

# 原子物理学的新增长点

## ——兼谈基础物理课程与基础科学前沿的联系

宁平治

原子物理学是基础物理学的重要组成部分，本文拟结合原子物理学探讨基础物理课程与基础科学前沿的联系。为此，首先明确以下问题：

### 一、原子物理学近年的新发展是什么？

#### 前沿在哪里？新增长点是什么？

据笔者了解，可以指出以下三点：第一，2009年在意大利开了一次国际学术研讨会，主题是“奇特原子（Exotic atoms）”；第二，2010年在中国也开了一次国际学术会议，主题是“超冷原子（Ultra cold atoms）”。可以说，这两次国际会议的主题多少代表了当前原子物理学前沿的新增长点。第三，国际权威科学杂志*Nature*在2010年7月8日的封面报道了瑞士保罗谢勒研究所的一个由32位物理学家组成的国际性研究团队合作取得的“震撼全球物理界的突破性研究成果”。团队首席科学家是德国马克思·普朗克研究所的波尔（Randolf Pohl），团队中还有台湾“清华大学”物理系的两位学者。他们通过比过去精确10倍的实验测量发现，组成物质的“基本砖块”之一的质子，其半径数值与迄今公认的数值明显不一致，而是小4%。报道评述说：“百年原子物理学面临挑战。”

### 二、百年原子物理学的发展

回顾一下百年原子物理学，大致可概括为诞生期，高潮期，低潮期，以及新活跃期四个阶段：

#### •诞生期（1911~1913年）

卢瑟福散射实验表明，原子核心非常重，且带正电。玻尔对原子的电子结构和原子光谱进行了成功解释。

#### •高潮期（1924~1926年）

德布罗意、薛定谔、海森伯、狄拉克作出了原子现象的量子力学解释。

#### •低潮期（1930~1960年）

由于缺乏精密实验技术，这一时期原子物理学发展近乎停滞，研究热点转移至核物理、核弹。

#### •新活跃期（1960~2010年）

精密科学、极端条件、特殊条件（高激发态）等实验技术的发展，以及奇特原子的发现使古老的原子物理学重新活跃起来。

上述原子物理学的新活跃期实际上起始于20世纪50年代末。对于百年原子物理学发展史的四个阶段如何在基础物理课程中适当而不片面地反映出来，是一个很值得探讨的问题。“前半百”在许多基础物理教材中已有很好的反映，恐怕重点是“后半百”。我们希望同学们尽量全面了解原子物理学一个世纪起伏振荡发展的实际情况，特别是了解后半世纪以来“老”的原子物理学如何焕发青春，如何加速蓬勃发展。这对于帮助同学们树立正确的原子物理发展观、树立热爱和献身物理学的理想、勇当物理学创新人才，应该说是有益的。

### 三、原子物理教学，基础物理课程，

#### 要不要适当反映科学前沿动态？

大家知道，最近在超冷原子及相关领域，因原子激光冷却（1997年，S. Chu（朱棣文），C. Cohen-Tannoudji（科恩-塔努基），W. Phillips（菲利普斯））、玻色-爱因斯坦凝聚的实现（2001年，C. Wieman（韦曼），E. Cornell（康奈尔），W. Ketterle（克特勒））以及光的量子相干性与精密光谱学的发展（2005年，R. Glauber（格劳伯），J. Hall（霍尔），T. Hansch（亨施）），十年里三次摘取诺贝尔物理学奖桂冠。中国大陆未来要出现摘取诺贝尔奖桂冠的人才，要出现大批现代化建设急需的创新人才，我们的理工科大学，我们的原子物理教学，难道没有责任向讲台下的本科大学生深入浅出地介绍一些科学前沿动态吗？实际上，有关超冷原子的物理内容已在牛津大学基础物理教科书中有所涉及。

### 四、结合原子物理学探讨基础物理课程与基础科学前沿联系的一点尝试

笔者在南开大学曾多年主讲本科《原子核物理导论》，并多次应邀到兄弟院校交流讲学。在北京师范大学讲学时的题目是“图解科学前沿：从原子到原

子核”。在这些教学实践中，对原子物理与原子核物理教学中如何反映科学前沿课题进行了一点尝试。

首先是切入点或结合点的选择问题。传统教学内容已讲清原子的轨道电子结构，与同学们讨论的两个问题是，(1)是不是可以改变一下原子所处的外部条件呢？例如由常压到高压，由常温到低温；(2)是不是可以改变一下原子的内部组成呢？例如把带负电荷的电子换为带负电荷的其他粒子，甚至把带正电荷的原子核换为带正电荷的其他粒子。引导同学们突破书本框框，合理地大胆设想，结果自然地联系到“超冷原子”和“奇特原子”的前沿课题。

所谓“超冷”，指的是温度低于 $1\text{mK}$  ( $10^{-3}\text{K}$ )，这时原子的分子热运动趋于停顿，单个原子作为整体的平动速度极低而易于捕捉和操控。并且与常温情况相比，冷原子体系出现若干新现象、新规律。

所谓“奇特”，是把通常原子中的“轨道”电子设法换为带负电的粒子，如 $\mu^-$ ， $\pi^-$ ， $K^-$ ， $\Sigma^-$ ， $\Xi^-$ ， $\Omega^-$ 等。其中最轻的粒子是 $\mu^-$ 轻子和 $\pi^-$ 介子，它们与电子的质量比很接近，分别是 $m_\mu/m_e \approx 207$ ， $m_\pi/m_e \approx 273$ 。但 $\mu^-$ 轻子仅参与电弱相互作用，而 $\pi^-$ 介子主要参与强相互作用。这样，奇特原子 $\mu^-$ 原子和 $\pi^-$ 原子就有不同的用处。

普通氢原子构造最简单，原子核只是一个质子，外面有一个电子绕行。一种“奇特氢原子”(exotic hydrogen atom)就是用 $\mu^-$ 粒子取代原本氢原子中的电子。按照大学物理课本，玻尔轨道半径与粒子质量成反比，于是 $\mu^-$ 子轨道半径比电子轨道半径要小200倍， $\mu^-$ 子比电子更容易“看清楚”质子，“感受到”质子的存在。这正是最近瑞士保罗谢勒研究所的国际性研究团队选择奇特 $\mu^-$ 氢原子测量质子半径的基本考虑。的确，一个 $\mu^-$ 子绕一个质子，目标很明确。在奇特 $\mu^-$ 氢原子中， $\mu^-$ 介子以不同的轨道(不同的能量状态、不同的围绕质子旋转的方式)而存在，质子半径大小不同将影响这些能量状态，并影响 $\mu^-$ 子从一种能量状态跃迁到另一种能量状态所需的能量。为了实验测量质子的大小，物理学家们使激光束精确地对准 $\mu^-$ 氢原子，激发 $\mu^-$ 子，使之从一种能量状态跃迁到另一种能量状态，同时放出电磁辐射，精确地测量到这些电磁辐射就可以测算出质子半径的大小。他们经过仔细而漫长的数据分析，得到比过去精确10倍的质子半径数值， $R = 0.84184$ 飞米 ( $1\text{飞米} = 10^{-15}\text{米}$ )，明显与现今的公

认值 $R = 0.8768$ 飞米不一致。所测出的 $R$ 小4%的科学结论正在产生重要影响。按照科学家们的讨论，这里只提三点。首先，这项发现挑战迄今已被精确地检验过的量子电动力学(光与物质相互作用的基本理论)的正确性；其次，这项发现或将改变目前最精确的基本物理常数——雷德堡常数；再次，大学的普通物理教科书有关部分也可能需要补充更新。

从以上粗浅介绍的原子物理学前沿的几个实例看到，似乎基础物理课程中某些概念的延伸有可能推动基础科学前沿的某种新课题的发展。反过来，科学前沿的某些新成果有可能更新基础物理的某些旧观念甚至基本概念。

## 五、基础物理课程教学联系基础科学前沿，也应适当向学生介绍前沿上活生生的创新过程

在授课过程中，适当展示有典型意义的科学发现事件，从而给学生展示一个活生生的不断发展的物理学景象，对于培养学生的创新意识十分重要。可以举出很多事例来说明。不仅物理学家们合作奋斗和成功的经历是一部培养学生科学素质的最好教材，而且物理学家们奋斗和失败的经历对学生来讲也是一份宝贵的财富。甚至于科学前沿有时出现的伪科学、假成果也是难得的反面教材。

这里顺便提一下，在庆祝 *Science* 创刊125周年之际，该刊编辑部公布了125个最具挑战性的科学问题。其中一个题目是：

“Are there stable high-atomic-number elements? A superheavy element with 184 neutrons and 114 protons should be relatively stable, if physicists can create it.”

它的意思是“是否存在稳定的高原子量元素？理论预言，含有184个中子和114个质子的超重元素应相当稳定，物理学家能造出来吗？”实际上，这个问题在约20年前就已成为大国竞相研究的目标。甚至不乏折腰者。维克托·尼诺夫(V. Ninov)是在科学界享有盛誉的伯克利大学劳伦斯实验室研究小组中唯一有权接触到原始数据的首席科学家。他于1999年宣布自己发现了最重的118号元素。但是后来被证明是捏造的，并立即被开除。同学们在震惊之余，内心深处恐怕多少已经印上了下面几个大字：“诚信是科学家的灵魂”。科学前沿的风云变化也能丰富基础物理教学内容，给教学带来若干有益启示。

(南开大学物理科学学院 300071)