



姜 换 清

从原子核的发现算起，原子核物理已经有了七十年的历史了。即使从中子的发现算起，也是四十年过去了。几十年来，那么多的人力和物力投入了核物理的研究，尽管核物理及核技术在各个方面已经有了广泛的应用，但人们对原子核的认识还是很不完全的。新的发现不断出现，新的研究领域仍在不断产生，摆在核物理学者面前的问题还是很艰巨的。

一、为什么要研究核物理？

核物理的广泛应用已经是人所共知的了，这里对于核物理已经和可能带来的应用不谈，而仅对于核物理本身的意义谈一些看法。

原子核是物质结构的一个重要层次，它与物质结构的其他层次有联系，但也有区别。原子核是一个多体体系，但又不像固体中那么多的多体，它少于三百体。它又比基本粒子，像质子与中子的组成复杂得多。这种情况使核物理成为很困难的问题。原子核内又非常“民主”，不像原子那样，中间有个核心，围绕它的是电子。这里质子与中子处于十分相似的地位。

原子核又有很多运动方式，有单粒子运动，集体运动，在集体运动中又有粒子空穴振动、转动等等。由于核内的核子不是太多，不同的运动方式之间的耦合又非常重要，这些与固体物理就不同。近年来，集团结构的运动方式也被普遍接受。从基本粒子物理的观点，原子核是层子集团组成的，所以，认识了原子核中的集团结构这一运动方式，有可能为研究核子之间的相互作用提供一些线索。

自然界中存在一些对称性。我们也了解到原子核中存在一些对称性。但我们所了解的原子核中的对称性是不是全部的对称性呢？这是十分有兴趣的问题。

总之，研究原子核，不仅是为了认识这一层次本身及它的应用，而且也是为其他物质结构层次提供重要的信息及可借鉴的方法。

二、我们是否真正了解了原子核？

原子核是由什么组成的？这是一个最基本的问题。翻开物理教科书，就会发现，原子核是由质子与中子组成的。这里产生了两个问题，一个是，除了质子、

中子以外，核中是否存在其它的自由度，像介子自由度。另一个问题是，即使是质子与中子，恐怕也与自由的质子、中子不完全一样，原子核中的核子可能是由介子裹着的。有人比喻，有可能原子核像一锅面粥，而质子与中子只是放进这锅面粥中的豆子。如果核中确有其它介子自由度，则又有一个是否要明显地引入这些自由度的问题，以及是否可以用重整化的办法，引入有效算符来模拟它，包括它，从而去掉这些自由度。

高能物理的发展，又揭示了核子是由层子构成的。这种层子自由度，是否也在原子核中有表现？这个问题将会是核物理进一步发展的一个重要课题。

核力是核物理中的另一个基本问题。虽然我们对它有了一些认识，找到了几组能够解释实验的核力形式，但对于核力的本质仍然远远没有解决。

人们总是习惯地用非相对论的薛丁格方程来描述原子核现象。这种未在原子核这一层次中普遍证实的运动规律，是否真正反映了真实情况？这个问题也需要在未来的研究中作出明确的结论。

除了这些基本问题以外，原子核物理一些老的问题也还没有完全解决。

例如：核中的中子分布。通常通过电子轰击方法及 μ 原子方法测量到的是核子的电荷分布。近十年来，人们期望用 κ^- 介子及 π^- 介子来研究原子核从而得到中子分布的信息，因为 κ^- 及 π^- 介子与中子的作用比与质子的作用强的多。但目前仍未得到精确的数据。而高能质子的实验与其它一些实验（像大角度电子散射）得出的结论又有矛盾，前者需要中子的分布半径比质子稍微大一点，而后者却相反。所以，中子分布的问题，仍然是一个基本的、尚无定论的、挑战性的问题。

再如：关于镜像核的库仑能差。这个问题与中子分布相联系。理论与实验总有出入。我们需要了解质子-质子及中子-中子相互作用的差别，这也是一个未解决的很本质的问题。

α -衰变也是一个老问题，任何量子力学书中，总用它作为隧道效应的一个例子。但如何微观地、定量地给出轻核到重核的 α 衰变几率仍然是一个问题。用壳模

型计算，不管对轻核或是一些经典的 α 衰变的重核，都与实验值偏差几十到上百倍，都必须引入 α -集团组态。所以，这样的老问题也没有完全了解清楚。

除了这些老问题以外，新的实验手段的发展，新的实验发现又提出了许多新的问题。例如：为什么在重核中没观察到 I^+ 态，而理论预计它应该存在？又如：重离子反应中，又发现了分子共振态，为什么在 15—20MeV 之间还有宽度仅 $\sim 300\text{KeV}$ 的尖锐共振？在重离子反应中，是否存在融合过程的临界角动量等等。

总之，老问题没完全解决，新的问题又在不断出现。

三、核物理的发展趋势：

尽管问题很多，但在过去的十年内，核物理的研究还是有了很大的开展。由此我们可以看到核物理的未来发展趋势。

在核物理的内部，过去十年来，形成了一些比较热门的课题，我们把它们叫做核物理的内部前沿课题。同时，利用新的实验手段，又把核物理扩充出去，形成了新的核物理的外部前沿领域。

1. 核物理的内部前沿课题：

当前，核物理的内部前沿课题可包括如下三个方面。

(1) 高自旋态：

实际上，人们发现某些原子核可以处于非常高的自旋态，如：自旋角动量可以达到三十几。实验发现，用重离子碰撞使原子核的自转角速度增加，当增加到一定数量时，它不再增大，而是转动惯量突然增大，自转角速度开始减少。当转动惯量增大到一定数值后，它又相对地稳定，转动角速度又再增加。这就是所谓的迴弯现象。实验中甚至发现了两个迴弯。这种现象的发现引起了人们的极大兴趣，人们开始从不同角度来理解这种迴弯现象的机制。现在人们相信，第一个迴弯是由于 $i_{13/2}$ 的中子排列效应引起的，第二个迴弯是由于 $h_{11/2}$ 的质子排列效应引起的。尽管大家相信这种机制，但没有直接的实验证据，人们正在想通过测量核磁矩的 g 因子的办法来证明这一点。

既然已经发现了两个迴弯，于是产生了另一个问题，是否有更高的非正常迴弯现象。按照理论预计，在角动量为 40—45 之间，将会有另外一个迴弯。目前人们正在理论上进行更仔细的计算，实际上更周密地统计测量 γ 谱，以求确定这种高的迴弯现象是否存在。

巨迴弯现象也是研究高自旋态的人们非常感兴趣的问题。理论上推测，如果用融合反应增大角动量，使核转动得越来越快，则核要被拉长，但形变不是一直随角动量的增大而增大，它要跃动，它要停留在一定的形变很长时间。如果角动量继续增大，例如大到 60，角动量再增大时，转动惯量就又要增加很快，这就导致所称的巨迴弯现象。这种迴弯现象是否真的存在？实验

上寻找这种巨迴弯现象将对迴弯产生的机制提供可靠的信息。

(2) 过渡区原子核：

原子核分类：一类是在满壳附近的核，其空间分布是球形的，人们称之为球形核。另一类是远离满壳的大变形核。对这两类核，过去的理论总是可以加以描述的。但还有另一类核，即处于满壳及大变形中间的核，叫做过渡区的核。理论上处理这种核，比较困难。在过去十年中，下述三点理论发展使得对这种核的处理前进了一步。

首先，人们发展了一种退耦合模型，即认为，由于这种核的离心力很大，单粒子运动与核心的转动退耦合。其次，人们也知道了如何精确求解玻尔-莫特逊哈密顿量，这样用玻尔-莫特逊模型也可以处理过渡区的原子核了。再其次，由日本的有马教授发展起来的相互作用玻色子模型（人们简称为 IBM 或 IBA），在描述过渡区的核方面也取得了很大的成功。但是，在这个领域，仍然存在一些矛盾及问题。如：非对称转子与软的转子的矛盾，以及除了 S 玻色子和 d 玻色子外，是否需要引入耦合成角动量为 4 的甚至更高的玻色子，这些问题应在最近的将来得到清楚的回答。

(3) 新的巨共振态：

核物理内在前沿课题之一是新的巨共振的发现。1972 年，首先在电子散射实验中发现了巨四极共振，说明某些核中，质子与中子可以同相振荡，也能反相振荡，从而引起原子核的四极形变。后来，又发现了 $T=0$ 的 $E0$ 巨单极共振，好像原子核可以作一种“呼吸式”的运动。这种新的运动方式直接与核的不可压缩性相联系，是一个十分本质、十分令人鼓舞的发现。另外，在一部分原子核上，又发现了磁单极共振 ($M1$)，例如： $S=1, T=1$ 的 $M1$ 共振。但奇怪的是，只是在轻核上看到这种共振，到了重核，这种激发就完全没有看到。

总之，在核物理内部，将会继续有许多重要的发现与发展。

2. 核物理的外部前沿领域：

随着实验技术的发展，新的探针出现了，它们也成了研究原子核的重要手段之一。

要认识原子核就必须变革它。过去人们只是用能量较低而质量较轻的炮弹，像 γ 射线，电子、质子、中子、 α 粒子等等。六十年代末期，人们认识到，应该扩充这种变革手段，应该用更重的炮弹，用新型的炮弹，用能量高的炮弹来认识原子核。这就逐步形成了核物理研究的新的前沿领域——重离子物理与中能核物理。

(1) 重离子物理：

重离子物理学原是由于找超重元素而出现的。当时，理论上预计，在质子数为 114 附近，还有可能存在

人们还未认识的一大批稳定元素，人们称之为“稳定岛”。为了登上这个未知的“稳定岛”以及其他一些原因，大批的重离子加速器出现了。人们相信，它们是人工合成这些超重元素的有效方法。十几年过去了，这些超重元素还未发现，但却发现了一些不寻常的现象，形成了重离子物理。最不寻常的也是没有预料到的是深度非弹性散射的发现。这是一种新的反应方式。在这种反应中，可以交换很多能量，可以交换许多质量及角动量。从而，重离子反应成了研究高自旋态、新的运动方式、新的远离 β 稳定线的同位素等的一种重要手段。实验上的发现，促进了理论的发展。对于这种深度非弹性碰撞过程，有人用统计的理论来描述它，也有人用相干激发的机制来理解它，……，尽管他们在解释实验方面都很成功，但真理究竟在哪里？这将等待未来的重离子物理来回答。

目前，重离子加速器已遍布世界许多地方。有的可以加速较轻的重离子，有的则是可以加速直到铀238的所谓全离子加速器。能量也有大幅度提高，例如在贝克莱已经可以把直到氩40的重离子加速到2—3京电子伏/核子，在杜布纳可以把碳12加速到4京电子伏/核子，在西欧中心的PS上可以把 α 粒子加速到20京电子伏/核子，在西德的GSI还在酝酿建立全离子加速器，使每个核子获得几个到几十个京电子伏。人们期望，当能量到达20—30兆电子伏/核子，可以看到热在核物质中是如何传播的，这是一种核内的非平衡过程。当能量大到140兆电子伏/核子，泡利原理将不起作用，可能把一个重离子打入另一个重离子而出现在低能重离子反应中不可能出现的现象。140兆电子伏/核子的能量，也可以产生真正的 π 介子，真正的 π 介子可以与核内的其他核子达到内部平衡，从而可以研究这种特殊情况下的核物质，并为天体的起源提供某些信息。能量到达1京电子伏/核子，有可能压缩核物质形成高密度的物质。按照现有理论，有可能出现核中 π 介子凝聚的现象。如果能量更高，甚至可以进一步压缩核物质，形成所谓层子物质。解决这些新的物理问题是未来重离子物理的新目标。

(2) 中能核物理：

在六十年代后期，人们粗略地意识到，高能粒子的波长短，可以用来了解核内部及短距离的性质。某些新的中能探针如 π 介子、 K 介子有其独特的性质，可以引起新型的反应，可以用来了解核中的物质分布，形成新的奇特的核。很高能量的质子可以穿过原子核把原子核钻一个洞，而其他部分尚未受影响，形成特殊的运动形态。作为玻色子的 π 可以把它的全部能量（包括静止能量）交给原子核，像一颗炸弹投进了原子核。这些奇特的变革方式，都有可能帮助我们得到原子核的某些新的知识。所以，除了某些原有的中能及高能加速器开始用于核物理研究外，又建造了专门产生新的探

针 π 及 μ 的加速器。美国的LAMPF、加拿大的TRIPIPF和瑞士的SIN，就是三台专门用来产生 π 和 μ 的强流质子加速器。由于它们产生强流的介子束，人们又称之为“介子工厂”。以“介子工厂”为标志的新时期使中能核物理这一核物理的前沿领域进入了新的阶段。发现了许多新的核物质形态，新的运动方式，揭示了新的矛盾，从而为核物理中一些基本问题的解决提供了新的线索。

首先，一些直接的、间接的线索表明，核中除了单粒子激发、集体振动、转动等激发方式以外，在激发能为300MeV以上，很可能还存在 N^* 激发方式以及在此基础上的转动与振动。这些已经是当前中能核物理的十分活泼的课题。而 π 与原子核的相互作用在这类课题中占有特殊的地位。

Λ 超子、 Σ 超子这些奇异粒子以至反质子也可以进入原子核形成新的核物质形态，实验上发现了一系列 Λ 超核及一些双 Λ 超核，也发现了 Σ 超核，有可能也存在反质子在核中的束缚态。通过这些研究已对 $\Lambda-N$ 、 $\Sigma-N$ 、 $\bar{p}-N$ 作用的性质有了新的了解。在西欧中心已计划建造低能反质子环，在美国也在酝酿建立 κ 介子工厂，将来这种研究会出现新的局面。还可能存在某些特殊状态的核物质，如密度很高的不平常的核态，也还可能在一定的核密度下，出现大量 π 介子在核内凝聚的现象，人们期望很高能量的重离子反应会给研究这种特殊形态创造条件。

借助于不同的手段，像高能电子散射，高能质子散射， π 介子与核的作用以及奇异原子等等，对核内的物质分布也有了深入一步的了解。发现在核内部，核物质的分布也不是均匀的，有可能有振荡。而且中子的分布与质子不完全相同。尽管不同的实验手段得出的结论还不相同，但这些矛盾将进一步吸引核物理学家去寻找真正的答案。

核力是核物理中的老大难问题之一，虽然人们从单玻色子交换理论出发，甚至考虑了三体力，半唯象地得到了几组能够解释实验的核力形式，但对于核力的本质的了解仍很肤浅。为什么核力很像分子力，在近距离是排斥的，到了大距离，它又是吸引的？核力的本质是否像分子力一样，可以归结为下一个物质层次的相互作用的外露？近年来，从核子的层子结构出发，用层子之间的相互作用（通过交换胶子）来计算核子-核子力，已成为非常时髦的事。有许多这类计算，企图给出核力的短程排斥心，但目前仍然没有一个定论。用层子模型来解释核力仍然是一个问题。

总之，核物理仍是一个十分活跃的核物理学领域，有艰巨的任务摆在核物理学家的面前。这些问题的解决，不仅需要核物理内部各个方面的配合，而且要与物质结构的其他层次的研究密切结合起来。这将是核物理的未来发展方向。