



现代核物理及其发展

石宗仁

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本文概述了核物理新的研究机遇. 这机遇是: (1) 在核介质内, 寻找和研究夸克自由度, 研究强相互作用的基本理论 QCD; (2) 研究核物态方程; (3) 研究夸克胶子等离子体 (QGP); (4) 研究各种极端条件下的核结构; (5) 核介质用于精确研究强、电弱相互作用的基本性质等. 为此, 4GeV 连续束电子加速器 CEBAF、相对论重离子对撞机 RHIC 正在建造, 强子装置和放射性核束加速器正在筹备.

关键词 夸克自由度, 夸克胶子等离子体, K 介子, 放射性核束, 连续束, 对撞机.

1 引言

核物理是以核为对象研究物质性质的一门科学. 它研究核的结构, 核内组分间的相互作用及核间碰撞规律. 由于核本身具有许多独一无二的特点, 现代核物理将它视为精确检验和发展标准模型的良好“实验室”.

目前, 核物理正面临新的发展、新的研究机遇, 主要集中于四个方面^[1,2]: (1) 在核介质内寻找和研究夸克自由度, 研究强相互作用力的基本理论 QCD; (2) 研究各种情况下的核物态方程, 特别是形成和研究夸克胶子等离子体 (QGP); (3) 高温、高角动量及不寻常中子和质子数比的极端条件下的核结构和天体物理研究; (4) 用核介质精确研究强、电弱相互作用的基本性质, 也包括太阳中微子问题. 四方面的每一个都包含广泛的内容, 它们构成了现代核物理的研究方向.

为了适应新的核物理研究, 国际上正在或筹备建造新一代大型加速器. 例如: 多个 GeV 连续束电子加速器, 相对论重离子对撞机, 强子装置及放射性核束加速器等.

2 现代核物理的四个主要研究内容

人们对核的认识是从外向内逐层深入的, 研究范围从一般到特殊, 从正常到奇异逐步扩大. 核物理的每一发展阶段都与技术进步, 特别是与加速器技术的发展紧密相关的.

2.1 核内的夸克自由度^[1,2,4]

至今, 可以认为原子核的组成成分四个层次: (1) 原子核是由紧密束缚在一起的核子组成, 没有单个核子的运动. 它好象是一个液滴, 有集体的转动或集体表面振动; (2) 当核子在其它所有核子提供的平均势场内运动时, 单个核子的轨道性质, 粒子-空穴激发等决定了核的性质, 核子自由度体现出来了, 它成为核组成的第二个层次. 这第二个层次是强相互作用力和泡利原理竞争的结果, 低能核物理就是基于这两个层次. (3) 在第三个层次, 原子核是由核子、介子及核子激发态组成, 现在, 人们称参与强相互作用的介子、核子及超子等为强子, 原子核是由强子构成的, 相应的理论是强子动力学 (QHD). 以上面三个层次为基础的核物理也称为传统核物理; (4) 1964 年, Gell - Mann 提出了强子的夸克模型, 他认为核子是由三个夸克组成的, 介子是由正、反两个夸克组成的, 即强子是由夸克组成的, 这是一种新的统一的概念. 不久, 在美国的 SLAC 实验室, 利用 25GeV 的电子深部非弹散射实验证明了核子内的夸克概念. 夸克间的相互作用力是靠胶子为媒介传递的色力. 在第四个层次上, 原子核是由夸克和胶子组成, 相应的理论是量子色动力学 (QCD).

当前, 核物理的中心问题是核子、原子核及所有强子是如何由夸克构成的, 色中性的核

子如何由色力实现强相互作用的。最终,希望用夸克胶子统一地描述原子核,在统一的框架下描述四个层次。实验上,研究夸克自由度的最好探针是高能电子,特别是连续电子束。

2.2 新的物质形态——夸克-胶子等离子体(QGP)

长期来,核物理研究基本上是在正常核温度和核密度范围进行的.要得到从低到高的核温度和核密度,从而研究核物态方程,必须在实验室内产生夸克胶子等离子体,来研究大距离的 QCD 和模拟天体演化过程。QGP 的独特信号是什么?至今不能说是唯一的确定了,它仍然是值得深入研究的。QGP 可通过速度极高的两个重核对撞来实现。

2.3 K 介子核物理^[1~3]

根据夸克模型,中子和质子分别由上(u)和下(d)夸克组成,中子的夸克结构为(udd),质子的夸克组成为(uud)。在 70 年代国际上发展的中能核物理研究中,曾利用能量小于 1GeV 的质子加速器产生了质量为 140MeV、寿命为 2×10^{-8} s 的 π 介子,然后用 π 介子作探针研究核的各种性质及 π 介子与核碰撞的规律。在夸克模型中,三种不同类型的 π 介子的夸克组成分别为 π^+ (u \bar{d}), π^0 ((u \bar{u} - d \bar{d})/ $\sqrt{2}$)及 π^- ($\bar{u}d$)。可见,无论低能,还是中能核物理,参与作用的都是以上、下夸克为基本成份。显然它们只能反映出核与上、下夸克有关的性质。

质量为 494MeV 寿命为 1.24×10^{-8} s 的 K 介子含有一个奇异夸克(s)。三种 K 介子的夸克组成分别为 K^+ (u \bar{s})、 K^0 (d \bar{s})及 K^- ($\bar{u}s$)。如果用 K 介子做探针,就能得到与奇异夸克有关的各种性质。同时,K 介子具有许多新奇的特性。这些特性是:(1) K^0 介子衰变中,时间反演不守恒,即 CP 破缺;(2) K^- 与中子相互作用可产生超子 Λ 或 Σ ,形成超核,从而可研究核内夸克是否去禁闭(deconfinement);(3) K^+ 在核物质内有很长的自由程,约 7fm,可以研究核内部的性质;(4) K^- 在核内自由程短,约 1fm,可以研究核表面的性质,与 K^+ 互补;(5)理论上预言的含有 6 个夸克的 H 粒子可以通

过(K^-,K^+)交换反应实现;(6)稀少衰变事件 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ 对检验和发展标准模型是极灵敏的。由于 K 介子具有这些特点,所以人们设

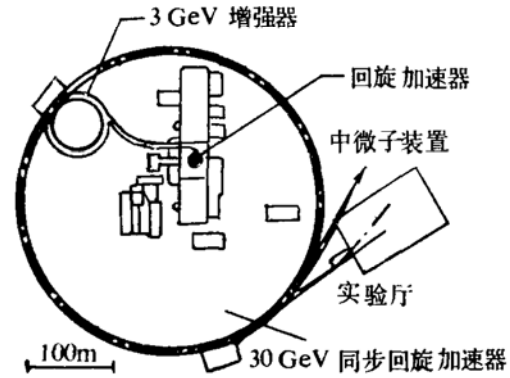


图 1 加拿大 TRIUMF 强子装置(KAON)概图

法寻求强度高,品质好的 K 介子束。

几十个 GeV 的质子强流加速器,又称强子装置,可以产生比现在高 50~100 倍强度的 K 介子束。

2.4 放射性核束核物理^[4]

除少数探索性的工作外,人们一直是利用地球上存在的稳定核做炮弹轰击另一个稳定的靶核,从而研究核结构及其碰撞规律。从稳定核间的碰撞得到的信息是比较正常的,或者说是全面的。基于这些信息的理论也不可能充分、全面地反映强相互作用的性质及核多体系统的行为。

理论预言有 8000 多种寿命长于 μ s 的原子核,地球上存在的稳定核大约 300 种,人工已经合成 2400 种,显然人工合成的原子核种类繁多。更重要的是它们具有许多特殊的性质,例如,最后一个或几个核子束缚较弱,并可占据特殊的量子轨道,如 $\nu K_{17/2}$;不寻常的中子与质子数目比(N/Z);高 Q 值;奇异的结构,……等。如果用人工合成的原子核做炮弹(称为放射性核束,简称为 RNB)轰击稳定的靶核,必然得到稳定的弹-靶组合所得不到的原子核,它们可出现在滴线上或滴线外;可产生完全的同位素或同中子素的核链,从而系统研究核形变同核子数及填充轨道的关系,以及

强相互作用力同它们的关系;在丰质子区产生一系列 $N=Z$ 的自轭原子核,包括长期寻找的双幻核 ^{100}Sn . 由于 $N=Z$ 壳效应得到加强,将出现稳定的奇异形变. 例如,超形变的 ^{100}Zn ; 超巨形变的 ^{100}Mo 、 ^{100}Ru 和 ^{100}Pd ; 八极形变的 ^{100}Ge 、三轴形变的 ^{100}Ti 和 ^{100}Kr ; 大的扁球形核 ^{100}Kr 等; 在丰中子区产生带有中子晕环(neutron halo)的原子核.

由于利用 RNB 产生的原子核具有不寻常的同位旋量子数,它们将有奇异的衰变方式,如质子发射、两个中子或质子发射、 β 发射后中子、质子再发射或裂变;将为天体物理的研究提供能量的产生、核素的生成和天体时间的标度等重要数据.

用放射性核束研究核物理是低能核物理的深化和必然发展,它将为人们认识强相互作用及核多体系统提供全面、丰富的信息.

3 新一代大型加速器

加速器是核物理研究首要必备的工具. 适合当代核物理的四个主要研究内容的现代加速器应具有强流、可变高能、包括次级束在内的好的束流品质以及连续波等.

3.1 4GeV 连续束电子加速器(CEBAF)^[2,5]

1987年,美国 Virginia 的 Southeastern 大学建造一台连续波(CW)、0.4~4GeV、流强为 $200\mu\text{A}$ 、电子极化大于 0.4 的电子直线加速器,简称 CEBAF. 预计 1994 年运行,1996 年达到指标. 加速器由两个 0.4GeV 的超导直线加速器构成,其核心部件是一组超导射频腔,每米提高电子能量 5MeV,在液态氮 2K 温度下工作,电子在加速器内循环 5 圈后能量达到 4GeV. 特点是 100% 占空因子(duty cycle),即连续束流,从而可开展符合(exclusive)和反应平面外(out of plane)的测量工作. 极化靶和极化束,以及反冲质子极化测量技术受到了重视,从而可开展自旋观察量(spin observable)的研究. 欧洲正在筹建一台 15GeV 连续束电子加速器(EEF),美国的 Bates 和荷兰的 NIKHEF 都将原来的电子直线加速器能量从 500MeV 提高到 1GeV,并配置了拉长/储存环(Stretcher/storage),实现连续束流,特别是极

化内靶技术将在储存环内得到应用.

3.2 相对论重离子对撞机(RHIC)^[2]

1991年,美国布鲁海文实验室(BNL)开始兴建 100GeV/u 的重离子对撞机,它由下面几部分组成,首先在串列加速器(TANDEM)产生重离子,经 550m 的输运注入同步增强器(Booster),提高重离子能量,使核外电子绝大部分被剥离,如将 Au 原子的 79 个电子剥离 77 个后注入可变梯度同步加速器(AGS),使能量达 14.6GeV/u;核外所有电子被剥离,最后注入相对论重离子对撞机(RHIC). RHIC 由间距 90cm 的两个超导磁环组成,磁场强度为 3.5T,重离子在环内被加速、储存及碰撞、环的周长为 3.8km. 束流填充时间大约 1min,每环内离子强度为 10^{11} ,在环内经 60s 加速达到最高能量,离子在环内寿命达 11 小时,一天填充两次即可. 有六个碰撞点,三个用于实验.

RHIC 的主要研究目的是寻找夸克胶子等离子体. 另外还有广泛的核物理,原子物理研究计划准备上机实施.

3.3 强子装置(KAON)^[4]

加拿大的 TRIUMF 正筹备建造一台平均 $100\mu\text{A}$ 、30GeV 的强流质子加速器. 它是一台加速器的组合体,共有五个环组成,其中三个用于加速,两个用于储存. 它们分别是现有的 500MeV 回旋、累积环(Accumulator)、3GeV 同步增强器(Booster)、收集环(Collector)及 30GeV 的延展环(Extender Ring). 整个加速器概图示于图 1.

主要目的是产生强流 K 介子束,以从事 K 介子物理研究.

3.4 放射性核束加速器^[4]

本文仅介绍文献[4]中提议的、基于在线同位素分离方式的放射性核束(RNB)加速器装置. 它由 RNB 产生加速器和靶、离子源、同位素分离器及后加速器组成. RNB 产生加速器为 0.5~1GeV 强流($\geq 100\mu\text{A}$)质子加速器,也可加速氘和 ^3He ,通过散裂(Spallation)和裂变等反应得到质量数从 1 到 240 的 RNB. 后加速器将使 RNB 能量达到 0.2~10MeV/u,并可变,最好是连续束流. 技术关键是放射性核束产生靶及离子源. 整个建议装置在图 2 中

装置. 它由 RNB 产生加速器和靶、离子源、同位素分离器及后加速器组成. RNB 产生加速器为 0.5~1GeV 强流($\geq 100\mu A$)质子加速器, 也可加速氘和 3He , 通过散裂(Spallation)和裂变等反应得到质量数从 1 到 240 的 RNB. 后

加速器将使 RNB 能量达到 0.2~10MeV/u, 并可变, 最好是连续束流. 技术关键是放射性核束产生靶及离子源. 整个建议装置在图 2 中给出, 质子加速器及后加速器都有几种选择.

为了全面系统的研究核物理发展所面临

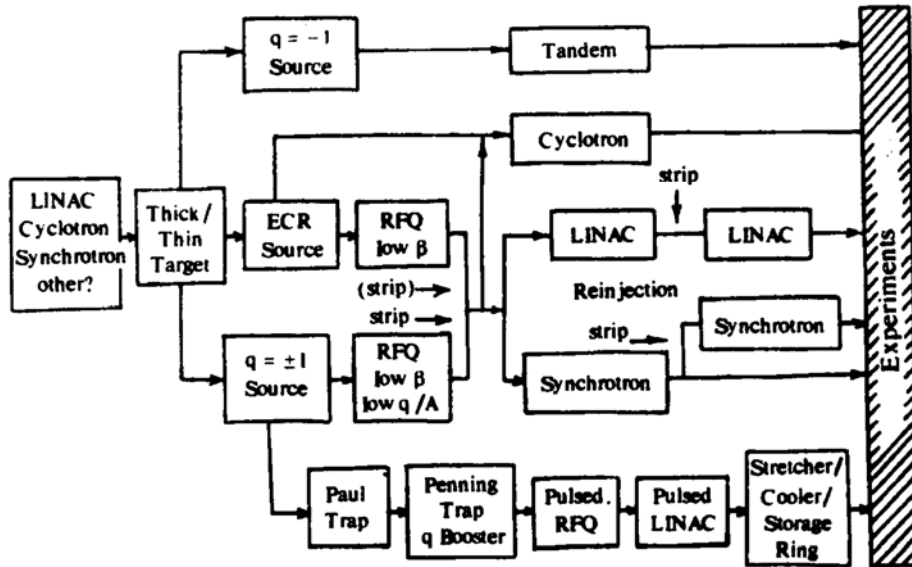


图 2 基于在线同位素分离的放射性核束加速器的建议方案

的四个方面, 除多个 GeV 连续束电子加速器, RHIC, 强子装置及放射性核束加速器外, 其他设备也是需要的. 例如: (1) 1GeV 以上的 π 介子装置; (2) 0.5~1 GeV/u 的高分辨重离子加速器; (3) 用于极化轻离子的 10~20GeV 的冷却环; (4) 能量大于 60GeV 的强子装置; (5) 高注量的冷中子和超冷中子源等.

作者感谢姜承烈同志给予的帮助.

参 考 文 献

1 Physics Through the 1990s, Nucl. Phys., National

Academy Press, Washington, D. C. 1986

2 "Nuclei, Nucleons," Nuclear Science in the 1990s, A long Range Plan by the DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee

3 A Proposal for Japanese Hadron Project Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, April 21, 1987

4 "The Isospin Laboratory" (ISL), Research Opportunities with Radioactive Nuclear Beams, LALP 91-51

5 Franz Gross, "CEBAF Scientific Program" Proceedings of CEBAF Workshop, Sep. 1, 1986

6 Craddock M K, "High Intensity Circular Proton Accelerators" TRI-87-2

Modern Nuclear Physics and Its Development

Shi Zongren

(Institute of Atomic Energy China, Beijing 102413)

Abstract The most new scientific opportunities of nuclear physics are; the exploration of the

quark degrees of freedom and of the underlying theory of the strong interaction, QCD, in the nuclear medium; the study of the nuclear equation of state and of quark-gluon plasma (QGP); the study of nuclear structure at the limits of temperature, angular momentum, and neutron-to-proton ratios; the use of the nuclear medium for precision studies of fundamental aspects of the strong and electroweak interactions. To do these, the 4GeV continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) and Relativistic Heavy Ion (RHIC) are being constructed, Hadron Facility (KAON) and Radioactive Nuclear Beam (RNB) Accelerator are in preparation.

Key Words quark degrees of freedom, quark-gluon plasma, kaon, radioactive nuclear beam, continuous beam, collider.

1993年穆斯堡尔效应应用国际会议召开

1993年穆斯堡尔效应应用国际会议(ICAME——93)于8月7日至8月14日在加拿大温哥华 British Columbia 大学召开。来自38个国家和地区的365位代表参加了这次会议。国际著名科学家、诺贝尔物理奖获得者、穆斯堡尔效应的发现者R·L·穆斯堡尔教授应邀出席了会议并作了报告。

这次会议共收到论文733篇,这些论文涉及了当前穆斯堡尔谱学研究的各个方面。会议共分化学、化学结构与键、矿物、地质和考古;生物和医学应用;材料科学与工程学;基础物理和同步辐射研究;理论,方法学、实验技术和数据处理;表面、介面、超晶格和多层膜;低维材料;晶格动力学;相变、弛豫和后效应;离子注入、辐射损伤和表面改性;超导;催化剂和腐蚀;磁性材料和磁学;非晶态材料、准晶、纳米材料;金属和合金;半导体、电和光学材料等18个专题。可以说这些专题几乎涉及研究物质微观结构的自然科学各个领域。

从本届会议研究课题的分布情况可以看出,在基础研究、应用研究、新材料、新方法等方面都有很大的进展。最活跃的课题似乎是有比较明显应用前景的非晶态材料、纳米材料、低维材料、半导体材料、电和光学材料及催化剂等方面。此外,在工业生产上的应用课题受到极大的重视。在基础研究方面正在采用各种最新发展的方法,使用同步辐射作为穆斯堡尔源进行穆斯堡尔试验的研究工作取得了很大的进展。此外,研究深度已深入到表面层和介面,化学和电子结构等层次上。

在这次大会上,我国科技工作者夏元复、李士分别担任国际穆斯堡尔谱学顾问委员会和程序委员会委员。会议决定1995年ICAME会议将在意大利召开。

(中科院高能物理所 理石供稿)

会议简介

由山西、陕西、新疆和甘肃省核学会共同倡议的四省(区)核技术应用学术交流会,于1993年5月31日至6月4日在西安西北核技术研究所举行。本次会议由陕西省核学会主办。来自四省(区)有关单位的六十多名代表出席了会议,中国核学会派代表到会祝贺。

会议共收到论文摘要83篇,其中核技术在工业应用方面的研究35篇、核医学34篇、核农学7篇、核安全和环境生态学等方面7篇。这些论文从不同的方面反映了四省(区)核技术应用研究的成果。

大会报告有:(1)中国辐射防护研究院李书坤研究员介绍了该院的科研方向与科研机构。该院近年来开发研制了三十多个产品。例如,防爆型粉尘个人采样器、个人剂量仪、乙肝免疫诊断药盒和热释光退火炉等已由企业批量生产,推进市场。(2)西北核技术研究所陈达研究员作了“核技术应用与我所发展概况”的报告,指出我国的核技术科学从50年代末期开始,30多年来形成了比较完整的体系,对国民经济的发

展起到了重要作用,在工、农、医等领域取得了长足的进步,农业辐照诱变育种处于世界先进行列。医用同位素应用于诊断、治疗普及程度有较大提高。核工业仪表方面以火灾报警器为例,年产值近亿元。(3)第四军医大学附一院邓敬兰教授从核医学影像学,核医学仪器,放射性药物和放射免疫分析法四个方面介绍了我国核医学的新进展。(4)中科院近代物理所施伟英同志介绍了该所近年来核技术的应用开发情况。该所与铁道部天水电缆厂联合建造的电子束辐照交联电线电缆生产线已正式投产。此外,西安262厂胡树植总工程师的“赴欧科学访问纪要”,中国核学会唐宗渝同志的“世界核电发展情况介绍”引起与会代表的极大兴趣。

代表们认为,这次会议开得很好,为四省(区)核科技工作者提供了相互交流,学习的机会,希望这样的会议今后能继续举行。

(中国科学院近代物理研究所 冉启慧供稿)