

原子物理学在核聚变的研究与开发中的作用

核聚变开发的下一步

对原子物理学研究提出新要求

R. K. Janev

在建立聚变反应堆的科学技术基础时，涉及到几个大学科。

等离子体物理学和相关的等离子体技术（包括大型超导磁体）主要处理高温等离子体的产生和约束、高温等离子体的稳定性、把等离子体加热到所需的热核温度并维持足够长的时间等问题。目前，在聚变等离子体物理学和等离子体技术中，有一些尚未解决的问题，如利用无感电流驱动达到托卡马克装置的准连续运行问题，在利用大功率外部等离子体加热的条件下的高标准热绝缘问题，以及使等离子体的动压强与磁压强之比（所谓等离子体 β 值）达到较高数值的问题等。

核聚变与核物理学的关系，不仅体现在基本的产能反应上，而且体现在热核燃料循环（核化学）和聚变反应堆安全方面。

材料科学和材料工艺学对核聚变是至关重要的，因为聚变反应堆容器的第一壁必须承受极高的功率负荷（几 MW/m²）、较高的热通量和热应力，并且不能让等离子体—器壁相互作用产生的高 Z 值杂质严重污染等离子体。不仅第一壁材料要受到严格的限制，而且面朝等离子体的所有其他部件都要受到严格的限制，如限制器、磁偏滤器中的靶板和等离子体射频加热用天线等。

原子物理学也是聚变研究中的一个必不可少的组成部分。因为等离子体能量平衡、等离子体加热、

点火和燃烧控制，以及等离子体诊断技术等许多重要领域，都涉及原子物理学。

上述四个科学技术领域，虽然没有完全包括正在进行的聚变研究工作的范围和复杂性，但它们是目前聚变研究工作中最重要的组成部分。在大型聚变装置的设计和运行阶段，还需要有一个涉及面较宽的工程基础，而且，如果没有超级计算机的帮助，这些装置上的试验也是无法以受控的方式进行的。

反映聚变反应堆基本特征的参数是聚变反应性（ $n\tau_E T$ ）。目前的聚变实验只能达到聚变反应堆所需值 $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$ 的约 1/10。目前仅以氢或氘为燃料运行的一批最大的托卡马克装置（JET, TFTR, JT-60, DIII-D），都早已在不同的实验中分别达到了聚变堆级的温度（ $T \sim 20 - 30 \text{ keV}$ ）、热绝缘（ $n\tau_E \sim 4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ ）和等离子体 β 值（ $\beta \approx 6\%$ ）。

目前正在进行的国际热核实验聚变反应堆（ITER）的概念设计工作，是在 IAEA 的赞助下进行的，并以填补这方面的空白和证实等离子体点火及实现较长时间的热核燃烧为指导思想。*

聚变研究和聚变技术方面的原子物理学

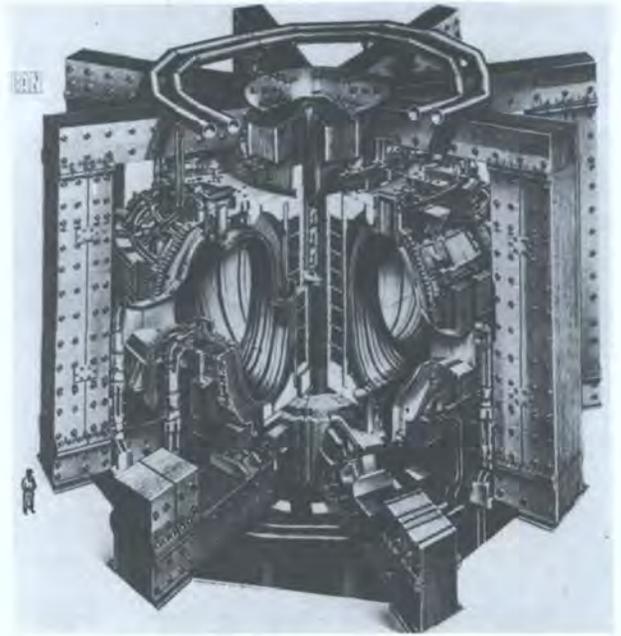
为了正确认识原子物理学在聚变研究中的重要

Janev 先生是 IAEA 物理和化学处的高级职员。

* ITER 是有欧洲共同体、日本、美国和苏联等四方参加的一个合作项目。

地位，可以指出这样一点：在适合于热核燃烧的温度（15—20 keV）下，原子过程是以比氘—氚（D-T）热核反应速率快8—10个数量级的速率进行的。这些原子过程大多是吸热的，它们会在聚变反应还远远不能发生的条件下就开始消耗等离子体的能量。即使在纯D-T等离子体中，如果温度低于~4 keV，因电子—等离子体离子之间的碰撞而发射韧致辐射的这一过程所散发掉的能量，也会大于D-T反应能够产生的能量。仅仅这种等离子体辐射冷却机制，就能使温度低于5 keV的等离子体点不了火。聚变等离子体中较重的原子型粒子（即使是痕量的），也可以辐射大量能量（主要通过韧致辐射和线辐射）。因此，如果铁离子的浓度大于等离子体密度的1%，则不管D-T等离子体的温度多高都不可能实现点火。钨离子的这种临界浓度更低，只有等离子体密度的0.1%。在类氢等离子体中作为杂质出现的较重原子型粒子具有有害的影响，这一点在聚变研究的早期阶段就已被认识。然而，在受约束的等离子体中，杂质的出现是不可避免的，因为等离子体会与容器壁发生相互作用。使等离子体杂质的含量保持在容许限值内，是获得较高的等离子体温度和等离子体点火的先决条件。

为了最大限度地减少等离子体与室壁的接触和防止容器壁的杂质过多地进入等离子体，必须在等离子



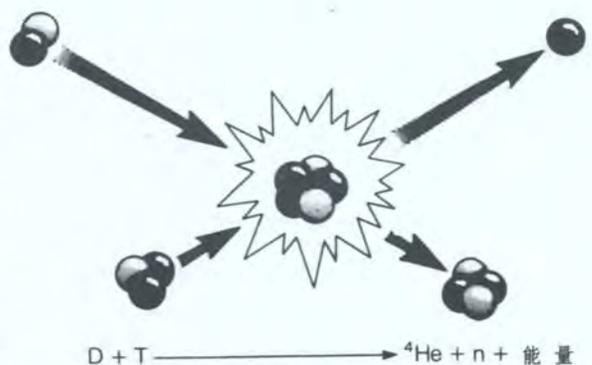
联合欧洲环（JET）示意图，该装置由欧洲共同体出资建造。

体边缘采用实物的或磁的限制器。这样就能将边缘的等离子体流引向限定的区域，在使用磁限制器（偏滤器）的场合，这类区域甚至能够位于主等离子体室以外。这部分被引出的边缘等离子体流，把室壁释放的杂质（以及向室壁扩散的等离子体粒子）带到特定区

核 聚 变 研 究

实现核聚变的希望是建立在 D (T, ^4He) n 聚变反应能释放 17.6 兆电子伏 (MeV) 能量，并能在自然界获得氘 (D) 的基础之上的。聚变反应堆必须自己通过 $n(^6\text{Li}, ^4\text{He})\text{T}$ 和 $n(^7\text{Li}, n'^4\text{He})\text{T}$ 核反应，在反应室周围的转换区内增殖所需的氚 (T)。自然界中的锂也是相当丰富的。在技术上实现核聚变的可能性，取决于能否将与约束容器壁离开一段距离的高温 ($> 10^8 \text{ K} \approx 10 \text{ keV}$) D-T 等离子体约束足够长的时间，以致聚变反应的规模能够大到使热核燃料点火成为可能的程度。建立聚变等离子体的点火和受控燃烧方面的科学技术基础，是近 40 年来聚变研究的首要目标。低密度 ($\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$)、高温 (10—20 keV) 等离子体的磁约束概念，是目前聚变研究中最主要的一种概念，它要求有大约 1 秒或

1 秒以上的热绝缘时间。在这种概念的范围之内，通常称之为托卡马克装置的环形磁位形，在满足聚变反应堆所需的等离子体参数方面已经获得了巨大的成就。



域, 然后从这些区域把它们抽离聚变系统。除了这种双向的屏蔽作用外, 偏滤器和限制器对约束系统还有其他一些有益的作用: 大大减轻第一壁的热负荷; 使氢同位素在系统内再循环; 在等离子体边缘建立起一道辐射冷却层, 使近壁等离子体保持较冷的状态, 因而无法引起室壁大量释放材料。

限制器和偏滤器的有益作用的最优化, 在很大程度上取决于对边缘等离子体内的原子粒子数的控制, 包括对第一壁、限制器和偏滤器板的材料组分控制。与这种最优化有关的原子物理学, 包括各种各样的气相原子碰撞过程, 以及差不多也有这么多种的粒子与表面的相互作用过程。参与边缘等离子体气相过程的粒子是: 等离子体的基本组分 (电子和氢同位素的原子核), 室壁的杂质原子和离子 (处于各种各样的带电状态), 以及诸如氢、金属氧化物和碳氢化合物等分子 (这一区域中出现这些分子是由于近壁的温度较低, 约为 5—50 eV)。这些等离子体组分之间的非弹性碰撞过程, 次数多, 情况复杂, 以致为了预言它们对等离子体能量转换和等离子体粒子运输的综合影响, 需要大量有关它们的碰撞特性的资料。不过, 通过实验可以了解这些过程的总效应: 碰撞把等离子体能量转换成辐射, 因而提供了一种能够保护室壁免受来自炽热的等离子体心的强大热通量影响的冷却机制。边缘等离子体辐射冷却的最优化, 需要有一个有关原子和分子的碰撞过程以及辐射过程的大型数据库。

等离子体组分与面对等离子体的实物部件 (聚变堆第一壁、限制器、偏滤器板等等) 的表面之间的碰撞过程, 对边缘等离子体的性质并通过边缘等离子体对整个等离子体的参数, 都会产生重大的影响。这些碰撞过程可以导致产生大量等离子体杂质, 并且是造成第一壁和暴露于等离子体面前的其他实物边界腐蚀的直接或间接的原因。这些碰撞过程的性质很复杂, 有关这些过程的资料又相当少 (尤其对聚变有意义的那些材料)。

发生在等离子体边缘区域的这么多气相的和表面的原子过程, 不仅对等离子体的能量平衡及其受约束状况有直接的影响, 而且对聚变反应堆技术也有影响。这些过程 (以及等离子体与边界材料的核相互作用) 是造成聚变反应堆第一壁腐蚀的主要原因, 因此, 对选择聚变反应堆材料有决定意义。

原子物理学正在对核聚变的开发作出重要贡献的另一领域, 是聚变等离子体的加热。为了把磁约束等

离子体加热到核聚变温度, 需要从外部供给能量。在托卡马克装置中, 欧姆加热只能把等离子体温度提高到几 keV, 远低于所需要的温度。迄今, 把外部能源的能量耦合到等离子体中去的最有效方法, 是把高能中性氢原子注入等离子体内部。在中性氢原子注入等离子体内部的这一过程中, 它们因与等离子体粒子碰撞而被电离和被磁场约束; 然后通过碰撞把它们的能量传给等离子体中的电子和离子。

目前, 现有的所有大型托卡马克装置都采用高能中性束加热 (辅以射频波加热), 并已经做到把高达 20 MW 的功率耦合给等离子体。中性束注入法还有把大量动量传递给等离子体的潜力, 因此可在等离子体内感生一种无感电流驱动。托卡马克聚变装置的连续运行, 需要这种电流驱动。

中性束等离子体加热方法几乎完全是以原子物理学的研究成果为基础的。这种方法的效率取决于从离子源引出的离子强度、离子被加速到所需能量以后在气室内的中性化程度, 以及它们注入并在等离子体内被阻止的情况。在中性束的产生和应用的所有这三个阶段中, 原子物理学的作用是极其重要的, 因为使离子源和中性化室最优化时遇到的许多技术问题, 必须要有足够多的原子碰撞过程知识才能解决。中性束能量沉积入等离子体, 也要求拥有关于中性束原子在存在着等离子体粒子和等离子体杂质的情况下发生电离和其他过程方面的十分详细的资料。如果计算中性束能量沉积所需的原子数据库不完备, 那就会使束流参数的估计值、进而使所需束流产生技术的估计都非常不恰当。

最后一点, 原子物理学深深介入聚变研究的第三个领域, 是等离子体诊断技术。为了获得聚变等离子体实况的清晰图象, 并能在此基础上控制等离子体的行为, 必须对它的许多参数 (温度、密度、能量和动量值等等), 包括这些参数随空间和时间的变化进行测量。大多数等离子体诊断法是以原子 (离子) 粒子所固有的效应, 或这些粒子间的相互作用所产生的效应为基础的。基于等离子体组分的韧致辐射和杂质线辐射的光谱法, 能提供有关等离子体基本参数 (电子和离子的温度和密度, 它们的空间分布与随时间的变化) 和有关等离子体杂质的组成和分布的大量信息。一些主动和被动的原子束诊断法, 能提供有关等离子体组分和参数的附加 (或独立) 信息。所有这些等离子体诊断方法, 也都需要有关等离子体组分的碰撞和辐射特性方面的非常准确的知识。

举出上述这些例子,是为了说明原子物理学研究已经起到的作用,以及在今后的聚变开发阶段中继续要起的作用。就目前的聚变装置水平而论,原子物理学对于它在其中起着十分重要作用的那些聚变研究问题(杂质控制、中性束加热技术、诊断技术等),都能提供十分令人满意的解决办法。聚变开发阶段的下一步(工程试验反应堆),则对原子物理学研究提出了一些新要求。

聚变反应堆开发中的原子物理学课题

随着聚变反应堆开发工作的开始,原子物理学与聚变的关系也已越来越扩展到工艺技术领域。随着聚变技术的逐步发展,原子物理学中这部分内容的具体形式和具体课题,肯定会发生变化和修改。因此,从设计下一代核聚变装置(例如 ITER)的角度,分析一下原子物理学在聚变反应堆开发工作中的作用是合适的。热核燃烧等离子体物理学(开发下一代聚变装置的计划中也包括要完全弄懂这个问题),也对原子物理学研究提出了一些问题。热核燃烧控制方面也存在着类似的情况。

下一代聚变试验反应堆设计中的一个重大课题,是如何选择合适的第一壁材料。这个问题包括两个方面:一方面与第一壁的热物理性质(金相稳定性、热传导、辐射损伤等)有关;另一方面与边缘等离子体工况和杂质控制有关。如上所述,边缘等离子体工况由气相的和粒子-表面间的原子碰撞决定;它对等离子体的含能量、等离子体的能量约束时间和稳定性,以及偏滤器的运行情况都有极大的影响。因此,控制边缘等离子体的工况,对热核聚变反应堆的成功运行极为重要。等离子体边缘是通向主反应等离子体的门户。由于等离子体的中心部分和边界部分之间有着密切的关系,所以边界部分的任何变化,很快就会传入正在燃烧的等离子体心。因此,控制边缘等离子体工况是控制热核燃烧的途径。

为了成功地控制边缘等离子体工况,显然需要一个关于原子气相和粒子-表面过程方面的内容十分广泛的数据库。这种数据目前仍然比较缺乏,为了建成这个数据库还需要做大量的研究工作。目前,许多原子物理学家和表面物理学家正在从事建立所需数据库的工作。

边缘等离子体的各种过程不仅影响等离子体点火和热核燃烧,而且还决定着面向等离子体的各种材料

的腐蚀速率及其寿命。聚变反应堆第一壁的工艺技术,还必须给由等离子体-室壁相互作用过程引起的快速腐蚀问题,提供一种解决办法。

控制边缘等离子体工况的另一个具体问题,是如何抽走热核灰烬。D-T 聚变反应产生的 3.5 MeV α 粒子,在给点火后的等离子体提供能量,使燃烧过程维持下去方面有着重要的作用。 α 粒子的加热作用完成以后,就成了逗留在等离子体中的“冷” α 粒子,它会使热核燃料稀释,因此要不断地把它们从反应区中清除掉。

幸好这些 α 粒子能向等离子体边缘扩散,并在那里与其他室壁杂质一起被引入独立的偏离器室,然后抽离聚变系统。聚变 α 粒子与其他等离子体组分(尤其与杂质离子)的原子作用过程,可以对它们在反应区中的加热作用以及从主室中被排走的过程都产生严重的影响。为了能预估和控制氦灰烬的排出,需要有一个大型的原子数据库。

磁偏滤器的设计和制造技术,需要数量特别大的原子和等离子体-表面相互作用数据。偏滤器板接受的热通量和等离子体粒子通量,会比流向聚变反应堆室第一壁的这两种通量高出若干倍。如果偏滤器板和偏滤器室设计得不合适,这部分材料就会受到严重的腐蚀。除选择合适的板材外,偏滤器的设计还必须考虑在偏滤器板和附近等离子体之间建立强烈氦再循环这样一种运行方式的问题。建立再循环的目的,在于在偏滤器板附近产生冷的高密度等离子体,使得加在偏滤器板上的热通量和粒子通量负载大大减小,腐蚀速率也会随之大大降低。为了维持偏滤器板周围的高速再循环工况,偏离器室内气体的排出速率也应该非常高。由于再循环过程而积聚在偏滤器室内的中性气体,其密度比等离子体密度还大,通过这部分中性气体运输能量和动量,涉及到范围极其广泛的原子过程和表面过程。为了能预估这种运输方式的效果,要求备有有关这些过程的数据。

聚变反应堆开发工作中的另一个重要技术领域是等离子体加热。ITER 目前的设想是利用能量约为 1 MeV 的大功率氘束加热堆心等离子体。正如前面讨论过的那样,确切的氘束能量,要由需要沉积入等离子体的能量值和感生电流驱动所需要的动量传递值决定。束衰减取决于各色各样的碰撞过程(涉及处于激发态的束原子),在能量这么高的情况下,碰撞过程的种类,要比目前采用能量为 100—200 keV 中性束的所有大型托卡马克装置中的多得多。这种束

原子激发效应，可以使束流的阻止截面增加一倍，因而这也给中性束技术提出了一些新要求。产生能量为 MeV 数量级的强中性束，应以负离子源为基础，但这种源的效率目前还不够高。关于这些离子源的物理学，又是由原子、分子和表面的碰撞所组成的。因此，若要使这些技术取得进步，就需要有一个有关这些过程的内容广泛的数据库。

IAEA 与核聚变有关的原子物理学计划

IAEA 除了在为聚变研究领域的国际合作构筑框架（例如 INTOR 讲习班和 ITER 概念设计活动）和组织两年一次的“等离子体物理学和受控核聚变研究国际大会”方面起作用外，它还在等离子体物理学、核物理学、原子和分子物理学领域，以及在聚变技术和聚变工程领域有自己的计划。机构还出版国际性杂志《核聚变》(Nuclear Fusion)、《世界受控聚变研究活动综览》(World survey of activities in controlled fusion research, 第一期于 1986 年问世，第二期正在准备之中)，以及与由机构组织的聚变研究领域的各种科学会议和学术会议有关的其它出版物。机构的这些具体计划的目的，是为专家们讨论聚变研究和聚变技术方面的最新发展水平与当前的问题提供一个论坛。机构还通过许多研究合同和进修金培训，直接帮助成员国实施它们本国的聚变研究计划。机构在聚变领域的计划的咨询机构是国际聚变研究委员会 (IFRC)。

机构在聚变研究的原子物理学方面的计划始于 1976 年，当时，在 IFRC 下属的聚变用原子和分子 (A&M) 数据分委员会的指导下，在 IAEA 物理和化学处核数据科内，建立了一个聚变用原子分子数据计划。1976 年，在联合国卡勒姆举行过一次咨询组会议，给机构在这个领域内的计划指出了初始的方向，这次会议是专门为确定聚变研究对原子分子数据的短期和长期需求而召开的。当前，IAEA 原子分子数据活动的主要目标有以下几个：

- 建立和维持一个评价过的与推荐的聚变用原子分子数据的国际数据库；
- 协调和支助聚变用国际原子分子数据库的开发，尤其是对由各国的聚变用原子分子数据中心从事

的汇编和评价活动进行协调。

- 建立和维持聚变方面的国际文摘数据库，并出版这些文摘；
- 通过 IAEA 的研究合同和协调研究计划，以及与原子物理学界的其他交往，促进和支助聚变用原子分子数据的生产；
- 向聚变实验室和其他用户提供评价过的原子分子数据。

在国际原子数据中心网的密切合作，和原子物理学界一大批力量和聚变界有关部分的大力支持下，IAEA 正在朝着这些目标前进。

在建立经过评价的聚变用原子分子数据库方面，现已取得重大进展，该数据库目前含有与氢等离子体基本组分的所有碰撞过程有关的推荐截面数据。对最重要的等离子体杂质（碳、氧、铁）和（在发生电离过程的情况下）对聚变有意义的所有原子与离子来说，也有整套或接近整套的碰撞和辐射数据。这些数据按易于被聚变应用计算机程序利用的格式表述。数据的汇编和评价是通过原子分子数据中心网用协调的方式完成的，数据的验证和推荐工作则请在国际范围内挑选的许多专家组去做。在等离子体-室壁相互作用数据方面，IAEA 的聚变用原子物理学数据库目前正在扩大。在现阶段，这一计划只涉及最基本的粒子-表面相互作用过程。不过，预计这项工作今后会扩展，还将包括有关在等离子体-材料相互作用过程中发生的更为复杂的现象（其中包括受到强大热通量和强粒子通量照射的那些材料的性质）的数据。

目前，IAEA 与聚变有关的原子物理学计划，重点放在完善大型托卡马克边缘等离子体的模型化和诊断技术、中等 Z 和高 Z 杂质的运输和辐射、高能 (1—2 MeV) 中性氘束注入反应堆级等离子体等方面所需的原子分子数据库上，并放在建立有关基本的粒子-表面相互作用过程的数据库上。这项计划把 IAEA 核数据科工作人员、原子分子数据中心网，以及许多国家级原子物理学和表面物理学研究实验室的工作组成了一个整体。这种国际合作精神，在建立一个收藏聚变用原子、分子和等离子体-室壁相互作用推荐数据的国际数据库的过程中，将继续起着重要的作用。

