

学校编码: 10384  
学号: B200224004

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

分子间多量子相干信号的线形理论、旋转坐标系纵向弛豫性质及其磁共振成像应用

Lineshape and Rotating-frame Longitudinal Relaxation of Intermolecular Multiple-Quantum Coherences, and its MRI Applications

郑炳文

指导教师姓名: 陈 忠 教授

专业名称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2005 年 11 月

论文答辩时间: 2005 年 12 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2005 年 12 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文,是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果,均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在            年解密后适用本授权书。

2、不保密（  ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期：     年   月   日

导师签名：

日期：     年   月   日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目 录

中文摘要	i
英文摘要	iii
第一章 绪论	1
1.1 分子间多量子相干实验现象	1
1.2 分子间多量子相干的理论	2
1.2.1 CRAZED 脉冲序列	2
1.2.2 iMQC 理论的两个基本假设	3
1.2.3 量子理论描述	9
1.2.4 经典偶极场理论描述	11
1.3 辐射阻尼效应	15
1.3.1 辐射阻尼效应实验现象及基本理论描述	15
1.3.2 辐射阻尼效应的物理图象	16
1.3.3 强辐射阻尼效应时的核磁共振线型分析	17
1.3.4 抑制辐射阻尼效应的方法	19
1.4 自旋锁定成像	19
1.5 iMQC 的应用	20
1.6 论文结构	22
第二章 分子间多量子相干信号线形理论	31
2.1 引言	31
2.2 原理和方法	33
2.2.1 时域信号	33
2.2.2 傅里叶变换	34
2.2.3 峰高	36
2.2.4 线宽	37
2.2.5 相位	39

2.3 数值模拟和实验观测	40
2.4 受辐射阻尼效应影响的多量子相干谱	42
2.5 本章小结	42
2.6 附录	43
2.6.1 对分子间多量子相干时域信号的复数傅氏变换	43
2.6.2 验证傅氏变换的正确性	46
第三章 旋转坐标系分子间双量子纵向弛豫的定量研究	49
3.1 引言	49
3.2 原理和方法	50
3.2.1 $T_1$ 、 $T_2$ 弛豫过程	50
3.2.2 相关时间 $\tau_c$	52
3.2.3 自旋锁定技术与 $T_{1\rho}$ 弛豫时间	53
3.2.4 旋转坐标系双量子纵向弛豫 $T_{1\rho,DQ}^{eff}$	54
3.3 定量实验	58
3.4 结果与讨论	60
3.5 本章小结	64
第四章 共振条件下旋转坐标系分子间双量子纵向弛豫加权的自旋回波 成像	69
4.1 引言	69
4.2 原理和方法	71
4.2.1 $T_1$ 与 $T_2$ 在病变成像方面的作用	71
4.2.2 K 空间	71
4.2.3 自旋回波成像特点	72
4.2.4 外加梯度场在 MRI 成像中的作用	73
4.2.5 $T_{1\rho,DQ}$ 加权成像原理与方法	74



4.3 实验材料和方法.....	77
4.4 结果与讨论.....	78
4.5 本章小结.....	82
4.6 附录.....	82
<b>第五章 偏共振条件下旋转坐标系分子间双量子纵向弛豫加权的快速自旋回波成像.....</b>	<b>87</b>
5.1 引言.....	87
5.2 原理和方法.....	87
5.2.1 快速自旋回波成像.....	87
5.2.2 分子间双量子横向弛豫 $T_{2,DQ}$ .....	89
5.2.3 偏共振下 $T_{1\rho,DQ}^{eff}$ 弛豫加权成像原理.....	90
5.3 实验材料和方法.....	93
5.4 结果与讨论.....	94
5.5 本章小结.....	98
<b>第六章 全文总结和展望.....</b>	<b>101</b>
论文发表情况.....	105
致谢.....	107

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## CONTENTS

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>iii</b>
<b>Chapter 1 Preface</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Phenomena of intermolecular multiple-quantum coherences</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Theoretical formalisms of (iMQCs)</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2.1 CRAZED pulse sequence</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2.2 Two presuppositions of iMQC theory</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2.3 CRAZED sequence</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2.4 CRAZED sequence</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Radiation damping</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3.1 Phenomena and theoretical formalisms of radiation damping</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3.2 Vector model of radiation-damped magnetization</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3.3 Lineshape analysis of strongly radiation-damped signals</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3.4 How to suppress radiation damping</b> .....	<b>19</b>
<b>1.4 Spin-locking MR imaging</b> .....	<b>19</b>
<b>1.5 Applications of iMQCs</b> .....	<b>20</b>
<b>1.6 Structure of this thesis</b> .....	<b>22</b>
<b>Chapter 2 Theoretical formalism of lineshapes of iMQC spectra</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2 Theoretical formalism</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.1 Time-domain signals</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.2 Fourier Transformations</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.3 Peak height</b> .....	<b>36</b>
<b>2.2.4 Linewidth</b> .....	<b>37</b>

2.2.5 Phase.....	39
2.3 Numerical simulations and experimental observations.....	40
2.4 iMQC spectra influenced by radiation damping.....	42
2.5 Conclusions.....	42
2.6 Appendix.....	43
2.6.1 Complex Fourier Transformations of time-domain iMQCs.....	43
2.6.2 Verification of expressions of iMQC spectra.....	46
<b>Chapter 3 Quantitative characterization of intermolecular</b>	
<b>double-quantum longitudinal relaxation in the rotating frame.....</b>	<b>49</b>
3.1 Introduction.....	49
3.2 Theoretical formalism.....	50
3.2.1 $T_1$ and $T_2$ relaxation processes.....	50
3.2.2 Correlation time $\tau_c$ .....	52
3.2.3 Spin-locking technique and $T_{1\rho}$ relaxation.....	53
3.2.4 Rotating-frame iDQC longitudinal relaxation $T_{1\rho,DQ}^{eff}$ .....	54
3.3 Quantitative measurement.....	58
3.4 Results and discussion.....	60
3.5 Conclusions.....	64
<b>Chapter 4 Spin-echo MR images weighted by <math>T_{1\rho,DQ}</math> relaxation with</b>	
<b>on-resonance spin-locking pulse.....</b>	<b>69</b>
4.1 Introduction.....	69
4.2 Theoretical formalism.....	71
4.2.1 Pathological diagnosis by $T_1$ - and $T_2$ -weighted MR images.....	71
4.2.2 K space.....	71
4.2.3 Features of spin-echo imaging.....	72

4.2.4 Effects of Gradients in MRI.....	73
4.2.5 Theoretical formalism of $T_{1\rho,DQ}$ -weighted MRI.....	74
4.3 Experimental materials and methods.....	77
4.4 Results and discussion.....	78
4.5 Conclusions.....	82
4.6 Appendix.....	82
<b>Chapter 5 Fast spin-echo MR images weighted by <math>T_{1\rho,DQ}^{eff}</math> relaxation with off-resonance spin-locking pulse.....</b>	<b>87</b>
5.1 Introduction.....	87
5.2 Theoretical formalism.....	87
5.2.1 Fast spin-echo imaging.....	87
5.2.2 iDQC transverse relaxation $T_{2,DQ}$ .....	89
5.2.3 Theoretical formalism of $T_{1\rho,DQ}^{eff}$ -weighted MRI.....	90
5.3 Experimental materials and methods.....	93
5.4 Results and discussion.....	94
5.5 Conclusions.....	98
<b>Chapter 6 Summary.....</b>	<b>101</b>
<b>Publications.....</b>	<b>105</b>
<b>Acknowledgments.....</b>	<b>107</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

**作者姓名：**郑炳文

**论文题目：**分子间多量子相干信号的线形理论、旋转坐标系纵向弛豫性质及其磁共振成像应用

**作者简介：**郑炳文，男，1978年1月出生，2000年9月师从于厦门大学陈忠教授，于 年 月获博士学位。

## 中 文 摘 要

分子间多量子相干(Intermolecular Multiple Quantum Coherence, iMQC)是核磁共振领域的前沿热点话题之一，对其的理论解释曾引起广泛争议。本文的工作是对iMQC理论的扩展和补充，主要成果如下：

一、首次建立了iMQC信号的线形理论。该理论很好地阐述了iMQC谱在线形、峰强、线宽、相位等方面的特点。由于iMQC和辐射阻尼均存在于高极化核自旋体系中，因此它们在信号特征上有很多相似之处。本文从线形角度对二者进行了详细比较，说明了它们是由不同的物理机理引起的。

二、首次将自旋锁定技术引入到CRAZED实验的演化期，提出了“旋转坐标系分子间双量子纵向弛豫”的概念。利用偶极场理论对该弛豫进行了表述，并对该弛豫进行了谱学定量测量，为其在弛豫成像的应用奠定了理论和实验基础。

三、提出了在共振自旋锁定条件下得到的旋转坐标系分子间双量子纵向弛豫 $T_{1\rho,DQ}$ 作为对比度加权参数，采用标准自旋回波成像序列得到一系列磁共振图像，并详细阐述了该方法的优缺点，表明了该弛豫加权成像的独特性和可行性。

四、采用偏共振自旋锁定场和快速自旋回波成像得到 $T_{1\rho,DQ}^{eff}$ 弛豫加权成像。此方法提供了两个有效参数可以调节弛豫时间，从而有效控制图像对比度。结果分析表明，该对比度与传统分子间双量子横向弛豫加权完全不同，也区别于共振条件下的 $T_{1\rho,DQ}$ 加权成像。偏共振方法合成一个有效自旋锁定场，降低了射频场强度，有助于减少临床应用中人体组织对电磁波的吸收。

**关键词：**核磁共振；磁共振成像；分子间多量子相干；弛豫

厦门大学博硕士学位论文摘要库



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库