

# 泡利：得天独厚的量子理论构造者

曹则贤<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2025-01-08收到

<sup>†</sup> email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250105

CSTR: 32040.14.wl20250105

**摘要** 泡利是量子论、量子力学和量子场论的构造主角之一。不相容原理、矩阵力学解氢原子问题、泡利方程、自旋—统计定理以及预言中微子等是人们熟知的泡利的几项成就。此外，就对物理学的理解与阐释能力而言，泡利也是罕有其匹的。关注泡利的成长过程有助于我们理解什么是合格的教育。真受过教育者做科学的范儿会彰显一份从容。

**关键词** 反常塞曼效应，不相容原理，二值性，自旋，泡利方程，自旋—统计定理

## 0 少年天才

沃尔夫冈·泡利，德文全名为 Wolfgang Ernst Friedrich Pauli，1900年4月25日出生于奥地利维也纳。泡利的父亲名为 Wolfgang Josef Pascheles (1869—1955)，后来自作主张把姓 Pascheles 改成了 Pauli。老泡利是维也纳大学的医学化学老师，1922年在儿子沃尔夫冈·泡利作为物理学家已经名满天下时获得了全职教授位置，比儿子早了一年。老泡利本人也是个学者，也忙着发表论文，故泡利早年的文章会署名 Wolfgang Pauli, Jr.，以示区别。老泡利在布拉格长大，1879—1883年间他上中学时有个同班同学叫 Ludvig Mach，这个路德维希·马赫是 Ernst Mach 的长子。恩斯特·马赫就是我们熟知的生理学家、物理学家、实证主义哲学家大神马赫，在1867—1895年间是布拉格大学的实验物理教授。直到马赫1916年去世，泡利一家和马赫一家都保持着亲密交往。小泡利实在是太可爱、太聪明了(图1)，估计是泡利天生的灵气太讨马赫喜欢了，这个爷爷辈的学术巨擘答应做他的教父，故泡利的中间名是马赫的名 Ernst。

泡利成长在学者之家，教父又是马赫这样的大神，小时候学习的条件相当不错。马赫不仅让小泡利摆弄他的各种科学仪器，还指点小泡利应该阅读的科学著作，1913年马赫更是在他的力学名著 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* (力学历

程)扉页上手书“Meinem lieben Patenkind Wolf in freundlichem Gedanken (怀着愉快的心情致我亲爱的干儿子小狼狼)”来鼓励小泡利阅读。马赫还推荐维也纳大学的函数论名家维尔廷谔(Wilhelm Wirtinger, 1865—1945)教授辅导小泡利的数学，到1914年泡利就学完了微积分。泡利就读的中学是维也纳的 Dobling 中学，他的同班同学库恩(Richard Kuhn, 1900—1967)是1938年的诺贝尔化学奖得主，比泡利早7年。

泡利18岁中学毕业，两个月后发表第一篇研究论文，主题是广义相对论。此后，泡利进入慕尼黑大学，投入索末菲的门下。在1919年，导师



图1 泡利20个月大时和母亲的合影

索末菲让泡利为德国数学百科全书撰写关于相对论的综述文章，经一年后写成237页的长文，至今为经典范文。有文献说，泡利19岁时就掌握了他那个时代最前沿的数学与物理，对外尔关于规范场论雏形的工作和爱因斯坦的广义相对论都有深刻的见解。1919年5月10日，外尔写信给他表达了合作的意愿。那一年，外尔可是名满天下的数学物理巨擘，而泡利不过是大二的学生。索末菲本人及其门下一众弟子，特别是朗德、海森堡和泡利，都是量子论的奠基人。泡利在21岁上完大三即博士毕业{不必惊讶，有那时德语国家学制短且是真老师教的原因}，博士论文研究的是氢分子离子 $H_2^+$ 模型(Über das Modell des Wasserstoffmoleküliions)。

泡利毕业后到哥廷恩大学玻恩门下做了一年的研究助手，后转往哥本哈根的玻尔研究所从事研究，1923—1928年间在汉堡大学做教授。在1922—1928年这段时间里，泡利对量子论和量子力学的建立做出了几个奠基性工作。就对量子论的全面理解来说，泡利可能是第一号的。1926年，由H. Geiger和Karl Scheel编辑的《物理手册》(*Handbuch der Physik*)之23卷为量子(Quanten)特辑，第一章即为泡利贡献的量子论，278页(图2)。其他六章皆为实验类文章。这是对薛定谔波动力学出现之前的量子理论的系统回顾。

## 1 量子力学著作

论及一个科学家的学术贡献，唯一作者的论文或书籍能够提供比较可靠的依据。泡利的量子力学文章可大致罗列如下：

(1) Wolfgang Pauli, Theoretische Bemerkungen über den Diamagnetismus einatomiger Gase, *Zeitschrift für Physik* 2(3), 201—205 (1920);

(2) Wolfgang Pauli, Jr., Quantentheorie und Magnetron (量子理论与磁子), *Physikalische Zeitschrift* 21 (21-22), 615—617 (1920);

(3) Wolfgang Pauli, Über das Modell des Wasserstoffmoleküliions (关于氢分子离子模型), *Annalen der Physik* 373(11), 177—240 (1922);

(4) Wolfgang Pauli, Jr., Über die Gesetzmäßigkeiten des anomalen Zeemaneffektes (关于反常塞曼效应的规则性), *Zeitschrift für Physik* 16(1), 155—164 (1923);

(5) Wolfgang Pauli, Jr., Zur Frage der Zuordnung der Komplexstrukturterme in starken und in schwachen äußeren Feldern (强或弱场下复杂结构项的指认问题), *Zeitschrift für Physik* 20(1), 371—387 (1923);

(6) Wolfgang Pauli, Zur Frage der theoretischen Deutung der Satelliten einiger Spektrallinien und ihrer Beeinflussung durch magnetische Felder (论一些谱线的伴线及其受磁场影响的理论意义), *Natur-*

| Inhaltsverzeichnis.                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Kapitel 1.                                                                               |     |
| Quantentheorie. Von Dr. W. PAULI, Hamburg. (Mit 16 Abbildungen.)                         | 1   |
| I. Allgemeine Prinzipien der Quantentheorie                                              | 1   |
| Die Grundpostulate der Quantentheorie                                                    | 1   |
| Wärmegleichgewicht zwischen Atomen und Strahlung                                         | 9   |
| Berücksichtigung der Translationsbewegung der Atome. Gerichtete Ausstrahlungsprozesse    | 14  |
| Der Comptoneffekt                                                                        | 18  |
| Wärmegleichgewicht bei Streuprozessen. Zusammenhang zwischen Streuung und Absorption     | 22  |
| Quantentheorie der mehrfach periodischen Systeme (Periodizitätssysteme)                  | 29  |
| Das Adiabatenprinzip                                                                     | 36  |
| Die statistischen Gewichte der stationären Zustände                                      | 38  |
| Das Korrespondenzprinzip                                                                 | 41  |
| Anwendungsbeispiele für das Korrespondenzprinzip (Oszillator, Rotator, Zentralbahn)      | 49  |
| Erhaltung des Drehimpulses bei der Ausstrahlung. Richtungsquantelung                     | 53  |
| Spektroskopische Stabilität                                                              | 61  |
| Schärfe der stationären Zustände. Theorie der Linienbreite                               | 68  |
| Quantelung der Hohlraumstrahlung nach der Methode der Eigenschwingungen                  | 75  |
| Verhältnis von Wellentheorie und Quantentheorie. Erhaltungssätze von Energie und Impuls  | 81  |
| Quantentheorie und Dispersionsphänomene                                                  | 86  |
| Nähere Diskussion der Verhältnisse innerhalb einer Absorptionslinie                      | 96  |
| Stabilitätsrelationen für Dispersionserscheinungen in äußeren Kraftfeldern               | 101 |
| II. Theorie des Spektrums von Atomen mit einem einzigen Elektron                         | 108 |
| Anwendung der Mechanik auf das Zweikörperproblem                                         | 108 |
| Anwendung der Quantentheorie auf das Kernatom. Wasserstoffähnliche Spektren              | 114 |
| Theorie der relativistischen Feinstruktur                                                | 118 |
| Starkeffekt                                                                              | 129 |
| Starkeffekt und Relativitätskorrektur                                                    | 141 |
| Zeemaneffekt                                                                             | 147 |
| Der Fall gekreuzter elektrischer und magnetischer Felder                                 | 159 |
| Probleme der Theorie wasserstoffähnlicher Spektren                                       | 164 |
| III. Spektren der Atome mit mehr als einem Elektron                                      | 166 |
| Das Versagen der bekannten theoretischen Prinzipien                                      | 166 |
| Allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Serienspektren                                          | 168 |
| Zentralbahnen erster Art. Polarisierbarkeit des Atomrestes                               | 174 |
| Eindringende Bahnen. Anwachsen ihrer Hauptquantenzahl mit der Atomnummer                 | 177 |
| Die Bohrsche Theorie des natürlichen Systems der Elemente                                | 186 |
| Die Spektren der auf den Abschluß der Achtzehnerschalen folgenden Elemente               | 193 |
| Allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Röntgenspektren                                         | 196 |
| Das Niveauschema der Röntgenspektren. Relativitäts- und Abschirmungsdubletts             | 203 |
| Übergang vom Röntgen- ins sichtbare Spektralgebiet                                       | 209 |
| Näheres über die Komplexstruktur der alkali- und erdalkaliähnlichen Spektren             | 216 |
| Allgemeine Form des anomalen Zeemaneffektes in schwachen Feldern                         | 220 |
| Zeemantypen für Dublet- und Einfachtriplettspektren                                      | 224 |
| Verallgemeinerung für höhere Multiplets. Intervallregel                                  | 226 |
| Magnetooptische Verwandlung (Paschen-Backeffekt)                                         | 231 |
| Intensitätsregeln der Multiplets und ihrer Zeemankomponenten                             | 238 |
| Beeinflussung der Serienspektren durch elektrische Felder                                | 244 |
| Der inhomogene Starkeffekt                                                               | 248 |
| Die Spektren der Erdalkalien vom Standpunkt des Aufbauprinzips                           | 252 |
| VI Inhaltsverzeichnis.                                                                   |     |
| Verallgemeinerung für beliebige Atome. RYDBERG'scher Wechselsatz. Verzweigungsregel      | 258 |
| Das Neonspektrum als Beispiel der allgemeinen Gesetzmäßigkeiten komplizierterer Spektren | 261 |
| Abschluß der Elektronengruppen im Atom und Periodenlängen des natürlichen Systems        | 267 |
| Beziehung der Zeemaneffekte zu anderen magnetischen Erscheinungen                        | 271 |

图2 泡利1926年《量子论》一文的目录截图

wissenschaften 12(37), 741—743(1924);

(7) Wolfgang Pauli, Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren (论原子中电子的闭合壳层与谱线复杂结构之间的关系), *Zeitschrift für Physik* 31(1), 765—783 (1925);

(8) Wolfgang Pauli, Über die Intensitäten der im elektrischen Felde erscheinenden Kombinationslinien (论电场中出现的组合线的强度), *Dan. Mat. Fys. Medd.*, 7(3), (1925);

(9) Wolfgang Pauli, Jr., Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeemaneffekt (论速度依赖的电子质量对塞曼效应的影响), *Zeitschrift für Physik* 31(1), 373—385 (1925);

(10) Wolfgang Pauli, Quantentheorie (量子论), *Handbuch der Physik* 23, 1—278 (1926);

(11) Wolfgang Pauli, Jr., Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik (论新量子力学观点下的氢光谱), *Zeitschrift für Physik* 36(5), 336—363 (1926);

(12) Wolfgang Pauli, Jr., Über Gasentartung und Paramagnetismus (论气体简并与顺磁性), *Zeitschrift für Physik* 41(6-7), 81—102 (1927);

(13) Wolfgang Pauli, Jr., Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons (走向磁电子的量子力学), *Zeitschrift für Physik* 43(9-10), 601—623 (1927);

(14) Wolfgang Pauli, Über das H-Theorem vom Anwachsen der Entropie vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik (论新量子力学观点下的关于熵增的 H-定理), In: Probleme der modernen Physik, Arnold Sommerfeld zum 60. Geburtstage, gewidmet von seinen Schülern, 30—45, Leipzig (1928);

(15) Wolfgang Pauli, Diracs Wellengleichung des Elektrons und geometrische Optik (狄拉克电子的波动方程与几何光学), *Helvetica Physica Acta* 5(3), 179—199 (1932);

(16) Wolfgang Pauli, Einige die Quantenmechanik betreffenden Erkundigungsfragen (几个关于

量子力学的问题), *Zeitschrift für Physik* 80(9-10), 573—586 (1933);

(17) Wolfgang Pauli, Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten Teil I: Klassische Theorie (论用五同质坐标表述自然定律之一: 经典理论), *Annalen der Physik* (Series 5), 410(3), 305—336 (1933);

(18) Wolfgang Pauli, Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten. Teil II: Die Diracschen Gleichungen für die Materiewellen (论用五同质坐标表述自然定律之二: 狄拉克物质波方程), *Annalen der Physik* (Series 5), 410(4), 337—372 (1933);

(19) Wolfgang Pauli, Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik (波动力学的一般原理), *Handbuch der Physik* 24 (1), 83—272 (1933);

(20) Wolfgang Pauli, Théorie quantique relativiste des particules obéissant à la statistique de Einstein-Bose (遵循爱因斯坦—玻色统计之粒子的相对论量子力学), *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 6(2), 137—152 (1936);

(21) Wolfgang Pauli, Contributions mathématiques à la théorie des matrices de Dirac (对狄拉克矩阵理论之数学的拓展), *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 6(2), 109—136 (1936);

(22) Wolfgang Pauli, Über ein Kriterium für Ein-oder Zweiwertigkeit der Eigenfunktionen in der Wellenmechanik (论波动力学中本征函数的单值或二值的判据), *Helvetica Physica Acta* 12(2), 147—168 (1939);

(23) Wolfgang Pauli, The connection between spin and statistics, *Physical Review* 58(8), 716—722 (1940);

(24) Wolfgang Pauli, Über die Invarianz der Dirac'schen Wellengleichungen gegenüber Ähnlichkeitstransformationen des Linienelementes im Fall verschwindender Ruhmasse (论狄拉克波方程关于无静止质量情形下线元相似变换的不变性), *Helvetica Physica Acta* 13(3), 204—208 (1940);

(25) Wolfgang Pauli, Relativistic field theories of elementary particles, *Reviews of Modern Physics* 13(3), 203—232 (1941);

(26) Wolfgang Pauli, On Dirac's new method of field quantization, *Reviews of Modern Physics* 15(3), 175—207 (1943);

(27) Wolfgang Pauli, Diracs Feldquantisierung und Emission von Photonen kleiner Frequenzen (狄拉克场量子化与低频光子发射), *Helvetica Physica Acta* 19(4), 234—237 (1946);

(28) Wolfgang Pauli, Eine Methode zur Bestimmung von Oszillatorenstärken (f-Werten) aus dem Starkeffekt (一个由斯塔克效应决定振子强度(f-值)的方法), *Zeitschrift für Physik* 124(1-2), 121—128 (1947);

(29) Wolfgang Pauli, On the connection between spin and statistics, *Progress of Theoretical Physics* 5, 526—543 (1950);

(30) Wolfgang Pauli, Der Begriff der Wahrscheinlichkeit und seine Rolle in den Naturwissenschaften (概率的概念与其在自然科学中的角色), *Verh. Schweiz. Naturf. Ges.*, 76—79 (1952);

(31) Wolfgang Pauli, Remarks on problems connected with the renormalization of quantized fields, *Il Nuovo Cimento* (10), 4(supplemento), 703—710 (1956);

(32) Wolfgang Pauli, Continuous groups in quantum mechanics, Report CERN 56—31 (1956). 重现刊印见于 *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften* 37, 85—104 (1965);

(33) Wolfgang Pauli, Die Verletzung von Spiegelungs-Symmetrien in den Gesetzen der Atomphysik (原子物理规律中的镜像对称破缺), *Experientia* 14(1), 1—5 (1958).

关于量子力学的专著, 则有 *Wave Mechanics*, *Selected Topics in Field Quantization* 和 *General Principles of Quantum Mechanics* 三种, 在后来的 *Pauli Lectures on Physics* 中分别位列卷5, 卷6和卷8。此外, 泡利1926和1933年的两篇 *Handbuch der Physik* 上的文章也有单行本。泡利

应该算是量子力学的诠释者(interpreter)之一, 其他有能力担当这一角色的还包括约当、狄拉克和冯·诺伊曼。

## 2 不相容原理

在原子论以及量子论的初级课本中都会提及泡利不相容原理。依当前Wikipedia的Pauli exclusion principle词条, 该原理的表述为“不能有两个或多个半整数自旋的粒子(比如费米子)在遵循量子力学规律的体系内同时占据同样的量子态(two or more identical particles with half-integer spins (i. e., fermions) cannot simultaneously occupy the same quantum state within a system that obeys the laws of quantum mechanics)”。不得不说, 这个表述是个非常糟糕的转述。首先, 这里的量子态是个非常含混的概念, 其次半整数自旋的说法还得再等上几个月才会有, 至于自旋与统计(费米子)之间的关系那更是个很久以后长长的故事。泡利不相容原理出现在泡利的“论原子中电子的闭合壳层与谱线复杂结构之间的关系”一文中, 其收稿时间是1925年1月16日, 而乌伦贝克(George Uhlenbeck, 1900—1988)和古德施密特(Samuel Goudsmit, 1902—1978)提出电子自旋文章的投稿时间则是当年10月17日。

碱金属的双线及其反常塞曼效应是泡利思考多年的问题, 关于其描述有一个经典理论无法自圆其说的发光电子之量子性质的二值问题, 对此其类似惰性气体闭合构型的原子实要依一个团动量 {Rumpimpuls. 猜测这是要说原子实是球对称的, 总角动量为0} 或者作为磁-力学(magneto-mechanische)反常之载体的形式参与。在强场情形下, 原子实与发光电子之间的耦合强度可忽略, 这两个分系统, 就稳态数目以及量子数的值和磁能量的值而言, 可以当作碱金属原子那样的原子实加上发光电子而无需赋予其他的量子性质。由此得到对原子中电子的一个用四量子数表示的一般分类法, 除了主量子数(Hauptquantenzahl)  $n$  和两个副量子数(Nebenquantenzahl)  $k_1, k_2$  外, 当有外场时还要引入一个量子数  $m_l$ 。泡利的主量子数、

副量子数的分别令人忍俊不禁。依德国大学的制度,读博士的,除了要有一个主修专业(Hauptfach)外,还都要有一个副修专业(Nebenfach)。泡利用haupt, neben作标签,信手拈来。约当的副专业是动物学,所以这老兄先提出了量子生物学一词。一个学位副专业为动物学的量子力学奠基人所提出的量子生物学,有那么两分靠谱。

关于原子的构造模型,泡利在斯通纳(Edmund Clifton Stoner, 1899—1968)的文章中找到了启发,通过对斯通纳工作的思考实现了实质性的进步(ein wesentlicher Fortschritt durch Überlegungen von E. C. Stoner erzielt)。斯通纳指出,一个闭合的子团(abgeschlossene Untergruppe)里的电子数,依赖于标记它的量子数 $k$ ,而与主量子数 $n$ 无关,也即与其他子团的存在无关。 $k=1$ 的,有两个电子; $k=2$ 的,有六个电子; $k=3$ 的,有十个电子。进一步地,对于给定的主量子数 $n$ ,从在磁场下的碱金属光谱得出的单电子的能级数目——此情形下所有的简并能级都展开了——正好等于对应同一个 $n$ 值的惰性气体的闭合壳层里的电子数目。泡利认识到,闭合壳层里的电子数目的问题,如果电子的状态可以由四个量子数定义的话,可以约化为每一个状态容纳一个电子的简单规则(This led Pauli to realize that the complicated numbers of electrons in closed shells can be reduced to the simple rule of one electron per state if the electron states are defined using four quantum numbers)。

后来传为泡利不相容原理的,出现在该文的p.776上(图3)。“Es kann niemals zwei oder mehrere äquivalente Elektronen im Atom geben, für welche in starken Feldern die Werte aller Quantenzahlen  $n, k_1, k_2, m_1$  (oder, was dasselbe ist,  $n, k_1, m_1, m_2$ ) übereinstimmen. Ist ein Elektron im Atom vorhanden, für das diese Quantenzahlen (im äußeren Felde) bestimmte Werte haben, so ist dieser Zustand ‘besetzt’”。这段可大致翻译如下:“在原子中永不会出现两个或多个等价的电子,其在强场下的量子数 $n, k_1, k_2, m_1$  (或者 $n, k_1, m_1, m_2$ , 也是

Es kann niemals zwei oder mehrere äquivalente Elektronen im Atom geben, für welche in starken Feldern die Werte aller Quantenzahlen  $n, k_1, k_2, m_1$  (oder, was dasselbe ist,  $n, k_1, m_1, m_2$ ) übereinstimmen. Ist ein Elektron im Atom vorhanden, für das diese Quantenzahlen (im äußeren Felde) bestimmte Werte haben, so ist dieser Zustand ‘besetzt’.

图3 泡利1925年论文p.776上的截图

一样的)相同。若原子中有个电子,它的这些量子数(在外场下)具有确定的值,则这个状态是‘占据的’”。泡利用的量子数记号 $n, k_1, k_2, m_1$ 对应现在的 $n, l, m; m_s$ 。你看,泡利的表述要比textbook writers严谨得多,这就是我们学物理不能指望textbooks的原因。

泡利说,对此规则的进一步(找)理由我们给不出来(Eine nähere Begründung für diese Regel können wir nicht geben),就是它自己看起来蛮自然的。这个问题,只当我们获得关于量子论之基础原理的进一步深化才有可能解决(nach einer weiteren Vertiefung der Grundprinzipien der Quantentheorie erfolgreich angreifbar sein)。仅仅等到第二年,薛定谔方程即告问世,当将薛定谔方程用于氢原子问题时,前三个量子数得到了解释,且它们之间的关系也变得一目了然。至于第四个量子数,就在1925年底,乌伦贝克和古德施密特大胆地提出了电子自旋的概念。

后来关于泡利不相容原理的表达变成了“对于多粒子体系,总的波函数关于两全同粒子对调只能是对称的(玻色子)或者反对称的(费米子)”。看,还是在强调一种神奇的二值性(Zweideutigkeit),即要么对称要么反对称。

### 3 构造矩阵力学

1925年,玻恩看明白了海森堡论文中要用到的数学是矩阵,于是要求泡利来完成其中的数学部分,但泡利拒绝了。在玻恩和约当构造矩阵力学的文章Zur Quantenmechanik一文(收稿日期为1925年9月27日)出来后,泡利迅速跟上了这门新的力学,发表了“新量子力学观点下的氢原子谱”,用矩阵力学得到了氢原子光谱巴尔末项的表

达。这是第一个矩阵力学应用的案例。如同狄拉克的矩阵力学论文，泡利这篇论文是矩阵力学发展过程中的重要环节。详情参见本系列的《量子力学之矩阵力学》一文，此处从略。

## 4 量子力学的泡利方程

由反常塞曼效应、海森堡的半量子数以及泡利不相容原理，终于催生了电子自旋的概念。1925年，在荷兰莱顿，两个莽撞的年轻人在埃伦费斯特(Paul Ehrenfest, 1880—1933)的鼓励下，投出了论电子转动的论文。论文共三篇，分别为

(1) G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons (用一个与单电子之内在行为有关的要求代替非力学强制假设), *Naturwissenschaften* 47, 953—954 (1925);

(2) G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Spinning Electrons and the Structure of Spectra, *Nature* 117, 264—265 (1926);

(3) S. Goudsmit, G. E. Uhlenbeck, Over Het Roteerende Electron En de Structuur der Spectra (论转动电子与谱结构), *Physica* 6, 273—290 (1926). 一文用德、英、荷三语种发表，可见作者对确立优先权的重视。这里的 Spinning，转动的，就是荷兰语的 roteerende，德语的 Rotierende，英语的 rotating，没有什么特别的。汉语关于 spin 的“自旋”译法里的“自”，属于翻译者强加的。西语也有时强调自旋，会说 self-rotation, eigene Rotation。据说，科洛尼希(Ralph Kronig, 1904—1995)先提出了电子自旋的概念，但泡利认为电子自旋如欲产生  $h/2$  那么大的角动量，表面线速度要超过光速{也是瞎扯。电子的大小恐不好定义}，肯定不对。科洛尼希未敢投稿，可惜了。关于自旋发现的故事，可参阅 Abraham Pais, *Niels Bohr's Times*, Clarendon Press (1991)。

乌伦贝克和古德施密特的出发点是朗德的矢量模型，光谱的磁行为由  $R$  (原子实角动量)， $K$  (发光电子角动量)， $J$  (总角动量) 和  $m$  (角动量  $J$  在

外场方向上的投影) 这四个数描述，而在描述光谱项公式中出现的却是  $R^2 - \frac{1}{4}$ ,  $K^2 - \frac{1}{4}$ ,  $J^2 - \frac{1}{4}$ 。然而，泡利认为在碱金属中，原子实是磁钝的(magnetisch unwirksam)，因此，在论及碱金属谱时量子数只应赋予发光电子。关于 X-射线和碱金属谱的双线问题，海森堡的解释是存在经典无法描述的二值性[Weiner Heisenberg, *Zeitschrift für Physik* 32, 841(1925)]，乌伦贝克和古德施密特觉得还有一种可能，即用不同于朗德的四量子数来描述电子，其意义分别为： $n$  和  $k$  如前是描述电子轨道的主量子数和方位角量子数，而将  $R$  赋予电子的自旋(eine eigene Rotation des Elektrons zuordnen)。

泡利看到关于自旋的论文出现当时是如何反应的，笔者不了解。但是，又是泡利对自旋概念之发展做出了关键的一步，即提出二分量的波动方程——泡利方程。

二分量波函数形式的波动方程称为泡利方程，有些地方会称为薛定谔—泡利方程，是泡利在 1927 年的 *Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons* 一文中表述了的。比较 1925 年玻恩和约当创立矩阵力学的第一篇文章题目 *Zur Quantenmechanik*，照顾到德语介词 zu (to) 的意思，我倾向于把 *Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons* 译成“走向磁电子量子力学”，强调这里关注的是一个构造过程。

对于一个电荷为  $q$  处于电磁场  $(A, \phi)$  下的粒子，泡利方程的一般形式为

$$\left\{ \frac{1}{2m} [\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} - q\mathbf{A})]^2 + q\phi \right\} |\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle,$$

这里的波函数是二分量的：

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{bmatrix},$$

这意思是说哈密顿量形式为  $H = \frac{1}{2m} [\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} - q\mathbf{A})]^2 + q\phi$ 。算符  $\boldsymbol{\sigma}$  是泡利矩阵构成的矢量。利用恒等式  $(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{a})(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{b}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) + i\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$ ，可以把泡利方程中的动能项与算符  $\boldsymbol{\sigma}$  脱耦合，改写为如下形式：

$$\left\{ \frac{1}{2m} [(\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 - q\hbar \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \times \mathbf{A}] + q\phi \right\} |\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle,$$

由此出发得出的一些结果成了原子物理基础。笔者当年想当然地误以为原子物理的相关结果是出现在量子力学之前的，想来好笑。学问的历史逻辑不一定是学问的内禀逻辑，但学问的历史逻辑一定自有其道理，是欲为学问创造者应该了解的道理。混淆了学问的历史逻辑一定程度上会给理解带来困难。

注意，4-电磁势的形式为 $(\mathbf{A}; \phi/c)$ ，而在泡利方程中， $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$ 与 $\phi$ 不是处于同样的地位，因此这个方程不是相对论不变的(nicht relativistisch invariant)。泡利说，他的这个工作只能看作是权宜的、近似的(können nur als provisorisch und approximative betrachtet werden)……尚不令人满意(noch gänzlich unbefriedend ist)。这种谦虚是如今如笔者这样的科学工作者模仿不来的，因为俺们没有往下谦虚的空间。

那么，泡利是怎样构造出泡利方程的呢？

泡利的动机是要给出薛定谔式的关于磁电子的量子力学表述，但是避免使用二值函数(zweideutige Funktionen)。为此，基于约当—狄拉克的变换理论，把绕固定方向的本征角动量作为独立变量给引进来。与经典力学不同，此变量只取 $\pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ ，与外加力场无关。在类氢原子那里，只能将本征(磁)矩的动力学行为当作久期扰动(das dynamische Verhalten des Eigenmomentes als säkulare Störung)处理。这些方法是早期天体力学就发展起来了的。

根据反常塞曼效应得到了电子具有本征角动量 $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ ，海森堡和约当用矩阵计算的形式将其纳入量子力学[Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Anwendung der Quantenmechanik auf das Problem der anomalen Zeemaneffekte (量子力学在反常塞曼效应问题上的应用), Zeitschrift für Physik 37, 263—277(1926)]，但欲处理这个本征矩在外场下受力的情形，就遭遇了独有的形式困难(eigentümliche formale Schwierigkeiten)。泡利注意到，恰当地使用约当—狄拉克的变换理论，其允许得到薛定谔函数的一般正则变换，根据本征函数的方法可以

得到关于磁电子行为的量子力学描述而无需动用多值函数。为此，要将电子之绕某固定方向的角动量分量作为新的独立变量，相应地，每一个量子态本征函数都分裂成两个函数 $\psi_\alpha(q_k)$ ， $\psi_\beta(q_k)$ 。当然，还要得到在外场下的微分方程，其应和海森堡与约当的矩阵方程等价。

泡利要做的，是把绕固定方向的电子本征(磁)矩作为独立变量引入波函数，并定义相应的算符。在经典理论中，电子总磁矩 $s$ 与对应的转角 $\chi$ 是一对正则变量，但转角 $\chi$ 是Zyklisch{周期的，循环的，不出现的，cyclic, ignorable, kinosthenic}，它不出现在哈密顿量中，总磁矩 $s$ 是守恒量。剩下的就是磁矩的 $z$ -分量及其共轭的转角 $\varphi$ 这一对正则变量( $s_z, \varphi$ )。状态函数如今也是转角 $\varphi$ 的函数， $\psi_E(q_k, \varphi)$ 。当动力学函数中出现共轭动量 $s_z$ 时，就用算符 $\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \varphi}$ 取代。如下这句，原文照录，因为太重要：“Wie bekannt, hat jedoch der Umstand, daß die Zahl der quantenmäßig erlaubten Orientierungen des Elektronenmomentes 2 beträgt, zur Folge, daß die so definierte Funktion  $\psi_E(q_k, \varphi)$  bei stetigem Fortschreiten von  $\varphi$  vom Wert 0 bis  $2\pi$  nicht zu ihrem Ausgangswert zurückkehrt, sondern ihre Vorzeichen verändert (众所周知，存在某些情形量子许可的电子矩的取向的数目为2。结果就是，如此定义的函数 $\psi_E(q_k, \varphi)$ 在 $\varphi$ 值从0持续到达 $2\pi$ 时不是复原而是改变符号)”。所谓电子的磁矩只有两个取向，那是人类的计数只能用整数。这个2，就成了电子自旋为 $\frac{1}{2} h$ 中的分母2。

等到比Stern—Gerlach实验更精细的实验出现了，发现旋磁比与 $g = 2$ 有点儿偏差，就满世界嚷嚷反常。难道这不该是最正常的现象吗？ $g = 2$ 这里的2是整数，不是实数，实验测出来1.37它也是2。接下来的实验—理论两方面的修修补补，笔者不敢苟同。

为了克服二值性，可用 $s_z$ 代替 $\varphi$ 作为独立变量。在量子力学中，kann aber  $s_z$  als zu einer Winkelkoordinate konjugiert, nur die charakteristischen Werte  $+\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$  und  $-\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$  annehmen (作为与角坐标

共轭的  $s_z$ , 其特征值只能假定是  $+\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  和  $-\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  {请记住, *annehmen* 的意思是假设, 它可能正确, 但不能在无限精度的意义上依赖假设}。于是, 函数  $\psi_E(q_k, s_z)$  分裂成两个  $\psi_{\alpha, E}(q_k)$ ,  $\psi_{\beta, E}(q_k)$ 。任何试图测量定态下  $s_z$  的尝试, 只会得到  $+\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  和  $-\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  这两个值, 就算  $s_z$  不表示运动方程的积分 (auch dann, wenn  $s_z$  kein Integral der Bewegungsgleichungen vorstellt。你看, 这就不讲理了, 但很有必要。未来关于  $g \neq 2$  的别扭可能与此有关)。

为了建立起微分方程, 把波函数表示为  $(p_k, q_k)$  和  $(s_k, \varphi)$  的函数, 同时令  $p_k = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q_k}$ ,  $\varphi = -\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial s_z}$  {这种混合变换让笔者想起 Routhian mechanics}, 总算符作用到  $\psi(q_k, s_z)$  上。 $\psi$  只在  $s_z = +\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ ,  $-\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  时不为零。(这样的方案难道不是无条理的和不是有意为之的。)事实上出现的哈密顿函数总是包含  $s_x, s_y, s_z$  作为变量的, 为此也故意地避免到极角那里绕弯子而直接代入合适的算符。泡利的这一段自白很重要(图4), 后来把由泡利方程近似得来的归于原子物理的内容当作严谨的进一步研究出发点的研究, 让我想起错层垒起的高楼: 每一层相对于下一层看似都没偏离几毫米, 就是顶端的重心在基础外, 就算不坍塌也是无意义的样子货。

泡利方程中的算符  $s$  {或者用  $\sigma$  表示} 是一个矢量算符, 分量为  $s_x, s_y, s_z$ , 则这个算符满足关系

nur für  $s_z = +\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  und  $s_z = -\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  von Null verschieden ist. Indessen wäre ein solches Verfahren unübersichtlich und wenig zweckmäßig. Die tatsächlich vorkommenden Hamilton-Funktionen enthalten zunächst immer die Drehimpulskomponenten  $s_x, s_y, s_z$  als Variable und es ist daher zweckmäßig, für diese direkt ohne den Umweg über den Polwinkel  $\varphi$  geeignete Operatoren einzuführen.

图4 泡利1927年论文p.607上的截图

Man kann diese Relationen auch in der symbolischen Matrizenform schreiben:  
 $s_x(\psi) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \psi$ ;  $s_y(\psi) = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \cdot \psi$ ;  $s_z(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \psi$  (3')

图5 泡利1927年论文p.608上的截图

$[s, s] = i\hbar s$ ,  $s^2 = \hbar^2 s(s+1)$ , 其中  $s = 1/2$ . 用  $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$  为单位, 符号改用  $S$ , 关系变为

$$S_x S_y - S_y S_x = 2iS_z; \dots$$

$$S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 = 3.$$

此算符线性地作用到波函数上, 取如下的尽可能简单的预设(einfachst mögliche Ansatz):

$$S_x(\psi) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \psi, \quad S_y(\psi) = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \psi,$$

$$S_z(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \psi.$$

这个表示(图5)从对  $S_z$  的要求出发, 借助对易关系就能得到。上述矩阵称为泡利矩阵。有必要提醒一下, 泡利矩阵出现在多种数学语境中。

$$\text{哈密顿量表示为 } H = H\left(\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q}, q, S_x, S_y, S_z\right).$$

根据约当-狄拉克的变换理论, 算符  $S$  {泡利就是用的这个字符, 容易混淆} 如下变换坐标和动量,  $P = SpS^{-1}$ ,  $Q = SqS^{-1}$ , 则它这样变换(能量本征)波函数  $\psi_E(Q) = S[\psi_E(q)]$ . 算符  $S$  对自旋算符的变换,  $S_{x'} = SS_xS^{-1}$ ,  $S_{y'} = SS_yS^{-1}$ ,  $S_{z'} = SS_zS^{-1}$ , 保对易关系。

泡利接下来给出了外磁场  $H_x, H_y, H_z$  下以及有心力电场下的薛定谔方程。但是, 用磁矢势写的泡利方程是何时出现的, 待确认。

容笔者大胆评论几句。泡利方程, 即便是形如  $\left\{ \frac{1}{2m} [\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} - q\mathbf{A})]^2 + q\phi \right\} |\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle$  的写法, 也是容易让人误解的。笨如笔者的初学者很容易把  $q\phi$  当成单纯的数, 而实际上它应该是  $\sigma_0 q\phi$ , 其中  $\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。整个构造过程, 愚以为可总结如下。从电子经典运动方程  $m\ddot{\mathbf{x}} = q(\mathbf{E} + \dot{\mathbf{x}} \times \mathbf{B})$  出发构造电磁场下电子的拉格朗日量  $L = \frac{1}{2} m\dot{\mathbf{x}}^2 + q\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{A} - q\phi$ , 其中的  $q\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{A} - q\phi$  可以这样理解, 电磁势 4- 矢量为  $\left(\frac{1}{c}\phi; A_x, A_y, A_z\right)$ , 速度 4- 矢量为  $(c; v_x, v_y, v_z)$ ; 进一步地可写成双四元数的形式  $\left(\frac{1}{c}i\phi; A_x, A_y, A_z\right)$ ,  $(ic; v_x, v_y, v_z)$ , 这样  $q\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{A} - q\phi$

就是这两个四元数的内积，再加上电荷 $q$ 作为系数(耦合常数)，这就有物理了。做勒让德变换 $\mathbf{p} = m\dot{\mathbf{x}} + q\mathbf{A}$ 进入哈密顿力学， $H = \frac{1}{2m} (\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 + q\phi$ 。将相应的薛定谔方程硬改造成两分量形式，即给矢量 $(\mathbf{p} - q\mathbf{A})$ 的三个分量和标量 $q\phi$ 各贴上一个 $2 \times 2$ 矩阵，得到方程 $\left\{ \frac{1}{2m} [\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p} - q\mathbf{A})]^2 + \sigma_0 q\phi \right\} |\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle$ 。对于有数学洁癖的如狄拉克者，这个构造过程是相当丑陋的。1928年，满足相对论形式的(毋宁说遵从哈密顿四元数代数形式的)狄拉克方程面世。

顺带说一句，也是在1927年，当年辅导少年泡利数学的维尔廷诺教授引入了Wirtinger微分算符 $\frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial \bar{z}}$ 。这个算符对量子场论的建立可太重要了。

## 5 自旋—统计定理

泡利关于自旋的一个值得一说的作品是自旋—统计定理(spin—statistics theorem)。确切地说，这个原理是泡利的学生菲叶茨(Markus Fierz, 1912—2006) 1939年率先提出来的[Markus Fierz, Über die relativistische Theorie kräftefreier Teilchen mit beliebigem Spin (任意自旋的自由粒子的相对论理论), *Helvetica Physica Acta* 12(1), 3—37 (1939)], 但是在泡利指导下进行的(unter Leitung von Prof. W. Pauli ausgeführt)。1940年泡利系统地重新推导了一遍，提出了此定理证明需要的三个公设。1949年，费曼(Richard Feynman, 1918—1988)给出了一个全新的推导，1950年泡利又发文指出费曼实际上是明显地用到了他提出的前两个公设，至于第三公设，费曼先允许负概率的出现然后甩掉那些概率大于1的场论结果，实际上是隐性地使用了第三公设。{这些大科学家的工作，笔者没有能力评论，但是遇到负概率以及大于1的概率这样的理论，笔者本能地有排斥的冲动}。施温格(Julian Schwinger, 1918—1994) 1950年基于时间反演不变性的证明，是在伯林凡特

(Frederik Belinfante, 1913—1991) 1940年基于电荷共轭不变性的证明后的一个新进展，这导致了泡利1955年将自旋—统计定理同CPT定理联系起来[W. Pauli, L. Rosenfeld, V. Weisskopf (eds.), *Niels Bohr and the Development of Physics*, McGraw—Hill (1955)]。相关内容超出笔者的理解能力，略去不论。

菲叶茨指出，在没有外场的情形下，可以给出自旋为整数的或者半整数但大于1的粒子的波场。自旋为整数的粒子必有玻色统计，而自旋为半整数的粒子则必有费米—狄拉克统计[Es zeigt sich, dass Teilchen mit ganzem Spin stets Bosestatistik, Teilchen mit halb-ganzem Spin stets Fermi-Dirac-Statistik haben müssen] {1939年，这个瑞士人坚持用玻色统计和费米—狄拉克统计的说法，他是有多讨厌爱因斯坦}。自旋小于等于1的粒子的自由波场已表明，单个粒子的荷密度与能量可唯一地确定，是规范不变量，而对于高自旋的粒子仅仅总荷与总能量是这样的。

泡利1940年的文章提到了公设I和公设II，1950年提到的三个公设如下：

(1) The vacuum is the state of lowest energy. So long as no interaction between particles is considered the energy difference between this state of lowest energy and the state where a finite number of particles is present is finite {即自由粒子能量正定}。

(2) Physical quantities (observables) commute with each other in two space-time points with a space-like distance {类空距离的两时空点上的观察量对易}。

(3) The metric in the Hilbert-space of the quantum mechanical states is positive definite. This guarantees the positive sign of the values of physical probabilities {保证概率是0到1之间的正经的数}。

自旋与统计联系的问题是相对论不变的量子场论(relativistically invariant quantized field theories)语境下的问题。引用泡利的原话，自旋与统计之间的联系是狭义相对论最重要的应用之一(the connection between spin and statistics is one of



图6 泡利在讲解量子力学(1929)

the most important applications of the special relativity theory)。有兴趣的读者请研读相关文献。此外，菲叶茨和泡利在1939年还有关于电磁场下任意自旋粒子的相对论波函数的讨论[M. Fierz, W. Pauli, On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field, *Proc. Roy. Soc. A* 173, 211—232(1939)], 也值得关注一下。

## 6 关于泡利矩阵的补充

量子力学的泡利方程的一个关键角色是泡利矩阵，但是不要误解为泡利创造了这个矩阵3-矢量，泡利矩阵也出现在其他语境，且早于1927年。泡利在1927年文章607—608页上的脚注中提到，是约当提醒他注意到那些矩阵同四元数之间的联系。记四元数为  $Q = k_1 A + k_2 B + k_3 C + D$ ，其中三个单位虚部有关系  $k_1^2 = k_2^2 = k_3^2 = -1$ ， $k_1 k_2 = -k_2 k_1 = k_3$ ，…。容易看出，有如下关系： $s_x = ik_1$ ， $s_y = ik_2$ ， $s_z = ik_3$ 。

泡利矩阵可用于四元数群(Quaternion group)  $Q$  的表示。四元数群有8个元素，为  $\{e_0, -e_0, e_1, -e_1, e_2, -e_2, e_3, -e_3\}$ ，它有四个1维不可约表示和一个2维不可约表示。2维不可约表示的8个生成元( $2 \times 2$  矩阵)分别为  $e_0 = I$ ， $-e_0 = -I$ ； $\pm e_1 = \mp i\sigma_1$ ， $\pm e_2 = \mp i\sigma_2$ ， $\pm e_3 = \mp i\sigma_3$ 。这里的  $\sigma_1$ ， $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  就是  $s_x$ ， $s_y$  和  $s_z$ 。

泡利矩阵可用于关于正三角形对称性的  $D_3$  群

的表示。 $D_3$  群有6个元素，为  $\{e, A, B, C, D, F\}$ ，即单位元， $120^\circ$  和  $240^\circ$  的转动，以及三个顶点的两两对调，它有两个1维不可约表示和一个2维不可约表示。2维不可约表示的6个生成元( $2 \times 2$  矩阵)分别为  $e = I$ ； $A = -\frac{1}{2}(I - i\sigma_2\sqrt{3})$ ， $B = -\frac{1}{2}(I + i\sigma_2\sqrt{3})$ ， $C = \frac{1}{2}(\sqrt{3}\sigma_1 + \sigma_3)$ ， $D = -\frac{1}{2}(\sqrt{3}\sigma_1 - \sigma_3)$ ， $F = \sigma_3$ 。

## 7 多余的话

泡利是个幸运儿，自己聪明不算，还得到了良好的教育，他的教父马赫、他的论文导师索末菲和他第一份工作的老板玻恩都是巨擘级的人物，他的生父和中学时辅导他数学的教授也都是一流的学者。有些人上了一辈子学也没可能遇到一个合格的老师。

泡利是一个早熟天才(child prodigy, Wunderkind)，成年后依然保持早熟天才的特点。他本人对量子力学做出贡献的几个关键点上的表现似乎说明了这一点。1925年，玻恩认识到了海森堡的色散关系呼唤矩阵力学，他首先想到的是前助手泡利，此时泡利已经去了汉堡大学。泡利毫不犹豫地拒绝了，他甚至认为玻恩的公理化尝试会毁了海森堡的直觉物理。等到玻恩—约当以及玻恩—海森堡—约当的矩阵力学文章面世以后，泡利迅速跟了上来，他用矩阵力学解决了氢原子问题，证明了矩阵力学的实用性。泡利本人是不相容原理的提出者，对自旋的概念却持否定态度，结果让古德施密特和乌伦贝克率先提出了自旋概念。后来偏偏是泡利给出了带自旋的电子波动方程，后来又和学生一起证明了自旋—统计定理。1926年，薛定谔提出了波动方程，泡利也不是很热心，但又是他1927年第一个提出了波函数为二分量子函数的波动方程，由其得到的许多结果后来成了原子物理的内容。

量子力学是个四面漏风的构造性学问。它的一些部分地成功的应用掩盖了它的诸多不尽如人意处。所谓 account for a phenomenon 取决于我们

对 phenomenon 认识了多少以及我们对“account for”的要求之高低。泡利是理论物理领域里横冲直撞的杀手，他只问是否有自己感兴趣的问题，自己是否及时赶上了，而不会受什么专业的限制。然而，如果仔细研读泡利的量子论和量子力学论文，其始终具有狭义相对论的底色。泡利的性格与能力，应了量子力学这门构造性学问诞生的时代性召唤。

对量子力学，包括之前的量子论以及后来的量子场论，有比较全面理解的，依笔者浅见，大约只有约当、泡利与狄拉克三人。也许因这三人皆才气逼人，故都不太讨喜。据说泡利很毒舌，这让很多人受不了。埃伦费斯特给泡利起了个外号“Die Geissel Gottes”（上帝之鞭），这又似乎是

赞美。科学失去了批判的良心，恐怕也会沦为世俗的买卖。山巅之上的舞蹈不要指望被山脚下的人欣赏。泡利高才、孤傲，但是活跃在索末菲、爱因斯坦、玻尔、玻恩、约当、海森堡、薛定谔、狄拉克、冯·诺伊曼等一干高人并起的量子力学奠基时代，他的学术生活倒也从不缺别人的理解与欣赏(图6)。这又是泡利的一大幸运。

### 参考文献

- [1] von Meyenn K(ed.). Wolfgang Pauli, Wissenschaftlicher Briefwechsel (泡利学术信件). Springer, 1979—2000
- [2] Enz C P. No Time To Be Brief (不为了). Oxford University Press, 2002
- [3] Pais A. The Genius of Science. Oxford University Press, 2000
- [4] Pauli W. Science, 1946, 103(2669): 213

慕尼黑上海光博会

LASER World of PHOTONICS CHINA

2025年3月11日至13日

📍 上海新国际博览中心-3号入口厅

慕尼黑上海光博会 🔍

20周年盛典 致敬，追光的你！

激光器与光电子

激光智能制造

检测与质量控制

光学元器件及材料

生物医学光子学

光学制造

集成光子学

红外技术与应用

20 YEARS OF LASER CHINA



扫码即刻注册参观