

聚变研究中的原子和分子过程

杨治虎 景成祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文主要描述了聚变研究中所需要的一些原子和分子物理过程的数据,这些数据有待今后在实验和理论研究中加以确定.

关键词 聚变, 数据.

聚变研究的许多领域都涉及到原子和分子的有关数据,如磁约束和高密度的惯性约束^[1].显然它们各处在不同的条件,且原子和分子的数据也相似,但是,这两个体系本质上的确有着完全不同的意义和要求.本文从下列方面对其做以介绍:

1 等离子体-表面相互作用

在磁约束中的等离子体和固体表面存在许多作用过程,尤其是托克马克装置和反应堆运行中的表面相互作用,这些相互作用包括等离子体内壁或孔栏间的溅射、起弧和解吸等过程,以及壁和孔栏装置上的能量损失、杂质的起源与输出、等离子体边界层过程与壁的腐蚀等,由于这些相互作用的机制不同,所需的原子和分子数据也就涉及到各个方面,每两年一次的等离子体-表面相互作用的专题国际会议,自80年代以来,已举行过多次.从近几次专题会议发表的有关相互作用的文献来看,其作用特点可概括为下列几个方面.

1.1 杂质主要起源于等离子体与壁相互作用过程(包括溅射、发泡和解吸)

物理溅射是产生杂质的主要机制.当高能离子轰击材料表面时,将其动能传递给材料表面的原子或分子,使它获得反冲能量.当反冲能量大于固体表面脱出功时,它便从表面区域发射出来.通常,称发射原子或分子的过程为溅射,可用溅射产额来描述.溅射产额不但与入射和出射粒子的能量、入射与出射角和入射

与出射粒子的质量有关,而且与固体表面束缚能、清洁度和表面其它条件也有关.图1表示不同材料的溅射产额与质子能量的关系,图2表示不同离子垂直入射在Fe、Ni、SS304和SS316上的溅射产额.

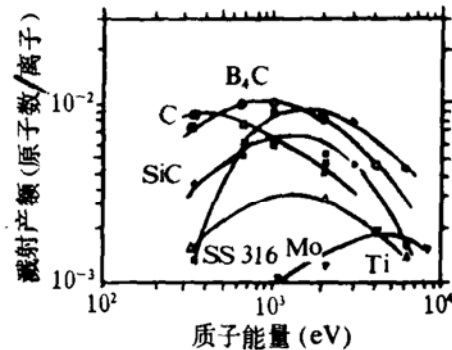


图1 不同材料的溅射产额与质子能量的关系.数据取自垂直入射,靶温度在50°~150°间.

由此可知,物理溅射需要某些粒子轰击一定固体表面时的溅射产额等数据.

化学溅射.随着低Z材料的壁和孔栏的广泛利用,化学溅射显得极为重要.挥发性化合物的产生是由入射粒子与材料表面区原子发生反应而形成,例如,氢原子与真空壁碳原子形成碳氢化合物,或氢与氧生成水.等离子体中的碳和氧等杂质主要来源于化学溅射.化学溅射产额主要与反应速度有关,所以它与入射粒子能量、金属表面温度和材料的种类有关.图3给出了在较高温度下,以不同能量的氢离子轰击热解石墨时产生的CH溅射产额

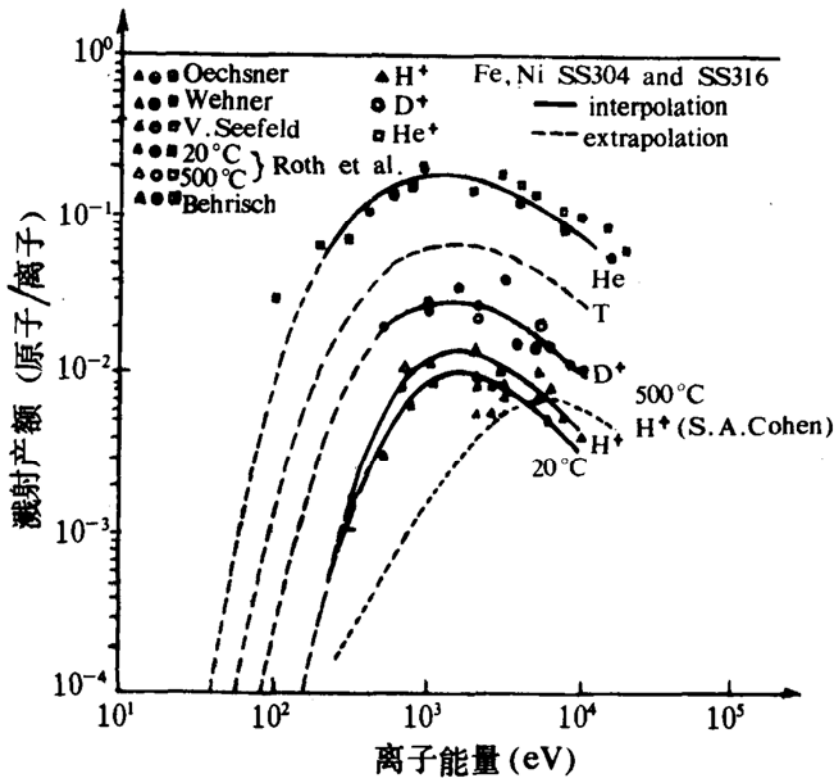


图 2 不同离子垂直入射时,所测到的溅射产额^[2,3,4]

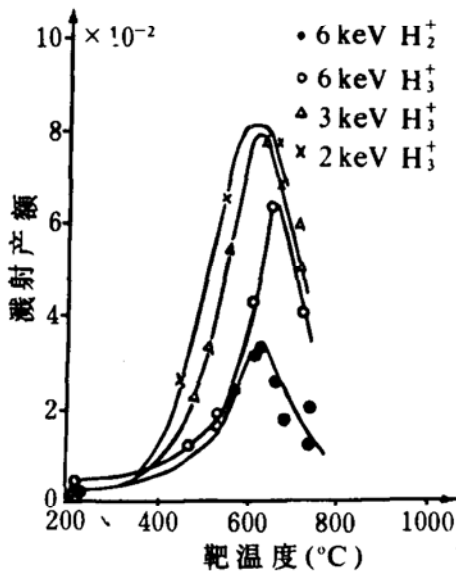


图 3 用不同能量的粒子轰击热解石墨时, 溅射产额与温度的关系

数据.

发泡. 用低溶解度的粒子轰击器壁时,可置换晶格中的原子,其后随沉积量的增加形成

气泡. 当气泡压强增加到一定值时,固体表面肿胀,且高高突起,最后使金属表面脱落,气体再释放,便又恢复到等离子体. 这种现象重复出现,其结果大于溅射对壁的腐蚀. 气泡的大小依赖于入射粒子的能量和剂量及靶片温度与其微观结构. 这种研究所需要的数据是,在不同温度的材料和不同粒子能量下粒子的二次发射率和注入量的关系.

解吸收 (Desorption) 作用. 吸附物的溅射,在表面物理中是一种标准方法,然而在文献中几乎查不到此作用的截面和产额. 由于固体和气体分子间的作用,固体吸收了气体,或将其吸附在固体表面. 当入射粒子(离子、电子和光)射入固体时,便发生碰撞,使吸收的气体原子分子释放出来. E. Taglauer 等人^[5]研究了入射能量为 500~1500eV 时的氦轰击固体的现象,其结果是由 Ni 解吸氧 O,所确定的解吸收截面为几个 $10^{-17}cm^2$. 对于光子解吸,人们已观测了 25~50keV X 射线的光子解吸,测到

的产额大约为 6.0×10^{-4} . 对于能量为 100eV 的电子, 解吸截面约为 10^{-18}cm^2 .

1.2 等离子体边界层

等离子体边界层研究的重要意义在于等离子体边界层能把等离子体与壁分开, 且保持等离子体的清洁度. 同时还能使损失功率均匀的分布在壁上、减小真空部件的热负载, 能有效屏蔽高能粒子与杂质等作用. 随着装置尺度的不断增大, 边界层等离子体与主体等离子体间的边界更加明显. 由于密度和温度的升高, 使边界层输运加快、聚变堆中杂质的累积与控制、辐射损失和粒子的再循环等问题都与等离子体边界层密切相关. 由此可见, 边界层的研究涉及中性原子、离子和分子的电离与复合, 以及电子和光子截面的许多数据.

2 等离子体中的杂质

等离子体内杂质的产生主要是由壁和孔栏等表面上形成的溅射、起弧和发泡等因素引起的. 由于辐射能损失和杂质中韧致辐射的增加, 将严重影响聚变等离子体的性质.

2.1 杂质对热核等离子体的影响

自从研究受控热核聚变以来, 人们就非常重视等离子体杂质和辐射冷却在高温等离子体的总能量平衡中的负载作用. 在完成受控热核聚变装置时, 必须解决“类聚变”(Fusion-like)等离子体中的杂质问题, 杂质对热核理想点火条件和 Lampson 条件影响很大, H. W. Drawin^[5]曾对此做过较详细的研究. 当杂质出现时, 辐射损失明显增加, 导致理想点火温度升高, 并严重影响能量约束时间; 电阻率的增加, 直接影响欧姆功率输入和能量平衡; 杂质含量的增加, 提高了等离子体有效离子电荷数 Z_{eff} . Z_{eff} 的提高不仅增加了韧致辐射的损失, 而且增加了等离子体的电阻, 改变了温度分布, 从而影响堆的稳定运行, 对纯氢或氦等离子体, $Z_{\text{eff}} = 1$, 而 Tokamak 装置, Z_{eff} 约为 8~10.

考虑杂质辐射损失时, 应考虑原子的几种物理过程, 即碰撞电离、辐射电子俘获、三次碰

撞、复合和光致电离等. 要了解杂质对热核等离子体带来的不利因素, 就必须变革上述原子的物理过程和获得理论与实验的数据.

2.2 等离子体模型

从理论上考察等离子体中的杂质和辐射损失时, 就必须用一定的模型研究各种粒子在不同状态间的平衡. 通常, 低温高密度等离子体处于或接近热力学平衡时, 可用热力学平衡或局部热平衡模型加以描述; 用简单的 Saha-Boltzman 分布公式表述激发态和电离态. 由于磁约束的低密度高温等离子体远离热力学平衡态, 所以只能采用日冕模型(Corona Model)和更复杂的碰撞-辐射模型了.

在研究核聚变等离子体内的电子与离子非弹性碰撞和辐射过程时, 应考虑下面几种原子物理过程: (1) 电子电离和三体碰撞复合; (2) 电子激发和退激发; (3) 自发发射和诱导发射及光致激发; (4) 辐射复合、受激复合和光致电离; (5) 介电子复合; (6) 电子-离子非弹性碰撞的韧致辐射.

由于低密度高温等离子体处在激发态平衡布居, 且激发态的寿命很短, 故可认为离子都处在基态. 当知道基态密度时, 可由平衡关系得到激发态布居数为:

$$C_{k,j}^Z \cdot n_k \cdot n_e = \sum_{i>j} A_{i,j}^Z \cdot n_{i,j}^Z \quad (1)$$

j 能级的布居密度产额为:

$$n_{i,j}^Z = \frac{C_{k,j}^Z \cdot n_k \cdot n_e}{\sum_{i<j} A_{i,j}^Z} \quad (2)$$

其中, $n_{i,i}^Z$ 是电荷数为 Z 的离子处在基态的密度, $A_{i,i}^Z$ 为自发跃迁几率. 这样, 日冕模型的电离平衡条件为: $n_{i,j}^Z/n_{i,i}^Z = R_i^{Z+1}/S_i^Z$, S_i^Z 和 R_i^{Z+1} 分别为电离系数和复合系数.

因此, 我们研究聚变等离子体中杂质的密度 $n = \sum_z n_{z,j}$ 时, 就需要知道它们的各种激发和电离截面, 以及谱线跃迁几率等物理数据.

如果不考虑离子和原子等重粒子间的碰撞贡献, 那么, 只有辐射过程贡献于辐射总功率 Ψ_{inel} (忽略回旋辐射(Cyclotron radiation))^[5]

为：

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{incl}} &= - P^{\text{rad}} \\ &= - P^{f-f} - P^{f-b} - P^{b-b} - P^{\text{die}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, P^{f-f} , P^{f-b} , P^{b-b} 和 P^{die} 分别表示自由-自由辐射、自由-束缚辐射、束缚-束缚辐射和介电子复合的功率密度, 由于介电子复合中包括了不同的速率, 所以它的辐射功率可表示为 (日冕模型):

$$\begin{aligned} P^{\text{die}} &\approx \sum_Z \sum_K \sum_{i,n} e_{k,i}^{Z+1} \cdot n_{k,i}^{Z+1} \cdot n_e \\ &\quad \frac{D_{k,i}^Z}{D_{k,i}^Z + B_{k,i}^Z} (E_{k,i}^Z - E_{k,n}^Z) \end{aligned} \quad (4)$$

由此看出, 要得到杂质辐射能损失, 就须知道各种过程的速率系数、不同元素在不同电离态的能级与谱线和 K 种粒子处在电荷数为 Z 、能级为 i 的粒子密度。

2.3 杂质的控制

控制杂质, 一是防止杂质的产生, 二是迅速清除等离子体中的杂质. 采用偏滤器控制杂质和减少辐射能损失是一种十分有效的方法, 在研究冷等离子体边界层时, 大都采用此方法, 这种方法具有很大的发展潜力, 用抽气孔栏等方法控制杂质也是一种简便的方法。

3 中性束注入

磁约束等离子体要满足聚变堆判据所要求的高温, 仅靠欧姆加热是不够的, 还需辅助加热, 其中较为成功的方法是中性束注入法, 其特点是, 先加速离子源产生的离子束, 并经过与原子碰撞中产生的中性化束注入等离子体, 然后与等离子体中的离子和电子碰撞, 发生电荷交换, 最后被磁场约束, 把能量传递给离子与电子而加热等离子体。

3.1 束的加热与俘获

中性束注入等离子体后, 中性束便发生电离, 并被约束在磁场中, 其主要过程是电荷交换、离子碰撞和电子碰撞电离. 在电离和捕获

后的注入原子把能量传给等离子体的过程中, 原子束密度变化可表示为:

$$I = I_0 \cdot \exp(-nL/D) \quad (5)$$

其中, D 是特征等离子体靶厚度, L 是等离子体内原子束经过的距离, n 是单位体积内的原子数. 当条件满足 $v_e > v_{in} > v_i$ 时, 穿透厚度 D 表示为:

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{\sigma'} \\ &= \frac{1}{\sigma_x(v_{in}) + \sigma_i(v_{in}) + [\sigma(v_e)v_e/v_{in}]} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\sigma_x(v_{in})$ 和 $\sigma_i(v_{in})$ 分别为碰撞中注入原子与等离子体的电荷交换截面和电离截面. 当电荷交换发生在 $E_{in} \leq 50\text{keV}$ 时, 捕获中主要是原子过程. 当高能注入时, 质子碰撞电离起主导作用, 而经电子电离后的捕获是一种较次要的过程。

此外, 当中性束同等离子体的离子发生电荷交换被俘获时, 它能穿过等离子体中心, 把更多的能量传递给 D 和 T . 中性束与杂质发生电荷交换时, 截面会随速度增加而大于 H 与 H^+ 和 D^+ 与 T^+ 的反应截面, 这一结果说明, 少量杂质会影响束的穿透, 所以杂质也会影响中性束的加热。

3.2 离子束中性化

氘和氚在正常大气压下是双原子分子, 当在离子源中电离时, 分子气体会产生含有 D_2^+ 、 D_2^+ 和 D_3^+ 混合的离子束. 这一离子束在中性气体靶中, 因电荷交换或分解电荷交换而成为中性束, 对它的研究要涉及有关电荷交换截面等数据. 不过其难度在于: 在所需速度之内, 因中性气体靶中的电荷交换所形成的中性化几率很小, 使得生成原子的效率很低, 因此, 为了提高中性化几率, 通常改用 D^- 为离子束, 其反应为: $D^- + D_2 \rightarrow D + e + D_2$. 该反应在所需速度内, 反应截面较大, 且功率效率很大. Riviere 等人^[6]已估算了 D_2^+ , D_3^+ , D_3^+ 和 D^- 离子束的 η_0 值, 图 4 给出了中性和全电离靶

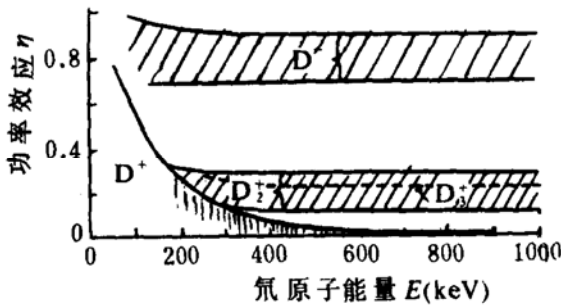


图 4 由 D_{1+} 、 D_{2+} 、 D_{3+} 、 D^- 束流产生的原子功率效率

的实验结果,证明了 D^- 束的独特优势.

4 等离子体光谱及其诊断

诊断聚变等离子体参数时,光谱测量是非常有效的方法之一.通常,从高温等离子体发射出的光谱极为丰富,从 X 射线一直到远红外光光谱区域.目前普遍采用的方法有激光光谱法和束箔光谱法.通过光谱测量,确定等离子体中的杂质浓度,有效电荷 Z_{eff} 、辐射功率、电子温度、密度分布、离子温度分布和电荷交换复合等参数.

4.1 杂质离子密度与分布

光谱谱线的发射系数可定义为:

$$\epsilon_e = \frac{1}{4\pi} n_i^z A_{ij} h\nu, n_i^z \text{ 是电荷数为 } Z \text{ 的离子在 } i \text{ 能级上的布居密度, } A_{ij} \text{ 为 } i \rightarrow j \text{ 的能级跃迁几率,}$$

对于热平衡状态下的等离子体密度可用 Boltzmann 分布

$$n(z, p) / n(z, q) = \omega(z, p) / \omega(z, q) \exp[-x(z, p - q) / kT]$$

来描述^[7].用 Saha 电离公式可计算出不同电荷态离子密度 $n^z (n^z = n(z, q))$,而元素在等离子体中的总密度为 $N = \sum_z n^z$,对于远离热力学平衡下的高温聚变等离子体,一般用日冕模型来描述各电离态和激发态的密度.此外,还可通过谱线发射系数定出等离子体中杂质和氢原子的绝对密度.

4.2 离子温度测定

利用谱线的多谱勒展宽可测量高温等离

子体中心的离子温度.此外,还可用不同种类离子的禁戒谱线测定离子温度分布.

4.3 荧光光谱

近年来,人们已用激光荧光光谱成功地测定了托克马克装置中的等离子体边界层中的原子与离子的密度和速度分布.其原理是:用可调谐染料激光,在很狭的谱带内聚集几百千瓦强度的短脉冲光,并在可见光或紫外区进行输运等离子体边界层中的原子或离子的共振谱线,根据谱线的强度和分布,可测量原子或离子的密度和速度分布,也可用其研究核聚变等离子体的杂质的输运过程.另外,还可用高电离态离子的长波禁戒谱线,即磁偶极子跃迁测量杂质的浓度;用谱线 Stark 展宽确定电子密度和微观电场强度及其分布^[7];用介电子伴线发射系数的相对值,可测出不同离子的相对丰度.

由此可见,等离子体光谱诊断所要求的数据,除原子与离子的能级和谱线与跃迁几率等外,还需有各种碰撞和辐射等过程的电离与复合、激发与退激发和速度系数等.这些数据不仅要求低电离原子数据,而且还需高电离原子的数据.目前,这些数据十分缺少,急待在理论和实验上加以研究、确定.兰州重离子加速器的建成与成功运行,加上与其相配套的具有国际先进水平的高离化态原子光谱装置,必将在高离化原子光谱领域作出高水平的工作.

5 惯性约束聚变

利用激光束、电子束或离子束的作用和挤压靶丸而形成非常密的高温等离子体.由于惯性作用,在未散开之前迅速进行聚变反应.当今,用激光打靶较为成熟,可达到的电子密度为 n_e 约 10^{24}cm^{-3} .在此密度下,可把靶丸挤压在直径为 $10 \mu\text{m}$ 之内,测量结果表明:其中热输运强烈地受到抑制^[8],这是由于在边界层出现极强自生磁场(约 10^4T)影响的缘故.

经激光挤压的等离子体由于离子密度极高,使其产生的微观电场足以使高电离杂质离子的共振谱线足够宽和位移,用谱线轮廓也可

测定电子密度. 现在, 这种方法也用于激光聚变等离子体的诊断. 但是, 使用此方法时, 应考虑到突然产生的感应磁场($B \approx 10^2 \sim 10^3 \text{T}$)的影响, 因为该磁场对谱线可产生感应的塞曼效应和运动的 Stark 效应.

目前, 激光聚变的诊断方法尚未成熟, 有许多问题急待解决. 例如, 在温度为 $5 \times 10^6 \text{K}$ 下, 根据两种热核反应的机制, 计算出的中子产额相差近 3.6×10^5 倍. 此外, 有些所需的原子物理数据还需在理论和实验上验证与确定.

参 考 文 献

- 1 朱士尧, 现代物理知识, 1992, 1: 27
- 2 Bohdansky J, et al. Proc. 9th Symp. Fusion Fech., Garmisch: 1976(Pergamon Press), 541
- 3 Int. Conf. on Surface efface in Controlled Fusion Devices, San Francisco 1976
- 4 Behrich R, et al. J. Nucl. Mat., 1976, 60: 321
- 5 Drawin H W. Phys. Rep., 1978, 37(2): 125
- 6 Riviere A C. Neutral Injection Heating of Toroidal Reactors, Appendix 3d, D. R. Sweatman, Culham Laboratory Rep. CLM-R112, 1971
- 7 Mc Whirter R W. Phys. Rep., 1978, 37(2): 125

Atomic and Molecular Processes in Fusion Research

Yang Zhihu Jing Chengxiang

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The atomic and molecular data on physical processes in fusion research are described. These data will be confirmed by experiment and theory in the future.

Key Words fusion, data.

B 与 Be 的含量使大爆炸模型受到怀疑

本刊讯 按照标准模型, 即宇宙诞生的大爆炸模型, 在宇宙诞生的最初几分钟内核聚变反应只能产生 H、He、Li 三种最轻的元素, Be 和 B 的含量不应很多. 但在银河系中发现了 7 颗 Be 元素含量很高的恒星, 使天文学家对大爆炸模型产生了怀疑.

1991 年英国剑桥天文研究所通过英—澳 3.9m 望远镜测得天秤星座一颗被命名为 HD140283 的恒星中 Fe 含量极低而 Be 含量却很高, 并测得其 Fe 和 H 含量之比只有太阳的 Fe 和 H 含量之比的 $1/400$, 故断定它是一颗古老的恒星, 大概是在 $(100 \sim 150) \times 10^9 \text{a}$ 前形成的. 按照大爆炸理论, 这种古老恒星的 Be 含量与 H 含量之比应为 1.5×10^{-16} , 但测定值却为 1.6×10^{-13} , 比理论预计大 1000 倍. 他们继续搜寻另外 8 颗恒星, 结果发现其中的 6 颗也有类似的情形.

如果假设在宇宙诞生的头几分钟内宇宙是不均匀的, 则能形成较多的 Be. 这时, 宇宙有高低密度区之分, 带正电的质子被带负电的电子拴在高密度区. 但不带电的中子则可以从高密度区漂流到低密度区, 中子与 ^1H 碰撞产生 ^3H , ^3H 与 ^7Li 相撞产生中子与 ^9Be , ^9Be 是 Be 的唯一稳定同位素. 若按大爆炸

标准模型, 早期宇宙的密度是均匀的, 质子主宰着核反应. 则只能形成极少量的 Be. 但大爆炸不是 ^9Be 的唯一来源, 在星体形成前宇宙射线穿越银河系时若与氧原子碰撞, 可以将其破裂产生较小的 Be 原子. 人们发现, 在这 7 颗老恒星中 Be 的丰度与 O 的丰度成正比, 但 Li 的含量却与 O 含量无关, 表明这些恒星中的 Li 是大爆炸中产生的, 与宇宙射线无关.

B 是不均匀大爆炸和宇宙射线都能产生的元素, 但有明显的区别: 不均匀大爆炸产生的 Be 多于 B, B 与 Be 产量之比小于 1, 而宇宙射线产生 B 多于 Be, B 与 Be 产量之比大于 8. 因此, 测定这些老恒星中 B 的含量将有助于推定 Be 的来源. 不幸的是, B 比 Be 更难测定, 需要借助于哈勃空间望远镜. 几个月前, 美国天文学家说, 哈勃望远镜探测到了 HD140283 恒星中的 B, 但 B 与 Be 含量之比为 5, 处于两个不同理论预期值之间. 英国剑桥天文研究所的科研人员正在利用哈勃望远镜测定其它 6 颗古老恒星中 B 的含量, 期望在这一问题的研究上有所进展, 从而向揭开宇宙形成之谜迈进一步.