

• 人物评传 •

汤川秀树的主要科学贡献

The Achievements of a Wise Man: Yukawa Hideki's Major Scientific Contributions

阿西伍惹 / AXI Wure 厚宇德 / HOU Yude

(山西大学科学技术史研究所, 山西太原, 030006)
(The Institute for the History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006)

摘要: 几经曲折, 汤川秀树建立了解释核力产生机制的介子理论, 成为日本第一位诺贝尔奖获得者。家教要求他自幼系统学习中国文化, 而他从初中开始就对道家哲学情有独钟。他认为科学家出色的直觉、想像与类比能力, 是科学创造过程中不可或缺的决定性因素。而他的这些能力, 主要来自于道家哲学的影响。在其科学生涯中, 道家哲学成为其理解现代科学的概念与理论、思考现代科学问题的思想基底。

关键词: 汤川秀树 介子理论 非定域场理论 老庄哲学

Abstract: After several twists and turns, Yukawa established the meson theory to explain the mechanism of nuclear force, and became the first Japanese Nobel Prize winner. His upbringing required him to systematically study Chinese culture from an early age, and he has been interested in Taoist philosophy since junior high school. He believed that the scientist's excellent intuition, imagination and analogy are indispensable and decisive in the process of scientific creation—abilities that he largely attributed to the influence of Taoist philosophy. In his scientific career, Taoist thought served as the ideological basis for him to understand the concepts and theories of modern science and to reflect on modern scientific problems.

Key Words: Hideki Yukawa; Meson theory; Non-local field theory; Philosophy of Laozi and Zhuangzi

中图分类号: K811; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.08.013 CSTR: 32281.14.jdn.2025.08.013



汤川秀树

汤川秀树(Hideki Yukawa, 1907–1981)由于成功提出 π 介子理论而荣获1949年诺贝尔物理学奖, 他是日本第一位诺贝尔奖获得者, 也是亚洲第一位获得诺贝尔奖的理论物理学家。

汤川秀树科学生涯的特殊之处还在于, 他的整

个学习以及获得诺奖的科研工作, 都是在未出国的情况下完成的。远离世界物理研究中心的汤川秀树, 为什么能够攻克物理学前沿的重要问题? 这难免令人好奇。汤川秀树在其著述中明确而反复强调, 他是在具有浓郁中国传统文化氛围的家族中成长起来的, 深受中国传统文化尤其老庄哲学的影响。在将中国传统文化与西方现代科学文化妥善对接方面, 汤川秀树是一个很有借鉴意义的样板。因此, 深入考察、

收稿日期: 2022年12月5日; 返修日期: 2024年12月16日

作者简介: 阿西伍惹(1993–)男, 四川凉山州人, 山西大学科学技术史研究所博士研究生, 研究方向为物理学史。Email: 1375346356@qq.com

厚宇德(1963–)男, 黑龙江明水人, 山西大学科学技术史研究所教授, 研究方向为物理学史与物理文化。Email: hyd630418@sina.com

分析汤川秀树在科研领域取得成就的各种关键因素,较之研究其他西方著名科学家,对中国科学界更富有特殊意义。本研究基于京都大学基础物理研究所汤川纪念馆和大阪大学汤川纪念馆提供的档案资料以及汤川秀树的日记手稿等重要一手文献资料,以介子理论、非定域场理论和基元域理论为核心,展示汤川秀树重要的科学思想与贡献。

一、艰难提出 π 介子理论

1929年从京都大学毕业后,汤川秀树留校成为无薪助教。22岁步入职业生涯,然而此时的汤川秀树内心却充满焦虑与不安:“虽然我只22岁,但是在年龄上并不算太小……海森堡、狄拉克、泡利和费米这四位最杰出的科学家……都在23岁或24岁左右就已取得了很大的成就”。([1], p.187)这种向世界一流科学天才看齐的抱负成为他全身心投入科学研究强大动力。此时,量子力学的理论建设已经结束,汤川为没有赶上这场轰轰烈烈的物理学革命而遗憾。在惆怅之余,冷静下来的他认真分析当时物理学的前沿生长点,很快意识到物理界还有两大领域有待开垦:其一是发展相对论性量子力学,其二是将量子力学应用于研究原子核问题。([1], p.187)几经选择,最终他把自己的关注点聚焦到第二个领域,从此踏上了建立介子理论的艰苦卓绝的探索之路。

1. 介子理论问世前的黑暗

量子力学能够准确计算原子外电子在核外各轨道间跃迁时吸收或辐射能量的多少以及量子对应的频率。但直到1932年人们对原子核的认识还很有限。当时物理学家已经明确知道自然界存在的基本粒子只有三种:电子、光子和质子。由于原子核发生 β 衰变时伴随着电子发射,人们曾很自然地设想原子核是由质子和电子组成的。然而这一设想却与量子力学存在冲突。根据海森堡的不确定性原理,电子如果被限制在原子核空间内,由于其质量很小所以必将导致它具有极大的速度,因而会很容易逸出原子核;此外,假如原子核内存在具有奇

数个核内电子,计算表明其磁场应该比从原子光谱的超精细结构推算出的磁场大1000倍左右。〔2〕这样一来,原子核由电子和质子构成的假说被断定不成立。1932年查德威克(James Chadwick)发现了中子;不久,海森堡和伊凡宁柯(Dimitri Iwanenko)各自独立地提出了原子核由中子和质子组成的设想。汤川秀树注意到了海森堡关于原子核结构的论文,并写了一篇综述性的介绍文章发表在1933年的期刊“日本数学物理学会纪事”,这也是汤川秀树第一次在专业刊物上发表学术论文。〔3〕然而,这种设想无法回避一个难题:是什么力把质子和中子束缚在如此狭小的原子核空间(直径为 10^{-15}m 数量级)?海森堡设想将质子和中子束缚成原子核的力,源于质子与中子或中子与中子之间交换电子机制所产生的吸引力。〔4〕1933年4月,在日本数学物理学会的年会上,汤川秀树做了题为“论核内电子”的报告,他类比电磁相互作用中的交换光子行为,较为认可海森堡的假设。但很快海森堡假设的问题即被揭示出来——首先,电子是自旋为 $1/2$ 的费米子,因此不可能作为交换粒子;其次,基于可靠计算,电子作为交换粒子所产生的作用力的力程要比核力的实际力程大200倍。〔5〕仁科芳雄(Nishina Yoshio)会后建议汤川秀树,假设考虑使用满足玻色-爱因斯坦统计即自旋不是 $1/2$ 的“电子”来作为交换粒子;然而,此时的汤川秀树还不具备在物理界已知粒子外假设“粒子”去建立理论勇气。在他看来,自然界不存在仁科芳雄设想的那种玻色子“电子”,否则它们应该早已在实验中被发现。([1], p.218)局限于既有基本粒子范围去解释原子核问题的思路,使此时的汤川秀树无法继续前进,研究陷入困境之中。他在回忆中写道:“事实上,从昭和7年到昭和9年秋(1932年到1934年)是我一生中最困难的两年。然而,正在经受磨难这一事实却使我感到满意。我觉得像一个背负重荷的旅人在拼命爬坡”。([1], p.211)

2. 介子理论的提出过程

1914年,英国物理学家查德威克在实验中发现, β 衰变过程中即使具有完全确定的初末

能量状态，放射性原子核所放射出的电子却不以确定的能量出现，而是表现为连续的能量谱线。这就是说， β 衰变所发射出的电子的能量并非简单地等于系统初末状态的能量差，而且衰变后的总能量比衰变前的总能量要少一些。那么减少的能量去了哪里？面对这一困惑，玻尔等人认为在 β 衰变过程中，能量守恒只在统计意义上成立，而对于单个的 β 衰变，能量守恒将不再适用。（[6]，p.339）能量守恒定律沦为统计定律的提法，从爱因斯坦到泡利（Wolfgang Pauli）等等，几乎整个物理界都无法接受，甚至作为撰写文章揭示此观点的合作者之一的斯拉特（John Slater）也不相信微观物理过程能量会不守恒。（[6]，p.348）1933年，泡利在第七届索尔维会议上提出中微子假说，经过讨论得到了多数物理学家的认可。该假说认为在 β 衰变过程中可能有一种尚未发现的、质量很小的自旋为 $1/2$ 的粒子（即中微子）伴随着电子一起发射出来，并带走了 β 衰变中所“遗失”的那部分能量。费米（Enrico Fermi）出席了此次会议，其后他根据泡利提出的中微子假说，成功建立了全新的 β 衰变理论。费米正确地指出， β 衰变中的电子和中微子在原子核内不是独立存在的，而是原子核内的中子通过弱相互作用衰变为质子，同时释放出一个电子和一个中微子。费米的理论不仅成功解决了 β 衰变能谱连续性以及半衰期问题，而且还发现了弱相互作用力。

汤川秀树1934年辞去京都大学的职位，到大阪大学理学部任专职讲师。读到费米的文章后，他立即基于类比，开始研究用“电子-中微子”粒子对代替“电子”，充当核内产生交换力的交换粒子的可能性。正当汤川秀树展开独立探索之时，苏联物理学家伊凡宁柯和塔姆（Igor Yevgenyevich Tamm）已经完成对这一问题的探讨，在写给《自然》（*Nature*）杂志的信中公布了他们的计算结果，他们认为以“电子-中微子”充当交换力粒子，仍然无法解释核力的短程性和核力的巨大强度。

然而，伊凡宁柯和塔姆这次的否定性结果没有挫败汤川秀树，屡败屡战中，他忽然意识

到了问题的关键所在。他回忆说：

我被这否定性结论振作起了精神，它使我睁开了双眼，我想：我不妨跳出包括新的中微子在内的已知粒子的范围去寻找属于核力场的粒子……10月初的一天夜里，我突然想到了关键问题。核力的作用距离极其短，约为 10^{-14} 分之2厘米。这一点我早已熟知。我的新见解是认识到这个作用距离和我所要寻求的新粒子的质量互成反比。我怎么以前没有注意到这一点呢？第二天早晨，我解决了新粒子的质量问题，发现它大约是电子质量的200倍。它还必须具有正的或负的电子电荷。当然，这样一个粒子还没有被发现，我反问自己：为什么没有发现呢？答案是简单的：产生这样的一个粒子将需要100兆电子伏特的能量，而当时还没有能产生这样高能量的加速器。（[1]，pp.225-226）

以“电子-中微子”粒子对作为交换粒子设想的失败，反而使沉浸在此问题中的汤川秀树获得了思想上的彻底解放，他意识到在既有的有限几个基本粒子基础上，设想建立原子核理论是无法成功的；而一旦意识到这一点，一切变得豁然开朗、难题迎刃而解，很快就得出了 π 介子理论的重要内容：明确了交换粒子的质量以及电荷。

在汤川夫人的催促下，汤川秀树开始着手撰写“论基本粒子的相互作用I”的初稿。从汤川秀树的论文手稿中可以发现该文的撰写时间始于1934年11月1日，在1934年11月17日召开的日本数学物理学会的会议上即公开宣读。这是汤川秀树首次在公开场合宣布自己的介子理论，这一天即介子理论的誕生日。

在11月17日的日记中，汤川秀树简要记述了参会当天的情形：“早上六点四十分起床，准备演讲。十一点半离开宾馆，把行李寄放在车站，在丸大厦吃午饭。数-物会议一点半开始。五点前，鄙人演讲，六点前结束。得到了仁科先生的鼓励”。^[7]需要特别说明的是，汤川秀树在论文中，为验证他的理论指出了实验方向——在当时的条件下，“重量子”不可能在实验室中由普通的核反应产生，只有在宇宙

射线中才有可能找到具有如此高能量的粒子。^[8]后来成为汤川介子理论的重要合作者的小林稔,这样回忆当时会议的情景:

虽然汤川的讲话很有启发性,为后来的物理学发展指明了方向,但会上却普遍没有回应。毫不夸张地说,这次会议给人留下了明显不愉快的印象……当时的汤川还是一位名不见经传的27岁物理学家。此外,他显得非常害羞,声音很低,几乎听不见。当然,他的假设太大胆了,不符合常识……然而,我记得仁科和汤川私下讨论过,如果能通过实验证实这种质量介于电子和质子之间的粒子的存在,那将是一件很有趣的事情。^[9]

根据小林稔的回忆,以及汤川自己的日记可以想象,汤川秀树在会议上首次提出介子理论时,只有仁科芳雄对他予以鼓励和支持,而其他更多日本物理学家“普遍没有回应”。更令汤川秀树难以想象的是,在国外他遭受到的是更加沉重的打击。汤川秀树把关于介子理论的论文投寄给美国的《物理评论》杂志后,遭到了审稿人、著名物理学家奥本海默的否定。最后,这篇具有划时代意义的文章刊登在了1935年2月的《日本数学物理学会纪事》。

3. 提出介子理论为何如此艰难?

今天回顾 π 介子理论的提出过程,有的人会觉得提出这个理论,不像建立相对论、量子力学理论那么困难。既然光子是传递电子与质子之间电磁相互作用的基本粒子,就类似应该存在一种基本粒子,传递原子核内核子之间相

互作用。按照这个思路,汤川较快算出了这种粒子的质量以及所携带的电量,数据表明这不是人类已知的一种基本粒子。反过来说,提出并要让人们接受 π 介子理论,必须先接受一个假设,即自然界应该存在一种尚未被发现的基本粒子。这个假设在今天看来不是问题,但是在那个时期,却是思想很难逾越的难关。如前所述,汤川秀树本人也曾为此所阻碍,而推迟了多年才突破这个思想瓶颈。

对当时的西方物理学家而言,将一个新理论建立在假设存在一种未知粒子之上,这种做法难以接受程度是今天很多人难以想象的。前文提到1933年物理学家经过在索尔维会议上的激烈讨论,认可了泡利的中微子假说。可事实上,泡利在1930年已提出了中微子假说,然而却一直难以获得多数物理学家的认可和支持。^[10]从思想方法上说,物理学家们相信量子力学的胜利是实证主义哲学的范例。而建立量子力学的一条重要的思想方法就是可观察性原则,^[11]即认为物理理论要建立在可观察的事实或物理量之上。量子力学于1926年奠定理论基础,1932年、1933年多位量子力学贡献者获得诺贝尔物理奖。因此,此时量子力学及其思想方法对于物理学家的影响是最深刻的时期,他们普遍相信可观察性原则,而反对假设存在某种粒子,并以此为基础建立理论。1937年玻尔访问日本时,在了解到汤川秀树的理论之后,曾质问汤川秀树:“难道你喜欢一种新的粒子吗?”^[12]玻尔质问的言外之意是:“你假设存

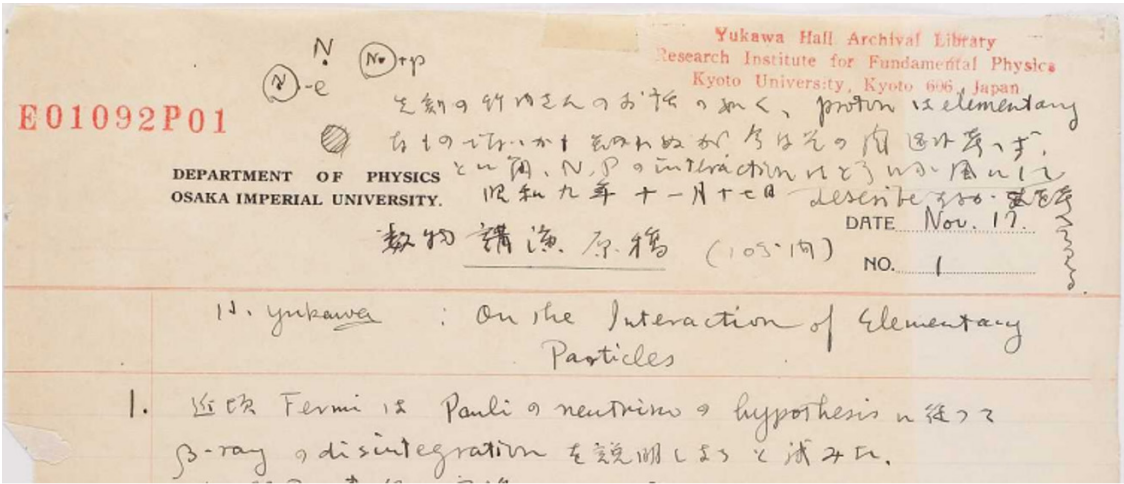


图1 汤川秀树在日本数学物理学会会议上的介子理论演讲手稿

在一种粒子来建立理论,这种做法合理么?不觉得奇怪么?物理界会接受吗?”杨振宁曾借助另外一位伟大理论物理学家狄拉克的话,让人们感受汤川秀树当时的遭遇:“在当时这个设想(指假设存在介子)是十分大胆的。这一点可以从狄拉克对30年代初物理学界中的气氛的评论中看到。他说:‘在那些日子里,舆论的气氛很强烈地反对提出新粒子的设想。’……当时的主导气氛是强烈地妨碍新粒子提出的”。([13], p.501)

可见,提出和接受 π 介子理论的困难,主要源于汤川秀树的做法与当时西方多数物理学家思想观念的直接冲突。不了解世界物理界当时的思想潮流,就无法理解汤川秀树提出 π 介子理论所面对的巨大困难和所承受的巨大压力。幸运的是,在远离西方科学中心、从小接受中国传统文化熏陶的汤川秀树,在积极吸收西方科学知识的同时,并没有受到当时在欧洲流行的实证主义哲学的束缚。同一时期不同地域科学文化对科学家的不同影响,是处于世界物理研究中心之外的汤川秀树,而不是某位欧洲物理学家提出 π 介子理论的重要因素。

4. 庄子哲学是汤川秀树提出新理论的重要思想动力

哲学气息的东方文化氛围并没有成为汤川秀树提出 π 介子理论的阻碍,相反它还助力汤川秀树将研究推向深入。总结一下汤川秀树提出 π 介子理论的过程,其核心为三次探索性的“类比”(见表1)。

从汤川秀树的回忆和日记等角度考察,1934年他为建立 π 介子理论而能够做出如上类比,与他基于文化积淀的思想和特殊心理有密切关系。这主要体现为,老子和庄子(尤其是庄子)的哲学使他对自我的直觉充满信心,即他坚信发自本能的思路和设想是正确的,凭借

自己的智慧完全能够想象和解决原子核世界的问题;另一方面,他丝毫不怀疑类比方法的威力。汤川秀树曾说:

在某些年轻一代的物理学家看来,理论物理学被归结成用抽象群数学来补充的复变量复值函数的数学了……我为一件事感到很不安,就是说这种片面的抽象化趋势缺乏某种对于创造性思维来说是很重要的东西。不管我们从日常生活的世界走开多么远,抽象也不能通过它本身来起作用,而是必须伴之以直觉或想象。([14], p.118)

因此,在汤川秀树看来,理论物理学研究,绝不简单地是物理学加数学的纯粹技术活动,重要的创造性首先需要物理学家的直觉和想象,而这二者很大程度上决定于物理学家的天赋。

庄子哲学是汤川秀树抗争西方实证哲学的主要思想力量。这可以通过其合作者坂田昌一的回忆去直接感受:“汤川学派的特点是一直在与实证主义倾向作斗争。汤川秀树最喜欢的一个词是中国著名哲学家庄子提出的‘知鱼乐’三个字,它准确地表达了汤川学派的基本精神”。^[15]在汤川秀树看来,“知鱼乐”即意指人可以通过直觉对人以外的、尚不能证明的事物做出合理判断。至于类比和想象等方法,汤川秀树直言不讳他得之于庄子对他的影响:“我非常喜欢庄子的思想,他在叙述中使用了许多比喻(类比的古老形式)和反证法,他的思想为我打开宏大而且愉快的遐想世界,这正是其具有无穷魅力之所在”。^[16]事实上,汤川秀树承认,古希腊的科学文化是理想的、完美的。([14], p.119)在古希腊的经典著作中,直觉、类比与想象都大量存在。那么为什么,汤川秀树又一再肯定中国古典哲学,尤其老子庄子的哲学对他有深刻而重要的影响呢?因为,在他

表1 汤川秀树提出 π 介子理论的三次主要“类比”研究

序次	时间	作用力类比	对象设想与类比	类比性质	类比结果
1	1933年	电磁力&核力	光子&电子	已知&已知	否定:与量子力学冲突
2	1934年	电磁力&核力	光子&电子-中微子	已知&半已知	否定:与计算结果不符
3	1934年	电磁力&核力	光子& π 介子	已知&未知	证实:1947年发现 π 介子

还是一位小学生、初中生的时候,他就熟读中国诸子著作,而性格使他对老庄哲学情有独钟。来自于老子庄子哲学的思想方法,先入为主地在汤川的精神与思想世界根深蒂固,并对他的科学研究产生积极的影响,也成为他化解科学问题的思想利器与文化基础。汤川秀树自己相信,这一点成为了他与其他20世纪科学家有所不同的个性:“古中国通过各种方式而在我心中占有地位。尽管这显得和我是一个科学家这一事实相矛盾,但是这反而足以给作为一个科学家的我以某种个性”。([14], p.104)文化对科学家的影响是毋庸置疑的。迪昂(Pierre Duhem)曾这样描述英国科学家的特点:“英国人觉得要研究物理学就必须使用模型。这种必要性如此之大,以致英国人的大脑一见到模型便理解了那个理论”。([17], p.75)而“对法国人或德国人来说,一个物理学理论基本上是一个逻辑体系”。([17], p.83)在以中国道家为代表的东方文化里,直觉、类比与想象是最常用的、最可靠、最方便、最智慧的思维方法,这种方法对于汤川秀树而言,如同机械模型对于英国人、逻辑体系对于法国和德国人所起的作用一样。借助于它以及由它而获得的自信,汤川秀树摆脱了西方实证主义的思想束缚,逆物理界思潮而上,在尚无实验依据时就大胆引入当时西方科学界极力反对的新粒子(介子),成功解决了长期困扰物理学界的核力问题。而进一步的实验研究则对他的理论予以最有力的支持。

5. 发现介子之后

在汤川秀树为自己提出的介子理论不被物理学界认可而苦恼与无奈之时,他的运气出现了不无意外的峰回路转。正如汤川秀树在1934年所预言的那样,1937年安德森(Carl David Anderson)和尼德迈耶(Seth Neddermeyer)在宇宙射线中发现了一种新粒子,这种粒子的质量约为电子质量的200倍,与汤川秀树预言的“重量子”的质量高度吻合。汤川秀树在得到这一消息后,于同年7月撰写了一篇题为“对宇宙射线中贯穿成分的可能解释”的论文,指出他所预言的“重量子”与安德森在宇宙射线

中发现的粒子可能是同一种粒子,并把文章寄给了英国的《自然》杂志,结果被编辑部拒收,这篇文章后来又刊登于《日本数学物理学会纪事》。

关键时刻,奥本海默站了出来。他得知安德森和尼德迈耶的这一重要发现后,想起了两年前被他“枪毙”的汤川秀树的论文,并给《物理评论》杂志撰文。在文中,这位著名物理学家写道:“实际上,它已由汤川秀树提出了,交换这种中间质量的粒子的可能性大于电子-中微子的费米理论,它对于质子和中子之间交换力的范围和数量提供了合理的解释”。^[3]就这样,奥本海默由汤川理论的反对者,基于对实验事实的尊重,迅速变为该理论强力的支持者。奥本海默的影响力巨大,从这时起,西方物理学家的目光逐渐聚焦向遥远东方的汤川秀树,并开始重视他提出的理论。

从1935年汤川秀树的“论基本粒子的相互作用I”一文被《物理评论》拒收,到1937年“对宇宙射线中贯穿成分的可能解释”一文被《自然》杂志退稿,这期间汤川秀树还有多篇论文在投稿过程中屡屡碰壁。如,1936年汤川秀树写了题为“正电子理论中的密度矩阵”的文章,投稿给美国《物理评论》杂志后不久,他也收到了杂志社寄来的拒稿信。值得庆幸的是,这些被《物理评论》和《自然》杂志拒稿的文章都被《日本数学物理学会纪事》所收录,从而使汤川秀树的介子理论和其他成果得以公之于世。这种对本国科学家重要研究成果保护性支持的做法,值得今天中国的学术界及期刊界借鉴。试想,如果汤川秀树的重要文章在国际、国内均未发表,他成功提出介子理论的事实就很难被学术界认定,进而他可能很难获得1949年的诺贝尔物理奖。然而介子理论至此尚未通过全方位的“考核”。宇宙射线中介子的寿命问题就是一大难题。当时的测量结果表明,安德森和尼德迈耶在宇宙射线中发现的新粒子的平均寿命为 10^{-6} 秒。然而,汤川秀树等人的理论研究结果却与这个实验结果相差甚大。从1937年至1938年,汤川秀树与坂田昌一、武谷三男和小林稔等合作,陆续完成了多篇文章,

其中,在一篇文章中他们估算出介子寿命为 5×10^{-7} 秒,^[18]在另一篇文章介子衰变寿命推进到 1.3×10^{-7} 秒。^[19]理论结果与实验数据的差异依然难以令人接受。

此时,日本介子理论的研究者不再是汤川秀树一人,也不只是他带着几人,而是出现了多个有实力的研究团队。其一是由汤川秀树本人领导的“Kansai”小组,成员有坂田昌一、武谷三男、小林稔、井上健等人;另一个是由朝永振一郎领衔的“Tokyo”小组,主要成员有荒木、渡边、宫岛、小崎等人。这两个小组的研究人员又逐渐融合于由仁科芳雄领导的名称为“Soryushiron-group”的研讨小组,这个小组的宗旨正如坂田昌一回忆所说:“这个小组形成了一种与经典物理学家的圈子完全不同的系统和氛围。我们组织了关于介子理论的定期讨论会,并尝试用多种方法解决介子理论的困难”。^[15]在这些实力派理论物理学家的协作下,介子理论所面对的难题逐一得以解决。其中,在1942年5月13日的一次学术讨论会上,由坂田昌一、谷川安孝和井上健等人提出的“双介子理论”,即解决了介子的寿命问题。“双介子理论”认为,汤川秀树所预言的“重量子”(π介子)会迅速衰变为另一个宇宙射线介子(μ子,即安德森1937年在宇宙射线中发现的粒子)和一个中微子,宇宙射线介子再以比较缓慢的速度衰变为一个电子(或正电子)和两个中微子。由于战争的影响,这一理论直到1946年才得以发表。1947年,美国的马夏克(Robert Marshak)和贝特(Hans Bethe)也独立地提出了“双介子理论”。^[20]1947年5月,英国物理学家鲍威尔(Cecil Powell)和他的团队,在宇宙射线中发现了π介子的存在并证实了“双介子理论”;1948年,在美国首次实现用加速器产生人工π介子;至此,汤川秀树所预言的“重量子”(π介子)才真正得到了实验验证,汤川秀树也因此于次年即获得了诺贝尔物理学奖。

回顾自己这一充满坎坷的历程,汤川秀树曾说:“那些探索未知世界的人是不带地图的旅行者,地图是探索的结果……事后找出捷径并非难事,而困难却在于一边开辟新路一边寻找

目的地”。([1], p.216)这是汤川秀树对自己探索经历的准确概括,也揭示了所有原创性研究的共性特征。

二、非定域场理论与基元域理论: 汤川秀树的其他重要理论贡献

汤川秀树在取得举世瞩目的介子理论成就之后,并未就此停下探索的步伐,而是继续投入到了对基本粒子理论的基础研究。其中他提出的比较重要的思想性理论有两个:1949年提出的“非定域场理论”,1966年提出的“基元域”理论。

早期的基本粒子理论,是建立在基本粒子本身没有确定几何大小即没有物理广延性“点”这一观点之上的。汤川秀树认为如此建立的基本粒子理论,无法避免地将被发散性困难所困扰。([21], p.115)例如,假设粒子的电荷全部集中在一个没有体积、没有面积、没有长度的几何点上,那么在该点附近的电场强度理论上就会是无限大;进一步,电场的能量也因此变为无限大,这就是“发散问题”或“无穷大奇点问题”的简单表现形式。物理学在实验上无法观测无穷大的物理量,在理论上也无法驾驭无穷大的物理量。在汤川秀树看来,这样的理论必须进一步发展、这样的局面必须改变:“如果一种物理理论预言一些可观测测量应该是无穷大,那么这个理论就必然被认为是在根本上有缺陷的”。([14], p.200)汤川秀树思考之后认为,要使基本粒子理论完备,就要从源头做起,从解决基本粒子的广延性问题入手:“考察基本粒子的广延性,是阐明隐藏于基本粒子背后的各种问题的关键”。([21], p.135)

研究的结果是1949年他提出了“非定域场理论”。要理解“非定域场”须先理解“定域场”。所谓“定域场”指的就是由没有空间大小的几何“点”粒子场源所激发的场。因此,汤川秀树要建立的“非定域场理论”的核心在于,作为场源的每个基本粒子都具有自己的几何尺度,即确定的半径、截面积与体积。在这样的粒子模型下,“非定域场理论”一旦成功建立,

发散问题将迎刃而解。与“定域场”中的情形不同,在“非定域场理论”中,质量、自旋、同位旋不同的各种基本粒子被当做一个整体来考虑。按照汤川秀树的设想,相对于基本粒子静止的坐标系,建立描述基本粒子的方程,然后加以推广,即可得到一般情形下的基本粒子方程。如果找不到静止坐标系,就用近似坐标系来类推处理。汤川秀树指出:“因为基本粒子无论以多快速度运动,也超不过光速,所以把上述坐标系进行适当的洛伦兹变换,就可以知道基本粒子的状况,因此方程是可以这样建立的”。([21], p.133)而对于超越光速的粒子,汤川秀树认为:就要“根据由高能现象得来的知识,着眼于以光速以上速度运动的基本粒子来建立方程”。([21], p.134)这就是汤川秀树设想的建立非定域场理论的基本路径。非定域场理论除了能够避免发散问题,还有其他优势,如汤川秀树本人所说:

由于非定域场具有力学的内部自由度,关于基本粒子相互作用的机构,现在已经可以进行深入的研究,这是过去作不到的。……在强相互作用的基本粒子系统中,可以把每个基本粒子都看做是在带电空间各自以适当方式旋转的假想陀螺,它们之间的相互作用决定着它们的旋转方向,由此可以认为,电荷独立性这种对称性是成立的,这种情况在定域场理论中只能说现象本身就是如此,而不能作进一步的说明。([21], p.135)

在提出 π 介子理论之后阶段的研究生涯里,汤川秀树未能与朝永振一郎等再次携手合作,而是与其在研究理念上产生了根本分歧。朝永振一郎不接受给基本粒子赋予广延性的假设,而尝试对量子场论的数学表述加以改造,从而达成与相对论的一致,由此他提出了量子场论的“超多时理论”(supermany-time)。([14], p.200)汤川秀树比较欣赏朝永振一郎的“超多时理论”,也认识到了它的有效性:“利用这个概念,处理奇点问题或发散问题的方法多少有点不同了。发散仍然存在,但是被弄的不那么讨厌了。这就是说,只要处理得正确,发散问题就不会妨碍量子电动力学得出和实验符合得

意外地好的结果”。([14], pp.200-201)朝永振一郎沿着自己的思路出发,最终建立了“重整化理论”,找到了解决量子电动力学中发散困难的有效办法,因而荣获1965年度的诺贝尔物理学奖。

然而汤川秀树对于自己的设想仍然充满希望:“尽管如此,我自己根本没有放弃赋予基本粒子以一种广延性的想法”。([14], p.201)在接下来的进一步推进思想走向深入的过程中,汤川秀树思考问题的基本维度,再一次体现了他一贯的思维特征:从传统文化尤其中国古代的老子庄子哲学出发,到其中去寻求灵感和启发;回顾前辈物理学家此前的相关重要工作,从中寻求具体入手点。在第一个方面,这一次直接给他灵感的是唐代著名诗人李白的诗句:

夫天地者,万物之逆旅也;光阴者,百代之过客也。……探索一下夫天地者万物之逆旅这种说法的现代诠释,我们就可以把四维时空连续域比喻为一种可以容纳天地万物的逆旅。这种观念也许保留了老子庄子哲学的某种精神。([14], pp.207-208)

在科学领域,汤川秀树新思想出于两位科学大师思想启示的结合。第一个启示来自于爱因斯坦的理论:“物质和能量的存在形式决定于时间、空间,反之物质和能量又决定时间、空间的存在形式,这是广义相对论主要思想的重要组成部分”;([21], p.143)第二个启示源自于普朗克能量量子化的概念。在这些思想相互协同的基础上,1966年汤川秀树提出了“基元域”(也译为基本领域)理论,它可以看做是非定域场理论的升级版。基于李白诗句以及爱因斯坦和普朗克思想的启示,汤川秀树产生了建立类似能量的最小量子的“客体”,由它将物质、能量、时间与空间结合起来,这就是基元或基本领域概念。汤川秀树引入“基元域”或基本领域概念的直接目的,依然是加深理解基本粒子,并更详细展示其广延性。一般而言,可大体将一个基本粒子理解成或对应于一个“基元域”。因为基元域具有空间属性即广延性,可以认为所有的基元域一起组成了空

间；因为基本粒子有寿命、有变化，因而它们具有时间属性；而每个基本粒子所携带的质量与能量的总和就是宇宙的质量与能量。在引入基元域概念之后，汤川秀树认为最大的观念变革是极大地改变看待物理场的视角：进一步研究物理场时，“不是引入把场作为空间点的函数并进行量子化而得到算符，而是考虑把场作为基本领域的函数进行量子化。这样一来，用量子力学来描述具有广延性的基本粒子，就是向基本领域的量子场论发展”。（[21]，p.145）1967年之后汤川与片山等人曾将基元域设想为具体的四维椭球体领域而进行了拓展研究。得到的结论是一个椭球体领域这样的基元域由明可夫斯基空间内的三维二次闭曲面所围成，最终需要13个参数来表征。也就是说，如果将基元域而不是过去的基本粒子看做量子力学的研究对象，那么它的状态可以用13个参数为变数的波函数来表示。汤川秀树的基元域思想早于1968年诞生的弦理论，但二者都始于探寻看待基本粒子的新视角。现在研究表明，弦理论至少需要10个维度；而针对一个具体特征的基元域，汤川等人的研究表明，他们需要13个维度。因此，两个理论仅从参量维度的视角相互比较，尚处于伯仲之间。较为遗憾的是，至今笔者尚未发现在汤川等日本物理学家之后，其他物理学家对于汤川秀树基元域思想的关注，这影响了该思想进一步结出硕果。

汤川秀树除在介子理论、非定域场理论和基元域理论等基本粒子领域进行了深入的探索之外，还曾涉足其他科学研究领域。1952年，担任京都大学基础物理研究所第一任所长后，他在核天体物理学、等离子体物理学和生物物理学等新兴科学领域都做出了自己的贡献，从而促进了日本这些领域与学科的快速发展。^[15]1974年末，美国在使用 π 介子治疗癌症方面取得了有希望的结果，汤川得知这一消息后为自己预言的介子有望治疗癌症而倍感兴奋。同时，汤川认为日本也要尽快实现这项研究，并于1975年在京都大学基础物理研究所召集医学及核物理学等领域的专家，对介子医疗研究进行了详细的介绍和讨论，汤川在会上强调：“努

力使科学成果造福于社会是科学家的重要责任”。^[22]可见，汤川秀树在投身物理学研究的同时，也十分关注并十分重视使科学成果促进人类福祉的问题，体现了其作为一名科学家所具有的高度社会责任感。

1965年杨振宁曾从三个层次总结汤川秀树的贡献：

一个是科学层次，在这个层次上，汤川秀树的论文开创了一个新纪元。一个是日本国家的层次，在这个层次上，我们看到，由于汤川秀树的激励，日本在物理学方面的先进研究取得了突飞猛进的发展。另一个是国际层次，在这个层次上，日本的发展为所有正在努力立足于现代世界的人们树立了一个榜样和创造了一种信念。（[13]，p.149）

1986年杨振宁再次高度评价汤川秀树对于日本科技的特殊历史作用：

他激发了日本下一代，再下一代，再下一代的年轻的物理学者对于物理进军的热枕。……我觉得今天日本是一个世界工业大国的事实恐怕与汤川秀树所做的贡献会有密切的关系。（[13]，p.525）

站在日本科技发展史的视角看待汤川秀树，杨振宁先生对他的评价是客观而恰当的。

结 语

在对中国传统哲学颇具好感的世界科学宗师中，汤川秀树独树一帜：他不仅喜欢中国哲学，尤其其中的老子庄子哲学，他还将老子庄子哲学作为自己基本的思想土壤，在其基础上去理解和诠释现代科学概念与思想，并在对老子庄子哲学的不断回味中，培养自己敏锐的科学直觉、提升自己灵动的想像与类比能力，作为自己从事科学研究重要的思想方法。成功后自信的汤川秀树断言，虽然中国古代哲学过去未能直接孕育出科学，但他对中国古代哲学对于未来科学的重要影响充满信心：

当我们考虑到将来时，肯定没有任何理由认为希腊思想应该仍然是科学思想发展的唯一源泉……中国古代哲学家们没有产生纯

科学。这一点到目前为止可能还是真实的。

但是,我们不能认为将来还会这样。([14], p.65)

汤川秀树不仅在世界科学家中,是与中国古代哲学关系最为特殊的,与中国著名的科学家们对本民族传统文化的评价相比,汤川秀树依然是特殊的。有些著名的中国科学家对中国的某些传统文化极为认可,比如杨振宁对中国的儒家文化情有独钟。但是笔者曾论述:“儒家文化对杨振宁的影响主要体现在以何如做人为核心的人生观、道德观方面。……与科学研究并无直接关联”。^[23]笔者曾长期关注其他著名中国与华裔科学家如吴大猷、彭桓武、李政道、丁肇中等等对于中国传统文化与哲学的评价。([24], pp.322-336)笔者发现,他们的基本共识是:“在他们学习近现代科学技术,尤其物理学的过程中,中国传统思想文化既不是有所助益的精神支柱,也不是帮助他们消化和吸收西方物理文化的良药”。([24], pp.336-337)笔者至今未发现与此共识相悖的其他具体案例。因此说,不仅与西方科学宗师相比汤川秀树与中国传统哲学的关系极为特殊,即使与中国或华裔著名科学家们与中国传统哲学的关系相比,汤川秀树依然是特立独行者。

[参考文献]

- [1] 汤川秀树. 旅人: 一个物理学家的回忆 [M]. 周林东 译, 石家庄: 河北科学技术出版社, 2000.
- [2] Brown, L. M. 'Hideki Yukawa and the Meson Theory' [J]. *Physics Today*, 1986, 39(12): 55-62.
- [3] 姚立澄. π 介子理论的提出——记日本物理学家汤川秀树 [J]. 物理, 2001, (7): 441-446.
- [4] Brown, L. M., Abraham, P., Brian, P. 20世纪物理学(第1卷) [M]. 刘寄星 主译, 北京: 科学出版社, 2014, 319.
- [5] 吴去非. 汤川秀树和他的介子理论 [J]. 物理教师, 2003, (7): 41-44.
- [6] 阿布拉罕·派斯. 尼尔斯·玻尔传 [M]. 戈革 译, 北京: 商务印书馆, 2001.
- [7] 小沼通二. 汤川秀树日记: 昭和九年: 中间子论への道 [M]. 东京: 朝日新闻社, 2009, 158.
- [8] Yukawa, H. 'On the Interaction of Elementary Particles I' [J]. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 1935, (17): 48-57.
- [9] Kobayasi, M. 'The Birth of the Yukawa Theory' [J]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1985, (85): 6-8.
- [10] 张民仓、皇甫国庆. β 衰变能量连续谱发现的历史回顾 [J]. 物理, 2004, (5): 378-381.
- [11] 厚宇德. 哪位物理学家首先提出了可观察性原则? [J]. 大学物理, 2016, 35 (10): 61-65.
- [12] 蔡明哲. 介子理论的创立及其启示 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 1987, (3): 115-120.
- [13] 杨振宁. 杨振宁文集 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1998.
- [14] 汤川秀树. 创造力与直觉 [M]. 周林东 译, 石家庄: 河北科学技术出版社, 2000.
- [15] Sakata, S. 'On the Establishment of the Yukawa Theory' [J]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1968, (41): 8-18.
- [16] 汤川秀树. 人类的创造 [M]. 那日苏 译, 石家庄: 河北科学技术出版社, 2002, 256.
- [17] 迪昂. 物理理论的目的与结构 [M]. 张来举 译, 北京: 中国书籍出版社, 1995.
- [18] Yukawa, H. 'On the Interaction of Elementary Particles III' [J]. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 1938, (20): 319-340.
- [19] Yukawa, H. 'On the Interaction of Elementary Particles IV' [J]. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 1938, (20): 720-745.
- [20] 杨建邺、李文清. 介子理论在日本的产生和发展 [J]. 科学技术哲学研究, 1993, (2): 32-38.
- [21] 汤川秀树、片山泰久、福留秀雄. 基本粒子 [M]. 张质贤 译, 北京: 科学出版社, 1975.
- [22] 桑原武夫、井上健、小沼通二. 汤川秀树 [M]. 东京: 日本放送出版协会, 1984, 115.
- [23] 厚宇德、王鑫. 杨振宁论中国传统文化及其对他的影响 [J]. 自然辩证法通讯, 2020, 42 (8): 107-113.
- [24] 厚宇德. 知识、技艺、理念: 传承与反思 [M]. 北京: 金城出版社, 2023.

[责任编辑 王大明 柯遵科]