

量子真空物理 导引

薛晓舟 著



科学出版社
www.sciencep.com

量子真空物理导引

薛晓舟 著

河南师范大学学术专著出版基金资助

科学出版社

北 京

/

内 容 简 介

量子真空物理是研究量子真空的结构、运动规律及其空间、时间特性的科学。本书由浅入深着重阐述了与量子真空有关的基本的物理概念和物理思想,尽量避免过多的数学推演和计算技巧。全书共有9章,内容可以概括为4个方面:首先是真空概念的演变(第一章),其次是量子场论真空(第二、三章),再次为量子引力真空(第四、五、六、七、八章),最后是量子真空的本体诠释(第九章)。

本书可供高等院校物理系高年级本科生、研究生和对物理学基础问题感兴趣的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

量子真空物理导引/薛晓舟著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015214-X

I. 量… II. 薛… III. 量子-真空物理学 IV. 0413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 038672 号

责任编辑:胡 凯/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年8月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:1—1 500 字数:234 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

宇宙和世界万物的本原是什么？其运动的基本规律是怎样的？空间及时间的本性又是如何的？自然界的这些深层奥秘，吸引着人们数千年来不停地探索。对这些问题进行研究，正是现代物理学所肩负的重要任务之一。

物理学是研究物质的结构、运动及相互作用规律和时间空间性质的一门自然科学；而粒子物理和量子场论则更是研究物质的基本结构、运动及相互作用基本规律和时间空间基本特性的量子物理学。人们认为量子场论是粒子物理学的理论基础，量子场是物质的基本形态，粒子是量子场所派生的，即场是第一性的，粒子是第二性的。量子场有基态和激发态的分别；基本粒子的产生是量子场的激发，即量子场处于激发态；基本粒子的湮没则是量子场激发态的消失，即量子场处于基态。当然这里所说的“粒子”产生和湮没，都是指“实粒子”而言，而非指虚粒子。可见从本原的意义上说，基态量子场或量子场基态理论的研究，则是更为原初性的。

基态的量子场我们称为量子真空，而量子场的基态则称为量子真空态。真空和真空态两个概念是不同的，真空是真空态的荷体或载体即承担者，真空态则是真空的状态。这种区分，无论是从真空概念的历史渊源及发展过程来说，还是从真空概念的物理意义明确性、深刻性而言，或是从真空及真空态体用不同侧面来看，都是十分重要的。现今已有的一般量子场论书籍和论文中，所称的“真空”实际上是指“真空态”，即量子场能量最低的状态，这使得古希腊原子论学派关于虚空或真空是世界万物的一种本原的概念，丧失了原来所指的意义。我们认为量子场论所揭示的“真空不空”的深刻含意，主要不在于“真空”是量子场能量最低的状态，而是“真空”本身就是物质的一种特殊形态，甚至说真空是物质的基本形态，所以“真空不空”。

量子真空物理学是研究量子真空即基态量子场的结构、运动及相互作用规律和时间空间特性的量子物理学。粒子物理及量子场论的研究进展，逐步揭示了量子真空物理可能是当今基本物理学一些重大课题的突破口，具有深远的物理意义和哲学意义。不仅如此，目前有关真空操纵技术或真空工程的探讨，已经取得一些重要进展（如光挤压、高能重离子碰撞等），并获得了一定的应用。

自从 20 世纪 70 年代量子规范场论取得重大成功以来，量子真空的研究已经逐渐被人们所重视。李政道在《物理的挑战》一文中认为，真空问题是物理学“21 世纪四大问题”之一。关于量子真空物理的书籍，在国际上出现较早和较多的，则是量子电动力学真空方面的。1985 年有 W. 格赖奈尔 (Greiner) 等三人的《强场量

子电动力学(Quantum Electrodynamics of Strong Fields)》,1994 年有 P. 迈隆尼(Milonni)的《量子真空·量子电动力学导论(The Quantum Vacuum. An Introduction to Quantum Electrodynamics)》,1995 年有 V. 金兹堡(Ginzberg)编辑的《非稳真空量子电动力学(Quantum Electrodynamics with Unstable Vacuum)》等书。探讨量子色动力学真空方面的,1988 年有 E. 休尔雅克(Shuryak)的《量子色动力学真空,强子和超重物质(The QCD Vacuum, Hadrons and Superdense Matter)》,1992 年有 M. 希夫曼(Shifman)编辑的《真空结构和量子色动力学求和规则(Vacuum Structure and QCD Sum Rules)》等书。另外,内容涉及半量子广义相对论真空方面的,1982 年有 N. 比赖尔(Birrell)和 P. 戴维斯(Davies)的《弯曲空间中的量子场论(Quantum Field Theory in Curved Space)》,1994 年黄焕然、周并举、张镇九的《弯曲时空量子场论》等书。但对超引力真空、超弦/M 理论真空的研究,只是散见在有关的一些论文里,还未见到有专著出现。由于量子真空理论内容涉及面广(例如规范场论、圈量子引力理论、超引力、超弦/M 理论、量子宇宙学等),且所用数学较深(例如李群、代数拓扑、流形拓扑等),其中许多领域仍是当代基本物理学研究的前沿阵地,至今国际、国内还没有全面地、系统地介绍量子真空物理的著作。为此,我们根据自己的学术思想及理论框架,编写了这本《量子真空物理导引》的书籍,抛砖引玉,试图对量子真空物理学的内容,初步地加以较全面、较系统地梳理和论述。

全书除前言和后语外,共有九章。由于系“导引”性质,我们侧重在基本物理概念和基本物理思想的阐述,并且由浅到深;尽量不具体涉及繁难的数学演算及技巧,避免过多的数学形式和推演掩盖物理内容和思路走向。当然我们此时要指出的是,物理规律的数学形式及其推演,方程式解的具体形式,常是物理内容和论证的精确化表示,这对于进行未知的物理理论的研究是不可缺少的。

本书第一章是真空概念发展过程,介绍了古希腊自然哲学,经典物理学,量子物理学的真空概念发展简要历史。第二章是量子电动力学真空,着重讨论了关于电磁场真空、电子场真空及电磁真空涨落、真空极化等基本概念,并给出了电荷重正化、质量重正化与真空涨落、真空极化的本质联系。由于这些概念及思想是讨论所有其他诸种真空的样板,所以是极为重要的。第三章是规范场论量子真空,此章同样是十分重要的,这是由于当代量子场论的形式就是规范场论,而规范理论又是弱、电、强和引力作用统一的理论基础。文中论述了量子色动力学真空如瞬子、真空隧通、 θ 真空及真空相变、真空凝聚等,研究了量子味动力学真空如希格斯真空、真空对称破缺等。第四章是半量子广义相对论真空,这是广义相对论和量子力学相统合的半经典-半量子的引力真空。从逻辑框架来看,半经典-半量子引力理论乃是走向完全量子引力理论过渡的作品。第五、六、七章分别讨论圈量子引力真空、超引力真空、超弦/M 理论真空。第八章是量子宇宙学真空,讨论了我们宇宙的创生来源于宇宙量子真空涨落,并定性地介绍了我们宇宙在创生期的膜世界模型

如 R-S 膜世界模型、霍金壳状膜世界模型、S-T 火劫/循环膜世界模型等。第九章是量子真空的本体诠释,本章首先论述了量子真空是物质的基本形态;其次分别讨论了在普朗克标度时,空间度量、时间度量、物质结构的断续性和基元性;再次研究了基本作用规律的量子性及统一性;最后论述了我们宇宙创生于量子真空涨落的论断,这充分说明唯物论自然哲学的正确性。

值得指出,在物理学中真空概念的内涵随着历史的发展而变迁着。按照现代物理学的理解,真空有经典真空和量子真空的分别。本书主要是讨论量子真空问题,为行文方便,有时把量子真空简称真空也常把真空态写成真空。

此外,为了突出在新世纪中基本物理学理论的重要走向,作为量子真空物理探讨的一个侧面,作者特把于 2000 年 10 月 28 日在郑州举行的“全国 21 世纪创新与发展学术研讨会”上所做的《论 21 世纪时间空间观念的量子革命》的报告全文,作为“附录”于书末,以供研究量子真空空间问题参考之用。

在本书的撰写和出版过程中,作者对河南师范大学理论物理研究所所长鲁公儒教授的大力协助,甚为感激;万陵德教授对本书初稿第一、二章,刘自信教授对第二、四章,鲁公儒教授对第三章,曹俊杰博士对第六章,分别做了校对和改进,并提出许多细致且宝贵的意见,作者对此致以衷心的感谢。

量子真空物理的研究正在蓬勃兴起,有许多问题现在还不清楚,需要大力加以探索,才可以进一步深入理解。作者在撰写本书过程中,曾学习和参考过不少有关著作及文献,受益很多,有些内容在本书中已经采用,多数已在参考文献中给出,在此对诸作者深表感谢。但由于自己学识浅,孤陋寡闻,书中所给出的观点和表述,勿庸讳言,会有不少值得商榷之处,恳请不吝指正为荷。

作者

2004 年 8 月 20 日

于河南师范大学理论物理研究所

目 录

前言

第一章 真空概念发展过程	1
1.1 古代自然哲学中的虚空概念	1
1.1.1 古希腊自然哲学中的原子、虚空和以太	1
1.1.2 中国古代自然哲学中的元气和虚空	3
1.2 经典物理学中的以太和真空概念	5
1.2.1 实验寻找技术真空	5
1.2.2 笛卡儿的力学以太	5
1.2.3 牛顿-惠更斯-菲涅耳的光学以太	6
1.2.4 法拉第-麦克斯韦-洛伦兹的电磁以太	7
1.3 相对论中的经典真空概念	8
1.3.1 以太经典理论的困难	9
1.3.2 狭义相对论中的真空和以太	9
1.3.3 广义相对论中的真空概念	10
1.4 量子场论中的量子真空概念	12
1.4.1 20 世纪理论物理学的逻辑框架	13
1.4.2 量子电动力学真空	13
1.4.3 量子味动力学真空	15
1.4.4 量子色动力学真空	16
1.5 量子引力理论中的量子真空概念	17
1.5.1 半量子广义相对论真空	18
1.5.2 圈量子引力真空	18
1.5.3 超引力量子真空	19
1.5.4 超弦/M 理论真空	19
参考文献	20
第二章 量子电动力学真空	21
2.1 电磁场真空	21
2.1.1 电磁场量子化	21
2.1.2 电磁场真空零点振荡	23
2.2 电子场真空	23

2.2.1 狄拉克相对论性电子波方程	24
2.2.2 负能级和狄拉克真空	25
2.2.3 电子场量子化和电子场真空	27
2.2.4 荷电真空和真空衰变	28
2.3 微观电磁作用和真空虚过程	28
2.3.1 微观电磁作用的直观描述	28
2.3.2 量子电磁作用和真空虚过程	29
2.4 量子电动力学真空的基本特性	32
2.4.1 真空涨落	32
2.4.2 真空极化	32
2.5 量子电磁真空作用和重正化问题	33
2.5.1 电荷重正化	34
2.5.2 质量重正化	34
2.5.3 重正化理论简评	35
2.6 量子电动力学真空效应的实验检验	36
2.6.1 氢原子的兰姆能级移动	36
2.6.2 电子反常磁矩	38
2.6.3 卡西米尔效应	38
2.6.4 库仑定律的修正问题	39
2.7 电磁真空操作和光挤压	39
参考文献	40
第三章 规范场论真空	41
3.1 规范场概念	41
3.1.1 定域规范变换	41
3.1.2 什么是规范场	42
3.1.3 规范场概念的推广	43
3.1.4 定域场论和非定域场论	44
3.2 SU(2)规范场真空简并	44
3.2.1 核子强作用和杨-米尔斯规范场	44
3.2.2 非阿贝尔规范场真空描述	45
3.2.3 SU(2)规范场真空态的多重性	46
3.3 瞬子、真空隧通和 θ 真空	48
3.3.1 瞬子概念	48
3.3.2 量子真空隧通:瞬子解的物理意义	49
3.3.3 θ 真空	50

3.4 量子色动力学真空相变和夸克禁闭	51
3.4.1 SU(3)胶子规范场真空	51
3.4.2 稀薄气体近似	51
3.4.3 色磁偶极气体与色磁真空	52
3.4.4 真空相变和色禁闭	53
3.4.5 色电真空和奈克禁闭	53
3.4.6 磁单极真空凝聚和夸克禁闭	54
3.5 量子色动力学真空及其操作	54
3.5.1 相对论重离子碰撞与激发真空	55
3.5.2 激发真空相变的探测	55
3.6 希格斯真空	56
3.6.1 戈德斯通定理和整体规范不变性的自发破缺	56
3.6.2 希格斯真空对称破缺正常真空和反常真空	56
3.6.3 希格斯机制和定域规范不变性的自发破缺	58
3.6.4 希格斯机制的重要意义	59
3.7 弱电统一真空和弱电强大统一真空	59
3.7.1 SU(2)×U(1)弱电统一规范场真空	59
3.7.2 SU(3)×SU(2)×U(1)弱电强统一规范场真空	61
3.7.3 SU(5)弱电强大统一规范场真空	62
3.8 规范场真空研究的重大意义	63
3.8.1 量子统一场论方面	64
3.8.2 现代微分几何方面	64
参考文献	64
第四章 半量子广义相对论真空	66
4.1 量子引力和半量子广义相对论	66
4.1.1 量子引力的多种形式	66
4.1.2 半量子广义相对论基本概念	67
4.1.3 半量子广义相对论研究的意义	68
4.2 广义相对论时空中标量场量子化及其真空态问题	69
4.2.1 广义相对论时空中的标量场方程	69
4.2.2 标量场量子化及其真空态	69
4.2.3 博戈留波夫变换及真空态的不确定性	70
4.2.4 引力场中真空态不确定性问题	71
4.3 绝热真空	73
4.3.1 绝热近似的意义	73

4.3.2 绝热真空态	74
4.4 共形真空	74
4.4.1 共形变换的性质	75
4.4.2 共形平直时空	75
4.4.3 共形真空态	76
4.4.4 玻尔瓦真空、哈特尔-霍金真空和昂鲁真空	77
4.5 伦德勒真空	77
4.5.1 伦德勒契	77
4.5.2 伦德勒真空态	78
4.6 霍金辐射和量子真空	78
4.6.1 广义相对论引力场方程的史瓦西真空解	79
4.6.2 史瓦西奇异性	80
4.6.3 霍金辐射	81
4.6.4 霍金辐射及量子真空	82
4.6.5 黑洞蒸发和信息丢失问题	83
参考文献	84
第五章 圈量子引力真空	85
5.1 圈量子引力研究简况	85
5.1.1 20 世纪 80 年代	86
5.1.2 20 世纪 90 年代	86
5.2 圈量子引力物理成果	87
5.2.1 主要物理成果	87
5.2.2 有待探讨的问题	89
5.3 空间面积和体积的分立性	90
5.3.1 量子几何和自旋网络	90
5.3.2 面积的分立性	91
5.3.3 体积的分立性	91
5.3.4 关于长度量子化问题	92
5.4 时空泡沫、自旋泡沫和真空泡沫	93
5.4.1 时空泡沫	93
5.4.2 自旋泡沫	93
5.4.3 真空泡沫和真空涨落	93
参考文献	94
第六章 超引力真空	95
6.1 超对称代数和超对称量子场论	95

6.1.1 超对称算子和真空态	96
6.1.2 超对称代数和超对称场论	97
6.1.3 超对称代数和中心荷	99
6.2 超对称真空破缺	101
6.2.1 超空间和超场	101
6.2.2 超对称真空破缺问题及外斯-朱米诺模型	103
6.2.3 最小超对称标准模型及软破缺的真空凝聚	104
6.3 现代卡鲁查-克莱因理论	105
6.3.1 外尔规范不变几何	105
6.3.2 正统的卡鲁查-克莱因理论	106
6.3.3 修改的卡鲁查-克莱因理论	110
6.4 11 维超引力真空	111
6.4.1 局域超对称性和引力作用	111
6.4.2 11 维超引力运动方程	114
6.4.3 福里翁德-鲁宾紧致化真空解	115
6.4.4 11 维超引力真空解其他方案	117
6.5 10 维超引力真空	117
6.5.1 $N=1, D=10$ 超引力	118
6.5.2 $N=2, D=10$ 非手征超引力	118
6.5.3 $N=2, D=10$ 手征超引力	119
6.6 超引力理论简评	120
6.6.1 主要优点	120
6.6.2 存在问题	121
参考文献	121
第七章 超弦/M 理论真空	122
7.1 超弦/M 理论研究主要进展	122
7.1.1 20 世纪 80 年代超弦理论	122
7.1.2 20 世纪 90 年代 M 理论	123
7.2 五种超弦理论	124
7.2.1 玻色弦	124
7.2.2 超弦	126
7.2.3 杂化弦	129
7.2.4 五种类型超弦理论及其真空	130
7.3 卡拉比-丘流形及其紧致化	130
7.3.1 卡拉比-丘流形紧致化和真空态	130

7.3.2	$E_8 \times E_8$ 群较 $SO(32)$ 群优越	132
7.4	超弦微扰真空和超弦场论	132
7.4.1	超弦真空和共形场论	132
7.4.2	超弦场论及其真空问题	134
7.5	M 理论非微扰真空	136
7.5.1	T 对偶性	137
7.5.2	S 对偶性	137
7.5.3	M 理论超统一真空	137
7.6	M 理论、量子黑洞和 AdS/CFT 猜测	138
7.6.1	D 膜和快子	139
7.6.2	M 理论对黑洞熵-面积公式的推导	139
7.6.3	AdS/CFT 对偶性	140
7.6.4	全息原理	140
	参考文献	141
第八章	量子宇宙学真空	142
8.1	量子宇宙学的兴起和发展	142
8.1.1	我们宇宙起源和量子宇宙学的兴起	142
8.1.2	量子宇宙学发展简况	143
8.2	旧量子宇宙学和 WDW 方程	144
8.2.1	广义相对论的哈密顿形式	145
8.2.2	惠勒-德韦特动力学方程	145
8.2.3	微超空间模型	146
8.3	新量子宇宙学和宇宙波函数	147
8.3.1	无边界假设	147
8.3.2	隧道边界条件	148
8.3.3	无边界假设和隧穿边界条件的比较	149
8.3.4	宇宙波函数和宇宙量子真空	150
8.4	宇宙量子真空涨落和时空虫洞	150
8.4.1	惠勒-德韦特方程的演化解及虫洞解	150
8.4.2	虫洞和婴儿宇宙	151
8.4.3	虫洞机制在低于普朗克能量物理中的效应	152
8.5	宇宙真空能量和宇宙常数问题	153
8.5.1	老的和新的宇宙学常数疑难所指	153
8.5.2	宇宙学常数的观测检验	153
8.5.3	真空能量密度和宇宙常数	155
8.5.4	宇宙学常数和精质模型	156

8.5.5 宇宙学常数和弦景观真空	156
8.6 宇宙暴胀和标量场真空	157
8.6.1 宇宙暴胀三种方案概述	157
8.6.2 宇宙暴胀的指数函数形式	159
8.6.3 宇宙暴胀和真空相变	161
8.7 超弦/M 理论宇宙学真空	161
8.7.1 兰德尔-桑德拉姆膜世界模型	162
8.7.2 霍金果壳状膜世界模型	162
8.7.3 斯坦哈特-特鲁克火劫/循环膜世界模型	163
参考文献	163
第九章 量子真空的本体诠释	165
9.1 真空是物质的特殊形态	165
9.1.1 形态和状态意义的所指	165
9.1.2 真空是物质的一种特殊形态	165
9.2 空间度量的断续性	166
9.2.1 空间、时间和真空的联系及区别	167
9.2.2 空间度量的断续性	167
9.2.3 空间度量存在着不可分的基本单元	168
9.3 时间度量的断续性	168
9.3.1 时间的 1 维性和单向性	169
9.3.2 时间度量的断续性	169
9.3.3 时间、空间的量子性和经典性的统一	169
9.4 物质基本结构的断续性	170
9.4.1 物质结构基元是存在的	170
9.4.2 物质结构的断续性和连续性的统一	170
9.4.3 物质结构、运动规律和时空特性的相互制约	171
9.5 基本作用规律的量子性及统一性	172
9.5.1 四种作用规律的量子性	172
9.5.2 四种作用规律的量子统一性	172
9.5.3 超弦/M 理论和万物理论	173
9.6 宇宙创生和真空涨落	175
9.6.1 我们宇宙创生和量子真空涨落	175
9.6.2 量子真空和无物理论	176
参考文献	176
附录 论 21 世纪空间时间观念的量子革命	178
后语	184

第一章 真空概念发展过程

真空按其词源本义是虚空,即一无所有的空间。根据量子场论的观点,真空不空,它是基态的量子场,量子场的基态是真空态,量子场是物质的基本形态,真空具有极为丰富的物理内容。人类关于真空实质的认识,经历了数次根本的变革和反复。

1.1 古代自然哲学中的虚空概念

1.1.1 古希腊自然哲学中的原子、虚空和以太

1. 原子论学派的原子和虚空

真空概念源于古希腊原子论。原子论哲学的三个代表人物是留基波、德谟克利特和伊壁鸠鲁。

留基波(Leukippos,约公元前 500~前 400)首创原子论,据说他著有《大宇宙秩序》和《论心》两书,都失传。留基波最初提出原子和虚空的学说,认为原子和虚空是万物的本原,原子是不可再分割的粒子;又提出因果必然性原则,说“没有任何东西是任意的,一切都能说出理由,并遵循必然性”;他还用原子论来解释人的认识,最先提出影像说,他的这些思想为原子唯物论奠定了基础。

德谟克利特(Demokritos,约公元前 460~前 370),原子唯物论的创立者之一,他是留基波的学生。著有《小宇宙秩序》、《论自然》、《论人性》等书,然而也已失传,只存有部分残篇。德谟克利特认为,一切事物的本原是原子和虚空,原子在虚空中做永恒的涡旋运动,各种不同类型的原子集合,组成了各种不同性质的自然元素,从而生成了万事万物。古希腊哲学史家第欧根尼·拉尔修指出:“他的学说是这样,一切事物的本原是原子和虚空,别的说法都只是意见。”

在德谟克利特看来,原子是一种最后的不可分的物质微粒,它的根本属性是绝对的充实性。虚空是疏松的空间,因此是原子做涡旋运动的场所。没有虚空,原子就不能运动。原子是存在,虚空是非存在。但是非存在并不是不存在,非存在指的只是没有充实性,它和存在一样都是实在的。德谟克利特所说的原子有四个主要特征:第一,原子是一种有大小的、坚固的、不可分割的物质微粒。它是永恒的,既不会毁灭,也不会改变。第二,原子在性质上是相同的,在数量上是无限的,在大小上是有区别的。第三,原子在虚空中,永远做不规则的涡旋运动。第四,万千事物都是由原子集合而成的,由于原子排列的形状、次序、位置有所不同,集成成的事物

也就千差万别。

亚里士多德在评述原子论的自然哲学时指出：“留基波和他的伙伴德谟克利特说，充满和虚空是基本元素，他们主张一个是存在者，另一个是非存在者。这就是说，充满和坚实构成存在者，虚空和疏松构成非存在者（因此他们主张存在者并不比非存在者更实在，因为虚空并不比坚实不实在），这两者是一切事物的质料因。”

伊壁鸠鲁（Epikouros，公元前 341～？），少年时代接受了德谟克利特学说的影响，同时也接触了柏拉图和亚里士多德的哲学。他把哲学分为三个部分：物理学，研究自然及其规律；逻辑学，说明认识自然的方法；伦理学，探索幸福的学说。前两部分是工具、方法或手段，后一部分才是人生目的。

伊壁鸠鲁的物理学是德谟克利特原子论的继续和发展。同德谟克利特一样，伊壁鸠鲁也反对柏拉图的“理念论”和亚里士多德关于神是“第一推动者”的理论，认为物质世界是唯一的实在。他在《给赫罗多德的信》中，说明了在以下三点上继承了德谟克利特的原子论思想。第一，宇宙是由形体和虚空所构成。“形体的存在是感觉充分证明了的”，在形体当中，有的是复合物，有的是复合物的元素，即原子。“虚空”是完全空虚的东西，是“不可触的实体”，它为形体提供活动的场所，没有“虚空”，“形体就无处存在”。第二，宇宙是无限的，“因为有限的东西总有一个边界，而边界是靠比较才显示出来的，宇宙既然没有止境，也就必然是无限的”。“所谓宇宙无限”，一是它所包含的形体，二是它包含的虚空无限广。第三，原子是不断运动的，原子在虚空中不断地运动和变化，由它所组成的物体也同样如此，“这些运动都没有开始，因为原子和虚空是永恒的”。

伊壁鸠鲁并没有停止在德谟克利特的水平上，他依据当时自然知识的水平，把原子论创造性地向前发展了一步，并且修正了德谟克利特论述中的某些不足之处。首先，他认为原子除了大小和形状的差别外，还有重量上的区别，此外并没有属于可知觉的东西的任何性质。其次，他坚持了原子是不可分的物质微粒，“并不需要存在着各种各样大小的原子，因为这样就一定会有某些原子顺利地进到我们的眼界之内，成为看得见的，但是从来没有见过这样的事，也不能想像一个原子如何可能变成可见的”，这就克服了德谟克利特的一个自相矛盾的说法，即一方面肯定原子是不可见的和不可分的微粒，另一方面又认为原子形状的大小是无限的，可以有很大的甚至像宇宙一样大的原子。最后，他提出了原子在虚空中运动可以偏离直线的学说，即“伊壁鸠鲁认为原子在虚空中有三种运动。一种运动是直线式的下落；另一种运动起因于原子偏离直线；第三种运动是由于许多原子的相互排斥而引起的。承认第一种和第三种运动是德谟克利特和伊壁鸠鲁共同的；可是承认原子偏离直线这一点上，伊壁鸠鲁和德谟克利特就不同了”。

2. 恩培多克勒、亚里士多德论虚空和以太

以太这个名称在古希腊哲学中已经出现，例如泰利斯（Thales，约公元前 624～

前 547)称“以太是空气的蒸发”,毕达哥拉斯(Pythagoras,约公元前 580~前 500)学派称“气为冷的以太”等。恩培多克勒(Empedokles,公元前 495~前 435)想像物质中含有一种神秘的轻介质,称“以太”组成的小孔。他设想构成世界的这个第五种成分(即在水、火、土、金四根之外)是试图解释许多形式的颗粒状结构时,避免引入空的空空间即虚空的概念,防止形成完全真空,即绝对真空。这实际上便是信仰以太的开端。

斯多噶学派产生于公元前 3 世纪。和原子论学派相反,他们认为一切物质都是连续体,宇宙是由弥漫着的“元气”——火和空气的一种弹性混合物——充盈着,但这并不意味着根本不可能存在空空空间即虚空。这些所谓的“元气”物质组成一个有限的连续体的岛屿,但座落在一个无限的空间中。由于他们所称的“元气”是空间充满着无所不在的流体,这恰是后人称为以太的先驱。

亚里士多德(Aristotles,公元前 384~前 322)是古希腊著名的哲学家、知识渊博的学者。他的学术思想对西方文化的发展产生了巨大的影响。在文艺复兴之前,他对真空的观点,一直得到普遍的流行。他舍弃了真空的空空间(即绝对空)存在的可能性。他不像原子论者主张,认为真空存在于我们的世界中,而是认为宇宙在体积上是有限的,包含着已经存在的万物,充满着物质的连续体;连续的介质以太是静态的、被动的、永远静止的。亚里士多德在其《物理学》中称“地在水中,水在空气中,空气在以太中,以太在宇宙中”。

1.1.2 中国古代自然哲学中的元气和虚空

中国古代自然哲学用以表示物质存在的基本范畴是气或元气。气的原意系指气体状态的存在物,即一种极细微的物质是构成世界万物的本原。元气是指产生和构成天地万物的原始的气或指阴阳二气混沌未分的实体。在中国哲学史上,气和元气的概念有一个演变的过程。

1. 先秦时期

气的概念最早见于西周末年的伯阳父(约公元前 7 世纪)的言论。《国语·周语》记载:幽王二年,西周山川皆震。伯阳父说:“夫天地之气,不失其序,若过其序,民乱之也,阳伏而不能生,阴迫而不能蒸,于是有地震。”在这里天地之气的根本内容是阴阳二气。《管子》还提出精气的概念,《内业篇》说:“精也者,气之精者也。”它认为精气是一种最精细的物质。《庄子》中《大宗师》讲“游乎天地之一气”,承认天地间充满着气;《知北游》肯定人和万物都是气聚结成的,都是一气的变化,称“人之生,气之聚也,聚则为生,散则是死”,“通天下—气耳”。《荀子·王制》论万物的类别中称:“水火有气而无生,草木有生而无知,禽兽有知而无义。人有气,有生,有知而有义,故最为天下贵也。”即认为万物各有特点,但都有气,气是各种物类的基本。由此可知,气非无而是有,气非形而是形之本,气是构成一切有形之物、有生之物的

原始材料,是生和死的基础,是世界的本原。

《管子》、《庄子》、《荀子》中皆称气,但没有“元气”一词。《鹖冠子》的《泰录篇》说:“故天地成于元气,万物乘于天地。”鹖冠子相传为战国时期楚国隐士,具有道家思想,姓名不详,居深山,用鹖羽为冠,因以为号,其著作有《鹖冠子》。

2. 汉唐时代

在汉代,气也是自然哲学中的重要概念,而且认为气生于虚无,并多处论述元气。《淮南子·天文训》论述世界生成时说“道始于虚廓,虚廓生宇宙,宇宙生气,气有涯垠,清阳者薄靡而为天,重浊者凝滞而为地。”它认为气从虚廓而来,虚廓非气,天地由气演化而成。其中“宇宙生气”句,《太平御览》卷一中引作“宇宙生元气”。汉代纬书中多次讲元气,《太平御览》引《河图》说“元气无形,汹汹蒙蒙,偃者为地,伏者为天也”。又引《礼统》说“天地者,元气之所生,万物之祖也”。汉代著述中所讲的“元气”大多认为是构成万物的原初物质。《易纬》中的《乾凿度》认为宇宙的演化图式是“夫有形生于无形,则乾坤安从生?故曰:有太易、有太和、有太素也。夫易者未见气也,太初者气之始也,太始者形之始也,太素者质之始也”。此中“太易”理解为虚无寂静的状态,未始有气,它和《淮南子》一样,认为气是形之本,而气又本于虚空,虚空非气。王充在《论衡》中说:“天地合气,万物自生”。《论衡·谈天》:“元气未分,浑沌为一”;又《言毒》:“万物之中,皆禀元气”。杨泉,三国时吴国人,在其《物理论》一书中说:“夫天,元气也,皓然而已,无他物焉。”指出了元气是构成万物的基元物质,天空只是充满元气的空间。

唐代柳宗元在《天对》中,认为天地在开辟以前,唯有元气:“庞昧革化,唯元气存”,强调元气之重要。

3. 宋明时期

到宋代,气的概念又有发展,很少人提及元气。张载肯定一切存在都是气。他在《正蒙·乾称》说:“凡可状皆有也,凡有皆象也,凡象皆气也。”他改变了《淮南子》虚空非气之说,提出“太虚即气”、“虚空即气”的学说。把“虚”和“气”统一起来,肯定气是最后的根本。他说:“气之聚散于太虚,犹冰凝释于水,知太虚即气,则无无”;又说:“知虚空即气,则有无、隐显、神化、性命通一无二。”他认为无形的虚空是气散而未聚的状态,无是有的一种状态,虚空并非一无所有。

明代王廷相发挥了张载的学说,强调元气为世界的唯一实体。他说:“余尝谓天、地、水、火、万物皆以元气而化,盖由元气本体具有此种,故能化生出天、地、水、火万物。”(《内台集》卷四)“天地未判,元气浑沌,清虚无间,造化之元机也。有虚即有气,虚不离气,气不离虚,无所始无所终之妙也。……二象感化,群象显设,天地万物之所由生也,非实体乎。”(《慎言·道体篇》)他指出:“元气之外无太极,阴阳之外无气。以元气之上不可意象求,故曰太极;以天地万物未形,浑沦冲虚,不可以名义别,故曰元气。”(《王氏家藏集》卷三十三)