

低场流动系统中激光增强液体¹²⁹Xe 的辐射阻尼信号^y

周 欣, 罗 军, 孙献平, 曾锡之

(波谱与原子分子物理国家重点实验室, 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 通常只有当样品的自旋浓度很大(如水中的质子), 强磁场和使用高分辨率谱仪的条件下, 辐射阻尼现象才能被观测到. 但是我们利用激光增强原子极化的方法, 使液态¹²⁹Xe 极化度提高到 1.45%, 相同条件下比未激光极化的极化度增强 5 000 倍, 因此我们能在低磁场流动系统中观测到液态¹²⁹Xe 的辐射阻尼.

关键词: 辐射阻尼; 激光极化; 核磁共振信号

中图分类号: O4862.53⁺2 文献标识码: A

1954 年 Bloemergen 和 Pound 分析了辐射阻尼的物理机制^[1]——核磁共振(NMR)事实上可以看成是一对线圈的耦合: 一个是实验中使用的射频线圈, 另一个是磁化矢量. 耦合的结果是进动的磁化矢量在射频线圈中感应产生了自由感应衰减(FID)电流, 记录下来便成了时域的 NMR 信号; 与此同时, 射频线圈中的 FID 电流又反馈到进动着的磁化矢量本身, 其结果是阻尼了磁化矢量的进动. 这个非线性效应的过程叫辐射阻尼. 1957 年, Bloom 建立了包括辐射阻尼效应在内的 Bloch 方程^[2], 并得到当磁化矢量取不同的初始相角 θ_0 时, 观测到的信号包络具有不一样的结果. 信号幅度先增大后衰减的现象有可能出现, 一方面与 $\theta_0 > 90^\circ$ 有关; 另一方面也与辐射阻尼场的强度有关.

辐射阻尼通常是发生在大磁化矢量 M 的情况下, 在静磁场均匀性好和谱仪探头的品质因素 Q 非常高的情况下. $M = \gamma \hbar C P$, γ 为回旋磁比, P 为极化度, C 为样品的自旋浓度. 生物样品中水质子的浓度一般为 100 mol/L ($C \approx 100$ M), 而生物分子的质子浓度只有毫摩尔量级 ($C \approx 1$ mM), 因此要在小的质子浓度样品中达到象水质子的磁化强度只有提高 P 值. 在热平衡时极化度 $P_0(B_0, T) \approx \gamma \hbar B_0 / (4\pi kT)$, 使用低温对核极化的改善是有限的, 因此

通常总是在高磁场强度 B_0 条件下观测到水中质子的辐射阻尼信号. 而我们采用激光增强核极化的方法, 大大提高了核的极化度, 在低磁场流动系统下观测到了¹²⁹Xe 液体的辐射阻尼信号.

NMR 的时域信号表示为^[3]:

$$S(t) = M_0 \operatorname{sech} \left| -\frac{t}{T_{rd}} + \ln \left| \tan \left| \frac{\theta_0}{2} \right| \right| \right| \exp(-i\omega_0 t). \quad (1)$$

此方程表示了**在强辐射阻尼情况下 FID 的理论包迹**. 当磁化矢量的初始角 θ_0 不同时, FID 有不同的包迹. 若 $\theta_0 < 90^\circ$, FID 单调地衰减; 若 $\theta_0 > 90^\circ$, FID 先增长后衰减, 并且经 Fourier 变换后得到频率域上的谱图, 其相位是受辐射阻尼扭曲的, 不可能通过参数调整成纯的吸收或发射相位.

我们的实验装置如图 1 所示. 首先在室温下充入 9.8×10^4 Pa 天然 Xe 气(28.8% 的¹²⁹Xe)至光泵室. 在 25 Gauss 磁场下, 用半导体激光器(Opto Power Co. Model OPC-D015-850-FCPS)光泵 Cs 原子 25 min. 经碰撞使自旋交换而产生的超极化¹²⁹Xe 气体^[4]输运到已预冷在 172 K 的 Bruker SY-80 M 谱仪线圈探头中, 降温至 142 K 冻成固体后再升温至液态, 并保持温度在 176 K, 单次采样观测液态¹²⁹Xe 的

y 收稿日期: 2002 - 03 - 05; 修改日期: 2002 - 06 - 26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19874073)和中国科学院知识创新工程资助项目(KJXC2- W1)

作者简介: 周 欣(1978-), 男(汉族), 湖北监利人, 博士生, 从事激光增强核极化¹²⁹Xe 的 NMR 和量子计算的实验研究.

辐射阻尼信号.

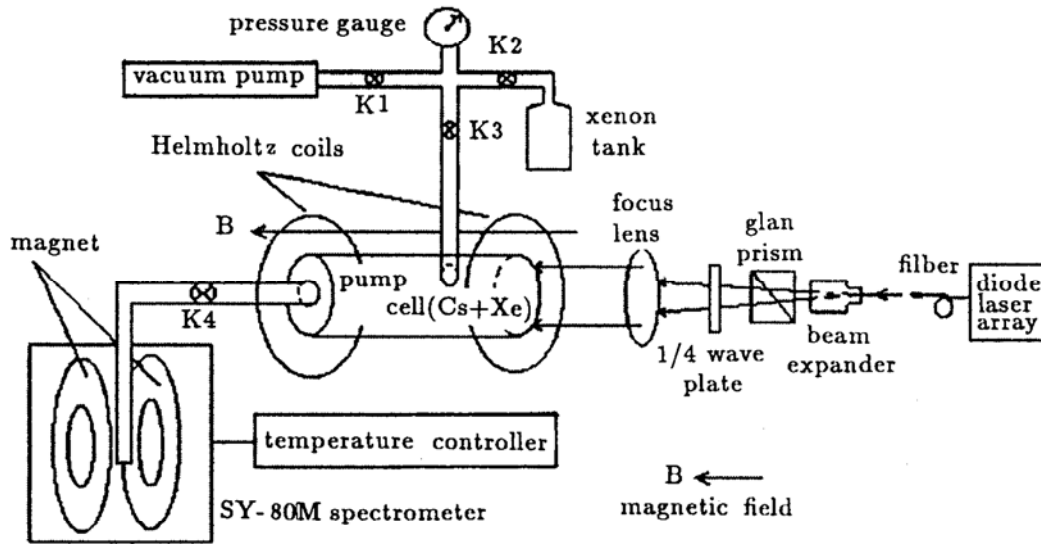


图1 实验装置图

图2是在150°射频脉冲激发下, 实验采得¹²⁹Xe的FID信号和相应的谱图. 可以看出其时间信号不同于一般单调衰减的FID信号, 频率信号也不符合洛伦兹线形, 而是与前面理论预测的那样受控于辐

射阻尼才能被观测到. 在高磁场下水中质子和激光极化的¹²⁹Xe样品两种情况下发生辐射阻尼的主要参数比较如下:

(1) 高磁场下高分辨率核磁共振谱仪探头的品质因素 Q , 和依赖于探头几何形状的填充因子 η , 都优于我们 Bruker SY-80 M 谱仪的参数值.

(2) 比较在室温下 11.7 T 的水中质子信号强度 ($C = 110 \text{ M}$, $P = 4.2 \times 10^{-5}$, $M = 7.83 \times 10^{-5} \text{ G/cm}^3$) 和 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的超极化液体¹²⁹Xe信号强度 ($C = 21 \text{ M}$, $P = 1.45 \times 10^{-2}$, $M = 1.42 \times 10^{-3} \text{ G/cm}^3$), 可以看出由于¹²⁹Xe核极化大大高于水中质子的, 极化的液体¹²⁹Xe信号强度大于高场下水中质子的信号强度. 并且与相同条件下无光泵的¹²⁹Xe信号相比, 激光增强因子为 5 000 倍.

(3) 由于 T_{rd} 与旋磁比成反比, 所以在相同磁化矢量的条件下, 旋磁比对辐射阻尼的影响, 质子是¹²⁹Xe核的 4 倍.

(4) 对惰性气体来说, 横向弛豫时间 T_2 大致等于纵向弛豫时间 T_1 , 液相弛豫时间在几分钟到几十分钟^[6,7]. 此外, T_2^* 的值受磁场均匀度的影响, 然而高分辨的 NMR 谱仪的磁场均匀度一般小于 1 Hz 的, 也优于 Bruker SY-80 M 谱仪的磁场均匀度.

因此, 通常要在强磁场和高自旋密度条件下才能观测到的辐射阻尼信号, 通过激光增强原子极化即便是在低磁场和低初始自旋浓度条件也能观测到辐射阻尼信号.

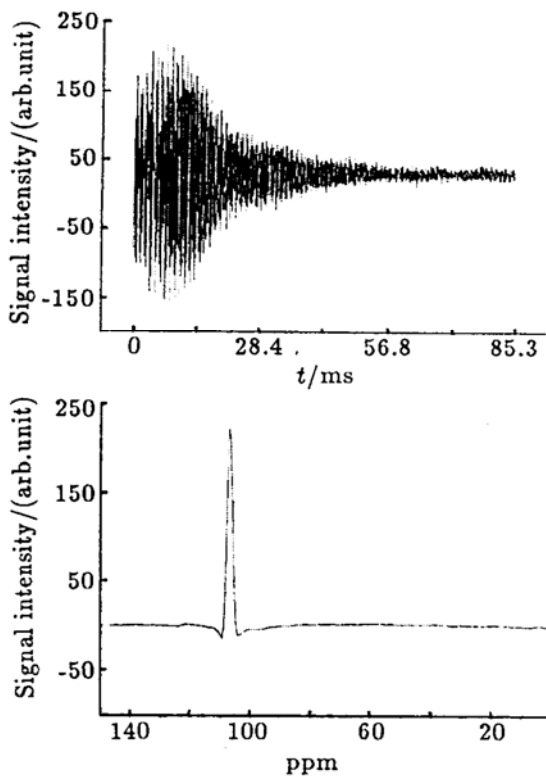


图2 (a) 150°射频脉冲时的FID信号, (b) 150°射频脉冲时的谱图

射阻尼时的线形. 因为只有当横向弛豫时间 T_2^* 比辐射阻尼因子 $T_{rd} = 1 / (2\pi\eta QM\gamma)^{[1,2,5]}$ 大很多时,

参 考 文 献:

- [1] Bloembergen N, Pound R V. Radiation Damping in Magnetic Resonance Experiments[J]. Phys Rev, 1954, **95**: 8.
- [2] Bloom S. Effects of Radiation Damping on Spin Dynamics[J]. J Appl Phys, 1957, **28**: 800.
- [3] Mao X A, Guo J X. Line Shapes of Strongly Radiation damped Nuclear Magnetic Resonance Signals[J]. Phys Rev, 1994, **B49**: 15 702.
- [4] Zeng X, Wu Z, Call T, *et al.* Experimental Determination of the Rate Constants for Spin Exchange Between Optically Pumped K, Rb, and Cs Atoms and ^{129}Xe Nuclei in Alkali-metal-noble-gas Van Der Waals Molecules[J]. Phys Rev, 1985, **A31**: 260.
- [5] Warren W S, Hames S L, Bates J L. Dynamics of Radiation Damping in Nuclear Magnetic Resonance[J]. J Chem Phys, 1989, **91**: 5 895.
- [6] Moschos A, Reisse J. Nuclear Magnetic Relaxation of Xenon 129 Dissolved in Organic Solvents[J]. J Magn Reson, 1991, **95**: 603.
- [7] Stith A, Hitchens T K, Hinton D P, *et al.* Consequences of ^{129}Xe - ^1H Cross Relaxation in Aqueous Solutions[J]. J Magn Reson, 1999, **139**: 225.

Radiation Damping of Laser-polarized Liquid ^{129}Xe in the Low Field Flow System*

ZHOU Xin, LUO Jun, SUN Xiarping, ZENG Xi-zhi

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics
and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Radiation damping is usually observed only when a sample has high spin concentration, such as water protons, in the high magnetic field with high-resolution spectrometer. However, after we applied the technique of laser-enhanced nuclear polarization, the nuclear spin polarizations of the liquid ^{129}Xe is increased to 1.45%, which corresponded to the enhancements of 5 000 compared to that without optical pumping under the same conditions. Therefore, we observed radiation damping of liquid ^{129}Xe in the low field flow system using the SY-80 M NMR spectrometer.

Key words: radiation damping; laser-polarization; NMR signal

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(19874073); National Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-W1)