

电子离子对撞机

——研究核子结构的超级显微镜

陈旭荣

(中国科学院近代物理研究所 730000)

如果某种大灾难摧毁了所有科学知识,而只有一句话传给下一代生物,那么用最少的词来表达最多信息的陈述是什么?我相信这是原子假说,即万物都是由原子组成的,小粒子以永恒运动的方式运动,在彼此相距很小的距离时相互吸引,但相互挤压时会排斥。如果加上一点想象力和思想,你将在那句话中看到关于世界的大量信息。

——理查德·费曼(Richard P. Feynman), 1964年

一、引言

1870年,汤姆孙(Thomson)发现了电子,并提出原子是由带负电的电子镶嵌在带有正电的均匀球体表面(葡萄干布丁模型)。随着电子的发现,以及20世纪初的科学革命,尤其是在1911年,英国物理学家卢瑟福(Rutherford)采用alpha粒子散射实验发现原子拥有一个带正电荷的高密度中心(原子核),电子围绕在原子核外面,让我们了解到还存在比原子更小的原子核,以及组成原子核的质子和中子,统称核子,如图1所示。

核子作为可见物质世界的主要基础构建单元,具有复杂的夸克和胶子内部结构,是当代核物理学前沿领域之一。对核子结构的研究是人们认识物质结构的最前沿领域,还有一系列根本性的问题有

待解决,比如核子质量来源、核子自旋起源和夸克胶子禁闭机制等问题。

电子-离子对撞机(Electron Ion Collider, EIC)是一种大型粒子加速器,被视作是具有超高分辨率的“三维电子显微镜”,是研究核子结构的最理想工具。EIC用没有内部结构的电子轰击质子和更重的原子核,可以探索核子和原子核内部夸克和胶子的结构及它们之间的相互作用。借助这种超级显微镜,科学家们能获得世界上最清楚的核子内部三维图像,人类探索微观物质世界的知识边界将得到继续扩展。

二、研究现状

核物理是研究核物质的领域,根据能标的不同,分为中低能核物理核、高能核物理。强子包括介子和重子,是从物质中分离出来的、已观测到的具有内部结构的最小单元。质子和中子统称为核子,属于重子。质子内部的夸克-胶子结构属于当今人类正在探索的物质世界的最深层次,是高能核物理研究的重要领域。

决定强子量子数的夸克被称为价夸克,质子的价夸克就是(uud),它们能够对外表现出来;除此之外,任何强子都可能包含无限数量的虚拟“海”夸克、反夸克和胶子,它们不会影响其量子数。强子

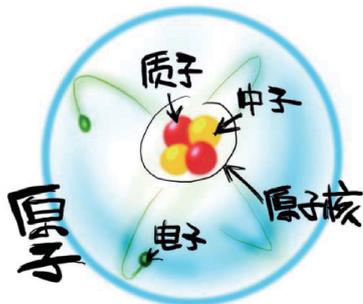


图1 原子结构。原子由原子核和电子组成,原子核包括质子和中子(两者统称为核子)

(图片来源: <https://zhidao.baidu.com/question/84449506.html>)

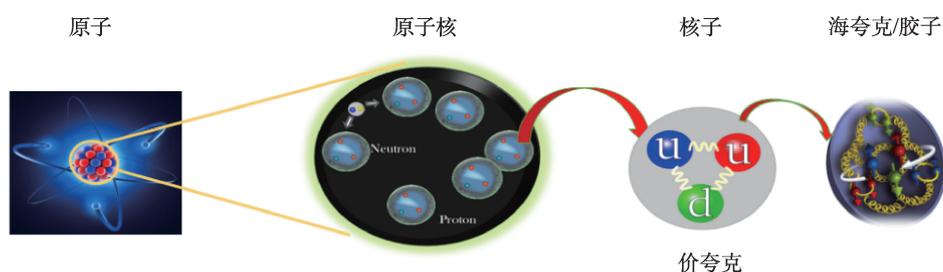


图2 物质结构,从原子到夸克和胶子

色场的胶子分裂时会形成海夸克,即虚拟夸克-反夸克。反过来两个海夸克会湮灭成产生胶子。在核子内部,真空中不断有正反夸克对产生又湮灭,胶子劈裂又重组,宛如一锅汤,形成了冒泡,沸腾,动态复杂的结构。

早期的加速器电子能量低,其德布罗意波的波长较长,所以最初物理学家认为质子自旋单纯来自组分夸克的自旋。但随着研究的深入和加速器技术的发展,人们发现电子与质子高能对撞会产生各种各样的粒子,这些粒子明显含有价夸克以外的其他种类夸克。现代观点认为,质子由价夸克(valance quark),胶子(gluon)和不断涨落的海夸克(sea quark)组成(图3)。

半个多世纪以来,人类对核子结构开展了长期理论和实验研究。理论上,组分夸克模型在1964年分别由盖尔曼和茨威格独立提出,认为介子是由夸克和反夸克所组成,重子是由三个夸克组成。盖尔

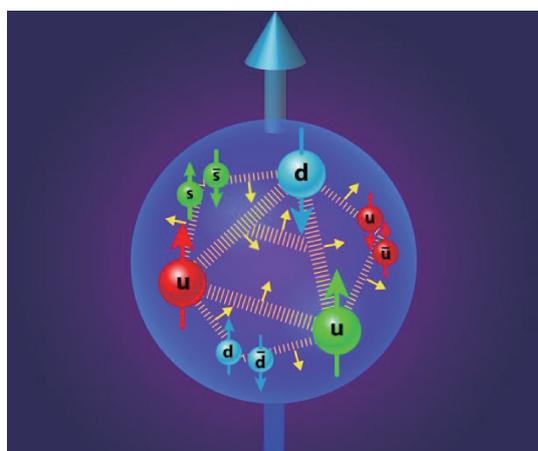


图3 质子内部结构

曼因此获得1969年诺贝尔物理学奖。基于夸克模型的强子谱研究,一直是核子结构研究的重要方向。实验方面,有关核子结构的实验研究已经诞生了三个诺贝尔奖,代表了核子结构研究发展的主要里程碑,分别是:核子反常磁矩研究(Stern, 1943年),第一次直接证明了质子为非点状粒子;电子散射测量核子的电磁形状因子(Hofstadter, 1961年),第一次观测到核子的电磁结构;深度非弹性散射实验与核子的夸克结构(Friedmann、Kendall和Taylor, 1990年),第一次证实了核子内部存在夸克。最近十年来,美国杰斐逊实验室(JLab)利用较低能量的电子束流对质子内部的价夸克的一维结构作了系统的研究,而核子的三维结构,直到最近才真正开始研究。

在我国核物理理论研究领域,已经形成了由来自多个研究机构的理论研究者组成的核子结构与QCD理论研究团队,并已跻身世界一流行列。他们对核子和原子核结构研究中提出了独到见解并取得了突出的成果:如QCD演化方程的改进、小 x 物理唯象学研究、角动量的规范不变分解理论、因子化定理和强子化机制的研究等,同时,基于修正的DGLAP方程,建立了质子和原子核的部分子分布函数数据库IMParton和nIMParton。这些理论研究将在EIC预研和实验数据分析中发挥重要的作用。实验方面,我国核物理学家参加了国外实验,已经形成一支比较大的研究队伍。所以,在理论和实验两方面,我们都已经有了比较好的基础,我们有能力提出和建造我们国家自己的电子离子对撞机。

三、电子离子对撞机的物理目标

在高能核物理领域,除了QCD相变外,另一个重大的课题便是核子结构。对胶子和海夸克进行研究需要更高能标的电子-离子对撞机。被视为“超级电子显微镜”的EIC装置,将是研究核子结构和原子核内夸克胶子分布的最有效设备,能够帮助科学家精确测量核子一维自旋结构和三维结构。图4总结了各种结构函数及其测量方法等。

自从EMC对质子自旋成分进行观测以来,我们已经取得了一系列的进步。但是,一维结构的实验结果误差依然比较大,尤其是海夸克的极化分布的误差依然很大,导致对质子自旋的各种来源缺乏准确的认识。因此,海夸克自旋分布的精确测量是当前实验和理论面临的重要任务之一。在继续提高核子一维结构测量精度的同时,随着理论和实验的发展,科学家们已经开始考虑测量核子的三维结构TMD和GPD了。TMD和GPD包含非常丰富的核子内部结构信息。当前,对于GPD和TMD的测量是极有吸引力的QCD研究前沿。可是,目前TMD和GPD的理论模型、计算和实验测量仍在发展阶段,亟需各类精确的实验数据,因此针对这些分布函数的研究是当前核子结构实验测量和QCD理论研究的重要前沿。未来的国内外EIC实验项目都将对核子的三维结构列为最重要的目标之一。这些测量深化了人们对核子结构和强相互作用的认识。

作为亮点,我们主要介绍EIC将解决如下三个核心科学问题:

1. 质子质量起源

质量是粒子的最基本性质之一。夸克组成质

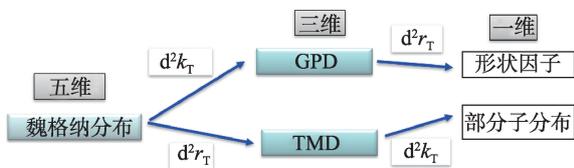


图4 质子一维和三维部分子分布函数

子的质量使用两个术语:流夸克质量是由希格斯机制产生的夸克质量,而组分夸克质量是指流夸克质量加上凝聚在流夸克周围的胶子场的质量。因此,虽然胶子本身没有质量,而包含胶子的核子却很重(一个核子的总质量比它所含的价夸克的质量大100倍)。核子的质量如何产生,还是一个谜题。解决质子质量的组成问题,并因此了解产生宇宙中所有可见物质的质量,是核物理与粒子物理中一个非常基本和有深刻物理意义的问题。

宇宙可见物质主要由质子和中子构成,这些强子是由夸克构成的。希格斯机制给宇宙中的万物赋予了质量。然而,希格斯场只给夸克和电子这样的基本粒子赋予了质量。由希格斯机制产生的夸克质量仅约占质子质量的1%(图5)。科学家将其余99%的质子质量归因于胶子相互作用,是一种强相互作用引起的量子效应。将夸克聚合在一起的强核力承担了质子大部分“赋予质量”的工作。然而,强核力所赋予物质的质量和由希格斯机制产生的质量是不同的,同时也并不是相互独立的。

目前,有QCD理论将质子质量分解为四个部分,其中能动量张量的迹反常的物理本质是质子质量问题中最不清楚的部分,这可以通过矢量介子Upsilon粒子产生过程的近阈产生截面的测量来研究:因为该截面对Upsilon粒子与核子间的非微扰胶子相互作用非常敏感,表现为在近阈截面的增强。作为未来研究质子质量物理起源的唯一强相互作用对撞机,EIC能首次精确测量Upsilon粒子在

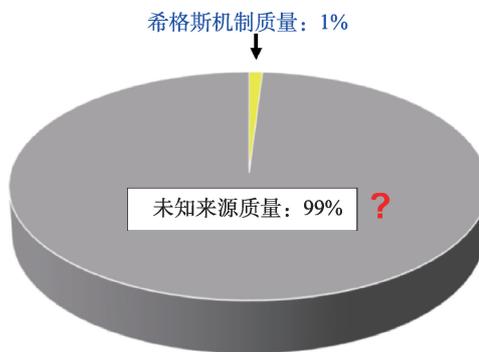


图5 宇宙中可见物质组成。希格斯机制产生的质量只占可见物质的1%左右,99%的可见物质的质量来自核子

阈值附近的产生截面。科学家结合粲味 J/ψ 粒子在阈值附近的产生,将深入了解 QCD 迹反常机制对质子质量的贡献。这对于理解和最终解决质子质量问题非常重要,还将促进我们从质量角度进一步理解强相互作用和 QCD 性质。

2. 质子自旋问题

质子自旋来源复杂:包括价夸克、海夸克和胶子的极化与轨道角动量贡献。人们直观的想法是,质子 $1/2$ 的自旋角动量来自两个自旋平行的夸克和另一个自旋反平行的夸克。然而电子与质子的散射实验发现,我们所知道的构成质子的三种夸克所具有的自旋角动量仅贡献了质子自旋的一小部分。这一历史事件也被称为“自旋危机 (spin puzzle)”。“质子自旋危机”使核子结构研究进入一个新时代。目前为止,我们知道质子内的价夸克,也就是 u 和 d 夸克,只贡献了 30% 的质子自旋。海夸克和胶子可能贡献 50%,但是至少还有另外 20%~30% 的自旋来源是不清楚的(图 6)。

国际上自 20 世纪 80 年代末 EMC 实验揭示核子自旋问题以来,核子自旋物理的研究一直十分活跃,国际上多个实验室通过一系列极化轻子-核子深度非弹散射 (DIS) 精确测量了核子自旋结构。SLAC, DESY 和 CERN 等实验室都曾对核子结构进行了卓有成效的研究。目前,世界上实验结果精度最高的实验室是 JLab, 它的加速器提供电子连续束流,最高能量从原来 6 GeV 刚升级至 12 GeV;亮度达 $10^{39}/\text{cm}^2\text{s}$;在极化束流和极化靶的情况下,亮度仍可高达 $\sim 10^{36}/\text{cm}^2\text{s}$,这保证了实验的高统计性。JLab 的束流能量,决定了其主要研究对象是质子内的价夸克。因此,要彻底解决质子自旋问题,EIC 是必不可少的研究装置。EIC 主要目标是确定海夸克和胶子自旋贡献及其轨道角动量。

3. 色玻璃凝聚现象

胶子在物质中的性质(即它们的排列或状态,以及它们如何将夸克结合在一起的细节)尚不为人所知。物质中的胶子与宇宙中的暗物质有相似之

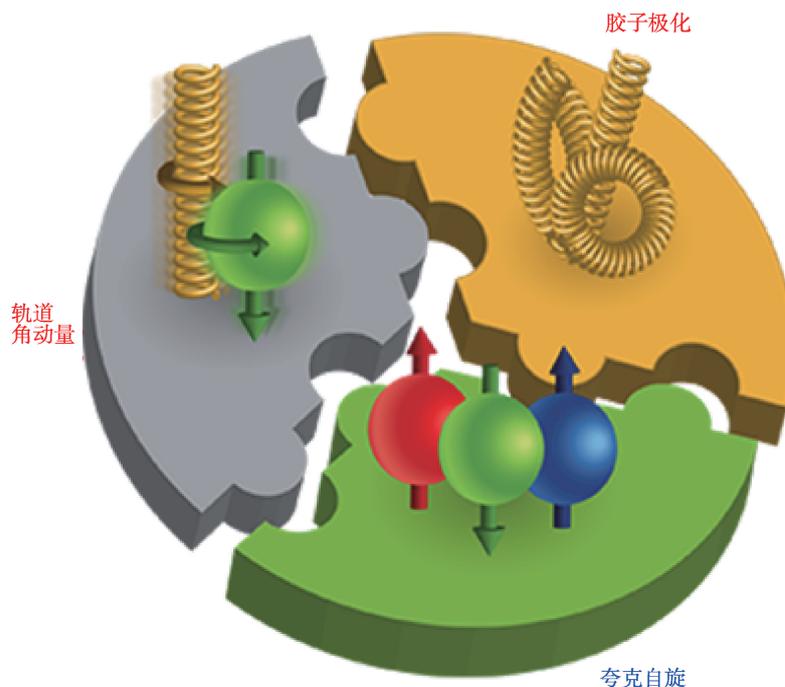


图 6 质子自旋来源

处:虽然看不见,但都起着至关重要的作用。就像凝聚态物理中有著名的玻色爱因斯坦凝聚一样,在 高能核物理中,也有一个类似的现象——“色玻璃凝聚”。如果设法将质子加速到接近光速,就会展 现出一种奇异的现象:质子内部胶子的数量急剧增加。这是因为,光速飞行的“胶子”会分裂,形成一 对能量较低的胶子,产生的胶子还会发生进一步的 分裂。最后,质子内部的胶子数量将达到一个上 限,胶子的数量不再增加,这时,光速飞行的质子所 表现出来的状态就被称为“色玻璃凝聚态”(Color Glass Condensate, CGC)。色玻璃凝聚的存在是 QCD 中胶子自身相互作用的一个直接结果(图 7)。色玻璃凝聚现象对于理解宇宙中的物质至关重要。

量子色动力学理论表明,色玻璃凝聚的能标 Q_s^2 正比于原子核质量数 A 的三分之一次方,所以电 子-重离子碰撞比电子-质子碰撞更容易观察到色 玻璃凝聚现象。EIC 上的重离子束流能为我们提供 一个探索饱和区域和 CGC 性质的途径。相比于 HERA, RHIC 和 LHC 仅仅发现了饱和胶子物质的

线索,EIC 凭借着较宽的运动学区间,以及在单举和 半单举非弹性散射过程中探测多种原子核的能力, 将有望成为第一个确定色玻璃凝聚现象的装置。

四、建设电子离子对撞机

目前,国际核物理界已基本形成共识:EIC 是研 究核子、原子核内夸克胶子分布的最有效装置。 EIC 实验及其相关物理研究是全球高能核物理界竞 争非常激烈的一个领域,是国际高能核物理界的最 优先研究计划之一。美国和欧洲都正在计划建造 高能电子离子对撞机,并已经有了一些概念设计和 物理研究。

美国科学界已确定 EIC 是其核物理发展的重 点,并要力争世界领导地位。2018 年发布的《美国 电子离子对撞机科学评估报告》明确指出了电子离 子对撞机在科学上的重要性:“核子质量如何产生 等重大科学问题需要一个有高度极化的电子和离 子束流的 EIC,这个 EIC 还要有足够高的亮度以及

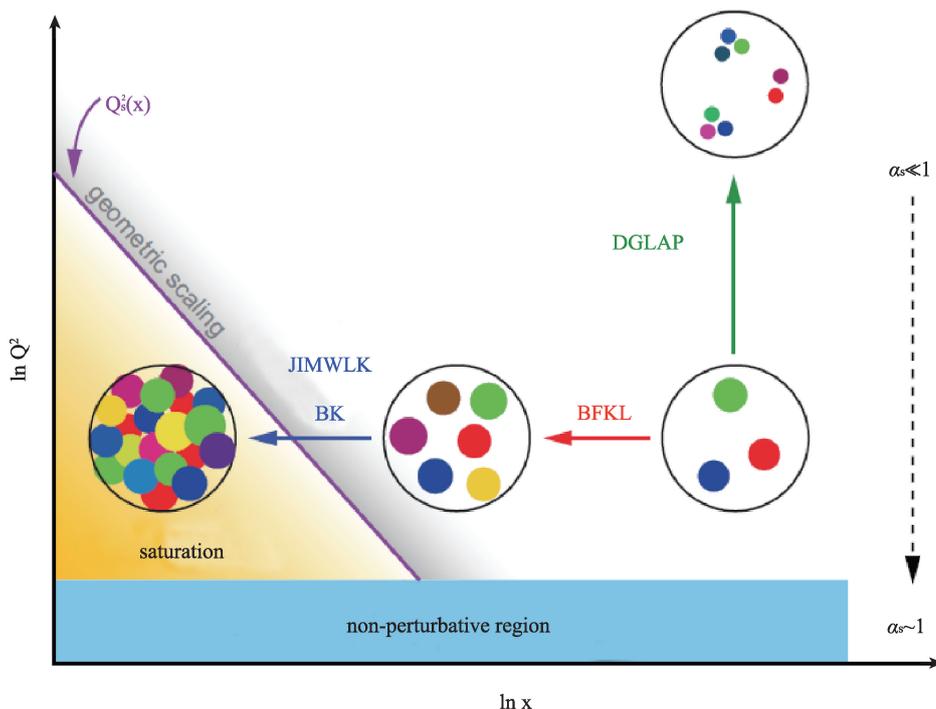


图 7 QCD 演化:探针分辨率 vs. 能量图。图中指出了非微扰和微扰 QCD 区域,在微扰区,部分子分布函数 根据 DGLAP 或者 BFKL/BK/JIMWLK 等方程演化(图片来源:美国 EIC 白皮书)

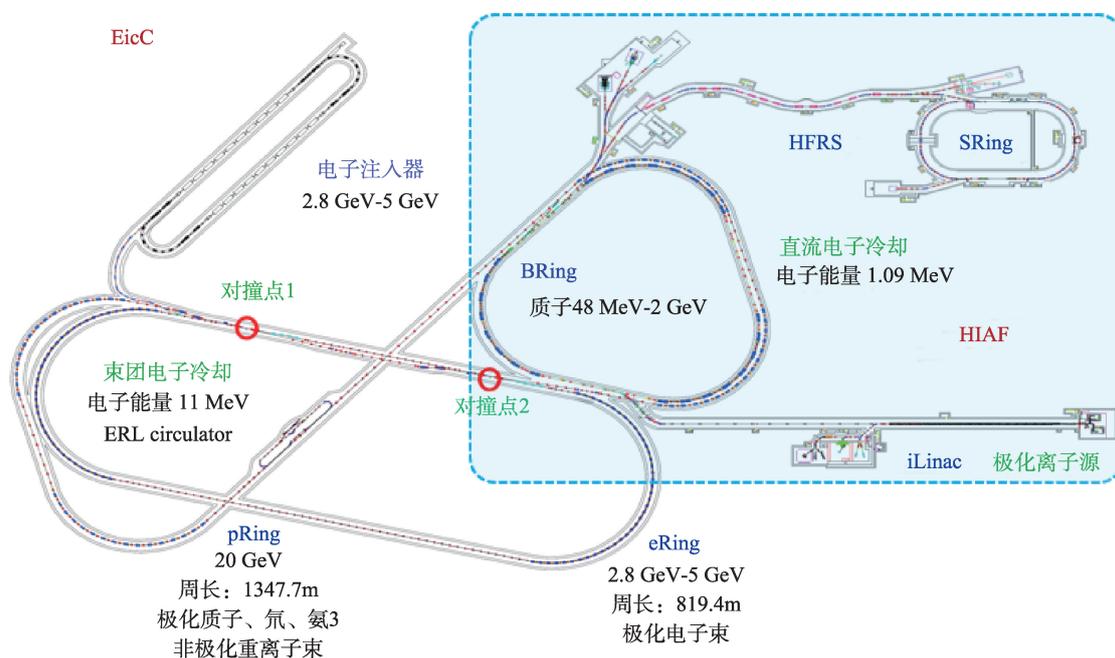


图8 在HIAF加速器基础上建设的中国电子离子对撞机EicC装置设计图

足够的并且可调的质心系能量。”评估委员会一共给出了9个调查结果。其中第一个调查结果是:只有EIC能够回答关于核子(即中子和质子),以及它们如何组成原子内部的原子核的3个重大问题:核子质量是如何产生的?核子自旋是如何产生的?胶子高密系统的涌现(emergent)属性是什么?

接着报告还提到,这样一个EIC装置将是世界上独一无二的装置,将使美国在世界上保持核物理、加速器科学以及对撞机技术上的领导地位,并有助于保持更广泛领域的科学领导地位。

2020年1月9日,美国能源部宣布:选定位于纽约州的布鲁克海文国家实验室承建大型核物理研究设施——电子离子对撞机eRHIC。eRHIC的目标聚焦在能区。在该能区,胶子动力学起主导作用。

中国电子离子对撞机计划也正在计划中。我国核物理领域的科学家经过多次战略研讨会和咨询会,已形成共识:充分利用广东惠州在建重大科技基础设施及其升级计划,确立我国在核物理前沿及交叉领域研究的优势,加速取得重大原创性成

果。基于我国2050年大科学装置发展路线图的规划,由中国科学院近代物理研究所最早于2012年主导提出,在强流重离子加速器装置(HIAF,已于2018年底在广东省惠州市开工建设)的基础上,添加一条新的电子束流,建成电子束流和质子/重离子束流均极化的中国电子离子对撞机(EicC)。该装置基于已有的强流重离子加速器装置HIAF,采用环形对撞机方案,建造一台“8”字型离子环pRing、一台电子注入器以及一台跑道形电子环eRing。EicC装置质心系能量位于15~20 GeV的区间。

探针尺度由对撞机的能量决定。EicC的探针尺度大约在质子的百分之一到千分之一左右,是研究海夸克的最佳区域。EicC建成后,将是世界上第一台运行于海夸克能区的极化电子离子对撞机。EicC的主要物理目标包括海夸克一维和三维结构的精确测量,原子核结构与性质、奇特强子态和质子质量起源等重大基础科学问题的研究。美国 and CERN 未来的 EIC 装置主要优势是研究胶子。HERA 实验获得了很多核子结构方面的实验结果,但是该实验的缺点是只有 ep,没有 eA,而且质子束

流没有极化,其亮度也偏低($10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。因此,EicC将是世界上第一台高亮度的双极化的电子离子对撞机。在EicC建成后,科学家将把核子结构的研究推入小 x 领域,即海夸克甚至胶子能区,开辟核物理研究的新领域。

EicC的设计为未来发展留有空间。EicC将在一期的基础上,进一步提高束流能量和亮度,建成EicC二期。EicC二期将精确测量核子及原子核中胶子和夸克海的多维自旋分布并寻找超出标准模型的新物理。将来可能进一步和Super tau/charm装置结合。

EicC的最主要目标之一是研究质子质量的起源,这和由中科院高能物理研究所提出的希格斯工厂——CEPC存在“互补关系”。一期建设CEPC作为希格斯粒子(Z 玻色子)工厂,精确测量希格斯性质,深入研究标准模型、电弱对称性自发破缺机制和质量起源等基本问题,寻找超出标准模型的新物理的线索。CEPC研究的是夸克这样的基本粒子由希格斯机制引起的质量起源,而EicC研究的是由强相互作用引起的强子层次的质量起源。这两种质量起源是相互补充的,我们只有同时理解了夸克和强子的质量起源,我们才真正理解强相互作用力和物质结构。

中国EicC和美国的杰斐逊实验室(JLab)装置和美国EIC主要有什么不同呢?能量和物理目标不同。EicC能量位于正在运行的JLab装置和美国EIC之间的空白区。三大装置的物理目标相互补充:EicC主要研究海夸克结构,而美国EIC集中于胶子物理研究,目前正在运行的杰斐逊实验室则主要研究价夸克结构。

五、结语

现代核物理的基本目标是研究强、弱和电磁三种相互作用在核物质微观层次的各种物理现象,理解宇宙的起源与演化、可见物质的基本结构。自卢瑟福发现原子核以来,经过一百多年的努力,人类

已经在核物理研究中取得巨大和重要的成功,从根本上影响了过去一百年的社会发展和科学研究。电子离子对撞机的建造,将使核物理的研究迎来一个新的时代,非常有希望获得一批国际领先的重要成果和重大发现。

作为一种重要的大型新科学装置,电子离子对撞机的设计、建造和运行将对其他学科产生重大影响,将为社会带来巨大利益。除了加速器,探测器和芯片等技术,EIC装置还将影响其他研究领域,包括格点QCD、粒子物理学、高能天体物理及原子和凝聚态物理,等等。

借助EIC激动人心的物理学前沿计划,核科学将继续吸引大批优秀的年轻人投入到这项探索核物质结构最前沿的基础研究中去。

致谢

感谢EicC合作组全体成员,特别感谢南京大学王凡教授和近代物理所靳根明研究员为本文提出许多很有价值的意见和建议,特别感谢刘芳女士在文字组织、润色和提高可读性等方面的帮助。

参考文献

- ①《中国极化电子离子对撞机计划》,曹须,常雷,畅宁波,等.中国极化电子离子对撞机计划.核技术,2020,43(2):020001。
- ②INT report, arXiv:1108.1713.
- ③ Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier Understanding the glue that binds us all, arXiv:1212.1701.
- ④ 美国2015年核物理中长期规划, NSAC, Reaching for the Horizon: the 2015 US Long Range Plan for Nuclear Science (2015) <https://science.energy.gov/np/nsac>.
- ⑤《美国电子离子对撞机科学评估报告》,美国科学、工程与医学院(NAS),National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. An Assessment of U.S.-Based Electron-Ion Collider Science. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25171>, 2018.
- ⑥ Xiang-Song Chen, Xiao-Fu Lu, Wei-Min Sun, Fan Wang, T. Goldman, Phys.Rev.Lett. 100 (2008) 232002; 103(2009)062001; Phys. Rev.Lett. 103 (2009) 062001
- ⑦ The chaotic effects in a nonlinear QCD evolution equation, Wei Zhu Zhenqi Shen Jianhong Ruan, Nuclear Physics B, Volume 911, October 2016, Pages 1-35.