

我的研究生涯*

黄 昆

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

编者按 在黄昆先生 80 寿辰时,新加坡的 World Scientific 出版社用英文出版了黄昆先生的论文选集: *Selected Papers of Kun Huang*. 黄昆先生为选集中收集的 20 篇论文专门写了一篇《注释》. 看过该选集的同 志都认为《注释》实际上总结和介绍了黄昆先生一生中做研究工作的经历和经验,对所有从事科学研究的 同志,尤其是年轻同志,很有教益,建议《物理》杂志将《注释》翻译成中文发表. 后来我们了解到,北京 大学的张树霖教授已将《注释》译成中文. 在张树霖教授的支持和帮助下,《注释》的中文翻译稿经黄昆先 生校订并征得他本人以及 World Scientific 出版社的同意,现在本刊“特约专稿”栏以“我的研究生涯”为题 刊登,以飨读者.

大家可以看到,选择列出的论文在时间上持续 了 40 多年,这是一个相当长的研究生涯. 然而实际 上这些论文仅代表了我的两个活跃研究阶段所得到的 成果,一个是在我 30 岁左右的六年时间里,另一个 是在我 60 岁以后的近十年时间里. 在中间的年 份,我的时间都用在在北京大学的教学工作上,教学工 作常不时地被错误的教育改革方向所打乱.

论文 [47a] 讨论了点缺陷引起的 X 射线漫反射, 这是我对物理学论文库的第一个重要贡献,而且也 是在布里斯特(Bristol)大学的博士论文工作的一 部分. 假如我没记错的话,我是在第二次世界大战后 第一个到达英国布里斯特成为莫特(N. F. Mott)教授 的研究生的人. 刚开始,他向我建议了两个论文题 目,一个是小角晶粒间界能量的理论计算,另一个是 缺陷对晶体固态 X 射线反射的效应. 由于我所学的 物理学基础课程十分侧重于系统性理论,对于解决 晶粒边界问题我不知道如何下手,因而我就选择了 关于 X 射线的题目.

我发现这个题目的理论工作是直截了当的,论 文 [47a] 就是所得的结果. 现在回想起来,如果说有 什么特别之处值得一提的话,那我会说,在当时我作 为一个初学者,注意到了理论工作的实用性,并且认 识到,在足够低的温度下,比之于热散射效应,理论 所预言的漫散射效应应该在实验上被观察到.

莫特教授明显地对这个工作感到满意,他只是 在我写的初稿中添加了无数的冠词“the”,然后就直 接送去发表. 同时,他特别建议我应使著名 X 射线 晶体学家 Guinier 教授对此工作感兴趣,以使理论预

言的漫散射在实验上得到证实(因已知 Guinier 教授 将在布里斯特大学的一个招待会上露面),然而当机 会出现时,我发现我是如此的胆怯,以致于未敢去赢 得这位著名人物的注意. 莫特教授知道这件事后,显 然很失望. 结果,理论所预言的漫散射几乎在 20 年 后才第一次得到实验的证实. 由于那时正是中国“文 化大革命”的动乱时期,因而耽搁了几年后我才第 一次知道实验的进展情况. 那时,漫散射的观察已经成 为一种专门的 X 射线技术,常称为 HDS(Huang's dif- fuse scattering, 黄氏漫散射).

在完成指定给我的论文题目后,我仍剩下大量 的时间,可用于阅读文献和进一步从事我自己的某 些研究工作. 我所从事的反映在所列论文 [48a] 中的 想法,是在我读了莫特关于金属合金的工作后产生 的. 通过他用 Thomas - Fermi 方法对多价溶质原子电 荷屏蔽的处理,我第一次知道了这种方法,并深深地 为它的简洁和有用所吸引. 于是使我想到,对于单价 溶质,某些电荷的不均匀和随之而来的屏蔽效应也 应该存在. 比如将金原子溶解在银里,金原子的位置 就像一个势能阱,而捕获一些将会被周围正电荷所 屏蔽的电子电荷. 这就为应用 Thomas - Fermi 方法提 供了一个简单的模型来说明中性溶质合金的电荷重 新分布效应.

需要指出的是,这篇论文的标题明显地强调论 文中所有相关电子的散射效应已经用相移(phase - shift)方法(这是刚从莫特与 Massey 合写的关于原子

* 2001 - 10 - 18 收到初稿, 2001 - 12 - 10 修回

碰撞的书中学到的)进行过认真的计算. 论文[48a] 将为我在金属导体电子理论方面惟一的一项工作, 这项工作不久就被 J. Friedel 工作的重要进展所取代, 很明显, J. Friedel 是在 1948 年我离开布里斯特不久开始同莫特合作的. 我仍然记得, 当我作为一名 ICI (imperial chemical industry) 的博士后研究员在利物浦 (Liverpool) 的时候 (大约在 1950 年), 就听说 Friedel 在布里斯特进行着优秀的工作.

在完成我的博士论文后, 我到爱丁堡 (Edinburgh) 大学跟随玻恩 (Max Born) 教授做半年访问. 当时仅希望籍此能拓宽自己在固体物理学方面的知识. 然而在访问期间, 玻恩教授给我看了一本尚未完成的专著的手稿, 该书试图提出一个晶格动力学的普适理论. 由于他的建议, 将由我同他合作完成写书的工作. 结果这个任务花费了三年的时间. 像玻恩在这本书的序言中强调的那样, 这本书不完全是已发表文章的一个汇编. 我想, 所选论文 [50a] 中关于力常数 10 个不变条件的获得, 是对玻恩的这个评论的一个理想的例证. 这 10 个基本不变条件代表了这本书总特色所必须有的新结果, 同时它们也是从众所周知的玻恩早年发展的长声学波理论延伸出来的工作.

论文 [50b] [51a] 和 [51b] 叙述了为长波光学振动的唯象处理建立基础的一对方程及与其应用有关的一组工作. 引起我做这些工作的背景是这样的, 当我在布里斯特大学做研究生的时候, 弗勒里希 (H. Fröhlich) 也在物理系, 因此我大体知道弗勒里希和莫特提出的与电子散射相联系的光学振动微观模型的开拓性工作. 然而当讨论这些问题的时候, 我已是一名 ICI 的博士后, 在利物浦大学的理论物理系同弗勒里希在一起. 由于弗勒里希在电介质研究方面的名望, 系里从工业界获得了许多电介质研究方面的资助. 因而在休息喝茶时, 作为介电极化基础的微观细节问题常被提出来讨论. 由于这些介电问题的微观处理的固有的复杂性, 这些讨论和我所记得的光学振动的微观模拟强烈地吸引了我, 再加上我特别不善于处理复杂的细节问题, 就构成了我在形成论文 [50b] 中唯象方程的总背景.

引入与光学振动相联系的这样一对方程的理论基础无疑应归之于与处理弹性波方法的比较. 弹性波通常能在唯象的基础上 (普遍的胡克定律) 进行巧妙而精确的处理. 然而, 历来处理光学振动要么是依据晶格动力学理论, 要么是建立在一些特殊的模型基础上. 在这两种情况下, 它们都是从微观上进行处

理的, 像上面提到的那样, 如此处理问题会不可避免地变得很复杂. [50b] [51a] 和 [51b] 的工作阐述了对这种情况的纠正, 并且证明了唯象处理是如何完美地导出重要而精确的结果的.

唯象方程应用得最自然的, 应首选论文 [50b] 所做的工作, 即联合静电学方程求唯象方程的振动解, 它们给出了在长波极限情况下横与纵光学波的频率比:

$$\omega_{10}/\omega_{T0} = (\epsilon_0/\epsilon_\infty)^{1/2}.$$

如此容易获得的这个基本的关系, 在当时作为长波方程的一个显著成功给我留下了深刻印象, 这使我进一步寻找这个方程的更多应用.

于是, 我记起读过一篇众所周知的关于离子晶体晶格振动计算的论文, 作者在论文中遇到了一些发散的结果 (与无限长波相联系), 并依据延迟电磁相互作用效应讨论了这个问题, 我发现文中的论证难于理解, 其结论我不能接受, 这时我认识到, 在长波方程的基础上, 长光学波电磁延迟效应很容易进行正确的处理. 因为这仅意味着由长波方程获得振动解时, 静电学方程应被全部麦克斯韦电动力学方程取代.

振动解很容易地以简单的解析形式得到. 此后, 人们认识到它们代表了它们电磁波与特定材料的元激发之间的耦合模 (后称为极化激元) 的第一个证明. 对振动解的这个正确解释证明是很重要的. 对此我讲一个与发表论文 [51b] 有关的趣事. 当初稿由玻恩寄到《伦敦皇家学会会志》发表时被拒绝了, 因为审稿人说论文中没有新内容, 后来玻恩建议换另一个审稿人评审, 论文才被接受发表. 回想起来, 我可以理解第一个审稿人拒绝论文发表的理由. 假如人们注意到这些解的一个非常有趣的特点, 即耦合的横晶格振动和电磁场准确地复制了众所周知的红外色散. 红外色散通常被认为是红外辐射通过晶体晶格的结果. 很清楚, 第一个审稿人以这种传统的方式把这篇论文看作是反常色散的一个典型情况. 实际上在论文 [51a] 里, 我已经特意解释了为什么这两种观点是彼此一致的.

或许需要强调的是, 我的论文里对这个问题的处理已超出了传统的反常色散, 其中清楚地导出全部耦合模不是偶然的, 这是由于我们用动力学长波方程并行地和电动力学方程写出问题的方程式的结果. 然而在传统的色散处理中, 长波方程的主动角色常以介电函数的形式变成了被动角色.

论文 [50c] 是关于 F - 心的辐射跃迁和无辐射

跃迁的.这也是我在第一个研究工作阶段里发表的最后的论文之一.实际上,这个问题几年前已引起我的注意.1947年,在布里斯特大学物理系举办了一个关于发光的专题讨论会,其中一个演讲者讲到了与F-心有关的非常宽的吸收带,他评论说,大的带宽说明了有几十个晶格声子能量的变化.他强调,从微扰理论的观点看,对这个问题的理论处理将需要一个令人难以接受的高阶微扰.这些评述作为一个未解决的向理论挑战的问题深深地印在我的脑海中.

几年后,明显地,由于我已经比以前更为熟悉晶格波和它们与电子的相互作用,我认识到关于F-心问题的高阶微扰的理论论证的导向是不正确的;因为在这种情况下,声子数的变化,不能归之于由于电-声子相互作用的微扰而引起的声子产生和湮灭的动力学过程.

事实上,有关物理学的合适图像是众所周知的,即在像F-心这样的缺陷中心里,电子跃迁总是伴随着邻近原子位置的重新调整.这个调整过程被称为晶格弛豫.

由于晶格弛豫可以以晶格振子原点的某种移动表示,晶格振子波函数在变化前后的这种变化意味着正交性的破坏,因而可提供任何数目声子的改变.

在这个总的基础上,论文[50c]第一次得出了与晶格弛豫有关的晶体缺陷中心电子跃迁的系统理论.这些跃迁的特点是同时发射和吸收一定数目的晶格声子.

理论用了简化的模型加以阐述.在这个模型里,所有参与晶格振子都被看作是体长波模,因而它是一个单频模型.而且,在这个模型里,晶格振子与缺陷中心的相互作用非常小,在同一过程中,多于一个声子(在同一个模里)的改变都不需要考虑.于是,在这个简化模型的框架里,理论以简洁而优美的方式导出,其结果可用一个众所周知的函数表达.

在论述作为理论基础的这个简单的模型时,我想强调的是,这个模型虽然在许多方面非常受限制,但对于一个简洁而优美的新理论的表达却是非常有用的.我之所以这样认为,部分原因是考虑到由于论文[50c]的发表所引起的迅捷反应;在几年的时间里,跟随论文[50c]发表了许多高质量的论文,进一步发展了这个理论.

论文[50c]也给出了一个无辐射跃迁的理论,晶格声子的吸收和发射使得无辐射跃迁成为可能,它们补偿了电子能量的改变.

因为晶格弛豫有关的电子状态的全部思想意味着用众所周知的绝热近似描述电子-晶格系统,因此无辐射跃迁被看作是非绝热算子引起的,而非绝热算子是由一个代表补偿绝热近似的微扰构成的.

像早先在上面提到的那样,论文[50c]标志着我早年研究工作的活跃时期的结束.然而,像我们将要看到的那样,大约在30年后,某些因素又使我从事一项直接源于上面所提到的关于无辐射跃迁理论的工作.

1977年,在北京大学工作27年后,我调到中国科学院担任半导体研究所所长.

在这期间的许多年里,我所记得的发表的论文仅有寄送玻恩80岁生日纪念文集的一篇,即[63a].这也是我用群论方法的基本知识所做的仅有的一篇文章.

在我新的工作岗位上,当我尚在努力于增加对半导体物理当前发展的了解,还未确定自己要干什么的时候,我被邀请去访问在意大利德里亚斯特(Trieste)的国际理论物理中心.我大概了解,自从我们早期关于与晶格弛豫相关的多声子跃迁的工作发表以来,这方面已得到了相当广泛的发展,因而就这个问题的发展做一个综述将是去理论物理中心做报告的合适题目.做了这个报告后,一个新的杂志——《物理学进展》(中文)杂志的编辑建议我把它写成一个评论文章.在写这篇文章的过程中,我注意到多声子辐射跃迁的理论已经得到了进一步的推广和广泛的实验证实.然而,无辐射跃迁的理论的情形却完全不同:一方面,无辐射跃迁对于像通过晶体缺陷中心或杂质产生的载流子复合这样一些重要过程是非常重要的基本机制;另一方面,理论的发展却存在很大的争议和混乱,使我不得不放下评论的工作,把这个问题作为一个专门的研究课题.这些研究被写在论文[80a]和[85a]中,它们可以被看作是我们早期论文中关于无辐射跃迁工作的修正和继续,当时我们非常高兴的是,论文简洁而有效地澄清了无辐射跃迁问题上存在的将近30年的不确定和争论.

此外,随着我们关于局限于单频晶格模的多声子跃迁的最早的论文发表之后,很快地出现了一个覆盖一般声子光谱的优美理论.从理论上说,它们代表了我们的早期工作所取得的最重要的进展.然而,就我个人而言,我宁愿用简单的模型直接去阐明某些物理效应,而不愿做一般形式的理论工作.实际上,我同顾宗权合作所做的工作,像在[83a][84a]和[82a]中所报道的那样,描述了用一个简单的模型去

解决某些涉及不同频率声子的问题,从而得到了解决一般多声子问题的另一途径,而且,这种做法容易用物理语言去理解所涉及的问题。

这种方法是以前声子多频率模的假设为特征的,也就是说,它假定声子模可以看作是聚成群的,每个群的模分享一个共同的频率,并且像单频理论(黄- Rhys 因子)那样,用一个耦合参数来表征。

在这样的基础上,所有符合能量守恒的声子发射被证明可表达为各声子数之间的一个最可几分布。

发射声子的最可几分布被发现遵从一个非常简单形式的指数律。这件事本身就表达了一个相当有趣的物理结果,它简洁地给出了一个给定的多声子跃迁的声子数。在某些物理效应里,声子分布起着重要作用,事实上,对这些特性的物理效应的讨论形成了所列论文主题的一部分。

我将以评述最后所列的几篇论文[88a] [88b] 和 [90a] 的一些背景来结束我的注释。

首先,由于研究所里组织物理学研究工作是要考虑到要能获得适当的财政支持,由此,我们的研究项目集中于半导体超晶格和低维结构的研究。其次,我自己的研究工作全部是同我的同事朱邦芬教授合作完成的。

当时,我们开始从事的是半导体超晶格和量子阱。我们注意到了,量子阱激子和空穴的能带结构是低维结构电子理论方面两个典型的发展迅速和有很大竞争性的研究课题。

据此,为了计算空穴的带结构[88c],我们相应地引入了一个较为粗糙但简单的模型。它实质上采用了在 Luttinger - Kohn 有效质量哈密顿基础上的平面波展开方法,同时又用 Kronig - Pennig 模型描述超晶格。这种做法特别有利于我们准确处理有关量子阱空穴的问题(例如, A 分量空穴、重 - 空穴和轻 - 空穴混合)。

我们成功地推导出了量子阱激子的光学选择定则,就是我们处理这种性质问题的一个好例子 [87a]。

然而,我们最富有成效的研究是关于超晶格光学振动模的研究。它以引入一个简单的模型作为我们理论处理的基础,并再次取得了成功。

当时对光学模的已有的理解来源于以介电连续近似为基础的唯象处理,而直接的晶格动力学计算又为繁杂的计算所困扰,只能处理一些特殊的情况。由于 1985 年 Cardona 小组的共振拉曼散射实验,围

绕超晶格光学振动模边界条件的争论,也就是关于静电学边界条件与力学边界条件的问题,使许多物理学家感到迷惑,也激起了我们的兴趣。

通过用偶极子晶格模拟光学振动[88a] [88b], 我们得到了一个模型。它对于超晶格的光学模描述具有十分灵活而适用的特征,作为计算量要比真实微观模型的少得多的微观模型,它能够通过参数化,在长波极限下与介电连续模型相一致。论文[88b] 实际上是代表了如何利用上面提到的灵活性的特性,去使用这个模型的一个具体例子。论文[88b] 使超晶格中光学模的一系列基本问题得到了澄清。这个模型已被称为黄 - 朱模型。

由于晶格振动的实验研究主要是利用拉曼散射实验,我们的工作密切地与拉曼散射实验的理论解释相联系。从我本身来看,由于缺乏系统的背景认识,我常常发现我被这种任务所难住,这种情况导致我与一些同事合作发展了一个超晶格中光学声子拉曼散射的细致的微观理论,即论文[90a] [89a], [90b]。

最后,我提一些关于研究生作好物理学研究的需要注意的地方,作为我的注释的补充。

我想着重指出,在研究活动中基本上有三个决定性的步骤。

我想强调,选择一个真正值得关注的课题是最重要的。很清楚,这一点是那些希望知道我是如何对我所选择的工作感兴趣的人所关注的核心。

找到一个有效的方法去解决问题的能力,是同样具有决定性意义的。这常常会给工作带来个人风格,并决定工作的独创和质量。

我要强调的最后一个决定性步骤是,要正确地理解自己研究工作所得到的最初结果的意义。我是通过我自己的失败认识到这一点的。这些失败,许多情况下是我认为自己的某些研究结果能够并应该进一步继续,以使结果的意义更深和更广时出现的。

这些话虽是对学生们说的,但也可以作为一个附加的脚注,它简短地概括了我在研究工作中的经验。

(张树霖 王建朝译,黄 昆校)

参 考 文 献

- [47a] Huang K. X-ray Reflections from Dilute Solid Solutions. Proc. Roy. Soc. (London), 1947, A190 :102
- [48a] Huang K. Quantum Mechanical Calculation of the Heat of Solution and Residual Resistance of Gold in Silver. Proc. Phys. Soc. (London), 1948, 60 :161

- [50a] Huang K. On the Atomic Theory of Elasticity. Proc. Roy. Soc. (London) ,1950 ,A203 :178
- [50b] Huang K. Phenomenological Equations of Motion for Simple Ionic Lattices. E. R. A. Report Ref. ,1950(L/T) 239
- [50c] Huang K. A Phys. Theory of Light Absorption and Non-radiative Transitions in F-centers. Proc. Roy. Soc.(London) ,1950 ,A204 : 406
- [51a] Huang K. Lattice Vibrations and Optical Waves in Ionic Crystals. Nature ,1951 ,167 :779
- [51b] Huang K. On the Interaction between the Radiation Field and Ionic Crystals. Proc. Roy. Soc.(London) ,1951 ,A208 :352
- [63a] Huang K. The Long Wave Modes of Cu_2O Lattice. Z. Physik , 1963 ,171 :213
- [80a] Huang K. Adiabatic Approximation Theory and Static Coupling Theory of Nonradiative Transitions. Scientia Sinica ,1980 ,23 :949 (in Chinese) ;1981 24 27(English version)
- [82a] Huang K ,Gu Z Q. Phonon Analysis in Multiphonon Transitions. Commun. in Theor. Phys.(Beijing) ,1982 ,1 :535
- [83a] Huang K ,Gu Z Q. Frequency Dispersion Effects in Multi-phonon Transitions. Physica ,1983 ,117B & 118B :552
- [84a] Huang K. Statistical Distribution of Phonons in Multiphonon Transitions. Jour. Luminescence ,1984 ,31 & 32 :738
- [85a] Huang K. Contributions to Multiphonon Transition Theory. In :Zhu H Y ,Zhou G Z ,Fang L Z ed. Advances in Science of China :Physics ,1. Beijing :Science Press ,1985. 1—18
- [87a] Zhu B F ,Huang K. Effect of Valence-Band Hybridization on the Exciton Spectra in GaAs-GaAlAs Quantum Wells. Phys. Rev. B , 1987 ,36 :8102
- [88a] Huang K ,Zhu B F. Long Wavelength Optic Vibrations in a Superlattice. Phys. Rev. B ,1988 ,38 :2183
- [88b] Huang K ,Zhu B F. Dielectric Continuum Model and Fröhlich Interaction in Superlattices. Phys. Rev. B ,1998 ,38 :13377
- [88c] Huang K ,Xia J B ,Zhu B F. Hole Subbands in Quantum Wells and Superlattices. Jour. Luminescence ,1988 ,40 & 41 :88
- [89a] Zhu B F ,Huang K ,Tang H. Exciton Mediated Raman Scattering in Multiple Quantum Wells. Phys. Rev. B ,1989 ,40 :6299
- [90a] Huang K ,Zhu B F ,Tang H. Microscopic Theory of Optical Phonon Raman Scattering in Quantum Well Systems. Phys. Rev. B ,1990 , 41 :5825
- [90b] Tang H ,Zhu B F ,Huang K. Raman Scattering in a Superlattice under an electric Field. Phys. Rev. B ,1990 ,42 :3082

·物理学史和物理学家·

俄国物理学家 N.G.巴索夫去世

2001年7月1日,著名俄国物理学家 N.G.巴索夫去世,终年78岁。巴索夫和美国物理学家汤斯、俄国物理学普罗霍罗夫一起由于发明微波激光器、激光器和从事量子电子学方面的基础研究,获得过1964年诺贝尔物理奖。

巴索夫1922年12月14日生于莫斯科南面480公里的沃罗涅茨附近的乌斯曼。1941年在沃罗涅茨中学毕业。卫国战争期间他在军队中服役,1943年在基辅军医学校毕业,在军队中工作到1945年卫国战争胜利。1946年到1950年,在莫斯科机械学院学习。从1948年起,巴索夫开始在前苏联科学院列别捷夫物理研究所的振荡实验室工作(从学校毕业后就分配到该研究所)。他和比他年长的普罗霍罗夫(1916年出生)一起从事气体的微波波谱、在分子束中的粒子数反转和微波腔中激发分子的受激辐射等研究工作,巴索夫和普罗霍罗夫称之为“分子量子振荡器”,当时美国的汤斯等人也在纽约的哥伦比亚大学进行微波激光器的研究。正是由于他们在微波激光器、激光器和量子电子学领域的奠基性的研究而

获得了1964年的诺贝尔物理奖(获奖时汤斯已去麻省理工学院)。

巴索夫早在1959年就提出过在半导体中产生粒子数反转的几种方法,并在半导体激光器方面开展了前期的研究工作。此外他还在激光频标、准分子激光、化学激光、激光诱发化学反应、非线性光学和光学信息处理等诸多领域进行过早期的探索。他较早地提出了用大功率激光引发核聚变的建议并用强激光照射氘化锂靶产生了中子,这是激光聚变研究的早期工作。

巴索夫从1963年起任列别捷夫物理研究所新建立的量子电子学实验室主任,1973年起任列别捷夫物理研究所的所长,在他同时指导下工作的学生和工作人员多达300余人,后来其中有60人已经当了教授。

除了诺贝尔奖以外,巴索夫还获得过列宁奖金和罗蒙诺索夫奖章,他的夫人也是一位物理学家。

(聂玉昕 编译自 Physics World
2001年8月第19页)