

研究意识问题的物理学途径*

汪云九^{1,2,†} 周昌乐²

(1 中国科学院生物物理研究所脑和认知国家重点实验室 北京 100101)

(2 厦门大学人工智能研究所 厦门 361005)

摘要 文章介绍了物理学理论和技术在研究意识问题中的应用进展。首先列出意识活动的一些主要特性,其次介绍新的仪器技术在确定意识的脑功能定位上的研究成果。最后介绍物理学的理论(特别是量子理论)在解释意识的机制上的作用,介绍信息理论在意识复杂性计算方面的应用。

关键词 意识问题,功能定位,微管和量子理论,意识复杂性计算

Physical approaches to the study of consciousness

WANG Yun-Jiu^{1,2,†} ZHOU Chang-Le²

(1 *Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *Xiamen University, Artificial Intelligence Institute, Xiamen 361005, China*)

Abstract Various physical approaches, both theoretical and technological, to the study of consciousness are reviewed briefly. The main characteristics for describing consciousness are first summarized, then recent research results using new physical methods for locating the areas of conscious activity in the brain are presented. Finally, certain theoretical hypotheses from physics, especially quantum theory, for exploring the mechanism of consciousness in the brain are described. The use of information theory to compute the complexity of consciousness is also discussed.

Keywords consciousness problem, functional location, microtubule and quantum theory, computation of consciousness complexity

1 引言

意识是精神世界中基本的内容之一,也是与人们日常生活息息相关的问题。但是,意识是什么?它如何从大脑中产生?……这些问题一直困扰着世上的智者。意识问题历来是心理学家、哲学家乃至宗教学家谈论的内容,也是至今尚未阐明的难题之一。西方科学家擅长于自然科学的研究,强调研究工作的客观性和可重复性,而意识问题恰恰牵涉到主观感觉和不可预测性,所以,意识问题是自文艺复兴以来西方自然科学尚未认真研究过的问题之一。

20 世纪物理学取得长足进步,相对论和量子力

学的诞生,对认识宏观和微观世界取得前所未有的成果。但是,这些认识仅仅限于客观的物理世界。上世纪 90 年代,意识问题的研究走到世界科学研究舞台的中心,作为成熟科学的物理学,利用其先进的仪器技术和严密、深奥的理论方法,加盟于意识问题的研究,取得一些重要成果。本文就此研究方向作一些简单介绍。

* 国家高科技研究发展计划(批准号 2006AA012129)资助项目
2007-03-23 收到初稿 2007-05-22 收到修改稿

† 通讯联系人. Email yjwang@sun5.ibp.ac.cn

2 意识活动的特点

在意识问题的研究史上,我们认为可分为两个阶段,其时间分割点是上世纪90年代。在此之前,意识问题是心理学、哲学认识论的研究对象,而且由于意识问题的主观性以及实验技术的欠缺,研究方法只能使用内省法(心理学中使用的一种方法,通过被试者的主诉体验来分析得到结果),理论方法是思辨的(用语言概念来论证结果),所以,对于意识问题的研究停留在初级阶段。意识问题研究的第二阶段,是以《惊人的假设》一书(作者为诺贝尔奖获得者 Crick F,1994年出版)的发表为标志,以自然科学(物理学、神经科学、脑科学、计算机科学等)的参与和介入为特征,形成一个空前规模的研究热潮。至今已在视觉觉知等方面取得一些实质性进展。

意识问题研究在进入第二阶段的时候,有过一段争论,意识是什么?意识的定义是什么?等等。这种纯思辨式的争论,各持己见,没有多少进展,最后,学术界基本上同意诺贝尔奖获得者 Edelman 的观点:“让我们列出它的一些性质来开始研究意识的工作吧!”Crick 和 Koch 也认为:“由于早熟的定义有着各种危险性,我们不想给意识本身下定义。”关于意识的特性,美国心理学之父 James W 曾经有过概括(1)意识是个人的(2)意识永远变化着;(3)意识是连续的(4)意识有选择性。以上四点是意识的宏观特性,学界基本上都同意这一观点。

Crick 在《惊人的假设》一书中,提到意识至少包括两个基本内容:一是意识与注意有密切关系;二是意识牵涉到记忆,特别是工作记忆。许多事例表明,人的意识并非与整个大脑的所有部位有关。

Edelman 和 Crick 是意识的自然科学研究热潮中的两位领军人物。Edelman 年龄较轻,著作较多,他们两人在世纪之交,分别在国际顶尖刊物上轮流发表论文,总结意识研究的进展和发表自己的观点。Edelman 在《自然意识:一种理论框架》一文中,强调意识的整合性(integration)和分化性(differentiation)。所谓整合性就是意识是脑在清醒状态下各部分联合活动的结果,不可能再分割为独立的片断;所谓分化性就是意识活动的内容的“节目单”极为丰富,如:谈天、骑车、看电视、听课等等。而在某一时刻,意识仅取这个大节目单中之一个来实现。

在意识的特性方面,汪云九等于2001年另外补

充一条,称为“适度性”。他们根据不同意识状态下脑内神经活动的剧烈程度,认为只有处于适当程度的神经活动时,意识才处于清醒状态。他们据此提出一种测量意识的方法。

只有对意识的特性有了基本的了解之后,才能开展进一步的理论研究。

3 意识的脑定位研究

人脑的许多功能,如视、听、运动等,都能在大脑部位找到相应的处理和控制中心,称为脑的功能定位。加拿大医生 Penfield 绘制的皮层功能图,是每本神经科学和心理学教科书中必备的图式。自然,人们在研究意识问题时,也会提出意识在大脑皮层中的定位问题¹⁾。

最早,分析脑外伤或手术切除患者的行为来推断意识的脑定位问题,上世纪末,PET(正电子发射断层技术),fMRI(功能性磁共振扫描技术)乃至TMS(经颅磁刺激技术)等先进的物理手段的应用,为意识的脑定位研究提供大量可靠的实验资料。而且这些实验技术大都可以在人体处于清醒状态下进行,也就是意识处于清醒状态下进行,被试者可以进行各种心理操作,而且可主诉主观体验过程,从而为意识的功能定位研究开辟了一条全新的道路。下面我们分两个方面来介绍这方面的主要进展。

3.1 自由意志和意识的脑中枢

Crick²⁾在研究“自由意志”(free will)的脑定位时,做出一些基本假设:第一个假设是人脑的某部位与制订进一步行动计划有关,但不一定在这个部位执行它。人可以意识到这个计划,至少可以直接回忆起来。第二个假设是人不能意识到这一部分脑区所执行的“计算”过程,而只知道它做出最终决定,也就是计划。第三个假设是执行这个计划或那个计划的决定受到同样的限制(部位,特性)。当时,Crick 看到“异手症”患者的一些报道,所谓异手

1) 在意识的自然科学方面,近年来国际上流行一个名词,即“意识的神经相关物”(neural correlates of consciousness, NCC),它想了解意识产生的神经部位、活动方式、编码情况等等可见可测的内容。意识的脑定位也是这方面的内容之一。

2) Crick 是20世纪三大基础理论(相对论、量子力学和DNA双螺旋结构)的提出者之一。他在《惊人的假设》一书中提出意识的还原论观点,号召用自然科学的办法来研究意识问题,并选择视觉系统作为研究意识问题的突破口,因此该书被认为是揭示意识问题科学研究的序幕。

症患者是脑部受伤后,患者不能对自己的行为负责,例如,患者想放下手中的物品,却无法控制手的行为去放下物品。患者的整个行为非常被动,生活没有目的,神情淡漠,对外部世界没有兴趣,对自己的内部精神世界也没有波澜起伏。分析这些患者的损伤区是在“前扣带回”区(Brodman 24 区附近)(图 1)。因此, Crick 认为前扣带回区是人的自由意志的发源地。该区在人脑中的位置很特殊,它位于前上顶叶的内表面上,它既与感觉系统的高级中枢相靠近,与运动皮层的高级部分相邻,又与额叶相距不远,因此,是“自由意志”(意图、行为和感知的综合体)的理想所在。

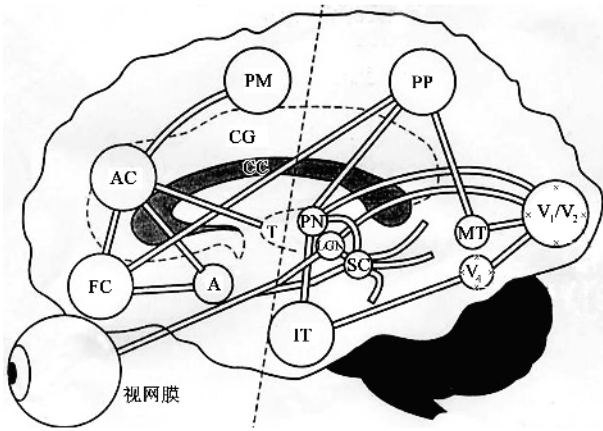


图 1 人脑的侧视图(图中英文标出的位置均为皮层下结构,其中 AC 是前扣带回部位, A 为杏仁核, CC 为胼胝体, CG 为扣带回, FC 为前皮质, IT 为前颞复合体, LGN 侧膝体, MT 为中颞叶, PN 为枕叶核, PP 为后顶复合体, SC 为上丘, T 为丘脑, V₁, V₂, V₄ 分别为视皮层 1 2 4 区)

Edelman 也认为,并非整个大脑的所有各区都参与意识活动,对意识活动起主要作用的系统是丘脑——皮层系统。神经生理学告诉我们,丘脑的上行纤维,对大脑的活动起唤醒作用。这里的丘脑特指丘脑层间核、网状核和前脑的底部,统称为“网状激活系统”,这部位的神经元弥散性地投射到丘脑和大脑皮层,它的功能是激活丘脑——皮层系统,使整个皮层处于兴奋状态。正常人或处于清醒状态,或处于睡眠状态。现代神经学又把睡眠状态分为快速眼动期(REM)和慢波睡眠期(SWS)。实验表明,在这三种不同意识状态下,网状结构的神经元呈现不同的活动状态。神经递质的研究表明,网状结构内存在不同的递质能系统,例如,胆碱能系统、去甲肾上腺素系统、多巴胺系统等。对照病理学观察,发现昏迷状态、癫痫状态、脑干死亡状态等情况下,这些递质能系统有不同的功能表现。

我国学者罗跃嘉等设计心理实验,让被试者进行猜谜和脑子急转弯式的顿悟,用 fMRI 和脑电技术测试大脑的活动,发现顿悟时前扣带回区有强烈的活动,印证了 Crick 的观点。也有其他一些实验(使用 fMRI, PET 等),证明前扣带回区在意识活动中的重要作用。

3.2 视觉觉知的实验

Crick 认为人是视觉动物,在各种器官之中视觉起主要作用,另外,神经科学在视觉研究中取得的成果最为丰富,因此, Crick 建议把视觉觉知作为研究意识问题的突破口。近年来,在研究视觉觉知问题上,使用电生理实验技术和 PET、fMRI、TMS 技术,取得许多重大成果。下面简单叙述主要成果。

电生理技术是上世纪 20 年代发明的一种技术,可直接记录神经细胞的电活动,当然最初使用的是电子管放大器。最初生物物理学把电生理作为重要内容之一。现在可以记录到神经纤维上单个离子通道的活动。用电生理实验技术研究视觉觉知问题时,设计一种实验,称为“双眼竞争”实验。进行这种实验时,给被试者的左右眼观看两张不同的图形(图 2),例如右眼观看水平条纹,左眼观看垂直条纹,被试者头脑中只会出现二者之一的感觉,不可能是两者的重合。因为电生理技术需要把电极插入颅内视觉系统的不同层次上,有一定的破坏性,所以让猴子来做被试者,给猴子的左右两眼观看二张不同的图形,它也会感知到头脑中一会儿浮现左边图形,另一会儿出现右边图形,交替感知。猴子不会主诉它的观感,但它可以用动作来表达,事先训练它看到左边图形(例如水平图形)时,拉动左边杆子,看到右边图形(例如垂直图形)时拉动右边杆子,作对了给以一滴桔子水奖励。猴子很善于学习,在进行双眼竞争实验时,一会儿拉动左杆,过一会儿又拉动右杆,表明它一会看到水平条纹,一会儿看到垂直条纹。做实验时同时记录下视觉系统各部位上神经元反应活动, Logothetis 发现(见表 1),随着视觉系统层次的提高,与视觉觉知有关的神经元数量增加很多。表明随着加工层次的提高,参与视觉觉知的神经元比例越高。

表 1 视觉系统各层次上神经元活动与视觉觉知的关系*

| 视觉通路 | V ₁ 区 V ₂ 区 | V ₃ 区 | V ₃ 区 MT 区 | 下颞叶 |
|-------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------|-----|
| 与觉知有关的神经元比例 | 10 | 40 | 43 | 90 |

* V 代表视觉皮层,下标代表视觉皮层各区, MT 为视觉运动皮层

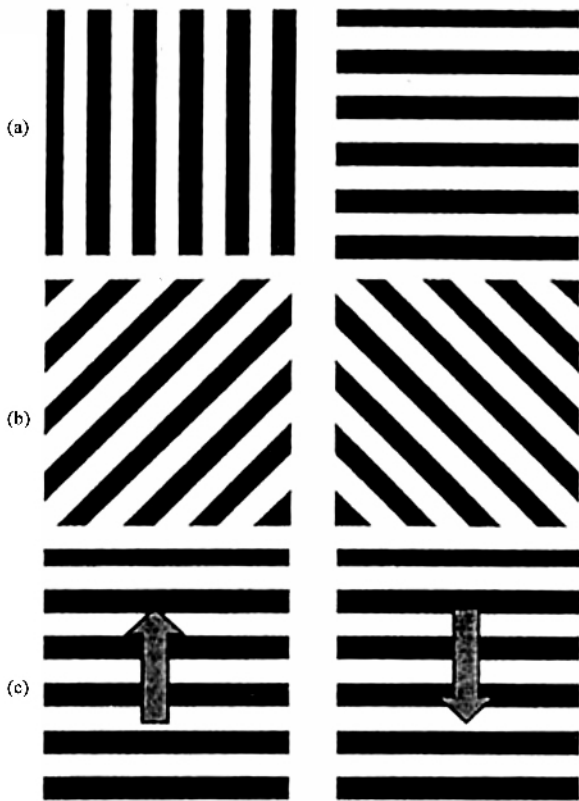


图2 双眼竞争实验 (图中(a)(b)(c)为三组双眼竞争图对,在进行这项实验时,在被试者眼前呈现出其中之一一种图时,例如图(a)中左眼看到的是垂直条纹,右眼看到的是水平条纹。这一要求,可用简单的物理手段实现)

视觉研究中还有一种有趣现象,称为“盲视”(blindsight),患者的枕叶(视觉的初级中枢)受损,声称看不见任何东西,但是叫患者在堆满家具的屋内行走,他不会碰到障碍物。叫他信把信封投入信箱内,他可以准确地完成任务。因此断定枕叶是视觉觉知的必需的部位。但是这种患者人数很少,不能进行很多的实验观察。TMS技术的发明,可以在颅内某部位上产生强磁场,从而可以暂时中止或激发这一部位的神经细胞的活动,产生“光幻觉”(phosphenes),根据刺激部位的差别和产生不同性质环境的关系,可以推断视觉功能与神经部位的关系。TMS技术可以不必进行开颅手术,掌握好磁刺激强度又不会损伤人体健康,所以是一种相当优良的实验方法。TMS实验发现,刺激枕叶可产生短暂的盲视现象。刺激MT区可产生运动的幻觉,刺激人的颞叶皮层可产生梦一样的人物、场景和对象的视觉感知。

总之,现代物理手段(EEG, PET, fMRI, TMS等)的发明和应用,配合动物实验和人的心理实验,以及

脑受损患者的病例,使得我们对视觉觉知过程的认识有了重大的进展。

4 物理学为意识研究提供理论武器

物理学作为成熟学科,既有实验研究又有理论总结。但是,以往物理学仅在物质世界的探索中取得丰硕成果。物质世界也是西方自然科学驰骋的领域。意识问题本质上是精神世界的问题,现在物理学也开始在这新领域内发挥作用。本节简单介绍意识研究中量子理论和复杂性计算的应用情况。

4.1 意识的量子理论

量子理论的内容已经超出人们日常生活经验的范围,只能依靠人的理性思维来理解,测不准原理表明人的观测(干预)引起波包塌缩,在这种情况下,纯粹的“客观”实验已不存在,主观和客观在这过程中交汇在一起。总之,量子论的提出,“习惯上把世界分成主体和客体,内心世界与外部世界,肉体与灵魂,这种分法已不恰当了”(Bohm D)¹⁾。正是因为量子论这一特性,可以使得它介入人的意识的理论研究。

上世纪80年代开始,用神经网络理论作为一种模型来解释人脑的认知过程,成为一种研究动向,推动了神经网络计算机的发展。另一方面,可以把神经网络的活动考虑为一种时空神经信息波的变化过程,用波函数描述时空信息的变化,因此可以很自然地把量子理论中一套方法应用到这方面的研究工作中来,可以从神经网络的活动层面上说明意识过程许多特性。由于这一方面的研究过于复杂和抽象,有兴趣的读者可参阅有关文献。我们在本节中仅介绍Hameroff和Penrose的意识的量子理论,因为他们提出的理论观点,有具体的生物学上的对应物,比较容易理解和讨论。

Penrose是著名的数理科学家,曾提出一种覆盖全平面的镶嵌图案和宇宙起源的黑洞理论而为学界所知,他对人工智能和意识问题也发表过专著。Hameroff是美国的一位麻醉学家。他们发现麻醉药

1) 《The Age of Spiritual Machines》一书的作者Kurweil R也表达类似的观点,他写道:“因此到了20世纪,西方科学转向东方哲学。宇宙茫茫,高深莫测,致使西方的客观论(基本上认为意识来源于物质)和东方的主观论(基本上主张物质产生于意识)能够和平共处,形成另一种二元论。显然,物质、能量和意识这三者是难分难解的。”

的作用机理很是玄妙,例如:氯仿、醚、氟烷、异氟烷乃至氙气都可以作为麻醉药,而它们之间的化学结构大相径庭。麻醉药的剂量决定意识的状态。如果化学结构不是引起麻醉作用的主要因素,那么什么东西在麻醉过程中起作用呢?他们认为可能是分子之间的范德瓦尔斯力(van der Waals force),它是一种电双极矩力。而这种力发生在神经细胞内的微管(microtubule)结构上,干涉了微管的功能,因而使意识丧失,起到麻醉作用。

微管是细胞骨架之一种,按一般看法,细胞骨架起支撑作用。在低等动物,例如纤毛虫,细胞骨架推动纤毛使它能在水中游动。后来发现细胞骨架还能传送物质,起营养作用。微管是一条条细长的中空的管子,直径25nm,管壁由13行tubulin(微管蛋白)的二聚物组成(图3),它们排列成六角形,形成管状。Tubulin二聚物可在两种构型中变动,因此可以在两种构型的量子叠加中进行运算。微管又细又长,在神经细胞中可以从胞体一直延伸到轴突的末端,因此可以考虑为传递信息的载体。来自树突的微管可以把信息传到轴丘处,影响神经脉冲的发放。而神经细胞之间的信息,则由间隙联结(gap junction)联结起来,形成一个合胞体(syncytium),像一个超级神经元那样活动。细胞间隙大约4nm宽,形成量子通道,这量子通道由一种特殊的细胞外细胞器(被称为“树突层状体”)组成,它实际上是细胞膜包裹起来的线粒体。神经细胞的量子信息状态是通过这种方式连结起来的。

Penrose和Hameroff提出的意识的量子模型,称为Orchestrated Objective Reduction(ORCH OR)(客观还原交响)模型,这个模型的生物物理基础就是神经元中的微管。ORCH OR模型可以解释意识的许多性质,首先,它可说明“绑定”(binding)问题,即个别特性如何组合为一个整体性问题,ORCH OR模型用量子相干态来解释它。其次,非局域的量子纠缠可以作为联想记忆的可能基础。第三,信息的量子叠加可以提供前意识和潜意识以及梦和觉醒状态的基础。最后,量子态的塌缩可以作为从前意识向意识状态转换的物理机制。

从物理学角度考虑,意识的量子理论尚有一些问题存在。首先,量子计算必须在极端低温条件下进行,与环境有个隔离区,以防止热噪声干扰(去相干作用)。第二,个别神经元中的量子态如何跨越细胞膜而达到相当大范围,使得许多个神经元同步活动。这些问题都是可以讨论和研究的。

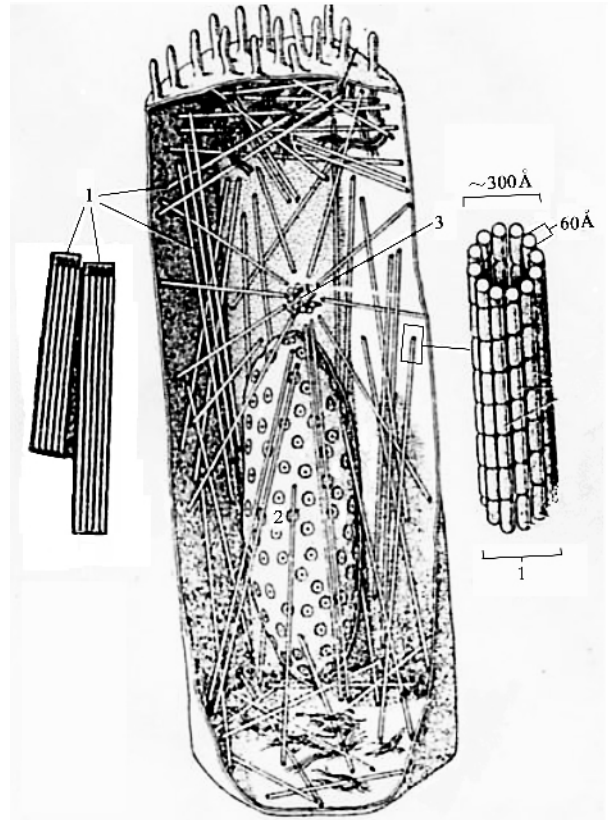


图3 一个典型的细胞结构图和它内部的微管(图中1是微管,2是细胞核,3是中心体。右侧绘出微管的详细结构和大小)

意识的量子论是物理学理论试图进入精神世界研究的一个尝试,使人开阔了视野,增加了新的思路。但是,学界对这种尝试一开始就有不同看法。因为细胞骨架和微管也存在于体细胞和极低等的动物身上,因此,有人批评说:难道你的脚趾头上和变形虫也有意识吗?一般认为意识是高等动物才有的现象,它们的神经系统进化到一定程度才涌现出的性能,因此,用量子论来解释意识问题,还原到的层次太低。本文作者认为,在一个问题还未解释之前,不要事先设定哪个观点和理论是对还是错,应当鼓励新思路、新观点的提出,通过实验和讨论来鉴别它们。

4.2 意识的测量

意识是一种主观体验,能不能进行客观测量呢?须知,测量和重复实验是西方科学的二大法宝。能够测量意识的程度,至少对于外科大夫进行手术有用处,因为可以根据它来控制麻醉药的剂量。

2000年,Edelman和Tononi在他们的书中给出意识复杂性的一个定量测定。他们的测量方法首先引入一个概念叫功能簇(function cluster),所谓神经

系统中的功能簇是指这个系统中的一个亚集,在某段时间内,这个亚集中的单元之间有很强相互作用。设神经系统中神经元组成集合 Z ,取其中 k 个神经元组成亚集 Z^k ,其中的 j 个亚集为 Z_j^k ,它的补集为 $Z - Z_j^k$ 。亚集与系统其余部分的相互作用,可用互信息来表达,互信息 MI 为

$MI(Z_j^k, Z - Z_j^k) = H(Z_j^k) + H(Z - Z_j^k) - H(Z)$, 式中 H 为熵。上式表达了 Z_j^k 的熵与其补集 $Z - Z_j^k$ 熵的关联程度。同时,定义亚集 Z_j^k 的整体信息 $K(Z_j^k)$ 为

$$K(Z_j^k) = \sum_{i=1}^n H(Z_i) - H(Z_j^k).$$

再定义功能簇的指标 $CK(Z_j^k)$ 为

$$CK(Z_j^k) = K(Z_j^k) / MI(Z_j^k, Z - Z_j^k).$$

上式定义的功能簇指标是亚集的统计独立性与亚集及余集统计独立性之比。依照这个定义,一个远大于 1 的功能簇指标,表明这里有一个功能聚类,其内部各元素之间相互作用很强,而与其余亚集之间的相互作用相当弱。

于是可以定义神经复杂性 $C_N(Z)$ 为

$$C_N(Z) = \sum_{i=1}^{n/2} MI(Z_j^k, Z - Z_j^k),$$

其中 Σ 是对各子集求和, $\bar{}$ 是平均数。于是神经复杂性成为每一个亚集与其余集的互信息的平均和,它反映了系统的状态数。

为了说明神经复杂度公式的合理性,Edelman 在他们的书中举出一个理想化系统来说明,限于篇幅本文不再列举,有兴趣的读者可参阅原文或译作。上述神经复杂度的计算公式在实际应用时计算量是相当大的,特别当 n (神经元个数)相当大时。而比较高等动物的神经系统中神经元数目以千万计。

2001 年,汪云九等考虑到意识清醒时,脑内电活动处于适当程度,而处于昏迷、休克等状态时,脑电活动是底下状态,当狂躁、癫痫时,脑内神经系统处于大规模全局同步的高兴奋状态,但脑处于无意识状态,于是设想把脑内活动程度作为横坐标,通过正态变换变成意识状态(纵坐标),这样脑内电活动的适当程度可以达到意识清醒的较大值,而脑电活动的低下或亢奋,经正态变换后只能得到意识状态的低位(无意识状态)。这个计算方法原则上可以

解释意识的不同状态与脑内电活动的关系。

上述介绍两种计算意识状态的方法,仅适用于理想的小系统。实际的和临床应用还需要想出一些更为实用的办法。

5 结束语

20 世纪人类在认识物质世界的道路上取得重大进展,其中物理科学起着带头作用。20 世纪 90 年代,学界开始用自然科学的办法试图探索精神世界的核心问题——意识问题。物理科学不仅提供先进的实验技术(PET, fMRI, TMS 等),为探明意识的脑机制提供新的切实有效的方法,而且物理学的理论观点,为解释意识本质提供了新的思路。不论将来这种解释成立与否,这是跨越物质世界和精神世界的划时代的一步,是在人类的认识史上值得留下一笔,同时,作者也相信,物理学在开拓新疆域的同时,也会发展壮大自身。

参 考 文 献

- [1] Crick F H. The Astonishing Hypothesis. New York, 1994(中译本:汪云九等译. 惊人的假说. 长沙:湖南科技出版社, 1998)
- [2] 汪云九, 杨玉芳等著. 意识与大脑. 北京:人民出版社, 2003 [Wang Y J, Yang Y F et al. Consciousness and Brain. Beijing: People's Publishing House, 2003(in Chinese)]
- [3] Edelman G M, Tononi G. A Universe of Consciousness. Basic Books, 2000(中译本:颀凡及译. 意识的宇宙. 上海:上海科学技术出版社, 2004)
- [4] Penrose R. Shadows of the Mind. Oxford: Oxford Univ. Press, 1994
- [5] 周昌乐. 心脑计算举要. 北京:清华大学出版社, 2003 [Zhou C L. Introduction to Mental Computation. Beijing: Qinghua University Publishing House, 2003(in Chinese)]
- [6] Woolf N J, Hameroff S R. A Quantum Approach to Visual Consciousness. TICS. 5: 472—478. 2001
- [7] 汪云九等. 科学通报, 2001, 46: 1140 [Wang Y J et al. Chinese Science Bulletin, 2001, 46: 1140(in Chinese)]
- [8] Tong F. Nature Reviews Neuroscience, 2003, 4: 219
- [9] Crick F H, Koch C. A Framework for Consciousness. Nature Reviews Neuroscience, 2003, 6: 119
- [10] Edelman G M. Naturalizing Consciousness: A theoretical framework. DNAS. 100: 5520—5524. 2003