



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Design and synthesis of paramagnetic probes for structural biology**

Liu, W.

### **Citation**

Liu, W. (2013, November 25). *Design and synthesis of paramagnetic probes for structural biology*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/22357>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/22357>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/22357> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Liu, Wei-Min

**Title:** Design and synthesis of paramagnetic probes for structural biology

**Issue Date:** 2013-11-25

## Reference List

- (1) Bünzli, J.-C. G. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 2729-2755.
- (2) Edelmann, F. T. *Coord. Chem. Rev.* **2013**, *257*, 1122-1231.
- (3) Butler, S. J.; Parker, D. *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 1652-1666.
- (4) Viswanathan, S.; Kovacs, Z.; Green, K. N.; Ratnakar, S. J.; Sherry, A. D. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 2960-3018.
- (5) Keizers, P. H. J.; Ubbink, M. *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.* **2011**, *58*, 88-96.
- (6) Reuben, J.; Leigh, J. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1972**, *94*, 2789-2793.
- (7) Dwek, R. A.; Richards, R. E.; Morallee, K. G.; Nieboer, E.; Williams, R. J. P.; Xavier, A. V. *Eur. J. Biochem.* **1971**, *21*, 204-209.
- (8) Bünzli, J.-C. G. *Acc. Chem. Res.* **2006**, *39*, 53-61.
- (9) Otting, G. *Annu. Rev. Biophys.* **2010**, *39*, 387-405.
- (10) Allen, K. N.; Imperiali, B. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **2010**, *14*, 247-254.
- (11) Keizers, P. H. J.; Saragliadis, A.; Hiruma, Y.; Overhand, M.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 14802-14812.
- (12) Madl, T.; Güttler, T.; Görlich, D.; Sattler, M. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 3993-3997.
- (13) Koehler, J.; Meiler, J. *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.* **2011**, *59*, 360-389.
- (14) Clore, G. M. *Mol. Biosyst.* **2008**, *4*, 1058-1069.
- (15) Arnesano, F.; Banci, L.; Piccioli, M. *Q. Rev. Biophys.* **2005**, *38*, 167-219.
- (16) Banci, L.; Bertini, I.; Marconi, S.; Pierattelli, R. *Eur. J. Biochem.* **1993**, *215*, 431-437.
- (17) Tolman, J. R.; Ruan, K. *Chem. Rev.* **2006**, *106*, 1720-1736.
- (18) Cotton, S. *Lanthanoid and Actinide Chemistry*; Wiley, 2007.
- (19) Gaponenko, V.; Altieri, A.; Li, J.; Byrd, R. A. *J. Biomol. NMR* **2002**, *24*, 143-148.
- (20) Dvoretzky, A.; Gaponenko, V.; Rosevear, P. R. *FEBS Lett* **2002**, *528*, 189-192.
- (21) Kamen, D. E.; Cahill, S. M.; Girvin, M. E. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 1846-1847.
- (22) Ikegami, T.; Verdier, L.; Sakhaii, P.; Grimme, S.; Barbara, P.; Krishna, S.; Fiebig, K. M.; Griesinger, C. *J. Biomol. NMR* **2004**, *29*, 339-349.

- (23) Pintacuda, G.; Moshref, A.; Leonchiks, A.; Sharipo, A.; Otting, G. *J. Biomol. NMR* **2004**, *29*, 351-361.
- (24) Rodriguez-Castañeda, F.; Haberz, P.; Leonov, A.; Griesinger, C. *Magn. Reson. Chem.* **2006**, *44*, S10-S16.
- (25) Leonov, A.; Voigt, B.; Rodriguez-Castañeda, F.; Sakhaii, P.; Griesinger, C. *Chem. Eur. J.* **2005**, *11*, 3342-3348.
- (26) Haberz, P.; Rodriguez-Castañeda, F.; Junker, J.; Becker, S.; Leonov, A.; Griesinger, C. *Org. Lett.* **2006**, *8*, 1275-1278.
- (27) Peters, F.; Maestre-Martinez, M.; Leonov, A.; Kovačič, L.; Becker, S.; Boelens, R.; Griesinger, C. *J. Biomol. NMR* **2011**, *51*, 329-337.
- (28) Viguier, R.; Serratrice, G.; Dupraz, A.; Dupuy, C. *Eur. J. Inorg. Chem.* **2001**, *2001*, 1789-1795.
- (29) Franklin, S. J.; Raymond, K. N. *Inorg. Chem.* **1994**, *33*, 5794-5804.
- (30) Parker, D.; Dickins, R. S.; Puschmann, H.; Crossland, C.; Howard, J. A. K. *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 1977-2010.
- (31) Prudêncio, M.; Rohovec, J.; Peters, J. A.; Tocheva, E.; Boulanger, M. J.; Murphy, M. E. P.; Hupkes, H.-J.; Kusters, W.; Impagliazzo, A.; Ubbink, M. *Chem. Eur. J.* **2004**, *10*, 3252-3260.
- (32) Vlasie, M. D.; Fernández-Busnadiego, R.; Prudêncio, M.; Ubbink, M. *J. Mol. Biol.* **2008**, *375*, 1405-1415.
- (33) De León-Rodríguez, L. M.; Kovacs, Z. *Bioconjugate Chem.* **2008**, *19*, 391-402.
- (34) Woods, M.; Kovacs, Z.; Kiraly, R.; Brücher, E.; Zhang, S.; Sherry, A. D. *Inorg. Chem.* **2004**, *43*, 2845-2851.
- (35) Sarka, L.; Burai, L.; Brücher, E. *Chem. Eur. J.* **2000**, *6*, 719-724.
- (36) Vlasie, M. D.; Comuzzi, C.; van den Nieuwendijk, A. M. C. H.; Prudêncio, M.; Overhand, M.; Ubbink, M. *Chem. Eur. J.* **2007**, *13*, 1715-1723.
- (37) Mayer, F.; Platas-Iglesias, C.; Helm, L.; Peters, J. A.; Djanashvili, K. *Inorg. Chem.* **2012**, *51*, 170-178.
- (38) Polášek, M.; Rudovský, J.; Hermann, P.; Lukes, I.; Elst, L. V.; Muller, R. N. *Chem. Commun.* **2004**, *0*, 2602-2603.
- (39) Polášek, M.; Kotek, J.; Hermann, P.; Císařová, I.; Binnemans, K.; Lukeš, I. *Inorg. Chem.* **2009**, *48*, 466-475.
- (40) Keizers, P. H. J.; Desreux, J. F.; Overhand, M.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 9292-9293.

- (41) De León-Rodríguez, L. M.; Kovacs, Z.; Esqueda-Oliva, A. C.; Miranda-Olvera, A. D. *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 6937-6940.
- (42) Liu, W.-M.; Keizers, P. H. J.; Hass, M. A. S.; Blok, A.; Timmer, M.; Sarris, A. J. C.; Overhand, M.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 17306-17313.
- (43) Woods, M.; Kiefer, G. E.; Bott, S.; Castillo-Muzquiz, A.; Eshelbrenner, C.; Michaudet, L.; McMillan, K.; Mudigunda, S. D. K.; Ogrin, D.; Tircsó, G.; Zhang, S.; Zhao, P.; Sherry, A. D. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 9248-9256.
- (44) Häussinger, D.; Huang, J.-r.; Grzesiek, S. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 14761-14767.
- (45) Graham, B.; Loh, C. T.; Swarbrick, J. D.; Ung, P.; Shin, J.; Yagi, H.; Jia, X.; Chhabra, S.; Barlow, N.; Pintacuda, G.; Huber, T.; Otting, G. *Bioconjugate Chem.* **2011**, *22*, 2118-2125.
- (46) Hoyle, C. E.; Lowe, A. B.; Bowman, C. N. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, *39*, 1355-1387.
- (47) Yang, Y.; Li, Q.-F.; Cao, C.; Huang, F.; Su, X.-C. *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 1097-1103.
- (48) Sletten, E. M.; Bertozzi, C. R. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 6974-6998.
- (49) Spiteri, C.; Moses, J. E. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 31-33.
- (50) Loh, C. T.; Ozawa, K.; Tuck, K. L.; Barlow, N.; Huber, T.; Otting, G.; Graham, B. *Bioconjugate Chem.* **2013**, *24*, 260-268.
- (51) Yagi, H.; Maleckis, A.; Otting, G. *J. Biomol. NMR* **2013**, *55*, 157-166.
- (52) Man, B.; Su, X.-C.; Liang, H.; Simonsen, S.; Huber, T.; Messerle, B. A.; Otting, G. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 3827-3832.
- (53) Su, X.-C.; Man, B.; Beeren, S.; Liang, H.; Simonsen, S.; Schmitz, C.; Huber, T.; Messerle, B. A.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 10486-10487.
- (54) Li, Q.-F.; Yang, Y.; Maleckis, A.; Otting, G.; Su, X.-C. *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 2704-2706.
- (55) Swarbrick, J. D.; Ung, P.; Chhabra, S.; Graham, B. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 4403-4406.
- (56) Swarbrick, J. D.; Ung, P.; Su, X.-C.; Maleckis, A.; Chhabra, S.; Huber, T.; Otting, G.; Graham, B. *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 7368-7370.
- (57) Su, X.-C.; Liang, H.; Loscha, K. V.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 10352-10353.

- (58) Harrowfield, J.; Kim, Y.; Skelton, B.; White, A. *Aust. J. Chem.* **1995**, *48*, 807-823.
- (59) Jia, X.; Yagi, H.; Su, X.-C.; Stanton-Cook, M.; Huber, T.; Otting, G. *J. Biomol. NMR* **2011**, *50*, 411-420.
- (60) Wei, Z.; Yang, Y.; Li, Q.-F.; Huang, F.; Zuo, H.-H.; Su, X.-C. *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 5758-5764.
- (61) Almeida, R. M.; Geraldies, C. F. G. C.; Pauleta, S. R.; Moura, J. J. G. *Inorg. Chem.* **2011**, *50*, 10600-10607.
- (62) Snyder, E. E.; Buoscio, B. W.; Falke, J. J. *Biochemistry* **1990**, *29*, 3937-3943.
- (63) Lee, L.; Sykes, B. D. *Biochemistry* **1981**, *20*, 1156-1162.
- (64) Lee, L.; Sykes, B. D. *Biochemistry* **1983**, *22*, 4366-4373.
- (65) Allegrozzi, M.; Bertini, I.; Janik, M. B. L.; Lee, Y.-M.; Liu, G.; Luchinat, C. *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 4154-4161.
- (66) Bertini, I.; Gupta, Y. K.; Luchinat, C.; Parigi, G.; Peana, M.; Sgheri, L.; Yuan, J. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 12786-12794.
- (67) Bertini, I.; Gelis, I.; Katsaros, N.; Luchinat, C.; Provenzani, A. *Biochemistry* **2003**, *42*, 8011-8021.
- (68) Bertini, I.; Janik, M. B. L.; Lee, Y.-M.; Luchinat, C.; Rosato, A. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 4181-4188.
- (69) Brautigam, C. A.; Aschheim, K.; Steitz, T. A. *Chem. Biol.* **1999**, *6*, 901-908.
- (70) Capozzi, F.; Casadei, F.; Luchinat, C. *J. Biol. Inorg. Chem.* **2006**, *11*, 949-962.
- (71) Ma, C.; Opella, S. J. *J. Magn. Reson.* **2000**, *146*, 381-384.
- (72) Nitz, M.; Franz, K. J.; Maglathlin, R. L.; Imperiali, B. *ChemBioChem* **2003**, *4*, 272-276.
- (73) Franz, K. J.; Nitz, M.; Imperiali, B. *ChemBioChem* **2003**, *4*, 265-271.
- (74) Barthelmes, K.; Reynolds, A. M.; Peisach, E.; Jonker, H. R. A.; DeNunzio, N. J.; Allen, K. N.; Imperiali, B.; Schwalbe, H. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 808-819.
- (75) Barb, A. W.; Ho, T. G.; Flanagan-Steet, H.; Prestegard, J. H. *Protein Sci.* **2012**, *21*, 1456-1466.
- (76) Su, X.-C.; Huber, T.; Dixon, N. E.; Otting, G. *ChemBioChem* **2006**, *7*, 1599-1604.
- (77) Su, X.-C.; McAndrew, K.; Huber, T.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 1681-1687.

- (78) Saio, T.; Ogura, K.; Yokochi, M.; Kobashigawa, Y.; Inagaki, F. *J. Biomol. NMR* **2009**, *44*, 157-166.
- (79) Sattler, M.; Schleucher, J.; Griesinger, C. *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.* **1999**, *34*, 93-158.
- (80) Keizers, P. H. J.; Mersinli, B.; Reinle, W.; Donauer, J.; Hiruma, Y.; Hannemann, F.; Overhand, M.; Bernhardt, R.; Ubbink, M. *Biochemistry* **2010**, *49*, 6846-6855.
- (81) Schmitz, C.; John, M.; Park, A. Y.; Dixon, N.; Otting, G.; Pintacuda, G.; Huber, T. *J. Biomol. NMR* **2006**, *35*, 79-87.
- (82) Pintacuda, G.; Keniry, M. A.; Huber, T.; Park, A. Y.; Dixon, N. E.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 2963-2970.
- (83) John, M.; Schmitz, C.; Park, A. Y.; Dixon, N. E.; Huber, T.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 13749-13757.
- (84) Skinner, S.; Moshev, M.; Hass, M. S.; Ubbink, M. *J. Biomol. NMR* **2013**, *55*, 379-389.
- (85) Bertini, I.; Kursula, P.; Luchinat, C.; Parigi, G.; Vahokoski, J.; Wilmanns, M.; Yuan, J. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 5134-5144.
- (86) Dasgupta, S.; Hu, X.; Keizers, P. J.; Liu, W.-M.; Luchinat, C.; Nagulapalli, M.; Overhand, M.; Parigi, G.; Sgheri, L.; Ubbink, M. *J. Biomol. NMR* **2011**, *51*, 253-263.
- (87) Raitsimring, A. M.; Gunanathan, C.; Potapov, A.; Efremenko, I.; Martin, J. M. L.; Milstein, D.; Goldfarb, D. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 14138-14139.
- (88) Stoll, S.; Lee, Y.-T.; Zhang, M.; Wilson, R. F.; Britt, R. D.; Goodin, D. B. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2012**, *109*, 12888-12893.
- (89) Liepinsh, E.; Baryshev, M.; Sharipo, A.; Ingelman-Sundberg, M.; Otting, G.; Mkrtchian, S. *Structure* **2001**, *9*, 457-471.
- (90) Barak, N. N.; Neumann, P.; Sevvana, M.; Schutkowski, M.; Naumann, K.; Malešević, M.; Reichardt, H.; Fischer, G.; Stubbs, M. T.; Ferrari, D. M. *J. Mol. Biol.* **2009**, *385*, 1630-1642.
- (91) Yagi, H.; Banerjee, D.; Graham, B.; Huber, T.; Goldfarb, D.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 10418-10421.
- (92) de la Cruz, L.; Nguyen, T. H. D.; Ozawa, K.; Shin, J.; Graham, B.; Huber, T.; Otting, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 19205-19215.

- (93) Pervushin, K.; Riek, R.; Wider, G.; Wüthrich, K. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **1997**, *94*, 12366-12371.
- (94) Saio, T.; Yokochi, M.; Kumeta, H.; Inagaki, F. *J. Biomol. NMR* **2010**, *46*, 271-280.
- (95) Kobashigawa, Y.; Saio, T.; Ushio, M.; Sekiguchi, M.; Yokochi, M.; Ogura, K.; Inagaki, F. *J. Biomol. NMR* **2012**, *53*, 53-63.
- (96) Tripathi, S.; Li, H.; Poulos, T. L. *Science* **2013**, *340*, 1227-1230.
- (97) Hiruma, Y.; Hass, M. A. S.; Kikui, Y.; Liu, W.-M.; Ölmez, B.; Skinner, S. P.; Blok, A.; Kloosterman, A.; Koteishi, H.; Löhr, F.; Schwalbe, H.; Nojiri, M.; Ubbink, M. *J. Mol. Biol.* **2013**. DOI: 10.1016/j.jmb.2013.07.006
- (98) Xu, X.; Keizers, P. J.; Reinle, W.; Hannemann, F.; Bernhardt, R.; Ubbink, M. *J. Biomol. NMR* **2009**, *43*, 247-254.
- (99) Xu, X.; Reinle, W.; Hannemann, F.; Konarev, P. V.; Svergun, D. I.; Bernhardt, R.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 6395-6403.
- (100) Hajduk, P. J.; Greer, J. *Nat. Rev. Drug Discovery* **2007**, *6*, 211-219.
- (101) Saio, T.; Ogura, K.; Shimizu, K.; Yokochi, M.; Burke, T., Jr.; Inagaki, F. *J. Biomol. NMR* **2011**, *51*, 395-408.
- (102) Guan, J.-Y.; Keizers, P. H. J.; Liu, W.-M.; Löhr, F.; Skinner, S. P.; Heeneman, E. A.; Schwalbe, H.; Ubbink, M.; Siegal, G. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 5859-5868.
- (103) Zhuang, T.; Lee, H.-S.; Imperiali, B.; Prestegard, J. H. *Protein Sci.* **2008**, *17*, 1220-1231.
- (104) Assfalg, M.; Gianolio, E.; Zanzoni, S.; Tomaselli, S.; Lo Russo, V.; Cabella, C.; Ragona, L.; Aime, S.; Molinari, H. *J. Med. Chem.* **2007**, *50*, 5257-5268.
- (105) Eisenmesser, E. Z.; Millet, O.; Labeikovsky, W.; Korzhnev, D. M.; Wolf-Watz, M.; Bosco, D. A.; Skalicky, J. J.; Kay, L. E.; Kern, D. *Nature* **2005**, *438*, 117-121.
- (106) Boehr, D. D.; McElheny, D.; Dyson, H. J.; Wright, P. E. *Science* **2006**, *313*, 1638-1642.
- (107) Mittermaier, A.; Kay, L. E. *Science* **2006**, *312*, 224-228.
- (108) Vallurupalli, P.; Hansen, D. F.; Stollar, E.; Meirovitch, E.; Kay, L. E. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2007**, *104*, 18473-18477.
- (109) Vallurupalli, P.; Hansen, D. F.; Kay, L. E. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2008**, *105*, 11766-11771.



- (110) Eichmüller, C.; Skrynnikov, N. *J. Biomol. NMR* **2007**, *37*, 79-95.
- (111) Hass, M. A. S.; Keizers, P. H. J.; Blok, A.; Hiruma, Y.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 9952-9953.
- (112) Hormel, S.; Adman, E.; Walsh, K. A.; Beppu, T.; Titani, K. *FEBS Lett.* **1986**, *197*, 301-304.
- (113) Kakutani, T.; Watanabe, H.; Arima, K.; Beppu, T. *J. Biochem.* **1981**, *89*, 463-472.
- (114) Brown, I. D. *Acta Crystallogr.* **1988**, *B44*, 545-553.
- (115) Vakoufari, E.; Wilson, K. S.; Petratos, K. *FEBS Lett.* **1994**, *347*, 203-206.
- (116) Kato, H.; Feng, H.; Bai, Y. *J. Mol. Biol.* **2007**, *365*, 870-880.
- (117) Sagermann, M.; Baase, W. A.; Mooers, B. H. M.; Gay, L.; Matthews, B. W. *Biochemistry* **2004**, *43*, 1296-1301.
- (118) Louie, G. V.; Brayer, G. D. *J. Mol. Biol.* **1990**, *214*, 527-555.
- (119) Baistrocchi, P.; Banci, L.; Bertini, I.; Turano, P.; Bren, K. L.; Gray, H. B. *Biochemistry* **1996**, *35*, 13788-13796.
- (120) Louie, G. V.; Hutcheon, W. L. B.; Brayer, G. D. *J. Mol. Biol.* **1988**, *199*, 295-314.
- (121) Berghuis, A. M.; Brayer, G. D. *J. Mol. Biol.* **1992**, *223*, 959-976.
- (122) Banci, L.; Bertini, I.; Bren, K. L.; Gray, H. B.; Sompornpisut, P.; Turano, P. *Biochemistry* **1997**, *36*, 8992-9001.
- (123) Nelson, D. *Hum. Genomics* **2009**, *4*, 59 - 65.
- (124) Lee, Y.-T.; Wilson, R. F.; Rupniewski, I.; Goodin, D. B. *Biochemistry* **2010**, *49*, 3412-3419.
- (125) Poulos, T. L.; Finzel, B. C.; Gunsalus, I. C.; Wagner, G. C.; Kraut, J. *J. Biol. Chem.* **1985**, *260*, 16122-30.
- (126) Poulos, T. L.; Finzel, B. C.; Howard, A. J. *J. Mol. Biol.* **1987**, *195*, 687-700.
- (127) Libeu, C. A. P.; Kukimoto, M.; Nishiyama, M.; Horinouchi, S.; Adman, E. T. *Biochemistry* **1997**, *36*, 13160-13179.
- (128) Weaver, L. H.; Matthews, B. W. *J. Mol. Biol.* **1987**, *193*, 189-199.
- (129) Bertini, I.; Luchinat, C.; Parigi, G.; Pierattelli, R. *ChemBioChem* **2005**, *6*, 1536-1549.
- (130) Clore, G. M. *Protein Sci.* **2011**, *20*, 229-246.
- (131) Pintacuda, G.; John, M.; Su, X.-C.; Otting, G. *Acc. Chem. Res.* **2007**, *40*, 206-212.

- (132) Su, Y.; Hu, F.; Hong, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 8693-8702.
- (133) Bernini, A.; Spiga, O.; Venditti, V.; Prischi, F.; Botta, M.; Croce, G.; Tong, A. P.-L.; Wong, W.-T.; Niccolai, N. *J. Inorg. Biochem.* **2012**, *112*, 25-31.
- (134) Otting, G. *J. Biomol. NMR* **2008**, *42*, 1-9.
- (135) Biekofsky, R. R.; Muskett, F. W.; Schmidt, J. M.; Martin, S. R.; Browne, J. P.; Bayley, P. M.; Feeney, J. *FEBS Lett.* **1999**, *460*, 519-526.
- (136) Gay, G. L.; Lindhout, D. A.; Sykes, B. D. *Protein Sci.* **2004**, *13*, 640-651.
- (137) Gaponenko, V.; Dvoretzky, A.; Walsby, C.; Hoffman, B. M.; Rosevear, P. R. *Biochemistry* **2000**, *39*, 15217-15224.
- (138) Aime, S.; Botta, M.; Ermondi, G. *Inorg. Chem.* **1992**, *31*, 4291-4299.
- (139) Aime, S.; Botta, M.; Fasano, M.; Marques, M. P. M.; Geraldes, C. F. G. C.; Pubanz, D.; Merbach, A. E. *Inorg. Chem.* **1997**, *36*, 2059-2068.
- (140) Cosentino, U.; Villa, A.; Pitea, D.; Moro, G.; Barone, V.; Maiocchi, A. *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 4901-4909.
- (141) Ranganathan, R. S.; Raju, N.; Fan, H.; Zhang, X.; Tweedle, M. F.; Desreux, J. F.; Jacques, V. *Inorg. Chem.* **2002**, *41*, 6856-6866.
- (142) Dapporto, P.; Fusi, V.; Micheloni, M.; Palma, P.; Paoli, P.; Pontellini, R. *Inorganica Chimica Acta* **1998**, *275-276*, 168-174.
- (143) Li, C.; Winnard Jr, P.; Bhujwalla, Z. M. *Tetrahedron Lett.* **2009**, *50*, 2929-2931.
- (144) Ni, W.; Fang, H.; Springsteen, G.; Wang, B. *J. Org. Chem.* **2004**, *69*, 1999-2007.
- (145) Polášek, M.; Šedinová, M.; Kotek, J.; Vander Elst, L.; Muller, R. N.; Hermann, P.; Lukeš, I. *Inorg. Chem.* **2009**, *48*, 455-465.
- (146) Green, K. N.; Viswanathan, S.; Rojas-Quijano, F. A.; Kovacs, Z.; Sherry, A. D. *Inorg. Chem.* **2011**, *50*, 1648-1655.
- (147) Parker, D.; Puschmann, H.; Batsanov, A. S.; Senanayake, K. *Inorg. Chem.* **2003**, *42*, 8646-8651.
- (148) Zhang, S.; Jiang, X.; Sherry, A. D. *Helvetica Chimica Acta* **2005**, *88*, 923-935.
- (149) Aime, S.; Barge, A.; Botta, M.; Fasano, M.; Danilo Ayala, J.; Bombieri, G. *Inorganica Chimica Acta* **1996**, *246*, 423-429.
- (150) Jacques, V.; Desreux, J. F. *Inorg. Chem.* **1994**, *33*, 4048-4053.
- (151) Ho, S. N.; Hunt, H. D.; Horton, R. M.; Pullen, J. K.; Pease, L. R. *Gene* **1989**, *77*, 51-59.

- (152) Tjandra, N.; Omichinski, J. G.; Gronenborn, A. M.; Clore, G. M.; Bax, A. *Nat. Struct. Mol. Biol.* **1997**, *4*, 732-738.
- (153) Delaglio, F.; Grzesiek, S.; Vuister, G. W.; Zhu, G.; Pfeifer, J.; Bax, A. *J. Biomol. NMR* **1995**, *6*, 277-293.
- (154) Vranken, W. F.; Boucher, W.; Stevens, T. J.; Fogh, R. H.; Pajon, A.; Llinas, M.; Ulrich, E. L.; Markley, J. L.; Ionides, J.; Laue, E. D. *Proteins* **2005**, *59*, 687-696.
- (155) Worrall, J. A. R.; Kolczak, U.; Canters, G. W.; Ubbink, M. *Biochemistry* **2001**, *40*, 7069-7076.
- (156) Schwieters, C. D.; Kuszewski, J. J.; Tjandra, N.; Marius Clore, G. *J. Mag. Reson.* **2003**, *160*, 65-73.
- (157) Banci, L.; Bertini, I.; Cavallaro, G.; Giachetti, A.; Luchinat, C.; Parigi, G. *J. Biomol. NMR* **2004**, *28*, 249-261.
- (158) Bashir, Q.; Volkov, A. N.; Ullmann, G. M.; Ubbink, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *132*, 241-247.
- (159) Allen, K. N.; Imperiali, B. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **2010**, *14*, 247-254.
- (160) Qi, D.; Tann, C.-M.; Haring, D.; Distefano, M. D. *Chem. Rev.* **2001**, *101*, 3081-3112.
- (161) Liu, C. C.; Schultz, P. G. *Annu. Rev. Biochem.* **2010**, *79*, 413-444.
- (162) Yang, Z.; Attygalle, A. B. *J. Mass Spectrom.* **2007**, *42*, 233-243.
- (163) Lang, S.; Spratt, D. E.; Guillemette, J. G.; Palmer, M. *Anal. Biochem.* **2005**, *342*, 271-279.
- (164) Behr, J.-B.; Gurlain, T.; Helimi, A.; Guillerme, G. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2003**, *13*, 1713-1716.
- (165) Lee, J.; Kang, S.-U.; Kil, M.-J.; Shin, M.; Lim, J.-O.; Choi, H.-K.; Jin, M.-K.; Kim, S. Y.; Kim, S.-E.; Lee, Y.-S.; Min, K.-H.; Kim, Y.-H.; Ha, H.-J.; Tran, R.; Welter, J. D.; Wang, Y.; Szabo, T.; Pearce, L. V.; Lundberg, D. J.; Toth, A.; Pavlyukovets, V. A.; Morgan, M. A.; Blumberg, P. M. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2005**, *15*, 4136-4142.
- (166) Mitsuya, M.; Kobayashi, K.; Kawakami, K.; Satoh, A.; Ogino, Y.; Kakikawa, T.; Ohtake, N.; Kimura, T.; Hirose, H.; Sato, A.; Numazawa, T.; Hasegawa, T.; Noguchi, K.; Mase, T. *J. Med. Chem.* **2000**, *43*, 5017-5029.
- (167) Norberg, O.; Deng, L.; Aastrup, T.; Yan, M.; Ramström, O. *Anal. Chem.* **2011**, *83*, 1000-1007.

- (168) Schmitz, C.; Stanton-Cook, M.; Su, X.-C.; Otting, G.; Huber, T. *J. Biomol. NMR* **2008**, *41*, 179-189.
- (169) Do-Thanh, C.-L.; Rowland, M. M.; Best, M. D. *Tetrahedron* **2011**, *67*, 3803-3808.
- (170) Kornmayer, S. C.; Rominger, F.; Gleiter, R. *Synthesis* **2009**, *2009*, 2547-2552.
- (171) van Delft, P.; Meeuwenoord, N. J.; Hoogendoorn, S.; Dinkelaar, J.; Overkleeft, H. S.; van der Marel, G. A.; Filippov, D. V. *Org. Lett.* **2010**, *12*, 5486-5489.
- (172) Shelbourne, M.; Chen, X.; Brown, T.; El-Sagheer, A. H. *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 6257-6259.
- (173) Shetty, D.; Jeong, J. M.; Ju, C. H.; Kim, Y. J.; Lee, J.-Y.; Lee, Y.-S.; Lee, D. S.; Chung, J.-K.; Lee, M. C. *Bioorg. Med. Chem.* **2010**, *18*, 7338-7347.
- (174) Wang, L.; Schultz, P. G. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 34-66.
- (175) Beck-Sickinger, A. G.; Budisa, N. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 310-312.
- (176) Hong, V.; Presolski, S. I.; Ma, C.; Finn, M. G. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 9879-9883.
- (177) Besanceney-Webler, C.; Jiang, H.; Zheng, T.; Feng, L.; Soriano del Amo, D.; Wang, W.; Klivansky, L. M.; Marlow, F. L.; Liu, Y.; Wu, P. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 8051-8056.
- (178) Hlavaty, J. J.; Nowak, T. *Biochemistry* **1997**, *36*, 15514-15525.
- (179) Milles, S.; Tyagi, S.; Banterle, N.; Koehler, C.; VanDelinder, V.; Plass, T.; Neal, A. P.; Lemke, E. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 5187-5195.
- (180) Norholm, M. *BMC Biotechnology* **2010**, *10*, 21.
- (181) McIntosh, L. P.; Wand, A. J.; Lowry, D. F.; Redfield, A. G.; Dahlquist, F. W. *Biochemistry* **1990**, *29*, 6341-6362.
- (182) Polasek, M.; Rudovsky, J.; Hermann, P.; Lukes, I.; Elst, L. V.; Muller, R. N. *Chem. Commun.* **2004**, *0*, 2602-2603.
- (183) Ishida, Y.; Inoue, M.-a.; Inoue, T.; Ojida, A.; Hamachi, I. *Chem. Commun.* **2009**, *45*, 2848-2850.
- (184) Geraldes, C. F. G. C. In *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*; John Wiley & Sons, Ltd: 2012.
- (185) Grey, M. J.; Wang, C.; Palmer, A. G. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 14324-14335.
- (186) Cornilescu, G.; Marquardt, J. L.; Ottiger, M.; Bax, A. *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 6836-6837.

- (187) Kuehler, T. C.; Fryklund, J.; Bergman, N.-k.; Weilitz, J.; Lee, A.; Larsson, H. *J. Med. Chem.* **1995**, *38*, 4906-4916.
- (188) Kühler, T. C.; Swanson, M.; Shcherbuchin, V.; Larsson, H.; Mellgård, B.; Sjöström, J.-E. *J. Med. Chem.* **1998**, *41*, 1777-1788.
- (189) Stoll, S.; Lee, Y.-T.; Zhang, M.; Wilson, R. F.; Britt, R. D.; Goodin, D. B. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* **2012**, *109*, 12888-12893.
- (190) Bashir, Q.; Scanu, S.; Ubbink, M. *FEBS J.* **2011**, *278*, 1391-1400.
- (191) Chatani, S.; Nakamura, M.; Akahane, H.; Kohyama, N.; Taki, M.; Arata, T.; Yamamoto, Y. *Chem. Commun.* **2005**, *0*, 1880-1882.
- (192) Fleissner, M. R.; Bridges, M. D.; Brooks, E. K.; Cascio, D.; Kálai, T.; Hideg, K.; Hubbell, W. L. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* **2011**, *108*, 16241-16246.
- (193) Hirayama, T.; Taki, M.; Nakamura, M.; Arata, T.; Yamamoto, Y. *Chem. Lett.* **2006**, *35*, 834-835.
- (194) Columbus, L.; Kálai, T.; Jekö, J.; Hideg, K.; Hubbell, W. L. *Biochemistry* **2001**, *40*, 3828-3846.
- (195) Fawzi, N.; Fleissner, M.; Anthis, N.; Kálai, T.; Hideg, K.; Hubbell, W.; Clore, G. M. *J. Biomol. NMR* **2011**, *51*, 105-114.
- (196) Berliner, L. J.; Grunwald, J.; Hankovszky, H. O.; Hideg, K. *Anal. Biochem.* **1982**, *119*, 450-455.
- (197) McHaourab, H. S.; Kálai, T.; Hideg, K.; Hubbell, W. L. *Biochemistry* **1999**, *38*, 2947-2955.
- (198) Fleissner, M. R.; Cascio, D.; Hubbell, W. L. *Protein Sci.* **2009**, *18*, 893-908.
- (199) Poulos, T. L.; Howard, A. J. *Biochemistry* **1987**, *26*, 8165-8174.
- (200) Xie, Y.-X.; Pi, S.-F.; Wang, J.; Yin, D.-L.; Li, J.-H. *J. Org. Chem.* **2006**, *71*, 8324-8327.
- (201) Zhu, L.; Li, G.; Luo, L.; Guo, P.; Lan, J.; You, J. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 2200-2202.
- (202) Morris, J. C.; McMurtrie, J. C.; Bottle, S. E.; Fairfull-Smith, K. E. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 4964-4972.
- (203) Blinco, J. P.; McMurtrie, J. C.; Bottle, S. E. *Eur. J. Org. Chem.* **2007**, *2007*, 4638-4641.
- (204) Lee, Y.-T.; Glazer, E. C.; Wilson, R. F.; Stout, C. D.; Goodin, D. B. *Biochemistry* **2011**, *50*, 693-703.

- (205) Wright, K.; Dutot, L.; Wakselman, M.; Mazaleyrat, J.-P.; Crisma, M.; Formaggio, F.; Toniolo, C. *Tetrahedron* **2008**, *64*, 4416-4426.
- (206) Wright, K.; Formaggio, F.; Toniolo, C.; Török, R.; Péter, A.; Wakselman, M.; Mazaleyrat, J.-P. *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 4183-4186.
- (207) Miyake, M.; Shen, J.; Liu, S.; Shi, H.; Liu, W.; Yuan, Z.; Pritchard, A.; Kao, J. P. Y.; Liu, K. J.; Rosen, G. M. *JEPT* **2006**, *318*, 1187-1193.
- (208) Chudinov, A. V.; Rozantsev, É. G.; Rozynov, B. V. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Khim* **1983**, *32*, 409-413.
- (209) Erdélyi, M.; d'Auvergne, E.; Navarro-Vázquez, A.; Leonov, A.; Griesinger, C. *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 9368-9376.
- (210) Yamamoto, S.; Yamaguchi, T.; Erdélyi, M.; Griesinger, C.; Kato, K. *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 9280-9282.
- (211) Mallagaray, A.; Canales, A.; Dominguez, G.; Jimenez-Barbero, J.; Perez-Castells, J. *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 7179-7181.