

# 马克斯·玻恩——连接经典时代物理与近代物理的思想桥梁

曹则贤<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2024-03-01 收到

<sup>†</sup> email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240406

玻恩是对经典物理各领域都有深刻理解且曾跟随几位数学巨擘学习过数学的物理学家，在固体物理、电子理论和光学方面都有所建树。玻恩1924年在一篇论文中造了“Quantenmechanik (量子力学)”一词，其思想基础在他1925年出版的 *Vorlesungen über Atommechanik* (原子力学讲义) 一书中有详细阐述，往前或可追溯到索末菲1904年的“Mechanik der Elektronen (电子力学)”一文。玻恩的一众研究助手和学生对量子力学的建立和拓展都做出了卓越的贡献，前者特别著名的包括 Jordan, Heisenberg, Pauli, Stern, Hund, Herzberg, Fermi, Teller, Rosenfeld, Wigner 等，后者特别著名的包括 Jordan, Hund, Weisskopf, Oppenheimer, Goepfert-Mayer, Flügge 等。玻恩是**凭自己的学问**影响了历史的人。

## 1 玻恩生平简介

玻恩(1882—1970)出生于西里西亚的布莱斯劳(Breslau, 现属波兰)，1901年入布莱斯劳大学，然后经海德堡大学、苏黎世大学于1904年转入哥廷恩大学，于1906年在哥廷恩大学获博士学位。玻恩的博士学位导师为 Carl Runge (就是计算方法 Runge—Kutta 法里的那个 Runge)，学位答辩的考官，数学方向的考官为 David Hilbert，而玻恩所选的副科是天文学，考官为 Woldemar Voigt (晶体学和相对论先驱)。玻恩拿到博士学位后的第一个工作是希尔伯特的物理助手，看来希尔伯特对他印象不错。其后，玻恩到剑桥在拉莫(电子理论奠基人)，汤姆孙(J. J. Thomson, 电子发现者)手下工作了半年，1908年玻恩在老家布莱斯劳跟着 Otto Lummer 和 Ernst Pringsheim (此二人都位列德国实验物理五杰，黑体辐射谱测量的主要完成人)学习实验物理，1908年底回到哥廷恩跟着闵可夫斯基研究相对论。1909年，玻恩通过

了 Habilitation，获得了 Venia Legendi (说明见后)。玻恩所作的 Habilitation 报告，主题是汤姆孙的原子模型，被闵可夫斯基评价为是“我这辈子听过的最糟糕的报告”。1912年，玻恩在哥廷恩大学获得私俸讲师职位，1914—1915在法兰克福大学做编外教授，1915年做柏林大学的编外教授，在这里和普朗克、爱因斯坦以及能斯特合作过，1919年在法兰克福大学获得正式教授位置，1921—1933年间一直在哥廷恩大学做教授(图1)。1933年，玻恩举家移民到英国，先在剑桥大学谋得一个讲师职位，1936年起在爱丁堡大学获得一



图1 1930年代的玻恩



图2 退休后的玻恩在家中

个教授位置。1953年，玻恩回到德国(图2)，靠退休金生活直到1970年辞世。

玻恩求学期间接触到了太多的学术巨擘，包括著名的哥廷恩数学三驾马车希尔伯特、克莱因与闵可夫斯基，本人独立工作后迅速取得巨大成就，且涉猎范围极为广泛。这让玻恩很早就有了很高的学术地位(图3)。玻恩先是研究原子晶格的理论，到1915年就写出了经典之作《晶格动力学》。此方向上后来有Born—von Kármán模型，此为固体声子理论的基础。再后来，有晶格动力学理论中的Born—Huang近似。以玻恩名字命名的概念有很多，本文未能加以说明的包括Born approximation, Born coordinates, Born equation, Born reciprocity, Born rigidity, Born series, Born square, Born—Landé equation, Born—Infeld theory, Born—Haber cycle, Cauchy—Born rule,

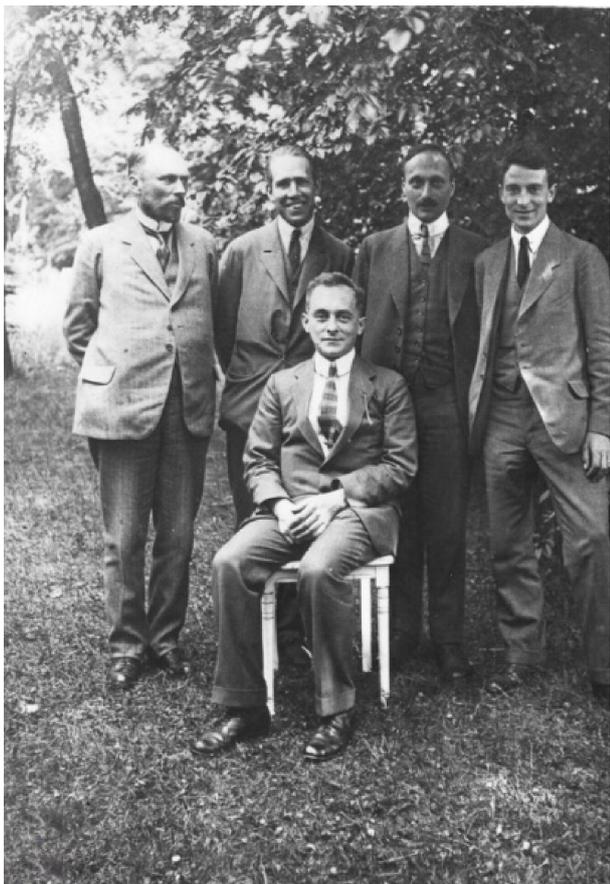


图3 1922年的玻恩。后面站着四位，从左往右依次为William Osler, 玻尔(1922年度物理诺奖得主), James Franck(1925年度诺奖得主), Oscar Klein

等等，感兴趣的读者请自行参阅相关文献。

## 2 玻恩的著作

玻恩一生著述甚丰，其中许多是经典。至于影响，那可不好评估，因为时间还在流逝。玻恩的纯学术著作列表大致如下：

(1) *Dynamik der Kristallgitter* (晶格动力学), Teubner (1915).

(2) *Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen* (爱因斯坦的相对论及其物理基础), Springer (1920).

(3) *Vorlesungen über Atommechanik* (原子力学讲义), Springer (1925). 英译本为 J. W. Fisher (transl.), *Mechanics of the Atom*, George Bell & Sons (1927).

(4) *Problems of Atomic Dynamics*, MIT Press (1926).

(5) Pascual Jordan, Max Born, *Elementare Quantenmechanik* (Zweiter Band der Vorlesungen über Atommechanik), Springer (1930). 这本约当与玻恩合著的《基础量子力学》(原子力学讲义的第二卷)如其名，计划是写两本的，但只出了这卷，是关于矩阵力学的！原计划的第二册是关于薛定谔的波动力学的，但玻恩认为外尔已经捷足先登了。

(6) *Optik: Ein Lehrbuch der elektromagnetische Lichttheorie* (光学—电磁的光理论教程), Springer (1933).

(7) *Experiment and Theory in Physics*, Cambridge University Press (1943).

(8) *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford University Press (1949).

(9) H. S. Green, Max Born, *A General Kinetic Theory of Liquids*, Cambridge University Press (1949).

(10) Kun Huang, Max Born, *Dynamical Theory of Crystal Lattices*, Clarendon Press (1954).

(11) *Physics in My Generation: A Selection of Papers*, Pergamon (1956); 德文版为 *Physik im*

Wandel meiner Zeit, Vieweg (1957).

(12) Emil Wolf, Max Born, *Principles of Optics*, Pergamon (1959).

请参照玻恩的出生年月以及相关学问出现的时段重新看一眼这个列表。

说明一下,以书的形式流行的还有玻恩的一些他人编纂的书信集、报告集等,未被当作著作列在这里。比如, *Moderne Physik* (近代物理), Springer (1933), 此书收录7个关于物质与辐射的报告; *Zur Begründung der Matrizenmechanik* (矩阵力学基础), Battenberg (1962), 此书收录玻恩和海森堡、约当1925年的矩阵力学三部曲。

### 3 玻恩对创立量子力学的贡献

论起玻恩对量子力学的贡献,类似“was instrumental in the development of quantum mechanics”这种轻描淡写的赞扬是不负责任的。如果要为量子力学选定唯一的一个创立者,那一定非玻恩莫属。笔者这样说的依据是,玻恩1924年创造了Quantenmechanik(量子力学)一词(出现于论文题目中,译文见本系列第一篇),而他能做到这一点的思想基础见于他同年出版的专著 *Vorlesungen über Atommechanik* (原子力学讲义),对,是“原子力学”(图4)。这恰如笔者此前所言, quantum mechanics 更多的在于 mechanics (不是力学,是对道理的究问。其对立的概念是 phenomenology, 现象的学问)而非 quantum (是名词!)。对于1924年前后那些有能力理解 quantum mechanics 的人来说,这包括玻恩、索末菲、薛定谔、希尔伯特与外尔,年轻一些的有克拉默斯,还有更年轻一些的如泡利、约当、狄拉克与冯诺依曼,微分算符有分立的本征值这种事情不会引起任何惊奇,那些重要的力学算符一般同时具有分立和连续的本征值。思想上能认识到有创立量子力学(原子力学)的必要,且一旦认识到这一点就因为同时有足够的数学、物理水平马上就开干,这样的人才,基于笔者当前能搜集到的历史资料,我认为除了玻恩以外,大概同龄的薛定谔(1887—1961)或也勉强可为,而洛伦兹、普朗克和索末菲有这个能

力但那时候已经老了。至于后来玻恩带着海森堡、约当、泡利等年轻助手所做的建立量子力学的具体工作,以及对薛定谔1926年的论文提供了波函数的概率诠释,那倒在其次了。

玻恩的《原子力学讲义》阐述了他创立量子力学的思想,脱胎于玻恩

1923/1924冬季学期在哥廷恩大学讲授的“原子力学”课。有趣的是,玻恩注意到这个原子物理的力学原理其理论还不成熟(diese Theorie sei hierfür noch nicht reif),因此他在撰写这本书的时候,就计划写两本,故而这书封面上有Erster Band(第一卷)的字样。玻恩要 die Grenzen abzustecken, ... die Wege zu bahnen, die über diese Grenzen hinaus führen sollen(勘定边界...开拓跨越边界的路)。玻恩坦诚:我知道,许诺这样的一本第二卷是鲁莽的,因为,关于为了解释原子性质而针对经典规则必须偏离的方式,目前人们只有很少的、含混的启示(Ich weiß, daß das Versprechen eines solchen zweiten Bandes kühn ist; denn vorläufig hat man nur wenige und undeutliche Hinweise über die Art der Abweichungen, die zur Erklärung der Atomeigenschaften an den klassischen Gesetzen angebracht werden müssen)。计划中的“第二卷”可能还要等几年才能写成,其当前的虚拟存在或许可以让当前这本书的目的与意义显得更清晰(Darum wird der geplante “2. Band” vielleicht noch manche Jahre ungeschrieben bleiben; vorläufig mag seine virtuelle Existenz dazu dienen, Ziel und Sinn dieses Buches deutlich zu machen)。你看,在一门学问连雏形都还没有的时候,玻恩就想到了要写一本关于它的专著。

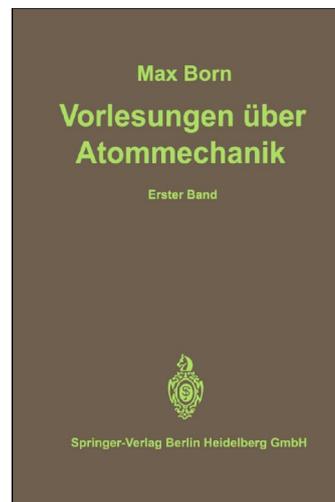


图4 玻恩1925年出版的 *Vorlesungen über Atommechanik* 一书

更加有趣的是，就在1925年，玻恩和助手海森堡、约当一起完成了著名的矩阵力学三部曲，创立了量子力学的矩阵力学形式（详见本系列的第三篇）。1930年，玻恩和约当撰写了 *Elementare Quantenmechanik* (Zweiter Band der Vorlesungen über Atommechanik) [《基础量子力学》(原子力学讲义的第二卷)] 一书。在序言中，玻恩写道：当时遮挡着原子规律之自身结构的纱巾必须很快落下的期望，没想到那么快且以根本性的方式就实现了 (Die Hoffnung, daß der Schleier, der damals noch über der eigentlichen Struktur der Atomgesetze hing, bald fallen müsse, hat sich in überraschend schneller und gründlicher Weise erfüllt)。而这本《基础量子力学》，玻恩又是计划写两卷的。当前的这卷是关于矩阵力学的，原计划的第二卷是关于薛定谔的波动力学的，但玻恩认为外尔已经捷足先登了 [指外尔1928年的 *Gruppentheorie und Quantenmechanik* (群论与量子力学) 一书]。

矩阵力学三部曲里引入最重要的公式是  $pq - qp = \frac{h}{2\pi} i$ ，这个可以算作是玻恩的代表性成

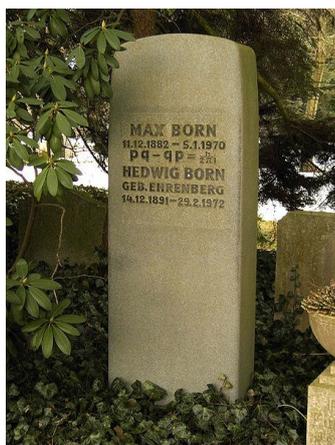


图5 玻恩和妻子的墓碑，上面刻有公式  $pq - qp = \frac{h}{2\pi} i$

就，后来刻在玻恩的墓碑上(图5)。这个公式将非交换代数引入物理。当前的一般性写法是  $qp - pq = i\hbar I$ ，其中  $q$ ,  $p$  分别是位置算符和动量算符，而  $I$  是单位算符。

一般量子力学文献提及玻恩对量子力学的贡献，似

Nach Heisenberg<sup>3)</sup> soll nun, wenn  $q$  eine rechtwinklige kartesische Koordinate bedeutet, das Quadrat des Matrixelementes (65) ein Maß für die „Übergangswahrscheinlichkeit aus dem  $r^{\text{ten}}$  in den  $r'^{\text{ten}}$  Zustand“ sein, genauer gesprochen für die Intensität desjenigen Teils der mit diesem Übergang verbundenen Strahlung, der in der  $q$ -Richtung polarisiert ist.

图6 薛定谔1926年波动力学论文提及概率以及引用矩阵力学的地方

乎不提是玻恩意识到有创造量子力学的必要，引入了量子力学一词，并同海森堡、约当一起创立了量子力学的矩阵力学形式，而是轻描淡写说玻恩对量子力学的贡献是为薛定谔的波函数提供了概率诠释。在薛定谔1926年创立波动力学的“Quantisierung als Eigenwertproblem (量子化作为本征值问题)”一文(此文分4部分发表)中，概率一词只出现一次，在第三部分的p.465上(图6)。原句是“das Quadrat des Matrix-elementes (65) ein Maß für die ‘Übergangswahrscheinlichkeit aus dem  $r$ -ten in den  $r'$ -ten Zustand’ sein”，意思是矩阵元(65)的平方是从状态  $r$  到状态  $r'$  跃迁概率的量度。这个思想来自前一年的矩阵力学。这里，在海森堡名下给出的参考文献是矩阵力学三部曲的海森堡一人署名的和玻恩与约当两人署名的两篇，即 W. Heisenberg, *Zeitschrift für Physik* 33, 879—893(1925); M. Born, P. Jordan, *Zeitschrift für Physik* 34, 858—888 (1925)(详见下一篇)。

英文文献中提及玻恩对薛定谔波函数的诠释，会称为 Born's rule，文献则指向 Max Born, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge* (碰撞过程的量子力学), *Zeitschrift für Physik* 37(12), 863—867 (1926)。这篇文章的提交日期是1926年6月25日，薛定谔论文的第三、第四部分的提交日期分别是1926年5月10日和6月21日之前，故合理的推测是，玻恩在撰写这篇文章的时候，薛定谔的论文应该是最多只发表了前三部分。玻恩在这篇文章开篇第一句是 Die von Heisenberg begründete Quantenmechanik ist bisher ausschließlich angewandt worden zur Berechnung der stationären Zustände und der den Übergängen zugeordneten Schwingungsamplituden (ich vermeide absichtlich das Wort “Übergangswahrscheinlichkeiten”), 大意是[海森堡所奠立的量子力学至今只用于静态以及赋予跃迁过程之振动幅度(我故意避免使用“跃迁概率”一词)的计算]。玻恩说 Die von Heisenberg begründete Quantenmechanik, 那是客气。玻恩这篇文章重要的地方是 p.865 上的这一句(图7), Will man nun dieses Resultat korpuskular umdeuten, so ist nur eine Interpretation möglich:  $\Phi_{\alpha}(\alpha, \beta, \gamma)$

bestimmt die Wahrscheinlichkeit<sup>1</sup>…，大意是“若将此结果改而用粒子语汇谈论其意义，则只有一种诠释是可能的： $\Phi_m(\alpha, \beta, \gamma)$  确立了…的概率<sup>1</sup>”。这里有一个脚注，Anmerkung bei der Korrektur: Genauere Überlegung zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit dem Quadrat der Größe  $\Phi_m(\alpha, \beta, \gamma)$  proportional ist, 中文意思是“更正：仔细考虑表明，概率正比于量  $\Phi_m(\alpha, \beta, \gamma)$  的平方”。这就是关于薛定谔波函数的玻恩诠释的出处，没想到是以一个脚注里的更正形式出现的！但是，这里，对笔者冲击最大的是 korpuskular umdeuten (转而理解为粒子的) 这两个字。薛定谔的波函数，还是要改用粒子语汇才能谈论其意义。这才是波粒二象性本义的一个侧面，任何粒子或者波的图像或语汇都要纳入对方才能说清楚，我将之称为玻恩的波粒二象性表述 (wave-particle duality in Born's term)。这消解了我关于双缝干涉实验的长期困惑 (用位置确定的粒子探测器测得的多粒子累积的强度分布来证明单粒子的波动性，是不是有些精神错乱？对此不感到困惑的物理学家就幸运了)。此外，波粒二象性还表明，关于微观存在 (比如涨落) 的数学表示，总同时有两项，一项是波动意义上的，一项是粒子意义上的，我将之称为爱因斯坦的波粒二象性表述 (wave-particle duality in Einstein's term)。

## 4 玻恩的学生们

玻恩名下的学生，按照维基百科所列有 19 人，这其中有不少都是对物理学做出重要贡献的人物，包括：

(1) 迈耶 (Maria Goeppert-Mayer, 1906—1972, 女)，因提出原子核壳层模型而获得 1963 年度诺贝尔物理奖；

(2) 奥本海默 (Robert Oppenheimer, 1904—1967)，曼哈顿计划的首席科学家。奥本海默的博士论文留下了玻恩—奥本海默近似；

(3) 洪特 (Friedrich Hund, 1896—1997)，以原子物理的洪特规则而著名。量子隧穿效应也是洪特作为一个量子力学习题而提出来的；

图7 玻恩 1926 年提出薛定谔波函数诠释的论文截图

(4) 弗吕格 (Siegfried Flüge, 1912—1997)，因其 1947 年出版的 *Rechen methoden der Quantentheorie* (量子理论的计算方法) 一书而闻名。该书是收录入 *Classics in mathematics* 的宝典。它的英文译本为 *Practical Quantum Mechanics*，由此而来的中译本名为《实用量子力学》。算以讹传讹吧。

## 5 玻恩的助手们

看一个教授的水平，或许其助手们的水平可以当作一个参考指标。玻恩的研究助手蔚为壮观，除了和他一起创立矩阵力学的海森堡、约当 (参见本系列的第三篇)，以及有用自己名字命名的量子力学方程的泡利以外，其他的也都是大名鼎鼎的物理学家。据不完全统计，玻恩的助手还有：

(1) 斯特恩 (Otto Stern, 1888—1969)，就是那个 Stern—Gerlach 实验中的 Stern，1944 年“因对发展分子束方法和发现质子磁矩的贡献”而获得 1943 年度的诺贝尔物理奖；

(2) 费米 (Enrico Fermi, 1901—1954)，Fermi—Dirac 统计中的 Fermi，被誉为最后一个理论物理和实验物理都精通的人，1938 年因“中子轰击诱导放射性以及发现超铀元素”获得诺贝尔物理奖；

(3) 洪特，Hund 定则里的那个 Hund。洪特诠释了双原子分子的带状谱。和洪特一样，约当也是玻恩的学生与助手；

(4) 赫茨堡 (Gerhard Herzberg, 1904—1999)，因“对获得电子结构的知识与分子特别是自由基的几何的贡献”获得 1971 年的诺贝尔化学奖。赫茨堡的《原子结构与原子谱》与《分子结构与分子谱》(四卷本) 是经典；

(5) 泰勒 (Edward Teller, 1908—2003)，Jahn—Teller 效应中的 Teller，被誉为氢弹之父；

(6) 罗森菲尔德 (Léon Rosenfeld, 1904—1974)，

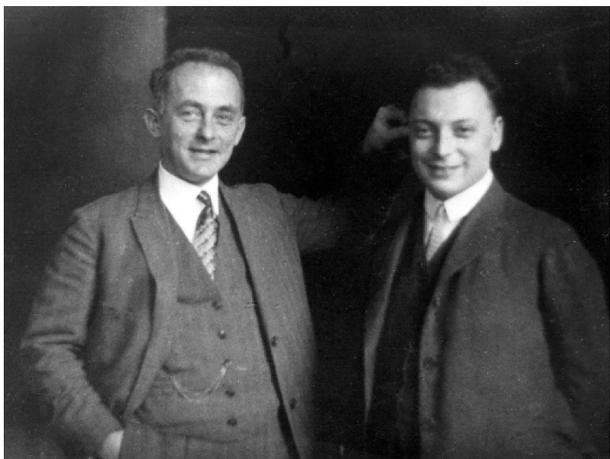


图8 玻恩对泡利耳提面命(大约在1925年摄于汉堡)。泡利可是被誉为“上帝的鞭子”的

Belinfante—Rosenfeld 应力—能量张量里的 Rosenfeld。他造了轻子 (lepton) 一词；

(7) 维格纳 (Eugene Wigner, 1902—1995), Wigner—Seitz 单胞、Wigner—Weyl 变换、Jordan—Wigner 变换里的 Wigner。维格纳和外尔把群论引入了量子力学，确立了后来以量子命名的一些学问的研究基调。维格纳因“对原子核和基本粒子理论的贡献”获得了1963年的诺贝尔物理学奖。他妹婿是 P. A. M. Dirac。

也就是说，前述玻恩的10个助手中，5人获得诺贝尔物理学奖(其中四人都早于玻恩)，1人获得诺贝尔化学奖。一个天才，最大的幸运不过是有大师耳提面命过吧(图8)。

玻恩在英国期间还有助手 E. Walter Kellermann (生卒年不详。此人著有 *A Physicist's Labour in War & Peace* 一书) 和福克斯 (Klaus Fuchs, 1911—1988)。

## 6 玻恩对中国的意义

玻恩的学生中有3个中国人，分别为程开甲、彭桓武和杨立铭，其中前两位后来都被我国授予“两弹一星功勋奖章”。另有一位中国青年黄昆在1947年的假期到玻恩那里短暂工作过，玻恩给他看了正在撰写的 *Dynamical Theory of Crystal Lattices* (晶格动力学理论) 一书的几章草稿。这本书，玻恩1940年原计划是在他1915年德语版的

*Dynamik der Kristallgitter* (晶格动力学) 的基础上纳入量子力学新进展写成一个英文扩展版的。因为玻恩事务繁忙，这本书就一拖再拖延宕了7年都未能完工。黄昆那时本就是固体物理大家莫特 (Nevill Mott, 1905—1996) 的博士生，表示有兴趣参与这本书的撰写，玻恩还真就把这本书的撰写托付给了他。1954年，这本书正式出版，后来成了世界范围内固体物理领域的经典之作。黄昆先生对中国半导体事业的建立有重要影响。

## 7 多余的话

毫无疑问，玻恩是与洛伦兹、普朗克、爱因斯坦、索末菲、薛定谔等这些对量子理论的建立有贡献者一样，是属于一类学懂了物理的人。海森堡、约当、泡利是他的研究助手，无论水平高低，不方便算在此列。

### 补充说明

为了正确理解历史上德语国家那些著名物理学家的教育与学术背景，有必要介绍一下德国/瑞士/奥地利的学术制度。博士生除了主要专业 (Hauptfach) 外，还必须修一个副科 (Nebenfach)。比如，玻恩的主科是物理学，所选的副科是天文学。博士学位答辩在论文答辩后还有考试，故答辩委员会里一定有一个教授是来自答辩人所选的副科领域。获博士学位者如果要继续走学术路线，要做 Habilitation，即为此要做一段时间的专门研究，在提交总结文本 Habilitationsschrift 后再给个公开报告。通过了 Habilitation 者，头衔可缩写为 Habil. Dr.，就有了授课资格 (Venia Legendi 或者 Venia Docendi)，可以获聘私俸讲师 (Privatdozent) 职位，接下来可以申请教授位置。德语国家的教授职位花样繁多，笔者闹不清楚。大体上，获得私俸讲师资格的年轻人会到博士毕业单位以外的机构申请到一个 außerordentlicher Professor 的职位，而后再谋得 ordentlicher Professor 的职位。提醒注意，außerordentlicher Professor (编外教授) 里的 außerordentlicher，本意是序列之外，对应的英文为 extraordinary，别根据英汉字典翻译成杰出教授就行。