

从原子物理看量子力学

关 洪

(中山大学物理系 广州 510275)

十几年前,有一次见到北京大学陈熙谋教授,交谈当中,发现大家都很关心原子物理课程的更新改革.他说,北京大学有不少老师主张要在现代的理论基础上来讲原子物理,就必须在这门课上讲清楚量子力学的基本原理;然而,凡是理论物理出身的教师,都毫无例外地反对这样做.他和我当然都赞同后一种意见.

事实上,我们可以看到国内出版的一些大讲量子力学原理的原子物理教材,每每是讲不清楚,并且常常是有严重错误的.例如,有一本原子物理的内部教材里,居然讲到用 J_+ 和 J_- 算符去构造一般角动量的本征态这样比较深入的内容,而且竟然出现了把算符 J_+ 作用到磁量子数最大的本征态,就把它变成磁量子数最小的本征态那样的错误公式.又如,在另一本公开发行的原子物理教材里,亦把量子力学里某种形式的概率幅叠加公式,错误地说成是在经典物理学里亦共同遵从的规则.

是不是这些老师都缺乏自知之明呢?我看不见得.我想,问题之一恐怕在于这的确是很困难的一项任务.即使是理论物理专家写的量子力学教材,同样会有这样那样的原则性或者非原则性错误.例如,近年在国际物理学文献里,早就屡次提出了对 Dirac 和 Landau 写的量子力学教材的多处合理而至今未见反驳的批评.可惜的是,国内还不具备在这方面开展正常的指名批评的气氛.没有批评就难以进步,这多少反映了我国高等教育的现状.

问题之二是受应试教育影响,或者说是应试教育支配着我们的教学.在这方面,我很同意本刊今年第一期俞允强教授说的:“基础理论课应保留的主要是理论的系统性和概念的清晰性.”可是,在应试方针的指导下,人们趋之若鹜的往往是那些例题习题很多,而理论系统比较混乱和基本概念并不清晰的教材.量子力学亦不例外.

在我读研究生的时候, Landau 的《量子力学》是指定必读的,但后来我很少看那本写得既繁琐又武断的书.而我一直比较欣赏 Schiff 写的《量子力学》.

这本书的特点是概念讲得清楚,在这方面没有说过什么错话,也极少有废话.半个世纪过去了,而这本书(包括它的新版本)依然站得住脚,广为使用.我赞成宁肯少讲一点,千万别把学生引入歧途.但 Schiff 的书例题少,单凭它是不足以应付考试的.所以我只好对学生说,你们要考研,就找那本例题很多的书看吧.

我见到过不同的教师讲的原子物理课是大不相同的.光学专家讲的原子物理,不厌其烦地叙述原子和分子光谱的细微末节,固体专家则把能带论也放进去了,甚至说:“一块金属就是一个大分子”等等.那么,原子物理到底应当讲些什么呢?

我国的教学过去照搬西方,以后又照抄苏联,传统的做法都是把原子物理当做普通物理的一部分.后来我们逐渐变得不耐烦了.普通物理里的力、热、光、电、原子,不是同“四大力学”的理论课多有重复吗?于是,特别是在四十年前乘着“大跃进”所提倡的“多快好省”之风,不少学校提出要把普通物理与理论物理“打通”,当年就正式出版过一本普物力学和理论力学打通的教材.到了前几年,一所重点大学又重提“打通”论,在刊物上发表把原子物理和量子力学打通的大纲,接着又出版了新教材.我粗看一下,觉得颇有“大跃进”之遗风,不过没有认真看下去,也用不着仔细看.因为这种做法明显是把原子物理当做量子力学的初步,或者量子力学的预备,亦即是说,把原子物理当做理论课的一部分.我以为,这种主张的出发点是完全不恰当的.

大家知道,普通物理是实验和理论并重的课程,它要解决的问题同理论物理不一样.今天的原子物理学其实是微观物理学,它既不应该讲成光谱学,也不适宜放进能带论.经过了整整一个世纪,微观物理已经从开始的一些出人意料的奇观异象,发展成为物理学的首要或者基础的部分.而我们的教学则远远落后于这一形势.有一次我听到一名同学问担任原子物理课的教师,他了解了怎样用原子束通过 Stern-Gerlach 装置的实验去确定电子的自旋,但是

又怎样去测定少数粒子的自旋呢(或者一个类似的问题)?那位教师竟无言以对.这也难怪,我们的原子物理课从来不讲这些内容,那位教师也没有学过.

原子物理课首先要告诉学生的,应当是在微观物理学的领域内,可以做哪些实验和怎么做那些实验.例如,怎样测定包括原子和原子核在内的微观粒子的质量(能量)、动量、自旋、寿命(宽度)等等性质.但极少有教师讲这些内容.于是,学完了原子物理的学生,仍然不知道一个激发态或者不稳定粒子的寿命(宽度)是怎样测量出来的.

由于我们的原子物理课常常只是为量子力学做理论上的准备,学生们一般都不清楚微观物理实验的实际状况.例如,量子力学基本概念的一个重要依据,乃是微观现象的统计性.由于在原子物理课上没有讲或者没有着重讲这一点,我只好量子力学课里为他们“补课”.这就是我写的《量子力学基础》(高等教育出版社,1999)里一节的内容.在这一节里讲到事件是微观实验的单元,而实验结果一般是对许多事件的平均.在那里还通过一幅从三百多个事件测量 λ 超子寿命的实验图,形象地说明了寿命的测定只能得出一种统计的结果.有一位年轻的同事对我说,但是学生们还不知道 λ 超子是怎么回事哩.我回答说,这并不妨碍他们欣赏这个漂亮的实验结果,何况它发现已经有五十年了.

类似的“补课”内容还有似稳态(共振)的唯象描写,散射(碰撞)的一般描述等.我以为,这些都是应当在原子物理课上解决的问题,而且不必用到量子力学.为什么原子物理要讲量子力学的成套理论,而不屑于讲那些本来应当由它解决的问题呢?而且,在讲宏观物理学课程的时候,也常常想当然地把经典物理学概念硬套到微观物理对象之上.例如,有一本普通物理教材,竟然谈论散射截面的“形状”.针对这种情况,我不得不在量子力学的教材里强调:“散射截面不是一个几何学的概念,而是一个统计学的概念.”

由此看来,本文一开始说的那种现象,实质上反映了这样一个矛盾:普通物理的教师在教学中不适当地追求理论化,而理论物理的教师则迫切地希望学生多了解实验.且不说大多数物理学家是做实验工作的,就是理论家要在物理学上做出真正的贡献,也必须对实验的状况有深入的了解.例如,四十五年前,恐怕有不同的几组人不约而同地想到了在弱作用中宇称有可能不守恒.然而,只有李政道和杨振宁不仅在这方面提出了新理论的方案,而且指出测

量哪一个赝标量就可以检验宇称是否守恒.吴健雄领导的小组接着进行了这种实验,便证明了新理论的正确性.事实上,同许多高能物理的理论家一样,李政道和杨振宁早期也做过关于怎样测定一些新粒子的自旋和宇称等性质的同实验紧密联系的理论研究.没有对实验的透彻认识,是做不出这些成就来的.

放射性的发现已经超过100年,成批新粒子的发现,也是半个世纪之前的事了.谁去讲授这些“原子物理”的基本现象呢?退一步,就拿电子这种最早发现的“基本粒子”来说,它的固有磁矩(准确地讲是反常磁矩)测量值的高精确度,以及同(量子电动力学)理论计算结果的高度符合,都是现代物理学里不可多得的突出例子.原子物理课里为什么不讲讲怎么样测量电子磁矩的现代实验呢?是不是这里不需要用到量子力学的理论方法,对于“打通”没有帮助,就可以撇在一边呢?我担心,长此以往,本科教育里真正的“原子物理”课,即关于微观物理学的最基本的实验手段和实验方法的介绍,就会没有人讲,也没有人听了.

我们的教育还有一个毛病,就是把每一门课都说成是包医百病的.例如,讲经典物理学的时候,雄心勃勃地要去解决微观粒子的散射问题,讲到量子理论,又把它说成是完美无缺的.这样便使学生习惯于赞美和崇拜现有的理论,不敢怀疑和创新.所谓“打通”论,实际上往往是用某种理论体系来统率整个物理学分支,只能使学生越学越死板.鉴于这种情况,我在讲量子力学的时候,一方面指出,“由经典物理学从轨道运动计算出来的微观粒子散射的结果,除了个别的巧合以外,原则上都是不可靠的.”另一方面也声明,量子力学在氢原子能级和自发辐射机制等问题上,其结果或者方法都是不圆满的.总而言之,要以物理学本身,而不是以某种理论体系去统率我们的每一门课程.

我们的量子力学是学多了还是学少了?这个问题难以给出一个绝对的答案.但我也可以试图这样回答:按以前的标准看,是学多了;按现在的标准看,是学少了.

在我们当前的教学计划里,量子力学只学一学期,充其量是每周4学时,你还要往里加码吗?我当然不是那个意思.我的意见是:第一,大力改革原子物理课,大刀阔斧地砍掉那些分门别类的知识性内容,着重讲微观物理学里的基本实验手段、实验方法,以及像散射、衰变、跃迁、共振等等过程或者状态

的一般性描述(在这些描述里面并不必须用到量子力学的 ψ 函数),这样就可以从量子力学课程里省下相应的“补课”时间,作出更加合理的安排.第二,在五十年代,我国一般物理学专业的量子力学是两个学期的课,用的苏联教材,内容并不少.那时候, Schiff 的书是研究生用的.而现在,研究生们有了别的课程,本科量子力学只学一学期,的确比国外一般的同类专业学得少.

国外的物理专业,通常在修习量子力学之前,先学一门“量子物理”课.这两门课加起来,其内容肯定要比我们的多.例如,十几年前我国翻译出版了的一套美国麻州理工学院的基础物理丛书,就有一本 French 等写的《量子物理学导论》.这本书里面有一点粗浅的量子力学,讲到简单的一维问题和氢原子为止.书中大量内容是对实验的介绍和分析,例如对微观粒子“波动性”的证据,对光束偏振状态的测量,都进行了多角度的详细讨论,给量子力学里的新概念(特别是概率幅即所谓“量子振幅”的概念)打下了一个坚实的基础,但又没有越俎代庖地去建立量子力学的理论体系(例如,全书没有引入算符).我尤其欣赏的是该书第 2-10 节里,对作为微观粒子探测器的感光乳胶成像的全过程(包括感光的微观过程、显影的放大过程、观察的宏观过程)的分析,真正说出了微观测量的精髓所在,我还没有见到过国内哪一本原子物理教材里有这种非常重要的基本的讨论.

借鉴国外的成功经验,我建议在物理学专业里设立“量子物理”课,重点介绍实验,也有一点简单的量子力学.学生有了实验知识的基础,又对 ψ 函数有一点熟悉的感觉,在量子力学课里就可以从比较严格和抽象的概念体系开始,并且加进一些日新月异的内容.

那么,按照这种意见,有了量子物理课,还不开原子物理课呢?量子物理课是同原子物理课并存,还是同它合并呢?这是一个值得进一步讨论的问题.

无论怎么样安排,我想有几点是应当注意的:

第一,加强散射态的教学.在目前的教学计划里,散射问题在普物力学、理论力学、统计物理、量子力学这几门课里都讲一点,显得很零散.前面三门课不可能把这个问题讲透,而到了量子力学又没有时

间了.虽然在原子物理学和量子力学的早期,主要解决的都是像原子和分子一类的束缚态的问题;但是,不仅在现代的微观物理学里,散射态的重要性早就超过了束缚态,而且微观粒子的散射实验亦已经成了宏观物理学甚至化学的重要研究手段.然而,在现在的课程里,没有哪一门会告诉学生,从散射的微分截面(角分布)的数据,可以了解到什么物理内容.我没有办法,只好又在量子力学里“补课”.(出版一些跨课程的专题课外读物让学生参考,可能是解决这类问题的一个好办法.)

第二,多讲点粒子物理.粒子理论比较深奥,但粒子物理比本来意义的原子物理要浅显得多.换句话说,粒子物理里有许多原子物理里很难找到的、量子力学的典型例子.例如,上面提到的测定 Δ 超子寿命那样简单的实验图,原子物理拿得出来吗?我在撰写《量子力学基础》一书的过程中,曾经想弄清楚原子光谱线的宽度是怎样测定的.在看书看不明白之后,我向暨南大学的黄乐天教授请教.他对我说,这正是他在北京大学读光学研究生的时候想弄清楚的一个问题,但后来终于放弃了.这并不奇怪,因为光谱学实验是在量子力学之前一两百年发展出来的,在那里的基本描述,一直使用着经典物理学的语言.像我们那样一开始就用量子力学武装头脑的后辈,很难得有耐心跟进到那个专业领域去.何况量子力学算出来的仅仅是光谱线的固有宽度,此外还有多普勒宽度、碰撞宽度等等复杂的因素.而粒子物理就没有那么多麻烦.我在量子力学教材里引用了一幅粒子散射的实验图,那上面就一目了然地显示出几个共振的位置及其宽度.

最后,也是最重要的是,千万不要把量子力学讲成经典物理学的改良或改造,或者试图从经典物理学的基础上推出量子力学.必须强调,量子力学的基本概念是不可能从经典物理得到解释的.这里牵涉到量子力学里不同学派的分歧,特别是对于哥本哈根学派的异议.我很赞成周光召教授在本刊今年第一期上说的一句话:量子力学是物理中争论最激烈的学科,也只有争论中才能把理论加以完善.限于篇幅,我不可能在这里展开这方面的讨论,有兴趣的读者请参阅我的新著《一代神话——哥本哈根学派评析》(武汉出版社,即将出版).