DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2024.05.009

玻色的生平与物理思想

——纪念玻色诞辰130周年*

李再东[①†]，南雪萌[②]，刘伍明[③††]

①天津理工大学 理学院，天津市量子光学与智能光子学重点实验室，天津 300384；②天津理工大学 电气工程与自动化学院，天津 300384；③中国科学院物理研究所，北京 100190

摘要 文章聚焦于20世纪初杰出的印度物理学家萨特延德拉•纳特•玻色(Satyendra Nath Bose, 1894—1974)的生平和物理成就。通过对全同粒子不可分辨性和概率解释的考虑，玻色发现了光子气体在量子力学中的统计规律，并由此推导出普朗克的黑体辐射公式。他的工作导致了玻色−爱因斯坦统计和玻色−爱因斯坦凝聚的发现，这些成就体现了玻色在推动量子物理发展中作出的卓越贡献。

关键词 玻色；量子物理；普朗克公式

1 玻色的生平

1894年，萨特延德拉•纳特•玻色(Satyendra Nath Bose)出生于英属印度首都加尔各答的一个中产阶级家庭[1]。作为家中的长子兼独子，他在父权主导的社会背景下，受到了父亲的极大关注和培养。他的父亲苏伦特拉•纳特•玻色(Surendra Nath Bose)，曾在东印度铁路工程部为殖民地政府服务。得益于父亲的努力和支持，玻色接受了优质的教育。玻色5岁时开始在师范学校上小学，学校离当时他父亲在加尔各答的约拉巴根租的房子很近。后来他们搬到戈巴根自己的房子，玻色转入附近新印第安人学校继续学习。在那里，他学习英语、孟加拉语、历史、地理、数学和梵语。他对数学特别感兴趣，尤其喜欢钻研高里•桑卡•戴的算术和代数教科书。同一时期，孟加拉国老师萨拉特•钱德拉•沙斯特里(Sarat Chandra Shastri)激发了玻色对孟加拉国语言和文学的热情。

1905年7月19日，印度总督柯松勋爵(Lord Curzon)对孟加拉国实施分裂政策，引发了印度民族主义情绪。当时11岁的玻色受斯瓦德什(Swadeshi)运动影响，怀着爱国主义情感参与学生抗议[1]。然而，由于父亲的严格要求，他只能被迫远离革命活动。在严格的父亲、慈爱的母亲，以及妹妹的影响下，玻色表现出羞怯、谦逊和温顺的天性，这限制了他的政治表达。尽管如此，他对革命者仍保持一定的关注和同情[2]。孟加拉国的分裂深刻影响了玻色，虽然他倾向民族主义，但受限于童年时代的经历和经济状况，他并未积极从事革命活动。

1907年，玻色进入印度教学校后，表现出对语言的喜爱和天赋，特别是在梵语和法语方面，后来他还学习了德语。他虽然视力不佳，却阅读了许多印度和西方作家的作品，是一个有思想的读者。他特别喜欢诗人丁尼生(Tennyson)和泰戈尔(Tagore)，还

* 量子光学与光量子器件国家重点实验室(山西大学)开放课题资助项目(KF202203)、国家重点研发计划项目(2021YFA1400900、2021YFA0718300、2021YFA1402100)和国家自然科学基金项目(12174461、12234012、12334012、52327808)

† 通信作者，研究方向：自旋动力学，原子分子物理。E-mail: lizd@email.tjut.edu.cn

†† 通信作者，研究方向：原子分子物理，凝聚态理论。E-mail: wmliu@iphy.ac.cn

精通卡利达萨(Kalidasa)的梵语作品《梅加杜姆》(Meghadootam)，这些影响了他的写作风格。1908年，玻色因为生病错过了中级科学班的入学考试[3]，只能继续在印度教学校学习，直到1909年进入总统学院。在这期间，他不仅掌握了高等数学，还阅读了多部印度的梵语经典著作。

玻色在1913年获得理学硕士学位，并在1915年获得加尔各答大学混合数学(类似于应用数学)学位。在这两门学位考试中，他都排名第一，第二名是梅格•纳德•萨哈(Megn Nad Saha)[1]。1916年，玻色受聘担任新成立的加尔各答大学应用数学系讲师。当时，甘尼什•普拉萨德(Ganesh Prasad)是加尔各答大学应用数学的教授。不过，由于和普拉萨德相处得不好，玻色后来转到了物理系。当时，物理系教职人手不足，玻色不仅要承担教学任务，同时还要兼顾系里的组织事务。尽管如此，他仍抽时间学习法语和德语，并阅读了大量他所关注的欧洲物理学文献。

1921年，玻色担任达卡大学物理系教授。1924年，在校长哈托格(Hartog)慷慨提供的研究津贴的资助下，他开始了为期两年的欧洲旅行和研究休假。同年10月，玻色从孟买出发抵达巴黎，与从事量子研究的物理学家建立了紧密联系。之后，他前往德国访问，与当地科学家交流学习，并在柏林与爱因斯坦共事。1926年返回达卡大学后，他继续担任教授，并兼任物理系主任。1945年至1956年，玻色在加尔各答大学教书，并于退休时获得名誉教授头衔。1958年，玻色当选英国皇家学会会员。1974年2月4日，这位伟大的物理学家去世。

2 玻色的主要物理成就

起源于德国的量子物理学，对印度科学家比相对论[4-6]更具吸引力。玻色成长于亚洲的一个偏远殖民地，却成功跻身于当时这个物理学前沿领域，并以其独特的量子统计对量子物理学的发展作出卓越的贡献[7-8]。1918年，他与萨哈在《哲学杂志》上发表了论文《论分子有限体积对状态方程的影响》，这是玻色在理论物理学领域的首个重要贡献[9]。1919年玻色在加尔各答数学学会上展示了两篇论文。次年，他与萨哈再次在《哲学杂志》上发表了论文《状态的方程式》[10]。

受到爱因斯坦论文的启发，玻色和萨哈合作出版了一本关于相对论的论文集。此外，玻色将爱因斯坦1916年发表的广义相对论的奠基论文[1]翻译成英文，由加尔各答大学出版社出版，这是该论文的第一个英文版本。考虑到他们当时身处远离欧洲的殖民地，这是一个非凡的成就。此后，玻色在《哲学杂志》上阅读了玻尔关于对应原理的论文[11]，又从德本德拉莫汉•玻色(Debendramohan Bose)那里得到了索末菲(Sommerfeld)关于多重量子化和谱线精细结构的论文[12]。1920年，玻色在《哲学杂志》上发表了《关于从光谱发射的量子理论中推断出里德伯格定律》一文[13]。

除物理学外，玻色对化学、文学(孟加拉语及英语)、地质学、动物学、人类学、工程学等多个学科进行了研究。他还投入大量时间推广孟加拉语作为教学语言，将科学论文翻译成孟加拉语，推动该地区自然科学的发展。

2.1 普朗克定律和光量子假说

20世纪早期的物理学家们仍在努力解决光的波粒二象性问题。尽管欧洲科学家普遍接受麦克斯韦的电磁场理论，认为光是一种波动现象，但爱因斯坦在1905年提出了光量子假说[14]，表明光也具有粒子的性质。1909年，在萨尔茨堡，爱因斯坦提出的公式揭示了在辐射能量密度中，代表粒子和波的线性项与平方项之和的能量均方波动。马丁•克莱因(Martin Klein)指出，“爱因斯坦认为，产生波动有两个独立的原因，辐射理论必须同时提供波和粒子机制”[15]。这一结论为后来对波粒二象性和互补性理论的理解奠定了基础，并在随后的量子物理学研究中引发广泛而深入的探讨。尽管越来越多的科学家认为空腔内的辐射应该被视作“光量子气体”，但在1905年前后，爱因斯坦没有深入研究黑体辐射的“量子气体”模型，原因有二：①光量子唯一的类粒子特征是其能量；②光量子不可能像常规粒子那样相互独立。如果光量子在统计上是独立的，那么一个“光子气体”将服从维恩定律，而不是普朗克定律。然而，玻色对这场关于令人费解的波粒二象性和对光的不连续性质的讨论[16]并不知情。

根据保罗•埃伦费斯特(Paul Ehrenfest)的观察，场激发的能量应该是量子化的。彼得•德拜(Peter Debye)利用弹性振动量子化的概念重新推导了普朗克定律，旨在解释固体的比热。1916年，爱因斯坦基于辐射平衡给出普朗克定律的另一个唯象推导，这种辐射平衡同时考虑了受激辐射和自发辐射的结果。然而，玻

色在他1924年发表的《普朗克定律和光量子假说》中指出[17]，上述推导在逻辑上存在不合理之处。当时，玻色可参考的物理文献为德拜1910年在《物理学年鉴》上发表的推导普朗克定律的相关文章。在达卡大学教授热力学和电磁理论的同时，玻色还进行相对论和量子理论研究。他发现在普朗克辐射定律的推导过程中存在明显的问题，该定律描述了温度T时平衡电磁辐射(即黑体辐射)的能量密度分布函数为：

$$\rho(v,T)=8\frac{\pi h v^3}{c^3}\left[\exp\left(\frac{hv}{kT}\right)-1\right]^{-1}, \quad (1)$$

其中v为频率，ρ为能量密度。对于普朗克定律而言，这只是与实验数据相一致的猜测公式，其理论基础有待进一步探究。玻色在《普朗克定律和光量子假说》一文中提出了新的理论框架：假设辐射被限制在体积V中，其总能量为$\boldsymbol{E}$。如果存在不同种类的量子，且每种量子的特征是数N和能量hv_s(s=0~∞)，则总能量$\boldsymbol{E}$为：

$$\boldsymbol{E}=\sum_s N_s h v_s=V\int\rho_v \mathrm{d}v。 \quad (2)$$

在满足式(2)的情况下，为了最大化概率，玻色引入一个相互作用的概率P：

$$P=(N_s\,dv_s)/(A_s+N_s\,\mathrm{d}v_s)$$
$$=(\check{n})/(\check{n}+1), \quad (3)$$

其中，$\check{n}=N_s/A_v$代表了每个单元格的平均量子数，A为自发发射常数，N_s是能量hv_s的光量子数。

根据玻色概率定律，吸收系数会随辐射密度的增加而减小。只有在辐射强度非常低($\check{n}\ll1$)时[18]，才会出现玻色原理所预测的对经典行为的偏离。虽然在1924年还没有这种光源，但随着现代量子光学的发展，像单光子态(Fock态)和压缩态这类状态[18]均显示出亚泊松统计这一非经典物理学特征[19]。此时，总能量$\boldsymbol{E}$为：

$$\boldsymbol{E}=\sum_s\frac{8\pi h v^s{}^3}{c^3}V\left[\exp\left(\frac{hv^s}{kT}\right)-1\right]^{-1}dv^s。 \quad (4)$$

式(4)相当于普朗克公式，可以视为一个特殊的时刻。后来，包括爱因斯坦在内的欧洲科学家们推广了这个公式，从而促进了物理学的发展。

2.2 热统计学方面的贡献

1924年，玻色在其论文《物质存在时辐射场的热平衡》[20]中对普朗克定律现有推导进行了批判。他指出，德拜证明普朗克定律可以借助统计力学来推导。然而，德拜的推导并未完全脱离经典电动力学，因为他采用了晶格振动的概念，并假设在特定能量范围内，能量可以被晶格振动所代替，这些能量只能是hv的倍数。尽管如此，玻色认为可以对德拜的推导进行修改，使其不必依赖于经典理论中的任何元素[20]。

玻色采用统计学方法，利用只能具有离散能量的量子粒子，成功导出了普朗克定律中的两个因子，这两个因子与经典电动力学无关。通过相空间参数分析，玻色将腔内辐射视为理想的光子气体，每个光子具有特定的能量(hv)和动量$((hv)/c)$。基于相空间中系统熵的极大值，他得出了绝对温度T时辐射的频率分布。在这里，玻色将光量子视为光子气体。与无相互作用的原子不同，光量子粒子数不守恒且无质量。更重要的是，玻色指出这些粒子具有全同的、无法区分的特性。在经典的统计处理中，这些相位点被视为是不同的。在推导普朗克定律时，玻色引入一种粗略的计算法来计算某个频率间隔内的状态数。他没有直接计算波频率，而是对一个粒子相空间中的体积元进行计数，并将所得表达式除以体积元的体积。然后，他将所得表达式乘以“2”以考虑“极化”。

此外，玻色撰写了一篇题为《密度波动》的论文，文中提出了一个基本结果，即根据他提出的新计数法，气体分子的均方能量波动可以表示为两项之和：第一项与频率成正比，对应于非相互作用分子的麦克斯韦-玻尔兹曼统计量；第二项与频率的平方成正比，与波现象的干涉有关[21]。

2.3 辐射场统计特性及光子自旋

在《物质存在时的辐射场的热平衡》一文中，玻色介绍了光子自旋的概念以及如何用统计方法理解磁场[22]，这篇文章的内容比《普朗克定律和光量子假说》更为详尽且显得更有雄心。玻色拒绝了爱因斯坦关于存在两种辐射过程的特殊假设，即自发辐射和受激辐射。他指出，从高能态到低能态的转变可以更优雅地解释，无需引入爱因斯坦的诱导跃迁假说。玻色认为自发跃迁足以解释这一转变，这种转变可以视为辐射场统计特性的结果。简言之，光的辐射是统一的单一过程，源自辐射场的统计特性，而非特定的能量传递机制。这与玻色早期的结论相似。

然而，爱因斯坦强烈反对这些观点。在1924年11月3日给玻色的回信中，他反对吸收系数与辐射密度无关的看法，而这一点得到红外辐射实验的支持。为了回应爱因斯坦的反对，玻色1925年1月重新修改了他的论文，并从巴黎寄给爱因斯坦。尽管如此，爱因斯坦仍不能接受玻色的

解释，坚持认为自发辐射和受激辐射是两个截然不同的过程。可能在听到爱因斯坦进一步的关键论证后，玻色放弃了他的论文草稿。深感失望的玻色于1926年返回印度，此后致力于教学和指导科研工作，并未再尝试发表他的论文。尽管他曾在信中提到法国物理学家保罗•朗之万(Paul Langevin)看过这篇论文后认为值得发表。

此外，作为玻色的最后一名研究生，帕塔•高斯(Partha Ghose)表示，玻色私下里一直坚称他确实提供了量子理论的解释，但爱因斯坦将其从翻译中删除，替换为关于偏振因子“2”的声明[23]。玻色认为“光量子具有一种固有的自旋，其值只能为‘$\pm h/(2\pi)$’”。没有记录证明这一点，因为爱因斯坦档案中缺少玻色的英文原稿。不过，1931年拉曼(Raman)和巴加万塔姆(Bhagavantam)发表的论文《光子自旋的实验证明》提供了证据[24]：玻色设想了量子除了能量$h\nu$和动量$h\nu/c$之外，还具有与运动方向平行的固有自旋角动量$\pm h/(2\pi)$的可能性。因此，权重因子“2”产生于量子自旋为右旋或左旋的可能性，对应于角动量的两个交替符号。

2.4 玻色-爱因斯坦凝聚的实验实现以及创新发展

1924年，来自加尔各答的不知名的30岁印度青年玻色，给当时著名的德国物理学家爱因斯坦写了一封简短的信。在信中，玻色请求爱因斯坦帮助发表一篇题为《普朗克定律和光量子假说》的论文[25]。爱因斯坦虽然不知道作者是谁，但还是阅读了这篇论文，并将其翻译成德语推荐到德国《时代周刊》杂志发表。关于玻色的论文，爱因斯坦评价说：“在我看来，玻色对普朗克公式的推导是一个重要的进步。他使用的方法也促成了理想气体的量子理论的发展，我会在其他地方更详细地讨论这一理论”[25]。显然，爱因斯坦对玻色的这一新颖的思路非常感兴趣，并在柏林科学院的物理数学研讨会上阅读了这篇论文[26]。会后，他立即给玻色寄去一封信，称赞玻色的工作是向前迈出的“美丽的一步”[25]。

随后，爱因斯坦推广了玻色的理论，预测如果将这种原子的气体冷却到极低温度，所有原子都会突然聚集在尽可能低的能量状态。这就是后来对量子物理和统计物理学产生重大影响的“玻色-爱因斯坦凝聚”。这一假说在当时非常大胆，但是受限于实验条件，一开始进展缓慢。直到1987年，华裔科学家朱棣文通过激光冷却技术俘获了中性钠原子[27]，推动了玻色-爱因斯坦凝聚的实验实现。朱棣文因在该领域的突出贡献荣获1997年诺贝尔物理学奖。1995年，埃里克•康奈尔(Eric Cornell)和卡尔•维曼(Carl Wieman)借鉴了朱棣文的超低温技术，实现了实验室条件下的玻色-爱因斯坦凝聚态[28]。紧接着，沃尔夫冈•凯特勒(Wolfgang Ketterle)独立于康奈尔和维曼的工作，对钠原子进行了相应的实验[29]，他用两个独立的玻色-爱因斯坦凝聚，获得了非常清晰的干涉图案。这个实验表明凝聚态原子具有很好的相干相位。凯特勒还产生出在重力作用下下落的“玻色-爱因斯坦凝聚液滴”，最终证实了这一长达70余年的物理学假说。这三位研究人员因其发现共同获得2001年诺贝尔物理学奖。

随着玻色-爱因斯坦凝聚的证实，超冷玻色以及费米气体性质的研究迅速成为科学界关注的焦点。Bloch等人[30]在探索超低温费米气体的实验中，深入研究了强相互作用体系中多体物理的Feshbach共振，并将超冷原子场研究与多个物理领域的基本问题联系起来；Giorgini等人[31]从理论角度审视了量子简并原子费米气体的物理性质，尤其关注了稀薄气体低温下的超流相；Chin等人探索了超低温气体中的Feshbach共振现象、简并费米气体和超低温分子等课题[32-33]。这些研究不仅推进了对玻色-爱因斯坦凝聚现象的理解，也支持了微重力、原子激光源、少体物理和原子波干涉测量等领域的长期研究。2020年，Aveline等人[34]通过将大量原子置于微重力环境，初步证明了微重力环境在冷原子实验中的优势。

玻色和爱因斯坦之间的通信是科学史上的佳话，为物理学的新现象奠定了基础。推测玻色-爱因斯坦凝聚在应用领域颇为有趣，所涉及的对物质的新颖“控制”技术给精密测量和纳米技术等领域带来革命性变革。值得一提的是，20世纪初爱因斯坦已是全球闻名的物理学家，特别是在爱丁顿日食探险之后。因此，爱因斯坦鼓舞人心的形象极大地激励了像玻色这样的年轻科研人员，他们的研究成果又显著影响了埃尔温•薛定谔(Erwin Schrödinger)后续的工作，并为1925年后量子力学的发展作出了卓越贡献。1926年，基于玻色的方法，恩里科•费米(Enrico Fermi)和后来的保罗•狄拉克(Paul Dirac)推

导出一个新的、遵循泡利不相容原理的粒子集合分布公式，该公式后来被称为费米-狄拉克统计。与此对应，符合玻色-爱因斯坦统计数据的粒子被命名为“玻色子”，这是狄拉克在他出版的《量子力学原理》中创造的术语[35]。

3 结论

玻色的伟大贡献是众所周知的。本文回顾了玻色的生平、思想渊源与科学贡献。尽管玻色成长于英属殖民地印度，但他不仅刻苦学习，还对新兴的量子力学表现出深刻的理解和感悟。这种精神是他作为科学家值得赞扬的特质。他创造性地认识到粒子的不可区分性(或全同性)，表现出对量子不连续性的独特理解，认真思考了爱因斯坦关于光量子的理论。玻色的思想与爱因斯坦颇为相似，尤其是重新推导普朗克定律的动机，这推动了量子力学的新发展，包括量子粒子的特性和薛定谔的波动力学。他是玻色-爱因斯坦凝聚这一物理现象的发现者之一，为现代量子物理学的重要研究领域作出了开创性的贡献。

(2024年3月20日收稿)■

参考文献

[1] BANDYOPADHYAY P. Satyendra Nath Bose (1894–1974) [J]. Hadronic J Suppl, 1985(2): v-ix.

[2] BOSE S. His majesty's opponent: Subhas Chandra Bose and India's struggle against empire [M]. Cambridge: Harvard University Press, 2011.

[3] BELLENOIT B H J A. Missionary education and empire in late colonial India, 1860-1920 [M]. London: Pickering & Chatto, 2007.

[4] DE VILLAMIL R. The principle of relativity [J]. Aeronaut J Lond Engl, 1897, 22(93): 282-284.

[5] JEFFERY G B. Sidelights on relativity [J]. Ourenglishclass Net, 2005, 112(4): 665-675.

[6] DARRIGOL O. The electrodynamic origins of relativity theory [J]. Hist Stud Phys Biol Sci, 1996, 26(2): 241-312.

[7] BANERJEE S. Transnational quantum: Quantum physics in India through the lens of Satyendra Nath Bose [J]. Phys Perspect, 2016, 18(2): 157-181.

[8] MEHRA J, RECHENBERG H. The historical development of quantum theory [M]. New York, NY: Springer, 1982.

[9] SHAHA M N, BASU S N. On the influence of the finite volume of molecules on the equation of state [J]. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci, 1918, 36(212): 199-202.

[10] SAHA M N, BOSE S N. XLV. Intelligence and miscellaneous articles: on the equation of state [J]. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci, 1920, 39(232): 456-456.

[11] BOHR N. XLII. On the quantum theory of radiation and the structure of the atom [J]. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci, 1915, 30(177): 394-415.

[12] SOMMERFELD A. Zur quantentheorie der spektrallinien [J]. Ann Der Phys, 1916, 356(17): 1-94.

[13] BASU S N. LXXI. On the deduction of Rydberg's law from the quantum theory of spectral emission [J]. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci, 1920, 40(239): 619-627.

[14] EINSTEIN A. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light [J]. Annalen der Physik, 1905, 17(132): 1-16.

[15] KLEIN M. Thermodynamics in Einstein's Thought: Thermodynamics played a special role in Einstein's early search for a unified foundation of physics [J]. Science, 1967, 157(3788): 509-516.

[16] DUNCAN A, JANSSEN M. Pascual Jordan's resolution of the conundrum of the wave-particle duality of light [J]. Stud Hist Philos Sci Part B Stud Hist Philos Mod Phys, 2008, 39(3): 634-666.

[17] BOSE. Planck's gesetz und lichtquantenhypothese [J]. Z Physik, 1924, 26(1): 178-181.

[18] SHARMA J. Satyendra Nath Bose [J]. Phy Today, 1974, 27(4): 129-131.

[19] LOUDON R, VON FOERSTER T. The quantum theory of light [J]. Am J Phys, 1974, 42(11): 1041-1042.

[20] BOSE S N. Wärmegleichgewicht im strahlungsfeld Bei anwesenheit von materie [J]. Z Für Phys, 1924, 27(1): 384-393.

[21] WALI K C. Satyendra Nath Bose: his life and times: selected works (with commentary) [M]. Hackensack: World Scientific, 2009.

[22] EINSTEIN A. Zur Quantentheorie der Strahlung [M]. Verlag u. Druck Gebr. Leemann, 1916.

[23] GHOSE P. Bose statistics: a Historical perspective [M]// SN Bose: The man and his work, 1994, 1: 35-67.

[24] RAMAN C V, BHAGAVANTAM S. Experimental proof of the spin of the photon [J]. Nature, 1932, 129: 22-23.

[25] BANERJEE S. Bhadralok physics and the making of modern science in colonial india [D]. Vancouver, BC Canada: University of British Columbia, 2018.

[26] DUTTA M. Satyendra Nath Bose: mathematician, scientist & humanist [M]. Calcutta: Calcutta Mathematical Society, 1995.

[27] RAAB E L, PRENTISS M, CABLE A, et al. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59(23): 2631-2634.

[28] ANDERSON M H, ENSHER J R, MATTHEWS M R, et al. Observation of bose-einstein condensation in a dilute atomic vapor [J]. Science, 1995, 269(5221): 198-201.

[29] DAVIS K B, MEWES M O, ANDREWS M R, et al. Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms [J]. Physical Review Letters, 1995, 75(22): 3969-3973.

[30] BLOCH I, DALIBARD J, ZWERGER W. Many-body physics with ultracold gases

[J]. Reviews of Modern Physics, 2008, 80(3): 885-964.
[31] GIORGINI S, PITAEVSKII L P, STRINGARI S. Theory of ultracold atomic Fermi gases [J]. Rev Mod Phys, 2008, 80(4): 1215-1274.
[32] HSIEH D, XIA Y, QIAN D, et al. A tunable topological insulator in the spin helical Dirac transport regime [J]. Nature, 2009, 460(7259): 1101-1105.
[33] CHIN C, GRIMM R, JULIENNE P, et al. Feshbach resonances in ultracold gases [J]. Rev Mod Phys, 2010, 82(2): 1225-1286.
[34] AVELINE D C, WILLIAMS J R, ELLIOTT E R, et al. Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab [J]. Nature, 2020, 582: 193-197.
[35] DIRAC P A M. The Principles of quantum Mechanics [M]. Oxford: Oxford university press, 1981.

Bose's life and physical thought: to mark the 130th anniversary of Bose's birth

LI Zaidong①, NAN Xuemeng②, LIU Wuming③

① Tianjin Key Laboratory of Quantum Optics and Intelligent Photonics, School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; ② School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; ③ Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper focuses on the life and contributions to physics of Satyendra Nath Bose (1894—1974), an outstanding Indian physicist from the early 20th century. Bose considered the indistinguishability and probability explanation of identical particles. He discovered the statistical law of photonic gases based on quantum mechanics. Additionally, he derived Planck's formula for blackbody radiation. His work led to the discovery of Bose-Einstein statistics and Bose-Einstein condensates, which reflect Bose's outstanding contributions to the development of quantum physics.

Key words Bose, quantum physics, Planck's formula

（编辑：温文）

自然信息

马斯克旗下脑机接口公司完成第二次人体植入

2024年1月，美国科技公司Neuralink成功完成全球首例人体脑机接口(BCI)芯片植入手术。近日，该公司又在第二个人身上植入了BCI。

据《自然》报道，Neuralink创始人埃隆•马斯克表示，第二个BCI工作良好，1 000多个电极中约有400个正在提供来自受体大脑的信号。他没有透露植入手术或接受者的细节，只是指出接受者患有脊髓损伤。而科学家正在观望Neuralink能否避免首次植入BCI时遇到的机械问题。

Neuralink的BCI名为Telepathy，是第三个在人体内进行长期测试的商业BCI植入物。Telepathy是一枚硬币大小的电子集线器，被放置于接受者颅骨中的一个洞里。从这个中心出发，手术机器人将64根柔性线穿过大脑周围的液体和膜，插入控制运动的大脑区域——运动皮层。

Neuralink联合创始人兼总裁Dongjin Seo表示，手术过程需要20到40分钟。每根线有16个记录位点共1 024个电极，可以记录神经活动，并通过蓝牙向外部设备发送信号。

Noland Arbaugh颈部以下瘫痪，是首位接受Neuralink的BCI的人，现在可以使用该设备控制电脑屏幕上的光标玩游戏。但在BCI植入一个月后，85%的柔性线从Arbaugh的大脑中缩回。他说，这削弱了设备功能，“真的非常困难”。

作为回应，Neuralink的工程师改变了算法，将神经数据转换为传递给计算机的命令。原始算法记录了单个神经元的活动，而改进后的算法记录了每个电极附近神经元的平均活动。虽然平均信号的分辨率较低，但效果立竿见影。

Neuralink神经外科主任Matthew MacDougall近日表示，第一次手术过程中产生了一个气囊，未来可能会使电极移位。植入第二个BCI的手术团队会尽量避免产生气囊，并将电子集线器放置在颅骨中较低位置，使柔性线更深地穿入皮层。

美国贝勒医学院神经外科医生和神经技术研究员Sameer Sheth说，对BCI植入过程进行如此多的改变“并不常见”，“但我认为，能从第一次中吸取教训是好事，这样第二次才能真正做得更好”。

Neuralink的竞争对手、美国Paradromics公司首席科学家Vikash Gilja则表示，该设备的稳定性和耐久性有待观察。

马斯克表示，今年可能会再植入8个BCI。他预测，未来的BCI将帮助患有精神病、癫痫和记忆力减退等疾病的人。

[吴玉 编译]