

吸收频率,保证固定频率激光实现冷却。

利用上述实现“冷却”的途径和解决问题的手段,可进行原子捕获的实验。

2. 激光偶极子捕获

激光偶极子捕获是通过激光的非均匀振荡电场同原子的感生电偶极矩的作用来实现的。强的激光场可克服使原子冷却和休止的辐射压力。当激光频率稍低于原子共振频率时,原子被抓进激光场最强区域。由于其势阱深度仅为 mK (开氏温度)量级,原子首先必须“冷却”。偶极子捕获由一个高聚焦激光束实现,其焦点浸于使原子冷却的光学“黏胶”中,“黏胶”中的慢原子落入阱中并聚集起来,其密度从 10^6 cm^{-3} 直到 10^{12} cm^{-3} 。这是第一个被提出和得到证实的方法。当然,还有其它许多方法也能达到目的。

3. 原子的磁场捕获

这种捕获是通过非均匀磁场作用于一个具永磁矩的原子的力来实现捕获的。对于一个具有 1 个玻尔磁子的原子和 2T 的磁场,它能局域的最大能量为 1K (开氏温度)。对于中性原子,它也必须要有冷却过程。

在“过冷”实验中,原子多数连续地静止于一锥形螺线管末端,当冷却激光关闭,一些未达到管末端的原子进入捕获区,冷却激光重新打开,只要足以使原子速度降下来即可。然后,捕获用的磁场打开,定住慢原子,并抓住它们。

原子的捕获部分由两个共轴线圈组成,其间通以反向电流从而在中心场强为零,且随着距中心距离的增长,磁场强度呈线性增加。在强磁场,大体积和好的真空条件下,原子可停留较长时间。

以上我们简要介绍了几种粒子的捕获方式,电动捕获,磁悬浮和激光捕获的原理及其各自适用范围。它们各有差异,但都有着共同一点:它们都需要造成一种使特定粒子能被捕获的势阱。粒子与微粒的电磁和光捕获极大地丰富了人们观察世界的角度,有着重要的应用和诱人的发展前景,但也还有待进一步的研究。在实际工作中,我们必须根据粒子的性质(电性,磁性或中性)及其大小采用不同的捕获方法或若干方法的结合,而各种方法也并非独立的,它们相互补充,此也是我们一并介绍的目的之一。

- [1] R. F. Wuerker et al., *J. Appl. Phys.* 30(1959), 342.
- [2] J. W. Beams, *SCIENCE*, 120(1954), 619.
- [3] I. Šimon, *J. Appl. Phys.* 24(1953), 19.
- [4] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, 19(1971), 283.
- [5] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, 24(1970), 156.
- [6] A. Ashkin et al., *Opt. Lett.* 11(1986), 288.
- [7] William D. Phillips et al., Phillip. L. Gould, Paul D. Lett, *SCIENCE*, 239(1988), 877.

谈谈对地球磁层极光区千米微波辐射的认识

陆全康

李顺祺

(复旦大学物理系,上海 200433) (交通大学出版社,上海 200030)

极光区千米微波辐射是地球磁层发射的功率最强大的辐射。解开这种辐射发生机制的谜对磁层物理性质的了解是极重要的。地球人造卫星和宇宙飞船对这种辐射进行了比较仔细的观察测量。Wu-Lee 模型对辐射的物理机制作出了成功的分析。十余年来,观察测量和理论解释均取得了可喜的进展,成为磁层物理中一个活跃的前沿研究领域。

一、美丽的北极光

瑞典诺贝尔物理学奖获得者阿耳芬教授早在 60 年代访问中国科学院和复旦大学作有关等离子体研究的学术报告时曾指出, 光谱分析技术的发展开始了原子分子物理的时代, 加速器技术的发展开始了原子核和基本粒子物理的时代, 而宇宙中百分之九十以上的物质处于等离子体状态, 地球人造卫星与宇宙航行技术的发展将开始等离子体物理的新时代。

通过气体放电、热核聚变、天体物理, 以及近来在空间物理各种问题上所作的巨大努力, 等离子体物理已成为一门充分发展的学科。

地球大气层的上部是电离层, 电离层外是磁层。按照美国电气和电子工程协会 1969 年制订的标准, 电离层定义成地球大气层的一部分, 其中存在的离子和电子数量多到足以影响无线电波的传播。通常将地球电离层划分为三个区域。高度范围从地球表面以上的 40 km 到 90 km 的范围称作 D 区。该区域的电子密度在白天约为 $2.5 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, 在夜间电子密度减少到可以忽略。高度从 90 km 到 160 km 范围的称作 E 区。该区的电子密度随太阳活动有规律地变化。电子密度值在白天可以达到 $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, 在夜间, 电子密度降低一个多数量级。E 区的上面称作 F 区。F 区电子密度变化很不规律, 峰值电子密度的平均值白天为 $2 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, 夜间为 $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 。该区对地球无线电波的反射起主要作用。在有些文献中, F 区的上界取在大约 800 km 高度。电离层外面属于地球磁层区域。

在地球的北极附近, 夜间可以看到丰富多彩的北极光。在南极也同样如此。美丽的极光是电离层中的等离子体放电现象。本文讨论的极光区千米辐射并非指上述极光辐射, 而是指极光上空的磁层区域中发射的微波辐射。由于这是磁层中功率最巨大的微波辐射, 因而引起了空间物理学家的极大兴趣和关心。

二、极光区千米辐射

极光区千米辐射简称作 AKR (Auroral Kilometer Radiation)。最早的观测是苏联的 Benediktov 等人于 1965 年开始报道的。后来, Dunckel 等人也观测到这种辐射, 并于 1970 年作了报道。然而, 这些科学家未能将微波发射源区的确切位置找出来。

直到 1974 年, Gurnett 首先确定了千米辐射源区的位置是沿着极光区的磁力线, 离地面 3000 km 以上的高空范围。这就是说, 千米微波辐射源区在可见极光的上空的磁层内。Gurnett 还估算出 AKR 的功率一般是 10^7 W , 有时可达到 10^9 W 。这是磁层中功率最强大的射电辐射。AKR 是怎样产生的? 揭开了它的辐射机制之谜对于地球磁层的了解是十分关键的。

三、太阳风

地球磁层中各种辐射的产生机制显然与电子和离子的运动性质有关。磁层内部的带电粒子一部分来自电离层, 另一部分来自太阳风。由太阳日冕向外喷射的稀薄等离子体流, 称作太阳风。太阳风通过行星际空间到达地球附近的速度大约 400—800 km/s。

地球磁层的外边界称作磁层顶, 其外形在向阳面像略被压扁的半球, 而在背阳面有一个很长的近似椭圆柱的尾巴, 称作磁尾。

绝大多数的太阳风粒子被地球磁场屏蔽于地球磁层外, 但也有一部分粒子通过扩散或经过磁尾进入地球磁层内。

太阳上的各种变化影响着地球空间, 太阳是一个活动性很强的星体。黑子是太阳上的强磁场区域。耀斑是太阳上亮温度很高的区域。耀斑的迅猛发生是与太阳黑子的活动相联系的爆炸有关联, 它会引起太阳风的强烈喷发。

四、观测结果

过去几十年里,太阳系射电天文观测的进步给人们留下了深刻的印象。特别重要的是测量方法和技术进步迅速。除了采用完备的地面设施以外,人造地球卫星和宇宙飞船都装备了高分辨率的观测手段。宇宙飞船先锋号和旅行者号(即旅行者号)都获得了极有价值的测量记录。

观测结果表明,AKR的主要特征为:(1)辐射的产生与磁层亚暴有密切的联系。千米微波辐射从高频(约400—600 kHz)发射开始,逐渐发展到较低频率范围的发射。(2)源区在可见极光上空区域,高度范围主要在4000到8000 km范围。然而发射范围从高度3000 km一直漫延到12000 km,甚至更高区域。(3)发射频率范围为100 kHz到700 kHz。典型的频率为300 kHz,相应于千米波长的范围。根据测量到的辐射频率和源区的投影位置,可推断出发射频率接近或稍大于源区的局部电子回旋频率。(4)由观测到的辐射偏振性质推断,AKR大部分是右旋偏振的快异常模(X模),少部分是左旋偏振的寻常模(O模)。

五、等离子体辐射

等离子体中带电粒子运动引起的辐射可分成两类。一类是由等速运动引起的辐射,另一类是由变速运动引起的辐射。

沿磁力线等速运动的带电粒子,当粒子运动速度超过辐射波的相速度时,就能产生辐射。这就是著名的切连科夫辐射。垂直于磁力线的粒子回旋运动,由于有向心加速度,它将产生回旋辐射。这是磁层中两类最重要的等离子体自发辐射。

为了试图解释和了解AKR的辐射机制,科学家们发表了各种理论模型。这些理论是多种多样的,但有一个共同的认识。他们都强调指出,采用自发辐射理论肯定无法解释这种功

率强大的射电辐射。

这种辐射很可能起源于等离子体诱发辐射。

虽然从爱因斯坦提出诱发辐射概念以来,在热辐射、原子分子物理和激光现象中对诱发辐射的分析已相当普遍。然而在空间等离子体辐射理论中,诱发辐射还是一种比较新的概念。

总的说来,有两种诱发辐射过程在等离子体中进行。一种取决于波与波的相互作用,另一种依赖于波与粒子的相互作用。

Barbosa于1976年采用波与波相互作用来研究AKR。他认为通过频率接近于混杂频率的静电波的非线性耦合能诱发功率强大的AKR。然而,为了解释测量到的千米微波辐射的功率强度,这些静电波要求具有每米几伏的电场强度。实际测量表明这个要求在千米微波辐射源区是不可能满足的。

Twiss与Schneider最先研究了波与粒子的共振相互作用激励的等离子体诱发辐射的机制。在等离子体中,处于较高能量状态上的电子数超过较低能量状态上的电子数时,即粒子数反转状态形成后,诱发吸收就有可能转变成相反的过程,从而产生诱发辐射。Bekefi等人具体考虑了电子的一种各向同性的“球壳”能量分布,证实一定条件下这种电子速度分布可能导致辐射的诱发放大过程。Freund和Wu于1976年研究了由损失锥型电子速度分布引起的X模与O模的诱发电射辐射。

六、极光区千米辐射的成因

地球磁层在向阳的一面,磁力线形成如漏斗或缝隙的区域,通常称作极尖区。在背阳的一面,磁尾的磁力线可以和高纬度的电离层联接。当带电粒子从背阳区域沉降到电离层,就会在地球两极产生明亮的极光。很多科学家认为在磁层中AKR的成因也与这种沉降电子有关。早期的测量认为向阳区与背阳区均能产生AKR。然而近代的精确测量已证实,只有在背

阳区才能产生 AKR。

Melrose 于 1976 年提出了一种理论, 建议极光区千米微波辐射的诱发放大产生于极光区向下沉降电子束流的动力温度各向异性。这种理论引起了人们的兴趣, 因为在这以前很多关于 AKR 成因的理论只能得出 AKR 的偏振性质主要是左旋偏振的寻常模 (O 模), 这与观测结果不符合而迅速被否定。Melrose 理论确实能解释极光区千米微波辐射主要是右旋偏振的快异常模 (X 模)。但是, Melrose 的物理模型要求沉降电子束流的能量分布具有巨大的动力温度各向异性。目前还没有实际测量结果证明有这样的各向异性存在。

Galeev 也认为极光区的沉降电子束流对 AKR 的形成有密切关系。他认为电子束流可以产生孤子。这种想法是令人感兴趣的。然而关键问题是能否在 AKR 源区确实测量到有孤子存在, 由此才能接受 Galeev 于 1977 年提出的模型。

对于 AKR 源区和功率测定作出重要贡献的 Gurnett 也提出了一个理论模型。他建议, 首先激励频率为电子回旋频率 Ω_e 的 $3/2$ 倍的静电波, 然后, 这些静电波通过波与粒子相互作用形成的相位聚焦效应逐渐产生增强辐射。这种模型能否解释 AKR 的成因缺乏事实根据。尤其, 在源区也从未测量到有频率为 $\frac{3}{2}\Omega_e$ 的波。

这些事实表明, 尽管关于射电辐射的实验测量和数据分析方面已取得了迅速的发展, 在辐射机制的理论分析方面的发展相对说来比较缓慢。

七、Wu-Lee 模型

1979 年美国 Maryland 大学的吴京生和李罗权提出了一种理论, 经过实际测量的考证, 成功地解释了 AKR 的成因。现代文献把这种理论称作 Wu-Lee 模型。

吴-李理论同样认识到沉降电子对于形成

诱发辐射承担着重要作用。但是与众不同的是, 他们首次提出由于磁镜效应, 仅是沉降电子束流中经磁镜反射后形成的上升电子流对辐射的诱发放大起作用。

Wu-Lee 模型的要点是考虑波与粒子共振相互作用条件中的电子质量相对论效应对辐射诱发放大的关键作用和提出两个基本假设。一个假设是关于高能电子能量具有损失锥型分布函数。另一个假设是关于辐射源区电子密度 n_e 和背景磁场强度 B_0 数值范围的假设, 即要求 $\omega_{pe} \ll \Omega_e$, 这里 ω_{pe} 是电子等离子体频率, Ω_e 是电子回旋频率, $\omega_{pe}^2 = 4\pi n_e e^2 / m_e$ 与 $\Omega_e = e B_0 / m_e c$, 这里 e 和 m_e 分别是电子的电量 and 静止质量, 和 c 是真空光速。

考虑极光区上空背阳侧的磁力线管内部的高能电子。这些电子是从磁层中的等离子体片区域过来的。他们在磁层中被加速, 具有的能量数量级为 1—5 keV。然而, 由于在极光区会聚的磁力线形成磁镜, 投掷角大于损失锥角 ϕ_c 的沉降电子将因“磁镜效应”而被反射。只有投掷角小的电子才能沉降到电离层中。

由于因磁镜效应反射上来的上升电子流具有损失锥型分布, 它能导致电子回旋不稳定性, 这对射电波的放大起着泵浦的作用, 从而引起功率强大的 AKR。

基于上升电子流具有损失锥型速度分布, 采用等离子体动力不稳定性理论, 可以计算出辐射的时间增长率和空间增长率。在这个计算中, 重要的是在电子与波共振相互作用条件中, 必须考虑电子相对论质量效应与多普勒位移效应的共同作用, 才能得到辐射放大。

以上是吴-李理论的第一个关于高能电子上升束流的能量分布的假设。

Gurnett 曾根据人造地球卫星在辐射源区得到的电子能量随纬度分布的空间形式呈现将英文字母 V 倒过来写的形式 (称作倒 V 现象), 分析出 AKR 源区局地地存在着平行于磁力线的电场纵向分量。由于电源的效应, 在源区的本底电子密度降低到很小的值。于是, AKR 源区的总电子密度也很低, 形成了 $\omega_{pe} \ll \Omega_e$ 的

条件。这是吴-李理论的第二个关于 AKR 源区电子密度降低的假设。

吴-李理论得到的主要结果为：(1) AKR 发射在接近于局域电子回旋频率的范围发生，(2) 由于源区符合 $\omega_{pe} \ll \Omega_e$ 的条件，AKR 发射强烈的 X 横辐射。它可以解释 AKR 的主要特征而并不要求 Melrose 理论中所需要的沉降电子束流能量分布的巨大的各向异性。由于两个基本假设和得到的主要结果均与实际测量符合，吴-李理论出现后很快引起空间物理学界的注意。

八、Wu-Lee 模型发展的三个阶段

吴-李理论的早期发展可以分成三个阶段。第一个阶段是 1979 年提出的简化理论，其中完全略去 AKR 源区低能量的本底电子成分的作用。只考虑能量为千电子伏的高能电子上升束流的作用。并且把辐射波的实频色散关系用真空电磁波的色散关系来近似。正由于在计算辐射波的增长率时考虑了 Wu-Lee 模型中提出的两个基本假设和计入电子与波共振相互作用条件中的电子质量相对论效应，得出了 AKR 的成因。

尽管简化理论作了很多近似，它仍然在定性上取得与实际观察一致的满意结果。但是，进一步改善理论模型的分析方法仍然是必要的，目的在于使理论在定量上取得与测量结果的更好符合，从而对 AKR 的发射机制获得更深入细致的了解。

吴-李理论的第二阶段是提出了稀薄等离子体模型。在 AKR 源区，等离子体包含两种成分。一种是冷本底等离子体成分。这类等离子体主要是从电离层上升到磁层区域的，平均能量比较低，因而称作冷等离子体。另一种是高能电子成分。这种电子成分需要考虑电子质量的相对论效应，但由于能量只有千电子伏的数量级，因而仅考虑弱相对论效应已足够精确。

虽然这两种等离子体的密度都不大，但通

常高能成分的电子密度 n_1 比冷成分的电子密度 n_0 更小。所谓稀薄等离子体模型就是假设 $n_0 > n_1$ 成立。

稀薄等离子体模型中把 AKR 的辐射模的色散关系取作仅由冷等离子体成分确定。这就是说，略去了高能成分的电子对色散关系的影响。然而，在辐射增长率的计算中，则把冷本底等离子体成分和弱相对论性高能电子成分的影响全部考虑在内。

吴-李理论的大量工作是采用稀薄等离子体模型作出的。它引起人们注意是由于下述几个基本特点：(1) 它得出了各种模式的射电辐射波的直接放大作用。(2) 理论的分析 and 数值计算方法简单明了。(3) 这类不稳定性可以在相当普遍的条件下发生。Wu-Lee 模型不仅能解释地球磁层中 AKR 的成因，还普遍应用于对太阳系其他行星的某些射电辐射机制的解释。

吴-李理论的第三阶段是建立了广义动力回旋微波辐射理论。根据源区实地测量得到的数据，在低高度区域，条件 $n_0 > n_1$ 确实能满足。但是，由于 AKR 源区的局域电场能阻止冷本底电子进入较高的高度区域，因而在足够高度的源区， $n_0 \lesssim n_1$ 的情况就能发生。在这些区域，稀薄等离子体模型的计算方法不再适用。新建立的广义动力回旋微波辐射理论把讨论范围推广到任意比值 n_1/n_0 的情况。这种理论全面地考虑了冷本底电子成分和高能电子成分的效应，自治地计算出各种辐射模的色散关系和辐射波的时间与空间增长率。

九、辐射的非线性饱和

由于辐射放大的能量是由等离子体中的可资利用的自由能提供的。线性理论预告的不稳定性导致的辐射强度并不可能无限制地增大。当电磁波的振幅变得足够大时，线性理论所要求的小扰动假设不再适用，这时就应采用非线性理论来进行分析。非线性效应能使波的增长达到饱和。只有证明了辐射的饱和水平足够

大,才能使线性理论预言的波增长充分发展.具体说来,仅当饱和能量大于实际测量到的 AKR 能量时,吴-李理论才能解释 AKR 的成因.这意味着,仅当线性不稳定性不能迅速被非线性饱和效应压制时,吴-李理论才是有说服力的.采用 Davidson 和蔡诗东建立的非线性饱和理论的分析方法,证明了这一点.

十、吴-李理论的最新发展

近十多年来,吴-李理论在解释极光千米辐射方面虽然取得了不少成果,但仍有不足之处.(1) 根据稀薄等离子体模型的理论分析,严格垂直于背景磁场方向不可能有 X 模辐射.然而,实际测量表明,确实在某些区域观测到垂直于背景磁场方向发射的 X 模辐射,而且强度很大.(2) 吴-李理论的不足之处在关于谐波辐射的解释上表现得更为明显.前面曾述及,AKR 源区符合 $\omega_{pe} \ll \Omega_e$ 的条件,发射的 AKR 是功率强大的 X 模辐射,少量的是 O 模辐射.吴-李理论成功地解释了这一特征.然而当分析 AKR 中的谐波成分时,吴-李理论得出当 $\omega_{pe} \ll \Omega_e$ 时, X 模辐射的二次谐波通常比基波弱.然而实际测量结果表明,虽然在某些源区 X 模的二次谐波比基波弱,然而往往也能测量到相反的情况,在有些源区出现基波比二次谐波弱,或甚至基波不出现而仅有谐波出现的情况.原有的理论就不能完善地解释这些现象.

Pritchett 指出,对于垂直于磁场传播的 X 模,当电子速度 v 满足条件 $v/c \geq \omega_{pe}/\Omega_e$ 时,需要在原有的理论中考虑更多的相对论效应所产生的影响.例如当 $\omega_{pe}/\Omega_e = 0.03$ 时, $v = 0.03c$ 的电子具有的能量为 230 eV. 由于 AKR

源区的高能电子具有千电子伏的能量.原有理论只在波与粒子相互作用的共振条件中考虑相对论效应是不够的,应当考虑更多的由电子质量相对论效应所产生的影响.例如,除了辐射增长率外,在实频率的色散关系中也要计入相对论所产生的修正项和新的模式.

在广义动力回旋微波辐射理论中考虑更多的相对论效应后, Wong 等得到的新理论结果就能完善地解释关于 AKR 谐波辐射的实际测量所得到的各种现象. 这是吴-李理论新发展所得到的成就.

在实频率的色散关系中考虑相对论效应后,会出现新的辐射模.这种由相对论效应产生的模式称作相对论模.

可以预期,随着人造地球卫星和宇宙飞船的继续测量,将会得到有关 AKR 辐射的更多的测量数据和发现更新奇的现象.目前,关于相对论模的研究正在进行.此外,还发现了 AKR 辐射谱的精细结构.随着对这些新发现的探索研究, Wu-Lee 模型将会得到进一步的发展.

本文曾在由中国等离子体研究会 (APSC) 和亚非等离子体培养训练联合会 (AAAPT) 在青岛大学举办的第三届暑期等离子体物理讲习班上讲授过.承吴京生教授提供资料和预印本,蔡诗东教授和李银安教授对本文提出宝贵意见,作者谨向他们表示衷心地感谢.本工作得到国家教育委员会博士点基金的支持.

- [1] C. S. Wu, *Space Science Reviews*, 41(185), 215.
- [2] H. K. Wong et al., *J. Geo. Phys.*, 94(1989), 5327.
- [3] Q. K. Lu, *The Third Summer School on Plasma Physics*, edited by S. T. Tsai and Y. A. Li, Tsingdao University, (1990), 18.

太阳风层可作为粒子加速的天体物理实验室

在宇宙中的稀薄等离子体中,通常所见的两体库仑碰撞是不重要的,带电粒子的行为由

长程电磁力引起的集体相互作用来控制.在这些等离子体中某些动力学能量被释放出来而转