

核物理研究的新机遇

Opportunities in Nuclear Physics

姜承烈 石宗仁

(中国原子能科学研究院)

一、绪 言

原子核物理是以原子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的碰撞规律。另外,由于原子核本身是物质结构的一个独立层次,它具有许多独一无二的特点,使它为检验和发展现代物理的理论基础——标准模型提供良好的实验场所。

核物理研究成果已经在社会上产生了巨大的影响。例如:核裂变释放出来的强大能量被广泛用于核能发电、核武器,它们的价值是不言而喻的;核物理研究方法及技术也广泛用于各个科学领域,如医学、农业、地质、冶金、固体物理和材料科学等等。值得指出,核物理与天体物理有着直接和紧密的联系,如太阳能、化学元素的生成都是通过核反应实现的。近年,用核物理研究去揭示天体形成、演化过程有长足发展,并形成了一门新科学——核天体物理学。事实说明核物理已经促进了许多科学的发展,并造福于人类。今后核物理学的发展,必将对人类做出更大的贡献。

核物理已有60年历史,但它一直是一个十分活跃,极有生命力的科学。我们对核组成的认识过程分四个阶段。早在1911年,卢瑟福利用 α 粒子轰击金箔,发现了后角反常散射,证明了原子内存在一个很小的核心,称它为原子核。1932年恰德威克发现中子后不久,海深堡等人提出了质子-中子核模型,即原子核是由无结构的中子和质子组成的。中子和质子统称核子,核子被当做基本粒子,核子间的相互作用力既不是引力,也不是电磁力,是一种新型的强相互作用力。它使许多核子紧紧地束缚在一起,形成稳定的原子核。在基态和低激发态,原子核常常表现出很强的集体性,整个原子核可以想像为一个液滴,它可以变形,集体转动和集体表面振动,也可以裂变成两个小液滴。核的

集体性构成了核组成的第一个层次。尽管核内的核子由强相互作用力束缚在一起,核子还在所有的核子产生的平均势场中运动着。运动规律由量子力学来描述,而且核子又能占据一定能量和性质特定的轨道。当单个核子的轨道运动,粒子-空穴激发等决定着核的结构,核子自由度体现出来了。它形成了核组成的第二个层次。集体性和核子自由度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。

随着加速器及探测技术的发展,新的实验结果开拓了上述核的组成概念。1947年包维尔从实验上发现了汤川预言的强相互作用力的传播子—— π 介子;1952年费米用195MeV的 π 介子轰击质子,发现了核子的最低共振态。在核内,距离大于核子半径时,核子间强相互作用可用交换中等重量的粒子——介子(例如 π 和 ρ 介子)来描述,这个强相互作用也可产生核子自身的激发,即核内还有核子激发态。至此,人们可以认为原子核是由核子、介子,核子激发态等组成。现在,人们定义参与强相互作用的介子、核子及超子等为强子。由此,在第三个层次上,原子核是由强子构成的,相应的描述它们的量子场理论是量子强子动力,它简写成QHD。

随着实验现象的进一步揭露,1964年盖尔曼提出了强子的夸克模型,他认为强子是由夸克组成的。核子是由三个夸克构成,而介子是由正、反两个夸克组成。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,相应的量子场理论是量子色动力学,简称为QCD。图1显示出核组成的四个层次。

1967年温伯格等人提出了弱相互作用和电磁相互作用统一的弱电理论。1983年鲁比亚利用质子-反质子对撞发现了电弱理论预言的弱力传播子 W^+ 和 Z^0 ,这是重大的科学成就。当今将电弱理论和强相互作用的QCD理论加在一起统称为

标准模型。而检验和发展标准模型已经是物理界最前沿的研究内容。原子核内同时存在强相互作用和电弱相互作用,以及原子核的定态特性等,为检验和发展标准模型提供了有特殊意义的实验场所。



图1 原子核组成的四个层次

人们常把有关前两个层次的核物理研究称为传统的核物理,它只涉及集体运动及核子运动自由度。数十年来,这方面已有了很大的发展,国际国内都已经建立起大量设备(各种能量和性能的加速器)来研究它,无疑今后对它的研究是大量的,并有很好的发展前途。特别值得提到的是“极端条件下的原子核”的研究,也就是在高温、高角动量及不寻常的中子数和质子数比(N/Z)等情况下核结构的研究。另外需要着重提出,在这个领域里有两个方面存在着新的机遇,也就是国际上尚属空白的,可以大大扩充传统核物理研究的领域。一个是放射性束的加速及其用于核物理研究,另一个是把已有的中能重离子物理研究推向 $0.5 \sim 1.0 \text{ GeV}$ /核子的高分辨研究。但是必须指出,从总的发展趋势看,出现更多新机遇的领域已经不是传统核物理而是对下两个层次的研究。

若干年以前,关于核子结构的研究属于粒子物理的范围。但是人们发现,核内的核子,并不全同于“单个”核子,核中的夸克也并不全同于“单个”核子内的夸克。例如看到了在核内核子肿胀了。另一方面为了细致地描述核的性质,决不能只依靠集体和核子自由度,还必须引入介子自由度,甚至夸克自由度。于是研究介子自由度和夸克自由度现在已成为核物理研究中很主要的前沿课题。

人们认为在下一个十年里,核物理研究中最激动人心的是下述四个方面:在核介质内,寻找和研究夸克自由度和强相互作用的基础理论QCD;研究各种条件下的核物态方程,以及形成和研究夸克胶子等离子体;研究在高温、高角动量及不寻常中子数和质子数比的极端条件下的核结构,也包括了天体物理的各种问题;核介质用于精

确研究强、电弱相互作用的基本性质,也包括天体和太阳中微子问题。

为了抓住这种新的机遇,国际上正在积极建造和筹备新一代的大型加速器,例如多GeV连续束、电子加速器,相对论重离子对撞机,k介子工厂等。

二、国际发展动态

1. 核内夸克自由度的寻找和研究

当前,核物理的中心问题之一是在核介质内夸克自由度和强相互作用研究,即原子核、核子及所有的强子是如何由夸克构成的,色中性的核子是如何由色力实现强相互作用的。最终,用夸克胶子统一地描写原子核,在统一的框架下描写原子核的四个层次。

实验上,有几种研究夸克自由度的方法,例如:高能轻子(电子、 μ 子和中微子)散射,在原子核内置入超子形成超核,质子-反质子碰撞等。每种方法都有各自的特点,并可获得不同方面的夸克运动的性质。目前看来,其中高能电子散射是最好的方法。使用电子有许多优点:电子是直接来自加速器的性能好的初级束流,而 μ 子、中微子、K介子,反质子是次级束流,它们流强低,单色性差,束流张角宽;电子与原子核的相互作用是规律清楚的电磁力,容易得到结构相关的形状因子;电磁力比强相互作用力弱很多,理论上可依微扰处理及对原子核内部扰动小;初末态关联小等等。

根据测不准原理,为获得核子尺度(~ 1 飞米)内的现象,电子必须传递给核子很高的动量,因而要求电子能量高;为了解不同层次的转换,电子能量应可变;由于小尺度,产生有用事件的机率小,为获得显著的事件率要求电子束流强;值得强调的是电子束应是连续的,连续束才能开展多举实验,从许多强子末态中挑选出有用的强子态,例如核子肿胀、六夸克态等,因而要求电子加速器具有可变高能、强流,连续束。目前,美国正在弗吉尼亚东南大学建造一台连续束, $0.4 \sim 4 \text{ GeV}$,流强可达200微安,电子极化度可达0.4以上的电子直线加速器,简称CEBAF,预计1994年建成投入运行。加速器由两个 0.4 GeV 的超导直线加速器构成,核心是一组超导射频腔,每米提高电子能量5 MeV,工作在液态氮2 K温度,电子在加速器内循环5圈后能量达到4 GeV。整个加速器概略地示于图2。此外,欧洲正在筹备建造一台 $15 \sim 20 \text{ GeV}$ 的连续束流电子加速器,也是为了进行这个领域的研究。

2. 新的物质形态——夸克胶子等离子体

根据天体物理和QCD理论预言,在很久很久以前,宇宙开始了惊人的大爆炸。在爆炸的瞬间,

所有物质的温度是 10^{19} GeV或 10^{32} K, 三种基本相互作用力有可比较的强度, 没有介子和重子(核子和超子总称), 只有更基本的轻子、夸克、胶子、光子及中间矢量玻色子。这种状态称为夸克胶子等离子体, 简称为QGP。随后, 物质膨胀, 冷却, 夸克强子化形成强子, 强子组合成原子核, 再逐步形成了星球和今天的宇宙。

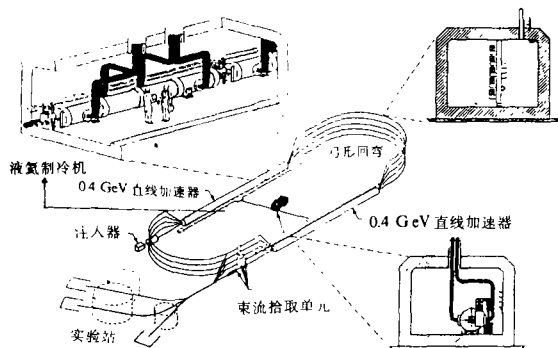


图2 美国正在建造的强流、连续束4GeV电子直线加速器概图

图3是以重子温度和密度为坐标, 划出各种核物质形态所在的位置。这就是现代著名的核相图。从中人们可以了解核物质形态同温度和密度的关系。在温度 $T_c \approx 200$ MeV, 在重子密度5~10倍于正常值的粗宽带之外, 为一种新的物质形态QGP。人们认为, 今天在中子星的内部仍保留着这种状态。随着温度和密度的降低, QGP转换成强子气体, 核子气体和液体及正常的核状态(有时也称为冷核状态)等。

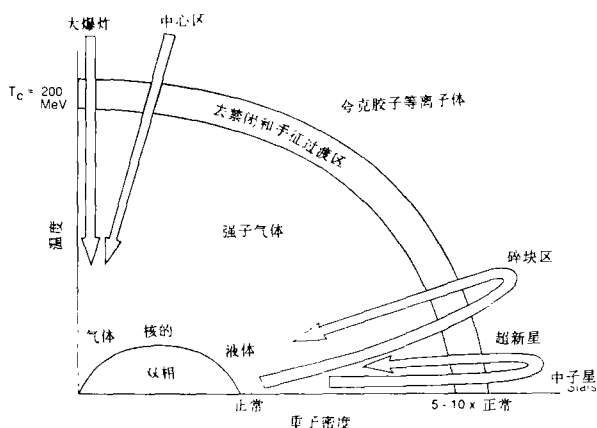


图3 核相图

几十年的核物理研究基本上是在正常状态附近。现在一个前沿的课题是在实验室内产生QGP, 从而研究长距离下的QCD及模拟天体演化过程。QGP可通过速度极高的两个重核对头碰撞实现, 在欧洲的核研究组织(CERN)和美国的布鲁克海文国家实验室(BNL)的初步实验结果表明这种高

温、高密度的核物质是能实现的。美国BNL正在建造一台强流, 每核子能量可达100GeV的重离子对撞机, 预计1997年投入运行。该机首先在串列加速器产生重离子, 经550米的输运注入同步增强器, 提高重离子能量, 使核外电子绝大部分被剥离; 然后注入可变梯度同步加速器(AGS), 使每个核子能量达到14.6GeV, 并使核外所有电子被剥离; 最后注入相对论重离子对撞机(RHIC)。RHIC是由间距90厘米的两个超导磁环组成, 磁场强度为3.5特斯拉, 重离子在环内被加速、贮存及对撞, 环的周长3800米, RHIC的整个概图示于图4。束流填充时间大约1分钟, 每环内离子强度为 10^{11} 离子, 在环内加速60秒后达最高能量, 离子在环内寿命长达11个小时, 一天填充二次即可。六个碰撞点, 三个用于实验。另外, 欧洲共同体现正在酝酿一个新计划, 建造一个大的强子对撞机(LHC), 并把它发展到可以加速铝离子, 那就可以把铝加速到每核子3TeV, 实现对头碰, 以进一步研究这方面的问题。

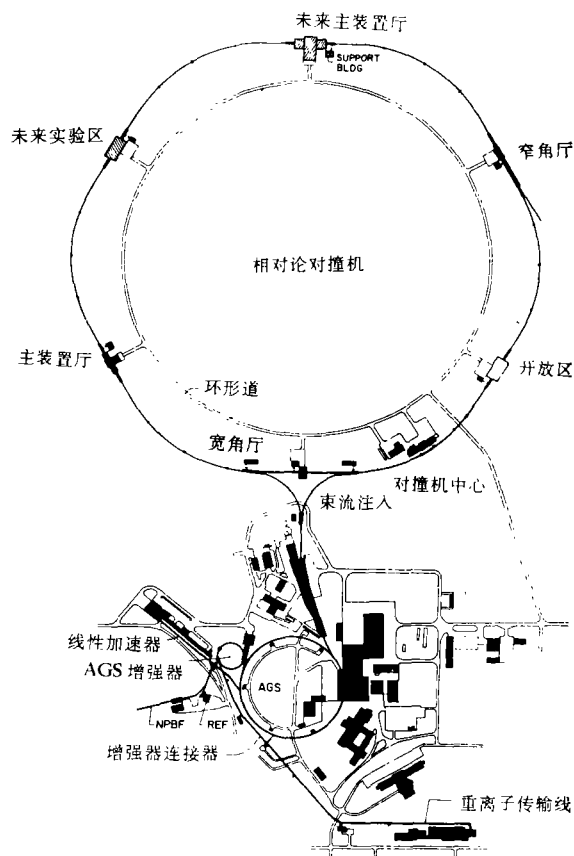


图4 美国正在建造的相对论重离子对撞机(RHIC)概图

3. K介子核物理

根据夸克模型, 中子和质子分别由上(u)、下(d)夸克组成, 中子的夸克组成为(udd), 质子的

夸克组成为 (uud) 。70年代国际上发展的中能核物理利用能量小于1GeV的质子加速器产生质量140MeV、寿命 2.6×10^{-8} 秒的 π 介子,然后用 π 介子做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: $\pi^+(ud)$, $\pi^0((u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2})$ 及 $\pi^-(\bar{u}d)$ 。也就是说,无论低能还是中能核物理,参与作用的都是以上、下夸克为基本成分。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} 秒的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 $K^-(\bar{u}s)$ 。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,例如: K^0 介子衰变中,时间反演不守恒,即CP破缺; K^- 与中子相互作用可产生超子 Λ ,形成超核,从而研究核内夸克是否是去禁闭; K^+ 在核物质内有很长的自由程 ~ 7 飞米,可以研究核内部的性质; K^- 在核内自由程短, ~ 1 飞米,可以研究核表面的性质,与 K^+ 互补;理论上预言的含有六个夸克的H粒子可以通过 (K^-, K^+) 交换反应实现;稀少衰变事件 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ 对检验和发展标准模型是灵敏的等等。利用K介子束将使人们对电弱力和强相互作用QCD有更深入的了解。由于K介子具有重要的意义,所以人们寻求强度高,品质好的K介子束。加拿大现正筹备建造一台平均流强100微安、30GeV的质子加速器。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,两个用于贮存。它们分别是已有的500MeV回旋、累积环、3GeV同步增强器、收集环,以及30GeV的延展环,整个加速器概图示于图5。这个项目现已得到日本、美国等允诺的财政支持,加拿大总统已批准其预算,现正在等待加拿大国会的最终批准。

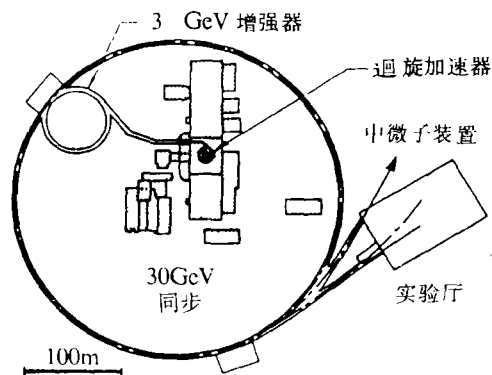


图5 加拿大正在筹备建造的强子装置(KAON)概图

4. 放射性核束的加速及其核物理研究

长期来,人们一直是利用地球上存在的稳定核做炮弹去轰击另一个稳定的靶核,从而研究核

结构及其碰撞规律。很明显,只从稳定核间的碰撞得到的信息是不够全面的。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。

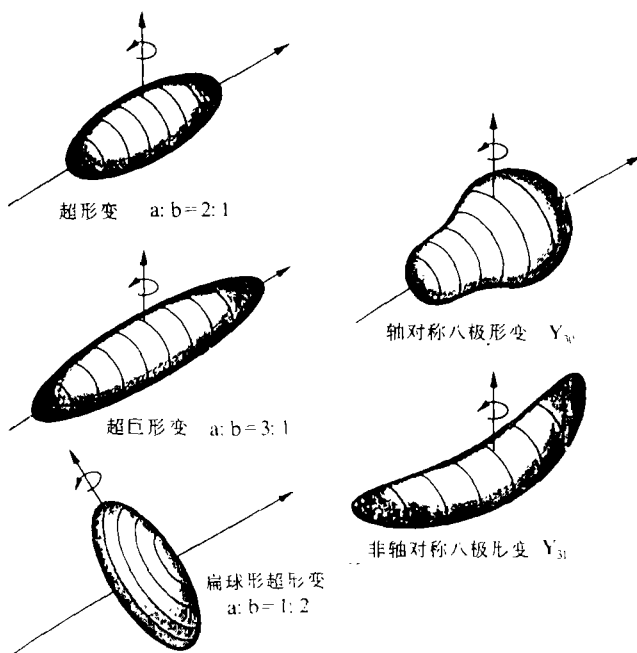


图6 一些利用放射性核束得到的奇异变形的原子核

理论预言有8000多种寿命长于微秒的原子核,地球上存在的稳定核大约300种,人工已经合成2400种。人工合成的原子核不仅种类繁多,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得很弱,并可占据特殊的量子轨道;不寻常的中子与质子数目比;奇异的结构;高的质量过剩等等。如果用人工合成的原子核做炮弹(后面称它为放射性核束,简称为RNB)去轰击稳定的靶核必然得到用稳定的弹-靶组合所得不到的原子核。它们可出现在滴线上或滴线外,直接检验现有的质量公式;可产生完全的同位素链或同中子素的核链,从中可以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 $^{100}_{50}\text{Sn}$ 。由于 $N=Z$,壳效应得到加强,稳定的奇异的核形变将出现,例如:超形变(Superdeformation)的 $^{60}_{30}\text{Zn}$ 和 $^{88}_{44}\text{Ru}$;超巨形变(hyperdeformation)的 $^{84}_{42}\text{Mo}$, $^{88}_{44}\text{Ru}$ 和 $^{92}_{46}\text{Pd}$;八极形变的 $^{94}_{32}\text{Ge}$,三轴形变核 $^{44}_{22}\text{Ti}$ 和 $^{72}_{36}\text{Kr}$;及大扁球形核 $^{72}_{36}\text{Kr}$ 等,图6是利用RNB可得到的一些奇异变形的原子核,以及在丰中子区产生带有中子晕环(Neutron halo)的原子核。由于利用RNB产生的原子核有更不寻常的同位旋量子数,它们将具有更奇异的衰变方式,例如:质子发射,两个中

子或质子发射, β 发射后中子、质子发射或裂变等。利用RNB将为天体物理提供能量的产生, 原子核的生成, 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。于是, 国际上, 目前掀起一股热潮, 都在计划建造一些大、中、小型放射性核束加速器。北美正在筹备建立同位素在线分离 (ISOL) 方式的放射性核束加速器装置。它包括产生RNB的加速器和靶、离子源、同位素分离器及后加速器等。RNB产生加速器和后加速器可以有各种类型, 可视技术条件、研究范围和规模大小而异, 无疑这是一个我国的财力、物力可及, 而且可以及时赶上的极有希望的方面。

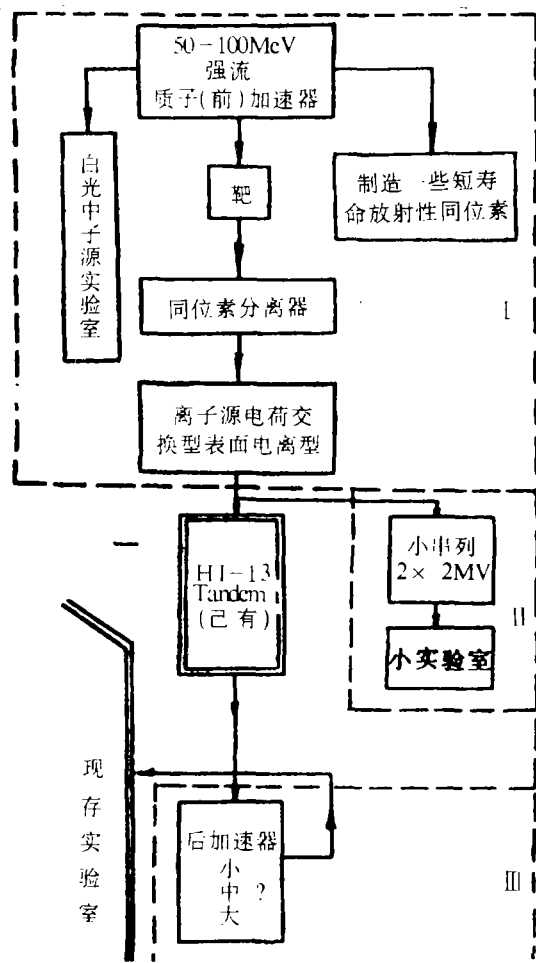


图7 一个新的放射性束加速器建议方案

三、对我国核物理发展的意见

我国在核物理研究方面已经具备了一定的规模, 形成了一支强有力的科研队伍。如何充分发挥这支队伍的作用, 进一步攀登科学高峰十分重要。

核物理研究的发展总是与大型加速器联系在一起的, 没有大型的加速器也就没有核物理研究。

同任何研究用的实验装置一样, 加速器有其物质和科学寿命。因而必须适时地改进现有设备, 同时建立新的大型设备。特别是, 建造一台大中型加速器需要好多年, 这就需要及早规划和组织实施, 否则就会丧失时机, 很可能再想抓时就会发现来不及了。

下面谈三点具体建议:

1. 将中国原子能科学研究院现有的串列加速器改为放射性核束加速器。可花钱较少, 见效较快地实现放射性核束加速和用于核物理和应用研究。原子能研究院的同志已提出了有自己特色的具体想法, 正在积极向各方面反映意见, 争取领导的支持。初步方案框图示于图7。

2. 对于我国近期尚无条件, 又非常重要的研究, 例如核内夸克自由度, 夸克胶子等离子体及K介子物理这三个方面, 宜采用国际合作, 小量投资, 介入跟踪方式, 从而培养人才和贮备技术。目前据我们所知, 对于夸克胶子等离子体方面已经有些研究单位在设立研究组介入国际合作, 这很好, 但另两项至今还未看到国内的动向。

3. 在适当时候由国家规划筹备建造一项国际尚属空白的有新机遇的大型加速器。例如可以是一台3GeV强流质子加速器。这种加速器在基础研究, 各方面应用及核能开发都有重要的意义, 较高能量的质子加速器至今在我国尚是空白。这种加速器除质子外, 还可以产生强流的中子, μ 子, 中微子及能量大于GeV的 π 介子等多种次级粒子。在基础研究方面: 利用质子与核的相互作用可研究自旋、同位旋自由度; 研究质子-质子, 中子-质子及 π -核子的相互作用性质; 利用中微子与核的相互作用研究电弱基本理论, 例如用脉冲中微子束测量标准模型中的重要参数温伯格角, 从而检验和发展标准模型, 利用GeV π 介子研究核结构, π 与核的作用及 π 在核内的运动行为等等。而重点是产生强流, 高能量分辨的GeV π 介子束, 研究 π 介子核物理及超核物理。在应用方面: 利用它产生的强流中子可开展中子参数测量; 可提供极强的冷中子或超冷中子从事固体物理研究; 利用强流 μ 子开展超导材料研究等等。另外, 在核能, 核化学以及医学等方面它都可有广泛的应用。这只是一种方案, 通过讨论还可以提出多种。而更重要的是必须制定我国的核物理长远发展规划, 一定建造一个与这种规划相应的大型加速器, 才能使我国的核物理研究有个长足发展的物质基础。

(责任编辑 刘先曙)