

# 粒子加速器揭示蚊子的秘功

小溪

谁都知道蚊子令人厌烦,这种小小的飞虫其雄性是“素食者”只吸食植物汁液,而雌性以吸食人及动物的血液为主,偶尔吸食植物液汁,一旦婚配就非吸血不可了,因为只有吸了血才能促进它的卵子成熟。叮人吸血的只是雌蚊。

不小心被雌蚊叮咬,让它吸了血并在皮肤上留个瘙痒包算是轻的,如果它已携带了某些病原体那就严重了,在它再刺入人体时就会将病原体带入人的血液。已知经蚊子传播的可怕疾病有疟疾、乙型脑炎、登革出血热、丝虫病、黄热病等80余种。据报道,仅疟疾这一种疾病,每年被蚊子传播感染的有数亿人,其中几十万人甚至有可能被夺走生命。

正因蚊子对人类健康的危害极大,科学家们一直致力于研究蚊子,想弄清它究竟是如何传播疾病的。研究纤小的蚊子凭肉眼无法进行,必须借助科技手段。随着科技的发展,光学显微镜、电子显微镜、离子和X射线显微技术以及高速摄影等高科技手段的涌现使相关的研究不断获得进展。

近段时间传来了令人吃惊的消息,科学家们意外发现了蚊子在叮人吸血时一种前所未有的“秘功”,而科学家们说:能够获得如此有突破性的成果首先要归功于粒子加速器技术的发展,使研究者拥有了功能强大的研究手段。

## 一、蚊子的嘴

蚊子体型纤小,为何它能这么“稳”、“准”、“狠”地吸食呢?通常猜想它应有个尖利的“嘴”。仔细观察蚊子的头部,蚊子的确有个针状的“嘴”,长在它的一对复眼下面,两边各有一根带须毛的触角。

借助显微镜,发现人们肉眼所看到的蚊子“嘴”其实只是个保护性的外套(称为下唇),而出乎人意料的是这个细长的保护套里居然包裹了6根比头发

丝还细的针状物:1根是食管(上唇),1根是唾液管(舌),2根是刺针(上颚),还有2根是锯齿刀(下颚)。

动物学中将昆虫的“嘴”称为口器,而蚊子这种既能刺入寄主体内又能吸食寄主体液的口器,则称为“刺吸式口器”。

蚊子的口器又细又软,怎么能在人毫无觉察时就穿透皮肤吸饱了血呢?

显微镜下进行的研究显示:蚊子的口器刺入表皮时用的是一种动态冲击姿势,口器绷直后快速刺向皮肤,包裹着6根“针”的“下唇”立即打开并折叠起来,其前端紧贴着皮肤起到引导和支撑作用。

6根针中的两根“上颚”尖头先刺破皮肤表面,再以一种周期性的振动增加刺入深度,带有锋利微型锯齿的两根“下颚”紧跟着锯开皮肤。上颚与下颚配合着很快深入到表皮下血管丰富的区域,上颚的尖头还会不断变换位置探查血管。

只要上颚一找到血管,“上唇”立即卷曲成一个吸管(上唇的上端与蚊子体内的食道相连),蚊子扩张自己的食道就可以使血液沿着上唇卷成的吸管

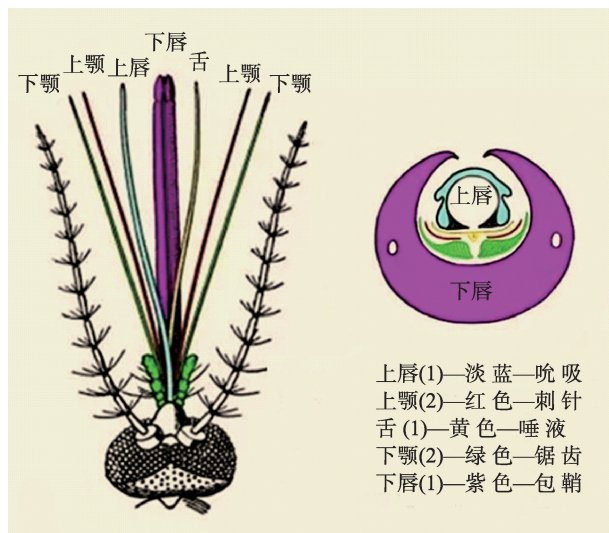


图1 蚊子口器的结构示意图(图片来自网络)

吸入体内了。

与此同时,蚊子通过“舌”将分泌的唾液注入人体。蚊子的唾液里含有舒张血管、抗凝血以及起麻醉作用的化学物质,便于更快地吮吸血液,也正是这种物质会引起被叮咬者过敏,表现为皮肤起包并发痒。如果蚊子体内已携带某种病原体,就会随着唾液进入人体——这正是蚊子叮人传播疾病之时。

## 二、新机遇

生物学家一直在探寻更高水平的成像技术手段来深入研究蚊子的吮吸功能,而随着粒子加速器技术的发展,同步辐射光源的诞生为他们带来了全新的机遇。

X射线是德国物理学家威廉·伦琴(Wilhelm Conrad Röntgen)1895年发现的。此后,常规的X射线在多个研究领域得到了广泛的应用,但只有出现同步辐射光源后X射线成像技术的发展才真正得到了质的飞跃。

同步辐射是一种电磁辐射。20世纪初,科学家根据电磁场理论预言:真空中接近光速运动的电子在磁场中作曲线运动时,会沿着弯转轨道切线方向发射连续谱的电磁辐射,只是在相当长时间内谁也没真见到过这种辐射。1947年,美国通用电气公司在调试70 MeV电子同步加速器时意外观察到了这种电磁辐射。同步辐射并非粒子物理实验所需,但通过对其特性的研究却发现它具有其他辐射源难以比拟的强度高、准直性好、能量范围广等优异特点,可为多个学科领域的研究提供优良的光源。

20世纪60年代末、70年代初,利用已建供粒子物理研究用的电子同步加速器,以“寄生”模式运行的第一代同步辐射光源开始出现,其X射线的亮度(指单位时间、单位面积、单位立体角、千分之一光子能量范围内的光子数。亮度越高表明束流品质越好)比常规X射线源约高4~5个量级。80年代初,基于技术的发展,一批发射度(束流尺寸与张角的乘积)较前大大降低、亮度大大提高的专用同步辐射光源陆续建成——被称为“第二代”。

第一、二代同步辐射光源主要利用电子束经过加速器弯转磁铁发出的同步辐射光。20世纪70年代末开始使用在加速器磁铁之间的直线段插入产生周期性磁场部件(称为插入件)的技术。当电子束通过插入件时会被往复、周期性地偏转方向,在近似正弦曲线的扭摆偏转中发出更强的同步辐射光,可大幅度提高光源品质。第二代同步辐射光源使用部分插入件,光源亮度可达 $10^{15}\sim 10^{16}$ 。

20世纪90年代中期,一批以低发射度和采用大量插入件为特征的高亮度同步辐射光源建成——被称为“第三代”,光源亮度可达 $10^{18}\sim 10^{19}$ 。

同步辐射光源所具有的高亮度、高通量、高准直度、精确可控、偏振性和能量连续可调等特点,为X射线成像研究提供了高水平的平台,使之前无法实施的许多成像研究得以实现。加上近年来相衬成像、相干衍射成像、吸收谱成像、X射线荧光成像等一系列新的X射线成像方法陆续出现,相关的应用研究如虎添翼,科学家们拥有了全新的X射线成像技术手段。

美国阿贡国家实验室的先进光子源(APS)属第三代同步辐射光源,电子束能量为7 GeV,由直线加速器、增强器、储存环、插入件和实验大厅组成。

直线加速器将电子加速到450 MeV(电子以接近光速的速度运行),电子束流被注入到增强器后在半秒时间内被加速到7 GeV,然后进入安装了1000多块磁铁、周长为1104米的储存环,强大的磁场使电子束聚焦后沿接近圆形的多边形真空轨道运行。在每个多边形的直边上安装具有多周期磁铁结构的插入件,用于大幅度提高光源品质。

APS储存环共设计了40个单元,其中35个单元用于为科学实验提供高品质光源。每个单元至少包括两条引出X射线的光束线,一条用储存环弯转磁铁作为光源,另一条用插入件作为光源。

APS提供的高亮度、高通量、高准直度、精确可控、能量连续可调的X射线为生命、材料、能源、环境等多种尖端科学研究提供了高水平的研究平台。

一个由来自日本东北大学、美国弗吉尼亚理工



学院、美国布鲁克海文国家实验室和日本东洋大学等多个机构研究人员组成的研究团队在APS上研究蚊子的吮吸功能。

研究蚊子之类的小型昆虫,为了实时捕捉昆虫系统内部各部分是如何协调配合工作的,需要借助同步辐射性能优异的X射线,透过昆虫外部轮廓,不仅揭示其体内软组织结构千分之一秒内的运动,而且分辨出长度为百万分之一米的细节。一般的显微镜显然不能满足这些需求,只有同步辐射X射线成像才能满足这类实验所需的苛刻条件。

该研究团队用APS一个插入件光束线提供的高性能X射线和配套的成像实验设施,选择适当的X射线参数,通过极为精细的实验控制,可在蚊子不被汽化的情况下观察它体内的情况,成功地拍摄到了活体蚊子吮吸行为的高分辨率视频,捕捉到蚊

子在吸食液体时一种前所未有的“秘功”,在蚊子吮吸液体行为的研究中取得了突破性的研究成果。

### 三、蚊子的秘功

令人感兴趣的是:如此精细的实验是怎样进行的呢?蚊子虽然既小又脆弱,但却是世界上最难对



图2 美国阿贡国家实验室先进光子源(APS)鸟瞰(图片来自网络)

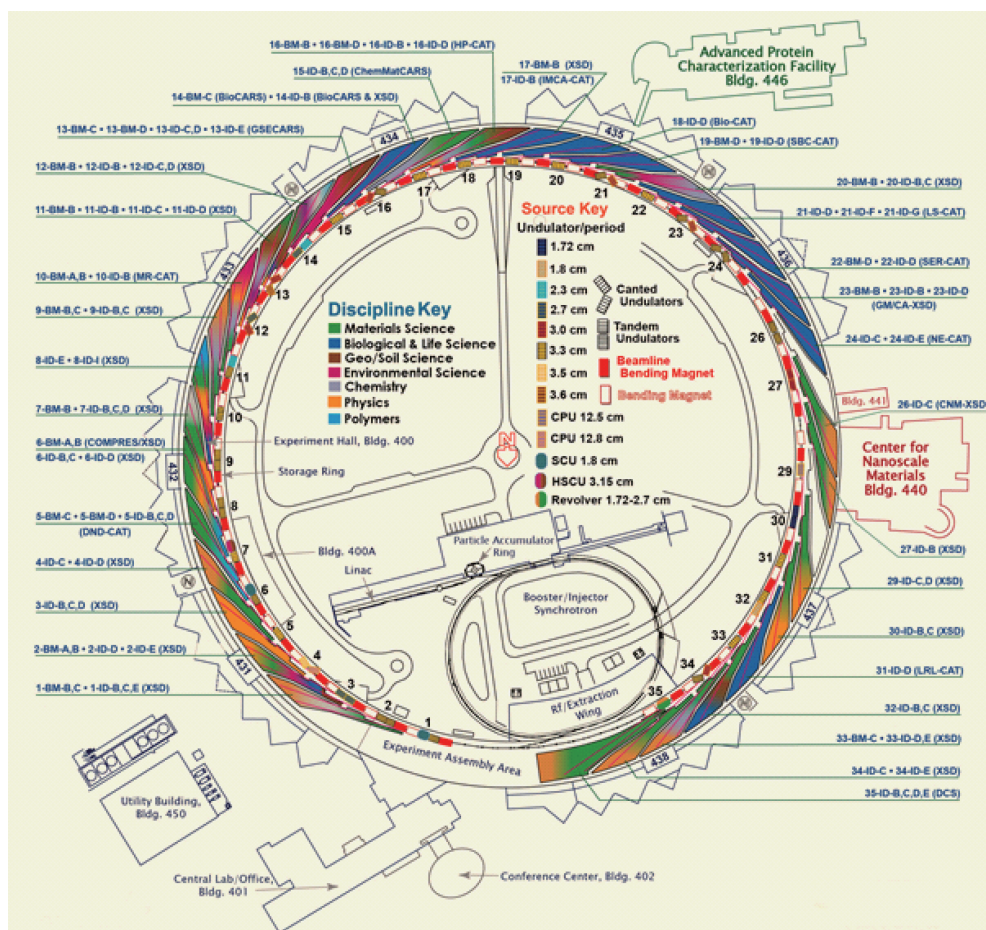


图3 APS光束线分布示意图(图片来自网络)

付的害虫之一。研究团队很明白,没有独特的创造性,就不可能揭示新的秘密。

传统的X射线成像基于这样一个原理:用X射线照射被研究的物体,安置在物体后面的成像探测器将接收到的X射线转化为图像。被照物体内部密度较高部分(例如骨骼)吸收较多的X射线,成像时表现为图像中较暗部分,而密度较低部分(例如液体或软组织)吸收较少的X射线,成像时表现为图像中较亮部分。因而传统的X射线成像被称为“吸收衬度成像”。一般动物体内由于骨骼与肌肉等软组织的密度差异大,可获得明暗衬度较大的清晰图像。然而,蚊子体内没有骨骼之类高密度的部分,体内各个部分的密度相差不多,吸收X射线的能力差异并不大,无法产生明暗衬度大的清晰图像。因此,研究蚊子等昆虫类物体就遇到了难题。

研究团队采用“相位衬度成像”技术来解决这个难题。这项技术有两个关键点:首先,虽然密度的微小差异不能产生可观测的吸收衬度,但这微小的密度差异却可以使X射线产生敏感的相位变化,导致X射线在蚊子体内发生微小角度折射。其次,第三代同步辐射光源可提供一般X射线光源所没有的高通量和高准直的X射线,可以使微小角度折射的X射线和背景X射线相互干涉,产生相位衬度。利用这两个关键点,研究团队使微小的密度差异产生出十分敏感的相位衬度图像,所获图像甚至可区分昆虫食道中的液体与空气。

研究团队的杰克·索查(Jake Socha)教授说“这仿佛为我们揭示了一个全新的世界”,“几乎所有你能放进这个光束的东西,都会使你首次以一个全新的视角来观察。”“图像中昆虫内部结构的清晰性相当惊人。”

实验的过程并不简单。开展正式实验之前,研究人员须谨慎地选择相关的实验参数,测试比较在什么条件下才能对昆虫的伤害最小,得到最好的图像。当然,X射线的波长越长,穿透能力越弱,所得图像的吸收衬度越高,吸收衬度对图像衬度贡献越大。但X射线的波长越长,对昆虫的伤害就越大。

这将使昆虫的行为不自然,甚至会立即杀死它们(虽然科学家们在研究实验结束后常会杀死这些虫子,但可不希望它们在实验半途中就死去哟)。测试结果表明:将实验时间控制在5分钟之内,对大多数昆虫没有太大的负面影响,可是,一旦实验超过20分钟,就会使它们发生暂时瘫痪。

即使有了缜密的预先研究,研究团队在每次实验之前仍要花6~8个小时来进行各项实验参数的调试准备。另外,还有一个具有挑战性的问题:用什么方式固定实验用的蚊子呢?你可没法对蚊子说:“X光照射时你身子‘别动’啊”。

实验用的蚊子是在APS旁边的森林中用陷阱诱惑捕捉的,捉到的蚊子被关在有食物和水的小笼子里养着。实验时只选用雌蚊,在进行正式实验前要将它们饿上48小时。临近实验,先用氮气暂时麻醉蚊子,再用某种品牌的指甲油将蚊子粘在一根针的顶端(这不属于高技术哈,但研究者们对此种指甲油赞不绝口),然后把蚊子长长的口器浸入含糖的喂食液(含10%葡萄糖),糖溶液中还需混入一种碘同位素,用于增强X射线的吸收,以便拍摄液体流动的清晰图像。待蚊子苏醒后就可以开始实验了。

研究人员用独创的实验装置在APS的(XSD)2-BM弯铁光束线上拍摄获得了蚊子头部的X射线投影图像,所得的二维投影图像用APS的tomPy软件转换成三维图像。他们还在APS的(XSD)32-ID插入件光束线上,用单色X射线(能量为33.25 keV)拍摄了饥饿蚊子吮吸花蜜时的高清视频,再用相关的软件处理分析视频数据。

研究团队有了惊人的发现,他们的研究成果发表在2018年2月的《科学报告》(Scientific Reports)期刊上,文章描述他们发现了蚊子的一种前所未有的“爆发式”吮吸模式。

尽管科学家们早就认识到研究蚊子叮人吸血方式的重要性,但以前的研究并不了解蚊子具有两套不同的吮吸系统。正常情况下,蚊子吸血是“连续模式”的,吮吸以连续运动的方式进行,是较高频率的多次小体量冲程,就像用吸管小口小口品尝似



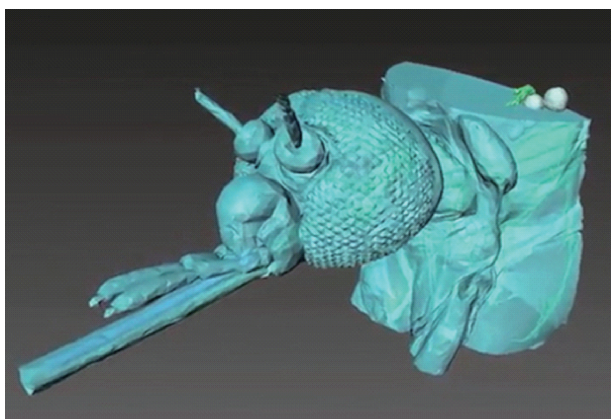


图4 在APS的(XSD)2-BM弯铁光束线上捕捉到的蚊子头部的X射线三维图像(图片来自网络)

地连续吮吸。

然而,在新发现的这种“爆发模式”下,蚊子的吮吸竟有一次性的大体量冲程——通过吸管的巨大吞咽——产生大量、快速的液体流入,所产生的流量比连续模式中观察到的要高出27倍。这是以前从未观察到的,而这种动作所需能量是原来的1000倍。这就引出了问题,为何蚊子有两种吮吸模式呢?什么情况下蚊子会使用爆发模式呢?

为了更深入地探索这个问题,研究人员利用观察到的形态学和运动学参数建立了蚊子吮吸的流体力学数学模型,对蚊子不同的吮吸模式原理进行详细分析,便于提出更多的假设,指导进一步研究的思路。研究发现,爆发模式允许蚊子按需产生一个低压真空,可用来驱动吮吸中的障碍物,例如气泡或小颗粒。也许这是蚊子试图避免被发现,暂时增加摄入量以更快地吮吸?然而,这种情况似乎发生机会较少,因为实验表明爆发模式只是偶尔发生。

蚊子不仅是一种讨厌的东西,也是对人类健康的一种威胁。近年来齐卡(Zika)病毒的大爆发以及一种新黄热病的流行,都是由蚊子携带病毒传播疾病引起的。关于蚊子吮吸机制和爆发式吮吸模式的新发现仅是研究的开始,还需在未来的研究中深入探索,更好地了解蚊子是如何传播疾病以及怎样才能更好地应对蚊子的危害。

研究团队的马克·斯特里姆勒(Mark Stremler)教授说:“我们越了解它们就越有可能找到控制它

们的方法。”“这项研究为我们打开了一个全新的问题和可能性的大门,而这些问题以及可能性在我们观察到这种爆发模式之前甚至没有考虑过。”

除了蚊子传播疾病的生物医学意义之外,这一发现还可能帮助科学家开发新的技术。研究人员设想在微流控装置中模仿蚊子的双吮吸系统,研发出可用于在人体内提供有针对性药物治疗的装置。

这项研究能成功地在APS上完成并取得可喜进展并非偶然。21世纪初以来,APS一直是使用X射线研究昆虫的世界领先者。在进行此项研究之前,APS上已进行过为数不少的昆虫活体研究,相衬成像、相干衍射成像、吸收谱成像、X射线荧光成像、显微成像、计算机断层扫描成像,以及大实验数据处理、图像重建等等前沿技术已有了扎实的基础。

#### 四、结语

上述这个有意义、高水平的蚊子吮吸方式实验令人实实在在地感受到了粒子加速器技术对人类社会作出的贡献。

基于粒子加速器技术的同步辐射光源建设起步于20世纪70年代,为科学家们开展科学研究和应用研究带来了广阔的前景,这些年来取得了极为丰硕的成果,关于蚊子爆发式吮吸方式的新发现仅是其中一个例子。

目前全世界已建成的同步辐射光源已超过50台。20世纪90年代初,国内最先建成的北京同步辐射装置是基于高能物理实验的高能对撞机兼用装置,属第一代同步光源。1989年建成的合肥光源是一台同步辐射专用装置,属第二代光源。2009年5月投入使用的上海光源属第三代同步辐射光源(台湾新竹光源也属第三代)。

已在北京怀柔动工的北京光源属第四代同步辐射光源(采用比第三代更先进的技术,性能更加优越),合肥先进光源(第四代)的建设构想也已提出,广东省正积极推动在东莞建设南方光源(第四代)与已建成的中国散裂中子源配套。可以预见,

就在并不太远的未来,中国的几大高性能同步光源将为材料、能源、环境、物质与生命科学交叉等广泛领域的科学研究提供强有力的技术支撑能力,为科技的发展作出更大的贡献。

(本文经朱佩平、清川审校,采自高能所微信公众号,略有修改)

### 参考文献

- ① When Your X-Ray Subject Has Wings: Peering Inside Insects with the Advanced Photon Source  
<https://science.energy.gov/news/featured-articles/2018/08-29-18/>
- ② What REALLY happens when a mosquito bites: Scientists capture how the parasite sucks blood in a gruesome video  
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2385937/>
- ③ Advanced Photon Source  
<https://science.energy.gov/bes/suf/user-facilities/x-ray-light-sources/aps/>
- ④ Mosquitoes Drink with a Burst in Reserve  
<https://www.aps.anl.gov/APS-Science-Highlight/2018/mosquitoes-drink-with-a-burst-in-reserve>
- ⑤ Burst mode pumping: A new mechanism of drinking in mosquitoes  
<https://www.nature.com/articles/s41598-018-22866-w>

### 科苑快讯

## “欧洲粒子物理2020战略”发布

2020年6月19日,欧洲核子中心(CERN)理事会全票通过欧洲粒子物理2020战略。该战略将对全球高能物理的未来发展具有重要而深远的影响。

这份欧洲粒子物理战略确定了先建设一台正负电子希格斯(Higgs)工厂,再建设一台高能质子对撞机的路线图。这和我国高能物理学界倡议的环形正负电子对撞机-超级质子对撞机(CEPC-SPPC)设想是高度一致的。该战略聚焦的几项关键技术,在CEPC-SPPC项目中也已经全面展开,部分已取得显著进展。同时,欧洲粒子物理战略就未来可能的、更为深入开放的国际合作也表明了态度。

该战略主要内容包括:

1)粒子物理要探索基本物理规律的奥秘,包括暗物质、正反物质不对称、中微子质量等,其答案隐藏在时空最微小的结构中。Higgs粒子是与这些根本问题相关的基本粒子,基于正负电子对撞机的Higgs工厂可精确测量Higgs粒子性质,是“优先级最高的未来对撞机项目”,并且未来期望建设能量尽可能高的质子对撞机,为上述问题提供答案。

2)为实现上述科学目标,需要大力推动关键技术的发展,包括高场磁体,高温超导体,等离子体尾场加速技术等,并提高能源利用效率。这些技术也将对社会产生巨大的应用价值。

3)该战略提出要推动与邻近学科的协同发展,推动全球参与的高能物理项目,包括CERN主持建设的和CERN参与、建设在欧洲之外的大型科学项目。CERN将积极协调欧洲国家参与这些项目,并提供技术支持。CERN的成员国将可以通过CERN、或直接通过双边/多边协议对这些项目做出贡献。

此外,欧洲粒子战略还就高亮度-大型强子对撞机(HL-LHC)升级、国际直线对撞机(ILC)、美国和日本的中微子实验等项目阐述了欧洲的立场。该战略得到了所有CERN成员国的一致赞成和高度赞赏,与会的各国代表表示,它充分考虑了粒子物理面对的核心科学问题,平衡了科学研究和技术风险,具有积极的进取精神。与会代表希望通过全欧洲、全人类的努力,将这份发展战略变成现实。

(中国科学院高能物理研究所实验物理中心供稿)