

原子核是否存在手性^{*}

孟杰[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 手征对称性在自然界中广泛存在,如人类的手,某些化学和药物分子以及海螺壳等都有手征性.原子核中的手征对称性概念于1997年提出,随后成为核物理研究之中的热点问题.文章简要介绍了原子核中的手征对称性概念,以及如何判断原子核中的手征对称性破缺,回顾了最新的理论和实验研究进展,并对未来理论和实验方面所需解决的问题进行了简单小结.

关键词 手征对称性,原子核,理论及实验研究进展

Is there chirality in atomic nuclei?

MENG Jie[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Static chiral symmetries are common in nature, for example, the macroscopic spirals of snail shells, the microscopic handedness of certain molecules, and human hands. The concept of chirality in atomic nuclei was first proposed in 1997, and since then many efforts have been made to understand chiral symmetry and its spontaneous breaking in atomic nuclei. Recent theoretical and experimental progress in the verification of chirality in atomic nuclei will be reviewed, together with a discussion of the problems that await to be solved in the future.

Keywords chiral symmetry, atomic nucleus, experimental and theoretical progress

1 引言

静态手征性在自然界中普遍存在,如宏观世界中海螺壳的螺旋性,微观世界中某些分子的手性,日常生活中的左右手等.在几何学中,如果一个图像与其镜像不同,或者如果一个图像不能通过转动和平移操作使其与其镜像重合,则称该图像是手性的(或者说具有手征性).在粒子物理学中,手征性是区分无质量粒子的内禀自旋平行(或反平行)于其动量的动力学性质.在化学中,手性分子及其相关现象的研究和应用是一个非常活跃的领域,涉及无机化学、有机化学、物理化学、生物化学和超分子化学等各个学科.许多生物活性分子都是手性的,包括自然界中的各种氨基酸(蛋白质的基本结构单元)和糖分子等.

药物中常常含有手性分子,这些手性分子两种镜像形态对人体的作用可能生死攸关.例如,20世纪60年代就曾因此造成过酞胺哌啶酮(一种镇定剂,孕妇服用可能生出怪胎,已被禁用)灾难.因此,能够单独地获得手性分子的两种不同镜像形态极为重要.为此,William S Knowles, Ryoji Noyori(野依良治)和K Barry Sharpless由于在手性药物分子方面的贡献而获得2001年度的诺贝尔化学奖.他们的重要贡献在于开发出氢化及氧化手征催化反应技术,保证只获得手性分子的一种手性形态.分子手性是一种自发破缺的对称性.严格的本征态是两种对映

* 国家自然科学基金(批准号:10720003,10775004,10435010,10221003)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815000)资助项目

2008-04-24收到

† Email:mengj@pku.edu.cn

结构体的线性组合.然而,两种对映结构体之间的隧穿几率通常如此之小,以致于一旦反应中形成一个左手性分子,这个分子就一直保持左手性.对于那些自然界选择了左手形态的复杂的生物分子(如Z-DNA分子),它的隧穿时间甚至超过了宇宙的年龄.

在原子核物理中,原子核的手性于1997年最先在理论上提出^[1].在利用三轴形变的粒子转子模型研究奇奇核的转动谱时,Frauendorf与孟杰发现具有三轴形变的奇奇核的转动谱在一定自旋范围内出现近简并现象.经过近两年认真系统的分析,他们提出原子核存在手性是导致这一现象的原因.即在具有稳定三轴形变(具有长、中、短三个主轴的椭球体)的原子核中,如果有少数几个处于高- j 轨道的价粒子和高- j 轨道的价空穴,价粒子和价空穴的角动量将分别沿原子核质量分布的短轴和长轴方向,而其余核子组成的原子核核芯的最大转动惯量则对应于中间轴,从而使得核芯的转动倾向于位于原子核短轴和长轴之间的中间轴方向.因而粒子、空穴、和集体转动的角动量相互垂直,与它们合成的总角动量形成左手征或右手征体系.这两种可能的状态通过手征算符,即时间反演和180°转动两种变换的组合, $\hat{S} = TR(\hat{S})$,相互转换.当角动量在3个主轴方向都有分量时,手征对称性被破坏,导致出现由两种相反手征性叠加得到的双重带,即所谓的手征双重带.它们之间的能级劈裂大小,反映了手征对称性破坏的程度.图1为原子核手性的物理机制示意图.

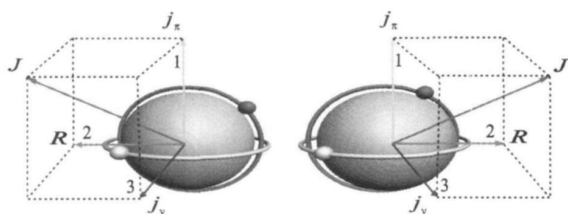


图1 原子核手性的物理机制

2 原子核手性的实验信号

继原子核手性被预言之后,世界范围内的许多大型实验室都致力于原子核手性的实验研究.

理论预言的原子核手性是基于高- j 轨道上的一个质子(或中子)和高- j 轨道上的一个中子(或质子)空穴与剩余核子所组成的三轴形变集体转子的耦合.在实验上如何判断一个原子核是否存在手性呢?基于以上理论预言,人们提出了一系列判断原子核手性的实验信号.

其中最重要的信号就是在实验上观测到宇称相同、在一定自旋范围内近简并的两条 $I=1$ 的转动带.相应地,这对转动伙伴带的能量震荡参数 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 随自旋应该平稳变化,它们的自旋顺排也应该近似相同.

基于相同的理论模型,表现在电磁跃迁上的实验信号是:观测到手征伙伴带之间有相似的磁偶极跃迁 $B(M1)$ 和电四极跃迁 $B(E2)$ 强度,且磁偶极与电四极跃迁几率的比值 $B(M1)/B(E2)$ 会随自旋振荡,以及带间电四极跃迁 $B(E2, I \rightarrow I-2)$ 被强烈抑制.

应该指出的是,实验信号基于高- j 轨道上的一个质子(或中子),高- j 轨道上的一个中子(或质子)空穴与剩余核子所组成的三轴形变集体转子的耦合.这样的条件对原子核这样一个有限多体量子系统来说是相当苛刻的.

3 原子核手性的实验研究进展

自从1997年理论预言开始,原子核手性的实验验证就引起了广泛的关注.这种效应可以期望在有稳定三轴形变的原子核中发生.如果稳定三轴形变的原子核中有少数几个高- j 价粒子和高- j 价空穴,粒子的、空穴的、和集体的角动量矢量可以形成左手征或右手征体系.从而可以给出一对转动带,即所谓的手征双重带.如图2所示.

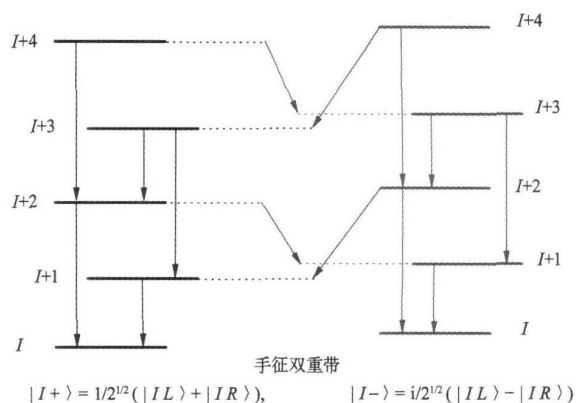


图2 原子核手性的实验信号之一:实验上观测到宇称相同的和在一定自旋范围内近简并的两条 $I=1$ 的转动带(L和R分别表示左手性和右手性的量子数)

在最初作出理论预言的文献[1]中,奇奇核¹³⁴Pr ($N=75$)中观测到的一对 $I=1$ 的转动带^[2]被建议为候选的手征双重带.2001年,来自美国和欧洲的科学家报道了在 $N=75$ 的奇Z同中子素¹³⁰Cs,

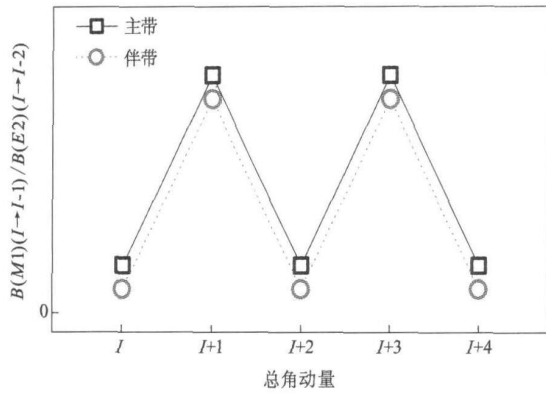


图 3 原子核手性的实验信号之一:手征伙伴带之间有相似的磁偶极跃迁 $B(M1)$ 和电四极跃迁 $B(E2)$ 强度,且磁偶极与电四极跃迁几率的比值 $B(M1)/B(E2)$ 会随着自旋振荡

^{132}La , ^{134}Pr , ^{136}Pm 中观测到的一系列手征双重带^[3]. 随后,在 $A \sim 100$ 和 130 质量区的奇奇核、奇 A 核和偶偶核中,都观测到了手征双重带^[3-7]. 图 4 给出了 $A \sim 100$ 和 130 质量区中观测到的手征双重带的原子核.

为了确认原子核手性的存在,除了要观测近简并的转动带之外,还很有必要测量其他物理量并与模型预言比较. 为此,2006 年意大利等国的科学家首先在实验上观测了 ^{134}Pr 的电磁跃迁几率^[8],对实验数据进行认真分析后声称, ^{134}Pr 中的手征候选带并不符合手征带所期待的电磁跃迁信号^[9]. 虽然 ^{134}P 中的手征候选带的双带之间能量差别极小,而且正如前面提到,目前判断原子核手性的实验信号基本上是基于高-轨道上的一个质子(中子),高- j 轨道上的一个中子(质子)空穴与剩余核子所组成的三轴形变集体转子的耦合所得到的结果. ^{134}Pr 电磁跃迁几率的实验测量结果,还是给实验上能否找到手征双重带蒙上一层阴影. 同时,也刺激了更多有关手征候选带的实验计划.

继 ^{134}Pr 的电磁跃迁实验之后不久,波兰等国的科学家利用多普勒频移方法对 ^{128}Cs 的手征候选带进行了寿命测量. 结果发现, ^{128}Cs 中手征候选带的电磁跃迁性质完全符合手征带所期待的特征,从而被认为是目前揭示原子核手征对称性破缺的最好例子^[10]. 这一结果不仅再次肯定了原子核手性的存在,而且极大地鼓舞了科学家们进行手征候选带的寿命测量^[11,12].

应该指出的是,中国科学家在实验验证原子核手性方面,也做了很多工作^[13-16].

4 原子核手性的理论研究进展

在理论研究方面,手征双重带的最初提出,源于对基于平均场近似的倾斜轴(偏离原子核密度分布的惯性主轴)进行推转近似的研究. 为了检验倾斜轴推转近似,人们建立和发展了完全量子化的粒子转子模型,进而由完全量子化的粒子转子模型给出了由于原子核手征对称性破缺而产生的手征双重带^[11].

手征对称性破缺是由于原子核总的转动轴位于任何一个密度分布的惯性主平面之外. 对于原子核绕倾斜轴转动的半经典平均场描述可以追溯到上世纪 80 年代^[17]. 其半经典平均场近似的有效性在文献 [19] 中有详细的讨论和检验.

完全量子化的粒子转子模型虽然可以给出由于原子核手征对称性破缺而产生的手征双重带,但是它存在以下缺点:转子的形变以及价质子和价中子运动的势场是唯象给定的;由于计算量的原因,它很难推广到多个粒子和多个空穴的情况.

平均场近似的优点在于它可以很容易地推广到多准粒子情形. 但是,它也存在以下缺点:平均场近似破坏了转动不变性,因此其角动量并不是好量子数;由于推转模型是一个半经典理论,因此它只能给出原子核是否存在转动轴位于惯性主平面之外的转动,并不能给出由于量子隧穿效应导致手征对称性破坏所产生的手征双重带. 过去的平均场理论大多是基于唯象的 Woods - Saxon 势场或者谐振子势场. 在文献 [18] 中,运用混合的 Woods - Saxon 势和 Nilsson 模型代替三轴推转的单- j 壳的单粒子势场,并结合壳修正的方法,证实了 ^{134}Pr 和 ^{188}Ir 中可能存在的手征性. 近年来,在原子核手性的平均场模型研究方面最重要的进展就是更微观的三维推转相对论平均场模型^[20]和 Skyrme Hartree - Fock 模型^[21-23]的发展. 但是,由于更微观的计算涉及转动方向的定义等复杂的技术处理和计算耗时等问题,这两个模型大规模地用于处理实际原子核的倾斜轴转动还有待发展.

比较而言,完全量子化的粒子转子模型近年来被广泛用于研究 $A \sim 100$ 和 $A \sim 130$ 质量区原子核的候选手征双重带并取得很大成功^[24-27]. 虽然,粒子转子模型目前还仅限于处理单个粒子和单个空穴的情况,但是考虑核子的对关联效应并通过调节核子的 Fermi 能级,可以模拟多个粒子和多个空穴的情

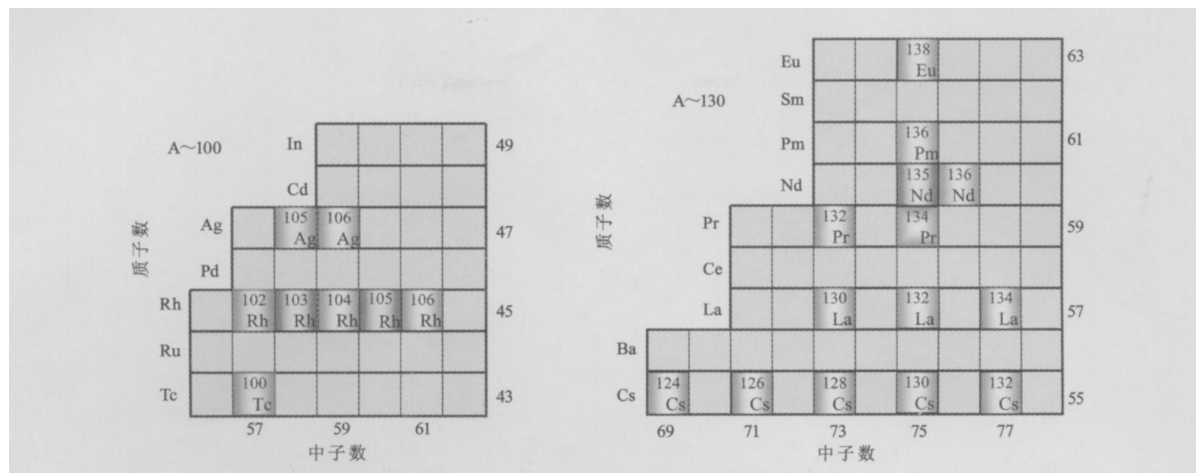


图 4 实验上在 A ~ 100 和 130 质量区的奇奇核、奇 A 核和偶偶核观测到的手征双重带

况. 初步计算结果表明, 考虑核子的对关联效应后的准粒子转子模型可以更好地描述许多候选手征双重带^[28-30]. 这一方面表明多粒子多空穴成分在候选手征双重带中的重要作用; 另一方面, 这也表明了发展多个粒子和多个空穴的粒子转子模型的必要性.

5 总结与展望

继 1997 年原子核中的手征对称性概念提出以来, 关于原子核手性的研究随即成为原子核物理前沿的热点问题. 在实验上, 相继在 A ~ 100 和 130 质量区的奇奇核、奇 A 核、和偶偶核中观测到 20 多条候选的手征双重带. 在能谱方面, 它们都能很好地满足所谓在一定自旋范围内有近简并的、宇称相同的两条 $I = 1$ 的转动带的条件. 在电磁跃迁方面, 至少在 ^{128}Cs 中发现的候选手征双重带之间有相似的磁偶极跃迁 $B(M1)$ 和电四极跃迁 $B(E2)$ 强度, 且磁偶极与电四极跃迁几率的比值 $B(M1)/B(E2)$ 会随自旋振荡. 相信随着实验技术和理论实验研究的进一步深入, 还会带来很多激动人心的发现. 例如, 在文献 [31] 中, 利用组态固定的三轴相对论平均场约束计算所预言的 MD , 表明在同一个原子核中有可能存在多对手征双重带的情况. 这为未来的实验验证提出了新的挑战. 当然, 这一预言一方面需要在更多的质量区进行检验, 如最近在 $^{102, 104, 106, 108, 110}\text{Rh}$ 等原子核中所进行的研究^[32]; 另一方面, 也需要更多的模型进行独立验证.

在理论研究方面, 借助大型计算机, 更微观的三维推转相对论平均场模型和 Skyrme Hartree - Fock 模型将有可能大规模地用于研究实际原子核的倾斜

轴转动. 同时, 多个粒子和多个空穴的粒子转子模型的发展相信近期会取得突破, 从而使自然地处理奇奇核、奇 A 核和偶偶核中的候选手征双重带成为可能, 同时也使判断原子核中是否存在手征对称性更加可靠.

该领域的理论与实验两方面的合作与相互推动, 必将使原子核中手征对称性的研究进入新的发展阶段.

致谢 感谢周善贵、张双全、彭婧、王守宇、亓斌、尧江明、张颖等人的合作以及本文准备过程中所给予的帮助.

参考文献

- [1] Frauendorf S, Meng J. Nucl Phys A, 1997, 617: 131
- [2] Petrache CM *et al* Nucl Phys A, 1996, 597: 106
- [3] Starosta K *et al* Phys Rev Lett, 2001, 86: 971
- [4] Zhu S *et al* Phys Rev Lett, 2003, 91: 132501
- [5] Vaman C *et al* Phys Rev Lett, 2004, 92: 032501
- [6] Joshi P *et al* Phys Lett B, 2004, 595: 135
- [7] Timar *et al* Phys Lett B, 2004, 598: 178
- [8] Tonev D *et al* Phys Rev Lett, 2006, 96: 052501
- [9] Petrache CM *et al* Phys Rev Lett, 2006, 96: 112502
- [10] Godner E *et al* Phys Rev Lett, 2006, 97: 172501
- [11] Joshi P *et al* Phys Rev Lett, 2007, 98: 102501
- [12] Mukhopadhyay S *et al* Phys Rev Lett, 2007, 99: 172501
- [13] Li X F *et al* Chin Phys Lett, 2002, 19: 1779
- [14] Zhu S J *et al* Euro Phys J., 2005, S01: 459; Yong - Nan U *et al* J. Phys G, 2005, B1 - B6
- [15] Wang S Y *et al* Phys Rev C, 2006, 74: 017302
- [16] 贺创业, 竺礼华等, 高能物理与核物理, 2006, 30 (Supp.): 166 [He C Y, Zhu L H *et al* High Energy Physics and Nuclear physics, 2006, 30 (Supp.): 166 (in Chinese)]
- [17] Kernan A K, Onishi N. Nucl Phys A, 1981, 361: 179
- [18] Dimitrov V, Frauendorf S, Dönau F. Phys Rev Lett, 2000, 84: 5732
- [19] Frauendorf S, Meng J. Z Phys A, 1996, 365: 263
- [20] Madokoro H, Meng J, Matsuzaki M *et al* Phys Rev C, 2000,

- 62: 061301
- [21] Olbratowski P, Dobaczewski J, Dudek J *et al* *acta Phys Polonica B*, 2002, 33: 389
- [22] Oi M, Walker P M. *Phys Lett B*, 2003, 576: 75
- [23] Olbratowski P, Dobaczewski J, Dudek J *et al* *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 052501
- [24] Peng J, Meng J, Zhang S Q. *Phys Rev C*, 2003, 68: 044324
- [25] Peng J, Meng J, Zhang S Q. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 1223
- [26] Koike T, Starosta K, Hamamoto I *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 172502
- [27] Wang S Y, Zhang S Q, Qi B *et al* *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 664
- [28] Zhang S Q, Qi B, Wang S Y *et al* *Phys Rev C*, 2007, 75: 044307
- [29] Wang S Y, Zhang S Q, Qi B *et al* *Phys Rev C*, 2007, 75: 024309
- [30] Wang S Y, Zhang S Q, Qi B *et al* *Phys Rev C*, 2008, 77: 034314
- [31] Meng J, Peng J, Zhang S Q *et al* *Phys Rev C*, 2006, 73: 037303
- [32] Peng J, Sagawa H, Zhang S Q *et al* *Phys Rev C*, 2008, 77: 024309

·物理新闻和动态·

更有效地利用太阳能

太阳能电池是一项具有环保意义的能源,它利用入射的太阳光转化为可用的电能.但对于太阳能电池而言,长期以来存在着成本与效率的矛盾,也就是说,如果让成本比较低,则它的工作效率也比较低.要想制作高效率的太阳能电池,就要花很高的代价.所以太阳能电池一直不能成为主要的能源,而只是在一些比较偏远的无法提供能源的地区和太空船上使用.

要想让太阳能电池普及到家庭和公共事业上去,首要的工作是提高太阳能电池的效率.过去的太阳能电池都是用硅晶制作的,它每千瓦小时的成本要比用石油燃料产生的功率所需的成本高好几倍,从环保的角度看,需要认真地研究如何更有效地利用太阳能.最近美国再生能源实验室(NREL)的 W. Metzger, I Repin 和 M. Contreras 共同研制成了新的高效率的太阳能电池.他们首先关注树叶吸收太阳光后如何从叶绿素分子中释放出电子的过程,这些带着能量的电子在运动过程中会与其他分子结合,形成碳水化合物大分子.而太阳能电池是在吸收太阳光后,从半导体中释放出电子,当这些电子处于激发态时就能形成电流来供给外电路.在这个过程中,激发电子的寿命愈长,则供给电池能量的效果就愈好.所以激发电子寿命的长短就是提高太阳能电池效率的关键.一般来说,当激发电子在晶体中碰到缺陷或边界时就会失去它的能量.因此必需制造高质量的硅、镓和砷化物的单晶,用它来做成太阳能电池的接收器,才能保证效率的提高,而制作这种单晶在工艺上比较复杂,因而成本也较高.

NREL 的科学家们利用铜、镉、镓和硒的多层晶片制成太阳能电池的接收板,这种材料称为 CIGS 复合晶板,这能将激发电子的寿命提高到 250ns,这个寿命听起来还不是很,但已足够使其形成电流,并得到令人满意的高效率.另一方面,这种 CIGS 晶片的造价要比硅单晶的低很多.所以他们的工作就为太阳能的普及和使用开拓了一条极其有利的路径.

(云中客 摘自 Journal of Applied Physics, 24 October 2008)

磁屏蔽可以保护太空船

太空中有害的辐射是长期宇宙飞行最主要的障碍.有的辐射是来自遥远太空的具有非常高能量的粒子,但是最需要关心的是通量高得多的太阳风.这种磁化的等离子体含有质子和 粒子(以及与这些粒子脱离的电子),可以破坏 DNA 并引起癌症.

飞往国际空间站的宇航员由地球的大气层和磁层屏蔽了大部分太阳风粒子,但是长时间在太空飞行的人没有这种天然屏蔽,因而具有非常大的风险.实际上,阿波罗计划中的宇航员只是侥幸地逃脱了特别危险的太阳活动高峰.

卢瑟福实验室的 Ruth Bamford 领导的一个研究组通过研究表明,可以利用人造磁层对太空船加以屏蔽.和天然的磁层相似,人造磁层可以将太阳风中的质子与电子分离开,在空中形成分离的电荷,从而可以使太阳风粒子偏离宇宙飞船.这种想法首先是在 20 世纪 60 年代提出的,但当时被认为是行不通的,因为需要屏蔽的空间的直径估计在 100km 以上.为覆盖这样大范围的磁场,需要能产生强度为几十甚至几百特斯拉的磁铁,而这么大的磁铁无法送到空中去.

Bamford 认为,以前的计算是不精确的,因为他们假定了太阳风等离子体的流动和普通的流体一样.对核聚变几十年的研究表明,等离子体会产生在普通流体中看不到的各种湍流.

研究人员认为,可以利用关于湍流的知识制造出一种小得多的防护罩,先是通过计算机模拟,后又通过实验证实了这种想法.在实验中,他们将超声等离子体注入到一个 1.5m 长的绕有磁线圈的真空容器中,在容器的一端放有一块磁铁靶.使用光学成像和电磁探针发现,磁铁靶使等离子体偏转,磁铁靶周围的空间几乎完全没有等离子体粒子.有关论文见 *Plasma Phys Control Fusion*, 2008, 50: 124025.

(树华 编译自 Physics World News, 6 November 2008)