

README

Last updated: 2024.12.23

README

基本信息

Topic of series

Information

推送内容

标题 (EP01)

引语

开场白

一、某科学与关于某的科学

二、哲学已死，生命为何？

三、人是万物的尺度

四、纷繁中寻找秩序

下集预告

基本信息

Topic of series

带电流体界面输运的复杂流体力学

Information

署名：轻舟

【不必放在推送里】

写作用时 75 min

修改用时 135 min

推送内容

标题 (EP01)

纷繁流动中的秩序：An Intro to 复杂流体力学

引语

“真正的简约不是删繁就简，而是在纷繁中建立秩序。”

--

人生苦短，而读博往往苦于不知止（咋整才能毕业啊

--

既然科技写作掉头发，那就漱空整点科普随笔吧（这下真毕不了业了 x

开场白

大家好，我是轻舟。本系列专栏的主题是**带电流体界面输运的复杂流体力学**，兼顾科学史、人物小传、科研选题、交叉学科研究等内容。

内容上受课题组讨论启发，将主要结合某次演讲内容展开，同时也涉及个人阅读、思考和研究经历。

风格上随心而动，整体偏重物理、科学、哲学的现实思辨，权当日常绞尽脑汁写论文之余的头脑体操。

这里特别感谢好友 Tony 此前的平台支持（见[阅读原文](#)），此处转载之余也做了些许修改。

那么现在，计时，开始！

插播一些声明

- 保证月更、偶尔可能双周更，预计连载半年左右
- 为提高效率、每次限时写作，挂一漏万、也难免成为复读机
- 如有事实谬误或不成熟观点，欢迎留言批评建议，督促笔者进步 :~)

本文是电耦合流体力学系列的第一篇，将结合其所属复杂流体力学复杂之处的讨论，突出其独特视角和挑战。具体而言，将先从哲学-科学发展的角度看看这门学问的诞生缘起和可能要面对的终极问题 [第一-二部分]，然后简要梳理历史上已有哪些探索 [第三部分]，举例说明它是什么（复杂机理有啥）、不是什么（“简明流动”有啥）。最后，概述**本系列文章的关注重点——带电流体界面输运的复杂流体力学** [第四部分]。

本文字数 4.8 k 左右，预计用时 3.5 分钟

一、某科学与关于某的科学

俗话说，21 世纪是生命科学的世纪。

想起最近在某平台听的一讲座视频，老师提到至少在生命科学领域，选对体系在某种意义上比熟练使用技术和提出好问题本身更加关键。大致意思是，技术（方法）是具体门槛，问题（视角）是得以飞行的引擎，体系（对象）则是选择造飞机这件事本身。

由此观之，所谓复杂流体力学的体系是啥？问题视角和技术方法如何？

如果一定要大言不惭地给出一个说明，所谓**复杂流体力学**（complex hydrodynamics）关注物理空间或相空间中**复杂流体系统集体激发模式的动力学演化**特征，其基于微观粒子动力学描述（还原论观点）与宏观有效场描述（涌现论观点）相结合的视角，并采用跨尺度建模与模拟并可能需要结合机器学习和数据驱动方法开展研究（没错，大饼很大）。

正所谓，“解放思想，实事求是”。从科学发展的一般角度看，在与自然互动的思辨需求和经济社会发展的现实需求引领（此时仍是关于某的科学）下，新体系的不同视角和方法逐渐诱导出了不同风格的学派，由此造成了历史上的学科分野（此时已成为了某科学）。作为一个新学科概念，其提出通常来源于新需求新体系的诱导，其通常以**对已有学科的反思和继承**作为出发点，以**拓展原有学科的边界并最终**以新的**面貌融入和重塑原有学科**作为最终结果。这里提出的所谓复杂流体力学的概念也不例外。

如果做一个类比，这里“复杂流体”力学和流体力学的差别，有点类似“关于生命”的科学和生命科学的差别。即，相比于研究范式相对定型的后者而言，前者在作为独立学科发展上更加不成熟。具体而言，前者在研究对象上不断拓展到未知领域，而在研究视角和方法上亟待新的发展，这种**在纷繁中建立秩序的可能性**也正是其迷人之处。当然，笔者关注它的最直接原因当然是，曾经被先后两个相关课题“折磨”到以至于必须起个名字纪念一下 (x)。

二、哲学已死，生命为何？

复杂系统，听上去还是很玄乎。这里举一些为人熟知（但可能难以准确定义或理解）的体系和概念，如神经网络（情绪和思维）、人体系统（“经络”和现代医药）、社会网络（政治和经济），这些都属于典型的巨复杂系统。

然而，心灵、人体和社会这类系统的学问，能否称之为科学仍然存在不少争论。但从科学主义的激进观点看，正如霍金在《大设计》中所言，“哲学已死”，“物理学家已接过高擎的火炬”。然而，这种“依赖模型的实在论”真的是人们通过理性想要寻求的万物理论吗？

专栏：科学和哲学的历史演变

回到科学的源头，亚里士多德时代科学和哲学还仍是思辨的科学，伽利略时代通过定量化和实验验证形成了现代科学，从此其与传统的哲学思辨便逐渐分道扬镳。伽利略对科学研究对象的一个重要区分是“两个物性”理论，即科学只研究第一物性，即那些不受人的主观判断影响的物理世界，从而将以心灵世界的第二物性排除在外。

--

随后几百年的历史见证了科学和技术的飞速发展，这极大地丰富了人类认识和改造世界的话语和手段。然而与此同时，人的自我指涉、科学家的主体性和技术的自主性也使得心灵所处的第二物性领域不断被剥夺。

--

实际上，随着物理学家研究兴趣的日益广泛，人的感觉甚至情绪和思维都已经逐渐被物理学范式所影响，并一步步被纳入了科学的研究范畴。活性软物质物理、神经科学、医学和药学、社会科学等领域的涌现，不断说明着这一点，尽管其被物理学范式所改造的程度有各种差别。

何处栖居心灵？如何理解人体和社会？**抑郁症、癌症、社会剧变**，科学和技术目前对其认知和改造的能力大多十分有限。从辩证的角度看，矛盾是永恒的。认识论层面的自然和人生的思辨哲学，方法论层面的技术和生活的现实哲学，这两对矛盾本身似乎就是难以逾越的鸿沟。人正是在其交叠地带漫步，去感受和放置这些矛盾的边界，这大概也是生而为人所必需直面和履行的使命罢。

不过，人类的理性是无比贪婪的，思辨哲学的对立统一和后现代主义的解构终究**无法阻止科学家和工程师们高歌猛进的脚步**（当然现实的哲学还是可以在很大程度上阻止的，甚至让其从存在的根本意义上被解构）。从乐观的科学主义者的角度，我们不妨假定这些矛盾有被定量解释和经验验证的可能。但上述思辨告诉我们，即便将其作为可研究的对象，这些系统的特性也可能与第一物性存在本质差别。

我们不妨猜测，对于心灵、人体、社会这类系统，基于微观模型的还原论只能给出其描述，要想进一步理解，需要研究其在宏观模式上表现出的涌现性质。这种思路也正是复杂流体力学的立足点所在。当然，**认识和改造世界需要一步一个脚印**，我们提这些复杂巨系统只是为了说明复杂流体力学的特征，而科学研究还是要从客观物理世界做起。

三、人是万物的尺度

除了上述生命系统，当然还有相对容易研究的、更接近客观世界的复杂系统退化案例。下面试着概述典型复杂系统相关的重要理论。

专栏：典型复杂系统的重要理论概述

1950s · 钱学森 · 物理力学

...

由于时代需要，**物理力学** (physical mechanics) 在早期的研究对象为高温高压气体、稠密液体和固体新材料在非理想状态下的热物性，近年来将微纳尺度界面输运体系作为**微纳界面力学** (micro-nano interface mechanics) 纳入了物理力学的范畴。理论层面，早期采用系综观点处理包含巨量微观状态的复杂动力系统的统计平均性质，近年来采用多组分多物理体系的相场理论描述微纳尺度非平衡输运过程。技术层面，其早期的理论处理手法基本继承了平衡态统计力学的经典流程从而仅限于局部平衡态的处理，近年来广泛采用相场理论数值求解和分子动力学模拟方法研究复杂材料体系微纳尺度的平衡性质和非平衡输运机理。

1970s · 普利高津 · 非平衡热力学

...

非平衡热力学 (non-equilibrium thermodynamics) 的研究对象为在理论物理/化学/生物学等领域广泛存在的远离平衡态的非平衡定态过程，例如碘钟反应、固体材料相变、植物叶片排列、生物指纹形成、种群动力学等问题。非平衡热力学采取了以唯象热力学为主的涌现论观点，与 Onsager 互易原理的不可逆热力学一脉相承，进一步发展了远离平衡态的非线性过程的稳定性理论，并提出了耗散结构和自组织等理论，能够对反应扩散动力系统模式演化的数值模拟结果给出定性解释。后来，普利高津创办了期刊 *Advances in Chemical Physics* 为代表，主要基于统计物理观点处理经典/量子系统的平衡性质和非平衡输运行为，不妨称之为**化学物理学** (chemical physics)，其广泛采用了统计物理为主的还原论观点，与宏观涌现论观点形成了观点互补。

1990s · 德热纳 · 软物质科学

...

软物质科学 (soft matter physics) 的研究对象为聚合物、胶体、表面活性剂、液晶、乳液、泡沫、颗粒体系等含有内部自由度且易流动的软物质，覆盖了粒子动力学、扩散和渗透、流动和变形等多种非平衡输运现象，其中流体状态体系又称为**复杂流体** (complex fluids，又可称为 soft flowing matter physics)。理论层面，这一概念是在德热纳的诺奖演说中着重提出，通常作为凝聚态物质中与“硬”晶体的对应物，因此其既与基于周期性调制波动性的固体物理具有完全不同的特征，又广泛采用凝聚态物理中还原论和涌现论相结合并体系对称性破缺的一般观点。技术层面，与固体输运基于准粒子的低能有效描述不同，软物质体系通常表现为基于多体关联粒子描述的强非平衡输运行为，早期采用统计物理理论计算与实验研究相结合的手段开展研究。近年来，随着计算硬件的性能提升和机器学习领域的复兴，粒子类数值模拟实验和数据驱动的研究手段也逐渐得到重视。

2010s · 很多人 · 电耦合流体力学

...

电耦合流体力学 (electromechanical fluid mechanics) 的研究对象为介电液体、液态金属、电解质溶液、气态等离子体、固体粘性电子等体系的非平衡输运现象，如等离子体放电和磁约束、电解质溶液导电和界面流动、固体电子粘性流动等。近年来，随着实验和模拟技术的发展以及新兴工程需求的出现，相关领域陆续涌现或被再发现。这方面的研究方兴未艾，这里举两个例子。

--

一是研究固体电子粘性输运行为和宏观守恒量描述的**电子流体力学** (electron hydrodynamics)。其基于量子 Wigner 方程、玻尔兹曼输运方程和宏观电子动量守恒方程等模型开展理论和模拟研究，能够半定量地解释低维材料在特定温度范围内的极小电导率、电子涡和负磁阻等效应。

--

二是研究不混溶电解质溶液界面的溶质离子-溶剂分子流体背景耦合输运的**电动多相流体力学** (electrokinetic multiphase hydrodynamics)。其基于界面离子分布粒子描述、相场方程扩散类描述、守恒量边界连接宏观描述、有效边界条件渐近匹配描述等开展理论和模拟研究，液滴电泳的定量建模仍很不完善。

人是万物的尺度。流体力学采用从宏观无穷小微观无限大的守恒场量看待世界，聚焦巨量微观状态的局部统计平均性质，特别关注物理场空间模式的微观机理和演化行为。上述研究涵盖了非理想气体/液体/固体、广义反应扩散体系、可流动软物质、带电流体体系等广泛体系，其共同特征是**流体体系内部含有额外的强关联自由度**，一般具有以**多物理-非线性-强关联特质**为基础的**多尺度特征**。这些特质和特征为其引入了“复杂度”，为其从宏观物理场演化角度的完整理解和定量描述预测带来了困难。

为简明起见，与“简单”流动和“经典”流体力学相对应地，不妨将**这类对象的研究统称为复杂流体力学**。

专栏：复杂流动和复杂流体

在高等流体力学课程中，通常会提到三类复杂流动，即复杂本构、复杂边界和复杂工况，这通常是现实中和工程中更为常见的情形，因此往往具有重要的实践意义。这里的所谓复杂，是相对简单流动而言的；后者通常对应于牛顿流体本构、无滑移固定边界、低雷诺数不可压流动的情形。

--

从研究对象上来看，复杂流体可大致对应于复杂本构的情形，即内部存在具有多物理、非线性、强关联特征的额外自由度，需要对相应自由度提控制方程。

--

不过，经典流体力学对复杂流体的传统研究通常限于宏观尺度，其表达为偏微分方程组定解问题，因此其很容易退化为微分动力系统的数学求解研究。**复杂流体力学**则突出了多尺度特征和跨尺度建模模拟视角，其**更接近物理力学而非数学/工程力学**。

--

这里举几例说明所谓复杂机理的可能来源。**子结构**，例如可流动软物质物理、多孔介质渗流输运等；**奇异界面**，例如物理化学流体力学、电耦合流体力学等；**多过程**，例如电子流体力学、声子流体力学等。

环顾上述已有理论，各学科领域的差异主要体现在学科的出发点不同（与什么学科相对应地被提出），而在**研究对象、视角、方法上均呈现出相互融合**的特点。具体而言，研究对象上呈现出不断扩张且与越来越多学科交叉的特征（包括体系组成、物理性质和物理过程），研究视角上则呈现出涌现论与还原论相结合但更偏重涌现论的特点（简单体系多从微观到宏观、复杂体系则多从宏观到微观），研究方法上则逐渐从理论与实验研究过渡到数据统计研究（后者典型代表是粒子模拟和机器学习）。尽管上面学科领域的“饼”的界限愈发模糊，但其发展历程为勾勒**复杂流体力学的特征**提供了参考。实际上，这些复杂系统的共性使得针对特定体系建立描述和预测手段，有望为解决一大类广泛问题的处理提供启发。

也可以注意到，借助实验和计算技术的提升，**人类现实地扩大了自身的有效尺度**。通过微纳表征和粒子模拟，越来越多的复杂物质体系被人类从微观角度纳入了其理解世界的范畴，但这也不知不觉拉大了相关领域内科学与技术的鸿沟。为了**跨越流体物质领域的这类鸿沟**，完整理解和定量预测其非平衡输运过程，需要从宏观物理场演化的角度把握现实中的多尺度体系，此时有必要采用跨尺度建模与模拟甚至结合机器学习和数据驱动方法，同时解析微观粒子作用机制并构建宏观有效描述。在一定程度上，这也是**复杂流体力学的使命所在**。

四、纷繁中寻找秩序

本系列文章将主要关注带电流体界面输运的复杂流体力学，并试图为其给出一种可能的较为统一的理解模式。

这类体系的一大特点是**静电相互作用的存在**，此时给出合理的有效描述至关重要，这涉及到如何“解耦”的问题。另一大特点则是**微纳尺度的界面输运**，构建描述时往往是“有效”容易、“合理”难，这涉及到挖掘涌现性质的还原论基础问题。

当然，理解归理解，idea is cheap，能踏实实现才是真本事。因此，系列文章也将简要讨论相关的技术性问题，权当启发。

Challenge I: Two typical correlated systems



Electrolytes in solutions

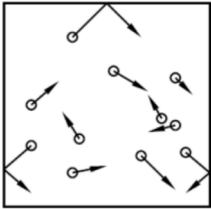
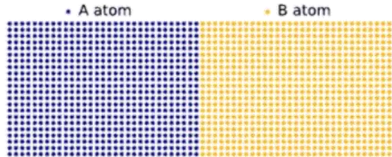
- Nature
 - ✓ **dissolved**
 - hydrodynamic
 - chemical
- Correlation
 - ✓ steric
 - ✓ **electrostatic**
 - ✓ flow-induced

Electrons in solids

- Nature
 - ✓ **fermion statistics**
 - ✓ **lattice regulation**
 - ✓ wave nature
- Correlation
 - ✓ coherent
 - ✓ **electro-** (e, l)²
 - ✓ magneto- (\uparrow, \downarrow)



Familiar ones: rarefied gas transport (molecule)



WHY diffusion decomposition of

ion transport in solution still stands?

- ☐ Advection
- ☐ Diffusion
- ☐ **Electro-migration**

WHY particle kinetic description of

electron transport still stands?

- ☐ **Excitation**
- ☐ Propagation
- ☐ **Scattering**

Challenge II: From familiar to unfamiliar ones

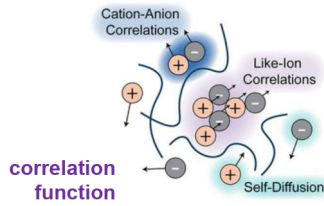


Electrolytes around interfaces

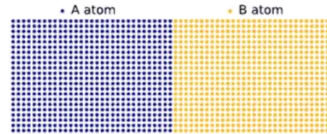
Quantums in solids

From **bulk, solid** to **liquid** interface

- | | |
|--------------------|------------------------|
| ➤ Nature | ➤ Correlation |
| ✓ dissolved | ✓ steric |
| • hydrodynamic | ✓ electrostatic |
| • chemical | ✓ flow-induced |

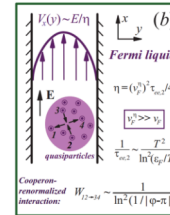


Familiar ones – I : nature and transport behavior of electrolytes in solution and electrons in solid



From **phonon** to **electron**

- | | |
|-----------------------------|--|
| ➤ Nature | ➤ Correlation |
| ✓ boson/fermion | ✓ coherent |
| ✓ lattice regulation | ✓ electro- (e, f) ² |
| ✓ wave nature | ✓ magneto- (\uparrow, \downarrow) |



quasi-particle picture

Familiar ones – II : transport of electrolyte transport at solid interface & phonon transport in solid

WHETHER kinetic description of **ion transport at solid interface** still stands?

- ❑ **Nature of interface/phases**
- ❑ **Adsorption kinetics**
- ❑ **Ion transport dynamics**

WHETHER kinetic description of **phonon transport** still stands?

- ❑ **Total no. conservation**
- ❑ **Frequency domain width**
- ❑ **Inter-quasi-particle scattering**

page12

下集预告

一地鸡毛中，也可能映照出社会的长程序。

多年寒窗后，迈向的将是人生的下一座围城。

面对新的问题，到底从何处入手？

拙见分享，敬请期待！

Contents

- **From simple to complicated: find connections and differences**
 - **“Where to start ... with something new”**
 - “Decouple” charge correlation: learn from TWO figures
 - Personal experience A: Electrolyte transport at interfaces
 - Personal experience B: Transport of correlated electron systems
- **Complex hydrodynamics as X-paradigm: What, Why, How, and Which?**
 - Example: Emergence of quantum hydrodynamics
 - New physics: “More SCALES at INTERFACE is Different”
 - Hallmark: Merging kinetic behaviors into hydrodynamics