

# “声子”的诞生\*

谢梦祥 任捷<sup>†</sup>

(同济大学物理科学与工程学院 声子学与热能科学中心 上海市特殊人工微结构材料与  
技术重点实验室 上海 200092)

2022-11-15收到

<sup>†</sup> email: xonics@tongji.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20221205

“声子”是现代物理学中的重要概念，其英文名称“phonon”于1932年被正式提出，而这一年也是中国物理学会成立的时间。值此“phonon”诞生和中国物理学会成立90周年之际，文章简要追溯了phonon这一概念诞生的历史背景、20世纪30—40年代phonon的引用和传播情况、phonon传入中国物理学界的历程和早期发展情况等。可以看到，“声子”的诞生，与统计物理的发展、量子力学以及量子场论的诞生，紧密相连，密不可分。回眸这段历史是为了更好地启迪今日，走向未来，创造新的历史。

## 1 引言

声子(phonon)<sup>[1]</sup>，固体振动的量子化表征，是第一个被引入物理学中的“元激发”(或称“准粒子”)。其概念的出现引领了在凝聚态物理中引入各种集体激发的热潮。近年来，声子带隙晶体、拓扑能带、压缩相干态、声子自旋等概念在声子物理学领域中广泛应用，提供了新的声子调制手段，在热调控、声振动调控、量子物态调控和量子传感等方面展现出诱人的前景。

在“phonon”提出90周年这一特殊时间，我们对其诞生前后的历史进行了系统性地考证和梳理，对phonon何时被翻译为“声子”并在中国得到传播进行了详细追溯，以期向读者更充分地展示phonon的前世今生。本文共分6章，在第2章中我们回顾了phonon诞生的历史背景，展示了声子物理研究观念从经典到旧量子论，再从量子力学到量子场论的转变。第3章主要梳理了phonon提出后在国际上的传播情况，主要包括苏联内部(phonon的提出者为苏联人)、美国学界以及欧洲

学界(以玻恩学派为主)对phonon这一名词的使用情况。第4章将视角从国际转回国内，详细考证了中国物理学会主持的物理学名词规范工作，对phonon何时引入中国并翻译为“声子”进行了追溯。海外留学归来的中国物理先辈们对声子概念传播、声子物理学科建设做出了重要贡献。phonon提出后，物理学家围绕其“实在性”也进行了许多思考。这些思考从不同角度促进了物理观念的变革和物理理论的发展。我们在第5章中将对此进行简要探讨。

## 2 Phonon诞生的历史背景

对物理学而言，20世纪初是一个群星璀璨、天才辈出的时代。phonon的提出很难归功于某个天才富有洞见的灵光一闪，而是建立在众多物理学家为其搭建的基础之上的。化用牛顿的名言，phonon的诞生是站在多个巨人肩上取得的成功。

这一切要从经典能量均分定理在固体热容问题中的失效讲起。1876年，玻尔兹曼通过假设固体中的粒子都在做简谐振动，利用能量

均分定理得到固体热容是一个与固体种类、温度无关的常数，成功解释了1819年实验发现的杜隆—珀蒂定律(Dulong—Petit law)<sup>[1]</sup>。但进一步实验表明，在低温时热容不再保持为常数，而是随着温度的下降趋于零，这与经典能量均分定理得出的结论矛盾。众多科学家为此做出尝试却始终无法解决这一难题。开尔文在1900年4月发表的著名演讲《在热和光动力学理论上的19世纪乌云》(“Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light”)中，将固体比热的实验和能量均分定理间的矛盾称为19世纪热和光的动力学理论上的“第二朵乌云”<sup>[2]</sup>。

除此之外，传统能量均分定理在黑体辐射中的失效同样如阴霾般笼罩在许多物理学者的心头。1900年10月，普朗克通过内插法得到的黑体辐射公式和实验数据十分吻合，这给了普朗克解决这一阴霾的希望。他开始寻找隐藏在该公式背后的物理实质，发现不得不假设线性谐振子的能量必须存在最小的能量单元 $h\nu$ 。1900年12月24日，普

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 11935010)

[1] 本文主要回顾phonon(声子)诞生前后的历史。为避免混淆，本文在强调其诞生的历史或仅涉及国际情况时，采用英文“phonon”；在概述其在国内的传播发展概况以及其在整个物理学中的意义时使用中文“声子”。受篇幅和主题所限，本文对当代声子物理的丰富成果未能详细涉及，是为遗憾。

朗克在德国物理学会的演讲《关于正常光谱的能量分布定律》(“On the law of distribution of energy in the normal spectrum”, 1901年发表于《物理年鉴》<sup>[3]</sup>)中,正式提出了“能量量子”这一概念,揭开了20世纪量子论的帷幕。而这一天,如今也被公认为“量子论的誕生日”。

这场席卷整个物理领域的量子观念革命启发了众多天才的物理学家,在解决“第二朵乌云”的固体热容问题中起到了关键作用。Phonon作为固体振动的量子化,也在这场贯穿20世纪前半叶的革命中逐步展现在世人眼前。

### 2.1 固体中的波:从经典到量子

作为量子论的提出者,普朗克在很长时间内其实并不看好这一理论,他回忆当年引入能量量子化,称其为“一次绝望的举动”<sup>[4]</sup>。真正拿起量子化这柄利剑刺向“乌云”的是爱因斯坦(图1(a))。1907年,爱因斯坦发表了关于固体热容问题的研究成果<sup>[5]</sup>。他基于简谐振子模型,采用了普朗克处理辐射的

量子形式来描述谐振子能量。换言之,爱因斯坦将能量量子化这一假设引入到了固体振动中,考虑到三维晶格具有3个方向的振动自由度,将所有自由度的量子化能量求和并对温度求导,便得到了比热容公式:

$$C_V = 3N_A k_B \left( \frac{h\nu}{k_B T} \right)^2 \frac{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right)}{\left(\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1\right)^2},$$

其中,  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $h$  为普朗克常数。一般情况下,爱因斯坦热容表现为温度的函数,这成功定性地解释了固体热容随温度下降的现象(图1(c)红色虚线)。而在  $h\nu \ll k_B T$  时(高温情况),上式回归经典的杜隆-珀蒂定律  $C_V = 3N_A k_B$ 。

爱因斯坦模型肯定了量子理论在固体振动研究中的正确性,但就此宣告“乌云”已经被彻底驱散还为时尚早,原因是在低温时爱因斯坦的理论值与实验值存在一定的偏差。1911年,爱因斯坦离开苏黎世大学,德拜(图1(b))接任爱因斯坦职

位的同时也着手考虑尚未完全解决的固体热容问题。在1912年发表的文章<sup>[6]</sup>中,德拜对爱因斯坦模型中“原子运动形式为频率相同的简谐振动”这一假设提出了改进,指出:“由于原子间相互作用效应较强,振动原子不会做单纯的周期简谐运动。而如果对原子运动进行傅里叶分解,那么原子的振动可以看作不同频率振动的叠加。”

爱因斯坦其实也做了类似思考,但这种方法数学上较为复杂,因此德拜另辟蹊径,选择从弹性方程出发。他认为固体中原子的振动可以看作由在连续介质中传播的多种模式的弹性波叠加而成。通过直接类比黑体辐射中电磁波在空腔里的模式数,德拜得到在  $\nu \sim \nu + d\nu$  范围内,振动模式数目与频率的关系为  $dz \propto \nu^2 d\nu$ 。一个由  $N$  个同种原子组成的系统,最多有  $3N$  个运动自由度,因此固体中的振动应该存在一个最大频率  $\nu_D$ , 满足:  $\int_0^{\nu_D} dz = 3N$ 。根据德拜模型得到的固体热容公式为

$$C_V = 9Nk_B \left( \frac{T}{\Theta} \right)^3 \int_0^{\frac{\Theta}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx,$$

其中  $\Theta = h\nu_D/k_B$  现被称作德拜温度,是表征材料热容性质的重要物理量。这一结果更为精确地描述了简单晶体的热容(图1(c)黑色实线)。在低温条件下,德拜热容近似与温度的三次方成正比,与实验数据十分吻合。

同样在1912年,玻恩(图2(a))和冯·卡门(图2(b)),钱学森的导师,“空气动力学之父”)二人在论文《关于空间格点的振动》(“Uber Schwingungen im Raumgitter”)中,通过引入周期性边界条件(即现在著名的玻恩-冯·卡门边界条件),在

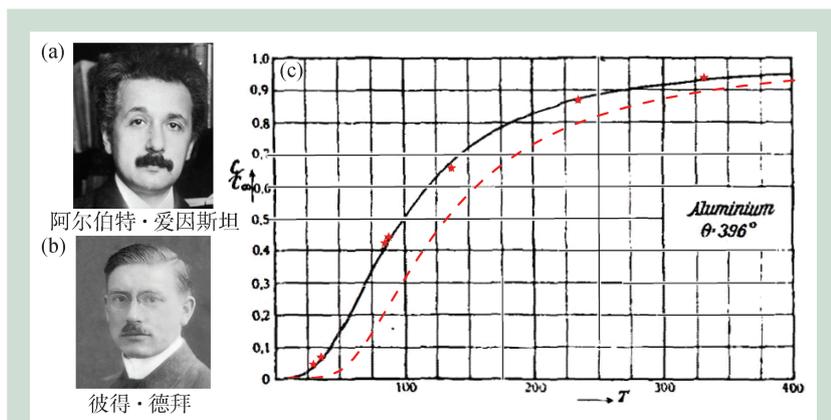


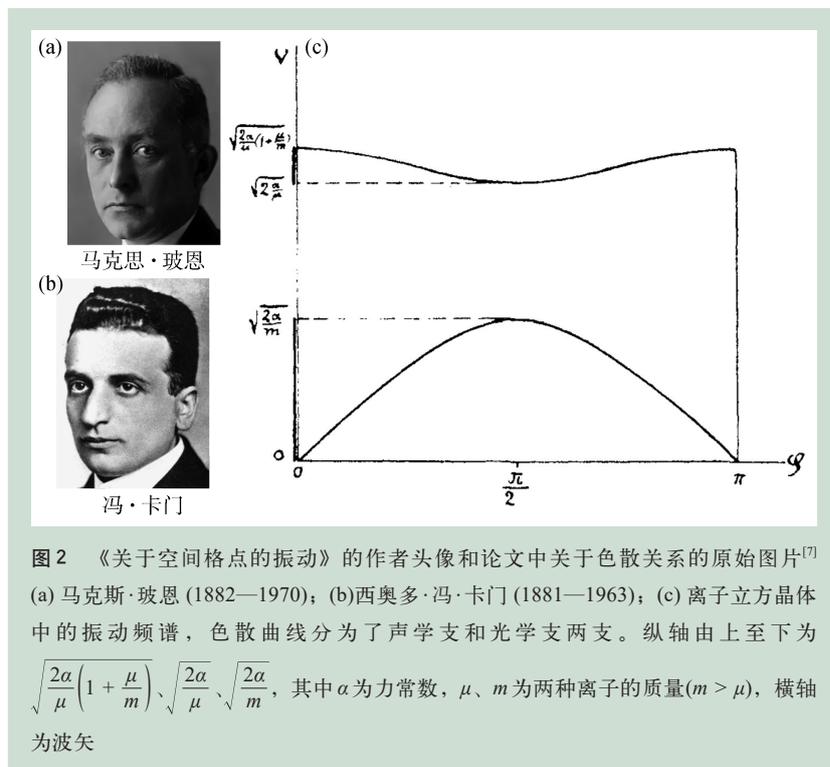
图1 爱因斯坦、德拜的头像和德拜原始文献图片 (a) 阿尔伯特·爱因斯坦(1879—1955); (b) 彼得·德拜(1884—1966); (c) 德拜原始论文中热容与实验数据的对比图<sup>[6]</sup>。原图中的实验数据用红色五角星凸显,为了强调爱因斯坦模型和德拜模型的差异,在原图基础上用红色虚线绘制了爱因斯坦的热容。纵轴中  $C_{\infty} = 3N_A k_B$  即经典理论的固体热容值,横轴为开尔文温度K

仅考虑最近邻原子相互作用的基础上得到了双原子晶格的振动谱,并进一步得到了固体热容的表达式<sup>[7]</sup>。虽然这一工作从更加贴近固体微观振动的实质角度描述了复杂晶体的热容,但德拜模型在保证精度的同时更加简洁、易于理解,因此在当时科学界中传播和影响更加广泛。不过玻恩和冯·卡门的工作在久远的历史长河中经受了时间的考验,其开创性地引入了晶格振动的简正模(normal modes)、色散关系等重要概念,并将振动分为象征着晶胞整体运动的低频声学支(acoustic branch)和象征晶胞内部形变的高频光学支(optical branch)<sup>[7]</sup>(图2(c))。这一工作深刻揭示了固体中晶格振动的特点,开辟了真正意义上的晶格动力学,为后续声子物理的发展奠定了坚实基础。

值得一提的是,玻恩还培养了大批中国学生和访问学者,比如彭桓武、程开甲、黄昆,间接为早期声子物理在中国的扎根、发展做出了独特的贡献。我们将在第4章详细阐述。

## 2.2 从波到 phonon: 量子场论的革命

在20世纪初量子力学和晶格动力学发展的过程中,玻恩充当着十分重要的角色。他凭借深厚的数学功底和富有远见的物理思维一次次地开拓着物理学的边界,晶格动力学如是,量子力学亦如是。量子论在固体物理中的结果指出,晶格振动由一系列能量量子化的简谐运动组成,每一个简谐模式都是所有原子参与的集体弹性振动,或称晶格振动的格波。这些弹性波或格波如何从波的图像转变到声“子”的图像,则起源于1926年开始的一场联



系波与某种粒“子”的“场量子化”观念革命。而这场变革,也要从玻恩这里讲起。

1926年,玻恩、海森伯(Werner Karl Heisenberg)和约当(Pascual Jordan)在开创量子力学矩阵描述的同时,也最先将量子力学研究的眼光从“粒子”转移到“场”身上<sup>[8]</sup>。在这篇名为《量子力学II》(“Zur Quantenmechanik. II”,也常被称为“three man work”)的文章中,他们同时实现了一维弦模型弹性振动的量子化和真空中电磁场的量子化。在物理学史中,这篇文章宣告了一条与“粒子的量子化”不同的道路——“场的量子化”——的出现,被视为“量子场论”诞生的标志性文献之一。

狄拉克在玻恩等人工作的基础上进一步考虑了场与物质的相互作用。在1927年发表的《辐射的发射和吸收的量子理论》(“The quantum theory of the emission and absorption

of radiation”)中,狄拉克通过场的正则量子化成功解释了自发辐射现象<sup>[9]</sup>。文章中,狄拉克指出:

“通过适当选择粒子的相互作用能量,描述原子与电磁波相互作用的哈密顿量可以看作原子与某种以光速运动并满足爱因斯坦—玻色统计的粒子相互作用的哈密顿量(The Hamiltonian which describes the interaction of the atom and the electromagnetic waves can be made identical with the Hamiltonian for the problem of the interaction of the atom with an assembly of particles moving with the velocity of light and satisfying the Einstein-Bose statistics, by a suitable choice of the interaction energy for the particles.)”

作为第一篇“应用”量子场论思想解决实际问题的文献,它在量子场论的发展中具有重要的意义。基于狄拉克提出的正则量子化方法,约当和维格纳(Eugen Wigner)

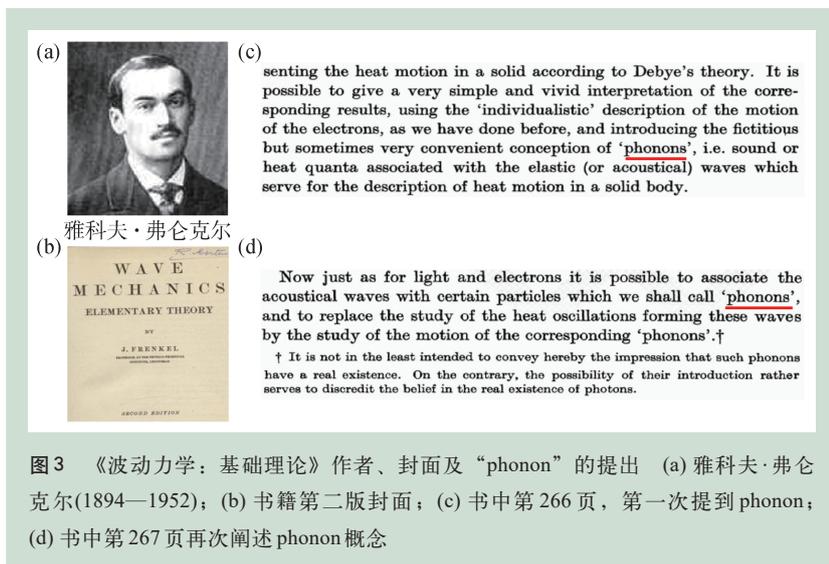


图3 《波动力学：基础理论》作者、封面及“phonon”的提出 (a) 雅科夫·弗仑克尔(1894—1952); (b) 书籍第二版封面; (c) 书中第266页, 第一次提到phonon; (d) 书中第267页再次阐述phonon概念

(1928年)<sup>[10]</sup>, 以及海森伯和泡利(Wolfgang E. Pauli)(1929年)<sup>[11, 12]</sup>很快将场与粒子间的联系进一步拓展: 不仅光子可以认为是电磁场的量子, 每种物质粒子都可以看作对应的场的量子(quanta)。

那么反过来, 表征弹性波或原子振动格波的场是否也可以看成某种“粒子”呢? 我们注意到同一时期, 德布罗意在1924年就已经提出了物质波和波粒二象性。同时在1927年的两篇文献中<sup>[13, 14]</sup>, 德布罗意就开始同时使用“light quanta”和photon (Lewis于1926年正式提出<sup>[15]</sup>)了。1929年德布罗意获得诺贝尔物理学奖, 在客观上也进一步刺激了波与粒子等价联系的思想。1930年, 塔姆(I. Tamm, 1958年诺贝尔物理学奖得主)在研究固体弹性(热)振动对光的散射时, 朝这一方向迈出了勇敢一步<sup>[16]</sup>, 提出:

“如果我们类比光量子的概念, 提出‘弹性量子’的概念, 那么量子力学计算的大部分结果都可以生动地表述出来(Führt man in Analogie zu dem Begriff der Lichtquanten den Begriff der ‘elastischen Quanten’ ein, so läßt sich ein wes-

entlicher Teil der Ergebnisse der quantenmechanischen Rechnungen anschaulich formulieren.)”

然而千呼万唤始出来, 犹抱琵琶半遮面。根据文献[17]的考证, 塔姆止步于“弹性量子”的称呼, 真正将弹性量子概念正式命名为“phonon”的另有其人, 他就是苏联物理学家弗仑克尔(Jacov Frenkel, 图3(a), 著名耦合振子模型Frenkel—Kontorova(FK)模型里的F)。

1930年和1931年, 弗仑克尔在发表的两篇文章《论固体中光向热的转化I、II》(“On the transformation of light into heat in solids I、II”)中借鉴了塔姆的观点, 采用“heat quanta”和“sound quanta”<sup>[18, 19]</sup>指代格波的量子化。1932年, 弗仑克尔在他出版的书籍*Wave Mechanics: Elementary Theory* (图3(b))中, 正式将固体热振动的能量量子命名为“phonon”<sup>[20]</sup>, 并明确了phonon的物理含义为(图3(c)):

“描述固体热运动的弹性(或声)波相关的声量子或热量子(sound or heat quanta associated with the elastic (or acoustical) waves which serve for

the description of heat motion of solid body.)”

至此, 从爱因斯坦第一次将量子论引入固体物理中算起的25年后, phonon这一词终于正式地、完整地揭开了它神秘的面纱, 出现在世人眼中。弗仑克尔在提出“phonon”一词的同时对其物理内涵进行了深度的思考, 并在《波动力学: 基础理论》和《波动力学: 高等通论》(*Wave Mechanics: Advanced General Theory*)的正文与脚注中多有体现, 我们将在第5章对此进行详述。

### 3 Phonon早期传播的历史

在人类科技与文明的历史长河中, 许多伟大变革总是悄然发生, 而人们往往在很久后才能意识到它真正的意义。Phonon在被提出后并没有立刻得到国际科学界的广泛关注, 而是在漫长的时间中逐渐深入人心, 取得共识。

在整个30年代, 采用phonon一词的科技论文屈指可数。在各种期刊文献中, 我们可以找到的最早使用phonon一词的是1934年朗道和A. S. Kompanejev发表于《苏联物理学报》(*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*)的文章<sup>[21]</sup>。而进一步在该杂志中可以找到3篇朗道学派使用phonon的文章<sup>[22-24]</sup>。在这些文献中, phonon一词并没有专门标注引用出处, 似乎在20世纪30年代的苏联学界, phonon已经取得了广泛共识和认可。这一时期弗仑克尔在列宁格勒(现为圣彼得堡)理工学院任教, 其本人与苏联其他物理同行间的学术交流很可能对phonon在苏联内部的传播起到了促进作用。

而在整个30年代的国际英文

期刊上, phonon 就踪迹寥寥了。Phonon 诞生后的整整 10 年, 采用 phonon 一词的期刊论文屈指可数。据我们考证, 最早在国际英文期刊中提到 phonon 的文献是 1935 年发表在《印度科学院院报》的一篇文章<sup>[25]</sup>, 其作者为印度学者 B. V. Rao (1930 年诺贝尔物理学奖得主拉曼的学生, 玻恩评价 Rao 是一名十分优秀的实验物理学家<sup>[26]</sup>), 文章中用 photon 和 phonon 的碰撞过程来处理光波和介质振动间的散射, phonon 这一词的引文直接指向了弗仑克尔的《波动力学: 基础理论》这本书:

“拉曼将介质散射光视为光子、物质粒子和与之相关的声量子(或使用弗仑克尔后来给出的名称‘声子’)的集合(Raman treats the medium scattering light as an assemblage of photons ..., material particle ... and associated with the latter, quanta of sound (or ‘phonons’ to use the name given later by Frenkel).)”

而 phonon 第一次出现在美国物理学界, 据我们考证, 是 1938 年由詹姆斯·弗兰克(J. Franck, 1925 年获得诺贝尔物理学奖)和爱德华·泰勒(Edward Teller, 美国氢弹之父)在《化学物理杂志》发表的《晶体中激发能的迁移和光化学作用》(“Migration and photochemical action of excitation energy in crystals”)<sup>[27]</sup>。这篇工作多次使用 phonon 来描述振动量子(vibrational quanta)。弗兰克和泰勒这篇文章也是第一个将 phonon 概念介绍到化学物理领域的工作。实际上, 在这篇文章正式发表之前, 泰勒已经在斯坦福大学一个关于光化学的暑期会议上向听众介绍了 phonon 这个概念。在 *Science News Letter* 刊登的此次讲座的报道“Meet exciton and phonon,

new words in physics”中<sup>[28]</sup>, 错把泰勒当成了 phonon 的命名者。在同年年底的另一篇名为“Introduce new simplicity into atom mathematics”的报道中, 泰勒澄清了 phonon 的命名者是弗仑克尔<sup>[29]</sup>。至于泰勒从什么渠道得知并接受了 phonon 这一概念, 我们并没有找到直接的文献资料, 可能是通过他的好友朗道, 也可能是直接从弗仑克尔的英文书中了解, 这已经无从考证了。

而在美国物理学会旗下的知名期刊 *Physical Review* 中, 我们能追溯到的最早涉及 phonon 一词的文章, 是 1941 年两位苏联物理学家贡献的英文论文: 朗道的《液氦 II 超流性理论》(“Theory of the superfluidity of Helium II”)<sup>[30]</sup>以及波梅兰丘克(I. Y. Pomeranchuk, 苏联科学院院士)的《电介质热导率》(“On the thermal conductivity of dielectrics”)<sup>[31]</sup>。在朗道的文章中, Phonon 不再指固体晶格振动的量子化, 而是用来表征流体在低能激发时原子的集体振动。而波梅兰丘克的文章采用多声子相互作用模型推导了电介质中的热容在温度远高于德拜温度和低温两种情况下的函数关系。phonon 一词在文章中反复多次出现。

在 40 年代后期, phonon 在英文期刊的出现频率逐渐增大。到了 50 年代, 在国际英文期刊如 *Physical Review* 中就已经可以非常容易地找到使用 phonon 的文章了。

不过在欧洲物理学界, 情况稍有不同。在 2.1 节和 2.2 节中, 我们多次强调了玻恩在量子物理和声子物

理领域观念转变中的关键作用, 但在玻恩发表的多篇晶格动力学文献中却没有使用过 phonon 一词, 出现最频繁的是代表整体运动的“long wave”和晶格内部运动的“short wave”<sup>[32-35]</sup>, 以及“thermal wave”<sup>[36]</sup>、“vibration”<sup>[37, 38]</sup>或者“lattice vibration”<sup>[39-41]</sup>。我们进一步调研发现, 玻恩曾在 1947 年对朗道解释液氦 II 超流性所采用的 Phonon—Roton 模型<sup>[30]</sup>进行了评述, 认为朗道导出的算子方程含义是模糊的, 其理论不是一个完整的量子液体理论<sup>[41, 42]</sup>。据此可以推断玻恩本人最迟在 1947 年已经知道了 phonon 这一名词。不过即便是 1947 年后的晶格动力学文章中, 玻恩也没有采用过 phonon 一词<sup>[36, 43]</sup>。而且在 1954 年出版的由玻恩和黄昆二人合著的 *Dynamical Theory of Crystal Lattices* (图 4 左) 一书中, 也没有出现 phonon<sup>[44]</sup>。尽管根据我们的调研, 1951 年黄昆就已经在发表的论文中使用过 phonon<sup>[45]</sup>。北京大学出版社于 1989 年翻译出版的《晶格动力学》中文版(图 4 右)仍然忠于原著, 没有使用“声子”一词。黄昆先生在中文版的序言中对此略有提及<sup>[46]</sup>:

“由于这本书的性质所限, 对于

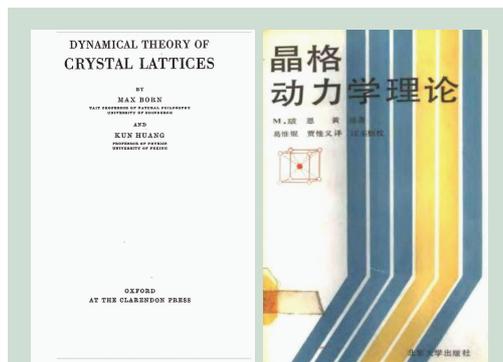


图 4 《晶格动力学》英文原版第一版(左)和中文译版第一版(右)封面

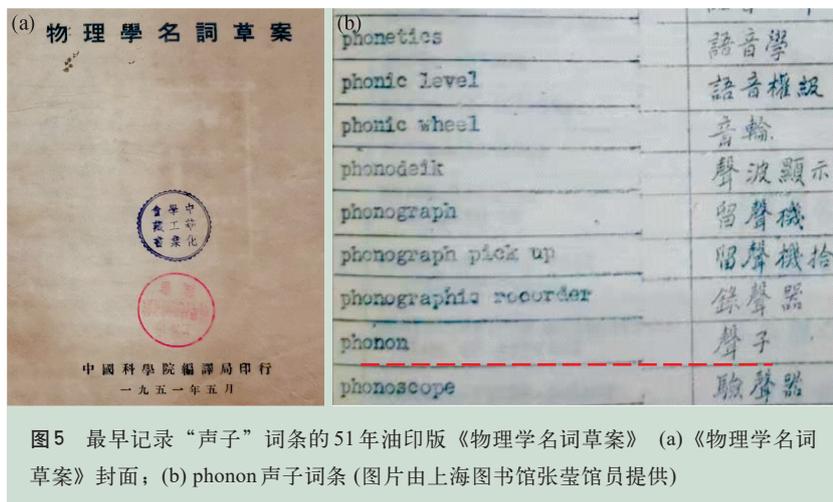


图5 最早记录“声子”词条的51年油印版《物理学名词草案》(a)《物理学名词草案》封面；(b) phonon 声子词条(图片由上海图书馆张莹馆员提供)

玻恩学派以外的工作讨论很少；书中极少提及苏联的工作，则更是由于当时对于苏联的工作几乎完全不了解。以后了解到苏联科学家在晶格理论方面做了很杰出的工作。然而，由于这些年来自己并未继续这方面的工作，所以没有条件对原书进行适当的补充和修正。”

#### 4 Phonon 在国内的引入和发展

1932年，在 phonon 诞生的同一年，中国物理学会正式成立。这一年是日本蓄意发动侵华战争的“九·一八事变”第二年，东北全境沦陷，中华民族正处于内忧外患、战火纷飞的动荡年代。中国物理学工作者团结一致，勤奋工作，在极为恶劣的环境中，努力探索发展中国物理学的道路。在这样的大背景下，很多资料都难以得到有效的保存，想要具体考证 phonon 一词何时、以何种方式翻译成中文“声子”有很大难度。我们将主要目光聚焦在中国物理学会负责的物理学名词规范化工作上，详细考证了名词规范化工作的历史，最终确定中文物理学名词“声子”最早出现在1951年中科院编译局出版的《物理学名词草案》中。

海归学者们对声子概念和声子物理学在国内的传播和发展也做出了独特贡献，比如程开甲编写了我国第一本《固体物理学》、黄昆和谢希德二人编写了我国第一本《半导体物理学》等教材。这些教材和对应课程均详细介绍了声子物理学。

##### 4.1 中国物理学会在物理学名词中的贡献

自1932年成立之始，中国物理学会就十分重视中文物理学名词规范化的工作。phonon 的引入和对应中文译名“声子”与中国物理学会的此项工作密切相关。在中国物理学会召开的成立大会上，参会的国立编译馆人员“提议组建名词审查委员会，转任厘订物理学名词事宜”<sup>[47]</sup>。1933年4月召开的“天文数学物理讨论会”通过了物理学名词审查委员会提出的“规定物理学名词案”，确定了审定的各项原则<sup>[48]</sup>，同时决议将全部物理学名词交由中国物理学会负责整理。1933年8月的中国物理学会年会上，由会员推举选出的杨肇嫔(主任委员)、王守竞、何育杰、吴有训、周昌寿、裘维裕、严济慈7人组成物理学名词审查委员会，开展物理学名

词的审定工作<sup>[49]</sup>。经过大量审定和编译工作，委员会于1934年出版了第一版的《物理学名词》(后文称“34年版《物理学名词》”)，除去重复词条共收录5147个名词<sup>[48]</sup>。

34年版的《物理学名词》具有特殊的意义，它的出版宣告了自1920年起“十余年来屡修未葺之事业，至此始得告一段落”<sup>[47]</sup>，这本《物理学名词》发行后曾多次再版，在1950年发行了第六个版本。不过34年版(包括再版的50年版)《物理学名词》并没有收录 phonon 一词。根据我们上文的调研，这一时间刚刚出现的 phonon 基本仅在苏联内部传播，因此34年版《物理学名词》没有收录 phonon 于其中也是十分正常的。

抗日战争时期，中国物理学会向西迁移，离乱之际，国运如缕，一夕数惊，居处无定，物理学名词审查委员会的工作几近停滞。举目望去，幽暗长夜之中尚有一息薪火得以存续：上海沦陷时期，在上海租界留守的杨肇嫔、陆学善、王福山(同济大学物理系老系主任)等人在与内地断联，生活几近无以为继的处境下弦歌未止，笔耕不辍。对当时的情形，陆学善曾回忆道：“那时我们在上海见面时不谈艰苦的生活，只谈名词翻译，有时几天讨论一个名词，非常认真。讨论定下的名词编写成书，自己出钱，装订成册”<sup>[49]</sup>。之后他们将做成的草案送到当时在昆明的中国物理学会总会，昆明的委员与学会会员又一同对稿件再次审阅。抗日战争胜利后的1947年9月18日，物理学名词审查委员会召开工作会议，根据各地会员意见，再次审核抗战时期取得的成果，对34年版《物理学名词》

进行增订，形成了《物理学名词增订稿》(后文简称47年《增订稿》)。这一增订稿在建国后对物理学名词统一工作有着极为重要的意义，遗憾的是由于当时局势，修订结果未及及时刊行<sup>[49]</sup>。

新中国一成立，中央人民政府就十分重视学术名词的统一工作，在文化教育委员会下设立了学术名词统一工作委员会，经中国物理学会的推荐，聘请王竹溪、王淦昌、方嗣榘、孙念台、陆学善、葛庭燧和杨肇嫌七人组成工作小组。在34年版《物理学名词》以及47年《增订稿》的基础上，新一版的《物理学名词》于1954年正式发行，收录名词9696条<sup>[50]</sup>。在这版《物理学名词》中，我们终于找到了phonon这一词条，对应的中文即为“声子”。

经进一步考证，我们发现，早在1951年3月中旬审定工作便基本结束，随即由中国科学院编译局“编成草案，分发有关各方，征求意见”<sup>[51]</sup>。我们最终在上海图书馆找到了这本馆藏的51年油印版《物理学名词草案》(图5(a))，并发现其中可以查到phonon和“声子”的词条(图5(b))。因此“声子”(phonon)可考证的最早收录时间也提前至1951年。考虑到这本《物理学名词草案》编订的主要依据是34年版《物理学名词》和47年《增订稿》，而34年版《物理学名词》中并没有出现phonon这一词条，因此phonon的引入和中文翻译很大可能是杨肇嫌等人在抗日战争时期的《增订稿》成果。遗憾的是我们并没有找到47年《增订稿》的任何纸质资料，无法证实这一猜想。可能由于种种原因，这本47年《增订稿》已经散佚到历

史的漫漫长河之中去了。

## 4.2 归国学者对我国声子物理学发展的贡献

在中国物理学会的物理学名词编纂工作如火如荼进行的同时，一大批海外求学的留学生受振兴中华，报效祖国的精神感召毅然踏上了归国的旅程，其中包括了对我国声子物理学科研建设及教育事业做出重要贡献的程开甲先生、彭桓武先生和黄昆先生。

根据我们的调研，1950年归国的程开甲(图6(a))是最早在中文科研论文中使用中文“声子”词汇的人，在1956年发表的论文中<sup>[52]</sup>，程开甲提出了解决海特勒—彭理论可能存在的红外发散问题的方法。引言的最后，程开甲提到“对于研究固体中的离子晶体的声子和电子作用也有此相似的情景(即低频发散)，所以这个理论的发展会有利于晶体的电子论”。此外，程开甲还在1958年发表了另一篇文献<sup>[53]</sup>，题为“离子晶体中慢电子—声子相互作用的理论：电子的有效质量和基态能量”。

自1950年起，程开甲在浙江大学、南京大学开展了物理学学科建设和固体物理的教学工作。在1959年，他将在南京大学教授固体物理学所使用的讲义整理装订成册，出版了新中国的第一本《固体物理学》书(图6(d))<sup>[54]</sup>。在其固体比热一节中，程开甲在脚注里给出了“声子”的定义：“每一个振动频率为 $\omega_j$ 的振动子的激发态称为声子，

特别在 $n=1$ 时，表示具有一个声子，具有能量 $h\omega_j$ ，具有动量 $h\omega_j/c$ ， $c$ 为声速”。同时在附录24中，程开甲基于声子模型得到了光频支与电场相互耦合的哈密顿量。作为国内第一本固体物理教材，这本书对我国声子物理的教学与科研起到了重要作用，其中涉及的不少内容至今仍然十分先进。

1960年，程开甲任第二机械工业部第九研究所副所长，参加原子弹的研制，从此改变研究方向为爆轰物理和状态方程理论研究，为我国的国防科技事业隐姓埋名二十多年。与程开甲经历相似的还有他的师兄彭桓武(图6(b))，二人均在玻恩名下攻读博士学位，均为新中国“两弹一星”元勋。彭桓武是玻恩名下的第一位中国留学生，也是最早用量子理论研究固体晶格热物理的中国人。1940年，彭桓武以《电子量子理论在金属力学和热学性质中的应用》(“Application of quantum theory of electrons to the mechanical and thermal properties of metals”)为



图6 程开甲、彭桓武、黄昆及其著作 (a), (d) 程开甲和他编订的《固体物理学》封面; (b), (e) 彭桓武和他的博士论文封面; (c), (f) 黄昆和他与谢希德共同编订的《半导体物理学》封面

题发表了博士论文(图 6(e)),并于 1941 年和 1942 年在博士论文的基础上进一步发表了三篇晶格动力学领域的文章<sup>[55-57]</sup>。不过在这几篇文章中提到关于晶格原子或者离子运动时,多采用 thermal wave,并没有用到过 phonon。

彭桓武在完成其博士论文后改变研究方向,前往都柏林研究院进行介子理论方面的研究。上文提到的程开甲对海特勒—彭理论的修正(即参考文献[52])中的海特勒—彭辐射理论即为彭桓武在这一时期的工作<sup>[58]</sup>。1947 年回国的彭桓武致力于缩小国内外物理学差距,先后在云南大学、清华大学、北京大学教授量子力学,并积极邀请著名物理学家访华或为国内年轻物理学家争取出国交流机会。随后,彭桓武为了“两弹一星”国家重大战略需要,再次调整自己的研究方向,在中子物理、辐射流体力学、爆轰物理等领域取得突破进展,为原子弹和氢弹等战略核武器的设计奠定了理论基础。

被誉为“中国声子物理第一人”的黄昆先生(图 6(c))也是中国学者中最早在英文文献中使用“phonon”的(见 1951 年的论文<sup>[45]</sup>)。而在归国之前,黄昆先生已经在声子物理领域做出了开拓性贡献,其中最著名的两项工作当属“黄方程”<sup>[59-61]</sup>和“多声子跃迁理论”<sup>[62]</sup>。在文章[60]中,黄昆利用自己提出的方程处理了离子晶体中晶格振动光频支与电磁波的耦合问题,解释了离子晶体的红外色散特性。而黄昆处理的这种光波与晶格振动的耦合产生的新的元激发,现在被称为“声子极化激元”。在文章[62]中,黄昆虽也未使用 phonon 一词(采用的 lattice vibrational quanta 等词汇),

但文章提出了后来被称为“多声子跃迁理论”<sup>[63]</sup>的方法,来处理固体杂质缺陷束缚电子态跃迁问题,被公认为是电子—声子相互作用在固体缺陷光吸收领域的开创性工作<sup>[64]</sup>。而文章中引入的表示跃迁前后声子云的平均声子数之差的无量纲因子  $S$ ,也被命名为黄—里斯因子(Huang—Rhys factor)<sup>[65]</sup>。值得指出的是,这篇 1950 年的文章实质上首次揭示了“相干声子态”的概念<sup>[65]</sup>,远远早于 1963 年格劳伯(Roy J. Glauber)提出的相干光子态(后者因此荣获 2005 年的诺贝尔物理学奖)<sup>[66]</sup>。

黄昆认为“在中国培养一支科技队伍的重要性远远超过个人在学术上的成就。”这一理念不但体现在其持续一生的教学生涯中,更在科研工作中潜移默化地影响着新一代又一代青年声子物理工作者。1951 年归国后,黄昆首先在北京大学承担本科生近代物理和统计物理的教学工作。1953 年开始,黄昆担任北京大学固体物理专门化教研室主任<sup>[67]</sup>,为研究生、中国科学院应用物理所的科研人员和一些高校进修教师上固体物理课程,为我国的固体物理领域培养了一批骨干人才。

1956 年,教育部为了迎头赶上国际前列水平,成立了五校联合的半导体专门化,黄昆担任半导体教研室主任,谢希德担任副主任。黄昆是这一决策的主要建议人,同时也是实施的主要组织者。这次专门化培训班培养了二百余名学生,成为我国半导体事业的“黄埔一期”<sup>[64]</sup>。1958 年,黄昆和谢希德二人基于 1956—1958 年这两年教学所用的讲义出版了新中国第一本《半导体物理》教材(图 6(f))<sup>[68]</sup>。在 1958 年出版的这本书中,可以很容易地找到“声子”这一中文词汇及

其相关物理内容。

## 5 Phonon 在物理学中的意义

声子,作为表征固体振动模的能量量子,其诞生与统计物理的发展,量子力学以及量子场论的诞生紧密相连,更与“光子”概念的诞生和发展密不可分。能量量子化、玻色—爱因斯坦统计和量子场论观点,这些对声子诞生起到关键作用的理论和思想,实际上都是起源于对电磁波和光子的研究。历史上声子(phonon)这一概念无论是物理内涵还是命名方式也都一定程度上受到了光子(photon)的启发和影响。

自声子诞生之初,声子和光子间的类比探讨从未停止。一方面,弗仑克尔在提出“phonon”一词后随即在书中指出它不具有像 photon 那样的“实在性”<sup>[69]</sup>:

“然而,我不认为会有人相信这种‘声子’的实在性。当然,这并不意味着光子同样是不真实的,因为声学和光学之间的类比与光学和力学(或声学和单粒子力学)之间的类比一样肤浅(I do not think, however, that anybody would believe in the reality of such ‘phonons’. This does not mean, of course, that the photons are equally unreal, for the analogy between acoustics and optics is just as superficial as that between optics and mechanics (or acoustics and the mechanics of single particles).”

可见在一开始,物理学家就不认为声子是和电子、光子一样可以存在于真空中的物质粒子,而仅仅是作为一种简化研究固体振动性质而引入的一种抽象概念。实际上,在 1929 年派尔斯(R. Peierls)针对固体热导率提出晶格中弹性波相互作用的倒逆过程(umklapp process)

时<sup>[70]</sup>，指出波散射前后准动量之间可差一个倒格矢。用现代的语言讲，就是由于晶格介质的存在，声子在相互作用前后准动量不守恒，可以差一个额外的介质周期性提供的准动量。这与光子、电子等在真空中可以存在的物质粒子所遵循的动量守恒行为大不一样。且根据测不准原理 $\Delta x \cdot \Delta k \geq 1$ ，对于具有明确准动量 $k$ 的声子来说，有 $\Delta x \rightarrow \infty$ ，即声子的位置无法确定。因而，声子既不是传统的“真实”粒子，也不局域在实空间中，而是代表一种集体激发的非局域准粒子。这种图像是便于处理介质中的多物理相互作用的。

这一“准”粒子观念随后升华为：介质中某种场的振动波或多体相互作用产生的集体运动状态的能量量子，均可视为介质中的某种元激发(elementary excitation)。元激发这一准粒子物理概念的引入，极大地启发了物理学家对凝聚态物理中多物理场与物质粒子各种相互作用的思考。声子，作为物理学中引入的第一个元激发，从准粒子的角度，更简洁地描述了固体中物质粒子的复杂集体运动和相互作用，相继启发了更多的丰富的准粒子，如：激子(exciton, 1931年弗仑克尔提出概念<sup>[18, 19]</sup>，1936年也由弗仑克尔命名<sup>[71]</sup>)，极化子(polaron, 1933年朗道提出概念<sup>[72]</sup>，1946年佩卡尔(S. I. Pekar)命名<sup>[73]</sup>)，极化激元(polariton<sup>2)</sup>，1956年法诺(U. Fano)提出概念<sup>[74]</sup>，1958年霍菲尔德(J. J. Hopfield)命名<sup>[75]</sup>)，等离激元(plasmon, 1951年玻姆(David Bohm)和派恩斯(David Pines)提出概念<sup>[76]</sup>，1956年派恩斯命名<sup>[77]</sup>)等等。这些准粒

子的英文名均以“-on”作为后缀，中文译名则均以“子”或“激元”结尾。

另一方面，声子这样的元激发准粒子性质又引发了物理学家对其实在性的进一步思考，反过来对声子类比的对象——光子是否真的“实在”这一问题提出质疑。其实早在一开始，在弗仑克尔提出“phonon”一词的同时，他就加了脚注(图3(d))：“我一点也不想在此表达声子是真实存在的这样的印象。相反，声子的引入可能对光子的真实性提出质疑(It is not in the least intended to convey hereby the impression that such phonons have a real existence. On the contrary, the possibility of their introduction rather serves to discredit the belief in the real existence of photons.)。”在弗仑克尔第二册的《波动力学：高等通论》<sup>[69]</sup>一书中，他也写到：“然而，我倾向于认为光子不比声子更加真实，在某种程度上，它们是由光现象中物质的波粒二象性的一种反映所创造的(I am inclined, however, to think that photons have no more reality than phonons, and that they are created by a reflection, as it were, of the wave-corpuscular duality of matter in the phenomena of light.)。”

随着量子场论的发展，这种对声子的思考演变为对光子、电子等基本粒子起源的探讨。20世纪后半叶不断发展的对称性破缺思想指出，如果系统基态具有一种称为连续对称自发破缺的特性，这个基态可以具有无能隙激发，且连续对称自发破缺后必然导致Nambu—Goldstone玻色子的出现<sup>[78]</sup>。基于这

一理论，无能隙声子可以认为是由连续平移对称性在周期晶格固体中的破缺导致的。但这一理论不足以解释光子和费米子的起源问题，激发了人们不断引入新的思想和理论。比如，场的振动涨落导致元激发准粒子的思想由文小刚等进一步发展，称为弦网凝聚。在这套理论下，所谓的基本粒子也不再基本，而是小于普朗克尺度下局域玻色子系统的低能集体激发所衍生出来的<sup>[79]</sup>。

## 6 总结

“夫夷以近，则游者众；险以远，则至者少。而世之奇伟、瑰怪、非常之观，常在于险远，而人之所罕至焉，故非有志者不能至也。”对物质运行规律和真理的不懈追求驱使着物理学家们在知识的边界不断探索。经历热力学统计物理到量子力学再到量子场论这一险远历程，声子这一“奇伟非常之观”终于展现在世人眼中。

声子诞生的历史可以用黄昆先生的名言“物穷其理，宏微交替”精要地总结。随着相关理论不断发展，晶格振动的图像从粒子运动到弹性波的传播，再从格波到声子，描述手段在“粒子(准粒子)”和“波(场)”间不断交替、层展，蕴含着丰富的辩证思维。连续与离散、波动与粒子、全局与局域、对称与破缺等等对立统一观念在声子物理里到处可见。每一次认知的螺旋上升，都昭示着人们对物质世界本源的更进一步。声子领域将随着人类对量子物态调控能力的增加而不断扩大，会越来越多地按需设计具有特殊功能的人工微结构和具有新奇性质的混合量子态，从而继

2) 这里的 polariton 主要是指 exciton polariton(激子极化激元)，而黄昆实际上在1951年提出了声子极化激元的概念(在4.2中我们对此有简要描述)。

续对科技、经济和社会进程产生重大影响,为物理学的新进展作出重要贡献。

抗战期间,杨肇谦先生曾写道“蛰居沪滨,幽忧隐愤,共相策励,亟思藉韬潜之光阴,从事于严正科学之述作,为将来复兴作育人才之

准备,效涓埃之助……”。每览此文,长不能喻之于怀。声子在国内的翻译、传播和发展离不开许多老一辈科学家在名词审定、教学、科研等领域的长久付出。中国物理学人的风骨和治学的严谨在他们身上体现得淋漓尽致。斯人已去,其志

长存,老一辈科学家对中国物理学(包括声子名词,声子物理)的贡献将被后来者永远铭记。

回眸这段历史是为了更好地启迪今日,走向未来,创造新的历史。谨以此文,庆祝声子诞生90周年以及中国物理学会成立90周年。

## 参考文献

- [1] 林宗涵. 热力学与统计物理学(第一版). 北京:北京大学出版社,2007
- [2] Kelvin L. Philosophical Magazine Series, 1901,2:1
- [3] Planck M. Annalen der Physik, 1901, 4: 553
- [4] Planck M. Nobel Lecture. 1920
- [5] Einstein A. Annalen der Physik, 1907, 327:180
- [6] Debye P. Annalen der Physik, 1912, 344: 789
- [7] Born M, von Karman T. Physikalische Zeitschrift, 1912, 13:297
- [8] Born M, Heisenberg W, Jordan P. Zeitschrift für Physik, 1926, 35:557
- [9] Dirac P A M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1927, 114: 243
- [10] Jordan P, Wigner E. Zeitschrift für Physik, 1928, 47:631
- [11] Heisenberg W, Pauli W. Zeitschrift für Physik, 1929, 56:1
- [12] Heisenberg W, Pauli W. Zeitschrift für Physik, 1929, 59:168
- [13] de Broglie L. Compt. Rend., 1927, 184: 273
- [14] de Broglie L. Journal de Physique et le Radium, 1927, 8:225
- [15] Lewis G N. Nature, 1926, 118:874
- [16] Tamm I. Zeitschrift für Physik, 1930, 60:345
- [17] Walker C T, Slack G A. American Journal of Physics, 1970, 38:1380
- [18] Frenkel J. Physical Review, 1931, 37:17
- [19] Frenkel J. Physical Review, 1931, 37: 1276
- [20] Frenkel J. Wave mechanics: Elementary theory, First edition ed. London: Oxford University Press, 1932
- [21] Landau L D, Kompanejev A. Zeitschrift für Physik, 1934, 6:163
- [22] Landau L D, Pomerantschuk I. Phys. Z. Sowjet., 1936, 10:649
- [23] Landau L D, Rumer G. Phys. Z. Sowjet., 1937, 11:18
- [24] Landau L D, Lifshitz E. Phys. Z. Sowjet., 1936, 9:477
- [25] Raghavendra Rao B V. Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, 1935, 1:473
- [26] Suryan G. Current Science, 2002, 83: 1597
- [27] Franck J, Teller E. J. Chem. Phys., 1938, 129:174106
- [28] Science New Letters. Science News and Science News, Washington D. C. 20036, 1938, p. 136
- [29] Science New Letters. Science News and Science News, Washington D. C. 20036, 1938, p. 396
- [30] Landau L D. Physical Review, 1941, 60: 356
- [31] Pomeranchuk I. Physical Review, 1941, 60:820
- [32] Born M, Fürth R. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1940, 36:454
- [33] Power S C. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1941, 38:61
- [34] Born M. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1942, 39:100
- [35] Begbie G H, Born M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1947, 188:179
- [36] Green H S, Born M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1948, 194:244
- [37] Fürth R. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1940, 37:34
- [38] Born M, Bradburn M. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1942, 39:104
- [39] Born M, Sarginson K. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1941, 179:69
- [40] Born M, Bradburn M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1947, 188:161
- [41] Born M, Green H S. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1947, 191:168
- [42] Born M, Green H S. Nature, 1947, 159: 738
- [43] Born M, Green H S. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1948, 192:166
- [44] Born M, Huang K. Dynamical Theory of Crystal Lattices. London: Oxford University Press, 1954
- [45] Huang K. Proceedings of the Physical Society. Section A, 1951, 64:867
- [46] 玻恩 M, 黄昆 著, 葛惟锬, 贾惟义 译. 晶格动力学理论. 北京:北京大学出版社, 1989
- [47] 前国立编译馆. 物理学名词. 上海:商务印书馆, 1934
- [48] 张林. 中国科技术语, 2019, 21:26
- [49] 阎守胜, 刘寄星. 物理, 2013, 42:401

- [50] 王琪. 中国科技术语, 2016, 18(5):53
- [51] 中国科学院编译局. 物理学名词. 上海: 商务印书馆, 1954
- [52] 程开甲. 南京大学学报, 1956, (04):83
- [53] 程开甲, 李正中. 科学通报, 1958, (06):186
- [54] 程开甲. 固体物理学. 北京: 人民教育出版社, 1959
- [55] Peng H W, Born M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1941, 178:499
- [56] Peng H W, Power S C. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1941, 38:67
- [57] Fuchs K, Peng H W, Born M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1942, 180:451
- [58] Heitler W, Peng H W. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1942, 38:296
- [59] Huang K. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1949, 45:452
- [60] Huang K, Born M. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1951, 208:352
- [61] Huang K. Nature, 1951, 167:779
- [62] Huang K, Rhys A F. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1950, 204:406
- [63] 黄昆. 物理学进展, 1981, 1:31
- [64] 朱邦芬. 物理, 2019, 48:488
- [65] 甘子钊. 物理, 2019, 48:496
- [66] Glauber R J. Physical Review, 1963, 130:2529
- [67] 朱邦芬. 黄昆——中国声子物理第一人. 上海: 上海科学技术出版社, 2002
- [68] 黄昆, 谢希德. 半导体物理学. 北京: 科学出版社, 1958
- [69] Frenkel J. Wave mechanics: Advanced General Theory, 1934
- [70] Peierls R. Annalen der Physik, 1929, 395:1055
- [71] Frenkel J. Phys. Z. Sowjet., 1936, 9:158
- [72] Landau L D. Physik Zeit. Sowjetunion, 1933, 3:664
- [73] Pekar S I. Journal of Physics (U. S. S. R), 1946, 10
- [74] Fano U. Physical Review, 1956, 103:1202
- [75] Hopfield J J. Physical Review, 1958, 112:1555
- [76] Bohm D, Pines D. Physical Review, 1951, 82:625
- [77] Pines D. Reviews of Modern Physics, 1956, 28:184
- [78] Goldstone J, Salam A, Weinberg S. Physical Review, 1962, 127:965
- [79] 文小刚. 量子多体理论: 从声子的起源到光子和电子. 北京: 高等教育出版社, 2004



欧普特科技  
GOLDEN WAY SCIENTIFIC

# 做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL OPTICAL COMPONENTS AND  
OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA








地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层  
E/5F M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING  
电话: 010-8809 6218 / 8809 6099  
邮箱: optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.