会陷入矛盾之中【2】”

在物理研究中，玻尔明确区分了主体和客体。但是在主客体分界线的划分上，玻尔和爱因斯坦以及经典物理学家们是有区别的。玻尔把主客体的分界线放在独立的观察者和量子现象之间。经典物理学家的物理实在观和爱因斯坦的物理实在观将主客体的分界线放在观察主体和量子客体之间，是因为他们没有看到量子客体在被观察的时候对观测仪器的依赖作用。究其更深层次的原因是在经典物理学中，作为独立观察主体的宏观的人与观察客体宏观的被观察物之间是平权的，观察主体可以自由的无歧义的获得关于客体的信息；而在量子物理学中，玻尔的物理实在观概括为：①承认有一个独立的外在世界；②微观客体的诸如动量、能量、质量等物理量在给定的时间和位置不可能具有确切的数值；③微观客体具有非定域性和不可分性；④物理世界是统计决定的。

笔者认为，Einstein 的这一观点是错误的，相对 space-time 总会影响绝对 space-time 的结构，但是仪器也是客观实在，仪器和微观粒子间的相互作用也不过是客观世界中的相互作用，简单地把仪器说成是观察者，并推断说观察者对微观粒子的影响大到不可控制，会带来一些看上去不可逾越的困难。Schrödinger 方程具有时间反演的“可逆性”，但在测量过程中 Wave packet collapse 的“跳跃”却是时间反演不可逆的。因此，从原则上讲，就不可能“推导”出时间反演不可逆的结果。Stephen Hawking 曾经提出过量子相干性丧失的可能性，因为电磁空间具有分立结构。要想从 Schrödinger 方程推导出 Wave packet collapse，就必须对仪器的宏观和经典性质加以强调，不可单纯由 Schrödinger 方程得到。可以证明，在宏观极限下，如果仅关心较短的时间演化，恢复 Quantum decoherence 的量子跳跃来不及发生，Schrödinger 方程为量子态提供了完全决定性的时间演化，Schrödinger 方程加上量子力学的系综解释，的确可以说明 Wave packet collapse 这一 Quantum decoherence 现象，“主观介入”可以排除。对量子描述赋予客观的物理实在：量子态。

著名的数学、理论物理学家罗杰·彭罗斯 1997 年 12 月在《爱因斯坦奇迹年》一书的序言中写道：“经常引起另一种表现的悖论：为什么在理解量子现象方面爱因斯坦起初与同时代人相比处于如此领先的优势地位，而在量子论的随后发展中他却落后于他们？确实，当量子论采取在 20 世纪 20 年代最终出现的形式时，爱因斯坦甚至从未接受过这种量子论。许多人可能认为，爱因斯坦是受他‘过时的’实在论的观点阻碍，而尤其如玻尔之所以能向前推进则恰恰是因为他否认在分子、原子和基本粒子这样的量子水平上这类东西真正作为‘物理实在’而存在。可是，很清楚，爱因斯坦在 1905 年能够作出这些根本性的进展，主要取决于坚信在分子和亚分子层次上物理实体的实际存在性。这些重要倾向在本书的五篇论文中显得特别明显。是否真如玻尔的追随者认为的那样，在任何重要的意义上爱因斯坦都犯了深刻的‘错误’？我不认为如此。我自己就坚决地站在爱因斯坦一边，相信亚微观粒子的实在性，相信今天的量子力学基本上是不完备的。我也主张，关于这种实在性的本质的一些关键性见识尚有待发现，这只有通过深刻分析量子论的基本原理和爱因斯坦自己的广义相对论的基本原理间的表现冲突才能最终显现。在我看来，只有掌握了这些知识，并加以适当运用，支配微观世界的量子论定律同支配宏观世界的广义相对论定律之间带有根本性的紧张关系才能得以解决。怎样才能成功地实现，只有时间，而且，我相信，一场新的革命将会作出回答——或许是另一个奇迹年”

参考文献：

【1】Einstein 和英费尔德著 周肇威 译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962 年。

【2】Einstein 著方在庆韩文博 何维国 译。《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。

4、爱因斯坦的辩证唯物观

爱因斯坦的科学理性论思想的形成不仅与他的科学实践密切相关，也在于他善于批判性地汲取前人和时人的思想财富。在这方面，除了开普勒、伽利略、牛顿、笛卡儿、莱布尼兹、斯宾诺莎、休谟、康德以及德国哲人科学家基尔霍夫、亥姆霍兹、赫兹、玻耳兹曼、普朗克的影响外，批判学派的作用无论如何忽视不得。要知道，彭加勒是一位热情的理性论者和高远的理想主义者，他对狭隘的经验论和实用主义不屑一顾。在彭加勒看来，经验并非一切，学者也不是被动的，正是他的思考向他揭示通向真理的道路。人的理智能够包容茫无际涯的宇宙，洞察其中无声的和谐。理性具有“思想的芦苇”的优势，能够给一切人留下烙印，思想可以产生思想。他赋予假设在科学中以重要地位，断言没有假设，科学家将寸步难行。有还尖锐地批评了蔑视

理论的人，认为若无理论不久便会停滞不前。马赫虽然是一位激进的经验论者，但是他也说过理性高于感觉、理论优于观察的话，重视、推崇、赞美思想和观念。而且，马赫哲学包含着约定论和理性论的因素，并对经验论的方法论即归纳法持有强烈的保留意见。爱因斯坦谙熟彭加勒和马赫，他从中受到震撼和启迪是不言而喻的。

广义相对论在某种意义上说是一种新的引力理论，它带有非常强烈的唯理论色彩，该理论的思辨性和构造性，使得彻底的经验论者如马赫等人一直拒绝接受它，对它持否定态度。广义相对论的基本特点之一就是具有逻辑简单性，构成它的理论的基础或前提的，只有两个基本公设，即广义相对性原理和等效原理。引力场方程本身所具有的数学简单性也是一目了然的。可是，从广义相对论推导出的可以同经验相对照的结论很少。为了要得到逻辑简单性，有时不得不放弃“对经验的接近”，“在这方面，广义相对论已经走得比以前的各种物理理论都要远得多了。对于引力论来说，情况已经是这样，至于企图概括总场性质的引力论的新推广，就更是如此了”【1】。追求物理学世界图景的客体性的意向也表现在企图通过从其实在图景中排除观察及其制约着的效应，重新解释相对论与量子力学。Einstein 讲：“我们在寻求一个能把观察到的事实联结到一起的思想体系，它将具有最大可能的简单性。“实在”决不是直接给予我们的，而是(作为一个谜)提示给我们的。给予我们的只不过是我们的知觉材料。从知觉材料到达“实在”，到达理智，只有一条途径，那就是有意识的或无意识(直觉)的理智构造即概念构造的途径。否则，人们就不可能正确地对待那些在物理学上要求描述实在的概念，而且有被如下的幻觉引入歧途的危险，那就是以为我们日常经验的“实在”是“真正存在的”，而物理学的某些概念只是“单纯的观念”，它们同“实在”之间被一条不可逾越的鸿沟分隔开。实际上，牛顿引进不变的质点等概念，就意味着向高度精炼的实在论进了一步。因此，断定“实在”是独立于我们的感觉而存在的，这是理智构造的结果。我们恰巧相信这种构造，要超过我们的感觉所作的那些解释。同时，因为这些概念或构造同我们的感觉具有对应关系，我们对有关实在的想法才表示信赖或相信”。

实验方法的优点使人能将科学认识大量地应用于生活实践，空前迅速地改变了人的生活实践。这一切都加深了人们对实验方法和数学方法的迷信，而忘掉了真正最本质的方法。Einstein 深刻地洞察到了这一点，他说：“牛顿的学说在实践上的巨大成就，也许足以阻止他和十八、十九世纪的物理学家们去认识他的体系的基础的虚构特征。”【2】因此，“直到十九世纪，许多人还相信牛顿的原则——我不作假说——应当是任何健全的自然科学的基础。”【3】这种倾向走向极端就会得出结论认为：不能应用数学方法和不能被实验验证的认识并不能被看作是真正科学的认识，因而也是没有意义的，这就是那些实证主义者否认自然哲学认识是科学命题的主要依据。这些观念在科学界的普遍盛行表明：物理学家由于迷信给物理学带来成功的方法，已经忘记了推动物理学前进的最内在动力——自然哲学的思辨方法。

事实上，在物理学中的思辨的方法决定了数学的方法，而数学方法却不能代替思辨的方法。对此，Einstein 指出：“在建立一个物理学理论时，基本概念起了最主要的作用。在物理学中充满了复杂的数学公式，但是，所有的物理学理论都起源于思维与观念，而不是公式。”【4】而在 Einstein 看来，这些对理论的创立起主要作用的基本概念“从逻辑上来看，却是思维的自由创造，它们不能从感觉经验中归纳地得到。这一点之所以不那么容易被意识到，那只是因为我们习惯于把某些概念和概念的关系(命题)如此不确定地同这些感觉经验结合起来，以致我们意识不到有这样一条逻辑上不能逾越的鸿沟，它把感觉经验的世界同概念和命题的世界分隔开来。”【5】Einstein 的这些真知灼见在整个物理学界至今仍是那样的微弱。——这是他晚年倍感孤独的一个原因。——以至于我们要重新强调这一点，仅仅将思辨方法作为物理学的一个方法提出来就显得很不够了，而需让它作为自然哲学的独立方法确立起来。

正因为 Einstein 看到了基本概念的发现对于物理学发展的决定性作用，所以，他对物理学基本概念的批判性分析所做的工作比任何一个物理学家都多。他写了大量的这方面的论文，其中重要的有《物理学的基本概念及其最近的变化》、《麦克斯韦对物理实在概念发展的影响》、《物理学和实在》等。单是专门讨论相对论与空间关系的就有多篇：《以太和相对论》、《物理学中的空间、以太、和场的问题》《相对论和空间问题》等。Einstein 热衷于从基本概念方面来阐明物理理论的内涵，并试图通过这种分析来找到创造力的新的源泉。在 Einstein 看来“科学的目的是：一方面是尽可能完备地理解全部感觉经验之间的关系；另一方面是通过最少个数的原始概念和原始关系(即基本概念和基本关系)的使用来达到这个目的。”【6】“他(指 Einstein)觉得科学观念的发展历史被忽视了。他所感兴趣的并不是资料的历史——什么时候，什么人干这个等等——而是对观念发展的追踪。”【7】“他对牛顿的了解，首先是作为一个古典物理学中许多基本概念的创立者。”【8】他说：“在对科学的志趣中，必须一而再、再而三地从事对这些基本概念的批判，为了我们可以不无意识地受到它们的支配。”

爱因斯坦曾经讲过：“借助于思维，我们的全部感觉经验就能够整理出秩序来，这是一个使我们叹服的事实，

但却是一个我们永远无法理解的事实。可以说：“世界的永久秘密就在于它的可理解性。‘要是没有这种可理解性，关于实在的外在世界的假设就会是毫无意义的，这是伊曼努耳·康德的伟大的认识之一。”

Einstein：“不研究‘物质’还有什么物理学呢？没有物理学我们在这里讨论什么呢？”海森堡：“我可没说研究‘物质’，当然要研究‘物质’。没有‘光’‘粒子’‘波’这些“物质概念”，我就无法设计实验，也就无法得到实验结果。” Einstein：“可是你的‘物质’是‘不确定’的，‘物质’应该是‘确定的’。上帝不掷色子。海森堡：“我现在的实验结果就是‘上帝掷色子，而且是‘上帝偷偷掷色子’” Einstein：“那是因为实验深度有限”。海森堡：“那我们怎么提高实验深度？”。 Einstein：“我也一直在想，还没想出来”。海森堡：“没有实验我们怎么能证明？”。。。。。。

从牛顿到 Einstein，从普朗克到德布罗意等物理学家，其物理理论从本质上说所揭示的都是质量（或量子）与绝对空间的相互作用的规律。但是，他们都只是把这种相互关系看作是现象的规律，他们的理论总是从质量与空间相互作用所表现出来的基本的、或具有特殊意义的现象（如惯性、真空光速不变、普朗克常数等）出发，通过揭示这些基本的现象与别的物理现象之间的数学联系来建构物理理论。可以说，至今为止的物理理论基本上只是一种关于物理现象规律的理论，其他自然科学亦然。这是导致为其辩护的哲学认识论停留在现象主义的实证原则（即认为只有可以经验到感觉才能被允许进入物理学）上的一个很重要的原因。只有 Einstein 晚期的认识论才突破了这一实证主义的局限性，转而信奉唯理论的实在论，但他没有从其认识论上的深刻的唯理论实在论见解转到批判自己的物理理论上来。苏格拉底说，我只知道一个真理，我对我自己是无知的。也就是说，即使聪明如哲学家，对自己也是无知的。物理学的问题，是主观人脑对照客观客体，两者相互作用碰撞而产生。由此导致的一切后果即为各式物理学理论（当然也包括你的理论），不过是碰撞产生的火花而已。各式的理论其基础取决于两个方面：主观的方面和客观的方面。科学家的眼睛永远向外张望，极少内省。而实际上，在对主观方面，也就是对自己研究清楚以前，是绝不可能真正了解外界的宇宙的。

参考文献:

- 【1】许良英 等编译。《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，1976 年版。
- 【2】《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，第 315 页。
- 【3】同上，第 309 页。
- 【4】Einstein、英费尔德著《物理学的进化》（中译本），上海科技出版社，1962 年版，第 176 页。
- 【5】《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，第 409 页。
- 【6】《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，第 562 页。
- 【7】《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，第 562 页。
- 【8】《Einstein 文集》第一卷，商务印书馆，第 623 页。

第四章 原子物理学与核物理学发展现状

1. 从独立粒子核壳层模型到原子核集体模型

一个亘古不变、极具魅力的话题：自从人类有了思维，人们就开始不停地追问“我们的世界究竟由什么组成？”古希腊哲学家泰勒斯提出：水是万物的始基；赫拉克利特认为：火是万物的本原；德谟克利特则宣称：世界万物都是由不可分割的颗粒(原子)和虚空所组成。我国古代的“五行说”认为，宇宙万物皆由金、木、水、火、土构成；“元气说”则认为，客观的元气是构成宇宙万物的本原。

粒子物理学中的“标准模型”理论，经受了相当成功的实验检验，被认为是迄今为止最有效的一个唯象理论，但是这个理论仍然存在着许多基本的疑难问题有待解决。诸如希格斯粒子的存在和本质，粒子质量的来源，夸克和轻子更深层次的特征标度，标准模型更深层次上的基本规律等，都是今后主要的研究领域。寻找超出标准模型的新理论，将成为高能物理近期探索的一个重要任务

核物理研究一开始，就面临着一个重要的问题，这就是核子间相互作用的性质。人们注意到，大多数原子核是稳定的，而通过对不稳定原子核的 γ 衰变、 β 衰变和 α 衰变的研究发现，原子核的核子之间必然存在着比电磁作用强得多的短程、且具有饱和性的吸引力。此外，大量实验还证明，质子-质子、质子-中子、中子-中子之间的相互作用，除了电磁力不同外，其它完全相同，这就是核力的电荷无关性。1935 年，汤川秀树（YukawaHideki 1907~1981）提出，核子间相互作用是通过交换一种没有质量的介子实现的。1947 年， π 介子被发现，其性质恰好符合汤川的理论预言。

介子交换理论认为，单个 π 介子交换产生核子间的长程吸引作用 ($\geq 3 \times 10^{-13} \text{cm}$)，双 π 介子交换产生饱和和中程吸引作用 ($1 \sim 3 \times 10^{-13} \text{cm}$)，而 ρ 、 ω 分子交换产生短程排斥作用 ($< 1 \times 10^{-13} \text{cm}$)， π 介子的自旋为零，称为标量介子， ρ 、 ω 介子的自旋为 1，称为矢量介子，它们的静止质量不为零，这确保了核力的短程性，而

矢量介子的非标量性又保证了核力的自旋相关性。核力性质及核组成成分的研究,为进一步揭示原子核的结构创造了条件。

在早期的原子核模型中,较有影响的有玻尔的液滴模型、费密气体模型、巴特勒特和埃尔萨斯的独立粒子模型以及迈耶和詹森的独立粒子核壳层模型。其中最成功的是独立粒子核壳层模型。

在 1948~1949 年间,迈耶(Mayer, Maria Goeppert 1906~1972)通过分析各种实验数据,重新确定了一组幻数,即 2、8、20、28、50 和 82。确定这些幻数的根据是:①原子核是这些幻数的化学元素相对丰度较大;②幻核的快中子和热中子的截面特别小;③幻核的电四极矩特别小;④裂变产物主要是幻核附近的原子核;⑤原子的结合能在幻核附近发生突变;⑥幻核相对 α 衰变特别稳定;⑦ β 衰变所释放的能量在幻核附近发生突变。在费密的启发下,迈耶在平均场中引入强的自旋-轨道耦合力,利用该力引起的能级分裂成功地解释了全部幻数的存在。接着,詹森(Jensen, Johannes Hans Daniel 1907~1973)也独立地得到了相同的结果。在迈耶与詹森合著的《原子核壳层基本原理》一书中,他们利用核壳层模型成功地解释了原子核的幻数、自旋、宇称、磁矩、 β 衰变和同质异能素岛等实验事实。由于原子核壳层结构模型所获得的成功,及其在核物理研究中的重要作用,迈耶和詹森共同获得 1963 年诺贝尔物理学奖。

核壳层模型是在大量的关于核性质、核谱以及核反应实验数据综合分析的基础上提出的,它对原子核内部核子的运动给出了较清晰的物理图象。这一模型的核心是平均场思想。它认为,就像电子在原子中的平均场中运动一样,在原子核内,每个核子也近似地在其它核子的平均场中做独立的运动,因此原子核也应具有壳层结构,通常把这一模型称为独立粒子核壳层模型。

平均场的思想使核壳层模型取得了多方面的成功,但是它也具有不可避免的局限性,因为核子之间的相互作用不可能完全由平均场作用代替。除了平均场以外,核子之间还有剩余相互作用。随着核物理研究的发展,在 50 年代以后,陆续发现一些新的实验事实,如大的电四极矩、磁矩、电磁跃迁几率、核激发能谱的振动谱、转动谱以及重偶核能谱中的能隙等,它们都不能用独立粒子的核壳层模型解释。

1953 年,丹麦物理学家、著名物理学家 N. 玻尔之子阿·玻尔(Bohr, Aage Niels 1922~)与他的助手莫特森(Mottelson, Ben Roy 1926~)及雷恩沃特(Rainwater, Leo James 1917~)共同提出了关于原子核的集体模型。这一模型认为,除平均场外,核子间还有剩余的相互作用,剩余作用引起核子之间关联,这种关联是对独立粒子运动的一种补充,其中短程关联引起核子配对。描述这种关联的核子对模型已经得到大量的实验支持。核子间的长程关联将使核变形,并产生集体运动,原子核转动和振动能谱就是这种集体运动的结果,而重核的裂变以及重离子的熔合反应又是原子核大变形引起的集体运动的结果。原子核的集体模型认为,每个核子在核内除了相对其它核子运动外,原子核的整体还发生振动与转动,处于不同运动状态的核,不仅有自己特定的形状,还具有不同的能量和角动量,这些能量与角动量都是分立的,因而形成能级。正因如此,与只适用于球形核的独立粒子壳层模型相比,原子核的集体模型有了很大的发展。用它可以计算核液滴的各种形状对应的能量和角动量。此外,当核由高能级向低能级跃迁时,能量通常还能以 γ 射线的形式释放出来,这一特征正与大量处于稳定线附近的核行为相符。此外,根据这一模型,当核形状固定时,转动惯量不变,随着角动量加大,核形状变化,转动惯量相应改变,导致转动能级变化,因此,这一模型对变形核转动能级的跃迁规律的研究,已成为研究奇异核的基础。原子核集体模型解决了独立粒子核壳层模型的困难,成功地解决了球形核的振动、变形核的转动和大四极矩等实验事实,为原子核理论的发展作出重要的贡献,为此,阿·玻尔、莫特森与雷恩沃特共同获得了 1975 年诺贝尔物理学奖。

2. 核结构与核动力学的新进展——IBM 理论

发展核模型的目的,在于更准确地描述原子核的各种运动形态,以期建立一个更为完整的核结构理论。由于人们对于核子间的相互作用性质、规律及机制并不完全清楚,不可能像经典物理那样,通过核子间的相互作用先建立一个核结构与核动力学理论,只能依靠所建立的模型,对有实验数据的核素或能区进行理论计算,再与实验的结果相比较,根据比较结果,调整模型,再通过模型理论,估算没有实验数据的空缺能区,发展实验技术,补充空缺数据,再与理论估算相比较,如此循环往复,推动核结构理论的进展,这是一个艰苦而又漫长的探索过程。截止到 70 年代初,核结构理论的进展大多在传统的范围内发展着。传统核结构理论的特点是:①没有考虑核子的自身结构;②处理核力多为二体作用,把核内核子间的作用,等同于自由核子间的相互作用;③认为核物质是无限的;④应用的是非相对论的量子力学;⑤研究对象是通常条件(基态或低激发态、低温、低压、常密度等)下的自然核素。

从 70 年代中到 90 年代,核物理的研究跳出了传统范围,有了巨大的进展。首先是实验手段的发展,各种中、高能加速器、重离子加速器相继投入运行;与此相应,探测技术的发展不仅扩大了可观测核现象的范围,也提高了观测的精度与分析能力;核数据处理技术由手工向计算机化的转变,更加速了核理论研究的进

程。受到粒子物理学和天体物理学发展的影响，核物理理论也开始从传统的非相对论量子核动力学（QND）向着相对论量子强子动力学（QHD）和量子色动力学（QCD）转变。一个以相对论量子场论、弱电统一理论与量子色动力学为基础的现代核结构理论正在兴起。虽然由于粒子物理已成为一门独立学科，核物理已不再是研究物质结构的最前沿，但是核物理的研究却更进入了一个向纵深发展的崭新阶段。

原子核的集体模型除了平均场外，还计入了剩余相互作用，因而加大了它的预言能力。然而，核多体问题在数学处理上的难度很大，这给实际研究造成很大的困难。近十几年来，有人提出了各种更为简化的核结构模型，其中主要的有液点模型，它的特点是反映了原子核的整体行为和集体运动，能较好地说明原子核的整体性，如结合能公式、裂变、集体振动和转动等。除了液点模型外，还有相互作用的玻色子模型（IBM），这一模型也是企图用简化方法研究核结构。目前，由于人们除了对核子间的核力作用认识不清以外，又由于原子核是由多个核子统成的多体系统，考虑到每个核子的3维坐标自由度、自旋与同位旋自由度，运动方程已无法求解，加上多体间相互作用就更难上加难。过去的独立核壳层模型强调了独立粒子的运动特性，而原子核集体模型又强调了核的整体运动，这两方面的理论没能做到很好的结合。尽管核子的多体行为复杂，无法从理论计算入手，实验观察却发现，原子核这样一个复杂的多费密子系统，却表现出清晰的规律性与简单性。这一点启发人们，能否先“冻结”一些自由度，研究核的运动与动力学规律，从简单性入手研究核，这就是相互作用玻色子模型的出发点。

1968年，费什巴赫（Feshbach）与他的学生拉什罗（F. Iachello）在研究双满壳轻核时，把粒子-空穴看成一个玻色子，提出了相互作用玻色子概念。1974年，拉什罗把这一概念用于研究中、重偶偶核，他与阿里默（A. Arima）合作，提出了相互作用玻色子模型。这一模型认为，偶偶核包括双满壳的核壳部分与双满壳外的偶数个价核子部分。若先把核壳的自由度“冻结”，把价核子配成角动量为0或2的核子对，即可把费密子对处理为玻色子，用玻色子间的相互作用描述偶偶核，可以使问题大大简化。他们的这一模型在解释中、重原子核的低能激发态上取得了很大的成功。相互作用玻色子模型更为成功之处是，它预言了原子核在超空间中的对称性。它指出核转动、核振动等集体运动行为是核动力学对称性的反映。由于对核动力学对称性的揭示，这一模型虽然比较抽象，却更为深刻也更为本质。在过去，提到对称性，往往被认为是粒子物理学的研究课题。其实，核物理也是对称性极为丰富的研究领域。最早注意到核对称性的是匈牙利裔美国物理学家、狄喇克的妻兄维格纳（Wigner, Eugene Paul 1902~）。维格纳毕业于柏林大学化学系，1925年获得博士学位，1930年与诺伊曼（Neumann, John von 1903~1957）一起被邀请到美国，担任普林斯顿大学数学物理教授。1936年，两人共同创立中子吸收理论，为核能事业做出重大贡献。1937年，维格纳基于核的自旋、同位旋，引入超多重结构，建立了宇称守恒定律。由于对原子核基本粒子理论的贡献，特别是对对称性基本原理的贡献，维格纳获得了1963年诺贝尔物理学奖。继维格纳，对原子核动力学对称性进行更深入研究的是埃里奥特。1958年，埃里奥特研究了谐振子场的对称性，建立了玻色子相互作用的SU(3)动力学对称性理论，这一理论与质量数A在16~24的核理论有很好的符合，但对于A较大的核，由于自旋-轨道耦合，使这种对称性遭到破坏，而偏离很大。在1974年拉什罗和阿里默提出的相互作用玻色子模型中，将角动量为0的玻色子称为s玻色子，角动量为2的玻色子称为d玻色子，s、d玻色子展开一个6维超空间，系统状态的任何一种变化，都可以通过6维空间的么正变换实现，这种么正变换构成U(6)群。原子核的角动量守恒即与空间转动不变性相联系，即s、d系统具有U(6)的对称性。他们还发现，s、d玻色子系统存在三个群链，①U(6) U(5) SO(5) SU(3)，简称U(5)极限。②U(6) SU(3) SO(3)，简称SU(3)极限。③U(6) SO(6) SO(5) SO(3)，简称SO(6)极限。在三个群链情况下，与s、d玻色子相互作用相关的哈密顿量均有解析解，原子核具有相应群的对称性。在三种极限情况，能量本征值对角动量都有确定的依赖关系，动力学对称性也依能级次序的表现而不相同。总之，这一研究成果揭示了原子核结构与动力学的对称性，并与实验结果取得了很大程度上的一致，IBM理论取得了很大的成功。

当前，粒子物理学面临的两大问题就是研究超出标准模型的新物理和解决描述强相互作用的量子色动力学（QCD）的非微扰问题。美夸克物理的研究不仅与微扰和非微扰QCD相关，而且与超出标准模型的新物理的探讨有密切联系。B介子与b夸克重子的弱衰变在检验标准模型的同时，有可能通过圈图效应揭示新物理存在的证据。B衰变和CP破坏的研究，不仅是当前而且至少在二十一世纪前五年将是粒子物理研究的热点。随着美国和日本两个B工厂的运行，B物理的研究将进一步形成高潮。粲物理的研究内容包括粲偶素与带粲味的粒子质量谱，粲偶素的强衰变与电磁衰变，粲偶素的强跃迁，带粲数粒子的弱衰变，以及粲偶素及带粲数粒子的产生等。当前粒子物理中的许多热点问题都与粲物理有关。例如，近年来在美国费米实验室观察到的高能质子-反质子碰撞中的粲偶素粒子的超高能产生，引起了对强子结构及量子色动力学中的新的理论和机制的研究。又如，最近在粲偶素辐射衰变或其它实验中观察到的两个粒子 (2230) 与 $f_0(1500)$ 被认为

极有可能就是人们寻找了十几年的胶子球。胶子球体现了胶子自由度的存在，对胶子球在实验上和理论上的确认将是对胶子作为传媒的量子色动力学的最直接和有利的支持，因而受到国际粒子物理界的广泛重视。

3、核内非核子自由度的研究

1. π 介子自由度

在建立相互作用玻色子模型的同时，核结构理论又从核内非核子自由度的研究中得到了新的进展。以核集体模型为代表的广义核壳层模型尽管取得了一定的成功，但毕竟还有一定的局限性。首先，这些模型都只是从部分实验事实或观测现象出发，从某个侧面用类比方法反映核子系统的机制。此外，在核反应理论中，所引入的可调参数又太多。可调参数越多，说明这个理论离成熟性与完整性越远。再加上现有的各种核模型间缺乏统一的内在联系，它们不是一个包容另一个，而是彼此独立，相互间关联甚少。追究起来，存在这些问题的原因是对核多体系统的认识有关。按传统认识，核内的核子只是一个无结构的点，核仅由这些被当作为点的核子组成，即原子核只存在有核子自由度，核子之间的作用单纯为两点间的作用。事实上，早在 30 年代，有人就预言了核内存在有非核子的自由度。

1932 年，查德威克发现了原子核内除了质子外，还有中子以后，很快地，海森伯就提出原子核是由质子和中子组成的。然而是什么力把它们紧紧地约束在核中呢？1935 年，汤川秀树发表了核力的介子场理论，他认为 π 介子是核力的媒介，并参与 β 衰变，同时提出了核力场方程及核力的势。根据这一理论，质子和中子通过交换 π 介子互相转化。1947 年， π 介子在宇宙射线中被发现。由于在核力理论中预言 π 介子的存在，汤川秀树获得了 1949 年诺贝尔物理学奖。

随着粒子物理学的发展，人们逐渐发现，在原子核内，除了传统的质子、中子自由度以外，还有更多的自由度，它们包括： π 介子自由度、 ρ 介子自由度以及各种核子的共振态 Δ 、 σ 粒子自由度、核内夸克自由度和核内色激发自由度等，情况远比人们对核的传统认识复杂。对这些自由度的研究极大地丰富了原子核物理学的基本内容。

多年来，人们一直在寻求着核内存在 π 介子的直接或间接的实验证明。一个主要的困难是得知核内存在 π 介子，需要波长极短的入射粒子束。为避免强相互作用带来更多的不确定性，人们选用了入射光子。近年来，有两个有名的实验给出了核内存在 π 介子自由度的证明。其一是氘核的光分裂实验，人们用两种方法计算了氘核光分裂 $\gamma + D \rightarrow n + p$ 过程的反应截面。结果发现，在入射光子能量 $E_\gamma \leq 50 \text{ MeV}$ 情况下，认为核只具有纯核子自由度的计算结果与实验符合，偏差只有 10% 左右；然而当 $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$ 时，纯核子自由度的计算与实验结果的偏离明显地加大，只有考虑了 π 介子自由度以后，才与实验结果一致。这一实验不仅证明了核内 π 介子的存在，而且还说明了在通常的低能核物理中，分子的自由度不能表现出来。另一个证明 π 介子自由度的是利用电子散射对 ^3He 形状因子的研究实验。实验结果表明，在电子与核的动量转移过程中，越接近核中心区域，动量交换值越大，核中心区域是高动量转移区，核的边缘为低动量转移区，而只有在低动量转移区，纯核子自由度理论才与实验结果符合，在高动量转移的中心区，必须计入 π 介子及 Δ 自由度的影响，才能与实验符合。这个实验不仅证明了核内 π 介子自由度的存在，而且进一步指出，在原子核的中心区域，非核子自由度问题的重要性更为突出。

2. 夸克自由度

从 40 年代末到 50 年代初，随着世界上各大型加速器的投入运行，粒子物理逐渐从核物理中分化了出来。本世纪 60 年代以后，粒子物理取得了一系列令人瞩目的进展。例如，在 70 年代初，格拉肖、萨拉姆和温伯格将弱、电相互作用统一在 $SU(2) \times U(1)$ 对称群的规范理论之中，并从多方面得到了实验上的直接和间接的证实。粒子物理的另一个著名成就是夸克模型和量子色动力学的建立。根据微观世界中的对称性，不仅可以对强子进行分类，而且还对强子内部结构的认识提供了有效的途径。低能强子按 $SU(3)$ 对称群分类，这些强子的基本构件，也是 $SU(3)$ 对称群的基础就是夸克，包括 u 夸克、 d 夸克和 s 夸克。为使强子满足自然界普遍遵守的自旋与统计性关系，每种夸克还有 3 种不同的色，色相互作用是强相互作用的起源，而传递色相互作用的 8 个媒介子就称为胶子。实质上，强相互作用理论即为 $SU(3)$ 色对称群的规范理论，称为量子色动力学 (QCD)。根据夸克模型，原子核的核子应由 3 个价夸克以及称为海夸克的虚夸克-反夸克对胶子组成，而传递核子相互作用的介子应由价夸克、价反夸克和海夸克、胶子组成。这种物质结构的新观点启发人们思索，核内的核子处于核的“环境”之中，它们到底与自由核子有什么区别？核“环境”对核子有什么影响？核内的夸克和胶子的分布如何？它们都参与什么作用？……这一系列问题都将与核内夸克自由度等的非核子自由度有关，这些问题已成为当今核物理发展的关键。

目前还不能严格地用量子色动力学描述原子核这样的多夸克系统，考虑到可能存在夸克自由度，有人提出了一个更为大胆的简化核模型。这一模型从夸克和它们之间的相互作用力出发，采用类似传统的独立粒子

壳层模型的方法来解释原子核的各种性质。在考虑夸克间相互作用时，这一模型假定存在有“对力”，而不考虑夸克的禁闭性质。根据这一模型，夸克的色自由度使每个壳层上容许的夸克数恰好与传统壳层模型每个壳层上的核子数相同，这使人们想到，在原子核内的夸克存在有自由度，它们可能不像在自由核子中那样禁闭，那么原子核内的夸克究竟有多大的几率跑出核内的核子之外？原子核内的夸克自由度能否表现出来？在对这些关键问题的研究中，核物理与粒子物理两大学科又重新走到一起，而趋于汇合之中。

3. 高能轻子非弹性散射实验——EMC 效应

传统的原子核的质子-中子模型在描述低能核现象时都十分成功，这表明，要发现核内的夸克效应或其它非核子自由度应该到高能核现象中去寻找。此外，根据标准模型预言，原子核是由若干核子、介子组合的集合系统，而核子、介子又都是通过胶子相互作用的夸克系统，核子在核内不停地运动，又会由于核子间的重叠形成夸克集团，这样一来，核内核子的性质，如大小、质量等，一定与自由核子不同，例如会稍微膨胀而变“胖”和有效质量变小等。此外，禁闭在核内核子中的夸克密度分布也会与自由核子的不同。这些都是由于夸克自由度带来的影响，称之为夸克效应。

寻求核内夸克效应的最直接和有效的方法就是用“探针”探测。这种“探针”就是能量极高的入射粒子。入射粒子的能量越高，它的德布罗意波长越短，分辨核内微小尺度的能力越强。此外，最好采用电子和 μ 子等非强子作探针，以避免强相互作用干扰，因为至今对强相互作用的了解不如电磁相互作用那样清楚。对于实验的结果，有人预计，当用能量高达几个京电子伏的高能轻子打入核内时，它们与核内夸克相互作用而散射，通过对散射粒子的能量、动量和散射角分布的测量，探知核内夸克的动量分布，即核子的结构函数。而另一些人则认为，原子核只是一个质子-中子构成的弱束缚体系，对于高达几个京电子伏的高能过程，这种弱的束缚不会起什么作用，核的“环境”影响不能显示出来，在自由核子靶上以及在原子核内核子靶上，测量这种结构常数不会显示什么差异。然而实验的结果，却大大出乎后一些人的预料。

1982 年，在欧洲粒子物理研究中心，由来自 17 个国家和地区的 89 位高能物理学家，组成了欧洲 μ 子实验合作组（EMC 组），进行了带电轻子深度非弹性散射实验。他们使用的高能轻子为电子、 μ 子和中微子，轻子与核子间传递的能量高达几个到几十个 GeV，这一实验结果发表在《物理通讯》杂志上^①。实验得到了铁原子核结构函数与氦核结构函数的比值，发现这一比值是夸克动量与核子平均动量比值 x 的函数，当 x 在一定的范围（布约肯区）内时，这个比值为 0.05~0.8，且呈一定规律随 x 变化。这个结果很重要，因为如果认为核内的核子仍保持自由核子的性质，这个比值应为 1，比值偏离 1 的实验结果表明，原子核内的核子包含了较多的低能夸克。尽管核子在核内的束缚很弱，周围核物质的存在依然明显地影响到束缚在核内夸克的动量分布。面对这一实验事实，人们不得不改变原来的看法，这一结果由此得名为“EMC 效应”。随后，EMC 效应陆续被美国斯坦福直线加速器、德国的电子同步加速器及世界上其它几个大加速器的实验证实。

EMC 效应的发现引起了世界性的轰动，这不是偶然的。它像科学史上许多其它重要发现一样，不是“先验的理论”，而是实验事实强迫人们去接受一种新的观念，这就是原子核内核子的亚结构与一般自由核子的亚结构有明显的不同。这里值得提起一个反面的例子，如果人们不是被一些“先验的理论”所束缚，本该更提早十几年发现 EMC 效应。在 70 年代初，在斯坦福直线加速器实验室(SLAC)就有一个用高能电子测量核子结构函数的研究组。他们以液氢与液氘为靶，得到了核中质子和中子的结构函数。因为用来盛液氢、液氘的容器是钢和铝的，为消除本底的影响，他们又进行了容器的空靶测量，这样就掌握了钢和铝靶的结构函数，却不曾想到与自由核子的结果相比较。EMC 效应的结果发表以后，他们把十几年前依然保存完好的数据重新计算分析，他们自己戏称这是“做了一次‘考古学’的研究”。其结果确实充满戏剧性，两次研究一前一后时隔十几年，对不同的探测粒子、不同能区做了测量，竟然得出完全一致的结果。这一事实不仅再一次令人信服地证实了 EMC 效应的存在，还使人们冷静地看到，SLAC 小组先于十几年得到实验的全部数据，却未能成为 EMC 效应的发现人，这不能不说明，对于那些已被广泛接受却未经实验事实证实的“先验理论”，确有必要重新检验。1988 年，EMC 组又在极小的布约肯区($0.003 \leq x \leq 0.2$)对不同的核(^{12}C 、 ^{46}Ca 、 ^{73}Cu 、 ^{56}Fe 、 ^{119}Sn)进行了测量。结果发现，在 $0 \leq x < 0.1$ 时，结构函数比值小于 1，有明显的遮蔽现象；而在 $0.1 \leq x < 0.2$ 时，结构函数比值大于或等于 1，有较弱的反遮蔽现象，而且遮蔽现象随不同的核而不同^①。伯格(E.L. Berger)等人对这一现象做出了解释^②。他们先从传统的核子-介子模型出发，同时考虑了核子的费密运动修正，认为遮蔽现象来源于核子造成的“影子”，即入射粒子“看不到”处于“影子”中的核子。根据这一解释，遮蔽现象本应该随着入射高能轻子转移给靶核动量的增大而迅速地减小，以至消失，然而实验现象却与这种估计相反。这表明，EMC 效应使传统的核子-介子模型出现了困难，原子核并非简单的核子的集合，即使引入了核子运动的费密修正，核内的夸克分布也与自由核子不同，这就迫使人们不得不考虑夸克自由度的问题。

根据量子色动力学，夸克的相互作用性质与核力、电磁力及引力性质完全相反。在强子内，夸克间距离

很小时，它们几乎相互没有作用，行为像无相互作用的自由粒子，然而随着夸克间距离的加大，禁闭势垒急剧增高，夸克像是被禁闭在强子的内部。EMC效应的发现使人们想到，禁闭在核“环境”中核子内的夸克自由度可能比自由核子内的夸克自由度大，在核“环境”中，核子内的夸克将有可能以某种几率跑到核子之外，甚至从一个束缚核子中“渗透”出来，再进入另一个束缚核子之中，两个相互靠得较近的核子会以一定的几率彼此“融合”，使核子自身膨胀起来，核子会因这种膨胀而变“胖”，随之有效质量减小。核内核物质密度越大，核子重叠机会越多，夸克禁闭长度增加就越大，这一效应就越明显。对 EMC 效应的这一解释先后由卡尔森(E.E. Carlson)^①及克洛斯(F.E. Close)^②等人给出，他们的解释与 1988 年 EMC 协作组的实验结果取得了大部分的一致。

事实证明，夸克自由度的研究还是很初步的，与问题的最后的圆满解决仍有相当大的距离。随着研究的深入，问题也不断地接踵而来。1990 年下半年，斯坦福直线加速器研究中心又公布了有关 EMC 效应的最新实验结果^①，他们用 800GeV 的高能质子轰击不同的靶核所产生的双 μ 子实验，测定了靶核内海夸克密度分布变化。结果表明，在布约肯变量范围 $0.1 < x < 0.3$ 时，海夸克密度大致没有变化，这与 EMC 效应的各种模型理论的预言都不一致。即使如此，EMC 效应的意义仍是不言而喻的，它一方面使人们认识到，必须从夸克层次对核的组分与结构进行重新认识；另一方面，从核的夸克禁闭性质变化讨论禁闭的根源又为粒子物理的研究展开了一个新的天地。它使人们确信，高能核物理以及高能重离子核物理^②的实验与理论研究一定能为核中夸克效应的研究提供更为丰富的内容，夸克、胶子自由度的核效应以及夸克、胶子自由度与核子、介子自由度的关联终将会被揭示出来。

附录：据英国《每日邮报》2010 年 11 月 9 日报道，科学家借助欧洲大型强子对撞机(LHC)，让铅离子以接近光速的速度对撞，成功创造出了迷你版的“宇宙大爆炸”，产生了一个温度为太阳核心温度 100 万倍的火球，也意味着产生了夸克—胶子等离子体。在宇宙大爆炸初期，正是这种夸克—胶子等离子体填满了整个宇宙。科学家表示，该项科研成果将用于解释 137 亿年前宇宙诞生之初的物质形成过程。

据悉，铅离子 4 日开始注入对撞机，7 日零时 30 分探测到首次铅离子束流的对撞，8 日 11 时 20 分获得铅离子对撞实验所需稳定条件，实验正式开始。现在，实验成功创造出了迷你版“宇宙大爆炸”。

ALICE (LHC 的一台探测器) 铅离子对撞实验的科学家、伯明翰大学物理学家戴维·埃文斯表示，他们对这一成就激动万分，实验获得了有史以来最高的温度和密度。这个过程发生在一个安全、可控的环境内，生成了炽热和超稠密的亚原子火球，其温度超过 10 万亿摄氏度，在这样的温度下，组成原子核的质子和中子会被融化，产生夸克—胶子等离子体。

欧洲核子研究中心主任罗尔夫·霍伊尔解释道，之所以产生如此巨大的能量，是因为铅离子含有 28 个质子，因此，两束铅离子束流被加速后，单束最高能量远高于质子束流能量，达到 287 万亿电子伏特。

英国理论物理学家约翰·埃利斯自 1978 年起为欧洲核子研究中心工作，他撰文表示，从严格意义上说，LHC 没有重现大爆炸，但它确实成功再现了大爆炸发生后极短时间内宇宙小范围的情形。实验将为宇宙的早期演化研究提供新的线索；也为基础理论物理研究提供新的途径，包括一些由弦理论提出的观点。

科学家希望，通过研究夸克—胶子等离子体，可以加深他们对强相互作用力的了解，强相互作用力是自然界存在的四种基本作用力之一，它不仅让原子核紧紧地依附在一起，而且对它们 98% 的质量负责。另外，研究夸克—胶子等离子体，也有助于科学家研究宇宙形成之初的状态以及物质变化过程。

LHC 栖身于瑞士和法国交界地区地下 100 米深处的环形隧道内，隧道总长约 27 公里。科学家希望通过对撞机内实现极高能量的粒子对撞，模拟出与宇宙大爆炸后最初状态类似的环境，从而深入研究宇宙起源和各种基本粒子的特性。

4、基本粒子结构认识的进展

在某些年轻一代的物理学家看来，理论物理学被归结为用抽象群数来补充的复变量复值函数的数学了。这种片面的抽象化趋势缺乏某种对于创造性思维来说是很重要的东西。最近二、三十年中，没有出现物理学家的思维方面的真正革命。换句话说，在 1905 年建立起来的狭义相对论，以及在二十年代建立起来的量子力学，它们的基本概念都没有在本质上发生变化，而只是抽象进步了。如果我们更加注意直觉式大胆的想法来作为不可避免的抽象化趋势的一种补充，基础物理学的又一次返老还童是可以期望的。我坚信用某种方法可以合理地把握住基本粒子的结构，而且，当然我正在为寻找可能的答案而费脑筋。我相信，这样的一天会到来。那时，我们将知道基本粒子的内心，即使这一切不会像庄子知道鱼的内心那样简单，但为了作到这一点，我们也许必须采取冲破现有知识框框的奇妙的思维方法。——汤川秀树。

所有的电子都是全同粒子，所有的质子也都是全同的粒子。这里是称质量、电荷、自旋等固有性质完全相同的微观粒子为全同粒子。由全同粒子的不可区分性，使得在全同粒子组成的体系中，两全同粒子相互代

换不引起物理状态的改变, 这个论断被称为全同性原理, 它是量子力学的基本原理。其次, 微观全同粒子的不可区分性, 对全同粒子的波函数提出了一个严格的要求。自旋为 $1/2$ 的奇数倍的粒子, 如电子、质子、中子等, 遵从费密-狄喇克统计, 称为费密子, 由费密子组成的全同粒子体系的波函数是反对称的。自旋为零或为 $1/2$ 的整数倍的粒子, 如光子, 遵从玻色-爱因斯坦统计, 称为玻色子, 由玻色子组成全同粒子体系的波函数是对称的。原子、原子核等复合粒子, 到底属于哪一类粒子, 则取决于它们所含费米子的奇偶数而决定。由奇数个费米子组成的复合粒子遵循费米统计, 仍为费米子。由偶数个费米子组成的复合粒子遵循玻色统计, 则为玻色子。由玻色子组成的复合粒子, 仍是玻色子。由此可见, 由无相互作用的全同粒子所组成的体系的哈密顿算符其本征函数等于各单粒子哈密顿算符本征函数之积, 本征能量则等于各粒子本征能量之和。

Seiberg 和 Witten 的工作主要讨论求解 $N=2$ 超对称规范理论的问题。自然界中的基本粒子分玻色子和费米子两大类, 这是两类统计性质完全不同的粒子。超对称性是一种关于玻色子和费米子的对称性, $N=2$ 超对称是比最基本的 $N=1$ 超对称限制更强的一种超对称, 前面提到的粒子物理的标准模型不是超对称性的理论($N=0$, Seiberg-Witten 的结果并不能立即用来解决现实的理论问题。在 Seiberg-Witten 考虑的理论中, 磁单极子起着非常重要的作用。磁单极子最早是由英国物理学家狄拉克在 30 年代初期从理论上讨论的, 后来在 70 年代中期由于出现在大统一模型和其他模型中又激起了人们极大的兴趣。由于实验上一直没有找到磁单极子, 一般认为磁单极子是很重的。在 $N=2$ 超对称规范理论中, 磁单极子的性质非常奇怪: 随着理论中参数的变化, 相互作用的强度越来越大, 磁单极子将转变为质量为零的粒子。Seiberg-Witten 证明了理论实际上有另外一种等价的对偶描述, 在对偶描述下, 电与磁是原来理论中的磁与电, 两者是互换了的, 电子与磁单极子是互换的, 强的相互作用与弱的相互作用也是互换的。因此, 可以利用这种对偶变换将强的相互作用问题化为弱的相互作用问题, 然后用微扰论求近似解的方法解决。在对偶理论中, 夸克禁闭的现象实际上就是通常的超导现象, 这时两个磁单极子结合成一对给出有质量的规范场形成能隙, 在原有理论中这就导致了电通量禁闭, 电通量是由带电夸克给出的, 电通量的禁闭就是夸克禁闭。由于磁单极子结合成对是由一破缺 $N=2$ 到 $N=1$ 超对称质量项给出的, 以上结果实际上证明了 $N=1$ 超对称理论是有夸克禁闭的。利用 Seiberg-Witten 理论, 可以严格求解和定性讨论一大批 $N=1$ 和 $N=2$ 超对称规范理论, 毫无疑问, 这些结果和方法将会部分地应用于通常的非超对称理论如标准模型。在数学上, 利用 Seiberg-Witten 的结果, 已经成功地发展了一套强有力的研究四维流形微分拓扑性质的极有效的新方法。此外关于对偶性的研究又触发了人们对超弦理论的新认识, 这些突破被许多著名物理学家猜测将引起本世纪自相对论和量子力学以来的又一次物理学的重要革命。

在量子论中, 把 electric field 的 Maxwell's equation 量子化后, 发展成为 quantum electrodynamics, 简称 QED; 它是以 Maxwell's equation 和 Dirac's equation 为基础, 研究电子、正电子和光子之间的相互作用的量子理论。QED 的基本观点是: 传递电磁作用的是一种叫做光子的玻色子, 自旋为 1, 静质量为 0; 可以将电磁力解释为光子的交换。到目前为止, QED 对各种物理过程的理论计算, 都和实验结果高精度地符合, 表明它有正确反映客观规律性的一面。

量子色动力学是称为夸克和胶子的学问。从应用上来说, 首先要分清量子色荷云的两种情况: 一是能掌握大型强子对撞机做量子色动力学实验的人, 他们可以直接进入内源性量子色荷云研究。二是不能掌握大型强子对撞机做量子色动力学实验的人, 但又希望从自然全息的角度, 解读一些在量子电动力学以下层次不能解读的实验现象和自然现象时; 或者他们认为在量子电动力学以下层次解读, 还可能不完善时, 再用外源性量子色荷云来探讨, 也许能提供一些启示或参考。但具体是不是, 仍需进入大型强子对撞机的内源性量子色荷云的实验。

外源性量子色荷云的探讨, 也可类比迈斯纳效应。1933 年迈斯纳和奥森菲尔德发现, 磁场不能渗透到超导体内部, 而只限于其很薄表层。这打破了超导体可以让电流毫无阻力地流过的第一特性的地位。因为按迈斯纳效应, 如果把一个具有超导性质的物体放在外磁场中, 物体必然会由于某种特性将磁场排开, 因此物体内部没有净磁场, 物体只能通过自身产生一个大小相等方向相反的磁场来确保这种抵消。但磁场产生于电流, 因此为了产生使体内磁场抵消为零的磁场, 超导体必须能够支持电流无限期地存在下去。超导体存在的这种反屏蔽现象, 对量子色动力学实验, 如维尔切克和李政道等对夸克禁闭的渐进自由和色动反屏蔽解释, 都受到迈斯纳效应的启发。

维尔切克说, 迈斯纳效应不仅能应用于真实的磁场, 而且还可以应用到那些出现量子涨落的地方。超导体抵消涨落磁场方面的虚光子, 使得实际光子在超导体内很难生存。要形成具有自我更新能力的场涨落, 就需要更多的能量, 光子表现为非零质量, 即光子是重的。而且电场力和磁场力的电荷源和虚光子之间相互作

用，粒子 A 影响着它周围的场涨落，后者又影响到另一个粒子 B，这就是关于 A 和 B 之间为什么会费曼图的最基本的图像。这实际提供了类似量子色荷云流之间的作用原理。

根据高能电子-核子深度非弹性散射实验，电子对核子的深度非弹性散射所描述的高能碰撞现象的强子结构模型显示，在核子内部电荷的分布，不是连续分布而是集中在一些点上。从电荷结构来看，核子内部存在一些带电的点粒子。1969 年费曼提出部分子模型，认为强子是由许多带电的点粒子构成，这些点粒子称为部分子，在高能电磁相互作用和弱相互作用过程中，可以近似作为相互独立的粒子。部分子模型是从实验事实出发而提出的理论，在解释高能碰撞现象中取得了一系列成功，同时也通过与实验的对比分析表明，在电子深度非弹性散射中，探测到的带电部分子具有 1/2 自旋，实际上就是夸克或反夸克。这就成为夸克-部分子模型。这个模型认为，由于强子是由夸克通过色相互作用结合成的复合粒子，强子内的部分子可以由三类粒子组成：

一类称为价夸克，它们的数目和味是确定的并随不同强子而不同，价夸克决定强子的性质；

一类称为海夸克，它们的数目和味是不确定的，但其总和的味性质和真空相同；

一类称为胶子，它们的数目不定，其味性质和真空相同，起传递色相互作用的作用。

这个模型认为，决定强子内部结构的动力学机制是量子色动力学，并充分利用部分子模型中发展的方法来进行处理：既然在强子内部存在胶子，胶子就可以转化为夸克-反夸克对。夸克-反夸克对又可以湮没为胶子。所以，在强子内部也还存在数目未知，然而确定的夸克-反夸克对。这些夸克称为海夸克，或微夸克。

1) 国际上，夸克在 1963 年就被提出。夸克有三种“颜色”的区别，1964 年就已经提出。这些都得到国际科学界的公认，但快半个世纪了，量子色动力学并未在我国普及。在中科院如周天龙等一些老科学家中，至今也还有不承认夸克的存在。

在量子色动力学和大统一理论中，量子色荷或广义荷是利用对称群和超对称群的专用数学来论述的。这类似随着对称性的增加，不同类型的荷之间的转变有更多的可能性，有更多种类类似胶子/光子 r/W 、 Z 等的规范子来实施： $SO(10) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1)$ ，这些变换和这种缩并，可以解释（强 \times 弱 \times 超荷）的基本对称性，向具有长程结果（强 \times 电磁）的转变。而荷账本也可以将夸克变成轻子或反夸克，质子变成正电子和光子的衰变。虽然这种事情，现实中很少发生，且衰变速率高，也是大麻烦。但利用物质有多色彩、多层级的性质，也能抑制不需要的进程，同时保持基本的统一对称性。这里，是把对称性和群论联系起来，对称性和群论也把自旋和堆垒圈态三旋联系起来。道理是，以不对称三角形和等边三角形的转动来演示群论，群论类似分数自旋。即等边三角形围绕中心转过 120 度，不会改变位形。而移动不对称三角形，就会改变它的位形。这里，等边三角形具有非平凡的对称性，它允许区分没有任何差别的、具有深刻的群论思想和自旋规范思想。

因为杨振宁院士把等边三角形的非平凡的对称性，扩张到球面的非平凡的对称性上，球面围绕水平的垂直线向上的轴的自旋，与球面围绕水平的垂直线向下的轴的自旋，其自转 360 度一周，处于不同位置的所有自旋态排列情形的集合，有变的和不变的。这里的各种自旋态位形的堆垒，是杨振宁院士创立规范场论广义荷的基本思路，也是量子色动力学模仿的先导。

因为如果等边三角形具有更复杂的对称性，即等边三角形是具有不同边的三角形，如分别是红、蓝、绿的具有不同“颜色”边的等边三角形，经过 120 度转动变化，就有变化；但整套 3 个作为集合，则仍变换到本身，这就是正统量子色动力学创立的思路。这种思路有一个缺陷，就是“颜色”是虚设的，并没有物理学意义。三旋量子色动力学是沿着杨振宁院士的规范场论广义荷的道路前进，把杨振宁院士的球面的非平凡的对称性自旋，扩张为环面的非平凡的对称性自旋，即三旋，再代换到正统的量子色动力学中，“颜色”就不是虚设的，而有了明确的物理学意义。

2) 从量子球面自旋到量子圈态自旋与量子色荷的联系，对非常不同的强作用、弱作用、电磁作用和引力作用等之间，存在惊人的相似性，提示了各自不同的对称性，可能是更大对称性下的次级对称性。额外的对称性，容许方程以更多的方式转动回自身。如果基本方程能够通过增设取得的更大对称性局部模式，获得量子色动能，或者弱力能源，这就能联系到细胞凋亡学说和基因学说之间对应的区别和相似，因为这类对应衰变反应的量子色动能工程和类似裂变、聚变反应的原子弹、氢弹工程之间的区别和相似。其次，原子弹、氢弹的裂变、聚变反应，具有强烈的核辐射污染。但辐射任何东西都有，两者相比取其轻。如此联系凋亡和死亡之间的区别和相似，是微妙的。衰变反应和裂变、聚变反应之间的区别和相似，也是微妙的。量子色动力学涉及真空的无中生有，或量子起伏，或量子涨落。由于在量子电动力学实验中，以上真空极化的影响不论从定性还是定量上都很小，就近乎碎片和喷注是一种确定性的量子以太论。但在量子色动力学实验中，碎片和喷注，是不确定性和非决定论的量子以太论，它不是简单的确定性或决定论能容纳的。这里，量子色动

力学实验有软辐射和硬辐射之分。软辐射，其中电子和正电子湮没成一个虚光子，然后这个虚光子又生成夸克-反夸克对，其扰动小。但因硬辐射会引起大量的软辐射，并造成三喷注、四喷注。所以量子电动力学的对称性原理的一些要求，仅是在缺乏相反的实验证据下的一种假设。例如 1998 年费米实验室的硬辐射实验，就得到令人吃惊的结果：反下夸克的数量大大超过了反上夸克。即不存在一种对称性原理要求质子的反上夸克分布同它的反上夸克的分布相同。质子的内部聚集着大量的软夸克和软胶子，价夸克沉浸在不断变化的低能胶子、夸克和反夸克的“海”中。夸克海，不对称且充满了胶。因此真空的以太凝聚爆炸方程，或喷注方程是：(无) = 夸克 + 反夸克 + 能量，这里的夸克和反夸克各是 6 种价味，每种价味又各是 3 种颜色。

在 E·H·Wichmann 所著《伯克利物理学教程》第四卷中写道：“我们达到了一个极限：把电子看成是由其它更基本的粒子所组成，就显得不合情理和无用了。”该书又写道：“今天没有人企图根据物质是无限可分的前提来创立一个全面的物质理论，这样一种企图将是无益的。”目前认为夸克和一些轻子是组成自然界所有物质的不可再分割的“基本粒子”。近代发展的物理学基础理论都是以这种观点为基础的。

汤川秀树认为：“基本粒子的本性不能和空间本身的结构孤立起来加以考虑。在 1960 年某日，终于将我的苦心思索结晶为基元域的概念：如果任何形式的能量开始和真空发生联系了，那么，按照这种联系方式的不同，我们就可以把它看成一种物质和粒子式的表现，甚至看成一个基本粒子。如果我们想象这个区域变得无限地小，那么，在极限情况下，它就将和一个点粒子相当，从而我们的理论表述就会和从前一样地遇到困难。因此，我们就给这个区域的尺寸规定一个下限，即一个对应于最小时空量子的极限，这就是一个不能再进一步有意义地细分的区域。我们可以把它叫做基元域。在某些年轻一代的物理学家看来，理论物理学被归结为用抽象群数来补充的复变量复值函数的数学了。这种片面的抽象化趋势缺乏某种对于创造性思维来说是很重要的东西。最近二、三十年中，没有出现物理学家的思维方面的真正革命。换句话说，在 1905 年建立起来的狭义相对论，以及在二十年代建立起来的量子力学，它们的基本概念都没有在本质上发生变化，而只是抽象进步了。如果我们更加注意直觉式大胆地想象来作为不可避免的抽象化趋势的一种补充，基础物理学的又一次返老还童是可以期望的。我坚信用某种方法可以合理地把握住基本粒子的结构，而且，当然我正在为寻找可能的答案而费脑筋。我相信，这样的一天会到来。那时，我们将知道基本粒子的内心，即使这一切不会像庄子知道鱼的内心那样简单，但为了作到这一点，我们也许必须采取冲破现有知识框框的奇妙的思维方法。……在古代印度有将时间本身也作为“不知道它是什么实体”来考虑的倾向。并且，还同样地认为，时间也存在有不可分割的最小单位，将它称之为“刹那”。将这种“刹那”用今天的时间单位来度量的话，大约为十分之一秒……关于基本粒子理论今后进一步的发展，说不定会是古印度物质观的思想经过某种形式的复活吧。把印度的极微观与古希腊的原子论观点相比较，不难看出，前者要较后者更为接近现代科学的观点。”

粒子物理的标准模型理论，它包含弱电统一规范理论和量子色动力学。这一理论成功地经受了大量实验的检验，但又面临着一些十分尖锐的挑战，有待进一步的检验和发展。电弱对称破缺机制、CP 破坏产生的机制、夸克禁闭、费米子质量起源这样一些基本理论问题都尚未得到解决。美国物理学家 L·斯莫林在认真梳理物理学发展史后，在《物理学的困惑》一书中总结道，“从 18 世纪 80 年代到 20 世纪 70 年代，我们关于物理学基础的认识，大概每 10 年就有一次大的进步。但自 20 世纪 70 年代以来，我们对基本粒子物理学的认识还没有一个真正的突破。”

附录：1、本报莫斯科 2 月 14 日电（记者 董映璧）一个由俄罗斯、比利时和德国科学家组成的国际科研小组，首次在实验中观察到了中子衰变的新方式——放射 β (beta) 衰变，即一个自由中子衰变成质子、电子、反中微子和光子。有关专家指出，该科研成果对粒子物理的研究有重要意义。

中子是基本粒子的一种，是原子核的组成部分。1932 年，英国物理学家乍得威克首次发现了中子。中子具有与质子大约相同的质量，属于重子类，由两个底夸克和一个顶夸克构成。绝大多数的原子核都由中子和质子组成（仅有一种氢原子的同位素例外，它由一个质子构成）。在原子核外，中子性质不稳定，半衰期为 15 分钟。基本粒子学理论认为，所有与带电粒子碰撞的反应形式都应释放出光子。但由于光子的能量很小，技术上很难“捕获”。目前，通过实验观察到的中子衰变方式只有一种，即衰变成质子、电子和反中微子，而没有观察到释放出的光子。多年来，一个由俄罗斯、比利时和德国科学家组成的国际科研小组，一直致力于中子衰变方式的研究。最近，研究人员使用三度重合的低能粒子记录技术：同时记录电子、光子的飞行时间和质子获得的脉冲能量，首次在实验中发现了中子的一种新衰变方式——放射 β 衰变，即衰变成质子、电子、反中微子和光子。实验还发现，平均 300 分之一的自由中子能够释放光子。据悉，2002 年该科研小组曾进行过类似的实验，但由于记录设备的灵敏度不够，未获得成功。之后，研究人员设法提高了低能粒子的实验记录精度，终于获得了成功。在未来的实验中，研究人员还有望将实验记录精度能提高 10%，重复上述实验。

附录 2: 据《科技日报》2007 年 9 月 19 日,“最新发现与创新”专栏报道,美国科学家新发现中子“庐山真面目”。结构如同三明治,正负电荷夹在其中。中子在内部中心和外部边缘各有一个负电荷,而在其间,像三明治一样,每一层有一个正电荷夹在其中,使中子呈电中性。华盛顿大学的物理学家杰拉尔德·米勒通过对美国和德国的加速器实验数据,进行分析得出中子内部有更复杂的电子结构,该分析发表在《物理评论快报》9 月 13 日电子版上。

3、一直来,物理学所采用的质子的半径为 0.8768 飞米,误差 ± 0.007 飞米,然而,电子一直以来被认为是“无大小的”粒子,直到现在,只有二种方法已经用来测量质子的半径。基于在一个质子和一个电子之间的交互作用的研究:在电子和质子之间的碰撞,或氢原子上(电子和质子构成)获得数据。在新的实验中,科学家使用 μ 介子取代氢原子中的电子。 μ 介子是一种带负电、质量为电子 207 倍的基本粒子,最新实验将精确度提高了 10 多倍,同样地他们没有考虑“ μ 介子的大小”,测量出来的数据是 0.8418 飞米,误差 ± 0.0007 飞米。

科学家的实验将精确度提高了 10 多倍,而测量出来的质子的半径比以前所采用的质子的半径要小 4%,这使现在的物理学面临一个困难的问题:要么阐释光和物质相互作用的量子力学理论本身有问题,要么基于现有质子大小计算和使用的里德伯常量是错误的。另外,一个重要的科学家们所没有考虑到的问题,就是现在的物理学忽略了“电子的大小”和“ μ 介子的大小”。

据美国物理学家组织网 7 月 8 日(北京时间)报道,科学家在最新出版的《自然》(Nature)杂志指出,质子的半径比以前认为的要小 4%。如果这个结论在未来进一步获得证实,那意味着,要么阐释光和物质相互作用的量子电动力学理论本身有问题,要么许多基于现有质子大小计算所使用的里德伯常量(原子物理学中的基本物理常量之一,为一经验常数)是错误的。不管是何种情况,都意味着我们需要重写基础物理理论。

一个由德国马克斯·普朗克研究所的伦道夫·波尔领导、有 32 名科学家参与的国际研究团队表示,他们的最新实验将精确度提高了 10 多倍,结果表明,质子半径要比以前认为的小 4%。或许,用来计算质子大小的里德伯常量将失去价值,如果出现这种情况,其他基础的计算也都要重新修订。

英国国家物理实验所的杰夫·弗劳尔斯表示,如果该研究获得证实,其意义可能要远远大于耗资 100 多亿美元的欧洲粒子物理研究所正在进行的测试所谓“标准模型”的碰撞,将会把粒子物理理论带入新的领域。

法国巴黎第六大学卡斯特勒·布罗塞尔实验室主任保罗·印第里卡托指出,现在很多理论学家准备重新进行演算,另外,还需要更多的实验来证实或者推翻新的结论。在接下来的两年内,该研究团队将使用同样的设备,使用含有 μ 介子的氦原子再进行一次实验。不管结果如何,都说明物理学还蒙着很多神秘的“面纱”,需要人们逐一揭开。

作者:刘霞
来源:科技日报

4、《自然》:特定情况下电子变重之谜破解——有助于探索重费米子特性和功能,研发新的高温超导物质

近日,美国和加拿大科学家通过频谱成像扫描隧道显微镜(SI-STM)获得了电子通过 URu₂Si₂ 晶体时明显变得更“重”的首幅照片。科学家认为该研究有助于探索重费米子的特性和功能,以研发出新的高温超导物质。相关研究发表在最新出版的《自然》(Nature)杂志上。

几十年来,物理学家们一直想弄清为什么电子在某些特定的情况下会比自然状态下重几百甚至几千倍。理解有关重费米子的这一现象将有助于设计出新的高温超导物质。美国布克海文国家实验室、加拿大麦马斯达大学和美国能源部下属的洛斯阿拉莫斯国家实验室的研究人员联合对这个问题进行了研究。

在该研究中,科学家的研究对象是由铀、钨和硅组成的物质 URu₂Si₂。该物质由加拿大麦马斯达大学的格雷姆·卢克团队合成,当被冷却到零下 256 摄氏度(17 开)时,该物质会发生相变。

以前,科学家认为,在更低温度下出现相变是因为某种“隐藏的秩序”。但是,科学家不能辨别出:这种“隐藏的秩序”同电子集体表现得像波一样相关,还是同单个电子与铀原子之间的相互作用相关。

研究人员使用频谱成像扫描隧道显微镜来观察电子经历相变时的“一举一动”,他们测量了此刻位于该物质表面的电子的波长和它们的能量,并由此计算出有效的电子质量。

该研究的领导者、布克海文国家实验室的物理学家谢默斯·戴维斯表示,研究结果表明,这些电子非常非常“重”——或许因为它们速度被变慢从而表现得非常重。

研究人员解释道,我们可以用足球比赛来理解这种现象。开球后,一对足球运动员在球场上奔跑,如果每个运动员能够毫无障碍地自由奔跑,整个团队就像一堆毫无关联的“电子”形成的波。但是,如果球场上摆满了一排一排的椅子,并且每个运动员在每次遇到一个椅子之后,都必须停留一会儿才能够继续在球场奔跑。在这种情况下,椅子就类似于铀原子,选手和椅子之间(电子和铀原子之间)的相互作用显然降低了原子的奔跑速度。

尽管遇到每一个铀原子时,电子减速仅仅持续一瞬间,但是,因为动能和质量有关,减速会使得电子显得比自由的电子的质量要大很多。新研究除了揭示相互作用是铀化合物中“隐藏的秩序”形成的原因外,还证明了 SI-STM 技术能够被用于“看见”重电子,这也给研究人员提供了一种思路,他们可以研发出更多的方式来“看见”这些现象。该研究团队正在使用新方法研究许多相关的化合物,以更好地理解重费米子系统。

5、核物质新形态的探索

迄今为止,已发现的稳定原子核 265 种,60 种天然放射性核,人工合成有 2400 种核,然而在核素图上,由中子滴落线、质子滴落线及自裂变半衰期大于 $1\mu\text{s}$ 的限制边界内所包围的核素应有 8000 余种,这表明有一大半核尚未被人们认识。根据目前的情况,考虑到可能的生成与鉴别方法,估计还可能被生成或鉴别 600 种左右的新核素,它们是世界各地有关实验室不惜耗费重金搜索的目标。

然而,随着远离 β 稳定线,未知新核素的生成截面也越来越小,寿命越来越短,使分离、生成和鉴别的难度越来越大。远离稳定线原子核研究在核物理学中占有特殊重要的地位。首先,这些核素具有一系列独特的性质,例如它们的中子、质子数之比异常,有的核结合能极大,有新的衰变方式,如高能 β 衰变、 β 延迟粒子发射、 β 延迟衰变、表面结团结构、形状共存以及中子滴落线附近核的反常大半径等。对这些独特现象的研究,有助于检验和发展现有的原子核理论。此外,现有的核结构模型,大部分是在 β 稳定线附近几百种核研究基础上建立起来的,如液滴模型、独立粒子核壳层模型、核集体模型等,它们都有待在远 β 稳定线的原子核研究中得到检验、深化与发展。随着新核素的生成与鉴别,以及随着对它们的衰变性质及核结构的研究,会不断地有新的现象被揭示,人们对核内部的结构以及运动规律的认识也将不断地深化。此外通过对远离 β 稳定线原子核的研究,还可能找到某些新的同位素和核燃料,为核能与核技术的应用提供新的能源。总之,核物质新形态的研究是一个十分广阔而又值得探索的新领域,这一领域中的任何新的进展都将能推动与它有关的原子物理、天体物理、核化学以及放射化学的进展。

在核物质新形态探索中,带有重要影响的有重离子核物理、极端条件下原子核以及夸克-胶子等离子体的研究。

1. 重离子核物理

这是近 30 年来,在核物理学研究中一个十分活跃又是极具有生命力的前沿领域。在本世纪 50 年代以前,人们在研究原子核的结构与变化时,只是利用质量小的轻离子,如氦核、氖核、质子、中子、电子和 γ 射线等轰击原子核,这一研究已取得了多方面的成果。从 50 年代到 60 年代中期,随着加速粒子能力的提高,人们开始使用高能碳、氮、氧核去轰击原子核,主要进行的是弹性散射与少数核子转移反应。从 60 到 80 年代,重离子核反应开始逐步成为获得人工超铀元素的主要手段。近 20 年来,大约以每年发现 30~40 种新核素的速度发展着。1982 年 5 月 11 日,美国劳伦斯-伯克利实验室(LBL)第一次成功地获得了地球上天然存在的最重元素铀的裸原子核,并将其加速到每个核子 147.7MeV 的能量,整个铀 238 离子的总能量达到 35GeV。在这个能量上,离子速度达到了光速的二分之一。LBL 的这一创举,不仅开创了相对论重离子物理学,而且使核物理的研究跨入一个以前无法触及的新领域,在这个新领域中,一些激动人心的奇特现象引起了物理界的高度重视。LBL 得到的高能铀离子是由一台称为贝瓦莱克(Bevalac)的加速装置获得的。这台加速装置由两部分组成。一部分是高能质子同步加速器,它只能把质子加速到 10 亿电子伏,是 40 多年前建成,如今早已废弃不用的老加速器,把它配了离子源和注入器,作为第一级加速器使用;另一部分是重离子加速器。通常,重原子的内层电子由于强库仑作用,被紧紧地束缚在原子核外的内层,Bevalac 先使铀原子部分电离,形成带少量正电荷的铀离子。然后,令其加速,当铀离子的速度超过核外电子的轨道速度时,使铀离子穿过某种金属膜,就会有相当多的电子被“剥离”,而形成带较多正电荷的铀离子,例如 $U68+$ 。再使 $U68+$ 继续加速,再使其通过聚酯树脂薄膜,得到 $U80+$ 和 $U81+$ 的离子混合物,最后再经过一层厚的钽膜,全部电子均被“剥”净,从而得到了绝大多数的裸铀核。

应用高能重离子可以研究核裂变的异常行为。在一般的原子核中,库仑力与核力起着相互制约的作用。若核力较强,原子核比较稳定;若库仑力较强,核就容易裂变。由于中子只参与核力作用,似乎增加中子数可保持核的稳定,然而,核力的力程极短,随着距离增加,核力急剧下降,使原子有一个极限尺寸,超过这个极限,原子核将不能束缚更多的中子。可裂变的铀核正处于核力与库仑力相抗衡的状态,它们稍微受到接

触就会裂解,之后,库仑力占优势,使核裂片互相分离。在 Bevalac 中产生的相对论性高速铀核就可以用来研究高能下核裂变行为。果然,把高能裸核注入乳胶探测器中,通过对径迹分析发现,铀核与探测器物质原子核相撞,出现了一系列奇特现象。例如,在 152 个碰撞事例中,有半数事例的铀核分裂成大小相差不多的两块,另外半数事件却分裂成数块,甚至在 18% 的事例中,铀核被撞击粉碎,而且入射能量越高,这种粉碎的事例越多,这类事件是高能核裂变的一种反常行为。

用类氦铀原子还可以对量子电动力学(QED)进行检验。根据量子电动力学,原子体系的跃迁能量可以用一个数学式表述,这是一系列幂指数渐增的连续项求和式,其中每一项都含有原子序数和精细结构常数。过去,在把这个表述式用于氢和氦等简单原子时,由于较高阶项带来的修正在实验中不易被察觉,常被略去不计,可是对于类氦铀原子,这些高阶项却起着重要作用,在这种情况下,将对 QED 的理论进行高阶次的检验。在重离子实验中,还发现了一种具有奇特性质的“畸形子”,这是一种比通常的核更容易与物质发生作用的原子核或核碎片。当它们穿透物质时,在没有到达正常深度前,就已经与物质发生了作用,所以它们在靶中的运动深度比正常核碎片浅得多。近年来的一些高能重离子实验表明,大约有 3%~5% 的核碎片属于畸形子。有一种说法认为,它们可能就是一种“夸克-胶子”等离子体。在这类等离子体中,中子、质子已被破坏得失去原来的特性,只剩下一团夸克和体现夸克间相互作用力的胶子。

包括 LBL,目前世界上共有 4 台高能加速器作为重离子核反应的研究基地。到 1982 年为止,LBL 已经能加速直到铀元素的全部重离子;美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)可以把 16O、32S、192Au 加速到 15GeV/N(eV/N 为每核子电子伏);欧洲原子核研究中心(CERN)可以把 16O、32S 加速到 60GeV/N;美国布鲁克海汶国家实验室拟在 1996 年建成的相对论重离子对撞机(RHIC),投资 4 亿美元。它建在原本为建造质子-质子对撞机所开掘的隧道里,隧道周长 3.8km。它包括两个巨大的超导磁环,最大磁场 3.8T,可以使质量数小于或等于 200 的离子能量达到 100GeV/N。它的一个重要目的就是研究在高温、高密条件下,实现普通核到夸克-胶子等离子体的相变。在今后的 20 年内,相对论重离子物理可望获得重要进展。

2. 相对论重离子物理研究

(1)探索夸克-胶子等离子体(QGP)

相对论重离子物理学是近年来发展较快的核物理前沿领域,也是今后若干年内核物理的重要研究方向之一。它主要是研究在极高温度(达到 1012K,即太阳中心温度的 60000 倍)以及极高密度(10 倍于正常核物质密度)下,核由强子态向夸克物质态,即夸克-胶子等离子体的相变。这项研究具有极其重要的意义。首先,夸克-胶子等离子体是人们长期以来渴望求到却又难以得到的一种物质形态。夸克-胶子等离子体与一般的电的等离子体不同,在夸克-胶子等离子体中,夸克在强子外是自由的,而整体上又是色中性的。如果说,上一世纪给本世纪留下了两个谜,一个是无绝对的惯性系,一个是波-粒二象性,这两个谜已随着爱因斯坦的相对论及量子力学的建成得以解决,那么,本世纪粒子物理学的发展又使另外两个更深层次的谜,一是对称性破缺,一是夸克禁闭呈现了出来。当前,描述自然界四种基本作用的理论是,描述强相互作用的量子色动力学(QCD),描述电-弱相互作用的 SU(2)×U(1)的模型理论,描述引力作用的广义相对论,这些理论的最终统一将使这两个谜获得最终解决,而相对论重离子物理研究又直接与这两个谜相关,正因如此,有人称这项研究具有“世纪性的地位”。根据核的相变理论,在正常温度和正常密度 ρ_N 条件下,一般核物质处于正常核态;但当密度达到 $2\rho_N$ 时,可能出现 π 凝聚,这是核物质具有较高秩序的状态,类似晶体点阵排列的原子;当密度达到 $5\rho_N$ 左右,单个核子产生许多新的激发能级,核变为激发态的强子物质;若再进一步压缩核物质,使密度达到 $10\rho_N$ 左右,核由强子激发态继续发生相变,此时出现解除夸克禁闭,夸克跑出核子外,在比核子大得多的范围内自由运动。此时,夸克与夸克间相互作用粒子组成夸克-胶子等离子体(QGP)。虽然这种理论分析尚有许多不确定因素,却引起了许多人的兴趣。人们一致认为,高能重离子反应是实现这一相变的最有希望的途径。有人估计,要实现普通核的非禁闭相变,核碰撞质心能量要达到 100GeV/N。预计在 1996 年建成的美国布鲁克海汶国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)将能满足这一要求。

(2)格点规范场理论对相变条件的预言

为探索夸克-胶子等离子体,首先应从理论上估计核物质由强子态向夸克-等离子体相变发生的条件。先从核物质密度与强子密度之差估算相变所需要的能量。其结果是,当核密度提高到正常态的 4 倍时,相变即可实施。然而这种方法仅只是一种估算,精确的方法应采用格点规范理论。在强子尺度的小范围内,研究夸克的物质运动规律时,量子色动力学采用了微扰展开的方法,这种微扰法取得了很大的成功。但是在大于强子的尺度上,夸克-胶子的等效相互作用强度并不小,由于交换动量的结果,使夸克-胶子体系产生了各种非微扰量,原来的微扰法不再适用。在强相互作用中,这种非微扰效应表现在多方面。从粒子的质量看,质子的质量恰好是 938MeV, Δ 粒子的质量是 1236MeV, π^0 介子质量是 135MeV,为什么它们恰好是上述值,这

实际上就是一种由非微扰效应产生的结果。此外，粒子的寿命、衰变现象、零点波函数、磁矩、结构函数甚至真空结构等，也都是夸克-胶子在大距离上的作用效应，也属于非微扰效应产生的结果。这些现象与非微扰效应的关系，是粒子物理学中十分重要而又未被完全开发的领域。1974年，美国康奈尔大学的威尔逊(K.G. Welson)提出了格点规范场理论，用以解释非微扰现象。其作法是，先设法在4维时空中取一系列等间隔的格点，连续的时空被一系列离散的格点所代替。他规定，胶子规范场只在格点间的键上起作用，而夸克费密场则定义在格点上。由上述场量组成的格点作用量具有规范不变性。当格点间的距离趋于零时，格点作用量趋于原有的量子色动力学作用量，格点规范理论趋于连续时空的规范理论，与连续时空的渐近自由相对应。下一步做法是，先在格点体系中计算各个物理量，然后再把格点间距趋于零，就可望得到真正的物理量，特别是那些非微扰量了。

事实上，微观世界中的微扰量与非微扰量本是为人为地划分出来的。当认识水平未达到一定的层次时，先讨论微扰量只是一种对复杂事物的简单处理方法。格点规范场理论的建立表明，人的认识水平又向更高层次迈进了一步。此外，由于粒子物理与统计物理的研究对象都是有无穷多自由度的体系，格点微扰理论把它们之间的相似性突出地表现了出来。然而，格点规范理论的计算是很复杂的，因为每个格点有四个正方向共四个键，在SU(3)规范不变条件下，每个键有8个独立变量，每个格点又有正反夸克场，每个夸克场有4个Dirac分量，有三种色，至少有四种味，这样一来，对于每边有16个格点的四维立方体，就有200万个独立变量。由于系统复杂，目前尚不能使用解析方法求解。但是由于理论的规范不变性，使讨论对象具有群积分的性质，可以用数值计算方法计算。1981年，帕瑞西等人利用布鲁克海汶国家实验室的大型计算机，使用抽样计数方法，即蒙特卡罗数值计算法，计算了这些群积分，不仅首次得到了 π 介子、质子、 Δ 粒子等强子的质量，而且还得到了 π 介子衰变常数以及标志手征对称性自发破缺不为零的数值。以后，又有人用同样方法计算出更有意义的结果，例如证实了两个重夸克之间的位势随距离的增加，呈现由库仑位势向线性位势的变化。这一结果证明了夸克之间距离加大时，存在有越来越大的作用力，结果使它们“禁闭”起来（渐近自由）。计算结果还显示，温度增加到一定程度，即高能粒子互撞时，夸克的自由能突然加大。这表明，在高能散射中，它们有可能从“禁闭”中被“解放”出来，相变的临界温度为200MeV、密度为正常核密度的5倍以上，达到这一条件相变即有可能发生，这一结果确实给人极大的鼓舞。

3. 实验尝试

1986年，欧洲原子核研究中心(CERN)在SPS加速器上首次进行了(60GeV~200GeV)/N的氧束流冲击重靶的实验，这是一次较为成功的相对论重离子实验。在这以前所做的有关实验，如CERN的p-p, α - α 实验；费密实验室的p-p实验，虽然能量很高，但由于碰撞粒子的质量太轻，高能密度聚集的范围太小，而LBL的Bevalac上做的Kr束打靶实验，虽然粒子足够重，但每个核子的能量只有1.8GeV，这个值又太低，使碰撞区的温度不够高。还有的虽然能量足够高，但实验的统计性又太差，事例数太少，都未能获得成功。

在CERN的这次成功实验中，发现了人们所期待的“ J/ψ 抑制效应”，它是QGP存在的迹象之一。根据理论分析， J/ψ 粒子有三种衰变方式，它可能衰变成两个电子， e^+ 和 e^- ；还可能衰变成两个 μ 子， μ^+ 和 μ^- ；或者衰变成强子。在高能碰撞中，强子也可能产生 J/ψ 粒子。 J/ψ 粒子可以看作由c和 \bar{c} 粒子组成，自由的c对存在有束缚态。当有QGP产生时，由于德拜屏蔽效应的存在，会抑制c束缚态的出现，因而不能组成 J/ψ 粒子，或者说 J/ψ 中产生的几率下降，于是 J/ψ 中粒子产额抑制现象常被当作为QGP出现的信号。

CERN使用的是200GeV/N的32S打击238U，所形成的体系可能是发射 π 介子和K介子，也可能发射 J/ψ 粒子， J/ψ 粒子又可能再衰变，通过衰变粒子，如 μ^+ 和 μ^- ，来判断 J/ψ 粒子的产额。在碰撞区形成一团火球，边缘地区的 J/ψ 粒子产额竟然是火球中心的1.6倍，由此判定，碰撞中心出现了 J/ψ 抑制，即有产生QGP的迹象。

另一个显示出现QGP迹象的实验是在美国布鲁克海汶国家实验室进行的，这是测定 K^+/π^+ 比例的实验。他们使用了14.5GeV/N的28Si束打击Au靶，观测 K^+ 与 π^+ 产额之比，并与质子对撞情况相比较。他们认为，如果有QGP产生， π^+ 、 K^- 和 π^+ 产额将减少，至多是不变，而 K^+ 的产额却要增加，这样一来，有QGP时， K^+/π^+ 产额比值应加大。他们的实验结果是：28Si打击Au后， K^+/π^+ 产额比值由质子对撞时的0.07上升为0.20，而 K^-/π^- 的比值则与质子对撞时一样。

重离子对撞实验是很复杂的。根据理论计算，在现有的条件下，对撞区的温度可达到200MeV左右，这个温度在相变临界温度附近，所形成的火球的横向半径大约有4.3~8.1fm，径向半径约有2.6~5.6fm。一个碰撞事例往往可以产生500个以上的次级粒子，处理这样复杂的事例以及处理如此大量的特征信号是件极为困难的事，因此，通过上述特征估计QGP的形成仍只是一种试探。即使如此，由于理论物理学家已给出相变存在的可能性，也由于实验物理学家又较成功地处理了如此复杂的反应事例，还由于相对论重离子碰撞实

验已达到了理论预言的能区,更由于这项研究目标所具有的深远的意义,这一切都使得夸克-胶子等离子体的研究成为核物理学前沿的热点课题之一。

4. 奇异核

近年来所发现的另一种核物质的新形态是包含其它强子的核多体系统,又称奇异核,例如 Λ 超核、 Z 超核以及反质子核等。目前只有 Λ 超核为实验所肯定,已开展了一些 Λ 超核谱学及生成 Λ 超核机制的研究。 Λ 超核最初是在宇宙射线研究中发现的。1952年,波兰物理学家M.丹尼什和J.普涅夫斯基从暴露在宇宙射线核乳胶中,发现一个特殊的事例。这是一个高能质子击碎了核乳胶中的银原子,产生的一个碎片,再通过发射带电 π 介子和一个质子衰变,碎片衰变的特征与理论上预料的 Λ 超子完全相同,因而认定这个碎片就是包含 Λ 超子的 Λ 超核。 Λ 超子是最轻的奇异重子,根据强相互作用要求,它的奇异数与重子数守恒,因而 Λ 超子在核物质中相对强相互作用是稳定的,只能产生弱相互作用衰变。 Λ 超核与 Λ 超子有几乎相同的寿命,因而在实验中可以比较容易地观察到 Λ 超核。到目前为止,已经在实验中观察到几十种 Λ 超核以及包含两个 Λ 超子的双超核,甚至包含若干个 Λ 超子的 Σ 超核。超核的发现,不仅打破了过去原子核只是由中子、质子组成的传统看法,而且通过超核的研究,还进一步获得了有关核结构与强相互作用的认识。超核物理已成为中、高能原子核物理研究的一个重要分支领域。奇异核伴随有奇异的现象。首先,与普通核相比,奇异核有着特殊的衰变方式。普通核的衰变类型有: α 衰变、 β 衰变(包括电子俘获过程)、 γ 衰变(包括内变换过程)和自发裂变等,奇异核则除了上述方式外,还有一些奇异的衰变方式。例如,奇异核 β 衰变可释放很高的能量,经 β 衰变后的末态核仍处于较高的激发态,若这一激发态的能量高于其中的核子或核子集团的结合能时,这个末态核仍有可能把多余的能量释放出来,退激发而变为一种新的核,称为子核。这种奇异衰变分为两个阶段,同时有三代核素参与,然而由于第一阶段的 β 衰变比第二阶段缓慢得多,在实验观测时,仅观察到第一阶段的 β 半衰期,故常把这种放射性称为 β 延迟粒子发射,或缓发粒子发射。其实,早在1916年卢瑟福(Rutherford, Ernest 1871~1937)和伍德(Wood, Robert Williams 1868~1955)在研究 ^{212}Bi 引起的荧光现象时,就曾发现在大量具有一定能量的 α 粒子中,混有少量具有较高能量的长射程 α 粒子,这实际上就是 β 衰变缓发 α 粒子。虽然他们观察到这个现象,却不明白其成因。直到1930年,伽莫夫(Gamow, George 1904~1968)也观测到了这个奇特的现象,才对它做出了解释。伽莫夫认为 ^{212}Bi 先经过 β 衰变到 ^{212}Po ,如果 ^{212}Po 处于激发态,它再放出带有该激发态能量的 α 粒子,这部分激发态能量转化为 α 粒子的动能,因而具有较高的能量。如果处于激发态的 ^{212}Po 先经过 γ 发射回到基态,就会发射低能量的 α 粒子。 ^{212}Bi 就是缓发 α 粒子的先驱核,而末态核发射 α 粒子后变为 ^{218}Po ,就是缓发 α 粒子的子核。卢瑟福、伽莫夫等人所观测到的 β 缓发衰变仅只是一种天然放射现象。

1937年,列维斯第一次人工地产生了 β 延迟 α 发射的先驱核 ^8Li 。1939年,罗伯茨又在中子轰击铀的实验中,首次探测到了 β 延迟的中子发射。50年代末,卡尔诺克霍夫首次观测并鉴别出 β 延迟的质子发射先驱核。此后,被发现的前驱核数量增加很快。近20多年来,大规模寻找缓发粒子的先驱核,并利用这种奇特的衰变方式研究奇异核的性质已成为核物理研究中的一个重要课题。

近十多年来,由于实验技术的发展,又陆续发现了 β 延迟衰变后两个或三个核子发射的奇异衰变方式。1979年9月欧洲原子核研究中心的一个研究组观测到了 β 延迟的二中子发射,以后又观测到三中子发射。1984年,劳伦斯-伯克利实验室的一个研究组在88英寸的回旋加速器上,观测到了土 ^{22}Al 的 β 延迟二质子发射现象。接着欧洲原子核研究中心又在线同位素分离器上发现了 ^{11}Li β 延迟 ^3He 和 ^3H 的衰变。在奇异衰变研究中,值得注意的是重离子的奇异放射研究方面的进展。1984年,牛津大学的一个研究小组发现了一个奇特的现象。 ^{223}Ra 的 α 衰变半衰期通常为11.4天,然而在这种衰变中,他们却发现了能量在30MeV的 ^{14}C 离子。这一现象出现的几率很小,大约在109衰变中才有一次,由于他们没有放过这个很容易被疏忽的现象,以后又陆续发现了 ^{222}Ra 、 ^{224}Ra 和 ^{226}Ra 的 ^{14}C 衰变; ^{230}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{232}U 、 ^{233}U 和 ^{234}U 的 ^{24}Ne 衰变以及 ^{234}U 的 ^{28}Mg 衰变。这一放射性所发射的实际上是核子集团,从而反映了核内核子的组合方式。对这一奇异现象的解释,以及寻找新的重离子发射核实验已经成为核物理中活跃的研究领域。除了奇异的衰变方式以外,奇异核还表现出奇异的形变特性。过去,通常把核认作为球形,如早期的核液滴模型以及独立粒子壳层模型等。1952年阿·玻尔和莫特逊提出了原子核集体模型,利用这一模型计算核在各种情况下的能量时发现,有些核在特定的变形下能量最低,稍微偏离这种变形,能量上升很快,这种核被称为硬的变形核;有的核在一定的变形范围内,能量的变化不大,被称为软的变形核。按照这一模型,除了核子可以在核内运动外,原子核还可以作为整体振动或转动。处于不同状态的核,具有不同的能量和角动量,并对应一定的形状,这些能量又不是连续的。通过大量的 β 稳定线附近的核研究,人们已经找到了核的能级分布与形状间的关系。当核转动时,如果形状发生变化,转动惯量相应改变,就会导致核转动能级分布情况变化。这一规律的研究

已成为研究奇异核的基础。在 70 年代, 实验上已经发现, 某些核可以有不同的形状, 它们对应着不同的能级, 有一组建立在球形基态上, 能级的间隔较宽; 另一组开始的间距较小, 后来越来越大, 它们对应着硬变形核的转动和振动。这种不同形状的状态在核中同时存在的现象, 称为形状共存现象。对这一现象的研究, 使过去曾被认为截然不同的异形核与变形核之间找到了某种联系。核的变形程度通常用一个参数 β 描述。 β 近似等于核长短轴之差与两轴平均长度之比。典型变形核的 β 值在 0.2~0.25 范围。 β 在 0.35~0.4 范围时, 称为超变形核。超变形核的第一激发态能级往往很低。 β 值及极低的第一激发态成为超变形核的两个判据。早在 1981 年, 摩勒和尼科斯就曾根据对奇异核研究的结果从理论上预言, 中子数和质子数在 38 附近的核, 属于自然界中最强变形的核。果然, 人们在远离 β 稳定线区域检验球壳层模型中发现, 质子数和中子数都接近幻数 40 的核, 如 ^{74}Kr 、 ^{76}Kr 核具有非常大的变形。目前, 奇异核研究已与重离子核物理相结合, 人们广泛采用中、高能重离子束, 通过弹核破裂的反应机制合成新的奇异核素, 并通过核素分离产生的次级奇异核束流研究奇异核反应及其性质。

在量子力学以前的背景下, 爱因斯坦的相对论很好地符合了一种自然的二元观, 即自然界存在两种事物, 一种是粒子, 另一种是场。而量子力学带来了更加统一的观点。在量子力学看来, 像电磁场那样的场的能量和动量也是以一束束的形式出现的, 那就是通常所说的光子; 它与其他粒子一样, 只是碰巧没有质量罢了。同样, 引力场的能量和动量也是以一束束引力子的形式出现的, 也是无质量的粒子。在量子力学里, 两个电子间的电磁力源于光子个交换; 同样, 光子与电子之间的力源于电子的交换。物质与力之间的差别基本上消失了, 任何粒子都可以充当某个力的承受者, 而它们的交换也能产生其他的力。结合相对论原理与量子力学的唯一途径是通过量子场论。量子力学和相对论之间几乎是不相容的, 但它们在量子场论中调和为粒子的相互作用方式, 这完全是一种逻辑的刚性, 为真实的基本理论赋予了美。物理学家想建立能描述更多现象的理论, 所以他们应该寻求尽可能有弹性的理论, 但在基础物理学中却不是。我们所谓寻找某种普遍的东西, 它统治着整个宇宙的一切现象。它能让我们严格描述那几个力——引力、弱电力、强力。物理学理论中的这种统一性是我们认为美的一部分。我们在物理学理论如广义相对论或麦克斯韦方程组中看到的美, 很像某些艺术品具有的美。它们都令我们感到这是自然的, 自然而然的, 我们不愿改变其中任何一个符号, 一个笔画或一根线条。不过, 正像我们欣赏音乐、绘画和诗歌一样, 那种自然的感觉是一种美的体验, 不可能从公式推导出来, 没什么逻辑的公式能在美的解释与单纯的数字罗列之间画出截然可分的界线, 但我们知道它们是不同的。一个原理有了简洁性和统一性, 我们才会认真看待它。所以, 我们的美学判断不是发现科学解释并判断其有效性的最终唯一方法, 我们在物理学中看到的美的形式是很有限的。如果用语言来表达, 我只能说那就是简洁性和统一性的美, 和谐的结构, 一切都恰到好处地组合在一起, 没有需要改变的东西, 存在着一种逻辑的自恰性, 那就是自然和古典的美。

在量子力学建立之初, 分别是由薛定谔和海森伯两人各自独立完成的。薛定谔建立的理论被称为波动力学; 而海森伯建立的理论被称为矩阵力学。后来由薛定谔证明了这两个理论完全是等价的, 并统一称作量子力学。海森伯在建立他的力学理论时, 提出了一个被称为海森伯乘法规则的计算法则, 但是这套数学方法当时的物理学家们并不熟悉, 而且他自己也没有把握。他把论文手稿送给 M 玻恩, 玻恩回忆起大学时老师罗斯森讲授过的代数理论, 这种法则就是 70 多年前已被创立的矩阵演算。所以海森伯的理论就被称为矩阵力学。如此的珠联璧合, 使人匪夷不解。数学家的美感是如何引出那么多年以后用于物理学的结构的, 尽管数学家可能对物理学应用一点兴趣也没有。

统计物理的一个基本思想是从成分粒子的动力学出发, 用统计的方法给出多粒子系统的宏观性质。而系综理论则是统计方法。但传统的物理课本中, 讨论的都是原子分子层次上的统计物理, 没有指明随着人类对物质基本结构及其动力学的认识发展, 会导致统计物理的重大发展。例如, 当人们对物质结构深入到核子这一层次时, 特别是建立了核子动力学的模型理论后, 出现了与这种动力学相应的统计热力学, 揭示有在核子层次上的物质形态——核物质或泛称强子物质。又如, 当人们对物质结构的认识深入到夸克这一层次, 建立了描述夸克相互作用的动力学——规范场论时, 就导致了夸克层次上的统计物理。其中特别引人注目的是以 QCD 为动力学的统计物理, 它预言了在夸克层次上的一种新物质形态——夸克物质或称夸克胶子等离子体, 开创了以探索夸克物质为目的的新的研究领域。

附录 1:

北京谱仪实验发现新粒子 X1835

2006 年 1 月 6 日, 北京谱仪国际合作组在北京中国科学院高能物理研究所和美国夏威夷大学同时宣布: 在北京正负电子对撞机上进行的北京谱仪实验观测到一个新粒子, 暂时命名其为 X1835 (X 表示其基本结构仍未确定)。

这个新粒子是在分析粲粒子 J/ψ 衰变到一个光子和三个介子的过程中被发现的。它的质量值约为 18.35 亿电子伏特（即 1835 兆电子伏特，约为 3.3×10^{-27} 千克），略低于二倍的质子质量值，而它的寿命非常短，仅为约 10-23 秒。该项研究成果去年 12 月 31 日已在国际著名期刊《物理评论快报》上发表，引起了国际高能物理界的极大兴趣。

X1835 粒子之所以引起国际高能物理界的广泛关注，不仅在于它是实验上观测到的一个新粒子，更因为它可能是在高能物理实验中寻找了几十年的新型粒子。粒子物理学家认为，夸克是自然界物质的最小组成单元之一，自然界已确认的参加强相互作用的粒子均由 2 个或 3 个夸克组成。粒子物理学家一直猜测应该存在新型粒子，包括由多于 3 个夸克组成的多夸克态粒子、由胶子（传播强相互作用力的基本粒子）和夸克混合组成的混杂态粒子以及由胶子组成的胶子球。因此，如果实验上发现这些新型粒子，无疑将是粒子物理研究的重大突破。因而这成为包括北京谱仪实验在内的许多高能物理实验的重要目标。

北京谱仪实验发现 X1835 粒子的消息披露后，粒子物理学家对它的基本结构进行了各种猜测。有些认为 X1835 可能与两年前北京谱仪在 J/ψ 粒子辐射衰变到质子-反质子过程中观测到的一个可能的新粒子是同一个粒子，因而可能是质子-反质子束缚态（一种由六个夸克组成的新型粒子）。还有一些粒子物理学家则认为它可能是胶子球或常规介子等。但目前的实验数据还不足以对这些理论解释和猜测做出最终判断，因而引起了粒子物理学家极大的兴趣和广泛的争论。最终确定 X1835 粒子的基本结构需要更大量的数据，并进行深入的实验和理论研究工作。

此项研究得到了国内理论物理学家的关心和大力支持，两年来理论物理学家和实验物理学家多次联合举行了针对北京谱仪实验一系列新发现的专题研讨会。理论和实验的联合研究对此项研究取得重大进展起了重要推动作用。在两方面的共同努力下，通过对 X1835 基本结构的深入研究，有望取得该研究领域的突破性进展，促进粒子物理基本理论的发展，加深我们对自然界的根本认识。

北京谱仪国际合作组是由来自中、美、日等国的二十多所大学和研究机构的物理学家组成，其中包括国内的 18 所大学和研究单位。近几年来，北京谱仪实验的物理分析研究取得了丰硕成果。合作组在国际一流期刊上发表了约 60 篇论文，尤其在多夸克态粒子寻找领域取得了一系列新发现，使我国高能物理实验研究在这一国际前沿领域处于领先地位。目前，北京正负电子对撞机和北京谱仪正在进行重大改造工程，计划在 2007 年年中投入运行，预期性能最终将提高 100 倍左右。届时将能获取比现有数据大约 100 倍的数据样本，在此基础上我们可以对 X1835 粒子等北京谱仪实验最近取得的一系列新发现进行更加深入的研究。

近日，新一届扩大后的北京谱仪国际合作组会议将在北京召开，来自中国、美国、日本、德国、瑞典和俄罗斯等国家的 100 多位高能物理学家将共同探讨如何在升级后的北京谱仪探测器上进一步加强合作，做出更多更好的物理工作。（中国科学院高能物理所实验物理中心 供稿）。

附录 2:新华社电 从宇宙空间辐射到地球的诸多射线中是否存在超高能量的“超级宇宙射线”，就这个问题持对立意见的日美两国科学家决定共同在美国犹他州的荒漠中展开庞大的观测计划。论证“超级宇宙射线”是否存在一直被认为是现代物理学的一大课题。所谓“超级宇宙射线”是指能量超过 10^{20} 次方电子伏特、数万亿倍于普通宇宙射线的一种射线。日本东京大学科学家从 1990 年开始相关观测，最终发表结果说，经过 13 年的观测，发现了“超级宇宙射线”。若想彻底弄清事实，必须精确地观测大量宇宙射线。日美两国科学家于是共同组成研究小组，建设“望远镜小路”（TA），并计划从 2007 年春天开始用几年时间进行观测，争取为这个争执不下的问题得出最终结论。《朝日新闻》日前报道说，正在建设中的“望远镜小路”位于美国犹他州州府盐湖城西南约 200 公里的荒漠中，占地面积达 760 平方公里，其中共设置 576 处粒子检测仪。这种仪器能够探测到宇宙射线命中大气中氮和氧的原子核时放出的粒子。（钱铮）

附录 2:

宇宙射线的各向异性及其围绕银河系中心旋转的证据
[羊八井宇宙射线实验中方合作组 2007 年 5 月 17 日]



中国科学院发布的 2007 年《科学发展报告》的第四章论文《宇宙射线的向异性及其围绕银河系中心旋转的证据》，是处在中国西部西藏羊八井宇宙射线实验中方合作组的力作。

人类身处的银河系是一个半径达几万光年的巨大空间，在这个巨大的空间中点缀着几千亿颗恒星。在浩瀚的星际空间中除了存在稀薄的气体物质外，还穿梭飞行着能量非常高的微观粒子。这些粒子的主要成分是带电原子核和电子，它们以接近光的速度飞行，被称为宇宙射线。由于在星际空间中还分布着强度以微高斯计的磁场，它们可以束缚银河系内的宇宙射线，使其不能够轻易逃逸出银河系。探测、研究宇宙射线的成分、能量及不同方向上的强度分布等，为我们提供了丰富的信息来了解宇宙射线的起源和在星际空间中的传播过程，同时也有助于我们了解银河系的磁场结构。

为了探索宇宙射线的奥秘，半个世纪以来我国科学家付出了长期艰苦不懈的努力。20 世纪 90 年代初，中日科学家合作在我国西藏自治区拉萨市西北约 90 公里处的羊八井建成了国际上著名的宇宙射线观测站（东经 90.5 度，北纬 30.1 度，海拔 4300 米，图 1 为观测站的全景图），中国方面由中国科学院高能物理研究所的谭有恒研究员负责，日本方面由东京大学宇宙线研究所的汤田利典教授负责。该观测站曾于 1995 年被美国《科学》杂志列为中国 25 个科研基地之一有六个可能的大科学计划之一，也曾被美国芝加哥大学的诺贝尔奖得主克罗宁（Cronin）教授誉为国际上最高品质的地面宇宙射线观测站。

现在羊八井宇宙射线观测站配备有中国与日本合作的西藏大气簇射探测器阵列（Tibet Air Shower Array，简称 ASY，图 1 中白点构成的阵列）和中国与意大利使用的羊八井天体物理辐射地基观测装置（Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing，简称 ARGO-YBJ，图 1 中右边的蓝顶实验大厅）。其中，ASY 大气簇射实验阵列已经建成运行了 16 年，并经历了 3 次大的改进，在高能宇宙射线观测实验研究中取得了独特而出色的研究成果；自 2000 年以来，ARGO-YBJ 也已经逐步建成，它的顺利运行将进一步提高羊八井宇宙射线实验的观测能力和范围。

得益于大视场的条件和稳定运行多年所获取的 400 亿个宇宙线事例，ASY 大气簇射实验发现，高能（介于万亿至数百亿电子伏特能量区间，作为对比，电子在五号电池的正负极间加速获得的能量为 1.5eV）宇宙射线的流强在不同的方向上会有“微小”的差异[见图 2 中的(a)、(b)]。为了理解这一最新的实验结果，我们可以想像一下地球表面上的大气。大气层基本上随地球的旋转而转动，并会由于太阳照射而造成温度和压力的差别从而使空气流动而形成风。迎着风的方向，空气流入量大，而在相反的方向上空气流入量则小。羊八井的实验结果同样表明，在太阳系附近观测到的宇宙射线的流强也有和“风”相似的地方，即有的方向上宇宙射线稍强些，有的方向上宇宙射线则稍弱些。由于宇宙射线是由带电粒子组成的，其强度的不均匀性很可能反映了太阳附近银河系磁场的结构。此外，通过分析数据我们还发现了在天鹅座方向上新的宇宙射线粒子源，其中除了高能带电粒子的贡献之外，还应当有中性伽马射线的贡献。这些现象有可能暗示在这个方向上离太阳系不太远（比如几百光年）的地方存在宇宙射线的发射源。

我们的实验结果还表明，宇宙射线整体上是和太阳系一样围绕银河系中心旋转的（图 3），这就如同大气层随着地球旋转一样。我们由此推测，在整个银河系里，宇宙射线等离子体和恒星与气体物质一样环绕银河系的中心旋转。人们已经认识到在银河系不同半径处的物质旋转角度速度是不一样的，即小半径转得快，大半径处转得慢。我们的观测结果反映出宇宙射线等离子体在银河系不同半径处与物质共转，因而具有不同的角速度。这些实验观测结果为研究宇宙射线起源和传播等问题提供了宝贵的信息。

该实验结果由于其在宇宙射线研究中的重要意义，发表在 2006 年 10 月 20 日的《科学》杂志上。同期的《科学》杂志上还发表了宇宙线向异性研究领域的权威人士杜勒迪希（Duldig）博士专门对我们工作的评述和期望。他希望我们能尽快改进升级“西藏大气簇射探测器阵列”，进一步推进这一前沿研究，扩大战果。

目前羊八井的两个实验都具有大视场、全天候的优点,工作在 TeV (10^{12} 电子伏特) 能区,较简单的改造就可以使之在 100TeV 能区有很高的灵敏度以深入研究银河系宇宙射线源。羊八井观测站的高海拔也有利于我们在将来把能区进一步降低几十倍从而可以观测宇宙深处的射线源,以开始天文学,宇宙学相关的研究。

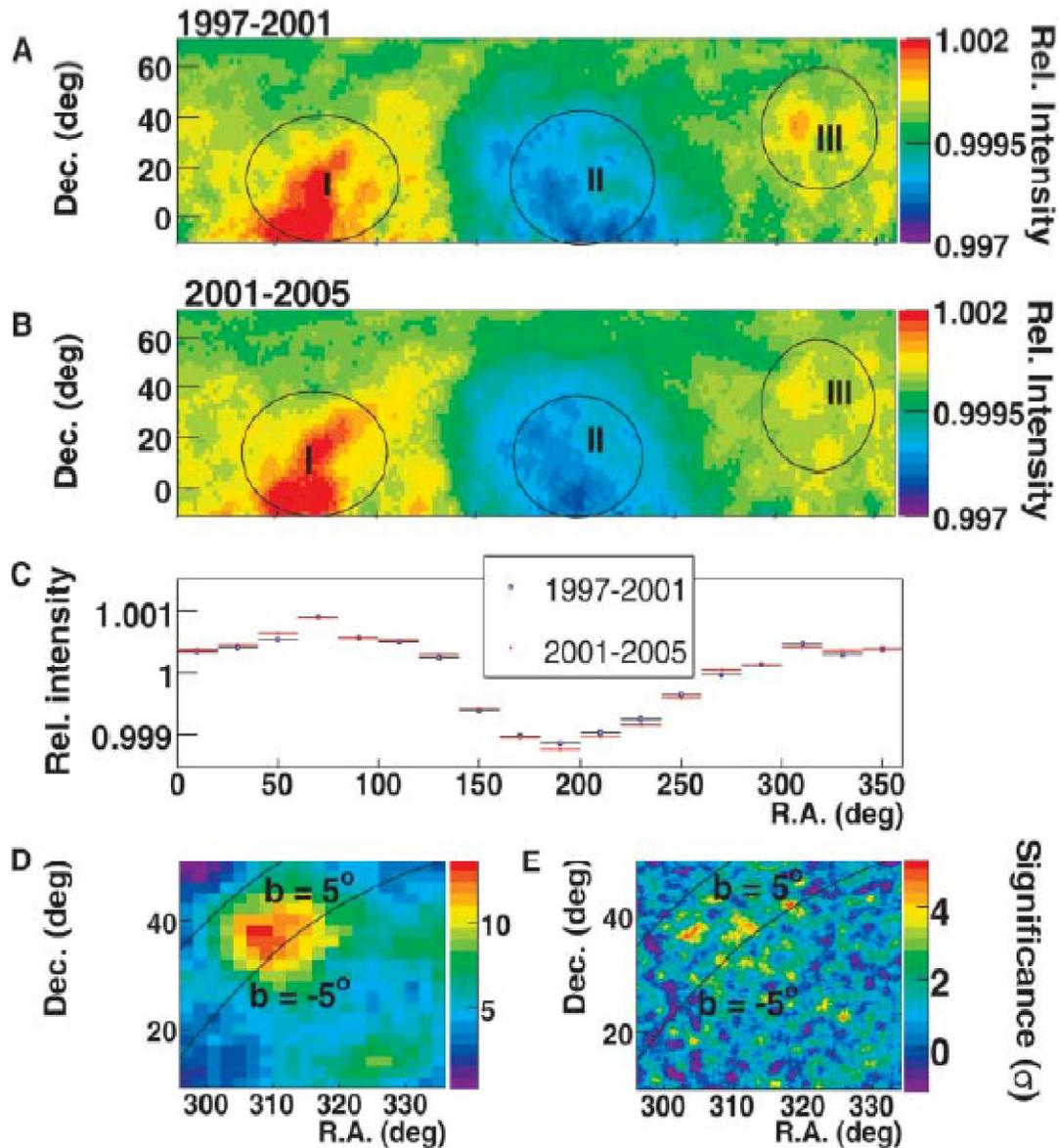


图 2 (A)、(B)显示不同时期里宇宙线强度在赤纬和赤经坐标下的分布图;I、III 区的红色表示比平均的强度有 1%左右的增强,而 II 区的蓝色表示有晦誓潭鹊娜鄙? (C)图表明这种差别不随年份,也即不随太阳活动而变化;(D)图是合并(A)、(B)数据后 III 区强度增强的显著性分布图;(E)图显示 III 区更细致的结构,空间上存在很小尺度内宇宙线强度的增强现象说明这里可能有中性伽马射线的发射。

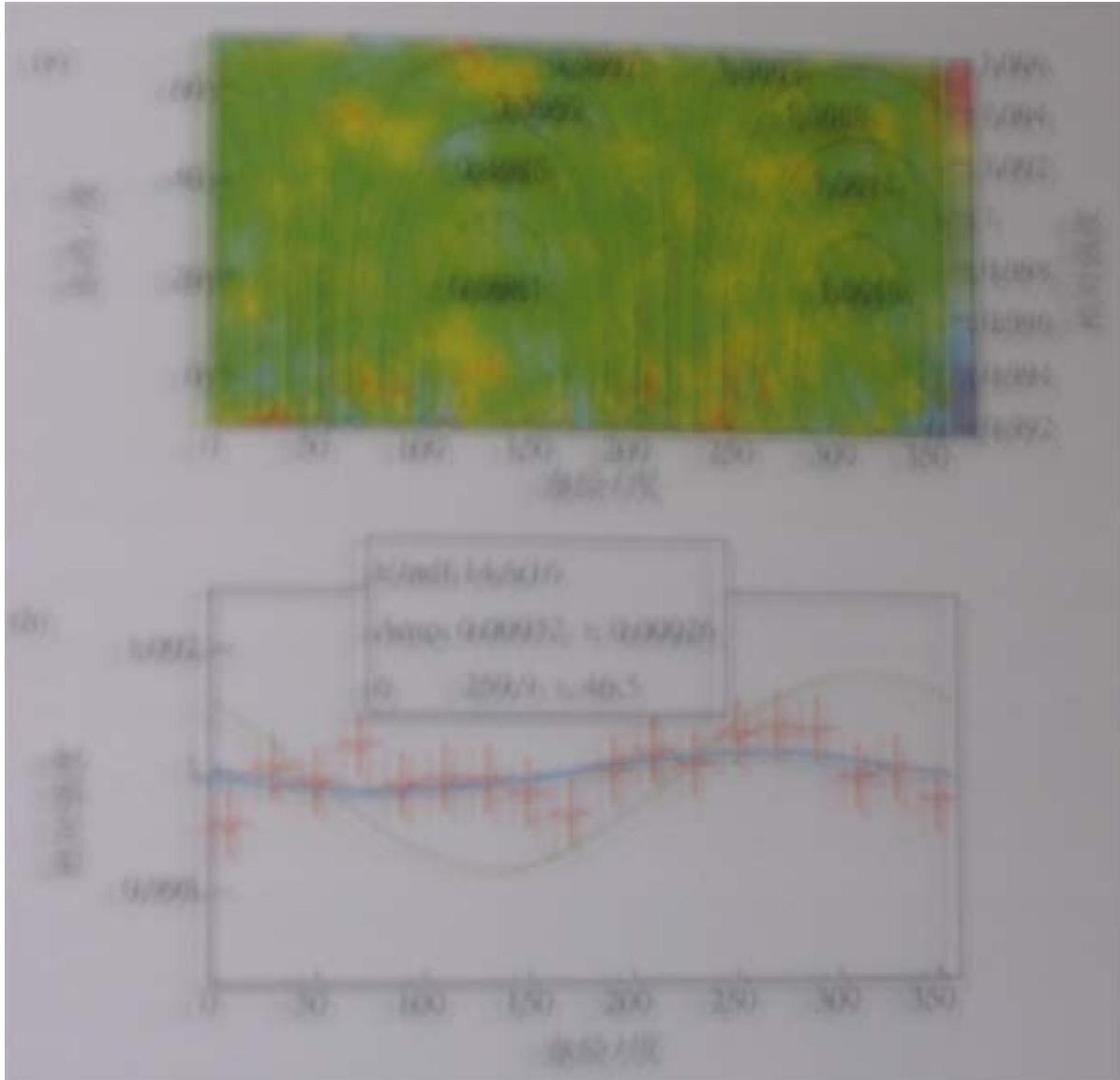


图3 (a)显示 300TeV 能量时宇宙线强度在赤纬和赤经坐标下的分布图。如果宇宙线不随太阳绕银河中心旋转, 则其与太阳系有相对的速度, 在地球上的观测者会感觉到相对的宇宙线的“风”, 即强度按等高线表示的方式变化。但数据表明这样的风并不存在, 也就是说, 宇宙线其实随太阳系一起绕银河中心转动(称共转);(b) 图十是实验测量结果, 实线是投影到赤纬方向的强度经拟合后的分布, 虚线是没有共转的情况下预期的宇宙线强度分布。

来源: 2007 年《科学发展报告》

第五章 量子力学的困难

1、量子力学基础的困难

量子力学在当代科学发展中既是成功的、也是神秘的。其成功之处在于, 它以独特的形式体系与特有的算法规则, 对原子物理学、化学、固体物理学等学科中的许多物理效应和物理现象作出了说明与预言, 已经成为科学家认识与描述微观现象的一种普遍有效的概念与语言工具, 同时也是日新月异的信息技术革命的理论基础; 其神秘之处在于, 与其形式体系的这种普遍应用的有效性恰好相反, 量子物理学家在表述、传播和交流他们对量子理论的基本概念的意义的理解时, 至今仍未达成共识(特别是出现了不少诡异性解释)。量子物理学家在理解和解释量子力学的基本概念的过程中所存在的分歧, 不是关于原子世界是否具有本体论地位的分歧, 而是能否仍然像经典物理学理论那样, 把量子理论理解成是对客观存在的原子世界的正确描述之

间的分歧。李政道教授：“二十一世纪物理学的挑战是：夸克禁闭，对称和对称破缺”。量子力学的创立者之一薛定谔 (E. Schrodinger, 1932 年诺贝尔奖) 就说过：“我们从来没有做过单个原子或者粒子的实验，尽管我们在理论和实验中有时假设能够这么做，可结果总是荒谬的。” 几乎没有一位物理学家真正对量子理论完全满意，但经过 1 个多世纪的时间，他们已经可以高效地利用该理论进行科学研究。物理学家现在例行公事地使用数学方法研究量子行为并给出准确度惊人的推算，包括分子结构、高能粒子碰撞、半导体行为、发射光谱分析等。

(1) 海森伯不确定原理及其困难

旅美华裔物理学家沈志远提出海森伯不确定原理是普遍适用的吗？海森伯不确定原理：一对共轭物理量（如位移 x 和相应之动量 p_x ）必须遵从不等式 $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$ ，其中 h 是普朗克常量， π 是圆周率， Δ 表示增量。空间尺度 Δx 缩小，动量 Δp_x 相应增大，能量也随之增大。 Δx 缩小到原子尺度（ 10^{-10} 米），相应的能量是化学能； Δx 缩小到原子核尺度（ 10^{-15} 米），相应的能量是核能。但是再往下推，空间尺度缩小到普朗克长度（ 10^{-35} 米），相应的能量比核能还要大一万亿亿（ 10^{20} ）倍！极言之，当 Δx 趋向零， Δp_x 趋向无穷大，相应的能量趋向无穷大。在无穷小的空间中蕴藏着无穷大的能量！这是海森伯不确定原理的必然结果，海森伯不确定原理是普遍适用的吗？量子力学中的“能量不守恒”是指根据“不确定关系”， $\Delta E \Delta t \gg h/2\pi$ 大于等于 $h/2\pi$ ，即两个相关的（表现为其算符不对易）的不确定程度的乘积必须不小于某个常数，那么在一个足够小的时间内，能量 E 的不确定程度可能比较大。但从长时间看来，能量是守恒的。从上述不确定关系也可以看出来，当时间稍微长以后，能量的不确定度 ~ 0 ，所以能量是守恒的。量子力学指出，即便是在绝对零度，微观粒子也还具有 $0.5h\nu$ 的零点能，在作零点振动，达不到绝对静止。从量子场论的观点来看，可以认为真空是最低的能态，是没有任何场粒子被激发的状态，真空中的 electric charge 为零。如果有足够的能量作用在真空上，就能激发出各种粒子。从负电子的理论得出，电子除了在原子中运动的量子态以外，应该有无限多个属于纯粹真空的“负量子态”。当俄勒冈州波特兰大学物理学家 Maximilian Schlosshauer 提到不确定性原理时，他说：“我们可以依靠这种抽象的存在来追寻这个世界，波动函数描述了概率在系统中的不同状态；有关量子理论的所有其他数学工具都能在教科书中被找到。”

(2) 量子电动力学及其量子场论的困难

原子物理学的最终目标是得到合适的初始方程，由此推演出整个原子物理学。我们距此还很远，向这个目标迈进的第一步是完成低能物理学理论，这就是量子电动力学，然后推广到越来越高的能量。但是目前的量子电动力学不能适应数学美的高标准，我们期望基本物理理论有这种数学美。目前的量子电动力学还使人觉得，仍然需要在基本思想上有激烈的变革。【1】这说明 Dirac 已经认识到原子物理学目前的基础存在着重大的问题。参与弱相互作用的 W^+ 、 W^- 和 Z 粒子，都是有质量的玻色子。因为有质量的玻色子，都是短程力的媒介粒子，不需要很稳定。粒子的稳定性当然是有弱相互作用控制的。但根本是由微观本性所决定的。粒子质量平均值附近的分布宽度 Γ 越大。粒子的平均寿命越短，越不稳定。已发现的粒子中绝大多数的宽度小于 400MeV 。最宽的粒子是 Z 粒子，其宽度为 2.490GeV 。实验到了人体触及不到的微观领域（或宇观世界），更多地受到理论指导，带有许多猜测和想象成份，众多实验数据是间接测量的和某些公式结合计算得到的。表面上看实验似乎是实验设备测量的结果，其实不然，其中包含许多先入之见和想象因素，而且还受到实验设计能动性所支配，不一定真正反映客观的主观成份相当大。设计本身就带有巨大能动性，不少花了巨大投资的庞大实验设备，能够做的实验又寥寥无几，远不如在应用中验证理论，应用至少具有为人类需要服务的功能，还具有理论验证功能。许多应用项目也是在理论指导下充分发挥人的能动性来设计的。

在分子领域场论是失败的，各方面都认为，现在唯一可作量子理论基础的原理应是一种能把场论翻译成统计学形式的原理。但这种理论是否实际上能以一种满意的方式得出来，没人敢下结论。粒子物理，天体物理和宇宙学目前正处于一个交叉融合的发展时期。目前有很多相关实验正在进行或准备之中，特别是阿尔法磁谱仪 (AMS)。已有实验结果提出了很多具有挑战性的问题，包括：超高能宇宙线的起源、伽玛射线爆发的机制、暗物质问题、宇宙常数和暗能量问题。对这些问题研究的进展和突破，都是对基本粒子和宇宙学的进一步认识，很可能会与更深层次的新物理相联系，甚至导致新的物理理论的出现。在量子场论中，每一种基本粒子用一种场来描写，粒子间的相互作用就可以看作是场的运动和相互作用，可是目前已经发现的基本粒子不计入激发态也已达几十种，它们之间的相互作用又是形形色色，因此量子场论不是一个统一的基本粒子理论，它不能反映出基本粒子间的相互作用和转化所说明的物质统一性。

1947 年，英国物理学家罗彻斯特和巴特勒，发现的“ V 粒子”，后被归入 K (K 子) 介子一类，共有 4 种：带正电的 K 子、带负电的反 K 子、中性的 K 子，以及中性的反 K 子； 后又被称为超子、重子，数量已超过百种，被称为“共振粒子”；它们类似以族的形式存在。1961 年，美国物理学家盖尔曼和以色列的尼曼各自

独立地提出了彼此极其相似的方案，来构成这些粒子族。为了建立一种粒子族的配置方案，盖尔曼需要与 8 种不同的性质打交道，他把自己的体系称为“八重法”，创造了一个由 10 个粒子组成的粒子族。他设想有一个三角形，其底部有 4 个物体，在它上面是 3 个物体，再上面是 2 个物体，在顶端是唯一的 1 个物体。底部的 4 个物体是相互有关的 Δ 粒子，每一个都比质子重 30% 左右，它们之间的主要差异在于电荷。这 4 种 Δ 粒子所具有的电荷分别为 -1、0、+1 和 +2；在它们之上的 3 个 Σ 粒子，它们比 Δ 粒子更重，带有电荷 -1、0 以及 +1；再上面是两个 Ξ 粒子，它们比 Σ 粒子更重，所带的电荷是 -1 和 0；最后，在这个三角形的顶端是一个最重电荷为 -1 的粒子，盖尔曼称最后这一种粒子为负 Ω 粒子，并且这种粒子又带一个负电荷。盖尔曼发现在这个图形中规律性很强：质量越来越大，粒子数则越来越少；电荷的排列方式同样也很有规律：底层是 -1、0、+1、+2，然后是 -1、0、+1，再上面一层是 -1、0，最后是顶部的 -1。

物质的结构问题：对于原子核结构的研究，提出了球壳式结构、液滴结构、嵌套结构、多层结构、点阵结构等多种模型；对于质子、中子、电子结构的研究，提出了夸克结构、实体结构、螺旋形结构等；对于质子、中子、电场的结构研究还提出了统一的电子论或光子论。在 高能领域中，已经不能严格区分场和粒子。当粒子能量的改变接近或超过它的静止能量时，粒子间的相互转化也就产生了。Einstein 认为：实物与场的区别不是定性问题，而是定量问题。在量子场论中，代表真空的状态就是能量最低的状态，存在一个真空能量密度 ρ_v ，所以真空能量是一种量子效应。因此能量可以称为世界上一切变化的基本原因。在量子理论中，根据不确定性原理粒子可以从粒子/反粒子对的形式由能量中创生出来，因此量子真空完全不同于“真空”，场的值必须有一定的最小不准确量或量子起伏。人们可以将这些起伏理解为光或引力的粒子对，它们在某一时刻同时出现、互相离开，然后又互相靠近而且互相湮灭。这些粒子正如同携带太阳引力的中微子。因为能量不能无中生有，所以粒子反粒子对中的一个参与者有正的能量，而另一个有负的能量。由于在正常情况下实粒子总是具有正能量，所以具有负能量的粒子注定是短命的虚粒子，它必须找到伴侣并与之湮灭。

参考文献：

【1】Dirac 著，曹南燕译。《自然科学哲学问题》—理论物理学的方法 1982 年第 4 期。

2、量子场论中的量子真空概念

现代真空理论实质上是量子的。具体说来，真空的众多新奇物理性质，正是被量子场论逐步的研究所揭示。可见在当今，只有理解量子场论，才有可能深刻而正确地掌握真空概念的物理内涵。量子场论是研究量子场的结构、运动及相互作用规律及其时空特征的物理理论。当今量子场论有阿贝尔的和非阿贝尔两种形式。在量子场论中，研究电磁作用的量子理论，是量子电动力学，属于阿贝尔量子规范场论；研究强作用的量子理论是量子色动力学，研究弱作用和电磁作用统一的量子理论是量子味动力学，两者都属于非阿贝尔量子规范场论。

1. 量子电动力学真空

(1) 光子真空

不少物理学家认为，量子理论中的真空概念，最早起源于 P. 狄拉克 (Dirac, 1902—1984) 对电子相对论波方程的负能态研究，然而事实并非如此。量子真空的思想源于狄拉克对辐射电磁场量子化的探讨，所以最早的量子真空并非电子真空，而是光子真空。

1927 年，狄拉克发表了题为《辐射的发射和吸收的量子理论》论文，标志着量子电动力学的诞生。在这篇文章中，狄拉克用两种不同的方法，研究了原子和电磁辐射场的相互作用问题，可称为微扰方法和波动方法。在微扰方法处理中，光子被视为一种粒子集合，在这个粒子集合中没有相互作用，粒子以光速运动，并且满足爱因斯坦波色统计。狄拉克在证明哈密顿量能导致辐射和吸收所遵循的爱因斯坦定律时，首次提出和应用了真空思想。

狄拉克假定对于光子，存在一种零态。在这种态中有无数个光子，但它们都是不可观测到的。这些光子可以从这些零态跃迁到生成可观测到的实光子，即零态的激发；而实光子也可跃迁回到这种零态，成为不可观测到的虚光子，即激发态的消失。这种实光子的产生和湮没图像是狄拉克第一次提出来的。可以看到这正是现今量子电动力学中真空态的概念和光子真空的思想，而电子真空的概念则是在他的这种思想的基础上提出来的。

(2) 电子真空

1928 年，狄拉克在电子量子理论方面发表了两篇文章。在这两篇论文中，狄拉克讨论了克莱因 (Klein-Gordon) 方程解的困难，并提出了著名的电子相对论波方程。利用这个方程来研究氢原子能级分布时，给出氢原子的能级结构，并和当时的实验很好符合。从这个方程还可以自然地导出自旋为 1/2，并且

电子自旋的回磁比为轨道角动量回磁比的 2 倍,使得人们相信,这是一个正确描述电子运动的相对性量子力学波方程。

在 1929 到 1930 年期间,狄拉克认识到没有合理的方法,能够避免电子从正能态向负能态的跃迁,才迫使他提出了负能态全部被填满的电子真空图象。这种真空像狄拉克本人想像的那样,是处于最低能态的一部分空间。当我们把所有负能态都填满时,就得到了系统的能量最低态。

狄拉克真空的深远意义,不仅第一次从理论上预言了正电子的存在,更重要的在于第一次提出了真空的一种量子模型,一种没有实粒子存在的空间,这是量子场论思想的萌芽;并且提出了实粒子产生的机制,预示了虚粒子的存在及粒子和场的,为后来量子电动力学的发展迈出了重要的一步。

在这里我们值得强调的一点是,由于狭义相对论和量子力学的初步结合,就得出在狭义相对论中原有的空空间即一无所有的空间概念是不存在的,因在其中充满了虚电子,即负能量的电子。充满虚电子的空间,称为电子真空。可见狭义相对论和量子力学的结合,不仅革新了狭义相对论的空间概念,而且使原来真空概念的经典性质,跃进到量子真空概念的初级阶段。

(3) 真空涨落和真空极化

最早提出量子真空概念是狄拉克,而对真空概念和真空实际效应研究的也是狄拉克。他对这个问题的探索始于 1933 年。这一年 10 月,布鲁塞尔(Brussel)召开的第七次索尔维(Solvog)会议上,狄拉克宣读了一篇论文。这篇论文开头写道:最近正电子的发现,又重新复活了旧的负动能的理论,因为到目前为止,实验的发现完全和理论相符。狄拉克建议,人们应当去发现负能态的物理意义。

1934 年,狄拉克对真空极化和真空涨落的问题作了详细讨论。接着 W.海森堡(Heisenberg, 1901---- 1976)和 V.魏斯科夫(Weisskopf)对量子动力学的真空也作了研究。结果表明,真空已不再是一个纯粹的空间,真空荷流密度和场强的涨落,即虚光子的产生和湮没,赋予了真空复杂的结构和性质。他们的研究表明,外电磁场将要感应出荷流涨落,而这些涨落又反过来改变原来的外电磁场,结果使得量子电动力学真空具有极化介质的性质。

2. 量子电动力学真空

真空对称自发破缺思想,是人们在超导研究的启发下得到的。1961 年, P.南部(Nambu)和 G.约纳-莱森奥(Jona-Lasinio)一起发表了《基于和超导相类似的基本粒子的动力学模型》的文章,此项工作把真空对称自发破缺概念引进量子场论,即一个场论的拉氏函数具有某种对称性,而体系的基态却是破缺的。同年 J.哥德斯通(Goldstone)类比超导理论提出了一个定理:如果体系的拉氏函数在某种连续变换下具有不变性,而这种对称性是自发破缺的,那么此时将伴随存在零质量、零自旋的粒子,即哥德斯通玻色子。这个定理称为哥德斯通定理。

然而哥德斯通玻色子是很不理想的,和事实不相一致。最早发现漏洞的是 J.许蕴格(Schwinger),他指出定域对称性破缺和整体对称性破缺是不同的。1963 年, P.安德孙(Anderson)发表论文,采纳了许蕴格文章的主要线索;他讨论了哥德斯通定理问题,提出超导是对称性破缺的例子,然而却不出现零质量粒子。他还建议如果电磁理论可以避开哥德斯通定理,那么其他定域对称规范理论也一定可以如此;他认为在规范不变理论中,杨-米尔斯(Mills)玻色子和哥德斯通玻色子相互缠结起来,最终将产生静止质量。

最引人注意的是 C.希格斯(Higgs)在 1964 年发表的论文,在文中引进了一个基本标量场,人们后来称为希格斯场,来代替超导理论中的库柏(Cooper)对。为了使希格斯场起到和库柏对同样的作用,假定希格斯场势能取一个特殊的函数形式,在规范理论中它被解释为希格斯场的自作用。这种势使得希格斯场和库柏对流的固有场那样破坏规范不变性,即希格斯场的真空态对称性自发破缺,也就是说希格斯场出现了简并的真空态。

3. 量子色动力学真空

我们对量子色动力真空的两个特性,即真空隧通效应和真空相变进行讨论。

(1) 真空隧通效应

非阿贝尔(Abel)规范场真空结构的研究,是从对非阿贝尔场方程解进行拓扑分类探讨开始的。较早进行这方面研究的是 A.普利雅可夫(Polyakov),他讨论了规范场的赝粒子解。1975 年,他和 A.拜尔文(Belavin)等人写了一篇题为《杨-米尔斯场的赝粒子解》的文章,进一步发现 4 维欧氏空间中杨-米尔斯方程的正规解,这种解使得有限作用积分定域极值化,并且讨论了解的拓扑性质。1976 年 G.特荷夫特(t'Hoofft)也研究了同样问题,他把赝粒子称为瞬子。同年 C.开伦(Callon)、R.代逊(Dashen)、D.格(Gross)发表论文《规范理论真空的结构》,研究了非阿贝尔规范场的真空结构和性质,发现规范场的拓扑上不同的真空组态间的隧通效应。哈密顿量的对角化,可以导致连续真空态的出现,并分析了真空的结构和性质。他们认

为, 这些解的物理诠释是含糊不清的, 因为它们在时空中是定域化的。在欧几里得规范孤子描述的事件中, 拓扑不同的规范真空内有隧通效应, 并且这种过程大大改变了真空态的性质。

他们还得出, 规范场的真空是 θ 真空, 其状态是各种绕数 n 的真空态的线性迭加, 各种绕数 n 的真空态之间的隧通效应是通过规范场的瞬子解而实现的。瞬子解的发现, 说明了非阿贝尔规范场具有复杂的真空结构。

(2) 真空相变

在 1976 年开伦等人的论文后部分中, 他们讨论了把真空看成是瞬子集合, 作为规范场真空的一种方便的几何图像。1978 年, 他们又发表论文题为《走向强作用的理论》, 把真空看作顺磁介质来处理。1979 年, 开伦对这种思想又进行详尽的研究, 肯定了真空相变的存在。

显然可见, 量子色动力学的发展, 大大促进了人们对真空性质的认识。量子色动力学真空所发现的真空隧通效应、真空相变、真空畴结构等新奇性质, 都说明真空类似于介质。这些研究结果揭示出真空是物质的一种特殊形态, 它具有各种各样新颖的物理特性。

从上面的材料可以看出量子力学中的真空并非一无所有, 它们和光子之间根据现代物理学理论应当有相互作用, 可是狭义相对论认为在真空中的光速是不变的, 显然存在着矛盾。

3、现代量子力学的几个疑难问题

核子的结构也不清楚。为什么氦核如此稳定? 为什么铀 238 非常稳定, 而铀 235 却是裂变的? 为什么中子的寿命只有十几分钟, 可是和质子结合在一起形成原子核以后就可以稳定了? 为什么粒子的寿命相差几十个数量级? 为什么物质的导电率相差几十个数量级? 射电类星体到底是什么东西?

1、高压物理实验: 发现许多物质(包括单质、化合物)在超高压作用下电阻随之减小。例如, 中国科学院物理研究所鲍忠兴等人所做的非晶碳电阻的压力效应实验, 在高压物理实验中对非晶碳样品进行了多次电阻随压力变化的实验测量, 非晶碳样品在 2GPa 内电阻发生较大变化, 在 2GPa 时, 其电阻值减小 72%; 在 2~4GPa 以内, 电阻值随压力增加继续减小, 在 4GPa 时, 电阻值减小 83%; 而在 4GPa 以后, 电阻随压力增加变化很小。旧量子论和旧量子力学是不能解释的。【3】

2. 阿佛加德罗常数的测定: 即阿佛加德罗常数定律: 在相同的温度与压强下, 相等容积所含任何气体的分子数(摩尔数)相等。并且多次物理实验证明是正确的。即在理想气体状下, 任何气体的一摩尔体积内所含的分子数都等于 $6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。理想气体是对实际气体的简化, 它要求分子间除碰撞外没有能量耦合, 这使得系统的内能严格地等于各分子动能的总和。当实际气体密度足够小时, 它的行为接近理想气体, 可以把压强趋于零的实际气体当作理想气体来处理。【4】为什么不同元素气体分子的体积在压强趋于零时其体积趋于一个相等的常数? 即为什么任何理想气体分子体积膨胀量相等, 并且是一个常数? 如何从本质上解释, 需要理论突破。

4、物质的热膨胀、冷收缩的实质问题: 传统理论认为, 物体的状态方程, 在压强不变条件下气体的体积随温度升高而增加; 对于液体和固体, 在平衡位置附近作热振动的粒子间的平均距离随温度而改变, 温度越高, 距离越大。以上解释, 只算得上是一种维象理论, 尚未涉及热胀冷缩的本质。这种理论无法回答, 当物体(分子)热膨胀的时候, 其原子的体积是收缩或是膨胀; 当物体(分子)冷收缩的时候, 也不能回答其原子的体积是膨胀或是收缩。因此这个问题仍有待进一步的研究【6】。

5、固体的比热问题: 1907 年, 由于 Einstein 和德拜的工作解释了固定比热在温度进入低温区时, 其比热迅速减小的现象。但是, 他们的解释并没有回答比热变化与原子内结构变化的相互关系, 没有回答比热变化的本质问题。因此, 固体比热的本质问题有待进一步探讨, 以使理论趋于统一【7】。

6、氢光谱实验: 1918 年, 丹麦物理学家玻尔解释了氢光谱, 为原子物理学的发展创立了良好的开端。但是, 氢分子的原子、电子是如何发射出氢光谱不同频率的电磁波的? 发射电磁波时, 原子的体积是收缩, 或是膨胀? 发射电磁波的时候, 电子是加速或是减速? 不同频率的电磁波是电子在什么位置上发射出来的? 不同频率的电磁波是谁先发射出来? 它们发射出来的顺序是什么? 传统的理论尚不能作出答复。因此, 有必要对氢光谱实验的理论解释作进一步探讨, 以使理论趋于统一【8】。

7、化学键的本质问题: 分子中原子间的相互结合力。十七至十八世纪, 对原子间的结合力是以力学的观点进行解释的。1812 年, 瑞典化学家柏采利乌斯提出了电化二元学说, 首次把原子形成的原因归结为静电力, 接触了化学键的本质。1852 年, 英国化学家弗兰克进一步研究了化合物的组成和化学式, 第一次提出了原子价的思想, 使人们对于化学键的研究, 从过去的定性考察进入到定量认识的新阶段。1916 年, 德国化学家柯塞尔提出, 化合价的本质是原子最外层电子行为的表现, 他提出了电价理论; 同年, 美国化学家路易斯提出了共价理论; 它们的诞生, 使经典的价键理论日趋成熟, 并初步揭示了化学键的本质。1927 年, 德国化

学家海特勒和英国化学家伦敦首先把量子力学应用到化学领域，通过求解薛定谔方程来揭示氢分子中化学键的本质，用电子云重叠的观点解释化学键的形成。最近，据英《新科学家》报道，在西德和英国的一些实验室里，化学家们正在合成由碳和磷原子组成的分子，用传统的化学原理不能解释这些原子形成的特殊结构，导致对化学键理论产生困惑，理论工作者们应该对此作出新的解释，或创立新的化学键理论，以使理论趋于统一。

8、电阻的本质问题：电阻随温度的升高而线性增加，半导体的电阻可以在某个温度的升高而增加，而在另一温度范围内随温度升高而急剧减小，即具有负的温度系数，在低温下物体的电阻剧烈地减小，几乎接近于零。以上三种情况下的电阻本质，传统的理论解释却是不统一的，这种不统一性，标志着电阻的真正本质尚未被揭示，有待进一步探讨，使理论达到统一【11】【12】【13】。

9、超导实验：1911年荷兰物理学家卡茂林——翁纳斯发现，在绝对温度4.2K附近，水银的电阻消失，这个现象称为“超导电性”。1958年，美国物理学家巴丁、库柏及斯里弗三人合作创立了超导的唯象理论——BCS理论，它预言：超导的临界温度极限为40K左右，这个极限早已被突破。由于高临界温度的超导物质被发现，有待于进一步从理论上阐明高温超导现象的机理，探索实现室温超导性的方法，使理论趋于大统一【14】【15】【16】。因为BCS理论只研究了s波配对。如果研究p波配对，那么两个电子的自旋方向可以相同。近来实验上发现了p波配对的超导，此外还有d波配对。

10、热核聚变实验：1952年，美国成功地试验了氢弹，第一次实现了非受控的即爆炸式的热核聚变，释放出了大量的聚变能。此后，人们就开始把注意力转向探索聚变能的和平利用上来，开始了受控热核聚变理论和方法的研究。但是，经过近40年的探索，尚未取得成功。按传统的理论去解释热核聚变总是有矛盾的，人们过去对此问题总是采取回避态度。倘若真的是等离子体(电子脱离氘原子核)相互碰撞才产生的聚变反应，它们就一定不可能完全碰到对方。因为，当距离 $r \rightarrow 0$ 时，库仑排斥力 $f \rightarrow \infty$ ，而外界压力又不是无穷大，哪来的力使它们克服库仑斥力完全碰到对方呢？这个问题有待进一步的研究解决，以使理论达到大统一【2】。

11、冷核聚变问题：1989年3月23日，美国化学家庞斯和英国化学家弗莱希曼在新闻发布会上公布了“冷核聚变”实验的部分结果。这一实验结果，争论很大。目前，“理论的现状使化学家把目光投向核物理学家，而核物理又寄希望于固体物理，指望在固体晶格中粒子寿命会变长；或在固体晶格里会出现只释放能量而不放出中子的新型聚变反应……”【11】【10】。

12、原子振动实验：大量的物理实验发现，在一定温度下，组成凝聚物体(如固体、液体)的原子在其平衡位置附近，不停地振动。原子为什么要振动，振动的动力是什么？物体吸热和放热与原子振动有什么关系？这些问题，目前，尚未搞清楚，有待进一步探讨【9】【5】。

13、质子的寿命有多长，如何来理解？

以前人们认为质子与中子不同，它永远不会分裂成更小的颗粒。这曾被当成真理。然而在70年代，理论物理学家认识到，他们提出的各种可能成为“大一统理论”——该理论把除引力外的所有作用力汇于一炉——的理论暗示：质子必须是不稳定的。只要有足够长的时间，在极其偶然的条件下，质子是会分裂的。办法是捕捉到正在死去的质子。许多年来，实验人员一直在地下实验室中密切注视大型的水槽，等待着原子内部质子的死去。但迄今为止质子的死亡率是零，这意味着要么质子十分稳定，要么它们的寿命很长——估计在10亿亿亿年以上。构成我们星体的物质是从不对称数量的早期宇宙中出现的物质与反物质湮灭的小的残余物。这一小的不平衡可能依靠假设的质子不稳定性，即物质的最简单形式和稍倾向于物质的构成多于反物质形成的物理法则。

因为这意味着所有核物质的不稳定性，所以发现质子衰变将是一个具有历史意义的事件。为寻找质子衰变，已经投入巨大努力。寻找质子衰变过去是日本神冈和超级神冈探测器，以及美国Irvine-Michigan-Brookhaven实验和Soudan探测器原来的主要目标。虽然没有观测到质子衰变，但那里的科学家们在中微子物理方面做出了如第五个问题中提到的给人印象深刻的发现。

斯坦福直线加速器中心(SLAC)的B工厂和BaBar探测器通过研究B介子，有机会对宇宙中物质大大多于反物质做出解释。正负电子在几十亿电子伏特时碰撞，可以按B介子衰变成其他粒子的方式研究非对称。非对称被称为CP破坏，1964年首次发现。CP破坏仍然没有完全被弄明白，据信，它起码对大爆炸形成宇宙后物质的存在多于反物质负部分责任。研究这一重要的非对称也会扩大我们对基本粒子的了解。B工厂的物理学家们已经发现物质与反物质在衰变成被称为重短寿命粒子的鲜明差别。

14、我们能否定量地理解量子色动力学中的夸克和胶子约束以及质量差距的存在？

量子色动力学(QCD)是描述强核子力的理论。这种力由胶子携带，它把夸克结合成质子和中子这样

的粒子。根据量子色动力学理论，这些微小的亚粒子永远受到约束。你无法把一个夸克或胶子从质子中分离出来，因为距离越远，这种强作用力就越大，从而迅速地把它们拉回原位。但物理学家还没有最终证明夸克和胶子永远不能逃脱约束。他们也不能解释为什么所有能感受强作用力的粒子必须至少有一丁点儿的质量，为什么它们的质量不能为零。一些人希望 M 理论能提供答案，这一理论也许还能进一步阐明重力的本质。

15、量子力学：量子力学取得了巨大成功，但它描述的是自然的最终理论吗？也许它会在很小的距离上和非常复杂的系统中失效，是否可用来描绘整个宇宙也还值得探讨。最近物理学家的测量结果表明，质子的电荷半径比以前认为的要小 4%，如果这一结论获得进一步证实，那意味着阐释光和物质相互作用的量子力学理论本身有问题，又或许是基于现有质子大小计算和使用的里德伯常量是错误的，不论哪种情况都将需要重写基础物理理论。

16、量子色动力学 (QCD)：量子色动力学可以完全求解吗？

17、为什么几十年来在粒子加速器碰撞实验中，喷射出来所有碎片的自由粒子，所有粒子分裂衰变整个过程的所有过渡产物粒子，包括最终稳定的质子、电子、中微子、光子，不是电中性的，就是只带一个单位电荷的粒子？

18、基本粒子最基本组成单元是什么？为什么所谓带分数电荷的 36 种“夸克”（含反粒子）居然会全部被禁闭？如果确实存在，那么禁闭的原因又是什么？为什么无穷小的点电荷一直未见能量“发散”？希格斯粒子？

19、为什么所有微观粒子都具有波粒二象性特征？我们至今仍不知道它们的形成原理和具体运动规律！为什么核能是 $E=mc^2$ ？是什么原因导致原子核内和所有粒子的质量缺失？

20、为什么质子、中子、电子及几百种原子核素都有固定不变的静止质量、磁矩值和相应的电磁场空间分布范围？它们的能量、磁矩是怎么形成的？又该如何精确计算？质子会衰变吗？磁单极探测？超重元素(奇特核)：

21、为什么质子、中子、所有的基本粒子内部和原子核内都存在强、弱、电、磁相互作用？它们之间是什么关系？各相互作用形成原理如何？强度又该如何精确计算？中微子有无静质量？自由夸克的探测，胶子？弱、电、强、引力能否统一？引力子或引力波的探测；

22、为什么天然放射系起始核 $\text{Th}232$ 、 $\text{U}235$ 、 $\text{U}238$ 的总核子数都接近 234？为什么已经合成核电荷数为 114 的重原子核仍然是极不稳定的？是什么原因导致核素稳定岛的预言失败？为什么稳定的结束核是 $\text{Pb}206$ 、 $\text{Pb}207$ 、 $\text{Pb}208$ ？为什么原子核在高速中子面前竟是完全“透明”的？它们内部到底呈什么样的结构？从铁到铀的重元素如何形成？暗物质和可能的暗能量都生成于宇宙初始时期一氢、锂等轻元素形成的时候。较重的元素后来形成于星体内部，核反应使质子和中子结合生成新的原子核，比如说，四个氢核通过一系列反应聚变成一个氦核，这就是太阳发生的情况，它提供了地球需要的热量。当核聚变产生比铁重的元素时，就需要大量的中子，因此，天文学家认为，较重的原子形成于超新星爆炸过程中，其中有大量现成的中子，尽管其成因还不清楚，最近，一些科学家已确定，至少一些最重要的元素，如金、铅等，是形成于更强的爆炸中，当两颗中子星一微型的、燃烧后的星球遗骸一相撞塌陷成为黑洞时。从铁到铀的各种重元素是如何形成的？

科学家们对星体和超新星中一直到铁的元素产生相当了解，但从铁到铀较重元素的准确起因仍然是个谜。美国能源部支持对在超新星中发生的核反应，以及对这些天体剧烈爆炸的计算机模拟研究。需要更多了解有关参与复杂连锁反应极短寿命原子核的信息。已经提出建造一种新的被称为稀有同位素加速器 (RIA) 的新装置，用以研究自然界可能存在的所有原子核。从 RIA 获得的数据和利用最大功率计算机对超新星的模拟，将使科学家们更加全面了解重元素的起源。

23、需要一种新的光和物质理论来解释在甚高能和温度时发生的情况吗？

用量子力学、电磁和它们作为电动力学统一的法则似乎对实验室中的物质和辐射进行了很好的描述。宇宙为我们提供地点和天体，如中子星和伽马射线爆炸源，这里的能量远远超过为验证这些基本理论在地球上可再现的能量。

伽马射线大面积空间望远镜 (GLAST) 通过观测来自许多不同天体源的高能伽马射线将开启这个高能领域。GLAST 有一个伽马射线成像天体望远镜，能力大大超过以前飞行的仪器，还有一台辅助的提高研究伽马射线爆的仪器。

在 GLAST 能区范围内，宇宙对伽马射线来说基本上是透明的。靠近可见宇宙边缘的高能源可用伽马射线光进行探测。如果这些天体在宇宙较早期间存在的话，我们就有充分的理由期待 GLAST 将看到红移值等于或大于 5 的已知类型的天体。对于伽马射线来说，小的相互作用截面意味着伽马射线可直接观测自然界最

高能加速过程。伽马射线向后指向它们的源，不像宇宙线被磁场偏斜有了 GLAST，天文学家们就拥有了非常好的工具，用于研究以将物质拉入而出名的黑洞是如何能够以大的难以令人相信的速度向外加速气体喷注的。物理学家们将能够研究比陆基粒子加速器中看到的更高能量时的亚原子物理。为同时进行天体物理和粒子物理研究，美国宇航局与美国能源部以及法国、德国、日本、意大利和瑞典的研究机构开展合作。GLAST 计划于 2006 年 3 月发射。为什么原子核会发射电子射线和伽马射线？它们是原先就存在原子核内？还是后来转化形成的？它们是如何转化的？能谱、强度又该如何计算？

24. 为什么电子在原子表层会形成所谓的“s、p、d、f 型电子云”？各个电子在“电子云”中具体运动特征、规律如何？电子激发、跃迁中能谱（尤其是表层多个电子的原子中）又该如何精确计算？如果电子确实是以几率状态分布，那么，固定不变的轨道磁矩和发射、吸收光谱能级又该如何解释？

25. 重原子内层 K、L 层众多电子的运动特征和 x 荧光射线谱能量又该如何分析计算？确定各种粒子和作用力是否是单一基本实体的不同表现形式，并且可以用一个统一的理论来解释它们。物理学中有四个基本作用力，粒子物理学的标准模型只包括了其中 3 个（电磁力，强相互作用力，弱相互作用力）。引力并未包括在标准模型中。努力建立一个理论将四个基本力统一到统一场理论中是理论物理学家的主要目标。由于粒子物理学的标准模型属于量子场论，那么任何统一都将必须把引力作为量子场论的一部分包括进去，这意味着问题 3 的解决与问题 1 的解决是相联系的。此外，粒子物理学的标准模型展示了许多不同的粒子——共有 18 个基本粒子。许多物理学家认为，一个自然界的基本理论应该有方法去统一这些例子，使得它们能够在更多的基本关系中被描述。例如，众多方法中定义最明确的弦理论预测所有的粒子都是不同振动模式下的能量丝，或者称之为弦。

26. 为什么热力学实验中获取近 0.0 K 的超低温相当困难？

27. 解决量子力学的基本问题有两种可能，或者在现有的理论基础上继续发展，或者创立一个新的理论。一个理解量子物理的问题便是物理学的根本机制与什么有关。量子物理学中有许多解释——经典的哥本哈根解释，Hugh Everett II 的备受争议的多世界解释，还有争议更大的如参与式人择原理。这些解释都是围绕量子波函数的坍缩这个问题而展开的。那些研究量子场论的现代物理学家不再考虑这些问题的解释与他们研究领域的相关性。退相干的原则，对许多人来说，解释量子坍缩的原因是——与周围环境的相互作用。更重要的是，物理学家可以在没有解决物理学基本层面上确切发生了什么的情况下求解方程，进行实验和将物理理论用于实践。因此，大多数物理学家不会考虑物理学在 20 英尺杆位附近发生的这些奇怪问题

28. 超高能粒子来自哪里？

物理学家们已经探测到宇宙中惊人种类的高能现象，包括没有预料到的高能但不知起因的粒子束流。在实验室的加速器上，我们可以产生高能粒子束流，但这些宇宙线的能量大大超过地球上产生任何能量。

1000 平方英里的 Pierre Auger 观测站是个国际项目，用来研究甚高能宇宙线，对撞星系是形成极高能量宇宙线的机制。位于阿根廷的 Pierre Auger 观测站有一台宇宙线探测器，展开面积超过巴黎的 10 多倍。在美国为其提供的建造费用金额中，美国能源部和国家科学基金会均摊。

29. 在极高密度和极高温下，新形态的物质是什么样的？

质子和中子是如何形成化学元素原子核的理论已有充分的阐述。在极高密度和高温时，质子和中子可“熔化”成一种不可区分的夸克和胶子“汤”，这可以在重离子加速器中探测到。中子星和早期宇宙中可以产生更高的密度并可探测到。相对论重离子对撞机（RHIC）正在 BNL 运行，研究极热、高密度核物质。它使金原子核束流在足以形成基本粒子（夸克和胶子）热、密度汤短暂微观宇宙的能量时相撞，这些粒子在宇宙大爆炸形成后的前几微秒存在过。世界上的物理学家对 RHIC 上每秒发生几千次的对撞饶有兴趣。每次的对撞都像一台微观高压锅，产生甚至比最热星体核心中还要极端的温度和压力。事实上，RHIC 对撞中的温度可超过绝对零度以上 1011 度，大约相当太阳温度的 10000 倍。虽然 RHIC 对撞可能超快和超热使科学家们感兴趣，但是它们太小太短，没有危险。使用大型 PHENIX 探测器的一个 RHIC 实验中，两个金原子核对撞向对撞轴横向发射出比标准模型要少的粒子。这是物质奇异态的第一个迹象，但需要更多的证据。将这一发现与未来几年更多发现结合在一起，研究人员就能弄清宇宙诞生以来就不存在的物质态。在能量极大的情况下，物质经历一系列的变化，原子分裂成其最小的组成部分，这些部分就是基本的粒子，即夸克和轻子，据目前所知它们不能再分成更小的部分，夸克性质极其活跃，在自然状态下无法单独存在，它们会与其它夸克组成光子和中子，两者再与轻子结合，形成整个原子。

这都是现在科学可以推测的，但当温度和密度上升到地球上的几十亿倍时，原子的基本成分有可能会完全分离开来，形成夸克等离子体和将夸克聚合在一起的能量，物质学家正尝试在长岛的一台粒子对撞机中创造物质的这种形态，即一种夸克——胶子等离子体，在远远超过这些科学家在实验室中所能创造出的更高温

度和压力之下，等离子体可能变化成一种新的物质或能量形式，这种阶段性变化可能揭示自然界的新力量。

要使这些力量结合起来，就必须有一种新的超大粒子——规范玻色子，如果它存在的话，就可以使夸克转变为其它粒子，从而使每个原子中心的光子衰变，假如物理学家证明光子能够衰变，那么这一发现就会证明有新力量的存在。

30、量子理论是一门实验科学，它描述微观空间中的物质运动，简单地说，就是用宏观的仪器测量微观粒子在各种相互作用过程中可由运动学和动力学表述的变化过程，它由二部分内容构成：一部分是由长度标度确认的实验结果；另一部分是沿用“欧氏几何学空间模型”的思路对实验结果的解析，即微观空间与宏观空间存在着反向自然律的解析，也就是描述理论的对称性与实验结果不对称的解析，决定论与非决定论的解析，因果律与态叠加的几率解析，真空态和真空破缺的解析，强子“色优惠”和“夸克幽禁”的解析，人为附加场和测不准原理的解析，等等，并把这些解析作为整个量子理论的“补充性假设”，这里明摆着的一个问题同样是，在微观空间，“几何学空间模型”的使用存在着确定的边界条件，这些边界条件是由微观空间的物理学内容决定的。量子理论只是告诉我们，微观空间的物理学内容是由定义空间的量子化分割加上“补充性假设”完成的，如果定义空间稍有闪失，也就是通常所说的“物理量必需表述为（与坐标无关的）几何量”稍有闪失，20世纪量子理论的全部“补充性假设”面临的困境是可想而知的，因为只要用“庞加莱空间”置换出量子理论实际使用的欧氏相对空间，量子理论近30项“补充性假设”就没有一条是可以存活的。当然也包括已被科学界接受的“重整化”和“测不准原理”。

31、宇宙深处超高能量的加码射线爆是怎么形成的？超高能量的质子射线是怎么形成的？近年来观测到的所谓强度和规模仅次于宇宙创生的大爆炸又是怎么形成的？太空中能量最大的粒子，其中包括中微子、 γ 射线光子和其它各种形式的亚原子榴霰弹都称作宇宙射线。它们无时无刻不在射向地球；当你读这篇文章的时候，可能正有几个穿过你的身体，宇宙射线的能量如此之大，以至于它们必须是在大灾变造成的宇宙加速活动中产生。科学家估计的来源是：创世大爆炸本身、超新星撞成黑洞产生的冲击波，以及被吸入星系中央巨大黑洞时的加速物质。了解这些粒子的来源以及它们如何得到如此巨大的能量，将有助于研究这些物质的活动情况。最近，天文学家已确定了爆裂的位置，并初步推测它们是巨大超新星爆炸和中子星与自身及黑洞的碰撞。

但即使现在，仍没人知道这么多能量在空中环绕时发生了什么。物质变得非常热，以至于它以异常的形式与辐射相互作用，而辐射光子能互相撞击产生新的物质。物质与能量的界限开始变得模糊。如果加入磁场因素，物质学家也只能对这种可怕环境下的活动做粗略的推测。也许现有的理论根本不足以解释这些现象。

32、能否解决强关联多电子系统的基态和元激发问题？能否解决低维凝聚态物理新现象的理论问题？何时能揭开狄拉克的大数之谜？可控轻核聚变能否实现？激光热核反应的点火条件（劳森判据）能否达到？常温核聚变能否实现？冷核聚变能否实现？量子混沌确实存在吗？最后一个超重元素的质子数是多少？热中子辐射俘获疑问的实质是什么？原子核磁矩能否准确计算出来？Gamow-Teller巨共振问题 g_A （核内核子） $\neq g_A$ （自由核子）能否解决？奇异电子峰是怎样形成的？EMC效应能否解决？质子自旋危机能否解决？电子与核散射中，纵向响应形状因子问题能否解决？有限核的结合能与能极能否一一准确算出来？夸克-胶子等离子体（G.P）物质态是否真的存在？有无胶子球存在？存在第四代基本粒子吗？e-u-t之谜何时能解开？亚夸克结构仅仅是推测吗？电子有无结构？光子有无结构？有无奇异物质存在？ C, Ψ 物理中的 ρ, π 疑难能否解决？宇宙反物质的探测；反物质世界是否存在？可控热核反应能否实现？冷聚变？

33、标准模型：粒子物理标准模型无疑极为成功，但人们并没有理解夸克和轻子的质量混合的物理起源和中微子的质量等。

加拿大沃特卢市圆周理论物理研究所的 Christopher Fuchs 说：“最理想的研究方法可以用朴素的语言逐句逐字地写成一个故事，它是那么的精彩而富有想象力，精确的数学研究方法根本无法描述它，这一点毫无疑问。”Schlosshauer 说：“许多我们所认为的只属于量子物理的特点，实际上只是众多未被发现的可能性的共性。这使我们焦点集中在量子理论的特点到底是什么这一问题上。”Hardy 认为：由于许多研究者感觉自己摸索到了正确的道路，因此量子理论重建工作的步伐近年来开始加快。但有谁能够判断这些努力是否是成功的呢？Hardy 说：“我想说判断成功与否最根本的标准在于更加理论化。我们是否对量子理论有了更深刻的认识？这些新的方法是否给予人们启迪从而推动当代物理学的发展？”他希望这些原则有朝一日能够帮助量子重力理论的发展。

参考文献：

【1】《科技日报》，1989年12月29日，第一版。

【2】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社，1987年出版，P550。

- 【3】苟清泉主编 《高压物理学报》 中国物理学会 高压物理专业委员会主办 P218。
- 【4】王竹溪 朱洪元著 《中国大百科全书》物理学 I、II，中国大百科全书出版社出书，1987 年 7 月。P 3，P729。
- 【5】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社 1987 年出版，P547。
- 【6】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社，1987 年出版，P549。
- 【7】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社，1987 年出版，P40。
- 【8】解恩泽等编，《简明自然科学史手册》，山东教育出版社，1987 年出版，P244。
- 【9】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社 1987 年出版，P539。
- 【10】《科技日报》，1990 年 2 月 9 日，第四版。
- 【11】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社，1987 年出版，P120。
- 【12】同上，P159。
- 【13】《物理》——数理化自然丛书第三册，P91。
- 【14】许国保等编，《简明物理学词典》，上海辞书出版社，1987 年出版，P657。
- 【15】[日]牧野升著，《超导革命》，天津科技翻译出版公司，1988 年出版，P66。
- 【16】中国科学院物理情报网编，《中国物理文摘》1990 年第 1 期，P116，P120。

附录 1:

作者：刘霞 来源：科技日报 发布时间：2010-7-9 17:04:57 《自然》：质子半径可能比以前认为的要小 4%，如获证实，将把粒子物理理论带入新领域。

据美国物理学家组织网 7 月 8 日（北京时间）报道，科学家在最新出版的《自然》（Nature）杂志指出，质子的半径比以前认为的要小 4%。如果这个结论在未来进一步获得证实，那意味着，要么阐释光和物质相互作用的量子电动力学理论本身有问题，要么许多基于现有质子大小计算所使用的里德伯常量（原子物理学中的基本物理常量之一，为一经验常数）是错误的。不管是何种情况，都意味着我们需要重写基础物理理论。

一个由德国马克斯·普朗克研究所的伦道夫·波尔领导、有 32 名科学家参与的国际研究团队表示，他们的最新实验将精确度提高了 10 多倍，结果表明，质子半径要比以前认为的小 4%。或许，用来计算质子大小的里德伯常量将失去价值，如果出现这种情况，其他基础的计算也都要重新修订。

质子是带正电荷的基本粒子，它同中子和电子一起，组成了宇宙的基本元件——原子。几十年来，粒子物理学一直使用由一个质子和一个电子组成的氢原子作为基准来测量质子大小。

在实验中，科学家使用 μ 介子取代氢原子中的电子。 μ 介子是一种带负电、质量为电子 207 倍的基本粒子，由于其质量比电子大许多，所带的负电可以屏蔽原子核的正电，所以，它能够同原子核更接近，发生的作用力更大，让科学家能够更精确地探测质子的结构。

另外， μ 介子以不同的能量状态存在，能量状态会影响其围绕质子旋转的方式，同时，质子的大小也会影响这些能量状态，也会影响让 μ 介子从一种能量状态跃迁到另一种能量状态所需的能量。

为了测量质子的大小，研究人员精确地让一束激光束对准包含了 μ 介子的氢原子，刺激 μ 介子从一种能量状态跃迁到另外一种能量状态，最终，研究人员精确地找到了他们正在寻找的跃迁，也测算出了质子的大小。

英国国家物理实验所的杰夫·弗劳尔斯表示，如果该研究获得证实，其意义可能要远远大于耗资 100 多亿美元的欧洲粒子物理研究所正在进行的测试所谓“标准模型”的对撞，将会把粒子物理理论带入新的领域。

法国巴黎第六大学卡斯特勒·布罗塞尔实验室主任保罗·印第里卡托指出，现在很多理论学家准备重新进行演算，另外，还需要更多的实验来证实或者推翻新的结论。在接下来的两年内，该研究团队将使用同样的设备，使用含有 μ 介子的氢原子再进行一次实验。不管结果如何，都说明物理学还蒙着很多神秘的“面纱”，需要人们逐一揭开。

附录 2:

美专家说粒子物理将进入“全新能量范围”

欧洲核子研究中心的大型强子对撞机 3 月 30 日完成迄今能量最高的质子束流对撞试验。美国专家评价说，这一壮举将引领粒子物理研究进入“全新能量范围”。

30 日在美国加州理工学院的一个会议室内，数位美国物理学家观看了欧洲核子研究中心的此次对撞试验。大型强子对撞机内的两束质子流在分别被加速至 3.5 万亿电子伏特后成功相撞，从而使对撞总能量达到 7 万亿电子伏特。

参加过大型强子对撞机探测器项目的加州理工学院物理学家哈维·纽曼在对撞完成后对当地媒体说：“这太令人激动了，我们正在进入一个全新的能量范围，我们正在观测各种各样的奇异景象。接收到（对撞）数据后，我们将立即展开分析。”

曾领导大型强子对撞机探测器项目的加州大学洛杉矶分校教授罗伯特·卡普斯指出，过去几十年来，宇宙学领域取得了重要进展，宇宙大爆炸理论得到越来越多研究者的认可，但要了解宇宙起源时的情景，科学家还需知道自然界最小的粒子是什么以及这些粒子之间存在何种作用力。他认为，自然界存在迄今未发现的作用力，物理学的一个重要任务就是揭示这些作用力。

附录 3:

李政道：粒子物理的光辉前景

在获得诺贝尔奖 50 周年的今天，李政道先生最近访问了西欧核子中心（CERN）。李政道认为，粒子物理的现状仍然是非常乐观的，这个观点不容置疑。

1957 年 12 月 10 日，两位年轻的旅美中国学者抵达斯德哥尔摩领取诺贝尔物理学奖——这是中国人第一次获得诺贝尔奖。因为在 1956 年夏天做的工作，李政道和杨振宁获得了这个世界上最著名的科学奖项。他们提出弱相互作用对宇称，即对所有空间方向的反转，是不对称的。授予他们诺贝尔奖使当时物理学界持续一年多的由于 τ - θ 之谜而引起的动荡，随着核子 β 衰变实验得到最恰当的终结。在这实验中，吴健雄和她的同事证明李和杨是正确的：在弱相互作用中自然界破坏了宇称对称性。

半个世纪过去了，李政道仍然关注着、探索着物质最基本的构造。他重点关注的是基本粒子的对称性，尽管在过去的岁月中许多方面已经改变。他指出，我们关于物质是由什么构成的概念与 50 年前相比已相当的不同了。今天，我们知道，所有一切物质都是由 12 种粒子组成，即 6 种夸克和 6 种轻子。这里的所有一切物质——不包括暗物质，不包括暗能量，但是包括所有我们这样的物质——每颗星星，我们的银河系，宇宙中所有的星系都是由这 12 种粒子构成的。

这 12 种粒子，可以分成 4 个家族，每个家族包含 3 种具有相同电荷的粒子。这构成了当前粒子物理标准模型的基础。这些都是我们的学生首先要学的课题。可是，在 1957 年，物理学家只清楚它们中两种粒子的知识——电子和 μ 子，两者都是带电轻子。夸克是后来才知道的，而 50 年前与核 β 衰变相关联的中微子事实上是现在了解的 3 种不同中微子的一种混合态。50 年来，这个领域硕果累累，共发现了 6 种夸克，第三种带电轻子（ τ 子）和 3 种中微子。李政道强调：“50 年前，我们只知道中微子的一种形态，但是我们不知道这一种形态事实上是现在知道的 3 种中微子组合的一个相干混合态。”现在，李政道的主要兴趣集中在研究轻子和夸克的混合现象。这种混合分别由 2 个 3×3 矩阵描述。李政道称这 2 个矩阵是粒子物理的重要基石。

李政道为粒子物理的进展感到由衷地骄傲，他认为 20 世纪下半叶取得的硕果可以与 19 世纪末叶取得的相媲美。在 19 世纪 90 年代发现了电子之后，卢瑟福(Ernest Rutherford)用他在 α 衰变、 γ 衰变和 β 衰变辐射方面的工作打开了新世界的大门。李政道注意到，20 世纪物理的很大部分，都是在研究强相互作用，弱相互作用和电磁相互作用，这些相互作用的研究实际上是从对 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变的研究中演化过来的。所有这些构成了标准模型的基础。“现在，100 年过去了，我们认识到，所有的物质都是由 12 种粒子组成，它们分属 4 个家族，每个家族由 3 种相同电荷的粒子组成。这实在是非常神奇。”他深信，这个领域正处在新发现的边缘，随着对这些基本组元的进一步探索，新的、伟大的物理发现将会诞生。

在过去 50 年中，大家对李政道在粒子物理方面的贡献印象深刻。他在中国长大，并且证明了自己是一名出色的学生，在 1946 年获得了中国政府的奖学金，这使他得以进入芝加哥大学。1950 年他在费米教授指导下荣获博士学位；李政道 1953 年任职哥伦比亚大学助理教授，至今仍是该校一名富有活力的教授。

李政道在粒子物理里的研究领域非常广泛，从只具有非常弱的作用的、几乎是无形无踪的中微子世界，到又浓又稠的像西餐汤似的强相互作用夸克胶子等离子体。20 世纪 50 年代末，在哥伦比亚大学，李政道教授对研究高能带区的弱相互作用的热忱超过了对粒子衰变的研究。所以这种倾向激励了他的同事，促使 Melvin Schwartz 构想出产生中微子束的方法。布鲁克黑文国家实验室 1962 年那个著名的实验应运而生。该实验证实了存在着两种不同的中微子，它们分别与电子和 μ 子相关联。

两年之后，布鲁克黑文又一次传出令人振奋的、突破性实验结果。James Cronin、Val Fitch 和他们的同事发现电荷共轭和宇称（CP）组合对称性在中性 K 介子衰变中被破坏。这种现象其实可以在 6 种夸克和它们的 3×3 混合矩阵的框架范围内得到解释。这些也是李政道目前工作的焦点。

差不多同时，李政道对场论还作出了开创性贡献，该贡献最终成为描述强相互作用理论的量子色动力学的一个重要部分，现在被称为 Kinoshita-Lee-Nauenberg 定理。该定理用于处理规范理论中的红外发散问题。在 QCD 中，它成为理解从夸克和胶子中产生喷注的基础——是粒子对撞机上进行的一个重要的研究课题，

不论是在早年 SLAC 的 SPEAR 对撞机上还是在 CERN 的即将开始运行的 LHC 上都是如此。除此之外，在表现形式为夸克—胶子等离子体的高温高密度 QCD 物质的物理中，李政道作出了他最重要的贡献之一。他促使人们认识到，人类实际上是有可能观察到这种振奋人心的物质的新状态的。1974 年，当时的实验物理学家关注的都是小之又小的尺度，但是他却提出了新的思维：“将高能量或高核密度物质分布在相对较大的空间，这对于探索新现象具有相当大的意义。特别需要指出的是，在重核碰撞中，他看到了真空恢复破缺对称性的希望。这也是那些推动布鲁克黑文 RHIC 对撞机项目的科学家的动机之一。而李政道在过去的几年中已经怀着激动的心情见证了强作用下夸克胶子等离子体实验得到的结果。他同时还看到了重离子对撞物理与暗能量物理之间的可能联系，两者都可能与集体场（标量场）有关，在物质场存在时都能产生负压力。“我深信在 LHC 上进行的重离子项目对于探索这种可能性是十分重要的。”

最近，李政道访问 CERN，看到为 LHC 实验工作作出的巨大努力和准备。他在思考，这些实验将会发现些什么？他预期 LHC 会作出重要的发现，包括发现新粒子，例如 Higgs 粒子存在的证据。他的关于宇宙中对称性的进一步想法将会使他个人提出更多的预言。

他深信，宇称、电荷共轭和时间反演中的不对称并不是物理基本定律内的不对称。实际上，他认为，它们仅仅是解的不对称，也就是说，是在我们生活于其中的大膨胀的宇宙中的不对称，仅仅是解的不对称。换句话说，他看到了 CP 破坏自发对称破缺的一种效应。在这种情况下，李说，有可能会发现右手的 W 和 Z 粒子，它们将与已经发现的左手的 W 和 Z 粒子相匹配。其他的新粒子有可能是无质量引力子的有质量伴子，就像无质量的光子在 W 和 Z 中有个重伴子一样。“它们一定会露出水面，而 LHC 将会是实现这个目标的第一个窗口。”

LHC 将来能带来的预期成果与李政道描绘的粒子物理的锦绣全景非常吻合。李政道说：“这将成为一个转折点，从我们在这儿发现的新物理中，我们还将了解下一步我们该做什么。我们期待 LHC 将呈现给我们一个充满新发现的世界，这些发现将为我们将来的探索指引方向。”荣获诺贝尔奖的半个世纪以来，李政道对粒子物理的前景一直保持着激动乐观的态度。“我深信，对于物理学来说，21 世纪初叶的重要性等同于 20 世纪初叶（前 50 年）。而 LHC 将会是作出第一批发现的第一台机器。我们都将非常荣幸能亲历其境。”

5/4/2017