# 中高能核物理的前沿问题与大科学装置

## 一、引言

中高能核物理作为原子核物理学和粒子物理学的边缘学科，兴起于 20 世纪 60 年代。其研究范畴涵盖原子核在高能粒子（10 - 10 MeV）及其次级粒子束（如 μ 介子、K 介子、反质子等）轰击下呈现的各类现象、特征及运动规律。这一学科领域的重要性在于，它不仅能深化我们对原子核微观结构与相互作用的认知，还为探索物质的基本构成和深层次物理规律提供关键途径。

近年来，中高能核物理发展迅猛，成果丰硕。国内外一系列中高能实验设施的建成与升级，如北京正负电子对撞机（BEPC）、兰州冷却储存环（CSR）、惠州强流重离子加速器（HIAF），以及欧洲核子研究中心的大型强子对撞机（LHC）、美国的相对论重离子对撞机（RHIC）等，极大地提升了束流能量和亮度，促使实验上不断涌现新粒子和新现象，为理论研究提供了坚实的数据支撑，推动理论取得诸多突破性进展。在此背景下，深入研究中高能核物理的前沿问题，并探究大科学装置在其中发挥的关键作用，显得尤为必要。

## 二、中高能核物理的前沿问题

### 2.1 核内非核子自由度

传统核理论自 1932 年发现中子后，将原子核视为由中子和质子（核子）组成的点粒子系统，认为核子遵循非相对论性量子力学规律，通过介子场的强相互作用在位势描述下构建核结构理论。然而，实际情况与该理论框架存在偏差。核子并非点粒子，而是具有激发态（如 Δ(1232) 共振态）的复合粒子，且介子场作为核内客观存在，其相关的非核子自由度（胶子、夸克、介子及核子共振态等的空间位置、自旋、同位旋等）对原子核的影响成为重要研究课题。

实验表明，即便在原子核基态，传统核理论与实验也存在不符之处；在高动量（或高能量）传递时，偏差更为显著。以 He 的电形状因子为例，低动量传递时理论与实验相符，但当动量传递超过 3fm ，理论值远小于实验值。当前，该领域主要研究 μ 介子以及核子共振态 Δ(1232) 对核多体系统的影响。尽管实验资料尚不完善，但已有结果显示介子交换流效应在原子核中不可忽视，对原子核的磁矩、β 衰变及 γ 跃迁均有一定影响；核子共振态 Δ(1232) 虽在核内成分占比小，但对核的基态及低激发态有影响，对某些物理量贡献明显，因此对核内 Δ 成分的研究日益受到关注。随着能量提升，夸克自由度在核内的影响研究也将逐步展开，轻子深度非弹性散射的 EMC 效应便是这方面的重要突破。

### 2.2 奇特原子和奇特核

在中高能核物理研究中，利用次级粒子束流可生成新型原子或原子核，即奇特原子和奇特核。奇特原子是由带负电荷的粒子取代核外电子形成，如 μ- 子原子、μ 介子原子、反质子原子等。由于这些粒子质量远大于电子，其轨道更靠近原子核，甚至可能穿越原子核，可作为探针用于探测原子核基态性质。

奇特核则是由其他重子进入原子核形成的新核多体系统，如 Λ 超核、Σ 超核、反质子核等。目前，Λ 超核已被实验证实，并开展了相关谱学及生成机制的研究。这些新的核多体系统，一方面增加了粒子种类，拓宽了核结构的激发方式，丰富了核结构研究内容；另一方面，对于研究核子与其他重子的相互作用具有重要意义。

### 2.3 介子核物理

以介子为探针研究介子与核碰撞机制，有助于深入理解介子与核的相互作用，为研究核内介子自由度影响提供直接信息。当前主要研究 μ 介子与核的作用（μ 核反应或 μ 核作用），也有少量 K 介子相关工作。自 μ 介子工作开展以来，针对入射 μ 介子能量在低能区及共振区（约 300MeV 以下）的情况，开展了大量 μ 介子 - 核散射（弹性与非弹性）、μ 核吸收及各种 μ 核反应的研究。

光学势阱的冲量近似可较好解释 π 核弹性散射实验，但对于 μ 核反应过程（尤其是非弹性散射），需考虑原子核多体效应；在共振区，μ 介子进入原子核可使核子激发为核子共振态 Δ(1232) 并在核内传播，这是 μ 核作用的重要机制。随着对 μ 核反应机制认识的加深，利用 μ 介子探索原子核结构的工作不断增加，其作为研究核内 μ 介子及 Δ 粒子自由度的主要探针，凭借自身独特性质（如玻色子可完全被吸收，有助于了解核子短程关联；具有三种电荷态，可发生单电荷交换和双电荷交换反应），为核结构研究提供了新手段。

### 2.4 高能电子及高能质子与核的作用

利用高能电子或高能质子轰击原子核，因其入射能量高，有助于揭示原子核内核子运动的高动量状态。高能电子与核作用的实验尤为重要，由于电子与原子核仅存在电磁作用，可避免强相互作用干扰，成为研究原子核的有力工具。例如，通过电子散射可确定原子核的密度分布，且随着入射电子能量升高，能更精确了解原子核核心部位的密度分布；从敲出反应（如 (e,e┡p) 反应）中，可探究质子在核内的能级特性。

### 2.5 高能重离子反应

高能重离子反应中，弹核既重又快，轰击原子核会导致靶核或弹核完全破碎，产生众多产物并放出介子（散裂反应）等，是一个充满新现象的领域，但存在诸多难以处理的问题，目前研究处于唯象阶段。有研究期望通过两大块核物质高速碰撞获得超过正常核密度的核物质，进而形成特殊核态，这一课题极具意义，但仍需实验验证。

### 2.6 重子 - 重子相互作用

核子之间的相互作用（核力）是原子核物理的基本问题。长期以来，核力借助符合二体散射实验的唯象位势描述，60 年代发展了单玻色子交换理论，近年来通过 π - N 散射振幅建立了 2μ 交换理论，成功解释了核力的中程性质。然而，对于核力的短程性质，仍只能用唯象排斥芯描述。从本质上讲，由于核子由夸克组成，核子间作用应从夸克间作用推导得出，但这是强相互作用研究中的难题。目前主要有袋模型和势模型两种理论模型处于探索阶段。随着对核内非核子自由度及奇特核研究的深入，对其他重子（如 Λ 超子、核子激发态 Δ 等）与核子相互作用知识的需求日益增加，相关工作也在逐步推进。

## 三、中高能核物理相关的大科学装置

### 3.1 国内外已建大科学装置概述

#### 3.1.1 国内装置

* **北京正负电子对撞机（BEPC）**：是我国第一台高能加速器，在粲物理、τ 轻子物理等研究方面取得了一系列重要成果，为我国粒子物理和同步辐射应用研究奠定了基础，推动了相关学科发展。其在精确测量粒子性质、探索新物理现象等方面发挥了关键作用，培养了大批专业科研人才。
* **兰州重离子研究装置（HIRFL）**：能够加速从氢到铀的全离子稳定束和放射性束，在新核素合成、高自旋态、短寿命原子核质量测量、放射性核奇特结构等研究领域成果丰硕。尤其是在超重核素合成方面成绩显著，使我国在该领域进入国际先进行列，为我国核物理基础研究提供了重要支撑。
* **北京 HI - 13 低能重离子加速器**：已运行 20 多年，在核物理基础研究中取得了高自旋、核天体反应等重要科研成果，为我国相关领域研究积累了丰富经验，培养了科研团队，在低能重离子物理研究方面具有重要意义。

#### 3.1.2 国外装置

* **欧洲核子研究中心的大型强子对撞机（LHC）**：是世界上最大、能量最高的粒子加速器，通过质子 - 质子对撞，在探索希格斯玻色子、研究夸克 - 胶子等离子体、寻找新粒子和新物理现象等方面取得了众多突破性成果，极大地推动了粒子物理学的发展，改变了人们对物质基本结构和相互作用的认知。
* **美国的相对论重离子对撞机（RHIC）**：主要用于研究高能重离子碰撞，在夸克 - 胶子等离子体的产生与性质研究方面成果卓著，为理解宇宙早期物质形态提供了重要实验依据，是国际高能核物理研究的重要平台。
* **欧洲核子研究中心的放射性核束流装置（ISOLDE）**：专注于产生和研究放射性核束，在核结构、核天体物理等领域开展了大量前沿研究，为探索远离稳定线原子核的性质和反应机制提供了关键实验手段。
* **德国的反质子和离子研究装置（FAIR）**：致力于在极端条件下研究物质的基本结构和相互作用，涵盖多个研究领域，包括高能量密度物理、核物质性质等，将为相关学科发展带来新的机遇和突破。
* **法国的在线放射性离子产生系统（SPIRAL2）**：能够产生高强度放射性核束，在核物理、核天体物理及相关交叉学科研究中发挥重要作用，推动了对奇特原子核和核反应的深入理解。
* **日本放射性同位素束流工厂（RIBF）**：拥有世界上最高强度的放射性同位素束流，在核物理基础研究、核天体物理模拟等方面开展了广泛研究，为揭示原子核的奥秘和宇宙演化提供了重要实验数据。

### 3.2 在建大科学装置及其预期影响

#### 3.2.1 中国强流重离子加速器（HIAF）

HIAF 是我国具有国际领先水平的下一代放射性核束装置，建成后将具备产生极端远离稳定线核素的能力。这将为研究极端条件下原子核性质提供关键平台，有望在原子核结构、核反应机制、核天体物理等领域取得重大突破。例如，通过对奇特原子核的研究，深入理解核力在极端条件下的表现形式，为完善核物理理论提供实验依据；在核天体物理方面，模拟宇宙中极端环境下的核反应过程，助力解释恒星演化、元素合成等天体物理现象。其先进的技术和强大的实验能力，将提升我国在国际中高能核物理研究领域的地位，吸引全球优秀科研人才合作交流，推动相关学科及技术的协同发展。

#### 3.2.2 其他国家在建装置

国际上还有部分国家正在建设或规划新的中高能核物理相关大科学装置。这些装置通常聚焦于更高能量、更高精度的实验需求，旨在探索尚未被揭示的物理现象和规律。例如，一些装置计划进一步提升束流能量和亮度，以研究更极端条件下的物质状态和相互作用；有的致力于发展新型探测技术，提高对稀有事件和微弱信号的探测能力。这些在建装置一旦建成，将推动中高能核物理研究迈向新的高度，引发新一轮的科研竞争与合作，促进全球范围内相关学科的快速发展。

## 四、大科学装置对中高能核物理研究的支撑作用

### 4.1 提供极端实验条件

大科学装置能够产生高能粒子束流、创造高能量密度、强磁场等极端物理条件，模拟宇宙早期或恒星内部等难以在常规实验室实现的环境。例如，大型强子对撞机（LHC）通过加速质子至接近光速并使其对撞，产生极高的能量密度，瞬间重现宇宙大爆炸后微秒级别的物质状态，为研究夸克 - 胶子等离子体等极端物质形态提供了可能。这种极端实验条件是探索中高能核物理前沿问题的关键，有助于揭示物质在极端情况下的基本性质和相互作用规律，验证和发展相关理论模型。

### 4.2 实现高精度测量

先进的大科学装置配备了高精度的探测设备和数据采集分析系统，能够对实验过程中的各种物理量进行精确测量。以兰州重离子研究装置（HIRFL）为例，在新核素合成实验中，通过高精度的质量测量设备和粒子鉴别技术，能够准确确定新合成核素的质量、电荷数等关键参数，为研究原子核的壳层结构、幻数等性质提供可靠数据。在高能电子与核作用实验中，利用高精度的电子探测器和能量测量装置，能够精确测量散射电子的能量和角度分布，从而深入研究原子核的内部结构和电磁性质。高精度测量为中高能核物理研究提供了坚实的数据基础，使得科学家能够对理论模型进行严格检验和修正，推动学科的精确化发展。

### 4.3 推动多学科交叉研究

大科学装置的建设和运行涉及物理学、工程技术、计算机科学、材料科学等多个学科领域。在中高能核物理研究中，与天体物理学的交叉尤为突出。例如，通过高能重离子反应模拟恒星内部的核反应过程，研究元素的合成与演化，为天体物理学提供重要的理论和实验支持；同时，天体物理观测中发现的一些奇特现象，如超新星爆发、伽马射线暴等，也为中高能核物理研究提供了新的研究方向和思路。此外，大科学装置的建设需要先进的工程技术支持，如加速器技术、探测器技术、真空技术等，这促进了工程技术学科的发展；而计算机科学在数据采集、处理和分析中的应用，以及材料科学为探测器和加速器部件提供新型材料，都体现了多学科交叉融合的特点。这种多学科交叉研究不仅丰富了中高能核物理的研究内容和方法，还为解决复杂科学问题提供了更广阔的视野和创新途径。

## 五、中高能核物理研究面临的挑战与未来展望

### 5.1 研究中面临的挑战

#### 5.1.1 理论模型的不完善

尽管在中高能核物理领域已取得诸多理论进展，但目前的理论模型仍存在局限性。例如，描述核力的理论虽然在部分方面取得成功，但对于核力的短程性质仍缺乏精确的微观理论解释；在处理多体系统时，由于原子核内粒子间相互作用复杂，现有理论模型难以准确描述所有现象，导致理论计算与实验结果存在偏差。此外，随着研究向更高能量和更极端条件拓展，新的物理现象不断涌现，对理论模型的适应性和预测能力提出了更高要求，如何构建更加完善、统一的理论框架，成为亟待解决的问题。

#### 5.1.2 实验技术的瓶颈

实验技术在中高能核物理研究中起着关键作用，但目前仍面临一些瓶颈。一方面，探测器的性能有待进一步提升。在探测稀有事件和微弱信号时，现有的探测器灵敏度和分辨率有限，难以满足研究需求；同时，探测器的响应速度和数据处理能力也制约了对高速碰撞事件的精确测量和分析。另一方面，束流品质的优化面临挑战。为了开展更深入的实验研究，需要更高能量、更高亮度且更稳定的粒子束流，但目前的加速器技术在实现这些目标时存在技术难题和成本限制。此外，实验环境的复杂性也给实验带来诸多干扰因素，如何有效屏蔽干扰、提高实验精度是实验技术发展面临的重要课题。

#### 5.1.3 国际合作与竞争的压力

在全球范围内，中高能核物理研究竞争激烈，各国纷纷加大投入建设大科学装置，开展前沿研究。国际合作虽然为共享资源、交流经验提供了平台，但也带来了竞争压力。在争取国际合作项目、吸引优秀科研人才和获取关键技术方面，各国存在竞争关系。此外，不同国家的科研政策、资金投入模式和研究重点存在差异，如何在国际合作与竞争中找准定位，充分发挥自身优势，整合资源，提升本国在该领域的国际竞争力，是各国面临的共同挑战。

### 5.2 未来发展展望

#### 5.2.1 理论与实验的协同发展

未来，中高能核物理研究将更加注重理论与实验的协同。随着实验技术的不断进步，新的实验数据将不断涌现，这将促使理论物理学家进一步完善和发展理论模型。理论模型的优化又将为实验设计提供更准确的指导，帮助实验物理学家更有针对性地开展实验研究，探索新的物理现象和规律。例如，通过对高能重离子碰撞实验数据的深入分析，推动量子色动力学（QCD）在非微扰区域的理论发展；而新的理论预测又将引导实验在更高能量、更精细的条件下进行验证，形成理论与实验相互促进、共同发展的良性循环。

#### 5.2.2 大科学装置的升级与新建

为满足日益增长的研究需求，现有大科学装置将不断升级改造，提升束流能量、亮度、稳定性以及探测器性能等关键指标。同时，各国将继续规划和建设新的大科学装置，以探索更前沿的科学问题。例如，我国的中国强流重离子加速器（HIAF）建成后，将与其他国内外大科学装置相互补充，形成更完善的研究体系。这些新装置将具备更强的实验能力，能够开展更复杂、更精细的实验研究，为中高能核物理的突破提供硬件保障。

#### 5.2.3 多学科融合的深化

中高能核物理与其他学科的交叉融合将进一步深化。在与天体物理学的结合方面，将通过模拟宇宙中各种极端环境