

从密集分子到成群的鸟儿,物理学家正在探索一种叫做“主动物质”的系统,希望能找到生物世界的基本理论——

主动物质研究或能揭示生物机制

本报记者 常丽君 综合外电

2012年,美国马萨诸塞州布兰德斯大学物理学家佐尼莫·多吉克和学生把微管蛋白和驱动蛋白加入油中混合,形成一种悬浮液滴,再加入三磷酸腺苷(ATP)。微管蛋白是构成细胞骨架的一部分,形状如细丝;驱动蛋白是沿着这些细丝移动的一种马达蛋白质,就像火车跑在铁轨上;而三磷酸腺苷是推动火车的燃料。

研究团队发现,这些分子能自己组织成更大的图案,在油滴中旋转。成束的微管由驱动蛋白连接,移动聚拢在一起,创造了一种新型液晶。这种液晶与标准液晶显示器不同,标准液晶显示器中的分子是在电场作用下被动地形成图案,而新液晶分子是自行推进,从周围环境中获取能量,主动形成图案;成千上万个个体独立运动所产生的集体行为,让它们自然形成了某种图案。

自然界这样的例子还很多,如一致飞行的鸟群,它们之中并没有领导者。实验室造出的例子也越来越,不只微管这样的生物材料,还有人造材料如微米级的光敏塑料球等。

这种有系统的特征,物理学家称之为主动物质(Active matter)。过去几年中,主动物质研究成了一项重要课题。

解释生命秘密尚需时日

研究人员希望,这项工作能让他们在已建立百年之久的统计力学基础上,得出一个关于主动物质的完整的定量理论。统计力学理论解释了原子、分子的运动如何产生了日常所见到的现象,如热、温度和压力等。而主动物质理论将走得更远,为至今还很神秘的生物过程,如细胞是如何运动的、怎样形成和维持自身形状、怎样分裂等等,提供一个数学框架。印度塔塔基础研究跨学科研究中心主管斯里莱姆·拉马斯沃米说:“我们想得到一个关于活物质的力学和统计理论,就像我们研究无生命粒子的集合所得到的那种理论。”

但要实现这一宏愿,还需要时间。研究人员刚开始对实验室里的主动物质取得控制权,即使最热心的支持者也承认,还没人构造出一种能描述从细胞部件到鸟类所有这些行为理论。即使真的有这样的理论,也非主流生物学家认为有价值的。美国耶鲁大学纽黑文分校分子生物物理学家乔纳森·霍华德说,对生物学家而言,“活物质是主动的”是如此显而易见,其中根本就没有更多道理。

主动物质让人联想到自组装人造组织、自泵液流设备和新型仿生材料。但研究人员也承认,这些想法还远未实现。德国慕尼黑理工大学物理学家安德烈斯·鲍斯奇认为,目前主动物质领域对应而言还太早,接下来会发生什么他们还无法预见,但这一领域确实需要有人来研究。

科学界坚持不懈的研究

众所周知,所有生命形式的基础是自推进个体结合在一起,产生了更大结构和运动。如果没有这一点,生物将被限制在更缓慢、被动的运动过程中(如DNA和蛋白质在细胞或组织中的扩散式运动),生命的诸多复杂结构和功能或许永远无法进化出来。几十年来,生物学家和物理学家一直在猜测,活物质中究竟有没有一些普适的原理。但对细胞活动的研究集中在识别成群结队的分子上,而不是寻找它们自组织的原理。因此直到上世纪90年代中期,主动物质研究才算真正起步。

早期最有影响的一个实验室由原美国普林斯顿大学生物物理学家斯坦尼斯拉斯·雷布勒带领,他的团队证明了在供给ATP作为能量的条件下,微管和蛋白质能自行组装成复杂的类生命结构。上世纪90年代初,匈牙利罗兰大学理论生物物理学家塔马斯·维塞克开发出一个颇有影响的主动物质模型,被称为“运动版的海森堡模型”。当时维塞克试图研究鸟群、细菌菌落和细胞骨架的整体运动,他意识到当时这方面还没有管用的理论。他在德国物理学家

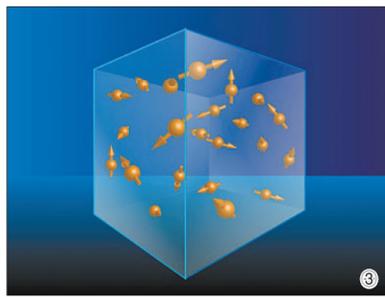
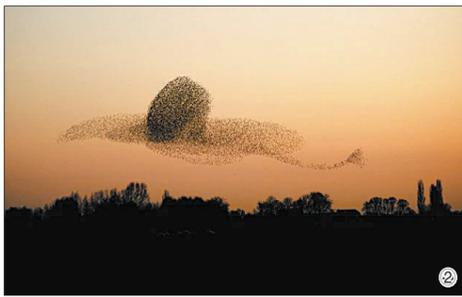
科学家们已有确凿的证据证明,暗物质的确存在,且其在宇宙中的数量是普通物质的5倍多。但暗物质是“何方神圣”、“性格如何”一直是未解之谜。中山大学天文与空间科学研究院院长李淼曾撰文称,天文学家对暗物质的“共识”是,暗物质的主要成分是不参与电磁相互作用的粒子,这些粒子统称弱相互作用重粒子(WIMPs)。

1998年,来自意大利的DAMA协作组表示,找到了暗物质存在的关键证据——弱相互作用重粒子,但其他研究并未发现,因此,很难对其进行证实或证伪。现在,英国《自然》杂志网站报道,来自韩国、意大利、西班牙和澳大利亚的四台探测器将携手对此研究结论进行证实。此项联合实验领导者、美国普林斯顿大学的弗兰克·卡拉普赫说:“在未来三年内,新研究结论或许能让这一切尘埃落定。”

WIMPs未被其他实验发现

DAMA实验位于意大利中部地底下的格兰萨索国家实验室,科学家们以总重约250公斤的25个超纯碘化钠晶体进行实验。科学家们认为,弱相互作用重粒子很少与其他粒子相互作用,因此很难被发现。不过,它偶尔会与地球上的原子“狭路相逢”,如果这一切在探测器内发生的话,DAMA内的碘化钠晶体应该会产生一道闪光。

1998年,DAMA通过碘化钠晶体每天产生的闪光



图①②成群的鸟同时行动,能形成不同的图案。

图③智能集群:自推进粒子之间一种简单的相互作用模型,能逼真地模拟鸟群、鱼群、细胞中自组装蛋白质、其他形式的主动物质的运动。在低密度时,运动形式随机。当个体周围只有较少邻居相伴时,不会形成明显的图案。个体移动的方向,是邻居头部方向的矢量平均。在高密度时,形成鸟群似的群体运动。随着密度增加,群体运动变得同步化。

维尔纳·海森堡1928年提出的一个磁性材料模型中找到了自己的出发点。海森堡把每个原子设想为一个自由旋转的磁棒,当这些原子磁棒间由于相互作用使得它们排列得比较整齐时,会出现较大的磁性。

为了解释主动物质,维塞克用移动“箭头”代替小磁体,表示有一定速度的粒子,粒子速度为周围粒子的平均速度(有一定的随机误差),这形成了现在所知的维塞克群集模型。他的模拟表明,当很多箭头挤在一个足够狭小的空间时,它们就开始以类似于鸟群、鱼群那样的形式运动。目前这一模型论文已被大量引用。

俄勒冈大学的约翰·托纳认为,维塞克的群集箭头还可以作为一种连续流体的模型。他把这一标准模型用在了流体力学中,描述液体在各种容器中的流动,从茶壶到海洋,他还把单个粒子所用的能量也考虑进去,对模型做了改进。从本质上,托纳的流体模型和维塞克的离散粒子模型对多种广泛的现象提出了同样预测,也开创了一个新的领域——主动物质模拟。

此后模拟主动物质的实验突飞猛进,但还有一个问题。法国里昂高等师范学院物理学家丹尼斯·巴托罗说:“定量实验的数量保持不变,几乎接近于零。”因为这种实验难度极大,没人能控制一个包含1万只鸟或1万条鱼的实验。而且在微观方面,当时既熟知物理期刊上的理论研究,又掌握提纯细胞成分所需的实

验室技术的科学家少之又少。

直到2000年后期,理论和实验才开始走到一起。博斯奇实验室是最早进行定量实验的科学团队之一。他和同事把肌动蛋白和肌球蛋白混合在一起,肌动蛋白也是一种细丝状的细胞骨架成分,肌球蛋白是行驶在肌动蛋白丝上的一种分子马达,会让肌肉收缩。他们还在混合物中加了肌球蛋白的天然燃料ATP,然后把混合物放在显微镜下面观察。博斯奇说:“我们没有做任何事,仅仅是把这些材料加在一起。”

在浓度较低时,肌动蛋白细丝四处漂游着,看不出什么秩序。当浓度较高时,它们形成了有规律的丛集,漩涡和带状。这正是维塞克和另一位科学家预测过的过渡阶段,博斯奇和同事立即识别了出来,并对这一阶段做了定量研究。他们在2010年发表了论文,让主动物质实验这一领域火了起来。

随后是多吉克2012年所做的微管实验,用了另一种马达蛋白质——驱动蛋白。这种模式更复杂,比博斯奇的实验运动性更强;流动的微管看起来就像运动的指纹。多吉克团队还注意到,液体中有序的排列偶尔会被打破,产生“瑕疵”缺口,这种不连续图案就像像冰在南北极的经线。这些缺口是动态的,旋转运动,就像能自我推进的粒子。

当时还没有理论能解释这种行为。到了2014年,多吉克和博斯奇团队、纽约锡拉丘兹大学物理学家克

里斯蒂娜·玛彻蒂联合,共同阐述了一种围绕球状旋转的主动液晶的性质,其依据正是这种运动缺陷,而不是单个的晶体元素。研究团队还进一步发现,他们能通过改变泡泡的直径和表面张力来调节缺口的运动,由此提出了一种控制主动晶体的可行方法。

主动物质商业应用尚遥远

多吉克团队正在向主动物质应用目标努力。他们想通过研究微管和蛋白质在狭小的多纳圈形容器中的自然流动,为开发“自泵流”奠定基础。自泵流是一种微流设备,其中液体分子能自己沿着设备管道运动,微流装置在实验生物学、医学和工业中已经越来越普及。

但任何工业应用都要克服至少一个主要障碍。目前,主动物质实验中所用的生物材料需要提纯,这一过程既昂贵又耗时。多吉克实验中所用的微管来自牛脑,博斯奇用的肌动蛋白来自兔子肌肉,而且它们在实验室的寿命很短。博斯奇认为,在找到廉价、稳定且现成的活性物质原料之前,实现商业化是不可能的。

主动物质材料的合成研究也一直在进步。2013年,纽约大学物理学家保罗·柴金和同事描述了如何制作“赤铁矿”粒子,这是一种氧化铁矿物,包含在球形的高分子聚合物中。当科学家把这些“微泳器”放在

过氧化氢溶液中,用蓝光照射,发生的化学反应让这些粒子自发地运动起来,聚集又分散,就像鸡尾酒会上的人群。

2013年,巴托罗和同事报道了一种较大规模的流体,只是把简单的塑料球放在导电溶液中。当研究人员打开电场时,小球开始随机旋转。当密度足够大时,小球和周围的球相互作用,开始自发地按相同方向滚动,就像一群鸟。

这种实验室造的材料还很原始,但只是相对于细胞花了40亿年进化才产生的材料而言。多吉克指出,在把能量转化为运动方面,他用的驱动蛋白比任何人造马达的效率要高得多。谈到短期收益平衡,巴托罗也很快变得气馁,他的旋转塑料球还不针对任何特定的应用。

主动物质或能揭示生物机制

但主动物质能激起这么多科学家的兴趣,不止在于它可能的应用,还在于它非常像最复杂的自组织系统:活生物。多吉克和同事在他们2011年的论文中称,他们在显微镜下看到,微管束固定在气泡的一端,以一种同步的、波动模式跳动,这种神秘现象让人想起某些细胞表面的纤毛和鞭毛。次年,他们又发表论文指出,微管液体流动和细胞质流动之间有着惊人的相似,在细胞质流动过程中,细胞骨架细丝结合在一起,搅动细胞内的成分,就像“一台巨大的洗衣机”。

马萨诸塞大学阿姆赫斯特分校物理学家詹姆斯·罗斯认为,实验室准备的主动物质和活生物之间的相似性似乎很神秘。她曾把微管—驱动蛋白系统的视频给细胞生物学家看,连他们都被愚弄了。

但霍华德警告说,有些东西看起来表现得像活的生物,但它们并不遵循同样法则。多吉克团队造出了某种东西,它们在外观和行为上都很像纤毛或鞭毛,但实际上,它们的作用原理可能完全不同。

为了检验主动物质理论能否揭示生物机制,美国哈佛大学生物物理学家丹尼尔·尼德曼研究了纺锤丝,这是一种以微管为基础的结构,在细胞分裂时控制着染色体的分离。他想检验早期理论和实验提出的一种观点:只靠短程微管—驱动蛋白相互作用,足以产生类似纺锤丝的结构。他首先用了精密的显微镜来检查从青蛙卵细胞中提取的物质,定量确定了纺锤丝形成过程中微管的密度、方向和压力。

随后,尼德曼把他的检测和主动物质如何自组织的模型结合。在2014年,他和德国马克斯·普朗克分子细胞生物与遗传学研究所生物学家詹姆斯·布鲁格斯合作发表了论文,称他们的实验与理论相符,他们观察了稠密微管之间的相互作用,足以产生纺锤丝并稳定地维持这种结构。

其他研究人员正在用来自主动物质的观点去检测,在组织生长、伤口愈合、肿瘤传播等过程中,大量的细胞是如何组织的。玛彻蒂和马克斯·普朗克复杂系统生物学研究所的弗兰克·朱利叶等人模拟了组织和肿瘤细胞的流动,这些细胞是通过细胞间的相互作用自行组织而流动,而不是靠化学信号。实验还在检验能否利用主动物质理论,帮助揭示细胞在发育中是如何自组织的。一些生物学家希望,这些研究能揭示控制细胞分裂、成型或运动的根本规律。

马克斯·普朗克分子细胞生物学与遗传学研究所生物学家托尼·海曼说:“它就像达尔文之前的林奈分类法。我们得到的所有这些分子,就像他们所有物种,需要在其中加入某种秩序,揭示它们背后的某种原因。”而主动物质可能提供这一原因。

但主流生物学家需要令人信服的证据。霍华德说,甚至“主动物质”这个词也可能妨碍了沟通,“它是个物理学术语。”尽管如此,他们仍希望这两个领域之间日益密切的结合有助于人们接纳它。德里斯顿工业大学生物物理学家斯蒂芬·吉尔说,主动物质研究的进步需要那些站在物理学和生物学前沿的科学家。“在交界的地方埋藏着金矿,但你必须推开这两个领域的限制。”

暗物质粒子真被“抓”过吗 “四大金刚”可能会给个说法

本报记者 刘霞 综合外电

数量的季节变化,从而首次宣称,探测到了弱相互作用重粒子。DAMA观测到的信号夏天出现得多于冬天。DAMA团队认为,这种变化是由于地球围绕银河系中心和太阳的轨道运动所致。在北半球的夏季,围绕太阳的公转运动会使地球高速冲入看不见的银河系暗物质的云中,增加了WIMPs击中探测器的几率。

照此情况,在6月初,当地球和太阳的轨道运动一致时,穿过地球的粒子数量应该达到峰值;而在12月初,当两者的轨道运动相对时,数量降到最低。但这也存在一个大问题。德国卡尔斯鲁厄理工学院的理论物理学家托马斯·斯科维特兹-芒格德说:“如果真是暗物质,那么它应该早已被其他实验发现了。”但迄今还没有。

不过,与此同时,所有尝试找出DAMA实验缺陷(例如研究人员没有考虑的环境影响等)的实验都以失败告终。美国加州大学圣迭戈分校的倪凯旋(音译)说:

“信号就在那里,但如何解读这一信号——它来自暗物质还是其他事物并不清楚。”倪凯旋参与的是名为XENON1T的暗物质实验。XENON1T位于格兰萨索国家实验室,由意大利国家核物理研究所(INFN)运行。不过,其他探测暗物质的全尺寸实验都没有使用碘化钠,因此,科学家们认为,存在着一种可能性:暗物质与钠的“交流”方式与它同其他元素的“交流”方式不同,但这一点还需进一步验证。

“四大金刚”将探测暗物质信号

此前,很多科学家认为,让碘化钠晶体达到所需的纯度是进行此类实验面临的重大挑战。但现在,功夫不负有心人,四个实验小组——韩国隐形质量搜索(KIMS)、耶鲁大学的DM-Ice、西班牙萨拉戈萨大学的ANAIS和同样位于意大利格兰萨索国家实验室的“拥有主动背景抑制的碘化钠”(SABRE)项目,都得

到了纯度合适的晶体。

KIMS和DM-Ice团队携手在韩国襄阳地下实验室建造了一台碘化钠探测器,其将于数周内开始记录数据。KIMS的主管机构、韩国地下物理研究中心主管金英德(音译)表示,与DAMA相比,这个探测器能更好地将暗物质信号从噪声中区分出来。

ANAIS则打算在西班牙比利牛斯山的坎弗兰克地下实验室建造一台同样的探测器,KIMS、DM-Ice和ANAIS将总共使用200公斤碘化钠,可与DAMA使用250公斤碘化钠媲美,因此,它们或能捕获同样数量的弱相互作用重粒子。DM-Ice负责人、耶鲁大学的雷纳·瓦格纳(音译)说,尽管更新的探测器会有更高质量的背景噪声,但它仍将能重现DAMA的大部分信号。

不过,卡拉普赫认为,碘化钠的纯度比质量更重要。他和同事研发出了一种技术来降低污染,今年1月份,他们宣称首次获得了纯度高于DAMA使用的

碘化钠晶体,他希望将背景噪音进一步降低到DAMA的十分之一。

SABRE会将一个探测器放在格兰萨索国家实验室;另一个探测器放在澳大利亚一个金矿内建造的斯托尔地下物理实验室。SABRE总重50公斤,它会使用一个传感器,将暗物质信号从噪声中“揪出”。卡拉普赫说,SABRE应在一年内完成研发,然后很快开始建造探测器。而且,在南北半球各有一台探测器,或许能厘清DAMA结果中的季节性是否受到了环境因素的影响。如果信号来自弱相互作用重粒子,这两个探测器应该能同时看到峰值。

DAMA新闻发言人、意大利罗马第二大学的丽塔·贝尔纳贝伊表示,DAMA至少要到2017年才开始发布最新数据,对于这些新碘化钠探测器的加入,她并不吃惊,也不紧张。她说:“在这许多年中,经过无数次再确认,我们的结论已被证实。”如果其他实验没有看到他们发现的季节性特征,那么,可能是其探测器的灵敏度不够。

这“四大金刚”能证明DAMA是正确的吗?美国密歇根大学的理论天体物理学家凯瑟琳·弗里兹对此表示,对DAMA获得的信号,目前没有其他解释。澳大利亚墨尔本大学的伊丽莎白·巴伯里欧是澳大利亚SABRE团队的领导人,她说:“在许多人曾经尝试重复DAMA实验,但全部折戟沉沙,这表明,要做这一点真的很不容易。”