

# 中国散裂中子源简介

韦 杰

## 一、中子散射

1932年,查德威克发现了中子,人们认识到原子核由带正电的质子和不带电的中子构成。中子的发现及应用是20世纪最重要的科技成就之一。

当一束中子入射到所研究的对象上时,与研究材料中的原子核或磁矩发生相互作用,被散射出来,通过测量散射出来的中子能量和动量的变化,可以研究在原子、分子尺度上各种物质的微观结构和运动规律,告诉人们原子、分子在哪里,原子、分子在做什么,这种研究手段就叫中子散射技术。用于中子散射的中子,波长从几埃到几十埃、能量在毫电子伏特到电子伏特之间,分别与物质中原子分子之间的距离和相互作用能量相当。

溶解酵素蛋白

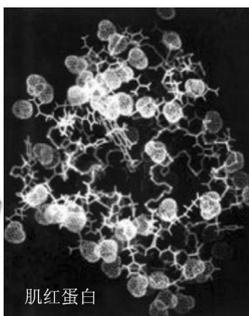
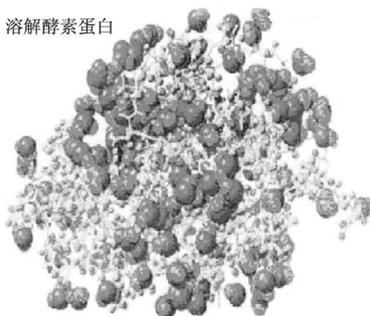


图1

中子不带电、具有磁矩、穿透性强,能分辨轻元素、同位素和近邻元素以及具有非破坏性,使中子散射成为研究物质结构和动力学性质的理想探针之一,是多学科研究中探测物质微观结构和原子运动的强有力手段。自1936年成功进行首次中子衍射实验以来,中子散射已广泛用于物理、化学、材料、生物、地质、能源、医疗卫生和环境保护等众多研究领域。同步辐射产生的高亮度X射线,主要与原子外围的电子云发生相互作用,从而探知物质的微观信息;而中子是电中性的,它与电子云基本不发生相互作用,而主要与物质中的原子核相互作用。因此,

作为探测微观结构的两种主要探针,同步辐射和中子散射看到的正好是物质的两个不同方面。这种优势互补已被许多学科用来准确研究物质中原子的位置、排列、运动和相互作用等,图1是利用中子散射观察到的含水溶解酵素蛋白和肌红蛋白的结构。

中子散射的作用既与同步辐射互补,又具有独特和不可替代性。其先进性与优越性表现在:  $^1$  具有宽泛的波长范围:从零点几埃到亚微米范围内连续可调。是度量原子、分子和原子分子团簇间距离从埃到纳米范围内的凝聚态物质微观结构最适合的标尺;  $^{\circ}$  有合适的能量覆盖:热中子的能量从微电子伏特到电子伏特,与凝聚态物质中的大部分动态过程的能量相当,适合研究物质中各种不同的相互作用和动态过程;  $^{\gg}$  能精确确定轻原子的位置;  $^{\frac{1}{4}}$  能区分同位素:原子核内中子数的变化可以极大地影响其对中子的散射。  $^{\frac{1}{2}}$  存在磁散射,是研究磁性微观对称性和磁矩运动最直接的工具;  $^{\frac{3}{4}}$  高动量转移(Q值)的散射强度明显:有利于研究物质中原子周围局部的细微变化和复合材料的结构特征;  $^{\text{b}}$  具有高穿透性:对工业上常用的钢铁和铝的穿透深度约为7mm和65mm;  $^{\text{A}}$  拥有非破坏性:应用热中子散射,不破坏生物样品的活性,特别适用于研究生物活性体系。

## 二、散裂中子源

先进的中子源是中子科学研究的基础。自1932年中子被发现以来,能产生高通量中子的中子源一直是科学家不断努力追求的目标。

高通量中子源包括反应堆和散裂源。核反应堆是一种稳定连续的中子源,在中子科学研究中发挥了巨大作用。通常使用 $^{235}\text{U}$ 作为核燃料,每次核裂变产生一个有效中子,释放180MeV的热量。堆芯中如此大量的热量必须及时有效地带出,才能保证

性及普遍性来说是非常强有力的,同时它也是对我们5能量条件简介6的引言中介绍的奇点产生原因之争的判决性结论。但霍金-彭罗斯奇点定理也有一个显而易见的缺点,那就是它既无法告诉我们究竟哪一条非类空测地线是不完备的,也无法提供有

关奇点具体性质的信息。这一缺点为后人加强奇点定理的结论部分留下了空间。不过要想加强奇点定理的结论部分,往往不可避免地前提部分也要予以加强。然而,这会有损定理的普遍性。

(作者主页: <http://www.changhai.org/>)

反应堆正常运行。正是因为堆芯散热条件的限制,反应堆中子通量在上世纪六七十年代就达到饱和。目前,全球公认通量最高的中子散射研究用堆是法国的 ILL(位于法国小城 Grenoble),通量为  $115 @ 10^{15} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

随着科技的进步,相应研究体系(如薄膜、纳米团簇、生物大分子和蛋白质等)的尺度分布越来越大,获得数量在克量级的样品也越来越困难。因此,小样品的快速、高分辨的中子散射测量迫切需要新一代通量更高、波段更宽的中子源,散裂中子源应运而生。脉冲散裂中子源突破了反应堆中子源的中子通量上限,正快速向前发展。

散裂中子源是由加速器提供的高能质子轰击重金属靶而产生中子的大科学装置。通过原子的核内级联和核外级联等复杂的核反应,每个高能质子可产生 20~40 个中子,每产生一个中子释放的热量仅为反应堆的约 1/4(约 45MeV)。从反应堆中子源发展到高通量脉冲散裂中子源,使中子探针的功能变得日益强大。散裂中子源的特点是在比较小的体积内可产生比较高的脉冲中子通量,能提供的中子能谱更加宽泛,大大扩展了中子科学研究的范围。

高通量中子源在我国有近半个世纪的发展历程。1958 年,我国建成第一座实验性重水反应堆,为我国原子能事业的发展打下了坚实基础,赢得了国际同行的尊重,同时也开展了中子散射研究。进入 21 世纪,随着我国整体科技水平的提升,越来越多的研究人员希望利用中子散射深化自己的研究。然而,我国研究用中子源发展相对滞后,高水平中子散射设施缺乏、技术发展缓慢,许多科学家已开始通过国际合作开展中子散射研究。为适应我国科学研究的发展、增强我国基础科学的原始创新,尽快建设我国的先进中子源和相应的中子散射国家实验室势在必行。

中国先进研究堆(CARR)预计将在 2008 年建成,它将成为亚洲领先的中子散射中心。然而,相对于前述脉冲散裂中子源的一系列优点,CARR 堆上进行的研究会有一定局限,为增加我国科技的整体竞争能力,在我国建设一台脉冲散裂中子源就十分必要。散裂中子源与 CARR 堆两者各具特色、相互补充,为我国中子科学的发展做出了贡献。例如,即将建设的中国散裂中子源(CSNS)的谱仪能同时测量大范围的动量能量变化,方便物质整体性能

的表征;CARR 谱仪每次都测量某一特殊的动量能量变化点,适合物质某些特定性质的精确表征;CSNS 的衍射谱仪将重点关注高动量转移的衍射数据,而 CARR 的衍射谱仪更有利于小的动量转移数据的测量;CSNS 散射谱仪利用飞行时间相应的中子能量分辨,重点测量多晶态物质中基本元激发及相应的态密度等,而 CARR 的三轴谱仪利用单色能量的甄别,重点测量单晶物质中各种激发的色散关系等。除中子散射外,CSNS 与 CARR 在其他研究和应用的领域内也各具优势。例如,CSNS 有利于质子治疗、介子应用、基础中子物理研究及核废料嬗变研究等,CARR 堆则更有利于同位素生产、半导体辐照、中子照相相等。

自上世纪 80 年代起,由质子加速器驱动的散裂中子源,逐渐进入实际应用阶段。世界上正在运行的脉冲式散裂中子源主要有美国的 IPNS 和 LANL SCS、英国的 ISIS。已经调束和即将调束的散裂中子源有美国的 SNS、日本的 J2PARC。计划建设的有中国的 CSNS、韩国的 PEFP 和印度的 ISNS 等。SNS 和 J2PARC 的设计束流功率超过了 1MW,CSNS、PEFP 和 ISNS 设计功率都在百千瓦量级。图 2 为世界范围内的散裂中子源的分布图。

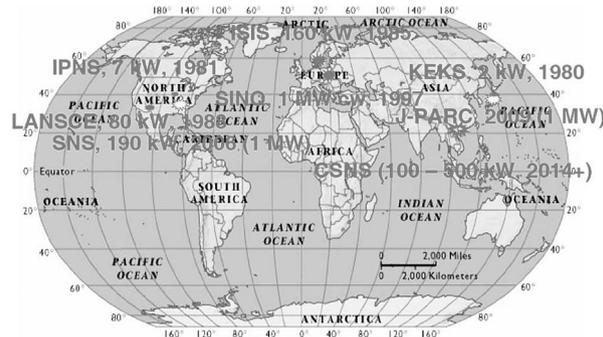


图 2

目前世界上最亮的散裂中子源))英国卢瑟福实验室的散裂脉冲中子源 ISIS 能产生通量为  $8 @ 10^{15} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  的脉冲中子,其脉冲中子通量已高出通量最高的反应堆近一个量级。对于中子散射来说,散裂中子源的脉冲特性使人们可以方便地采用飞行时间技术去利用某一波段范围内的全部中子,而不像反应堆通常只选取某一特定波长的中子,因此中子的使用效率提高了 1~3 个量级。

进入 21 世纪,美、日、欧等发达国家开始认识到能提供更高通量和中子利用效率的散裂中子源在现代科学技术中的重要地位,相继提出建设束流

功率为兆瓦量级的散裂源。它们能产生比反应堆高上百倍的有效中子通量,为多学科的创新研究提供了强大的研究平台。在美国,以橡树岭国家实验室为主的六大能源部国家实验室携手合建了一台设计束流功率为 1.4MW 的散裂中子源 SNS,它提供的中子通量高达  $10^{17} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。其总投资也高达 14 亿美元。通过 7 年多的紧张建设,于 2006 年 4 月 28 日产生出第一束中子。目前,正在逐步提高功率,谱仪建设也正按部就班地进行。

在日本,日本原子能研究所与高能加速器研究机构合建的工程总投资约 18 亿美元的强流质子加速器研究联合装置 J2PARC 正在建设。其中一台 3GeV 的快循环同步加速器将提供设计束流功率为 1MW 的质子束流用于驱动散裂中子源。

英国通过升级改造,将 ISIS 的束流功率从 80kW 提高到 160kW,并计划进一步升级改造其质子加速器,提高到 240kW,同时正在积极建设第二靶站,第二靶站将从每秒 50 个脉冲中得到 10 个脉冲,束流功率为 48kW。

中国即将建设的 CSNS 为设计束流功率 100kW 的脉冲散裂中子源,并有升级到 500kW 以上的潜力,其设计脉冲中子通量超过 ISIS,装置总投资为 14 亿人民币。CSNS 将成为发展中国家拥有的第一台散裂中子源,并进入世界四大散裂中子源行列。CSNS 是开展前沿学科及高新技术研究的先进大型实验平台,能为我国多学科创新在国际上占领一席之地提供良好机遇。对中子散射而言,更高的中子通量在进一步减少实验所要求的最小样品量和缩短测量时间上存在优势。与正在建造的兆瓦级的美国散裂中子源 SNS 和日本散裂中子源 J2PARC 相比,只有极小部分课题(如超薄膜、快速反应和快速相变过程等)不能在 CSNS 开展。CSNS 设计的最小样品量在毫克量级,最短测量时间在分钟量级,能满足各学科 90% 以上的中子散射研究需求。投资仅为兆瓦量级散裂源百分之十几的 CSNS 是符合我国国情、能满足我国科技发展需要、高性价比的大科学装置。

### 三、科学意义

中子散射是人们了解物质微观结构和运动状态的重要工具之一。中子散射第一次直接测定了反铁磁结构的自然存在,验证了法国科学家奈尔(Louis Neel)反铁磁相互作用的猜想,使其荣获 1970 年诺

贝尔物理学奖。磁有序结构的中子衍射测量加速了磁相互作用理论的完善,推动多体凝聚态理论和实验的发展。传统超导体中电子自能的中子散射能谱,与超导隧道实验结果惊人一致,人们才最终相信解释常规超导体中超导机理))) 电声相互作用的 BCS 理论。美国科学家沙尔(Clifford G. Shull)和加拿大科学家布罗克豪斯(Bertram N. Brockhouse)因开创性的中子散射实验技术荣获 1994 年诺贝尔物理学奖。年产值几十亿美元有“磁王”美誉的第三代稀土永磁材料 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>B 的晶体结构和磁结构最终由中子散射实验测定。中子散射应用于物理、化学、生命科学、材料、纳米等学科领域,有望在诸如量子调控、蛋白质相互作用、高温超导机理等研究方向实现突破。

散裂中子源起步较晚,但发展很快。利用散裂中子源丰富的短波长中子和时间飞行技术,可方便快捷地获得高精度结构解释所需的高动量转移数据、原子间相互作用的声子态密度、有机分子中起重要作用的氢键结合能等,产生了一大批高水平的研究成果。液氮温区的高温超导体 Y<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O 的结构确定,就是在 IPNS 上由粉末中子衍射最终敲定。科学家在 ISIS 的中子散射谱仪上测量了高温超导材料中整个布里渊区内声子和自旋涨落特征、含氢无机材料氢原子的运动和有机分子中氢键结合特征等,为人们全面认识高温超导机理和氢原子运动规律提供了重要实验依据。

中国散裂中子源将于 2013 年前后建成,将为涉及物质材料的物性和微观结构与动态的众多前沿学科提供一个功能强大的综合性研究平台。科学家将利用 CSNS 在相关领域发现和认识新的现象和规律,并在我国已逐步形成的优势领域内实现突破,如高温超导材料和机理、稀土永磁材料、纳米科学和技术、基因和蛋白质工程等。高温超导的形成可能与体系中声子和磁激发密切相关,中子散射正是探测它们的合适工具。通过多方面、多层次的实验,深入了解体系中电荷、自旋、轨道以及晶格之间的相互作用,结合其他测量,有望最终解决高温超导的微观机制,为开发新型高温超导材料提供指导。氢离子(即质子)的带电量与电子相同,质量却在电子与其他重离子之间,因此其运动完全不能用目前已有的凝聚态理论描述。然而氢键的形成和运动却是生命活动中的关键因素之一,中子散射对氢离子的特殊辨别

能力,可为之提供令人信服的实验数据,发展能准确描述氢离子运动规律的凝聚态新理论。

#### 四、战略意义及社会效益

CSNS项目不仅面向世界科学前沿,有力提升了我国基础研究和高技术水平,而且促进了我国在能源、国防、工业等领域先进技术的发展。

深海储存有大量甲烷等有机可燃小分子的水合物,即所谓可燃冰。它是有待开发的一种新型能源。我国已在南海发现可燃冰发育区,可燃冰的开发利用可能成为我国一种新型清洁能源。根据国家发改委近期出台的一份题为5中国石油替代能源发展概述6的研究报告,中国在未来10年将投入8亿元用于可燃冰的勘探研究。CSNS高压下的中子衍射技术可用于研究可燃气态甲烷水合物的形成机制和稳定条件,其研究成果将为安全、高效地开采和利用可燃冰提供科学依据。

我国正在采取积极姿态发展核能,开展加速器驱动洁净核能系统(ADS)的研究对于我国未来裂变核能的可持续发展开辟了创新的技术路线,它可有效解决我国核能发展中核燃料不足和核废物处理的瓶颈问题。散裂中子源项目与ADS在加速器与靶技术方面相通,可视为ADS技术开发的一个发展阶段。散裂中子源项目的建设,必将有力促进ADS核心技术的发展,提高系统集成能力。

通过散裂中子源项目发展起来的强流质子加速器,还可用于航天器件辐照效应的地面模拟试验研究,包括材料的辐照损伤与电子器件的单粒子反转效应等,其研究成果对于提高航天器件的寿命与可靠性有重要意义。散裂中子源产生的质子和中子可用于肿瘤的放射性治疗研究,为不断提高国民健康水平服务。

高效的CSNS小角散射技术可为石化工业提供高水平服务,如甄别原油成色和成分、研究燃油中添加剂的结合形态和效率等。利用中子散射对工程材料和部件缺陷及应力的深度检测,可为工程部件确定可靠的使用期限,确保安全生产;还可用于研究包括焊接部件的应力分布和产生规律,深冲板材的多相分布与性能,电镀高密度材料的结构,材料制备过程与工艺控制等。散裂中子源提供的中子具有很强的穿透性,中子照相技术在工业中应用广泛,能弥补X射线照相和C射线照相的不足,现在已成为一种新的无损检验方法,可用于检验飞机、航天飞机、火

箭导弹等的各种零部件的结构和加工质量,也可以用来检验反应堆部件缺陷,还可用于考古和文物鉴定。中子散射还特别适用于高温、高压、高速运动、强辐射等极端条件下的工件检验。

虽然通过国际合作,我国研究人员有机会利用国外散裂中子源装置开展一些实验研究。但实际上国外实验室所能安排给我们的束流时间有限,不可能保证总量需求和机时时间安排要求,使我国丧失了在一些重大前沿领域获得突破的机会。一些涉及国家安全、国防研究等方面的课题,则根本不可能到国外开展合作研究,必须自己拥有必要的研究装置,以满足国家战略需求。

CSNS装置作为一个大型科学工程,其建设需要采用一系列高新技术,涉及范围也较广。CSNS采取立足国内、自主创新的指导思想,通过科研单位与企业合作攻关的方式,最大限度地在国内开发出项目建设所需高新技术产品,从而达到既节省项目经费、又提升国内相关产业技术水平的双赢局面。

CSNS将建在广东省东莞市,这样的大科学装置首次在我国南方经济强省建设,对于贯彻国家中长期科技发展规划、改变经济增长模式、实施科教兴国的战略目标可以起到很好的示范作用;有利于促进广东省经济、科技同步发展,增强我国南方地区的科技创新能力,同时也能提高与东南沿海国家与地区科技交流的水平与能力。另一方面,本项目建在广东,有利于优化科研设施在全国的布局,增加我国南方省份的科研基础设施。

作为多学科公共平台的大型科研装置,CSNS为多学科间的相互渗透、交叉和融合创造了条件。CSNS性能优越,首批建设的谱仪居国际先进水平,可同时容纳几百名来自不同部门和单位、从事不同学科和领域研究的科学家和工程师开展工作。建成后,谱仪上每年的研究人员容量可达上千人。这些使用CSNS的科学家和工程师之间的特定紧密关系,非常利于相互交流、启发和影响。CSNS作为一个大型研究中心,为实现小学科之间、相邻学科之间、大学科之间乃至远离学科之间的相互渗透、交叉和融合,萌发新思想、产生新方法、开辟新领域和建立新学科创造环境、提供机遇,CSNS的建设和高效运行将促进我国科学技术进步的飞跃。

#### 五、中子散射的重要应用

CSNS主要面向国内用户。随着中子散射技术



放规律; ° 利用中子衍射和准弹性散射方法, 可研究高储能快离子导体电池中离子扩散规律和电化学反应特征; » 单晶的中子衍射和非弹性散射可研究铁电、压电材料的结构相变和特定声子模式的软化; ¼ 中子磁散射可用于各种磁性功能材料的磁结构、磁畴变化的研究, 以利于新型磁性材料的开发; ½ 中子的高穿透能力和 CSNS 的高通量可实现工业加工材料的非表层深度 CT 扫描, 分辨率可达毫米量级, 为材料加工工艺提供指导; ¾ CSNS 的高 Q 值中子衍射能为复合材料提供更为直接和准确的物相鉴定。

**环境科学** ° CSNS 的中子反射技术研究可提供聚合物表面对不同气体、液体的吸附、反应过程和反应效率等, 促进环境友好高分子材料的发展; ° CSNS 高压下的中子衍射技术可研究 CO<sub>2</sub> 等温室气体水合物的形成和稳定条件, 为温室气体深海掩埋的可能性提供科学依据; » CSNS 的高 Q 衍射可以直接定量研究毒性金属污染复合物中的金属元素成分和结合环境。

**医药学** ° CSNS 的中子散射技术可研究药物的结构及与药物作用对象结合的特征, 为药物遴选、改性等提供依据, 加快新药研制进程; ° CSNS 产生的中子可用于多种医用同位素生产和新型医用同位素的开发研究。

## 六、中国散裂中子源装置

中国散裂中子源的总体科学目标根据国家需求建成一个世界一流的中子散射多学科研究平台, 使其为生命科学、材料科学、化学、物理等领域的微观研究提供强有力的研究手段。CSNS 装置包括 1 台 80MeV 负氢直线加速器、1 台 1.6GeV 快循环质子同步加速器、2 条束流输运线、2 个靶站和 3 台谱仪及相应配套设施。设计束流功率为 100kW, 脉冲重复频率 25Hz, 最高中子通量为  $210 @ 10^{16} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

CSNS 采用较低能量的直线加速器后接快循环同步质子加速器设计方案, 对束流功率为百千瓦量级的装置而言, 比全能量直线加速器加储存环组合(如美国的散裂中子源 SNS) 结构的设计方案造价更低, 并且易于升级。CSNS 靶站采用有扁平截面的多片厚度不同的钨片叠合而成的靶体, 可为中子散射谱仪提供高通量中子束线, 3 台谱仪分别为高通量粉末衍射仪、小角散射仪和多功能反射仪。

CSNS 的方案设计吸取了当前国际上加速器、靶站和谱仪技术的最新成果, 其指标具有国际先进

性。CSNS 设计有效脉冲中子通量约为美、日新一代兆瓦级散裂中子源设计指标的 1/5。脉冲重复频率选择为 25Hz, 可大幅提高有效长波中子通量和每个脉冲内的中子利用效率(对于大多数中子谱仪, 100kW/25Hz 中子源的有效脉冲中子通量和 200kW/50Hz 的相当), 有利于生物、化学大分子和分子团簇的研究; 所选择的谱仪能满足大部分生命科学、材料科学、纳米科学、物理学、化学等多学科领域前沿发展对散裂中子源的不同需求。

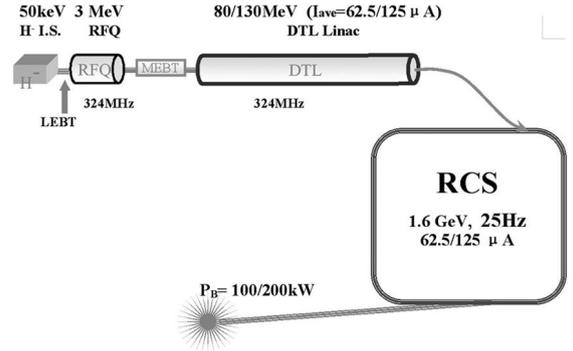


图 4

图 4 给出了 CSNS 系统构成示意图。离子源 (IS) 产生的负氢离子(H<sup>-</sup>) 束流, 通过射频四极加速器(RFQ)聚束和加速后, 由漂移管加速器(DTL)把束流能量进一步提高, 负氢离子经剥离注入 1 台快循环同步加速器 (RCS), 使束流达到最后能量 116GeV。从环引出后, 质子束流经传输线打向钨靶, 在靶上产生的散裂中子经慢化, 再通过中子导管引向谱仪, 供用户开展实验研究。

**加速器系统** 加速器是散裂中子源的基本组成部分, 它决定整个装置的主要性能指标, 也是投资的主体, 其运行稳定性决定了整个装置的使用效率。加速器设计遵循了装置先进性、运行可靠性、经费合理性和可升级性的基本原则。低能端射频四极加速器(RFQ) 是国际广泛采用的直线加速器低能端加速结构, 能同时完成束流的聚焦、聚束与加速, 有利于克服低能强流束的空间电荷效应, 极大提高了束流品质。正在建造中的美、日散裂中子源均采用这种加速结构, 而英国已经建成的 ISIS 散裂中子源加速器也于近年建造 RFQ 以替换原来的高压型加速器。DTL 部分采用较高频率(324MHz) 的射频功率源, 而不是传统的 202MHz, 有利于加速较高峰值电流的束流, 同时缩短直线加速器(LINAC) 的长度和减少造价; 快循环同步加速器中将采用一系列先进技术, 像陶瓷真空盒、采用带内水冷的铝绞线圈主

磁铁和谐振电源系统、铁氧体加载腔技术等。这些先进技术在国内均是首次应用,这些新技术的研发将显著提高我国工业企业在相关领域的技术水平。

**靶站系统** 靶站是将高能质子脉冲转化成适合中子散射用的慢中子脉冲的转换器。经过加速器加速的高能质子脉冲入射重金属靶体,通过散裂效应产生大量中子,并用慢化器将其慢化成适合中子散射用的慢中子脉冲的设施。靶站采用扁平包钽钨片靶的优化设计,提高中子产额和靶的寿命。采用3个不同特性的慢化器,特别是内含低能中子吸收体的退耦合液态甲烷慢化技术,可获得波长合适的高强度脉冲中子,以满足不同学科对中子波长、能量、通量和分辨率的要求。3个慢化器共为中子散射谱仪提供了18条中子孔道。参照国际散裂中子源多学科应用的现状和未来20年科学的发展,根据不同散射谱仪设计对慢化器、中子飞行距离和中子探测器所需空间的要求,对相应的中子谱仪进行了全局规划,一期将建成其中3台谱仪。

**谱仪系统** 中子散射谱仪是用于中子散射实验的装置。在谱仪设计中采用超镜中子导管和立体分布多探测器系统等国际先进技术成果,提高中子的利用效率和谱仪分辨率。除使用传统的背底转子系统外,谱仪还将使用弯曲导管技术,以甩开快中子和C射线,提高信噪比。样品环境设备,将使用统一的国际通用装置,使同一环境设备(特别是极端条件设备)可在任一谱仪上使用,降低谱仪的投资成本、提高样品环境设备的使用效率。软件上,谱仪系统将利用目前先进的计算技术和网络技术,开发有效的数据处理、传输和分析系统、数据远程共享系统和谱仪远程控制系统。

## 七、我国的中、远期规划

由于中、远期发展所需占地面积及安全防护方面的要求,中国散裂中子源装置建设不能在已有研究所园区进行,而必须建设一个全新的基地。新基地选址在广东省东莞市大朗镇的一块丘陵山地,共规划1000亩装置和科研用地,一期建设占地400亩。图5为CSNS装置规

划效果图。

CSNS一期设计功率及脉冲中子通量位居世界前列,能满足目前国内大部分中子散射相关实验的要求。但我们同时看到,同美、日在建的兆瓦级散裂中子源相比,百千瓦级CSNS的主要指标还有一定差距。CSNS的科学寿命超过30年,为使这台装置长时间保持国际先进地位,满足日益增长的多学科用户的研究和应用需求,装置在设计阶段就充分保留了未来进一步升级的余地,并尽量减少在一期建设中为保留升级能力的投入。

为升级束流功率,在80MeV直线加速器之后预留一段空间,以备束流功率升级时,增加直线加速器长度、提高能量。能量提高至130MeV或250MeV的直线加速器,可将打靶束流功率提高到200kW或500kW。若考虑将快脉冲同步加速器的重复频率提高到50Hz,则CSNS有升级到兆瓦级束流功率的能力。中子谱仪可根据需要逐步增加到18台,同时可根据需要建设第二靶站。

为满足用户的需求,散裂中子源装置园区将建造一系列包括样品准备和预处理在内的实验室服务设施。在满足并发展散裂中子源用户的同时,可依托散裂中子源设施发展包括物理、化学、材料、计算等以中子应用为主的多学科中心。

CSNS的加速器是我国第一台高能强流质子加速器,除用于散裂中子源,还有潜在应用前景。从直线加速器的束流中引出极少量,即可用于质子治癌研究。同时,直线加速器束流还可用于工业辐照的研究等。利用同步加速器引出的质子束流,还可开展包括质子照相在内的核物理应用等研究工作。在



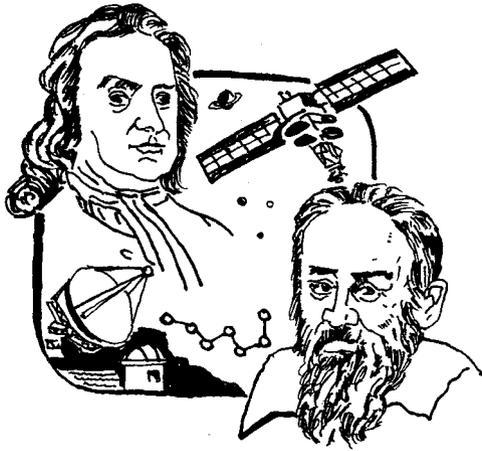
图5

# 伽利略惯性原理、牛顿体系及其宇宙佯谬

郭汉英

近代科学是在文艺复兴时期起步的,逐渐从神学的桎梏中摆脱出来。经过哥白尼、布鲁诺、开普勒、伽利略等先驱的不懈努力,到牛顿建立力学体系,取得极其伟大的成功。牛顿之后,经典力学又取得一系列重要进展;应用非常广泛而且重要。这里,主要考察有关伽利略惯性原理以及牛顿体系的宇宙佯谬等问题。

牛顿力学和引力定律是有近似的。首先,所有力学现象的描述,都离不开测量。在牛顿理论中,隐含着测量信号的速度为无限大,刚尺和钟的计时都满足欧几里德几何等假定。牛顿理论成立还有一些其他条件。通常,往往用/宏观、低



速0来表述这些条件。然而,这并不确切。例如,水星近日点的进动问题,既是宏观、又是低速,而牛顿理论却不能描述。大概除了欧几里德几何一些概念的近似之外,牛顿并不知道这些条件。对于这些条件的认识,经历了很长的过程。

牛顿体系的基础是伽利略惯性原理。这个原理包含惯性运动、惯性观测者、惯性参考系和伽利略相对性原理。当然,与所有的观念、原理一样,这个原理也是近似的、是大量观测中抽象出来的。然而,作为原理,起着极其重要的基准作用。后人发现,牛顿体系不能给出自恰的宇宙图景。在牛顿

设计阶段和整体布局中,均考虑了这些未来技术发展的需要,为这些依托于 CSNS 加速器的发展预留了空间。

开展加速器驱动洁净核能系统(ADS)的研究对于我国未来裂变核能的可持续发展开辟了创新的技术路线,可有效解决我国核能发展中核燃料不足和核废物处理的瓶颈问题。以散裂中子源的直线加速器为基础,可建设 ADS 系统的研究装置,开展 ADS 的基础性研究,同时还可利用同步加速器的脉冲束流在同一装置上开展 ADS 的研究工作。

以 CSNS 的加速器为基础,可进一步扩大规模更大的研究装置。例如可用 CSNS 的加速器作注入器(只需分出 CSNS 加速器束流的约 1% 即可),建设更高能量的同步加速器(约 30GeV),开展包括中微子和反质子在内的高能物理及核物理等基础科学的研究。

总之,根据国家科技发展需要,预计将在广东东莞建成一个以散裂中子源为主、包括多个大科学装置的大型科学研究基地,为国家的科技进步和创新做出巨大贡献。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 作者简介



韦杰,1963年生,1983年毕业于清华大学物理系,1989年于美国石溪大学物理系获博士学位。美国布鲁克海文国家实验室终身研究员。1986~1998年参加美国重离子对撞机 RHIC 的物理设计、研发、建造和束流调试,1997~1999年参加欧洲 CERN 大强子对撞机 LHC 对撞区的设计、担任 US LHC 项目 BNL 加速器物理部经理,1998~2002年主持美国 SNS 加速器储存环的物理设计,2000~2002年担任美国橡树岭国家实验室的散裂中子源 SNS 加速器物理组组长,2002~2005年任美国 SNS 储存环与运输线部主任、主持 SNS 储存环与运输线的建造。2005年接受中国科学院高能物理研究所聘请,担任中国散裂中子源加速器工程指挥部(筹)经理,2007年始担任中国散裂中子源工程(筹)经理。现为中国科学院高能物理研究所研究员。

本文根据5散裂中子源项目建议书6编写,作者代表中国散裂中子源工程项目组,编写过程中曾得到其他建议书编写人员的大力协助,在此一并致谢。