

喜欢评论的大师泡利*

陈难先[†] 译

(清华大学 北京 100084)

2019-08-07 收到

[†] email: nanxian@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190909

泡利会怎么说

量子力学可称作是量子论的现代版, 它从诞生、成长到成熟一共只有5年, 1925年到1930年。这5年完成的事比此前25年要多, 和此后70年相比, 也是一样。1925年前的进展常因为概念上的困惑而受阻, 各种悖论打乱了前进的步伐。例如波一粒两象性的干扰和束缚, 即爱因斯坦“光的粒子说”和经典“光的波动学说”之间的矛盾。到了1925年, 这些困难不再成为发展的障碍。或许是由于理论物理学家对量子领域中的奇特概念已经习以为常, 不再为此困惑, 并开始构建与这些奇特概念相匹配的新物理。结果发现, 一旦放下这些概念上的争执, 进展马上就快得惊人。对于经历那个时期的人来说, 突然间就象云雾顿开似的, 各方面都呈现出新的清晰景象。

新生代的量子物理学家几乎都是1920年进入这个行列的。他们多可算是第二代量子物理学家, 几乎都在1900年普朗克到柏林物理学会作出划时代报告之后出生。可以想象, 普朗克的报告简直就是催促新生代诞生的号角。泡利(Wolfgang Pauli)、居里奥(Frederie Joliot)和乌伦贝克(George Uhlenbeck)是1900年生人; 海森伯(Werner Heisenberg)、费米(Enrico Fermi)和劳伦斯(Ernest

Laurence)都是1901年生人; 奥本海默(Robert Oppenheimer)、冯·纽曼(John von Neumann)和伽莫夫(George Gamow)则是1904年生人。这些精英中最聪明最活跃的莫过于泡利。他不仅在自己领域里做出重大贡献, 而且有点像玻尔(Bohr)似的, 在与同事长期的切磋讨论中, 指点着他们的成长。那时候, 许多量子物理学家认为, 自己的工作要是没经过泡利当面的苛刻批评, 绝不能算正式完成。要是当时泡利不在场, 他们也要问一声, “泡利会怎么说?”

泡利有位助手派尔斯(Rudolf Peierls)谈起过泡利对人的评论。“你要是把一些尚未结束的工作或者一些新的推断或猜想, 去请教泡利, 你一定会获得重要的经验和感受。因为他的洞察力和知识分子的清高, 绝不会马马虎虎, 敷衍了事。泡利的评论是绝不会照顾伙伴们的脸面的。”对此, 泡利打了个比方说: “有些人有严重的玉米过敏, 和他们相处的唯一办法就是让他们踩在玉米堆上, 直到他们习以为常为止”。如果泡利看到一篇无关重要的或者缺少连贯性的文章, 他就会说: “这甚至不仅是对错的问题了(It is not even wrong)”。又一回, 他的同事拿来一篇质量不高的文稿, 他给出的意见是: “我不在乎你想问题有点慢, 但我绝不赞成你发文章的速度比你问问题还要快(I do not

mind if you think slowly, but I do object when you publish more quickly than you think)”。

不管什么级别的工作, 它的水平和重要性, 都会成为泡利尖刻批评的对象。他和苏联理论物理学家朗道(Lev Landau)之间就有过争论, 他认为朗道的工作很出色, 但表述得不好。他在回应朗道的辩解时说, 我并没有说你做的每一件事都没有意义。“问题远不仅如此。你的表述含混不清, 使人既没法告诉你哪些是有意义的, 也没法告诉你哪些是没有意义的”。

泡利在慕尼黑学生时代干的那事可作为他自命不凡的处女作。在一次报告会上, 爱因斯坦发表了一条意见, 泡利居然从拥挤的报告厅后排跳出来: “爱因斯坦先生讲的



著名物理学家沃尔夫冈·泡利(1900—1958)

* 文章编译自 Wiuiam H. Cropper. *Great Physies*, 牛津大学出版社, 2001。

话真不算太笨(真的不是废话)(You know, what Mr.Einstein said is not so stupid)”。

反形而上学的血统

从年轻时,泡利的脸蛋和身体都是滚圆的,身体显得很笨拙。有一位传记作家声称,泡利经历了一百次驾驶课才通过他的驾照。反过来说,他在智力上的表现一点也不笨拙。

泡利大概天生不适合做实验。据说,只要他出现在哪里,那里的实验室仪器就会发生故障。泡利传奇中最有名的就是被戏称为所谓的“泡利效应”。派尔斯告诉我们,实验室档案有一条正式纪录描述,有一回泡利刚到一个实验室,就引起了机械破坏、真空系统泄露、玻璃装置破碎。泡利的“破坏性魔力”非常厉害,有一次哥廷根实验室发生爆炸,正好是他乘火车到达哥廷根车站的时候。这些“不幸”都没有殃及泡利自身。有一次泡利刚抵达招待会,一个精心设计的装置使一盏枝形吊灯突然坠毁,大家都相

信是“泡利效应”的必然结果。泡利一来,滑轮卡壳,吊灯也没法挪动了。

泡利在智力上有很强的遗传特征。他的父亲约瑟夫(Wolfgang Joseph)是维也纳大学的教授,专攻蛋白质的物理化学。他的母亲舒慈(Bertha Schutz)是一名新闻记者,外祖父是维也纳皇家歌剧院歌唱家。约瑟夫出身在布拉格的著名犹太家庭——Pascheles家族。他在布拉格查尔斯大学学医,有位同班同学是马赫(Ernst Mach)的儿子。大约在马赫搬到维也纳大学时,Wolfgang Pascheles就当上了查尔斯大学的教授,并把名字改成泡利Pauli,入了天主教。

老泡利在1900年生下了他的独生子,受洗时取名Wolfgang Ernst Friederich,中间的名字Ernst来自泡利的教父马赫。每当有人问起泡利的宗教背景时,他总是这么解释:“在接受洗礼的那段时期,马赫的观念比教堂里神父给我的影象更深,使我实际上受到了反形而上学的洗礼,而不是天主教的洗礼……这就使我身上总像是保留着一种反形而上学的血统”。

在上学的所有阶段,少年泡利一直是公认的神童,不仅仅是数学、物理方面,古代历史方面也是如此。在健身房上体育课的间隙,他居然会拿起刚刚发表两三年的爱因斯坦关于广义相对论的文章阅读起来,并发表了3篇文章,使专门研究相对论的大数学家外尔(Hermann Weyl)不禁对他侧目相看。

泡利是慕尼黑大学理论物理教授索末菲(Sommerfeld)的研究生,所以他和海森伯常在一起,相识相知。没过两年,海森伯就开启了革命性的量子力学。泡利喜欢和他开

玩笑地议论索末菲的八字胡子和严肃的表情:“你看他像不像一个典型的老派匈牙利军官?”可是,玩笑归玩笑,学生对老师的敬重还是很持久的。派尔斯写道:“令人惊讶的是,当索末菲拜访泡利时,人们可以看到他对老师那种毕恭毕敬的态度。这对一个通常不会因人而异待人的泡利来说,简直难以想象”。索末菲很赞赏这位很有天赋的学生。他曾把写一篇百科全书文章的艰巨任务交给了年方十九的泡利。索末菲认为泡利写的洋洋237页的文章“挥洒自如,无暇可击”。爱因斯坦更是十分称赞:“任何该领域的专家都不会相信,文章出自一位年仅21岁的青年之手,作者在文中显示出来的对这个领域的理解力,熟练的数学推导,深刻的物理洞察力,使问题明晰化的能力,表述的系统性,对语言的把握,对该问题的完整处理和相应评价,实在令人钦佩。”

离开慕尼黑之后,泡利到了哥廷根,展现出他灿烂而又挑剔的人生画面。1921年他成为玻恩(Max Born)的助手。那时,玻恩正在哥廷根创建理论物理研究中心,与玻尔的哥本哈根研究所互相呼应。玻恩一开始就发现泡利“充满活力”。可是,也有问题:“泡利爱睡懒觉”。玻恩上午11点上课,要求作为副手的泡利也能到场,可泡利偏偏经常缺席,以至于玻恩不得不请系里的女秘书在十点半钟去叫他。反客为主,大家似乎都成了泡利的助手,玻恩以极大的幽默心态,对他十分宽容。玻恩对科学家天赋的判断,和玻尔一样有经验,他认为泡利“无疑是绝顶聪明的天才”。

在哥廷根待了一年,泡利转到玻尔那里,形成了现代物理学中最富有成果、延续时间最长的合作



青年泡利(图片来自网络)

关系。虽然他俩从来没有合写过文章，可能是对问题的看法从未达到一致，但是他们各自都需要批评交流。玻尔遇到任何人都要宣传和辩论，以完善和发展他的思想。在与学生或助手争辩时，几乎都以玻尔的大声谈论了结。别的情况，比如和爱因斯坦、薛定谔(Erwin Schrödinger)讨论时，争论常常因为基本概念问题僵持不下。但是，泡利凭借他出类拔萃的评论才能，一直是玻尔在辩论中最需要的合作者。他们的争论从未结束，但是他们一直在前进，玻尔离不开他们。玻尔的助手之一，罗申菲尔德(Leon Rosenfeld)说过，如果泡利不在场，玻尔就会把注意力集中到泡利给他的信。“泡利来信可是件大事呀！玻尔去上班时总把他的信带在身上，要么反复地看，要么拿给好几位感兴趣的人看。在起草回信时，他终日像是和一个缺席的朋友进行着假想的对话，似乎泡利就坐在旁边面带轻蔑的微笑听着”。

泡利在这批量子物理学家中属于奔波折腾较多的一个。在慕尼黑、哥廷根和哥本哈根之后，他去了汉堡(Hamburg)，开始在学术界有了很高的位置。1928年，泡利受邀到苏黎世理工学院(ETH)担任物理学讲席教授度过一生，只有1940—1945年期间在普林斯顿高等研究院度过了5年。

在1934年之前，泡利的私人生活有点曲折。1929年他和年轻的舞蹈演员德普娜(Kathe Deppner)结了婚，但不久她就和一位药剂师私奔了。这使泡利很气恼：“要是跟一位斗牛士跑了，我还能理解。怎么会和一个普通的药剂师……”。接踵而来的一段危机，他在琼格(Carl Jung)指导下接受了精神分析的治

疗，并于1934年与弗兰西丝卡·帕特伦(Francisca Bertram)组成家庭。

泡利不相容原理

泡利很早就被量子论的神秘感及其遇到的挫折所吸引，那时他还是在索末菲课堂里听讲理论的学生。他很快就熟悉了索末菲对玻尔理论复杂而精心的推广，并发展了一种对氢分子结构理论的复杂应用。与此同时，泡利对玻尔—索末菲理论有所批判，并对他的低班同学海森伯指出，前辈所为整个就没跳出“原子论”的框框。泡利凭借他的超常敏感和精细，很善于找出前人的争论中是否有共同的交集可取。他的结论是，那时的量子论实在是“一塌糊涂”。泡利对海森伯抱怨说，“每个人都在伸手不见五指的浓雾中摸索前进，这团浓雾至少要几年才能驱散。索末菲期望实验会帮助我们找到新的规律。他相信数字中的关系，有点数字神秘主义”。

从玻尔的第一项工作开始，代表原子性能的定态具有离散的能量，他们可以从“量子数”来计算，而且当原子能量发生变化时，它就会在这些“定态”之间进行“量子跃迁”。在玻尔1913年文章之后十年以来，许多量子论的主题都集中在量子数。以量子数为基础的原子模型总要回答一个问题：为了描述原子可观察的物理和化学性能，对于每个电子态至少需要多少个量子数才行呢？首先，玻尔模型只有一个量子数，然后变成两个、三个，最后按照泡利的提议要四个。

泡利发现，他可以用许多组四量子数集合创造奇迹，每一组四个量子数对应着原子中每一个电子的状态。模型的关键是一组规则，它

规定每个电子选择哪些量子数。玻尔引进的两组规则仍然适用：所有原子中的每个电子态对应的一组量子数都是一样的，电子按能量最低原理占据这些定态。泡利还加上一条普遍原理，即“泡利不相容原理”。它和之后更精巧的理论相比，几乎同样清晰地阐述了原子分子理论。运用在量子物理中非同寻常的简单自由度，泡利断言，原子中每个电子所占据的状态的四个量子数必须是唯一的：在同一原子中，没有两个电子可以占据同一个状态，即不可能有两个状态用同样的四个量子数表征。

“泡利原理”在1925年提出，时间早于海森伯提出量子力学。泡利以他天才的洞察力从浩如烟海的光谱数据中得出的不相容原理，其难度甚至远大于开普勒整理行星轨道的数据。

后来的理论确定，“泡利原理”适用于任何电子系统。不管是原子中的电子，分子中的电子，固体中的电子，它们必须按泡利原理来构建。任何两个靠得很近的电子绝不会完全相同，即表征它俩状态的量子数不可能完全相同。这意味着电子总是互相回避；在原子中，它们聚在一堆同心壳层里。

自旋

四个量子数而不是三个才能使电子的故事完美，在当时可是理论上很高层次的谜。早期的理论中明确认为，对电子态用几个量子数描述是电子运动所在空间的维度问题。原子中电子沿轨道运动是在三维空间中的运动，所以只需要三个量子数来描述。那么，第四个量子数将带来什么物理意义呢？如果经

典物理的类比还成立，那就会有一个明显的猜测，即电子和行星一样，除了轨道运动还有绕着内轴的自转。

好几位理论家曾经有过这个想法，诸如康普顿、海森伯、玻尔和泡利，但是，这有问题。首先，行星和垒球的自转是三维空间中的转动，如果电子的自旋也是如此，并不需要引进第四个量子数。那么，就算电子自旋和垒球自转不同，它是在一个超出经典物理想象的三维空间以外的旋转吗？虽然泡利对自旋的概念也说不清楚，但是泡利相信，他的第四个量子数涉及到“某些用经典物理观点描述不了东西”。

这就是1925年末的情况，就像沃登(Wearden)所说，“清规戒律被粉碎了”。那些备受尊敬的理论家不敢做的事情，被莱顿大学的两名荷兰研究生乌伦贝克(George Uhlenbeck)和古德斯密特(Samual Goudsmit)迅速而轻松地完成了。在泡利的启发下，他们抓住了自旋概念的要害。乌伦贝克曾说明过事情的原由：

古德斯密特和我突然意识到这个想法，起源于学习泡利的一篇文章，他的文章表述了著名的“不相容原理”，并用四个量子数表征电子。这篇文章写得比较抽象，没有

具体的图像。对我们而言，比较神秘。那时，我们已经熟悉每个量子数对应着一个自由度的看法，而另一方面，按照电子是点电荷的概念(没有行星或垒球那样的三维结构)，电子显然只有三个自由度，我们没法处置第四个量子数。

两位研究生很快就看出，要是能把第四个量子数和电子超出通常三维空间的特殊的自旋运动联系起来，有很大的好处。稍后，他们又慢慢地看到自己认识中的不足。这时他俩去请教莱顿大学理论物理教授、他们的导师厄伦菲斯特(Paul Ehrenfest)，还得到了莱顿中学创建校长洛伦兹(Hendrik Lorentz)的帮助(厄伦菲斯特是后任校长)，洛伦兹对此有兴趣但不积极。为了这个发现，他俩为厄伦菲斯特准备了一份摘要，后来经过更周详的考虑，并告诉导师，他们决定不发表。但是，厄伦菲斯特的职业生涯使他比学生们更为精明。他说，已经把文章投给一个杂志。当时，许多有名的理论物理学家都觉得自旋概念过于怪异，这对乌伦贝克和古德斯密特是一个很好的机会。厄伦菲斯特告诉他们：“你们还太年轻，不要犯傻”。

在完成一篇好的电子自旋理论文章的竞争中不少人都被淘汰下来，泡利的助手柯隆尼克(Ralph Kronig)就是一例。在乌伦贝克和古德斯密特通过厄伦菲斯特向杂志投稿之前好几个月，柯隆尼克就得出了类似的结论，他还就此和泡利讨论过。但是，柯隆尼克很不幸，遭到泡利劈头盖脸骂了一通，并说服他放弃发

表。派尔斯在回忆中说，“泡利在晚年对此事一直不愿提起”。电子自旋无疑是20世纪物理和化学中有重大影响的概念。迄今，乌伦贝克和古德斯密特没有因为他们的理论得到诺贝尔奖，柯隆尼克的故事可以解释诺奖为何把他们漏掉。

不仅是电子，所有基本粒子，例如质子、中子和正电子，都有自旋，而且大多数基本粒子都只有两个自旋态。 $+1/2$ 和 $-1/2$ ，一个向上，一个向下。半整数的出现也是出乎意外的。

按照量子数个数代表电子运动的空间自由度的说法，读者可能要问，在三维空间运动的氢原子中也包含自旋，为什么在玻尔理论中只用了一个量子数？实际上，和其他原子中的电子一样，氢中电子状态也要用四个量子数表征。但是，氢有点特别，电子态能量几乎只取决于头一个量子数，和其他三个几乎没有关系。玻尔很幸运，他建立的氢原子模型就像在一维空间似的。

评论

泡利对物理问题的悟性在他的同辈中几乎是最高，甚至可以说超过了爱因斯坦。玻恩说，“自从他在哥廷根当我助手起，我就发现他是可以和爱因斯坦相提并论的天才。从纯科学的角度看，他可能超过爱因斯坦”。泡利对量子力学和量子场论的基础建立都有重大贡献，对不相容原理的阐述，对核物理和粒子物理的重大贡献，他绝对够得上是一名现代物理学大师。然而，他的伟大和爱因斯坦、玻尔或海森伯是不同的。

在一定程度上，泡利被他的才智约束住了。有时，他对物理的理



课堂上的泡利(图片来自网络)

解太好了。他的批判意识变得那么精细和广泛，以至于他不能用同时代人所拥有的想象力和直觉能力来发挥他的创造力。他的大量工作都没有发表，而是遗留在私人的信件中。泡利是开辟现代物理的开路先锋，但没有成为占据名寺大刹的鼻祖。

以海森伯为例，他对经典物理原理的大胆背离很快就获得惊人的成功。泡利评论道，“或许，一个人不太熟悉经典物理的伟大统一性，就容易找到自己的路，就会有明显的优势”。然后，他又以赞赏的口吻说，“当然，缺乏知识是不可能获取成功的”。

如果泡利良好的批判意识只是对个人的一种约束，那么，对他的许多同事来说，无疑是一种鼓舞和启发。对于所有具有智慧去倾听的



珍贵的“科学界最牛合影”（图片来自网络）

人来说，泡利很像是一位伟大的文学评论家，他的言辞既精辟准确又一针见血，其实是经过洞察力和经验之间的反复平衡升华出来的心声。在现代物理学中，许多最好的理论工作的完成都有泡利的参与，

个人的直接介入或者思想上的影响。他总是“坐在那里倾听，面带轻蔑的微笑”。

1958年，泡利英年早逝。后人碰到问题仍然会想着，“泡利会怎么说？”

新书推荐

内容简介：本书收录了《物理》杂志“物理学咬文嚼字”专栏的第31—54篇文章，阐明了一批物理学概念字面上的原意，并论述这些概念以及概念背后物理学思想的演进，是一本值得物理学研习者珍藏的参考书。

推荐理由：物理学需要一种叙述性的语言作为其载体。不幸的是，这门语言不是我们的母语。不同的语言可能呈现给学习者不同的物理图像，而不同的文化会塑造研究者不同的风格从而将物理学导入不同的方向。用中文表达的物理

学，因为其间还要经过一个翻译的过程，则那些物理学概念本来的一些内在关联，就在不知不觉中丢失了。有些概念甚至会被完全曲解。

中国科学院物理研究所曹则贤研究员在科研教学之余，长期关注物理学在中国传播过程中所遭遇的语言问题。通过比照重要物理学文献的英文、德文、法文原文，他对用中文修习物理学所遇到的一些因语言问题造成的缺憾，有了深切的认识。2007年7月，曹则贤研究员在《物理》杂志开辟“物理学咬文嚼字”专栏，为用中文修习物理学者说文解字。

读者和编者

