

文章编号: 1007-4627(2004)04-0284-03

正电子能量转换研究进展*

王少阶

(武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 简要介绍了正电子能量转换的原理、优点、重要应用前景及主要研究领域.

关键词: 正电子; 正电子湮没; 正电子约束; 正电子能量转换

中图分类号: O562 **文献标识码:** A

1 引言

正电子是电子的反粒子, 正电子进入物质后与电子发生湮没, 亦可与电子形成正电子素(其符号为 Ps, 亦称电子偶素)而后湮没. 正电子与正电子素湮没后均发射特征 γ 射线. 应用现代核谱学方法可精确测量这些湮没 γ 射线的特性, 从而得到物质微观结构的许多重要信息. 因此, 正电子湮没在材料科学等领域得到广泛的应用. 近年来, 随着反物质研究的进展, 正电子能量转换 (PEC) 开始为人们所重视. 本文将简要介绍正电子能量转换的原理、优点、重要应用前景及主要研究领域.

2 正电子能量转换的原理

正电子是英国科学家狄拉克最先预言, 并由美国科学家安德森于 1932 年在宇宙线实验中发现的. 它是人类认识的第一个反物质. 缺中子放射源的 β^+ 衰变和高能 γ 射线引起的电子对效应均可产生正电子. 正电子遇电子就会发生湮没并放出两个光子, 正电子与电子的质量全部转化为湮没光子的能量, 每个光子的能量为 $E_\gamma = m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$.

正电子能量转换就是先用电能产生正电子, 并用电磁技术对其进行约束, 用以积累和储存足够数量的正电子, 然后在某些特殊能源需求时通过正电子湮没反应将其转换为光能. 正电子能量转换将为未来能源需求提供革命化的解决方案.

3 正电子能量转换的优点

具有已知最大能量密度 正电子湮没过程中,

不仅正电子, 而且与之湮没的电子的质量都全部转化为湮没光子的能量, 每个光子能量为 $E_\gamma = m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$. 简单计算可知, 1 kg 的正电子湮没后会产生 $1.8 \times 10^{17} \text{ J}$ 的能量, 这是人类已知的最大能量密度. 表 1 列出了几种典型物质的能量密度.

表 1 几种典型物质的能量密度

物质	能量密度/(J · kg ⁻¹)
TNT	4.7×10^6
裂变 (100%)	7.1×10^{13}
聚变 (100%)	7.5×10^{14}
正电子	1.8×10^{17}

没有放射性核废料 正电子湮没的产物仅为能量 0.511 MeV 的 γ 射线, 这种能量不会引起任何核反应, 不会污染大气、地球和其他任何环境.

可用电磁装置实现正电子的约束和储存 正电子带正电且质量很小, 可较容易用电磁装置对其约束和储存^[1,2]. 计算表明, 正电子素在一个交叉电磁场中存在长寿命态^[3].

可产生足够数量的正电子 缺中子放射源的 β^+ 衰变和电子直线加速器均可产生正电子. 如美国劳伦斯利弗莫国家实验室 (LLNL) 用 100 MeV 电子直线加速器即可产生能量在 1—10 eV 范围, 流强为 $10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$ 的正电子束^[4]. 如进一步改进, 可年产 μg 量级的正电子 (10^{21} e^+).

4 正电子能量转换具有重要应用前景

建造新型 γ 激光器 美国加州大学 River Side

收稿日期: 2004 - 08 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (A0324501)

作者简介: 王少阶 (1942—), 男 (汉族), 湖北武汉人, 教授, 从事正电子湮没研究; E-mail: wsjh@public.wh.hb.cn

分校的 Mills 等^[5]最近提出建立基于玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的正电子素湮没 γ 激光器的设想,即在一圆柱体内形成高密度单态冷 Ps,通过受激湮没生成一个沿轴向发射的相干 γ 射线束.初步计算表明,如能积累 10^{13} 个正电子,有可能得到能量为1 J的小激光器.

宇宙飞船的新能源 航天技术虽已取得巨大成就,但就人类探索与开发空间而言只是迈出了一小步,目前飞行器主要绕地球运行.若要将人送上火星或进入远外空间作星际飞行,则要求飞船有更高的速度.化学燃料作推进剂已不能满足要求,必需大大增加燃料的能量密度.美国宇航局2001年召开的“先进空间推进器研讨会”上, Meyer 等^[6]提出用正电子能量转换作航天飞机推进器的设想.他们认为10年内用此技术发射一个1 000 kg的小型航天飞机是可能的.

国防应用——清洁光子弹和战略导弹防御 只要存储足够数量的正电子,可做成体积很小的手提式武器.如能得到1 mg正电子并将其释放,进入物质后会极快湮没,所产生的能量相当于40万t TNT炸弹所产生的能量,是一种新型干净的光子弹.若能发展出能量为1 GJ的 γ 激光器,则可用于战略导弹防御.

促进相关学科发展 正电子能量转换涉及正电子的产生、慢化、约束、积累、储存及转换等一系列重大技术,将对正电子物理、反物质研究、高密度能量存储、 γ 激光、玻色-爱因斯坦凝聚等学科的发展产生巨大推进作用.

5 正电子能量转换的主要研究领域

正电子的产生和慢化 目前有两种方法产生正电子:一种是使用缺中子放射源(如 ^{22}Na , ^{64}Cu)的 β^+ 衰变,另一种是用50—100 MeV的电子直线加速器中的高能电子打钨靶,通过韧致辐射产生正电子.这两种方法产生的正电子能谱均很宽,不便于正电子的约束与收集.为此,必须使用慢化器将正电子能量慢化至1—10 eV.如美国劳伦斯利弗莫国家实验室(LLNL)用100 MeV电子直线加速器产生能谱在1—10 MeV范围内的正电子流强为 10^{15} e^+ /s,但慢化后仅得到 10^{10} e^+ /s.如重新设计并进

一步改进,可望年产 $\mu\text{g}(10^{21}$ e^+ 个)量级的正电子.目前的实验常用50 mCi的 ^{22}Na 作为正电子源,如用固态氖作慢化材料,可实现1%左右的慢化效率,比传统钨慢化器的效率提高约10倍.

正电子的约束和储存 这是实现正电子能量转换的关键.因为正电子的质量很小,即使其能量仅为eV量级,其速度仍然很高.为有效约束和积累正电子,首先需解决的关键问题是将其能量继续降低到热能(25 meV).当用50 mCi的 ^{22}Na 作为正电子源时,常采用基于捕获的正电子束技术,即用氮分子的电离与激发使正电子能量降到热能.其次用交叉电磁场装置对处于热能的正电子进行约束和积累,常采用潘宁阱来约束、积累正电子.此外,还采用旋转电场技术对正电子等离子体作进一步径向压缩,以增加正电子密度,并改善真空,力争使正电子积累时间超过1 000 s.此外,还将从理论上研究在交叉电磁场中,正电子素(Ps)存在长寿命态的条件.同时开展手提式正电子捕获装置的设计.

正电子能量转换 如使用50 mCi的 ^{22}Na 产生正电子,将可能积累 10^9 个正电子,在此基础上,可开展正电子素(Ps)分子形成、Ps玻色-爱因斯坦凝聚(Ps-BEC)和受激湮没辐射研究.如用100 MeV电子直线加速器来产生正电子,可望积累 10^{15} 个正电子,在此基础上可开展 γ 激光器研究,力争实现1 J能量输出,并进行清洁光子弹模拟实验(10^{15} 个正电子相当于1 μg 正电子,将产生180 J能量).如能将正电子数积累到mg量级(10^{24} e^+),则可开展能量为1 GJ的 γ 激光器、手提式清洁光子弹研究,并开展导弹防御方案及重量约1 000 kg小型航天飞船的推进器方案研究.只要坚持不懈地探索,正电子能量转换必将在建造新型 γ 激光器、宇宙飞船的新能源乃至防务领域均能得到广泛的应用.

6 结论

只要坚持不懈地探索,正电子能量转换必将在建造新型 γ 激光器、宇宙飞船的新能源乃至防务领域均能得到广泛的应用,并促进如玻色-爱因斯坦凝聚等相关基础学科的发展.正电子能量转换不仅将革新高密度能量储存技术,并将对未来某些特殊能源需求乃至武器装备提供革命化的解决方案.

(下转第305页)

- [13] Ding Y B, *et al.* Phys Rev, 1996, **D54**: 1 136. **A103**: 59.
- [14] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Phys Rev, 2003, **D67**: 14 027. [17] Yang J J, *et al.* Nucl Phys, 1998, **A640**: 457.
- [15] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Phys Rev, 2000, **D62**: 34 014. [18] Ken P E, Grosse H, Sch F. Comp Phys Commun, 1985, **34**: 287.
- [16] Barchielli A, Brambilla N, Prospero G M. Nuovo Cim, 1990, [19] Shen P N, Li X Q, Guo X H. Phys Rev, 1992, **C45**: 1 894.

Heavy Quarkonium Mass Spectra in a Relativistic Quark Model*

MEI Hua, CHEN Hong

(School of Physics, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China)

Abstract: A relativistic quark model based on the quasipotential approach in quantum field theory is briefly introduced, and by using this model, heavy quarkonium mass spectra are calculated in detail. It is shown that such a model can give results which are in agreement with the observed experimental data on the mass spectra.

Key words: heavy quarkonium; mass spectrum; relativistic correction; annihilation potential

(上接第 285 页)

参 考 文 献:

- [1] Gilbert S J, Kurg C, Greaves R G, *et al.* Appl Phys Lett, 1997, **70**: 1 944. Conversion. 7th Int Symp Positron and Positronium Chemistry, Jul. 2002, Oak Ridge, USA.
- [2] Greaves R G, Surko C M. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 1 883. [5] Mills A P. Jr. Nucl Instr and Meth, 2002, **192**: 107.
- [3] Ackermann J, Shertzer J, Schmelcher P. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 199. [6] Meyer K J, Metzger J D, Smith G A. 2001 Advanced Space Propulsion Workshop, Huntsville, AL USA, April 2001.
- [4] Edwards K M. Revolutionary Development of Positron Energy

Studies on Positron Energy Conversion**

WANG Shao-jie

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The concept of positron energy conversion, the advantages of positrons, the possible applications and main research area of positron energy conversion were reviewed in this paper.

Key words: positron; positron annihilation; positron confinement; positron energy conversion

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10147208)

** Foundation item: National Natural Science Foundation of China(A0324501)