

# 从宏观到微观谈转动与自旋

尚仁成，清华大学物理系，北京，100084

丁海兵，中国科学院电子学研究所，北京，100190

本文先通俗地介绍我们日常生活中遇到的转动运动及其主要特征。进一步转向微观粒子运动，介绍其不同于宏观物体运动的特点。在此基础上，再介绍微观粒子的转动运动及其自旋。并介绍自旋在若干方面的应用。最后再简要介绍清华大学研究的我国第一台极化电子源及其主要性能。

## 1. 在高速转动的世界中生活

“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。如果你对你的朋友说我们无时无刻不处在一个高速转动的世界中，你的朋友一定会认为你神经系统出了毛病。其实是你的朋友出了毛病。首先说，我们都住在地球上，日复一日，年复一年地跟着地球以每小时 1674 公里的速度(赤道附近)绕地球自转轴转动着。这比最快的汽车速度还要快十倍以上。恰好是诗人说的“坐地日行八万里”。地球还要绕太阳一年转一大圈，这一圈是九亿多公里，每小时差不多要跑十万公里，和孙悟空一个跟斗差不多远。现代的小学生都知道，每天的日出日落，可以说明地球在自转。但如果不是伟大的科学家哥白尼的贡献，这种日出日落，也曾长期被解释为太阳绕地球转动。在没有太阳的阴天和夜间怎么知道我们和地球在一起转动呢？聪明的人们曾设计了各种物理实验来观察和证明地球自转。例如，在一座精心设计的完全垂直于地面高矗的高塔顶上，选一个风和日丽的天，从塔顶沿塔的东西墙面中线垂直落下一个很重的铅球。结果发现，铅球落地时，总不落在塔基的正中，而是像比萨铁塔那样，球落点总要和塔基中心线偏一点（例如，200 米高的塔，大概偏移为 5 厘米）。这是因为塔和地球一起在由西向东自转，塔尖离过地心的转轴的距离比地面离转轴的距离更大，因此塔尖（以及放在塔尖的铅球）绕转轴转动的线速度比地面转动的线速度大。当铅球脱手下落时，除了受地心引力（严格说这个引力也不是正好指向地心的，我们暂考虑这一点）垂直下落外，还要带着这一点线速度的差别，总要向东偏一点。这个实验比较直观地证明了地球在自转。另外的试验，像大学物理都要讲的、并在天文馆展出的傅科摆，也能很形象地说明地球的自转。

我们在高速转动的地球上会受到多种力的作用，你可能首先会想到，因为随地球高速转动，可能会受到惯性离心力作用。我们在夏天能稳坐在树荫下的沙发椅上乘凉，说明圆周运动产生的离心力和地球对我们的吸引力及地面对我们的反作用力互相平衡。因此，我们既没有离心力将我们向外抛的感觉，也感觉不到地球的向心力将我们向里吸。除此以外，如果我们在高速转动的世界中运动，还会受到一种特有的力，这种力叫做科利奥里力。在北半球，从西向东运动的物体会受到一个向北偏转的力，这就使从西向东流的河流北岸会受到更严重的冲刷。一盆装满水，若在盆底开一个口，水迅速往外泄漏时，会在水面上产生一个漩涡，而且在南半球和北半球漩涡旋转方向不一样，这也是由于科利奥里力的作用。其实，我们前面举的从塔顶掉下铅球向东偏移的例子，也可理解为铅球在塔尖和在地面的转动角动量（见

下文)发生了变化,只有铅球受到一个力矩的作用才能发生这样的变化,这个力矩正是由西向东的科利奥里力提供的。

一个物体作直线运动具有动量,若物体做曲线运动或绕某一点或一个轴作圆周运动,或者说转动,它就具有动量矩,或者叫角动量。物体绕着自身的轴转动,我们就称它具有的角动量为自旋角动量,常常简称为自旋。本文中我们将反复地和自旋打交道。物体运动的角动量可以规定为一个向量(矢量),他的大小由转动物体的转动惯量(作直线运动物体有惯性,也可叫做惯量)及转动速度决定。如果用右手伸开,四个手指微微顺着转动方向弯曲,那么,大拇指所指的方向就是角动量矢量的方向。角动量的大小和方向都不会轻易改变,只有受到一定的外力矩时才会改变。没有外力矩时角动量是不变的,这就叫角动量守恒。轮船在大海中长期航行时怎么知道它自身的位置和方位呢?怎么对他导航呢?什么参照物都没有了,“大海航行靠舵手”也不灵了。若是明亮的夜空还可以靠特定的一组星星的方位来确定方向,但看不见星空的天气或潜入水下的潜艇就毫无办法了。长期使用的办法是陀螺导航仪,就是依靠高速旋转的陀螺在船只航行过程中始终保持角动量方向不变,由它来确定轮船前进的方向。

## 2. 离经叛道的微观粒子:

著名球星迈克尔·乔丹能够以很高的成功率将对方掷出篮球阻断,因为他牛顿力学“学得好”,只要他准确知道篮球此时此刻的位置和速度(及方向),就可以知道下一秒钟篮球应在什么位置,准时地跳到那个位置就可以抓个正着。将篮球换成足球、垒球或换成更小的乒乓球,它们还是有同样的运动规律,都服从牛顿力学。如果我们将球不断地小下去,会发生什么变化呢?会不会出现哲学家说的量变到质变呢?黑格尔举过一个著名的例子说,给一头毛驴背上的袋子内添加谷子。一粒一粒的加上去,开始很长一段时间,毛驴都不会感到有多大变化。不断的加下去,袋子越来越重。当加到某一粒谷子时,毛驴终将承受不住而被压倒了,这就是从量变到了质变。当我们将球做得只有一个分子(或者所有比分子小的粒子,我们统称为微观粒子)那么大时,奇迹就发生了。我们如果确定分子某时某刻的准确位置,我们就完全不知道他的动量(速度)。反过来如果准确的知道了分子的动量,就完全不知道他在什么地方。即不能同时准确知道微观粒子的位置和动量。这时,比乔丹高明十倍的运动员也难以抓到一个微观粒子了。

我们都知道光是一种波,它能像水波一样发生干涉、衍射等波动现象。我们看见的肥皂泡或水面漂浮的油膜呈五颜六色,这就是光波干涉的结果。我们又知道光会产生光电效应。即便很弱的光,只要波长够短(紫光比红光波长更短),就能从金属表面打出一个一个的电子。因此爱因斯坦提出光波是由一个一个的光量子组成的。这是一个划时代推断。这一推断解决了当时物理学存在的一个重大疑难问题,从而获得了1905年的诺贝尔物理学奖。

既然光可以又是粒子又是波,其他微观粒子呢?法国科学家德·布洛意1924年提出所有微观粒子都既是粒子又是波,即都有所谓的波和粒子二象性。这种波和一般的水波、声波还

不一样，我们所见到的水波、声波是由大量水分子或空气分子组成的，干涉、衍射也是在大量分子存在的情况下生的。而德·布洛意波是和每一个微观粒子相联系的特殊波。让电子束通过两条很窄的缝照到荧光屏上，会看到像光波干涉那样的明暗相间的干涉条纹。但是，更奇怪的是，当电子束流弱到电子一个一个地通过双缝时，仍可得到干涉条纹（只要记录时间够长），也就是说每个电子自己和自己干涉。

一个垒球质量若为  $m$ ，运动速度为  $v$ ，我们就知道这个垒球的动能为  $mv^2/2$ 。垒球放在离地面高度为  $h$  的地方，具有势能（或叫位能） $mgh$ ，这里  $g$  为重力加速度。动能和位能之和就是小球的总能量。速度  $v$  或高度  $h$  随意变化一点点，总能量也就变化一点点。这个一点点可以是任意小的。因此我们就说宏观的小球的能量是可以连续变化的。微观粒子也有动能、位能及总能量，但和宏观的小球不同，这些微观粒子的能量在一定条件下（例如束缚在原子中的电子），是不能连续变化的。能量有一个最小单位  $h$  ( $h=6.626 \times 10^{-34}$  焦耳·秒，是一个很小的量，称为普朗克常数)。这些微观粒子的能量只能为某些数值，不能取任意值。因此我们说微观粒子的能量是量子化的。牛顿力学可以完全描写宏观物体的运动，与之对应的，需要一个全新的科学——量子力学来描写微观粒子的运动。

### 3. 微观粒子的高速转动

微观粒子既然有波、粒二象性，是否仍有高速转动呢？这种转动和宏观物体的转动有什么不同特点呢？事实上，整个世界都有其微观结构：组成各种物质的基元是各种性质不同的分子。水由水分子组成，食盐由氯化钠分子组成……。分子又是由若干个同种或不同种的原子组成。例如，水分子由两个氢原子和一个氧原子组成。每个原子则由一个原子核和绕原子核运动的一个或多个电子组成。原子核由几个到上百个质子和中子组成，这些质子和中子又可统称为核子。高速运动的质子或电子具有很高的能量，这些高能量粒子在相互碰撞时，还会产生许多新的短寿命粒子。质子和中子以及这些碰撞产生的短寿命粒子又是由更小的单元——夸克组成的。从分子到夸克，构成微观世界的这些粒子统称为微观粒子。

这些微观粒子是否也会高速旋转呢？从分子到夸克，虽然大小相差 7~8 个数量级，但是都在做高速转动运动。分子绕他们的质量中心作振动和转动运动，原子和分子中的电子绕核心作“轨道”（这里我们是借用宏观物体经典运动的术语，并非严格意义上的轨道）转动运动。电子本身还做自转运动。原子核中的核子也围绕所有核子共同的质心作转动运动。组成各种粒子的夸克也作“轨道”运动。除了作“轨道”运动外，所有这些微观粒子也都在做自转运动。因此和每一个微观粒子相连的都有一个自旋角动量，或简称为自旋。

一个宏观的小球若围绕一中心点转动，小球质量若为  $m$ ，速度为  $v$ ，离转动中心的距离为  $r$ ，则小球转动的角动量为  $rmv$ 。因为  $v$  和  $r$  都是可以连续变化的，所以宏观小球的角动量也是可以连续变化的。和能量不能连续变化一样，微观粒子转动的角动量也是不能连续变化的。即角动量的大小也是量子化的。所有粒子都有自旋（有的粒子自旋为零），自旋角动量的大小也是量子化的，不能取任意值。可以用一个数值  $J$  来标记转动角动量的大小，这个

数值称为角动量量子数，转动角动量= $\sqrt{J(J+1)} \hbar$ ，这里  $\hbar = h/2\pi$  是为了计算方便引入的。同理用另一个数  $S$  来标记自旋角动量的大小，自旋角动量= $\sqrt{S(S+1)} \hbar$ 。

有的粒子自旋可以相当快。例如，原子核在发生碰撞（核反应）过程中，自旋角动量可以达到  $65\hbar$  以上，原子核差不多每秒要转  $10^{22}$  转（原子核的转动还不完全像刚体转动，有时只有表面部分转动内部不转或转的较慢）。不过原子核的半径只有几费米（1 费米= $10^{-15}$  米），如果按刚体转动估算，可以算出原子核的表面的转速可达到光速的  $1/10$  左右。电子的自旋量子数为  $1/2$ （即自旋角动量为  $\sqrt{3/4} \hbar$ ）。从经典电磁辐射估计的电子的经典半径为  $2.8 \times 10^{-15}$  米。电子的质量已知道。假定电子是电荷和密度均匀分布在半径为  $2.8 \times 10^{-15}$  米的小球内，要达到  $\sqrt{3/4} \hbar$  这样的自旋角动量，则电子表面的转动线速度应远远超过光速。这是与物理学的基本原理相违背的。实际上，当代最新测量表明，精确到  $10^{-16}$  cm 时还测不出电子的大小，也就是说电子即便有半径，也是小于  $10^{-16}$  cm 的。半径更小，要达到那样大的自旋角动量，就要转得更快。因此电子的自旋角动量是怎么来的呢？至今还是一个谜。对于微观粒子，牛顿力学失效。它们的运动就不能像一个刚体球绕通过其质心的一个轴那样转动。我们说它具有内禀自旋。

角动量不仅有大小，而且还有方向，因此角动量是一个矢量。宏观物体绕一个固定轴转动，角动量的方向就是沿这个定轴并与转动方向构成右手螺旋。宏观转动的角动量方向可以随意选择，例如剃须刀，可以竖着使用，也可以横着或斜着使用。只要有一定的力矩改变转轴方向，并且轴承能支撑各个不同方向的转动就可。和宏观转动不同，微观粒子转动的角动量方向不能任意选择，只能朝向一些特定的方向。即角动量的方向也是量子化的。例如选定一个特定的方向作为我们考虑问题的参考方向（通常这个方向可以选电场方向、磁场方向或粒子运动方向，将选定了的方向称为量子化轴），电子自旋角动量的方向就只能与选定的量子化轴平行或反平行，决不会有自旋垂直于这个轴，或自旋与轴成  $30$  度角的电子存在。当然，如果是别的粒子，自旋是  $1$  或更大，自旋可取的方向更多一些，但也是有限的几个。自旋为  $S$  的粒子，可取  $2S+1$  个方向。

**小磁铁构成的世界：**与每一种转动角动量（动量矩）相联系的都有一个磁矩，磁矩的大小是和角动量成正比的，而其方向则是和角动量的方向相同或相反的。这样一个磁矩就像一个具有南北极的小磁铁。对于带电粒子的转动，这个磁矩可以理解为由于带电粒子所带电荷的转动形成的电流产生的磁矩。但是，中子完全不带电，中子的自旋运动也有与之相联系的磁矩，这种磁矩是怎么产生的，又是一个令人费解的问题。这种磁矩称为“反常磁矩”，来自于中子和另一种微观粒子即  $\pi$  介子的强相互作用。大量的微观粒子自旋朝同一方向排列（顺排）是形成磁铁及其他磁性材料的物理基础。

**宏观规律寓于微观体系之中：**微观粒子的转动表现出许多不同于宏观物体转动的特性，需要用量子力学来描写其运动状态。是否宏观运动的规律在微观体系中都不适用了呢？这也不对，许多宏观运动的特征与规律，同样在微观体系中表现出来。例如，在宏观转动系统中

存在惯性离心力。而在微观的双原子分子中，电磁力将两个原子束缚在一起。就像将两个小铁球用弹簧拉在一起一样。当两个原子绕他们连线的中垂线转动时，离心力会将连接“弹簧”拉长，从而使分子的转动能发生变化。这个变化已在分子光谱的观测中观测到了。同样，科里奥利力也在微观世界中存在。考虑到科里奥利力后，分子的能级会有一定变化，这也在实验中测量到了。当原子核转得够快时科里奥利力能将紧密结合在一起两个自旋方向相反的核子（好像两个南北极相反放置的小磁铁吸引在一起一样）硬给拆散。这种结对被拉开后原子核的转动惯量会突然增大，原子核的运动状态会发生突变。这也在实验中观察到了。

#### 4. 自旋的杠杆作用：

宏观的高速转动能推动科学和社会进步。微观粒子很小，其转动影响是否也是微小的呢？中国的乒乓外交用小球推动大球，推动世界进步。和乒乓外交一样，微观粒子的自旋能量虽小，确也是推动科学与世界进步的一个巨大的杠杆。从生活到科学的丰富多彩的世界中，到处都可以看到微观粒子转动及自旋的影响。

你到立体电影院去看立体电影时，你想到过这也和自旋有关吗？构成极弱的光线的光子数也有成万上亿。这些光子都有自旋。这些光子自旋方向排列方式不同，就可以构成不同性质的偏振光（线偏振、左旋圆偏振、右旋圆偏振等等）正是利用了偏振光在影院中专门配置的眼镜片中的传输和吸收情况不同，才能够看到电影中的篮球向你头上直飞而来，你会不由自主地伸手去挡这个虚拟的篮球…。

##### 你身体里面的小磁铁

你想检查脑部或身体其它部位是否有肿瘤或其他病变吗？你可作 CT 检查，但有时密度很高的骨头可能挡住有肿瘤的部位。最好的办法是到医院去做一个核磁共振扫描。核磁共振（即 NMR）就是利用原子核的自旋来成像的仪器。原子核有自旋，也就是一个个的小磁铁。加一个外磁场，原子核的小磁矩就会在外磁场中转向。原子核将其磁矩的北极倒向外磁场的南极，南极倒向外磁场的北极。这是整个系统最稳定的状态，也就是能量最低的状态（称为基态）。如果再外加一个高频电磁场，这个高频电磁场会发射电磁波。发出的电磁波的能量也是一份一份的（量化的）。每一份能量的大小和电磁波频率成正比。如果这样一份能量的大小正好和某种原子核在磁场中从基态到较高的能量状态（称作激发态）的能量差相同，这时高频磁场发出的能量就会被原子核吸收，这种吸收称为共振吸收。不同原子核共振吸收的频率是不同的。由高频电磁波被人体各部位吸收的频率及吸收的强弱就可知道不同种类的原子核在人体内的分布情况，从而可以形成各种原子核在人体中的分布图像。

**自旋与量子计算：**由于量子力学的推动，产生了当代的电子技术，有了功能无比强大的计算机及当代的通讯技术。而且这些技术正在日新月异地发展着。例如计算机的计算速度差不多每十八个月要提高一倍。这些高新技术是否会这样无限制地发展下去呢？科学对当代技术的发展提出了警告：此路不通！提醒人们，再沿这个方向发展下去，前面有不可逾越的障碍。计算机是以大规模集成电路为基础的，集成电路是将成千上万个晶体管做在同一块硅片

上，通过硅晶片内部连接成为完整线路。要想提高计算机的计算速度，这些晶体管就要越做越小。小到一定程度，又会发生量变到质变，晶体管就不能工作了。因为它碰到了量子力学设置的障碍。

这话又要从微观粒子的特性说起了。一个人如果只能跳一米五高，修一圈三米高的围墙就可以将他长期困死在围墙内。春秋战国时英明一世的齐桓公晚年，奸臣们为了夺权就用这个办法在王宫周围筑高墙将其围困而死的。微观粒子就不一样了，一个能量只有  $2\text{eV}$ （微观物理中，常将一个电子在电场中经过  $1\text{V}$  的电压所获得的能量作为能量的一个基本单位，即一电子伏—— $1\text{eV}$ ）的电子，筑一圈  $4\text{eV}$  高的围墙是否就能将电子长期围在里面呢？不行了，微观粒子有二象性，他也就有了穿墙的本事，量子力学中叫做位垒穿透。在围墙外也有一定的几率能发现电子。而且围墙越薄、越低，电子穿过围墙的几率就越大。集成电路中，为了保证各晶体管能独立工作，不互相干扰，也要修一个个这样的围栏（或叫隔离位垒）。当晶体管越做越小时，这种位垒就会越来越小，越来越薄，最后电子就能随意穿越位垒，使集成电路完全不能正常工作。这就使集成电路的发展遇到了不可逾越的量子屏障。为了越过这个屏障，近年来提出了多种发展计算机和通讯的办法。其中量子计算和量子通讯最受关注。而量子计算的各种方法中，目前有一种核磁共振方法发展最快。核磁共振方法可以利用一些大分子中的原子核的自旋的方向来作为量子计算的基本单元——量子位。量子位等价于现有计算机中的二进制的位，但有目前计算机所不具备的特殊功能。虽然量子计算和量子通讯要达到实用阶段，还有很长的路要走，但无论如何它使人们看到了希望。我们也看到，自旋在这条发展路上起了至关重要的作用。

**自旋电子学：**从人类发明了电以后，中学生都知道，导电都是靠电子携带其电荷在导体或半导体中运动来完成的。即依靠电荷的流动来导电，来传递信号。近年来正在酝酿着电子学的一场革命——自旋电子学的出现。假定有两束等量的电子流动，一束向左流，一束向右流。从传统的电流的概念来衡量，导体中没有净电流。但如果向左流的一束电子全部自旋向上，而向右流的一束电子全部自旋向下。我们知道正电荷向左流等价于负电荷向右流。同理自旋向上向左流的电子等价于自旋向下向右流的电子。这样，在导体中，虽没有净电流流动，确有净的自旋流。如果我们能依靠自旋流来传递信号，半导体器件，就可以在没有电流的情况下传递信号。电流造成的功率损耗就可以减到极小的程度。

## 5. 自旋与极化<sup>[4]</sup>

在很多与自旋相关的现象的研究中，都需要自旋指向单一方向或自旋角动量分布在某一方向上占有优势的系统，这种系统称为极化系统。例如，通常使用的电子束，可由  $\text{W}$ 、 $\text{WTh}$  或  $\text{LaB}_6$  等材料为灯丝的电子枪提供，这种电子束一般是非极化电子束。若一个电子系统中所有的电子的自旋角动量分布在某一方向上占有优势，即电子自旋处于两个相反分量上的电子数目不相等，称这个电子系统是自旋极化的。具有这一特性的电子束，称为自旋极化的电子束，简称极化电子束。关于电子束的极化度在量子力学基础上的理论推导，Kessler 已在

文献<sup>[2]</sup>中进行了详细的描述。这里我们只简单给出电子束极化度的定义。我们选择量子化轴的方向为极化度测量方向， $N_{\uparrow}$ 表示电子束中自旋向上（与量子化轴的方向相同）的电子数目， $N_{\downarrow}$ 表示自旋向下的电子数目， $N_{\uparrow} + N_{\downarrow}$ 为电子束中总的电子数目，则电子束极化度定义为<sup>[2]</sup>

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \quad (1)$$

若  $N_{\uparrow} = N_{\downarrow}$ ，则电子束极化度  $P=0$ ，为非极化电子束，也称为自然电子束；若  $N_{\uparrow} \neq N_{\downarrow}$ ，电子束极化度  $P \neq 0$ ，为极化电子束。

清华大学物理系经过多年的努力建成了国内第一台 GaAs 极化电子源。利用圆偏振激光照射具有负电子亲和势（电子在晶体中的能量高于电子在真空中的能量）的 GaAs 类半导体（光阴极）表面，光致发射就能产生极化电子<sup>[1, 2]</sup>。该类极化电子源通常可提供 1~20 $\mu$ A，甚至更强的连续束流。在 高能电子加速器中，它还可以提供高达  $10^{11}$  电子/脉冲的极化的脉冲电子束流。电子束的极化度与光阴极的选择有关，用通常的非应变 GaAs 光阴极，极化度的理论上限为 50%。实验上各国目前获得的极化度为 27%~30%。在低温制冷的情况下可达 43%。而应变 GaAs 和超晶格 GaAs 光阴极则可得到更高的极化度。但其量子效率比非应变 GaAs 光阴极要差得多，而且加工工艺非常复杂。因此，除了对极化度要求非常高的实验外，一般都选用非应变 GaAs 晶体作为光阴极。基于上述考虑，我们实验组（清华大学物理系极化物理实验室）选用非应变 GaAs 晶体作为光阴极。经过多年艰苦努力，成功研制了国内第一台实用的 GaAs 极化电子源，并在实验上获得了 30.8%的极化度<sup>[5, 6]</sup>，这一指标略高于国外非应变 GaAs 极化电子源的平均水平。束流强度约为 8 $\mu$ A、寿命长于 260 小时，和国际目前水平相当。

图 1 是我们研制的极化电子源的总体布局图。

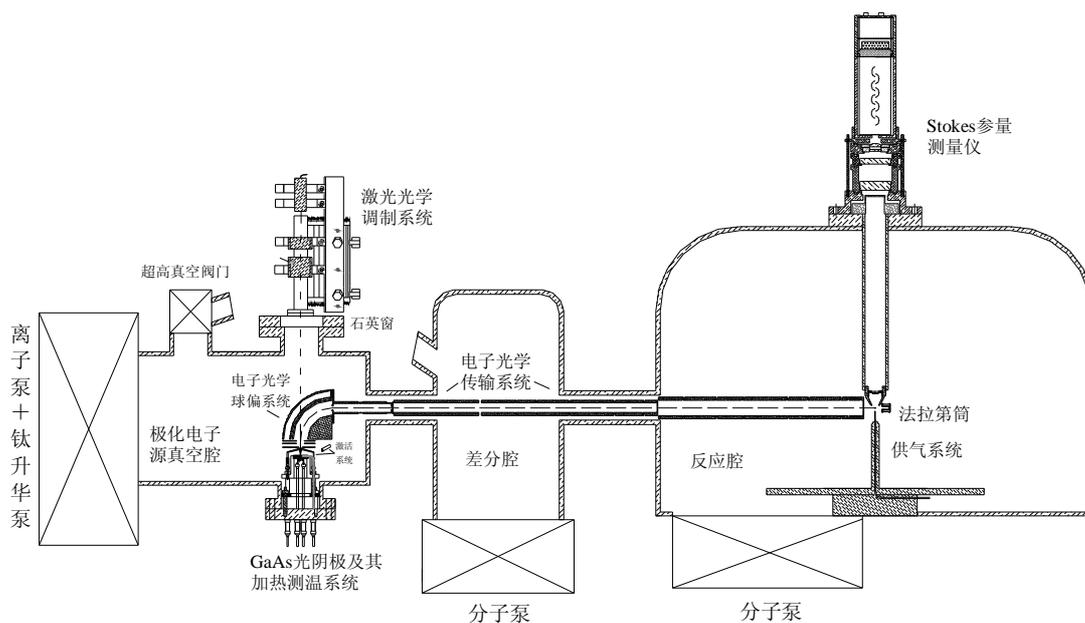


图1 极化电子源总体结构示意图

用我们自己研制的氦原子极化度测量仪，对极化电子源电子束极化度进行了测量。测量得到的入射电子束的极化度的实验结果如图2所示。入射电子能量范围从23.0eV到23.7eV，扫描步长为0.1eV。图2(a)所示为自旋向上时测得斯托克斯参数 $P_3(\uparrow)$ ，图2(b)所示为自旋向下时测得的 $P_3(\downarrow)$ ，图2(c)为消除仪器偏振后得到的斯托克斯参量 $P_3$ 。最终极化度 $P_e$ 由 $P_e = -6P_3 / (3 - P_1)$ 得到。可以看出，极化度 $P_e$ 主要由斯托克斯参量 $P_3$ 决定， $P_1$ 对其贡献很小。由图2可知，在整个入射电子的能量范围内，自旋向上的极化电子束入射时，测得其极化度为正值， $P_e(\uparrow) = 33.2\% \pm 3.5\%$ ；而自旋向下的极化电子束入射时，测得其极化度为负值， $P_e(\downarrow) = -28.5\% \pm 4.6\%$ 。对 $P_1(\uparrow)$ 和 $P_1(\downarrow)$ 取平均并且消除 $P_3(\uparrow)$ 和 $P_3(\downarrow)$ 的仪器偏振影响后，得到的电子束的最终极化度 $P_e = 30.8\% \pm 4.0\%$ 。

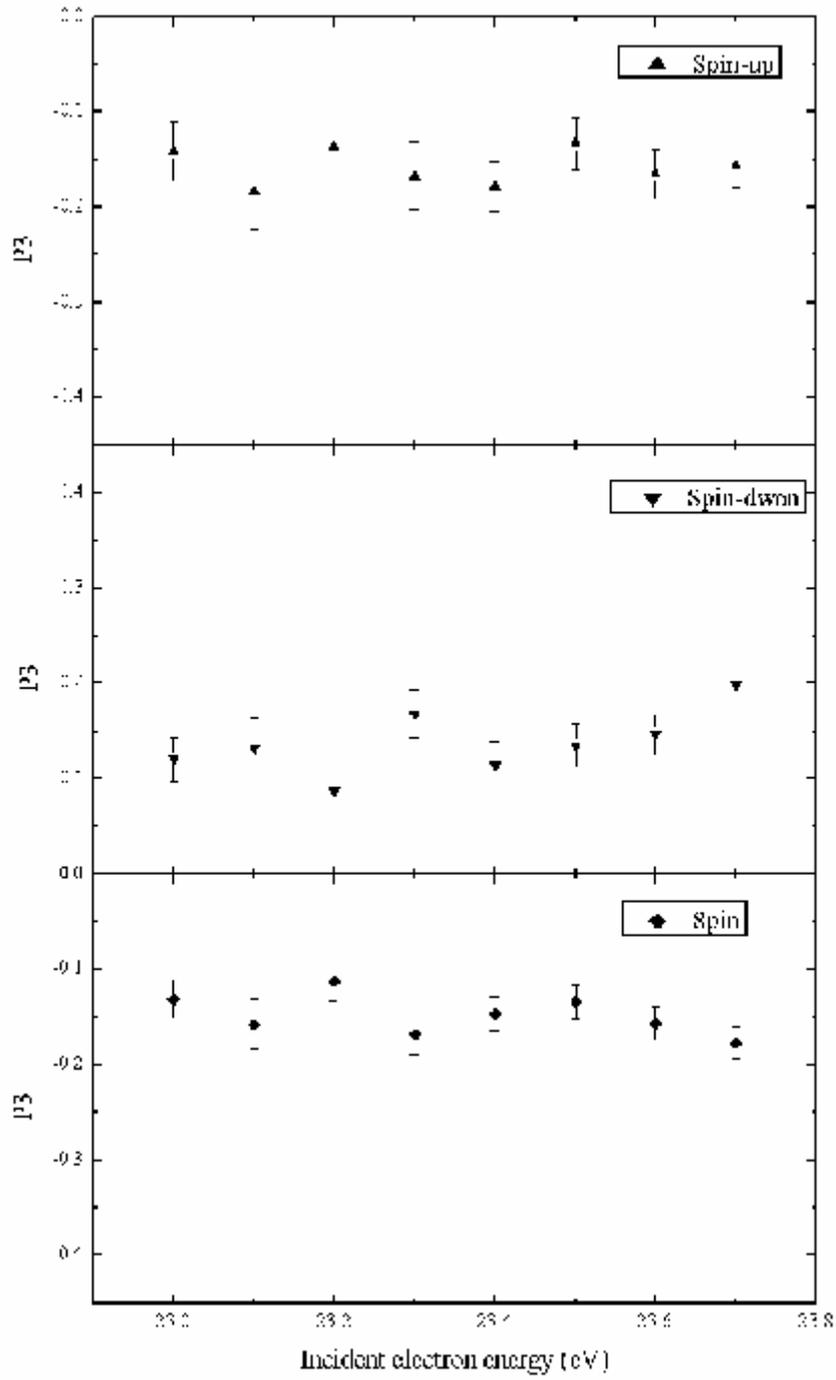


图2 He 388.9nm 谱线积分 Stokes 参量  $P_3$  与入射电子能量关系。(a) 入射电子极化方向为自旋向上, (b) 入射电子极化方向为自旋向下, (c) 极化方向相反消除仪器偏振后的  $P_3$  值

## 参考文献

- [1] Pierce D T, Meier F, Zurcher P. Direct observation of spin dependent electronic structure of GaAs using spin polarized photoemission. *Phys. Lett. A* 1975, 51:465-466.
- [2] Kessler J. *Polarized Electrons*. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 1985. Pierce D T, Celotta R J, Wang G-C, et al. GaAs spin polarized electrons source. *Rev. Sci. Instrum.* 1980, 51:478-499.
- [3] Pierce D T, Celotta R J, Wang G-C, et al. GaAs spin polarized electrons source. *Rev. Sci. Instrum.* 1980, 51:478-499.
- [4] 丁海兵博士论文：极化电子碰撞谱仪的研制及氦原子积分 Stokes 参量实验研究
- [5] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C. Polarization measurement of spin-polarized electrons by optical electron polarimeter. *Chin. Phys. Lett.* 2005, 22:2546-2548.
- [6] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C. Experimental study on helium optical electron polarimetry. *Chinese Physics* 2005, 14:00.