

物理学哲学研究



武 汉 大 学 学 术 丛 书
Wuhan University Academic Library

桂起权 沈健 著



武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS

物理学哲学研究



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

武
汉
大
学
学
术
丛
书

Academic Library

桂起权 沈健 著

Wuhan University

图书在版编目(CIP)数据

物理学哲学研究/桂起权,沈健著. —武汉:武汉大学出版社,2012.1
武汉大学学术丛书

ISBN 978-7-307-09019-4

I. 物… II. ①桂… ②沈… III. 物理学哲学—研究 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 153113 号

责任编辑:王军凤

责任校对:刘欣

版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 18.25 字数: 258 千字 插页: 3

版次: 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-09019-4/O · 455 定价: 40.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书
自然科学类编审委员会

主任委员 ▶ 刘经南
副主任委员 ▶ 卓仁禧 李文鑫 周创兵
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

文习山	石 兢	宁津生	刘经南
李文鑫	李德仁	吴庆鸣	何克清
杨弘远	陈 化	陈庆辉	卓仁禧
易 帆	周云峰	周创兵	庞代文
谈广鸣	蒋昌忠	樊明文	

武汉大学学术丛书
社会科学类编审委员会

主任委员 ▶ 顾海良
副主任委员 ▶ 胡德坤 黄 进 周茂荣
委员 ▶ (以姓氏笔画为序)

丁俊萍	马费成	邓大松	冯天瑜
汪信砚	沈壮海	陈庆辉	陈传夫
尚永亮	罗以澄	罗国祥	周茂荣
於可训	胡德坤	郭齐勇	顾海良
黄 进	曾令良	谭力文	

秘书长 ▶ 陈庆辉



桂起权

1940年生，浙江宁波人。武汉大学哲学学院教授，博士生导师，湖北省自然辩证法学会物理学哲学专业委员会名誉主任，湖北逻辑学会名誉会长。1952—1958年在上海市育才中学求学，1958—1963年在安徽大学物理学及无线电系求学。长时期以来主要从事分科化的科学哲学研究和逻辑哲学研究。发表著作（包括合著、译著）40余种，论文约200篇。



沈 健

1974年生，湖南溆浦人，科技哲学博士。曾先后就读于中南大学、中山大学，现任嘉应学院副教授，主要从事科学哲学和物理学哲学研究。主持国家级课题1项，参与国家、省（部）级科研课题5项。出版专著《量子革命与问题还原》1部，在《哲学研究》、《自然辩证法通讯》等刊物发表论文约20篇。

目 录

导 言	1
第一章 新解近代科学革命：从伽利略、笛卡儿到牛顿	17
第一节 近代科学革命的顶峰 ——牛顿经典体系的三大核心	18
第二节 伽利略与牛顿、笛卡儿与牛顿的思想关联对比	19
第三节 近代科学革命的“历史异化”	25
第四节 近代科学革命的“历史异化”的原因	26
第五节 小结	31
第二章 物理学史上的毕达哥拉斯主义传统	32
第一节 毕达哥拉斯主义的起源	32
第二节 行星定律的发现	34
第三节 近代力学的建立	38
第四节 现代物理学中的毕达哥拉斯主义	40

第三章 解读狭义相对论的思想渊源	45
第一节 狭义相对论的渊源：“静止以太”与相对性原理不 协调	45
第二节 爱因斯坦与洛伦兹及彭加勒的区别	48
第四章 解读广义相对论的思想渊源	56
第一节 广义相对论的源流：等效原理、广义协变性与马赫 原理	56
第二节 时空的相对性与绝对性、广义相对性与协变性	65
第五章 海森伯与量子革命	72
第一节 慕尼黑：量子工程师驱驾的人才特别快车	72
第二节 哥廷根：量子数学家主宰的“数学王国”	77
第三节 哥本哈根：浸透着量子哲学家的精神	82
第四节 海森伯对于量子革命的特殊贡献	86
第六章 玻尔互补性之真谛：一种量子力学的科学哲学	89
第一节 玻尔早年所受的哲学影响	90
第二节 互补性独特的物理学内涵	96
第三节 互补性与一般辩证法的联系	100
第四节 对罗森菲尔德的互补性解释的再分析	103
第七章 因果 / 机遇或决定论 / 非决定论的两极张力 ——从玻尔、玻恩到玻姆	107
第一节 对尼耳斯·玻尔的因果观分析的再分析	108
第二节 解读马克斯·玻恩的概率决定论思想	114
第三节 戴维·玻姆的量子势因果解释的解读	125
第四节 卡尔·波普尔“物理非决定论”的涵义辨析	132
第八章 充实的真空观：量子场的实在论与生成辩证法	140
第一节 “场”对粒子而言将成为第一性的物理实在	141

第二节	粒子论与场论	
	——历史上的竞争纲领·····	144
第三节	爱因斯坦的“以太”、空间、真空、场=同一个物理实在·····	147
第四节	狄拉克真空：场量子的生成辩证法·····	149
第九章	再论量子场的实在论和生成辩证法	
	——从生成论与构成论对比的眼光看·····	155
第一节	生成论还是构成论·····	155
第二节	量子场论：场本体论及结构实在论的解释·····	158
第三节	粒子本体论或场本体论的两难抉择·····	162
第四节	真空：凸显场本体论必要性之转机·····	167
第十章	EPR 悖论、量子远程关联及其判决性实验	
	——从逻辑的观点看·····	172
第一节	悖论的根源在于背景知识是可错的或“有毛病的”·····	172
第二节	从 EPR 论证到贝尔不等式的实验检验·····	173
第三节	“判决性实验”可以有相对可靠的逻辑基础 ——“船上修船”与“沼泽地”隐喻·····	177
第四节	爱因斯坦的“客体独立性”和“非超距作用” 与量子整体性或量子远程关联性·····	181
第十一章	量子消相干等于还原论的终结吗？·····	186
第一节	量子消相干是什么·····	186
第二节	量子消相干对还原论的批判·····	189
第三节	对量子整体论和经典世界突现论的批判·····	193
第四节	量子消相干攻势下可能的还原进路·····	196
第十二章	规范场论的研究纲领述评	
	——按照毕达哥拉斯主义模式解读·····	200

第一节	物理学几何化纲领的毕达哥拉斯主义解读·····	202
第二节	量子场论纲领的“生成论”和毕达哥拉斯主义再解释 ·····	204
第三节	规范不变性思想的历史渊源·····	207
第四节	规范场论纲领与物理学几何化纲领是统一的·····	211
第十三章	关于弦论的哲学分析·····	216
第一节	弦论的哲学界定·····	216
第二节	弦论存在本体论基础吗? ·····	220
第三节	弦论与科学的经验可证实性·····	222
第四节	弦论与理论的唯一性主张·····	224
第五节	弦论与科学的亚决定性·····	226
第六节	弦论与科学实在论·····	227
第七节	弦论与科学的隐喻·····	229
第八节	弦论与科学的统一·····	231
第十四章	量子逻辑: 一次全新的逻辑构造·····	234
第一节	量子逻辑的内涵·····	235
第二节	量子逻辑的起源及其发展·····	236
第三节	量子逻辑数学基础的新颖性·····	242
第四节	量子逻辑形式的多样性·····	246
第五节	目前关于量子逻辑的主要争论·····	256
附录	量子引力的其他探索·····	260
参考文献	·····	269
后 记	·····	279

导 言

读者眼前的这本著作《物理学哲学研究》，其实是笔者所主持的一系列“物理学哲学”研究项目的总结成果。这些项目包括：（1）《哥本哈根科学哲学思想的批判性研究》；（2）《物理学哲学研究》；（3）《现代物理学前沿的哲学问题——规范场论的哲学意义》。^①事实上，这一总结成果的取得，也是与由笔者所发起的武汉“量子哲学共同体”^②在开放的、多元化的学术氛围下的长期讨论和争论分不开的。该共同体在1998年左右便粗具雏形，目前，这一共同体已经取得了诸多硕果：与笔者结盟的武钢基础物理研究所的赵国求研究员大大推进了他所创作的“量子力学曲率解释”；笔者的博士生团队得到了磨练，完成了三篇物理学哲学博士论文，并翻译出版了一些物理学哲学著作；万小龙博士独立出版了量子力学哲学专著，并且迅速成长为科学哲学学科的带头人和物理学哲学

^① 《哥本哈根科学哲学思想的批判性研究》为1990年国家教委博士点基金项目；《物理学哲学研究》为2000年国家社会科学基金项目；《现代物理学前沿的哲学问题——规范场论的哲学意义》为教育部人文社会科学基地2002年重大招标项目。

^② 桂起权：《我们的量子哲学共同体》，载《吉林师范大学学报》2004年第6期。

学术界的新秀，他所指导的博士生完成了从科学哲学视角研究“量子力学诠释”和“EPR 悖论”的博士论文。

拉卡托斯说得好：“没有科学史的科学哲学是空洞的；没有科学哲学的科学史是盲目的。”^① 遵此嘱咐，笔者研究科学哲学的基本纲领和口号是“分科化的科学哲学”，主张将狭义的、本真的科学哲学所提供的普适性原理，分别应用于物理学、生物学、计算机科学等具体学科，与科学思想史所展示的各个学科的经验内容密切结合起来，依次做出物理学哲学、生物学哲学与计算机科学哲学乃至经济学方法论来。笔者认为，这样的科学哲学才是活生生的，有血有肉的。

如果在“分科化的科学哲学”的视野中进行比较分析，用总体性观点对我们的物理学哲学研究的核心理念进行定性和定位，那么，可以用最简洁的语言说：1. 我们的物理学哲学研究的总纲领，是毕达哥拉斯主义与科学实在论的理念的整合。2. 在本体论上，我们相信“场的实在论”，认为无形无象的场是物理世界的第一性实体。同时承认，凭借“关于结构的知识”是认识不可观察“实体”的必由之路（这是知识论版本的结构实在论论题，后详）。3. 在因果性观点上，我们主张，作为自组织系统的物理世界，在整体上是由因果律与机遇律共同决定的。4. 我们持有多元主义方法论观点，认为从不同视角看，多种量子力学解释各有其合理性。

笔者在科学思想史著作《科学思想的源流》中曾经提出，古希腊自然哲学为近现代科学和科学哲学留下的思想遗产，主要可以归结为原子论、毕达哥拉斯主义和有机体论或目的论的自然观这样三大研究传统。原子论纲领主张“世界以‘不可分粒子’为基元”的观点，一直处于强势地位。与原子论相互竞争的“场论”思想纲领，即“世界以连续物质为基质”的“以太自然观”纲领在历

^① 伊·拉卡托斯：《科学研究纲领方法论》，上海译文出版社 1986 年版，第 141 页。

史上曾经处于弱势地位，但是目前潜力巨大^①。最终，量子场论以“产生与湮灭”的方式终于将粒子论与场论融合了起来。毕达哥拉斯主义传统^②的核心是“数”，数量和形状是该传统的思想枢纽，它同原子论一起对近现代科学的建立发挥了巨大的作用。至于目的论的自然观，它在相当长的时期内基本上被排除在科学之外，不过得益于20世纪中叶控制论和系统科学的兴起，它又重新充满活力。

笔者在物理学哲学著作《规范场论的哲学探究》^③中提出，我们物理学哲学研究纲领的核心理念应该归于科学实在论与毕达哥拉斯主义这样两种理念的整合。一方面，我们是科学实在论者，深信成熟的科学理论中的科学定律所表征的正是物理世界的近似真理。无论是原子论传统下的“粒子本体论”或者场论传统下的“场的本体论”都不违背科学实在论；另一方面，我们又深信，物理世界基本结构及其相互作用的奥秘都深藏于数学和谐（尤其是基本对称性，既包括外部对称性，也包括内禀对称性）之中。后一种理念是毕达哥拉斯主义的基本信念，不过我们进一步主张，这种数学和谐并非人为的，而是物理世界本身所固有的，于是毕达哥拉斯主义的理念就与科学实在论的理念整合了起来。在现在这本《物理学哲学研究》里，这一理念将得到进一步的贯彻。

笔者在《生物科学的哲学》（2003）中提出，整个生物学哲学的奥秘在于能阐明自组织演化规律的系统科学，系统科学可以看作生物学理论背后的元理论，强调经过复杂性系统科学重新解释的“目的论自然观”对于理解生命现象的特殊价值。

与上述思想一脉相承，笔者在《计算机科学哲学研究的核心

① 从亚里士多德的“虚空不可能”、笛卡儿的“物质的充实空间（广延性）”到法拉第和麦克斯韦的电磁场“以太”，再到量子场的“场本体论”，“世界以连续物质作为基质”的纲领性思想不断得到拓展。

② 桂起权：《物理学的毕达哥拉斯主义研究传统》，载吴彤等编《科学技术的哲学反思》，清华大学出版社2004年版，第183～198页。

③ 桂起权、高策等：《规范场论的哲学探究》，科学出版社2008年版。

理念》一文^①中提出：毕达哥拉斯主义和有机体论或目的论自然观的整合，将是理解计算机科学哲学的奥秘的一把金钥匙。作为我们新研究纲领的核心理念，整合论事实上是与这一领域中的“计算主义”（弱论题）观点相呼应的。人工生命、机器智能等都能在这一框架中得到合理解释。

以上是从“分科化的科学哲学”视野，概括性地表明《物理学哲学研究》这本书的核心理念，以下则将具体地介绍本书各部分的思想要点。

第一章：新解近代科学革命：从伽利略、笛卡儿到牛顿。笔者虽然十分推崇拉卡托斯的科学史与科学哲学相结合的“内史”观点，但是又以关注“科学的社会历史因素”的“外史”观点来补充：（1）在科学史家 A. 柯依列《伽利略研究》的思想启迪之下，通过对比伽利略与牛顿、笛卡儿与牛顿的思想关联，就他们对近代科学革命的不同贡献，做出新的“社会建构”性的解读。（2）我们认为，以往的近代科学革命史存在一种夸大伽利略、弱化笛卡儿的历史作用的错误倾向，这种倾向直接揭示了科学史被“异化”这样一种事实。（3）从哲学背景角度说，这种夸大或弱化（“异化”）与欧洲哲学史上英国经验论传统与欧洲大陆唯理论传统的对立直接相关。（4）进一步剖析的结论是，科学史的“异化”源自哲学、心智、地域、媒介、政治上的偏见，而这些偏见在深层又折射了科学历史以及科学的社会建构性。

第二章：物理学史上的毕达哥拉斯主义传统。（1）在科学哲学中，毕达哥拉斯主义的要旨是，认为物理世界的奥秘在于数学和谐或基本对称性。（2）必须补充说，这种数学和谐并非人为的，而是物理世界本身所固有的。这样，毕达哥拉斯主义与科学实在论的理念便整合起来，这种整合论将成为我们物理学哲学研究纲领的核心理念。（3）通过科学史的考察表明，追寻数学和谐与基本对称性的思想，不仅对近代天体力学中行星运动定律的发现有决定性

^① 桂起权、任晓明：《计算机科学哲学研究的核心理念》，载《淮阴师范学院学报》2010年第1期。

意义，而且对理解现代原子光谱学、相对论、规范场论和粒子物理学等都有启示价值。(4) 伽利略的言论被看做毕达哥拉斯主义的宣言：宇宙这部宏伟的书是用数学语言写的，它的文字是三角形、圆和其他几何图形。(5) 在近代科学中，开普勒行星三大定律的发现应当看作是毕达哥拉斯主义的胜利，因为正是追求宇宙在数学上的奥秘，才导致开普勒最终成功地利用数学语言、公式来表述物理世界的定律。(6) 而韦斯科夫在《二十世纪物理学》中更是主张：毕达哥拉斯的观念在氢原子光谱线中再生，“天体谐音”又重新出现在原子世界之中。(7) 海森伯在《二十世纪物理学中概念的发展》中强调，现代物理学中的“粒子”，不是德谟克利特的原子，而是基本对称性的数学抽象。(8) 爱因斯坦力求把握“宇宙设计”的基本思路，而不是枝节问题。大部分物理学家都追随爱因斯坦的理性主义思路，自然的基本设计是“寻求内在的对称性与和谐之美”这一信念已经深深扎根于物理学家们的思想当中。(9) 即便是最近提出的超弦理论，它的内在本性仍然还是毕达哥拉斯式的。

第三章：解读狭义相对论的思想渊源。(1) 从科学思想的历史渊源和深层哲学根据的视角来分析狭义相对论。爱因斯坦的深层思想是一贯的：坚信物理世界的建构应当遵循和谐秩序的原则，坚信“自然定律的普遍有效性，应当不随坐标系变换而变”的哲学理念，从狭义到广义相对论的进展，这始终是探寻新理论时最重要的启发性原则。(2) 爱因斯坦独具慧眼，他用“理性的眼睛”洞察到，如果电磁学的麦克斯韦方程组只对“以太”这个绝对参照系才有效，则就违背了相对性原理。大自然决不允许这样做，不允许破坏和谐秩序。伽利略的相对性原理已经表明，力学规律对一切惯性系都同等有效，不随参照系而变。因此，电磁学规律也应当如此。(3) 如果真有“以太”这个绝对参照系，那么就可以在地球上测定“以太漂移速度”。可是，反复实验所得到的只是令人意外的“零结果”。对此，经典物理学体系的保守派（他们至多是改良主义者）和激进的革新者作出了完全不同的反应和解读。(4) 爱因斯坦与洛伦兹及彭加勒存在根本区别：尽管在相对论的先驱者

中，率先提供数学表达式的是洛伦兹，率先找到普遍原理的是彭加勒，可惜他们最终还是没有摆脱旧观念（“以太”、绝对参照系等）的束缚，未能把工作进行到底。洛伦兹可以说是旧理论体系中技艺最为精湛的修补匠，“长度收缩”、“局域时间”都是应付反常的绝妙之计，可惜只是限于特设性假设。然而，在相对论革命家爱因斯坦那里，则另有一番景象，“同时性是相对的”成为突破口，彻底批判绝对时空观，摧毁其核心原理，确立了“光速不变”和“狭义相对性原理”等全新的第一原理，“长度收缩”、“局域时间”都真正成为从第一原理导出的自然结果。

第四章：解读广义相对论的思想渊源。（1）爱因斯坦坚信物理世界的和谐秩序原则，坚信“自然定律的普遍有效性，应当不随坐标系变换而变”。对于惯性系是那样，推广到非惯性系也应当是那样。在进行推广时，架构的桥梁是等效原理和广义协变性原理。（2）分析广义相对论的创立过程中，新物理思想与新数学工具之间的能动相互作用。特别是一旦认识到在弯曲时空中必须采用“柔性标尺”，也就借助于黎曼几何与张量分析工具取得了关键性的突破。（3）马赫对绝对时空观的大胆怀疑和有力批判，给予爱因斯坦无穷的启发性力量。通过对“马赫原理”的重新解读，还可以看出它对寻找广义相对论的引力场方程的启发性作用。（4）从新的角度讨论了广义相对论时空观，指出引力场的时空相对性之中仍包含着某种绝对性。探讨了爱因斯坦与马赫的相对性纲领的微妙差异，分析了物理上广义相对性与数学上广义协变性的区别与联系。

第五章：海森伯与量子革命。（1）量子革命是20世纪三大革命之一。慕尼黑学派、哥廷根学派、哥本哈根学派这三大学派在量子革命中起决定性作用。这些不同的学派、科学共同体各有各的特色，各有各的研究纲领、方针路线和战术部署。（2）索末菲史称“量子工程师”，他领导的是慕尼黑学派。该学派的纲领性目标是，根据有关原子光谱的最新实验数据，运用精致的数学技巧，来改良玻尔的原子模型，因而他们属于量子革命前夜的改良派。该学派的特色是量子光谱学，启发性思想方法，毕达哥拉斯的数学和谐。

(3) 玻恩史称“量子数学家”，他所领导的是哥廷根学派。哥廷根大学因其特殊的学术氛围而被称为“数学王国”。玻恩在初级阶段(1922年)推出的“行星原子力学”纲领仍然是改良主义的，即企图弥补玻尔理论的缺点，建构一个在逻辑上更一致又在数学上更严密的行星原子模型。该学派的特色是微扰方法，启发性思想方法，类比天文学的摄动方法。(4) 量子危机孕育着量子革命。旧量子论的反常事实层出不穷，各种特设性假说、权宜之计都无补大局。1924年进入新阶段，为了摆脱危机，玻恩终于下决心提出革命性纲领：要求建立全新的公理化量子力学，拥有自己的基本运动方程，原子客体的一切性质可以从这“第一原理”自然地推演出来。(5) 玻尔史称“量子哲学家”，他所领导的是哥本哈根学派。这里所谓的“量子哲学”，不是思辨的形而上学，而是从量子物理学实际内容中提炼出来的最普遍的原则性问题，但绝非技术性的细节。玻尔的特色是，对物理学概念进行整体性把握和哲理性思考。哥本哈根学派的特长有：一是以辐射量子论作为范例；二是对应原理的熟练应用，即借助量子 and 经典之间的类比，来寻找新定律、新公式。(6) 总起来说，海森伯从“量子工程师”索末菲那里学到了物理学，从“量子数学家”玻恩那里学到了数学，从“量子哲学家”玻尔那里学到了哲学。他是慕尼黑学派、哥廷根学派与哥本哈根学派这三个科学共同体联合培育的结果，具有人才学意义上的“杂交优势”，因此能成为量子革命的先锋与主将。^①

第六章：玻尔互补性之真谛：一种量子力学的科学哲学^②。

(1) 玻尔早年接受了独特的辩证思维教育。丹麦哲理诗人摩勒的小说，采用了轻松而幽默的方式表述了黑格尔的“反思辩证法”，该小说对青年玻尔的哲学理解力起到了茅塞顿开的决定性作用。(2) 以老玻尔克里斯蒂安为轴心，存在一个喜欢自由争鸣的生理

① 王自华、桂起权：《海森伯传》，长春出版社1999年版。

② 该章可参看桂起权：《析量子力学的辩证法思想——玻尔互补性构架之真谛》，载《哲学研究》1994年第4期；以及《关于互补性逻辑、辩证逻辑与次协调逻辑》，载《河南社会科学》2010年第1期。

学家共同体，“机械论与目的论”的关系之争成为他们的热门话题。这种环境无论就“喜欢自由争鸣”习性的培养，或者是日后对“互斥又互补”的关系的理解，都对青年玻尔的心灵产生潜移默化的作用。（3）通过好友罗宾，玻尔了解到詹姆士《心理学原理》中关于“思想流的整体不可分性”和“自我”与“非我”划界的相对性。这些概念对于理解量子世界的本性，具有启发性价值。（4）对于互补性独特的物理内涵，恐怕许多人没有抓住其要害。那么，其特异性究竟何在？最本质的特征究竟何在？从前，在对宏观世界的处理中，“主体=观察者”与“客体=被观察者”，两者可以严格划分。事实上，这种划分的前提是经典力学有两种理想化：“观察”——不会对客体产生真正的干扰；“物理客体”——可以与外界的相互作用隔绝（原来是什么样就什么样，可以严格界定其孤立状态）。现在，在量子力学对原子世界的处理中，相互作用不可忽略，观察者与被观察者的关系已经变得难分难舍，二者“既相互排斥，又相互补充”。换句话说，观察者（主体）与物理系统（客体）划界虽然还是必不可少，但由于相互作用和量子纠缠的无所不在，绝对的孤立状态并不存在，严格划界不再可能。（5）互补性与一般辩证法的联系：尽管“互补性”概念来自对量子世界本性独特的“互补又互斥”或“相反相成”的抽象，但它一旦从量子力学语境中抽象出来也就获得了普遍意义。重要的是，这种“互补又互斥”以科学的精确性来刻画，没有任何逻辑矛盾。（6）对罗森菲尔德互补性辩证法研究的再分析。玻尔的密友罗森菲尔德从辩证哲学观点出发，就互补性与经验的关系、量子规律的几率特征、互补性与决定论的关系、互补性与客观性、科学实在论以及互补性本身的界限等六个方面，为互补观点做出了有力的辩护。在此基础上，本书将进一步集中阐发玻尔思想中的辩证法内涵。（7）罗森菲尔德所说的“互补性=量子力学的毕加索艺术”，言无虚发，它不只是一种隐喻，而且还是一种形象化的模型。实际上，毕加索的立体主义让人物的正面、侧面或背面互补起来，奇特地结合成整体，这与玻尔的互补性的语义模型（即“黎曼面模型”）保持高度的一致性。