

诺奖巨磁电阻效应与 SXQ 理论 ---- SXQ 理论应用举例 (1)

习强

Recommended: 王德奎 (Wang Dekui), 绵阳日报社, 绵阳, 四川 621000, 中国, y-tx@163.com

摘要: SXQ 理论的主要成份是三旋, 而三旋的核心是研究自旋。那么如果 SXQ 是讲自旋, 球量子有自旋, 环量子有自旋, 同是自旋, 为什么环量子的自旋比球量子的自旋重要? 特别是有人说: 巨磁电阻 (GMR) 效应涉及自旋, 庞磁电阻 (CMR) 效应也涉及自旋, 而且 CMR 是自旋世界美妙绝伦的一个例子, 但为什么比拼到现在, CMR 反而没有得诺贝尔奖, GMR 得了诺贝尔奖呢?

[习强. 诺奖巨磁电阻效应与 SXQ 理论----SXQ 理论应用举例 (1). *Academ Arena* 2025;17(6):35-40]. ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online). <http://www.sciencepub.net/academia>. 03. doi:[10.7537/marsaaj170625.03](https://doi.org/10.7537/marsaaj170625.03)

关键词: 巨磁电阻; 庞磁电阻; 自旋; SXQ 理论; 哲学

【0、引言】

2007 年 10 月科学界的最高盛典----瑞典皇家科学院颁发的诺贝尔奖揭晓: 法国科学家阿尔贝·费尔和德国科学家彼得·格林贝格尔, 因分别独立发现巨磁阻效应, 共同获得 2007 年诺贝尔物理学奖。

巨磁阻效应 (GMR) 是一种量子力学和凝聚态物理学现象, 它产生于层状的磁性薄膜结构。瑞典皇家科学院在评价这项成就时表示, 该诺贝尔物理学奖主要奖励: “用于读取硬盘数据的技术, 得益于这项技术, 硬盘在近年来迅速变得越来越小”。

诺贝尔评委会主席佩尔·卡尔松, 用两张图片的对比, 说明巨磁阻的重大意义: 一台 1954 年体积占满整间屋子的电脑, 和一个如今非常普通、手掌般大小的硬盘: “正因为有了这两位科学家的发现, 单位面积介质存储的信息量才得以大幅度提升”。

巨磁阻是什么? 巨磁阻又称特大磁电阻, 庞磁电阻等, 其磁电阻(MR)可高达 10 的 6 次方。我国有一位科研人员说: “看看你的计算机硬盘, 存储能力有多大, 就知道他们的贡献有多大了”。诺贝尔奖并不总是代表着深奥的理论和艰涩的知识, 它往往就在我们身边。

例如, 根据该效应开发的小型大容量硬盘, 已得到了广泛的应用: 我们司空见惯的笔记本电脑、MP3、U 盘等消费品, 就闪烁着巨磁阻效应的科学光芒。磁阻效应, 可以在磁性材料和非磁性材料相间的薄膜层 (几个纳米厚) 结构中观察到。这种结构是由铁磁材料和非铁磁材料薄层交替迭合而成, 当铁磁层的磁矩相互平行时, 载流子与自旋有关的散射最小, 材料有最小的电阻。当铁磁层的磁矩为反平行时, 与自旋有关的散射最强, 材料的电阻最大。

这里, 巨磁阻效应 (GMR) 或磁电阻(MR), 与自旋有关, 是啥? 自旋是啥? 你真知道物理学原理的自旋吗? 这就是本文要讲的 SXQ 理论, 它在三个层次都联系上庞加莱猜的层展和呈展。如此, 称为

“三旋/弦/圈理论”, 简称为 SXQ 理论 (由分别取“三旋”、“弦论”、“圈量子”的中文拼音第一个字母的大写 S、X、Q 组成)。

即 SXQ 理论包含了所曾主要表达的数学和物理内容, 既有环量子三旋理论, 又有超弦/M 理论, 还有圈量子引力理论等。

【1、自旋重要从此开始】

1、让你当回“马赫”

赫赫有名的马赫, 是 19 世纪末 20 世纪初一位有影响的“革命的”奥地利物理学家。他以教条式坚持的“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则为武器, 同著名化学家奥斯特瓦尔德, 共同对玻尔兹曼的“原子”研究发起了一场持久的攻击。

因为马赫认为: 科学界从未有人见到过一个原子, 所以不承认原子的存在, 并认为只有在实验上得到证实的说法, 才有科学意义。

马赫的“革命性”, 被第二国际的“革命家”利用来反对列宁; 反之, 被伟大的革命导师列宁, 痛批为“经验批判主义”。

20 世纪末 21 世纪初, 多数物理学家都相信夸克是永远看不见的, 它们被永久禁闭在强子之内; 而夸克模型的创立者, 也承认夸克原是一种数学虚构。而三旋理论认为: 强子的子结构, 是一种环量子的自旋, 说白了, 用环量子的三种自旋----面旋、体旋、线旋的数学编码, 可以描述强子的子结构夸克密码----这也是一种数学虚构。

如果你是当代“革命的”的“马赫”, 应怎么想呢?

其实, 教条式的“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则, 从古到今, 都不是我们全称的唯物主义。例如, 从古到今的人类共同体验, 都认为我们的宇宙, 可分为实体与虚空两个部分, 从而奠定了唯物主义的“一分为二”原则。这里实体, 类似的物质, 是“唯物”, 难道虚空类似的存在, 就不是“唯物”? 正是基

于唯物主义的一分为二原则，实体就是实体，虚空就是虚空，但也存在实体中有虚空，虚空有实体的东西，从而又奠定了唯物主义的“辩证”原则。所以“一分为二”法，和“辩证”法两个原则，才是唯物主义最基本的东西。

球量子形态的实体或虚空，从结构到功能都可作“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则的描述。惟独环量子的形态，是既有实体又有虚空，从结构到功能作自旋数学编码描述，取其“逻辑自洽性”原则和理想、对称原则，可有 62 种自旋态，比实体或虚空的球量子取其“逻辑自洽性”原则和理想、对称原则的两种自旋态---左旋和右旋，多出 54 种自旋态。且从密码学编码的相容性和冗余性出发，取 62 种自旋态的环量子作强子的子结构的相容性编码，对应“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则描述称的“物质”，那么 62 种自旋态相容性编码之外的冗余性编码，自然是“暗物质”了。

本来强子会像小小陀螺一样自旋，这应三旋理论跟强子理论能对“自旋”形象，与经典力学有类似共同认识的一些地方，但强子理论又受传统量子力学角动量对“自旋”定义的影响，把自旋限定在整数和半整数的数学编码框架里，根本不管经典力学对自旋的形象思维，造成反“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则描述的百年之痛。

其实，这正是角动量球量子形态描述的量子力学的实体或虚空图像自旋造成的，如果引进环量子形态描述的自旋图像，量子力学的整数和半整数的“自旋”定义的百年之痛，可用手征性分开对应解决。

自旋世界如此重要，但总归是一种数学描述，坚持“物质第一性”和“逻辑自洽性”两个原则的人们，也许会为类似夸克的存在状态这类问题长期争论下去，那就让你当一回“马赫”吧！

2、巨磁电阻效应解读

2007 年诺贝尔物理学奖获得者阿尔贝·费尔和彼得·格林贝格尔，获奖的原因是，先后独立发现了一种全新的物理效应---“巨磁电阻”效应。但这项发现的伟大之处还不仅如此，因为当时《科学时报》记者就此采访了该领域的我国 4 位学者，其中中国科技大学张裕恒院士说：“小到手表，大到宇宙，电子的电性有了充分利用，但是磁性一直沉睡着。1988 年发现巨磁电阻效应，其科学意义在于第一次揭示了电子的另外一个行为---自旋的作用”。

巨磁电阻效应是指磁性材料的电阻率，在有外磁场作用时，较之无外磁场作用时存在巨大变化的现象。根据这一效应开发的小型大容量计算机硬盘，已得到广泛应用，因为在制作读取头中加以应用，它非常有助于从硬盘中读取数据。

众所周知，硬盘能够存储包括音乐在内的信息，这些信息被存在微小的磁化区，信息则通过记录磁

场变化的读取器取出，而机器在读取数据时，必须把用磁记录的信息转换成电流。硬盘越小，各个磁化区的面积也越小，磁化的程度也越弱。因此如果欲在一张硬盘中存储更多信息，就需要更为灵敏的读取器。

强磁性材料在受到外加磁场作用时引起的电阻变化，称为磁电阻效应。巨磁电阻效应是 1988 年发现的一种磁致电阻效应，由于相对于传统的磁电阻效应大一个数量级以上，因此名为巨磁电阻。

1997 年首个应用巨磁电阻效应的读取头研制成功，基于巨磁电阻效应原理制成的读取器，它可以将细小的磁场变化转换成不同的电阻，使读取器产生不同的电流，而电流是读取器的信号，这很快成为标准技术，即便今天最新的读取技术也均由巨磁电阻效应发展而来。

不论磁场与电流方向平行还是垂直，都将产生磁电阻效应。平行的称为纵磁场效应，垂直的称为横磁场效应。磁场引起的电阻变化与未加磁场时电阻之比，称为磁电阻率。一般强磁性材料的磁电阻率在室温下小于 8%，在低温下可增加到 10% 以上。已实用的磁电阻材料主要有镍铁系和镍钴系磁性合金，室温下镍铁系坡莫合金的磁电阻率约 1%~3%，若合金中加入铜、铬或锰元素，可使电阻率增加。

镍钴系合金的电阻率较高，可达 6%。与利用其他磁效应相比，利用磁电阻效应制成的换能器和传感器，其装置简单，对速度和频率不敏感。磁电阻材料，已用于制造磁记录磁头、磁泡检测器和磁膜存储器的读出器等。

3、巨磁电阻传感器原理

巨磁电阻效应，来自于载流电子的不同自旋状态与磁场的作用不同，因而导致的电阻值的变化。这种效应，只有在纳米尺度的薄膜结构中才能观测出来。赋以特殊的结构设计，这种效应还可以调整以适应各种不同的性能需要。例如，巨磁电阻传感器，将四个巨磁电阻构成惠斯登电桥结构，该结构可以减少外界环境对传感器输出稳定性的影响，增加传感器灵敏度；工作时电流输入端接 5V~20V 的稳压电压，输出端在外磁场作用下即输出电压信号。

【2、自旋重要第一次被揭示】

电子的磁性被命名为“自旋”，这是 1897 年汤姆森发现电子具有电性 24 年之后的又一怪事。其实从三旋理论出发，这并不奇怪。

三旋从唯象上说，是一种两群缔合结构，即它包含类圈结构 (ψ) 和自旋结构 (Ω)：

$$\Psi = \psi \Omega \quad (2-1)$$

由于环面与球面不同伦，对“自旋”像小小陀螺一样的经典力学图像出发的物理语义学定义应是，自旋：有固定的转轴或转点，能同时组织旋转面，并能在旋转面内找到同时对称的动点，且轨迹重叠的

旋转。那么自转应是：有固定的转轴或转点，但不能同时组织旋转面，也不能找到同时对称的动点，或有对称动点轨迹也不重叠的旋转。

转动应是：可以没有固定的转轴或转点，不能同时组织旋转面，也没有同时对称的动点，但轨迹是封闭线的旋转。

有了从经典力学到量子力学对自旋的统一定义，那么对于环量子的类圈体结构应有三种自旋。

面旋：类圈体绕垂直于圈面的轴的旋转；

体旋：类圈体绕圈面内的轴的旋转；

线旋：类圈体绕体内中心圈线的旋转。

其中体旋粗略地讲类似一种翻动，可对应宏观的温度效应；面旋可对应电子的电性，例如，电流从正极必然要流回负极实现循环；线旋可对应电子的磁性，例如，当外部磁场以称为通量线的一条条线束的形式穿透超导体时，就可能出现电阻，而通量线经常被称为涡旋，在三旋中，涡旋属于线旋。

在陶瓷氧化物---钕钙锰氧中发现的高达125000%的磁阻效应，称为庞磁电阻效应。这类隧穿磁电阻效应，具有信息不易挥发、密度高、信号容量大的特点，有可能超越巨磁电阻技术；而且自旋用到量子计算等技术中，可以存储海量信息。这一切用三旋理论很好理解：

类圈体同时能作三旋，设体旋为0状态，面旋为1状态；线旋类似原子核磁场和外加磁场，它既能作方向定位又能对体旋和面旋方向进行操作，而且是远距离、瞬时缠连的同时作用。这如花样游泳运动员在水中除能作各种表演外，还能听令于岸上的指挥。

例如，利用氯仿中氢核和碳核类圈体似的三旋之间的相互作用，建造一个量子受控非门：用一个振荡频率为400兆赫（即射频）的磁场，可以使被置于10特斯拉的恒定磁场（设箭头沿垂线）内的一个氢原子核圈发生体旋。设氢圈的面旋轴向不是朝上就是朝下，即圈面在垂直于恒定磁场的水平方向；再设碳圈的面旋轴向确定地朝上，即圈面也在水平方向，当一个适当的射频脉冲加上之后，可以使碳的圈面绕水平方向轴体旋到垂线方向，然后碳圈将绕着垂线方向轴继续体旋，其体旋速度将取决于氯仿分子中氢圈的面旋轴向是否恰巧朝上。而经百万分之一秒的时间，碳圈的面旋轴向将不是朝上就是朝下，这取决于邻近的氢圈的面旋轴向是朝上或朝下。

因为在那一瞬间再发射一个射频脉冲，使碳的圈面再绕水平方向轴体旋90度，这样，如果相邻的氢圈的面旋轴向朝上，此操作就使碳圈的面旋轴向朝下；而如果相邻的氢圈的面旋轴向朝下，它就使碳圈的面旋轴向朝上。可见量子计算是借助于类圈体的三旋转动及“受控非门”的操作，因为作为这种逻辑门三旋基础的面旋轴向可以处于朝上和朝下，以

及体旋可以绕水平和垂线轴向转动这两种状态的迭加中，因此，量子计算可以同时为一组似乎互不相容的输入进行操作。

科学家们认为，量子计算中，量子效应是几率性、不可预测的，这导致器件工作不稳定。目前超大规模集成电路在1平方厘米的面积上，可以集成10的7次方到10的8次方个电子元件，器件最小尺度是20纳米，一旦小于这个尺寸，量子效应开始起作用，而传统的工作原理如欧姆定理等就失效。

第二次世界大战以来，世界文明的发展都和电子学有关系，但人们从不关心电子的磁性。由于巨磁电阻的发现和应，以前分开的电子学和磁学正在相互融合，这就是自旋电子学。

因为传统的硅基芯片只利用了电子的一个自由度---电荷，而没有用到自旋，量子计算要想突破这个尺寸，就必须利用电子的自旋，把自旋作为信息储存、处理、输运的主体。利用了电子自旋来调控电子传导，这是一个在室温下用量子效应制作器件的绝佳例子。

【3、自旋世界的比较】

SXQ理论的主要成份是三旋理论；21世纪初弦论走到庞加莱猜想，产生的第三次超弦革命，是把环量子三旋理论、超弦/M理论和圈量子引力理论等看成是同一种理论的三个层次，而能把它们统一起来。例如，单个环量子三旋的三类62种自旋态，是62种圈态密码，也形成一种量子自旋系综，它的两个层次：

一是环量子联系庞加莱猜想与唯象规范场和二次量子化引出的管线弦、套管弦等图像，是和当基底空间用一张二维的纸表示，卷绕粘接成一个圆筒时，这个弯曲的一维收缩成一个极小的圆，以致二维空间最终看起来就像是一维的直线一样，而紧紧卷绕粘接起来的薄膜圆筒这时就类似于弦的图像。即弦理论只要坚持任何时候它说的开弦或弦线，都不是实心的杆线弦，而是空心的管线弦，闭弦也是管线弦两端的拼接，那么弦与环两者是等价的，超弦/M理论也就没有拓扑学上环面与球面不同伦的数学纷争。

二是环量子的线旋耦合网格，形成圈组合的边和结的自旋网络图，也是与圈量子引力理论等价的。所以这里的环量子、弦和圈组合等三个层次的实线，仅是庞加莱猜想归纳的“简并形式”。反之，这三个层次仅是庞加莱猜想的层展和呈展；这种空心管线弦的简并实线，也仅是在计算、应用、理解上的一种方便。如此，它包含了既有环量子三旋理论，又有超弦/M理论，还有圈量子引力理论等所曾主要表达的数学和物理内容，称为“三旋/弦/圈理论”；简称为SXQ理论。

如果SXQ是讲自旋，球量子有自旋，环量子有自旋，同是自旋，为什么环量子的自旋，就比球量子

的自旋重要？特别是有人说：巨磁电阻（GMR）效应涉及自旋，庞磁电阻（CMR）效应也涉及自旋，而且 CMR 是自旋世界美妙绝伦的一个例子，但为什么比拼到现在，CMR 反而没有得诺贝尔奖，GMR 得了诺贝尔奖呢？

前者就不要说了，因为环量子的自旋，能包容球量子的自旋，反之则不能。其次，根据物质质量谱公式，对应代夸克的质量（K）等于对应代的轻子的质量（Q）加上对应代的两种规范玻色子的质量和（B），例如：上夸克（u）的质量等于对应代轻子电子（e）的质量，加上对应代玻色子光子与胶子 1 的质量和，如果假设电子等轻子的拓扑结构类型图像为“环量子”，对应代的光子与胶子等玻色子的拓扑结构类型图像为“球量子”，把这种球量子看作是环量子类圈体上的转座子，能随类圈体作线旋，那么这种轻子加玻色子组成的夸克，它的拓扑结构类型像什么呢？

显然它也是属“环量子”类型的拓扑结构图像；如此组成的质子、中子等重子、强子、核子的微单元弦圈链线结构，自然就可交给超弦/M 理论和圈量子引力理论等的数学和物理去作简并处理。

至于说到后者，有人说：正常磁电阻、各向异性磁阻和现在的巨磁电阻，都存在于磁性金属材料中，而这个 CMR 却是在过渡金属锰氧化物中被发现的；虽然在 1950 年代，对这一类物质的磁性有过深刻的理论研究，1960 年代也有人零星报道过这类物质的磁电阻行为，但是那时人们还来不及顾及这些复杂材料——凝聚态物理学家的精力，主要还是放在金属和半导体物质上面。

另外，这个氧化物体系也太复杂了，那时即便发现了 CMR，大概也不以为意，因为那个年代应用的技术基础还没有搭建起来。

但到了 1980 年代末和 1990 年代初，发现了过渡金属氧化物高温超导现象后，这才触发物理学家对其它过渡金属氧化物的兴趣。

大约在 1993 年，当时在贝尔实验室的 S·金和在马里兰大学的拉梅什用 PLD 方法制备出 LaSrMnO 薄膜，于低温强磁场下测得几乎 100% 的磁电阻，CMR 吸引了大批凝聚态物理学家。

客观说来，自然界的物质一般分成三类：金属 M、半导体 S、绝缘体 I，一个大致的区分是看其电阻随温度变化的行为。对于 M，电阻很小但随温度升高而升高；对于 I，电阻很大且随温度升高而下降；对 S，电阻不大不小，但也是随温度升高而下降；如果一种物质的电阻在温度变化时一会儿呈现 M 行为、一会儿呈现 I 或 S 的行为，那么这种物质里面的 CMR，绝对是凝聚态物理学家的宝贝。

【4、庞磁电阻效应自旋的价值】

1、CMR（庞磁电阻）的自旋作用核心，是锰氧化物的 $Mn_{3+}-O_2--Mn_{4+}$ 链中的自旋对的所谓双交换，即一个电子从 Mn_{3+} 传递到 Mn_{4+} 上去，中间隔了一个 O 离子，一般认为这样的传递比较难以实现。可是传递过程是左边的 Mn_{3+} 将一个电子传给 O 离子，而这个 O 离子同时将自己的一个电子传给右边的 Mn_{4+} ，从而使这个离子链变成 $Mn_{4+}-O_2--Mn_{3+}$ 链。这样的同时传递称之为双交换 DE。

量子力学规定电子在这条链上的传递，必须在 Mn_{3+} 和 Mn_{4+} 的离子核内部的自旋保持互相平行时才可以进行；而这种左右电子的平行运动，其本质是一种小三旋圈。按三旋的定义，还属面旋。

如果它们的自旋反平行或者有一个夹角，那么电子跑过去都会遇到阻碍，也就是说电阻很大。这里自旋在规范电子输运上起着关键作用，所以 CMR 中自旋是主角。

2、CMR 是自旋世界的一颗奇葩，因为 CMR 中存在自旋与电荷、轨道和晶格（声子）的强烈交互作用，其物理甚至比高温超导还要丰富些，但如果 CMR 只有在室温以下，且必须在很大磁场（几个特斯拉）下才能达到，则目前看来是无法实际应用，而 GMR（巨磁电阻）随时间却是身价万倍。其次，CMR 源于过渡金属氧化物，这东西从半导体制造业角度，不看好，与硅技术不兼容且稳定性不好。

而 GMR 这个邻居则类似化妆技术高超，养颜技术精到，反而因为使用自旋电子学这一招牌，而变得更加风光迷人。

3、在温度下降到一定值时，锰氧化物内部的 Mn 离子的自旋有平行排列的倾向，这类类似于伊辛模型里面的铁磁转变，一旦进入到铁磁转变温度点（居里点）以下，电子在其中传播遇到的阻力马上就小了很多。这就是为什么低温区域电阻，随温度下降而迅速下降的原因。然而，虽然温度下降，电阻的确是下降的，但是理论估算出来的电阻，比实验测量得到的实际电阻要低很多。

更为奇怪的是在高温区段，电阻不再随温度下降而下降，反而是电阻随温度升高而下降了。为什么电阻数值会这么大？且在高温区域电阻又变得随温度升高而下降呢？这种梦幻般的电阻随温度的变化，在其它物质中非常少见，可在锰氧化物中确如此平常和随处可见。这里，CMR 中自旋虽是主角，但是锰氧化物中还存在着一种凝聚态物理叫做贾恩·泰勒（JT）畸变的效应，也就是晶格会自发地发生变形。

它会使电子的运动变得艰难起来；既然这个 JT 效应本质上是一种晶格效应，说明在 CMR 中，电子输运有机地将自旋与晶格联系在一起。由于这个 JT 效应，电子运动只有靠高温下的热激活，才能从一地跳到另外一地。这就好比电子身上被绑了一个沙袋，

这种绑了沙袋的电子称为局域化的电子。

局域化电子走路就像半导体和绝缘体中电子的传播一般，电子只有靠温度来帮忙才能够走得更顺畅，所以才有电阻随温度升高反而降低了，这也就是为何实际电阻比齐纳的 DE 理论预测高很多的原因。

4、GMR 的化妆技术、养颜技术，来自分子束外延技术获得的高质量样品，保证了实验结果的准确性和可靠性，分别作出了 50%和 10%的电阻变化率。没有高质量的样品就没有好的物理，分子束外延是一种在人工条件下，生长单晶、平整、光滑的高质量晶体薄膜的技术，可使分子或原子按晶体排列，一层层地“长”在晶体基片上。

利用该技术能制备薄到几十个原子层的单晶薄膜，以及交替生长不同组分、不同掺杂的薄膜，而形成的超薄层量子阱微结构材料。

所以说，如果没有这项技术，很难说能否发现并很快得到同行认可的巨磁电阻效应；即使可以，可能也会推迟几年。

5、如果把巨磁自旋电子学，与单个电子旋转作比较，更有意思的是美国布法罗大学一个研究小组开发出一种新设备，它可以简单快捷地诱捕、探测和操纵单个电子旋转，这就清除了一些阻碍自旋电子学和基于电子旋转的量子计算发展的主要障碍，使得研发以利用单旋转为基础及具有低功率/高性能计算潜力的设备，离现实更进了一步。

如它可以使我们轻松地以一种模式中诱捕、操控和探测单电子自旋；这种模式的潜力在于它可以按比例扩展成为致密的集成电路。虽然曾有人宣称捕获了单电子旋转，但都是利用量子点、纳米大小半导体在极冷的温度条件下（即绝对温度 1 度以下），论证旋转捕获的。

但在日常条件下，将设备或计算机冷却到那样的温度是不可能的，它将使得系统非常容易被干扰。相反，布法罗大学研究小组捕获和探测旋转的温度约为绝对温度 20 度，基于这种方法的标准将可以用于发展可靠的技术。此外，他们开发的这种系统需要相对较少的在半导体中控制电子流动的逻辑门，这将有助于增加测量复杂的集成电路的可行性。布法罗大学研究人员通过他们创新的量子点接触，成功实现他们的目标：即研发了在半导体的两个导通区域之间，控制电荷流动的狭窄的纳米级缩颈，预测显示，它应该可以利用这些缩颈来诱捕单电子自旋。他们研发的这种系统可通过有选择性地金属门，供以一定的电压来操控半导体中的电流；这些金属门均装配在其表面。

这些金属门间拥有一个纳米大小的间隙，当它们通以一定的电压时，量子点接触就会在这样的间隙中形成。通过改变通向金属门的电压，能够对缩颈的宽度进行连续地压缩，直到它最终完全关闭。

当增加金属上的电荷时，它就会开始弥合间隙。随着电荷的增加，它就会允许越来越少的电子通过，直到它们全部不能通过。就在间隙快要完全关闭之前，当对这一通道进行挤压时，就能探测到通道内最后电子的捕获及其旋转情况。

在那一瞬间，旋转的捕获表现为流过设备另一半的电流的变化情况，设备的一个区域很容易感受到另一区域所发生的情况。

6、这种在一根导线的两边同时向中间的间隙输送电子的一维运动，图像虽说不同于小三旋圈，但其本质按三旋的定义，仍可归属于一维的线旋图像。单电子旋转的被诱捕，和探测到，那么下一步的研究工作，就是诱捕和探测两个或更多相互联系电子的旋转。

这是自旋电子学和量子计算发展的先决条件，在自旋电子学中，信息的读取，传输和处理，都是针对电子或核自旋来操作的。

而所谓的自旋电子学，就是以电子自旋或核自旋为研究的核心，主要研究与电子的电荷和自旋密切相关的过程，包括自旋源的产生、自旋注入、自旋传输、自旋检测及自旋控制，其最终目的是实现新型的自旋电子器件，如自旋量子阱发光二极管、自旋 p-n 结二极管、磁隧道效应晶体管、自旋场效应晶体管、量子计算机等，这是在电子材料如半导体中，主动控制载流子自旋动力学和自旋运输的一个新兴领域。即它是利用电子自旋来制造电子元件的电子学，是利用电子的自旋属性进行工作的电子学。

7、早在 19 世纪末，英国科学家汤姆逊发现电子之后，人们就知道电子有一个重要特性，就是每一个电子都携带一定的电量，即基本电荷（e）；但到 20 世纪 20 年代中期量子力学的诞生，才告诉人们电子除携带电荷之外，还有另一个重要属性，就是自旋。

这个电子的自旋，有 $\pm\hbar/2$ 两个角动量数值，其中正负号分别表示“自旋朝上”和“自旋朝下”。其实这种把电子的自旋角动量，有 $\pm\hbar/2$ 两个数值的图像，对应的“自旋朝上”和“自旋朝下”，本质只是一种球量子的图像，这是我们在前面说造成传统量子力学百年之痛的根源。因为按庞加莱猜想，电子的球量子图像只是它的实际图像的一种简并，电子内部结构的典型距离标度 10^{-13} 次方厘米，是能测量到的电子的最大半径，小于 10^{-13} 次方厘米就测量不准了，这表明环量子三旋效应，才是电子的实际图像。

8、通过对电子电荷和电子自旋性质研究的进展，虽然诞生了自旋电子学，但这并不是说电子的自旋自由度以前从没有用过，例如，半导体中很多类型的自旋极化现象，如载流子的自旋，半导体材料中引入的磁性原子的自旋，和组成晶体的原子的核自旋，传统的数据存储介质磁盘，等等，用的就是磁性材料中电子的自旋。

然而从某种意义上说，这都是用的电子的球量子图像自旋。即使是自旋电子学最基本应用的以巨磁电阻为基础的存储器和自旋阀，其中自旋的作用也是被动的，它们的工作则要由局域磁场来控制。

而磁电子学，则是要基于电子传导和磁性间的关联效应，通过磁场实现对输运特性调制的新兴学科，它涉及自旋极化、自旋相关散射和隧穿、自旋积累，以及弛豫、电荷自旋--轨道--晶格间相互作用等强关联和量子干涉效应等方面；而且作为纳米电子学的重要组成，它在磁记录、磁头读出、非易失信息随机存储、自旋晶体管及量子计算机等领域，也能获得广泛应用。自旋电子学，则是想要走出被动自旋器件的范畴，成为基于自旋动力学的主动控制的应用。

因为这种主动控制，可以导致新的量子力学器件，如自旋晶体管、自旋过滤器，以及调制器、新的存储器件、量子信息处理器和量子计算。但从某种意义上说，这仍是电子的球量子自旋图像原理的运用。

【5、结束语】

目前半导体自旋电子学研究，分为两个领域：即半导体磁电子学和半导体量子自旋电子学。而同一个球量子的电子自旋图像，则难以把磁性自旋和电性自旋统一起来。

但对环量子的电子自旋图像来说，则是驾轻就熟。

目前令人感兴趣的这两个自旋图像的物理学原理，带来的自旋动力学变数，不但都有量子力学固有的量子特性，而且这些特性将导致新的自旋电子学量子器件，而不是传统的以电子电荷为基础的电子学以及与自旋态有关的长弛豫时间，或相干时间的电子学发展。

在环量子的电子自旋图像的磁性半导体中，如果自旋朝上的载流子浓度，多于自旋朝下的载流子，

这些载流子运动会产生所谓自旋极化电流。自旋极化电流的大小、存在的时间长短取决于许多因素，如材料的特性、界面、外场及温度等等。

事实上，半导体中的载流子自旋可以通过局域磁场，或通过器件的栅极改变外加电场，甚至通过偏振光地进行操作。这一事实，也是开发环量子自旋电子学应用的一个重要的物理基础。

而对于量子计算，因要求精密的控制自旋纠缠及利用局域磁场操纵单一自旋，对此环量子电子三旋理论却能为量子计算机原理提供更为清晰的图象。所以随着诺奖巨磁电阻效应的深化，环量子自旋电子图像的物理学原理，迟早终究会对球量子的电子自旋图像提出挑战。

参考文献

- [1]陈欢欢，人们从此发现：自旋如此重要，科学时报，2007年10月17日；
- [2][美]汉斯.R.派格斯，宇宙密码，上海教育出版社，郭竹第译，1989年8月；
- [5]王德奎，三旋理论初探，四川科学技术出版社，2002年5月；
- [6]孔少峰、王德奎，求衡论---庞加莱猜想应用，四川科学技术出版社，2007年9月；
- [7]王德奎，解读《时间简史》，天津古籍出版社，2003年9月；
- [8]王德奎、林艺彬、孙双喜，中医药多体自然叩问，独家出版社，2020年1月；
- [9]习强，从咖啡环效应到拓扑绝缘体---非线性希格斯粒子数学讨论(6)，Academ Arena, September 25, 2012；
- [10]王守义、习强，球绕流与马约拉纳--克利福德绘景---抽象物理全景图圈比点更简单的绕流球趣想，Academia Arena, April 25, 2021。