

磁性知识补充

在论文的语境中，**time-reversal symmetry-breaking responses**（时间反演对称性破缺响应）指的是材料由于其内部结构或特性不再满足时间反演对称性而表现出的各种现象和反应。

为了更清晰地解释，我们可以分解这个概念：

- **Time-reversal symmetry (时间反演对称性)**：这是一个物理学中的基本对称性。简单来说，如果一个物理系统的时间方向反过来（比如，一个过程从未来倒退到过去），系统的物理规律仍然保持不变，那么这个系统就具有时间反演对称性。在磁性材料中，时间反演对称性通常与磁矩方向有关。如果一个材料具有时间反演对称性，意味着将系统中所有磁矩的方向反转，系统的物理性质应该保持不变。
- **Symmetry-breaking (对称性破缺)**：当一个系统不再具备某种对称性时，就称为对称性破缺。**Time-reversal symmetry-breaking** 就是指系统不再具有时间反演对称性。在磁性材料中，最常见的导致时间反演对称性破缺的原因是**磁有序**，例如铁磁性。铁磁性材料具有自发的磁化强度，磁化强度有一个确定的方向，这个方向就破坏了时间反演对称性。
- **Responses (响应)**：在物理学中，"responses" 指的是材料对外部刺激（例如电场、磁场、光照、温度梯度等）的反应。

Time-reversal symmetry-breaking responses (时间反演对称性破缺响应) 因此指的是，由于材料内部时间反演对称性的破缺，材料会展现出一些特定的、与时间反演对称性破缺相关的物理现象和反应。

在论文的上下文中，**"time-reversal symmetry-breaking responses"** 具体指的是：

在传统的铁磁性晶体中，由于存在自发的磁化强度，**时间反演对称性被打破**。这种对称性破缺导致了以下典型的**响应**：

1. **电子能带结构中的自旋极化 (Spin polarization in the electronic band structure)**：由于时间反演对称性被打破，自旋向上和自旋向下的电子能带不再相同，导致电子能带结构出现自旋极化。这是铁磁性材料能够产生各种磁性和自旋相关现象的基础。
2. **广泛的时间反演对称性破缺响应 (broad range of time-reversal symmetry-breaking responses)**：这指的是一系列与时间反演对称性破缺相关的宏观物理现象，例如：
 - **反常霍尔效应 (Anomalous Hall effect)**：在铁磁性材料中，即使没有外加磁场，也能观察到霍尔效应，这就是因为时间反演对称性破缺导致的。
 - **自旋电流和自旋极化现象 (spin-polarization phenomena)**：铁磁性材料可以产生自旋极化的电流，以及各种与自旋相关的现象。

论文强调，最近发现的一些材料，例如“交替磁体 (alt magnets)”，也表现出强烈的 **"time-reversal symmetry-breaking responses"** 和 **"spin-polarization phenomena"**，这些现象通常被认为是**铁磁体的典型特征**。然而，这些交替磁体却具有反铁磁体的特征，例如零净磁化强度。这就引发了一个矛盾，促使科学家们重新审视传统的磁性相分类，并提出了“交替磁性”这一新的磁性相的概念。

总结来说，**"time-reversal symmetry-breaking responses"** 在这篇论文中是指由于时间反演对称性破缺，特别是与磁性有序相关的破缺，而产生的各种物理现象，例如自旋极化、反常霍尔效应、自旋电流等。这些响应是传统铁磁体的典型特征，而论文讨论的关键点在于，在一些非传统磁性材料（如交替磁体）中也观察到了这些响应，尽管它们不具备铁磁体的净磁化强度。

这是一个非常好的问题，它触及了理解反铁磁体和交替磁体之间区别的核心。你的问题可以分为两部分：

1. 反铁磁体是否存在“自旋分裂现象”吗？
2. 自旋向上和自旋向下的电子能带相同吗？

让我们分别解答：

1. 反铁磁体是否存在“自旋分裂现象”吗？

传统的观点认为，理想的“传统”反铁磁体在非相对论极限下，并不存在明显的、类似于铁磁体的“自旋分裂现象”。

- **传统反铁磁体的概念：** 在传统的反铁磁体模型中，原子磁矩以反平行的方式排列，导致宏观净磁矩为零。连接不同自旋亚晶格的对称性操作主要是 **空间反演 (inversion)** 或 **平移 (translation)**。
- **对称性与自旋简并：** 在这些“传统”反铁磁体中，**时间反演对称性 (T)** 和 **空间反演对称性 (P)** (或平移对称性) 的结合，可以保护电子能带的 **自旋简并 (spin degeneracy)**。这意味着对于给定的能量和动量，自旋向上和自旋向下的电子态能量是相同的。
- **“非自旋分裂”的含义：** 因此，在“传统”反铁磁体中，如果你只考虑理想模型和非相对论极限，并且只关注电子能带结构，你可能看不到像铁磁体那样明显的、能量上的自旋向上和自旋向下能带的分裂。

但是，需要强调的是，这个“非自旋分裂”的结论是基于一些理想化假设的，并且是对“传统”反铁磁体的一种简化描述。在实际的反铁磁体材料中，情况可能更加复杂：

- **相对论效应 (Spin-Orbit Coupling)：** 即使在反铁磁体中，**相对论自旋轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC)** 效应也可能引入 **微弱的自旋分裂**。这种自旋分裂通常比铁磁体中的小得多，并且其机制也与铁磁体的磁交换分裂不同。论文中提到的 **Rashba 自旋分裂** 就是一种相对论效应导致的自旋分裂，即使在非磁性或反铁磁性材料中也可能存在。
- **“交替磁体”的出现：** 论文的核心观点是引入“交替磁体”这个新的磁性相。**交替磁体与“传统”反铁磁体的关键区别在于连接反平行自旋亚晶格的对称性操作类型。** 交替磁体中，连接反平行自旋亚晶格的对称性操作是 **晶体旋转 (rotation)**，而不是空间反演或平移。这种 **旋转对称性** 的存在，即使在**非相对论极限**下，也允许并导致了**强烈的自旋分裂现象**。这正是交替磁体区别于“传统”反铁磁体的关键特征。

2. 自旋向上和自旋向下的电子能带相同吗？

对于“传统”反铁磁体：

- **理想情况下：** 在理想的“传统”反铁磁体模型中，**在非相对论极限下，自旋向上和自旋向下的电子能带是相同的，即自旋简并的。** 这意味着 $E(\uparrow, \mathbf{k}) = E(\downarrow, \mathbf{k})$ ，其中 E 是能量， \mathbf{k} 是动量， \uparrow 和 \downarrow 分别代表自旋向上和自旋向下。
- **实际情况：** 在实际材料中，由于相对论自旋轨道耦合效应，即使在“传统”反铁磁体中，自旋向上和自旋向下的能带也可能 **不再完全相同，而是存在微小的分裂**。但是，这种分裂通常 **非常弱**，并且与铁磁体和交替磁体中的自旋分裂机制和强度都不同。

对于交替磁体：

- **自旋分裂：** 交替磁体的一个核心特征就是**存在显著的自旋分裂**。由于其独特的晶体旋转对称性，即使在非相对论极限下，交替磁体的自旋向上和自旋向下的电子能带也 **不再相同，而是分裂开来**。这意味着 $E(\uparrow, \mathbf{k}) \neq E(\downarrow, \mathbf{k})$ 。
- **交替的自旋极化：** 更重要的是，交替磁体的自旋分裂具有 **动量依赖性 (momentum-dependent)** 和 **交替符号 (alternating sign)** 的特点。这意味着在布里渊区 (Brillouin zone) 的不同区域，自旋分裂的方向和大小可能会发生变化，甚至反号。这与铁磁体中通常是均匀的自旋分裂有很大不同。

总结：

- **“传统”反铁磁体** 在理想模型和非相对论极限下，可以被简化地描述为具有自旋简并的能带，即自旋向上和自旋向下的能带相同。但在实际材料中，相对论效应可能导致微弱的自旋分裂。
- **交替磁体** 则是一个完全不同的情况。即使在非相对论极限下，由于其独特的晶体旋转对称性，**交替磁体必然存在显著的自旋分裂现象**，自旋向上和自旋向下的能带是不同的。这种自旋分裂是交替磁体区别于传统反铁磁体和铁磁体的关键特征，也是其展现出许多类似铁磁体的宏观响应（例如反常霍尔效应、自旋电流等）的根本原因。

因此，不能简单地说反铁磁体不存在“自旋分裂现象”或者自旋能带一定相同。关键在于要区分“传统”反铁磁体和“交替磁体”，并理解不同类型反铁磁体的对称性和自旋分裂机制。交替磁体的发现，极大地扩展了我们对磁性材料的理解，并揭示了在零净磁化强度下实现强自旋极化和时间反演对称性破缺响应的新途径。

理解论文中提到的 **“unconventional d-wave (or higher even-parity wave) magnetic phase”** (非传统的 d 波 (或更高偶宇称波) 磁相) 需要从以下几个方面入手：

1. "Unconventional" (非传统的):

- **相对于传统的磁性相**: “Unconventional” 直接表明这种磁相不同于我们熟知的传统磁性相，即铁磁性 (ferromagnetism) 和反铁磁性 (antiferromagnetism)。
- **挑战传统分类**: 传统的磁性分类主要基于材料是否具有净磁化强度 (ferromagnetism) 或零净磁化强度但具有磁有序 (antiferromagnetism)。而 “unconventional d-wave magnetic phase” 模糊了这种界限，它具有零净磁化强度 (类似反铁磁体)，但同时又展现出许多类似铁磁体的特性 (例如时间反演对称性破缺响应和自旋极化现象)。

2. "d-wave (or higher even-parity wave)" (d 波 (或更高偶宇称波)):

- **对称性描述**: “d-wave” 和 “higher even-parity wave” 描述的是 **磁序的自旋极化在动量空间中的对称性**。这种描述借鉴了超导领域中对非常规超导体的分类方式，特别是 **d 波超导体**。
- **类比超导的 d 波**: 在 d 波超导体中，超导能隙 (superconducting gap) 具有 d 波对称性，这意味着能隙的大小和符号在费米面上随方向变化，并具有特定的节点 (nodes)。论文中类比地使用 “d-wave” 来描述磁性，指的是 **自旋极化在动量空间中也具有类似的非均匀分布和特定的对称性**。
- **偶宇称性 (even-parity)**: “Even-parity” 指的是在空间反演操作下，自旋极化保持不变的对称性。d 波、g 波、i 波等都属于偶宇称波。这意味着这种磁相的自旋极化分布在动量空间中具有一定的对称性结构。
- **非均匀和各向异性 (non-uniform and anisotropic)**: 与传统的铁磁体 (通常被认为是 **s 波磁性**) 不同，“d-wave (or higher even-parity wave) magnetic phase” 的自旋极化在动量空间中是 **非均匀的** 和 **各向异性的**。这意味着自旋极化强度和方向在不同的动量方向上有所不同，甚至可能改变符号。

3. "Magnetic Phase" (磁相):

- **磁性有序状态**: “Magnetic phase” 明确指出这是一种具有磁性有序的状态。尽管这种磁相具有零净磁化强度，但它仍然是一种磁性有序状态，与完全非磁性的状态不同。
- **交替磁性 (Altermagnetism)**: 论文的核心观点是，这种 “unconventional d-wave (or higher even-parity wave) magnetic phase” 正是他们提出的 **交替磁性 (altermagnetism)** 的本质特征。交替磁性被认为是继铁磁性和反铁磁性之后的第三种基本磁性相。

总结 **“unconventional d-wave (or higher even-parity wave) magnetic phase”** 的核心要点:

- **零净磁化强度**: 与反铁磁体类似，宏观净磁矩为零。
- **时间反演对称性破缺**: 与铁磁体类似，打破了时间反演对称性，导致自旋极化和相关的物理响应。

- **动量空间非均匀和各向异性的自旋极化:** 自旋极化强度和方向在动量空间中不是均匀分布的, 而是具有 d 波或更高偶宇称波的对称性, 呈现出复杂的空间结构。
- **对称性驱动:** 这种非传统的磁性相不是由强关联效应主导, 而是由晶体结构和对称性决定的, 使其成为一种更基本、更鲁棒的磁性相。
- **交替磁性的特征:** 是交替磁性这种新型磁性相的特征性描述, 解释了交替磁体为何同时具有反铁磁体的零净磁化强度和铁磁体的时间反演对称性破缺响应。

类比 d 波超导体的意义:

- **强调各向异性:** 类比 d 波超导体, 强调了这种磁相中自旋极化的 **各向异性** 和 **非均匀性**。
- **暗示节点结构:** d 波超导体有节点, 暗示这种磁性相的自旋极化分布也可能存在类似的“节点”或“弱极化区域”。
- **激发新的研究方向:** 类比 d 波超导体, 暗示这种磁性相可能具有类似于非常规超导体的复杂和有趣的物理性质, 值得深入研究。

总而言之, "unconventional d-wave (or higher even-parity wave) magnetic phase" 指的是一种非传统的、由特定对称性决定的磁性有序状态, 它具有零净磁化强度, 但展现出时间反演对称性破缺和动量空间非均匀的自旋极化, 是交替磁性的核心特征, 并与非常规超导体的 d 波对称性具有类比性。理解这种磁相, 有助于我们认识交替磁体的独特物理性质和潜在的应用价值。

好的, 我们来详细理解一下“自旋亚晶格 (spin sublattice)”的概念, 以及它与实空间和原胞的关系。

1. 自旋亚晶格 (Spin Sublattice) 的概念:

- **磁性原子位置的划分:** 在磁性材料中, 特别是反铁磁体和交替磁体中, 磁性原子通常分布在多个晶格位置上。“自旋亚晶格”就是将这些磁性原子位置 **根据其自旋方向和磁相互作用的特点** 划分成的若干个子集。
- **反平行自旋排列:** 在反铁磁体和交替磁体中, 磁矩通常以反平行的方式排列, 以降低能量。“自旋亚晶格”的划分通常就是为了区分 **自旋向上** 和 **自旋向下** 的磁性原子位置。
- **例子: RuO₂ 的自旋亚晶格:** 论文 Figure 4(a) 中 RuO₂ 的示意图就是一个很好的例子。Rutile 结构的 RuO₂ 中, Ru 原子分布在两个不等价的晶格位置, 论文中标记为 RuA 和 RuB。这两个位置上的 Ru 原子磁矩方向相反, 形成反铁磁性排列。因此, RuO₂ 可以被认为具有两个自旋亚晶格:
 - **RuA 亚晶格:** 自旋向上 (红色表示) 的 Ru 原子位置集合。
 - **RuB 亚晶格:** 自旋向下 (蓝色表示) 的 Ru 原子位置集合。

2. 自旋亚晶格与实空间 (Real Space):

- **实空间概念:** “实空间”就是我们通常理解的三维空间, 原子在其中占据确定的位置, 磁矩也存在于这些位置上。
- **自旋亚晶格是实空间概念:** **自旋亚晶格的概念是定义在实空间中的。** 它描述的是磁性原子在 **物理空间** 中的位置分布, 以及这些位置上磁矩的平均自旋方向。Figure 4(a) 清晰地展示了 RuO₂ 晶体结构中 RuA 和 RuB 亚晶格在实空间中的位置。

3. 自旋亚晶格与原胞 (Unit Cell) 和子胞 (Subcell):

- **原胞 (Unit Cell):** 原胞是晶体结构中最小的重复单元, 通过平移原胞可以构建整个晶体。
- **子胞 (Subcell):** “子胞”的概念相对模糊, 通常可以理解为原胞的更小的组成部分, 或者为了描述某些特定性质而人为划分的单元。在磁性材料中, 特别是多亚晶格磁体中, 有时为了方便描述磁结构, 可能会引入“磁原胞 (magnetic unit cell)”的概念, 它可能比晶体的化学原胞更大, 以包含完整的磁有序结构。

- **自旋亚晶格与原胞/子胞的关系：**

- **不是原胞的子胞：自旋亚晶格 不是 原胞的子胞。** 它们是完全不同的概念。原胞是描述晶体结构平移对称性的基本单元，而自旋亚晶格是描述磁性原子自旋排列的子集。
- **原胞可能包含多个自旋亚晶格：**一个原胞 **可能包含多个自旋亚晶格** 的原子。例如，RuO₂ 的原胞 (rutile 结构的原胞) 就包含了 RuA 和 RuB 两个自旋亚晶格的 Ru 原子。
- **自旋亚晶格可能跨越多个原胞：**在一些复杂的磁结构中，自旋亚晶格的周期性可能与晶体的化学原胞不同，甚至可能跨越多个原胞。这时，就需要引入磁原胞来描述磁结构。

总结：

- **自旋亚晶格 (Spin Sublattice) 是实空间的概念，** 它描述的是磁性原子在物理空间中的位置划分，并根据其自旋方向进行归类。
- **自旋亚晶格 不是 原胞的子胞，** 它们是描述晶体不同方面的概念。原胞描述晶体结构的平移对称性，而自旋亚晶格描述磁性原子的自旋排列。
- **原胞可以包含多个自旋亚晶格，** 一个材料可能被划分为多个自旋亚晶格，以描述其复杂的磁结构。

更形象的比喻：

你可以把晶体想象成一个城市，原胞就是城市里的一个标准街区。磁性原子就像是居住在城市里的居民，他们的“自旋”就像他们的政治立场 (例如，左派或右派)。自旋亚晶格就是根据政治立场划分的居民群体，例如“左派居民区”和“右派居民区”。这些居民区 (自旋亚晶格) 是在城市 (实空间) 中划分的，一个街区 (原胞) 可能同时居住着左派和右派居民。

希望这个解释和比喻能够帮助你更好地理解“自旋亚晶格”的概念以及它与实空间和原胞的关系。理解自旋亚晶格对于理解反铁磁体、交替磁体等复杂磁性材料的磁结构和物理性质至关重要。

理解亚铁磁体 (ferrimagnet)、反铁磁体 (antiferromagnet) 和交替磁体 (altermagnet) 之间的区别，关键在于把握它们磁性结构的特点和由此产生的宏观性质。这三者都属于磁性材料，但它们的磁矩排列方式和最终表现出的物理特性却大相径庭。

我们可以从以下几个方面进行对比：

1. 磁矩排列方式 (Spin Arrangement):

- **反铁磁体 (Antiferromagnet):**
 - **亚晶格结构：**反铁磁体具有两个或多个磁性亚晶格 (spin sublattices)。
 - **反平行排列：**相邻亚晶格上的磁矩 **大小相等，方向相反**，呈现 **完全补偿的反平行排列**。就像两个人背靠背，力量相当，互相抵消。
 - **净磁矩：**宏观上，由于磁矩完全抵消，**净磁矩为零**。
- **亚铁磁体 (Ferrimagnet):**
 - **亚晶格结构：**亚铁磁体也具有两个或多个磁性亚晶格。
 - **反平行排列，但大小不等：**相邻亚晶格上的磁矩 **方向相反，但大小不相等**。就像两个人背靠背，但一方力量大于另一方，无法完全抵消。
 - **净磁矩：**由于磁矩大小不相等，无法完全抵消，宏观上表现出 **非零的净磁矩**，但通常比铁磁体小。
- **交替磁体 (Altermagnet):**
 - **亚晶格结构：**交替磁体也具有两个或多个磁性亚晶格。

- **反平行排列，由晶体旋转对称性连接：**相邻亚晶格上的磁矩 **方向相反**，排列方式也呈现反平行，但关键在于 **连接不同自旋亚晶格的对称性操作是晶体旋转对称性**，而不是像传统反铁磁体那样的空间反演或平移。这点是区分交替磁体和传统反铁磁体的核心。
- **净磁矩：**宏观上，磁矩也 **完全补偿，净磁矩为零**，这一点和反铁磁体相同。

2. 宏观性质 (Macroscopic Properties):

• 反铁磁体 (Antiferromagnet):

- **宏观磁性表现：**由于净磁矩为零，宏观上表现得 **类似非磁性材料**，难以通过传统的磁场探测手段直接观测。
- **磁化率：**磁化率通常较小，且在奈尔温度 (Néel temperature) 以下呈现特殊的峰值。
- **自旋分裂：**在理想的非相对论模型下，传统反铁磁体被认为 **不具有明显的自旋分裂** (spin splitting)。但实际材料中，相对论效应可能引入微弱的自旋分裂。

• 亚铁磁体 (Ferrimagnet):

- **宏观磁性表现：**由于净磁矩非零，宏观上表现出 **类似铁磁体的磁性**。例如，可以被磁场磁化，具有磁滞回线等。
- **磁化率：**磁化率较大，类似于铁磁体。
- **自旋分裂：****具有自旋分裂**，类似于铁磁体，电子能带结构呈现自旋极化。

• 交替磁体 (Altermagnet):

- **宏观磁性表现：****净磁矩为零，类似反铁磁体**，宏观磁性不明显。
- **但具有铁磁体般的响应：**关键在于，交替磁体虽然净磁矩为零，但却表现出许多类似铁磁体的特性，例如强烈的时间反演对称性破缺响应 (time-reversal symmetry-breaking responses) 和明显的自旋极化现象 (spin-polarization phenomena)。例如，反常霍尔效应、自旋电流等，这些现象通常被认为是铁磁体的标志性特征，但在交替磁体中也得以实现。
- **自旋分裂：****具有强烈的自旋分裂**，类似于铁磁体，但与铁磁体的自旋分裂不同，交替磁体的自旋分裂通常是 **动量依赖的、各向异性的，并具有特定的对称性 (d 波或更高偶宇称波)**。

3. 核心区别总结:

特征	反铁磁体 (Antiferromagnet)	亚铁磁体 (Ferrimagnet)	交替磁体 (Altermagnet)
磁矩排列	反平行，大小相等	反平行，大小不等	反平行，旋转对称性连接
净磁矩	零	非零	零
宏观磁性表现	类似非磁性	类似铁磁性	类似反铁磁性，但有铁磁体响应
时间反演对称性破缺	较弱 (宏观上看似对称)	强烈	强烈 (尽管净磁矩为零)
自旋分裂	传统观点：较弱或无	强烈，较均匀	强烈，动量依赖，各向异性
亚晶格连接	空间反演/平移	(类似铁磁体内部)	晶体旋转对称性
核心特点	净磁矩为零，磁性不明显	净磁矩非零，磁性明显	净磁矩为零，但有强自旋极化和铁磁体响应

更形象的比喻:

- **反铁磁体:** 就像两个势均力敌的人在拔河, 力量完全抵消, 绳子纹丝不动 (净磁矩为零, 宏观磁性不明显)。
- **亚铁磁体:** 就像两个人在拔河, 但一方力量略大于另一方, 绳子会向力量大的一方移动 (净磁矩非零, 宏观磁性类似铁磁体)。
- **交替磁体:** 就像两个人在拔河, 力量也完全抵消, 绳子不动 (净磁矩为零, 宏观磁性类似反铁磁体)。但他们虽然力量抵消了, 却都在卖力地拉绳子, 并且他们的拉力方式很特别, 具有某种“交替”的特点 (净磁矩为零, 但有强烈的自旋极化和铁磁体般的响应)。

总结:

交替磁体是介于传统反铁磁体和铁磁体之间的一种新型磁性相。它既有反铁磁体的零净磁矩, 又具有铁磁体的时间反演对称性破缺和强自旋极化特性。 **最关键的区别在于连接不同自旋亚晶格的对称性类型以及由此产生的独特的动量空间自旋极化特征。** 理解交替磁体有助于我们拓展对磁性材料的认知, 并探索新型的自旋电子器件应用。

好的, 我们来详细探讨一下交替磁体 (Altermagnet) 的 “time-reversal symmetry-breaking responses” (时间反演对称性破缺响应) 是如何体现的, 以及这些响应与传统铁磁体和反铁磁体的区别。

交替磁体 “time-reversal symmetry-breaking responses” 的体现:

交替磁体虽然净磁矩为零, 但由于其独特的晶体结构和对称性, 打破了时间反演对称性, 从而展现出一系列与时间反演对称性破缺相关的宏观响应, 这些响应在传统反铁磁体中要么很弱, 要么不存在, 但在铁磁体中却是典型的特征。

主要体现方面:

1. 反常霍尔效应 (Anomalous Hall Effect, AHE):

- **传统铁磁体:** 铁磁体中, 由于自发磁化强度破坏了时间反演对称性, 存在显著的反常霍尔效应。即使没有外加磁场, 也能产生横向电压。
- **传统反铁磁体:** 传统反铁磁体, 由于净磁矩为零, 并且在理想模型中被认为是时间反演对称的 (宏观上), 因此反常霍尔效应通常 **很弱或可以忽略不计**。即使在一些具有非共线磁结构的或考虑相对论效应的反铁磁体中, 反常霍尔效应也通常比铁磁体小得多。
- **交替磁体:** 交替磁体中, 尽管净磁矩为零, 却可以展现出与铁磁体相当甚至更强的反常霍尔效应。实验和理论研究都证实了在 RuO₂ 等交替磁体中存在显著的反常霍尔效应。这表明交替磁体虽然是零净磁矩磁体, 但其时间反演对称性破缺程度可以与铁磁体媲美。
- **晶体霍尔效应 (Crystal Hall Effect):** 论文中还提到了 “晶体霍尔效应” (Crystal Hall Effect) 的概念, 强调交替磁体的反常霍尔效应不仅与磁性有关, 还与晶体结构和对称性密切相关。

2. 自旋电流和自旋极化现象 (Spin Current and Spin Polarization Phenomena):

- **传统铁磁体:** 铁磁体是高效的自旋极化电流源。利用铁磁体可以产生自旋注入、自旋转移力矩 (STT) 等重要的自旋电子学效应。
- **传统反铁磁体:** 传统反铁磁体, 由于自旋简并和时间反演对称性, 通常 **难以产生明显的自旋电流和自旋极化**。早期的反铁磁自旋电子学研究主要集中在利用相对论自旋轨道耦合效应来操控反铁磁 Néel 矢量, 但自旋电流和自旋极化效应通常较弱。
- **交替磁体:** 交替磁体被预测和实验证实可以高效地产生自旋电流和自旋极化。例如, 理论预测 RuO₂ 等交替磁体可以作为高效的 **电自旋分裂器 (electrical spin splitter)**, 将非自旋极化的电流转化为自旋极化的电流。实验也证实了在 RuO₂ 中存在 **自旋分裂力矩 (spin-splitter torque, SST)**, 这是一种基于非相对论机制的、高效的自旋力矩效应。

- **非相对论自旋电子学:** 交替磁体的自旋电流和自旋极化现象 **主要来源于非相对论机制**, 强度远超传统反铁磁体中基于相对论效应的自旋电流。 这为发展 **非相对论自旋电子学** 开辟了新的道路。

3. 磁光效应 (Magneto-Optical Effects):

- **传统铁磁体:** 铁磁体具有显著的磁光效应, 例如磁克尔效应 (Magneto-Optical Kerr Effect, MOKE) 和磁光法拉第效应 (Magneto-Optical Faraday Effect)。 这些效应是磁性材料中时间反演对称性破缺的直接体现, 被广泛应用于磁性薄膜和磁性存储的研究。
- **传统反铁磁体:** 传统反铁磁体的磁光效应通常 **很弱**, 因为宏观磁矩为零, 磁光信号难以探测。 需要使用更精细的技术, 例如磁圆二色性 (Magnetic Circular Dichroism, MCD) 等来研究反铁磁体的磁光性质。
- **交替磁体:** 交替磁体也被预测和实验证实可以展现出显著的磁光效应, **尽管净磁矩为零**。 这表明交替磁体的时间反演对称性破缺不仅体现在输运性质上, 也体现在光学性质上。 利用磁光效应可以探测和操控交替磁体的磁序。

总结交替磁体 "time-reversal symmetry-breaking responses" 的核心要点:

- **类似铁磁体的响应强度:** 交替磁体虽然净磁矩为零, 但其时间反演对称性破缺响应 (反常霍尔效应、自旋电流、磁光效应等) 的强度可以 **与铁磁体相当甚至更强**, 远超传统反铁磁体。
- **非相对论机制为主导:** 交替磁体的这些响应 **主要来源于非相对论机制**, 与传统反铁磁体中基于相对论效应的微弱响应有本质区别。
- **晶体对称性驱动:** 这些响应的出现与交替磁体独特的 **晶体对称性** 密切相关, 特别是连接反平行自旋亚晶格的 **晶体旋转对称性**。
- **新型自旋电子学平台:** 交替磁体为发展 **新型的、非相对论的、零净磁矩自旋电子学** 器件提供了理想的材料平台。

与传统铁磁体和反铁磁体的对比:

- **与铁磁体的区别:** 交替磁体的 **净磁矩为零**, 这与铁磁体形成鲜明对比。 零净磁矩意味着交替磁体具有 **更强的抗磁场干扰能力**, **更小的磁畴噪声**, 以及 **更低的功耗** 等优点, 在自旋电子学应用方面具有潜在优势。
- **与反铁磁体的区别:** 交替磁体虽然也具有零净磁矩, 但其 **时间反演对称性破缺响应** 和 **自旋极化强度** 却 **远超传统反铁磁体**。 这使得交替磁体突破了传统反铁磁自旋电子学的局限性, 展现出更广阔的应用前景。

总而言之, 交替磁体的 "time-reversal symmetry-breaking responses" 体现在其可以展现出与铁磁体相当甚至更强的反常霍尔效应、自旋电流、磁光效应等, 而这些响应主要来源于非相对论机制, 并与独特的晶体对称性密切相关。 这些响应使得交替磁体成为一种新型的、具有重要应用潜力的磁性材料, 有望推动自旋电子学进入一个新时代。