

# The Investigation of Fusion Theory and Self-Sustained Combustion of the Fusion Reactor

Shuqin Tian<sup>1</sup>, Chuanhua Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Qiandian Station of Shenyang Railway, Fushun Liaoning

<sup>2</sup>Freight Transport Center of Shenyang Railway, Xinbin Liaoning

Email: [tsq234@21cn.com](mailto:tsq234@21cn.com), [656019511@qq.com](mailto:656019511@qq.com)

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2015; accepted: Apr. 11<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Based on the corrected special theory of relativity, the pinch effect has been proved to be length contraction effects for plasma like galvanization. It will not accelerate the fusion reaction. By questioning the electromagnetic radiation theory, the current theory has been approved that it does not fit the Maxwell's equation. Combined with the testing results of the fusion reaction, the current electromagnetic radiation theory underestimated the radiation power of the fusion reactor. As mentioned above, it revealed the reasons causing the great difference between the current fusion theory and the testing results, and concluded that the current fusion reactor cannot achieve self-sustained combustion. So the improvements on the magnetic confinement devices have been suggested. For achieving self-heating of the fusion reactor, the first wall of the fusion reactor must be designed to reflect the radiation. At last, the new device which combined magnetic mirror and Tokamak has been discussed and its superiority has been approved over the rest of magnetic confinement devices.

## Keywords

Fusion, Magnetic Confinement, X-Ray Reflection, Magnetic Mirror, Tokamak, Pinch Effect

---

# 核聚变理论再探及聚变堆的自持燃烧

田树勤<sup>1</sup>, 陈传华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳铁路局前甸火车站, 辽宁 抚顺

<sup>2</sup>沈阳铁路局货运中心, 辽宁 新宾

Email: [tsq234@21cn.com](mailto:tsq234@21cn.com), [656019511@qq.com](mailto:656019511@qq.com)

收稿日期: 2015年3月26日; 录用日期: 2015年4月11日; 发布日期: 2015年4月16日

## 摘要

根据修正后的狭义相对论, 得出通电流等离子体的箍缩效应, 本质上是尺缩效应, 其并不能对聚变反应起促进作用。对电磁辐射理论的质疑, 指出目前的电磁辐射理论并不符合麦克斯韦方程组, 再结合聚变实验结果, 推测目前的电磁辐射理论低估了聚变堆的辐射能。以上两点揭示了目前核聚变理论与实验形成巨大差异的原因, 并得出目前的聚变装置不能实现聚变堆自持燃烧的结论。由此提出了对目前磁约束聚变装置在功能上的改进, 将聚变堆包层第一壁设计为具有反射镜的功能, 使辐射能重新返回, 以达到聚变堆的自加热目的。最后探讨了磁镜与环流器相组合的聚变装置新型, 阐述了该装置具有其它磁约束装置不可比拟的优势。

## 关键词

核聚变, 磁约束, 电磁辐射, X光反射, 磁镜, 环流器, 箍缩效应

## 1. 引言

可控核聚变是目前认识到的, 最终解决人类社会能源问题和环境问题, 推动人类社会可持续发展的重要途径之一。从上世纪 60 年代末至今, 全世界共建造了上百个相关实验装置, 分为惯性约束(ICF)和磁约束(MCF)两种。但科学家们在理论研究和实验技术上遇到了一个又一个难以逾越的障碍, 距工业应用的最初目标依然很远。

ICF 聚变是由激光器或粒子加速器产生的强脉冲能量, 照射到含有聚变燃料的靶丸上, 靶丸吸收强脉冲能量后形成高温、高密度等离子体, 使聚变燃料发生聚变反应, 释放出能量。这种聚变装置需要不断地向反应室中心提供核燃料靶丸, 是以短脉冲方式运行的受控核聚变, 需要周期性地重复点火驱动。受多种能量形式间的转换效率限制, 靶丸的能量增益需大于 150~200 时, 才能实现静电能的输出[1]。而目前的能量增益, 才刚刚实现 1 的突破[2]。所以 ICF 在很多环节上, 都必须取得突破性的进展, 否则是没有竞争力的。

MCF 聚变是利用带电粒子在磁场的作用下, 围绕磁力线转动, 而不能横穿过磁力线的性质, 将极高温度的等离子体核燃料, 约束在磁场中。该种装置可不断地进行燃料添加及废料排放, 是种可持续运行的受控核聚变装置。MCF 聚变历史悠久, 技术成熟, 其最终目标, 是实现人们所期望的可自持燃烧的聚变反应。这是 ICF 不能做到的, 也是人们不愿放弃 MCF 的一个重要因素。但该装置实际工程中却遇到了很多难以解决的技术困难, 如中子辐射对聚变堆包层第一壁材料的损坏, 维修和放射性处理等等。这些问题造成了 MCF 进展的停滞不前, 一直处于理论上可行的水平, 其能量增益也落后于 ICF。这使得 MCF 的应用前景不被当前看好, 认为晚起步的 ICF 可能是更好的方案。

可见, 无论是 ICF 还是 MCF, 目前都存在着难以解决的困难。代表世界最先进的中国 EAST, 其等离子体放电持续时间设计值为 1000 秒[3], 但实验模拟值只有几秒[4]。实际与理论的巨大差异, 说明 MCF 在理论上必存在着重大缺陷。实验是验证理论的根据, 理论是对实验发展的促进。所以, 完善 MCF 核聚变理论, 并指导实验装置的改进, 是摆脱当前 MCF 困境的必然选择。

## 2. 磁约束核聚变理论的进一步完善

### 2.1. 重新认识箍缩效应

等离子体通以电流后, 根据洛伦兹力定律, 电流产生的磁场将使等离子体中的电粒子, 沿垂直于电流方向的收缩, 称为箍缩效应。一般设电流方向为  $z$  轴方向, 所以也称为  $z$  箍缩。通常认为, 箍缩效应对等离子体产生向内的压力, 从而使等离子体的密度和温度得以提高, 是促进聚变点火的一个因素。其实不然。

狭义相对论的最新研究指明, 运动物体在横向和纵向上, 具有相同的尺缩效应[5], 且皆源于力的作用[6] [7]。对于流动的液体, 由于其所占空间的尺缩, 对其外部表现为压强减小, 即伯努利效应。而对于普通气体, 压强减小的同时, 还会伴随着雾化效应而使温度降低。通以电流的等离子体, 其横向尺缩源于洛伦兹力, 纵向尺缩源于额外纵向力[6]。所以说, 箍缩效应在本质上就是尺缩效应, 而由此造成的等离子体密度提高, 是电粒子间作用力的重新平衡, 并不会增加等离子体内部的压力。这种空间上的收缩, 表现为等离子体约束增强的假象。如果不考虑由电流和磁场引起的电粒子碰撞而产生的欧姆热, 箍缩效应不会对聚变反应产生任何促进作用。

$Z$  箍缩实验装置, 是靠流经金属或金属丝阵围成的套筒的强大电流产生的磁场, 而获得的高温、高压等离子体。对等离子体本身来说, 属于外力作用的结果, 并不是等离子体自身电流的箍缩效应。当套筒融断后, 电流便全部流经等离子体, 等离子体内部压力便不再增加。而当前的  $Z$  箍缩聚变理论, 并没有考虑到这个因素, 认为应能获得高产额(增益达 100)聚变能[8], 从而过高地估算了电流的作用。这种情况同样存在于 Tokamak 装置中, 成为理论与实验产生差异的一个重要因素。

### 2.2. 电磁辐射理论的重新审核

麦式方程组预言了电磁波的存在, 但电磁波的辐射理论却是建立在电磁感应原理的基础上[9], 并认为电荷只要有加速度, 就会形成电场扰动而感生出磁场, 磁场再感生电场, 如此反复, 形成电磁辐射, 并预测加速运动的电荷将受到辐射阻尼力的作用。但由辐射功率的拉莫尔公式导出的辐射阻尼力, 不但理论上行不通, 与实际观测值也远远不能符合[10]。再者, 该辐射理论把电磁波看做电场的振动, 这不但无法描述波形态的电场, 也背离了电场的存在形式, 更无法说明电磁波的粒子性, 从而与光就是电磁波的结论发生矛盾。如此等等问题还有许多, 而其中电磁波的零点困难更是其无法回避的死结。

电波和磁波(电磁波)是由麦式方程组分别推导得出的[11], 电波与磁波是同步的, 是与电磁感应原理相矛盾的(零点困难的起因)。其电场的波动方程为:

$$\nabla^2 E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中, 等号左边为辐射出的电磁波。等号右边是波源, 其中  $\mu\sigma$  为常数( $\mu$  磁导率,  $\sigma$  自由电荷的体密度),  $\partial E/\partial t$  为外电场的变化率。当外电场恒定或  $\partial E/\partial t = 0$  时, 等号左边成为脱离波源而传播的电磁波。可见, 波源激发电磁波的条件之一是  $\partial E/\partial t \neq 0$ 。而如果波源中无自由电荷, 即  $\sigma = 0$ , 波源也不能激发电磁波, 即单凭电场的变化不能激发电磁波。因为波源中自由电荷的运动规律依赖于  $\partial E/\partial t$ , 所以, 电磁波产生的本源是自由电荷的规律性运动。

设单位体积内自由电荷数为  $n$ , 则  $\sigma = nq$ , 则自由电荷的加速度  $a = Eq/m$  ( $m$  为单个自由电荷质量), 得  $E = am/q$ , 则式(1)右边整理为  $\mu nm \partial a/\partial t$ 。因为自由电荷质量的密度  $\rho = nm$ , 则式(1)整理为:

$$\nabla^2 E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu\rho \frac{\partial a}{\partial t} \quad (2)$$

由式(2)可知, 波源中自由电荷加速度的变化率, 才是激发电磁波的必要条件。从另一角度考虑, 恒定的加速度不可能形成周期性的波动, 这与质点的加速度恒定时, 不会形成机械波的道理类同。可见, 将电磁波理解为电磁场的相互激发是不能成立的, 也不符合式(1) (2)或麦式方程组。可见, 电磁感应与电磁波, 本质上是两种不同的电磁规律, 彻底否定了匀加速电荷激发电磁波和将电磁波定性为电磁场相互激发的理论。

目前所有电磁波的发射装置, 本质上都是电荷的加速度随时间发生变化, 且辐射垂直于加速度方向。圆周运动的电荷, 虽加速度大小不变, 但方向不断变化, 根据式(2), 则仍将产生电磁辐射或称同步辐射。现代高能同步加速器的加速部分, 都是采用直线加速装置[12], 是对电荷的不断重复加速, 加速度的变化只存在于匀速与加速的交替时刻, 而电荷在加速过程中, 加速度近似恒定, 所以这种加速装置的辐射很小, 与式(2)符合。其实原子也辐射电磁波, 如热辐射。原子之所以稳定, 是因为辐射的能量与吸收周围物质辐射的能量相等, 原子属于动态稳定。

麦式方程组是微积分方程, 而微积分方程的解不仅仅决定于微分方程的形式, 还依赖于解的初始条件。初始条件不同, 同一微积分方程解法不同, 结果也不相同[13]。由于数学解存在冗余项, 单纯依靠数学上的预言, 很难做到结果的唯一性, 也不能揭示结果的具体生成机制。

### 3. 聚变堆自持燃烧的实现

#### 3.1. 等离子体的热能损失

实现聚变能源的可利用, 只能通过高温等离子体方法, 这已为理论和实践所证明。这就要求聚变产物所携带聚变能, 能够保证聚变堆形成自持燃烧, 方可实现聚变能的有效输出。

等离子体的热能损失, 主要是辐射损失。根据当前的电磁辐射理论计算, 对于粒子密度  $n_e = n_p = 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 温度为 4 keV 的氘-氘反应堆的辐射功率, 正好同核燃料产生的功率相平衡[9]。但 1986 年 TFTR 的放电, 等离子体温度高达 20 keV [14], 已远远超过了聚变点火要求, 但仍不能实现自持燃烧。中国的 EAST, 其增益也不到 1 (首次实现增益大于 1 的, 是采用惯性约束的美国国家点火装置[2]), 可见其聚变反应是外界持续加热的结果, 而不是自持燃烧。有学者曾猜测, 部分  $\alpha$  粒子以意想不到的方式逃离了等离子体, 且不将动能留在等离子体中, 但实验的分析结果却否定了这种猜测[15]。

在等离子体吸收  $\alpha$  粒子能量的过程中, 会把大部分能量首先转移给电子(与转移给离子的能量比高达 170 [16]), 使电子产生更强烈的韧致辐射, 导致了  $\alpha$  粒子的动能损失。而劳逊判据推导的前提是, 认为  $\alpha$  粒子能量会全部留在等离子体中[17], 所以劳逊判据不能直接做为聚变堆自持燃烧的依据。

一般来说, 温度在 950°C 时, 辐射与传导对流传递的热能大体相等[18]。由此可见, 极高温等离子体的辐射能则更是远远大于传导对流传递的热能。另外, 同种粒子间碰撞所形成的辐射, 虽然频率较低, 易被等离子体吸收, 但由于聚变堆的密度低、体积小, 对其吸收也是有限的。研究认为, 恒星内部的聚变能量, 便是主要依靠辐射能进行热传递的[19]。

对辐射理论的质疑(2.2 节), 说明目前的理论计算值是需要重新审核的。当然, 从麦克斯韦方程组出发, 对辐射作完整的计算, 目前还充满着数学上的困难[9]。其实仅从上述实验结果的分析看, 也完全可以肯定, 对于目前的 MCF 装置, 单纯依靠各种大功率装置对等离子体加热, 是不能实现聚变堆自持燃烧目的的。

#### 3.2. 聚变堆反射镜

目前的聚变装置存在两大困难, 聚变堆的自持燃烧和中子辐射对聚变堆包层第一壁材料的损坏(近期内无彻底解决的思路)。所以, 实现聚变能的可利用, 必须改变现行聚变装置在功能上的设计理念, 即,



增加辐射能的直接利用功能。这样，便可大幅度提高聚变堆温度，并向着 $^2\text{D}-^3\text{He}$ 等无中子生成的聚变反应跨进，力求从根本上解决这两大困难。

由于物质的辐射光谱就是其吸收光谱，所以采用光反射镜做为聚变堆的包层第一壁，将辐射能重新反射回聚变堆，极利于辐射能的重复吸收，从而大大减少聚变堆的热能损失。在目前情况下，反射镜是实现聚变堆自持燃烧的唯一可行途径，且还能起到些稳定和压缩等离子体的作用(ICF原理)。

做为聚变堆包层第一壁的反射镜，应能够对各种频率的光或电磁辐射进行高效率反射，尤其是X光的反射。X光穿透力强，对其反射的研究，是目前X光学研究热点。反射镜的设计有几种方式可选取，多层膜X光反射镜，碘化铯(CsI)等将X光转变为可见光，还可采用X光导管或毛细管原理，将X光导回聚变堆方法制成反射镜。具体选用哪种形式，要结合当前的技术水平和聚变类型加以选择，其宗旨是尽可能选用高反射效率的反射镜。

被反射镜吸收掉的辐射能量会变成热能，可用于向外发电。也可应用光电效应原理，将部分辐射能直接转换为电能。

等离子体中混入适量的杂质，可增加电子数密度。根据康普顿效应，X光子与电子碰撞，可转换为更低能量光子，利于反射效率的提高。可见，MCF聚变装置加入反射镜后，可使聚变堆达到更高的温度，其杂质影响也可忽略。

对于 $^2\text{D}-^3\text{T}$ 型聚变，还要考虑反射镜的抗中子辐射损伤能力。为了减少中子对反射镜的伤害，可在聚变堆中加入过量锂(产生的氦可直接用于聚变燃料)或其它重离子对中子进行吸收，以尽可能延长反射镜寿命。相信随着反射镜制作技术水平不断提高和聚变技术的不断成熟，实现 $^2\text{D}-^3\text{He}$  ( $^3\text{He}$ 在地球上的蕴藏量很少，大量获取要依赖月球)这种无中子产生的理想聚变反应，是完全可行的。

## 4. 组合型磁约束聚变装置初探

### 4.1. 磁镜与环流器相组合的聚变装置

实现聚变堆的自持燃烧，首先必须保证等离子体的宏观稳定性。而目前的MCF装置中，只有极小B磁镜(磁阱)可以做到这点。如图1，将反射镜做为聚变堆包层的第一壁并置于磁镜中，可最大限度地减少辐射能损失或提高聚变堆温度。变压器在环流器中感应的闭合环形电场，使落入磁镜损失锥的电粒子在环流器中得到加速，并从另一端再次回到聚变堆，从而完成聚变堆的加热，是种将聚变堆与加热器分离开的聚变装置。可见，聚变堆的温度主要取决于环流器中的感应电场强弱、反射镜的反射效率和磁镜的镜比。

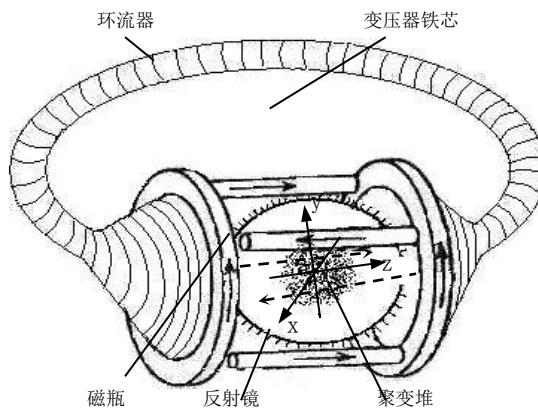


Figure 1. The type of combination with fusion device's working principle

图 1. 组合型聚变装置工作原理

由于图 1 环流器中的电粒子存留时间极短，完全不同于 Tokamak 装置中环形聚变堆的长时间存留，极利于抑制电粒子的向外漂移(电漂移)而碰撞器壁(也可辅以传统的外加或环形铜壳形成的垂直磁场予以解决[17])。克服了传统 Tokamak 装置中的环形聚变堆所带来的多种技术难题和设备的复杂性，并合理利用了磁镜的端损失，解决了离子的逃逸问题。

由环流器中磁场的曲率和不均匀性所引起的漂移(正负电粒子分离),将会减少正负电粒子的碰撞机率,有利于电粒子的加速或对磁镜中的聚变堆加热。由于电子与离子质量相差很多,电子很容易在磁镜损失锥处被离子碰回聚变堆或为离子让路,从而实现了聚变反应所期望的典型离子加热。

#### 4.2. 磁镜中等离子体微观不稳定性的抑制

磁阱实验在抑制等离子体的宏观或磁流体动力学(MHD)不稳定性方面是没有不成功的[20]。但对微观不稳定性的抑制则无能为力,其分别为: 1) DGH 模。在离子分布函数足够窄时发生。2) HFCLC 模。由离子速度分布不均驱动的电子纵向振荡模形成的高频对流损失锥。3) DCLC 模。角向的电子漂移波通过径向密度梯度,跟损失锥离子分布中的粒子数反转相耦合而激发的漂移回旋损失锥。4) AIC 模。沿纵向传播的阿尔芬波跟离子回旋运动发生共振的结果,驱动项主要是磁镜位形中固有的离子分布各向异性。

纵观这些微观不稳定性,都是由于磁镜中磁场的横向、纵向分布不均,捕获离子的分布函数偏离麦克斯韦分布,造成了等离子体的各项异性。要针对性地分别解决这些微观不稳定性,将是个极复杂、也是极难实现技术问题。而若能使等离子体旋转起来,问题便可迎刃而解。

将经环流器加速后射向聚变堆的两条电粒子径迹(图 1 虚线所示),分别沿 y 轴和 x 轴方向偏离等离子体中心,形成对聚变堆的旋转力矩(类似场反向位形技术),则聚变堆将会形成非定轴旋转,离子便会在磁场作用下趋于均匀分布。如此,磁镜的所有微观不稳定性,便可全部得到有效控制。聚变堆的旋转还会形成一定的反向场,使宏观稳定性也得到进一步加强。

采用具有磁阱位形的磁镜与无等离子体逃逸问题的环流器组合,不但可充分发挥二者的各自优势,还做到了化劣势为优势的效果。其加热原理,完全有别于依靠正负电粒子碰撞形成的欧姆加热,是不受等离子体温度影响的简单、高效、易控的电流加热方式。通过控制变压器电流,即可达到精确调整聚变堆温度的目的。

#### 4.3. 极具前途的会切磁场位形磁镜

磁镜装置工程设计简单, $\beta$ 值(等离子体压力与磁压力之比)高,但从制造技术和工艺角度考虑,图 1 中的磁镜只能适用于实验或小型聚变电站的建设。且依靠等离子体的旋转来抑制微观不稳定性,还会影响到加热功率和装置的各种参数等选择。

若将磁镜两端线圈的电流互相反向,则形成会切磁场位形磁镜(会切磁镜)。会切磁镜可以进行任意组合,从而形成容积更大的多磁极会切磁镜。将来或可用永磁体(目前 B 可高达 2 T)代替电磁体,从而大大降低建设和运行成本。

多磁极会切磁镜是种非常理想的 MCF 聚变装置,其有几大优势。1) 内部磁场分布对称,利于微观不稳定性的抑制。2) 内部磁场曲率皆为正(好曲率),极利于 MHD 不稳定性的抑制,是优于目前任何形式的 MCF 装置。3) 中心场强为零,磁场梯度(包括会切面)或镜比(近似无穷大)远大于图 1 中的约飞场磁镜,会切面同其它部位一样,能够最大限度地反射电粒子。4) 会切磁镜也可与环流器相组合而形成图 1 结构,易于实现离子型加热。只是环流器的一端为正常磁极,另一端需连接在磁场的会切处。5) 燃料的添加和废料的排放部位,容易设置。

一般认为,带电粒子容易从磁场会切面逸出约束系统。这似乎是个非常棘手的问题,所以很少有人

研究会切磁镜，也未见到过关于该种装置的实验报导。但由于多磁极会切磁镜内部会切处的磁场，同其它处一样具有较大的梯度，只要参数选择合适，电粒子逸出问题，完全可以得到解决。可见，多磁极会切磁镜对未来大型聚变电站建设，是极具前途的。

## 5. 结论

目前核聚变装置的基础理论，有两方面需要重新认识：1) 通电流等离子体的箍缩效应，就是相对论的尺缩效应，其并不能对聚变反应产生促进作用。2) 对由麦式方程组得到的电场波动方程继续推演，得出电荷加速度的变化率才是激发电磁波的首要条件。

实验结果表明，目前的 MCF 装置不能实现聚变堆自持燃烧，由此提出 MCF 装置在概念设计上的改进。将反射镜做为聚变堆包层的第一壁，这近似于将辐射能量直接留在了聚变堆中，是实现自持燃烧的可行性方法，且可免除要求很高的大功率加热设备的制造，大大降低聚变发电成本。对于中子辐射问题的解决方法，一是加强反射镜的抗中子辐射损伤能力，二是直接向无中子生成的聚变反应过渡(反射镜的加入会使聚变堆温度大幅提高，使这种聚变反应在实际中的实现成为可能)。

对于经过多次重复而不能成功运行的实验装置，必需要寻求理论或装置原理上的突破，才能向着最终目标靠近。对于存在理论缺陷的装置，一味的细节强化，是经验的积累，也是失败的重复。磁镜与环流器的组合，可解决目前 MCF 装置面临两个重要问题——稳定和加热，是对其它 MCF 装置优化的新型。虽然图 1 装置还只是个原理模型，但其在概念设计方面的改进，是在理论和实验基础上提出的尝试，也是对理论和实验的完善发展。

## 参考文献 (References)

- [1] 王淦昌, 袁之尚 (2005) 惯性约束核聚变. 原子能出版社, 北京, 29.
- [2] Hurricane, O.A., Callahan, D.A., Casey, D.T., et al. (2014) Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion. *Nature*, **506**, 343-348.
- [3] 刘英, 罗家融, 李贵明, 等 (2008) EAST 数据采集控制系统. *计算机工程*, **14**, 228-230.
- [4] 刘成岳, 陈美霞, 吴斌 (2010) EAST 装置放电预测的初步研究. *核聚变与等离子体物理*, **4**, 295-300.
- [5] 田树勤 (2011) 狭义相对论中各变换式的重新推导及合理性分析. *廊坊师范学院学报(自然科学版)*, **4**, 51-55.
- [6] 田树勤 (2012) 狭义相对论变换式修正结果的验证. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, **2**, 212-216.
- [7] 田树勤 (2013) 引力理论新探. *现代物理*, **3**, 84-89.
- [8] (俄罗斯)利伯曼, 等 (2003) 高密度 Z 箍缩等离子体物理学. 孙承纬, 译, 国防工业出版社, 北京, 271-275.
- [9] (美) Bekefi, G., 等 (1981) 电磁震荡, 电磁波和辐射. 王思符, 等, 译, 人民教育出版社, 北京, 217-223, 240.
- [10] 俞充强 (1999) 电动力学简明教程. 北京大学出版社, 北京, 200-204.
- [11] 卢荣章 (1985) 电磁场与电磁波基础. 高等教育出版社, 北京, 121-125.
- [12] 谢家麟 (2000) 加速器与科技创新. 清华大学出版社, 北京, 148-149.
- [13] 陈睿 (2000) 平面横电磁波模的初值问题. *物理学报*, **12**, 2514-2518.
- [14] 朱士尧 (1992) 核聚变原理. 中国科学技术大学出版社, 合肥, 41.
- [15] 张砚 (1994) D-T 聚变反应堆  $\alpha$  粒子逃逸问题的探讨. *高新技术通讯*, **11**, 43-45.
- [16] (美)T.卡马什 (1982) 黄锦华等, 译. 聚变反应堆物理(原理与技术). 原子能出版社, 北京, 109.
- [17] 王乃彦 (2001) 聚变能及其未来. 清华大学出版社, 北京, 38-39.
- [18] 张衍国 (2008) 炉内传热原理与计算. 清华大学出版社, 北京, 150.
- [19] (日)林忠四郎 (1983) 恒星的演化诞生与衰亡. 科学出版社, 北京, 53-54.
- [20] (美)爱德华·泰勒 (1987) 聚变 第一卷 磁约束(上册). 胥兵, 等, 译, 原子能出版社, 北京, 232.