超冷原子基于人工自旋轨道耦合量子模拟的发展背景

自旋轨道耦合描述粒子自旋和轨道运动之间的相互作用。举个形象例子，一个带电粒子在外磁场中运动时会受到一个与速度方向垂直的力（洛伦兹力），导致运动偏转。改变外磁场或者粒子的速度方向都会改变偏转方向。于是考虑如下情况，粒子存在两种不同的内秉自旋态：自旋朝上和朝下。当粒子处在自旋朝上的状态时，感受到一个方向朝上的磁场；而处在自旋朝下时，感受到一个方向朝下的磁场。那么对于该运动粒子，处在自旋朝上和朝下的状态会受到完全相反的洛伦兹力，导致相反的轨道偏转。从而自旋和轨道耦合起来。这里的关键是，与自旋有关的磁场并不是通常理解的外加真实磁场，而是通过操控由人工合成的模拟磁场或规范场。因此对不带电的中性超冷原子，要产生人工自旋轨道耦合，关键要合成与自旋有关的人工规范场。相关理论和实验研究大致可分为如下几个阶段。

第一阶段：早期理论。2003到2004年，因斯布鲁克大学Jaksch 和 Zoller [1]、维尔纽斯大学Juzeliunas和Ohberg [2]分别在光晶格和超冷费米气体中提出与自旋无关的人工磁场的理论方案。2004年底，刘雄军等人将后者方案推广，引入自旋，理论提出合成自旋有关的人工规范场，从而产生人工自旋轨道耦合 [3]。沿着类似思路，刘雄军等人[4]和华南师大朱诗亮等人[5]于2006年分别独立在超冷原子中提出自旋霍尔效应的理论模型。这里提出的自旋有关的人工规范场仍为特殊情形。在2005年，Osterloh等人[6]和Ruseckas等人[7]分别在光晶格中和连续超冷原子气中首先提出更具一般性的被称作为非阿贝尔人工规范场的理论方案。基于这些方案，理论上可以实现不同维度和类型的人工自旋轨道耦合。

第二阶段：一维自旋轨道耦合的实验和理论发展。早期的人工自旋轨道耦合方案在实验上并不容易实现。2008-2009年，刘雄军等人指出在简单的Lambda体系中通过拉曼耦合可实现一维人工自旋轨道耦合[8]。这个体系被普遍用到实验中来合成人工自旋轨道耦合和规范场。2009年，美国国家标准技术局（NIST）的Spielman小组合成人工磁场 [9]，并用中性原子模拟带电粒子在电磁场中的行为 [10]。在此基础上，2011年，他们率先人工合成了一维自旋轨道耦合的玻色爱因斯坦凝聚体 [11]。该研究为超冷原子量子模拟开辟了新方向，并引起了自旋轨道耦合效应的研究热潮。迄今已有约10个研究小组报道实现了一维自旋轨道耦合和人工规范场，包括NIST、麻省理工、德国慕尼黑MPQ等国际著名研究机构。

中国科学技术大学潘建伟、陈帅和邓友金等的实验小组经过多年努力，在发展了对于激光和磁场精密操控的技术基础上，致力于超冷原子量子模拟，人工规范场和自旋轨道耦合方向的研究。2009年开始搭建超冷原子量子模拟实验装置，2010年实现了国内第一个光阱中的玻色－爱因斯坦凝聚体。随后，开始致力于人工合成规范场和自旋轨道耦合的实验研究，并至2011年掌握了拉曼耦合技术，实现了一维自旋轨道耦合规范场的人工合成。

在一维自旋轨道耦合的研究阶段，中科大实验小组与清华大学翟荟理论小组进行了深入系统的合作研究。主要包括，2012年，系统性的研究了玻色爱因斯坦凝聚体在自旋轨道耦合规范场中的集体震荡模式，发现了震荡的非简谐性，自旋震荡与动量震荡的关联等 [12]。2014年，在没有理论预言的前提下，实验上确定了一维自旋轨道耦合的玻色气体的有限温度下的相图，这项发现使人们能够更清楚地理解自旋-轨道耦合的玻色气体的基本特性 [13]。

在同一时期，山西大学的张靖实验小组与清华大学翟荟理论小组合作，也取得了一系列重要进展。他们第一个在简并费米气体中实验合成一维自旋轨道耦合 [14]。紧随其后麻省理工学院Zwierlein实验组也在费米气中报道了实现 [15]。随后张靖与翟荟的小组又通过调节原子之间的相互作用与自旋轨道耦合相结合，实现了分子的合成 [16]。

第三阶段：高维自旋轨道耦合体系的理论研究。在一维自旋轨道耦合实验持续开展的同时，理论上不断提出新的高维自旋轨道耦合实现方案。如包括德州大学达拉斯分校张传为等人对Tripod方案的改进 [17]；Campbell等人提出的多能级环形耦合方案 [18]；许志芳，尤力和Ueda提出的磁脉冲耦合方案 [19]；刘雄军等人提出的拉曼光晶格方案 [20]。另一方面，基于自旋轨道耦合，大量新奇物理被研究，包括玻色子磁性相和条纹相，量子反常霍尔效应，拓扑绝缘态，拓扑超流与Majorana费米子， BCS-BEC转换等一系列重要的现象。

第四阶段：当前进展。2014年起，中国科大潘建伟、陈帅及邓友金小组和北京大学刘雄军小组合作；山西大学张靖与香港中文大学周琦合作，同时独立开展二维自旋轨道耦合的理论和实验研究。张靖等人率先在费米子中报道二维自旋轨道耦合的实现（Nature Physics 2016）[21]。中科大与北京大学联合团队率先在光晶格的玻色子中人工合成新的二维自旋轨道耦合，并观察到自旋轨道耦合导致的能带拓扑等现象 [22]。这些重要进展表明中国在人工自旋轨道耦合量子模拟的研究走在国际最前列，并将极大推动这个领域的未来发展。

**参考文献**

[1] D. Jaksch and P. Zoller, New J. Phys. 5, 56 (2003).

[2] G. Juzeliunas and P. Ohberg, Phys. Rev. Lett., 93, 033602 (2004).

[3] X.-J. Liu, H. Jing, X. Liu, and M.-L. Ge, Eur.Phys.J.D, 37, 261(2005)(online); arXiv:quant-ph/0410096.

[4] X.-J. Liu, X. Liu, L. C. Kwek, and C. H. Oh, Phys. Rev. Lett. 98, 026602 (2007), arXiv:cond-mat/0603083.

[5] S.-L. Zhu, H. Fu, C.-J. Wu, S.-C. Zhang, and L.-M. Duan, Phys. Rev. Lett. 97, 240401 (2006).

[6] K. Osterloh, M. Baig, L. Santos, P. Zoller, M. Lewenstein, Phys. Rev. Lett. 95, 010403 (2005).

[7] J. Ruseckas, G. Juzeliunas, P. Ohberg, and M. Fleischhauer, Phys. Rev. Lett. 95, 010404 (2005).

[8] X.-J. Liu, M. F. Borunda, X. Liu, J. Sinova, Phys. Rev. Lett. 102, 046402 (2009).

[9] Y. J. Lin, R. L. Compton, K. Jimenez-Garcia, J. V. Porto, and I. B. Spielman, Nature 462, 628 (2009).

[10] Y-J. Lin, R. L. Compton, K. Jimenez-Garcia, W. D. Phillips, J. V. Porto, and I. B. Spielman, Nat. Phys. 7, 531 (2011).

[11] Y. J. Lin, K. Jimenez-Garcia, and I. B. Spielman, Nature 471, 83 (2011).

[12] J.-Y. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 109, 115301 (2012).

[13] S.-C. Ji et al., Nat. Phys. 10, 314 (2014).

[14] P. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 109, 095301 (2012).

[15] L.W. Cheuk, A. T. Sommer, Z. Hadzibabic, T. Yefsah, W. S. Bakr, and M. W. Zwierlein, Phys. Rev. Lett. 109, 095302 (2012).

[16] Z. Fu et al., Nat. Phys. 10，110(2014).

[17] C. Zhang, Phys. Rev. A 82, 021607 (R) (2010).

[18] D. L. Campbell, G. Juzeliūnas, I. B. Spielman, Phys. Rev. A 84, 025602 (2011).

[19] Z F. Xu, L. You, M. Ueda, Phys. Rev. A 87, 063634 (2013).

[20] X.-J. Liu, K. T. Law, T. K. Ng, Phys. Rev. Lett. 112, 086401 (2014).

[21] L. Huang et al., Nat. Phys. 12, 540 (2016).

[22] Z. Wu et al., Science 354, 83 (2016).