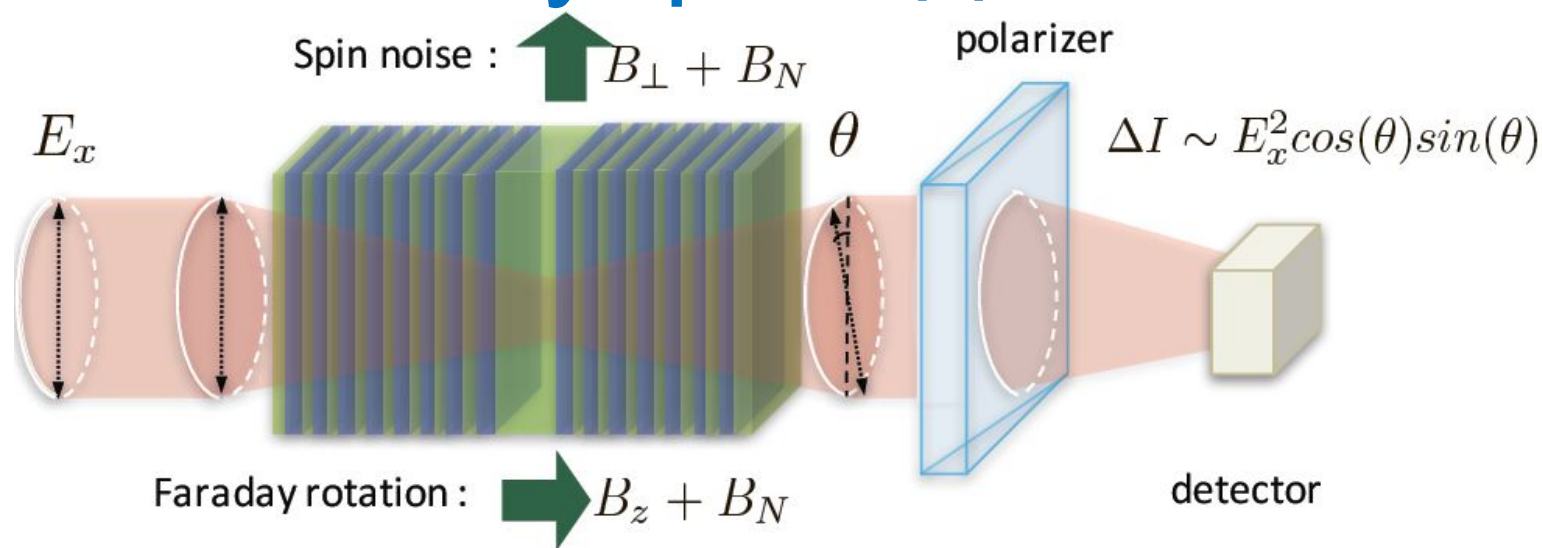


- К.В.Кавокин, лаб. Оптики спина СПбГУ



Спиновая физика – от птиц до полупроводников

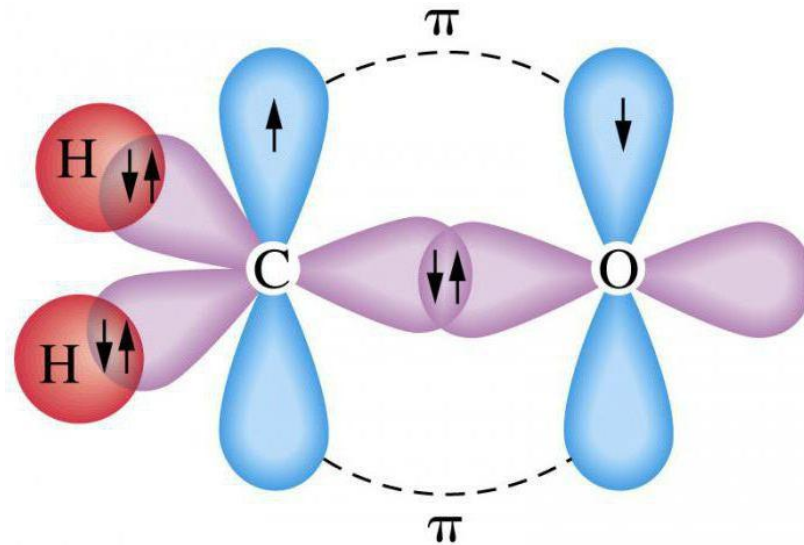


СПИН S

μ

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

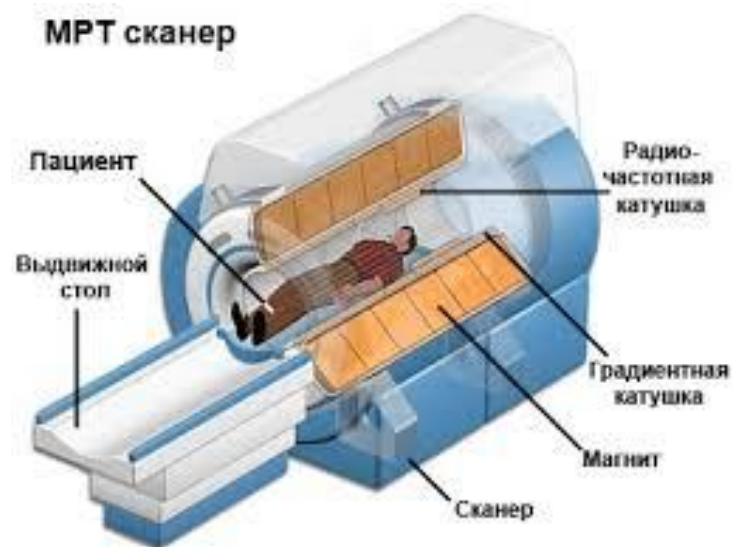




Ковалентная связь



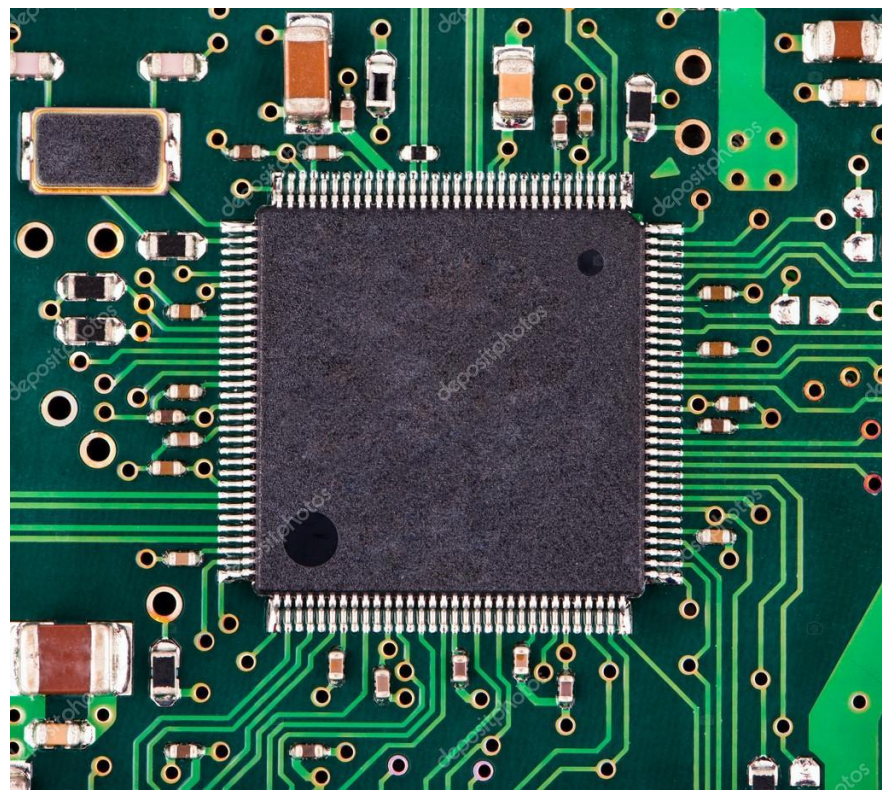
МРТ сканер

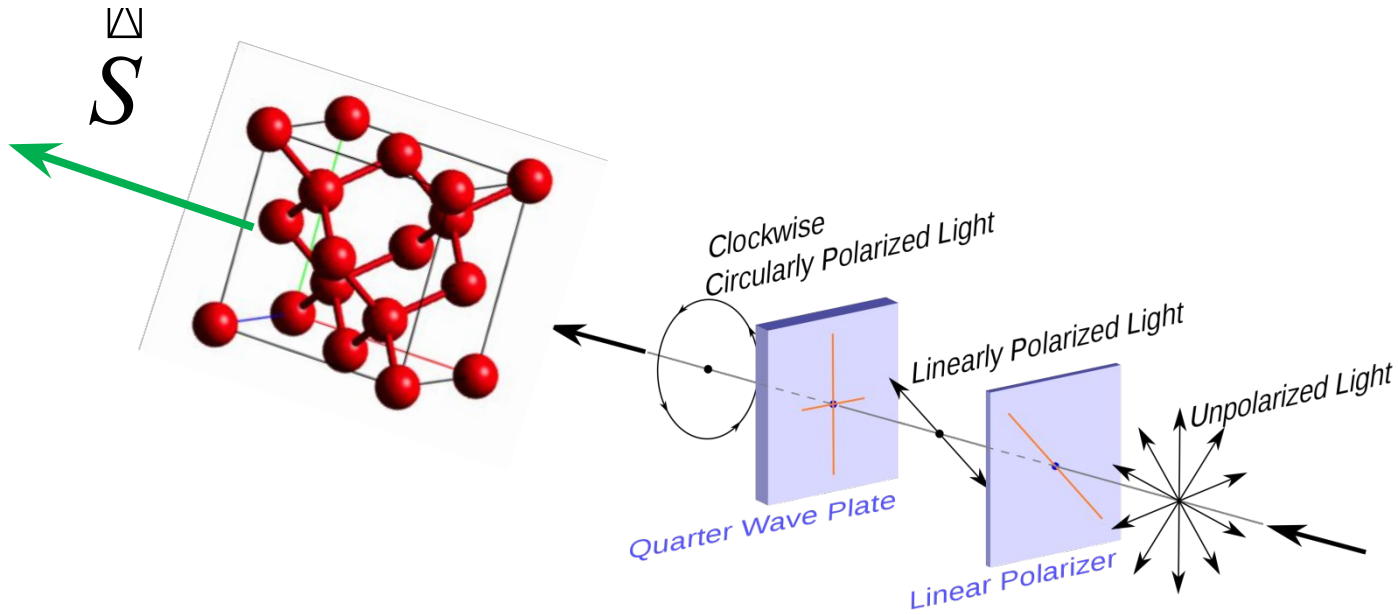
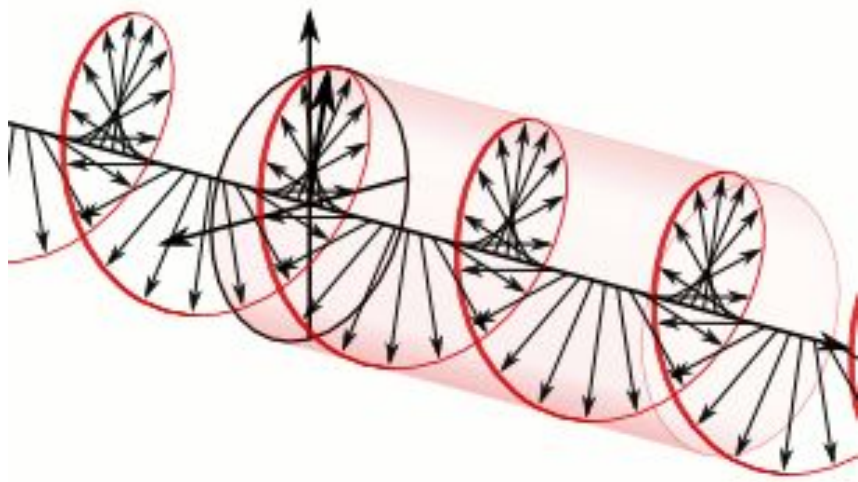


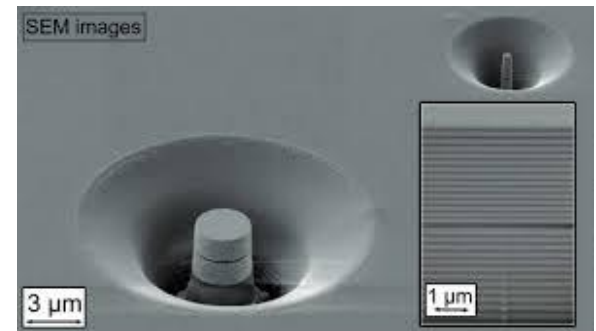
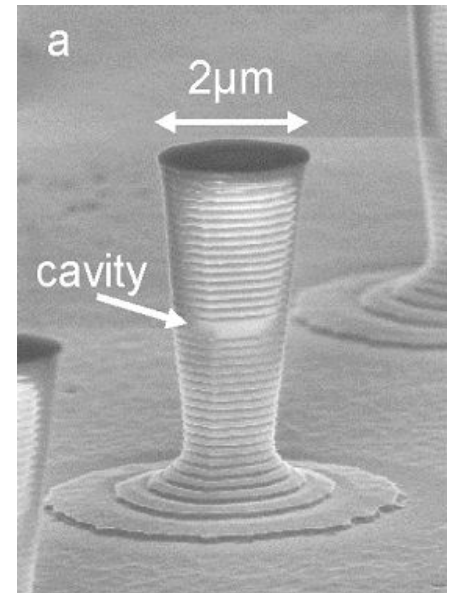
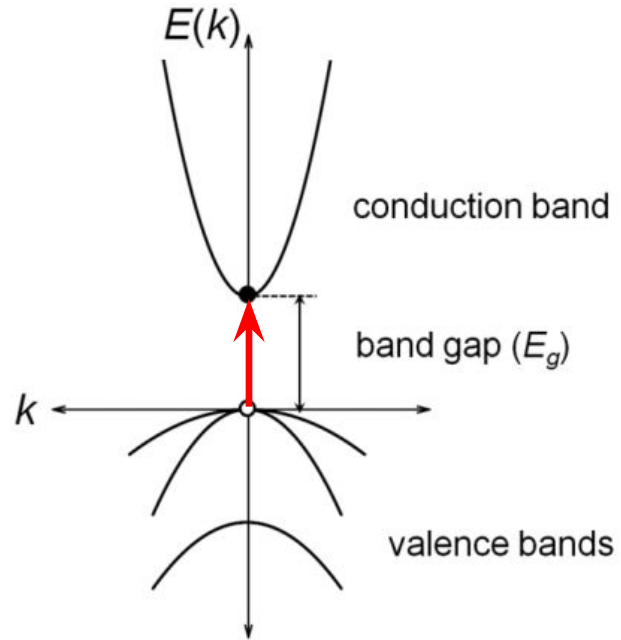
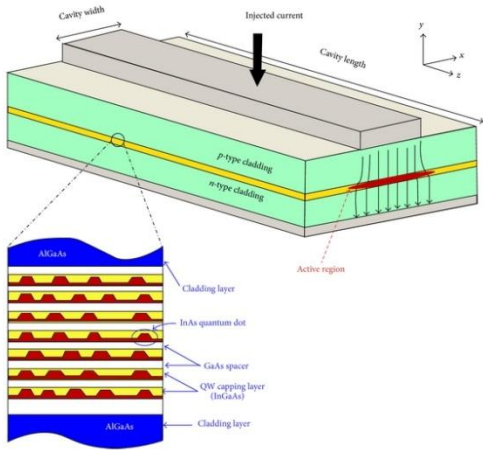
А при чём тут птицы???

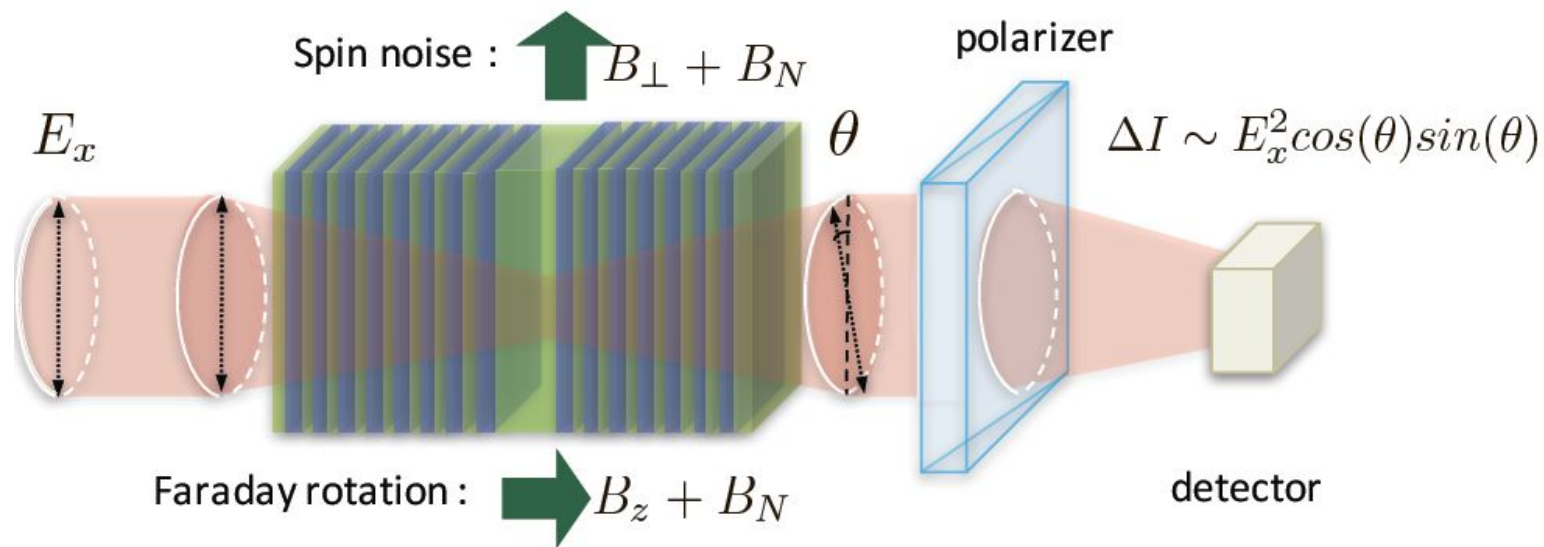


И полупроводники???

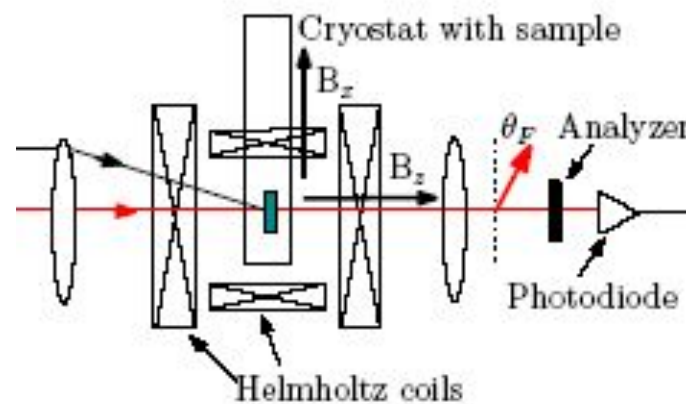




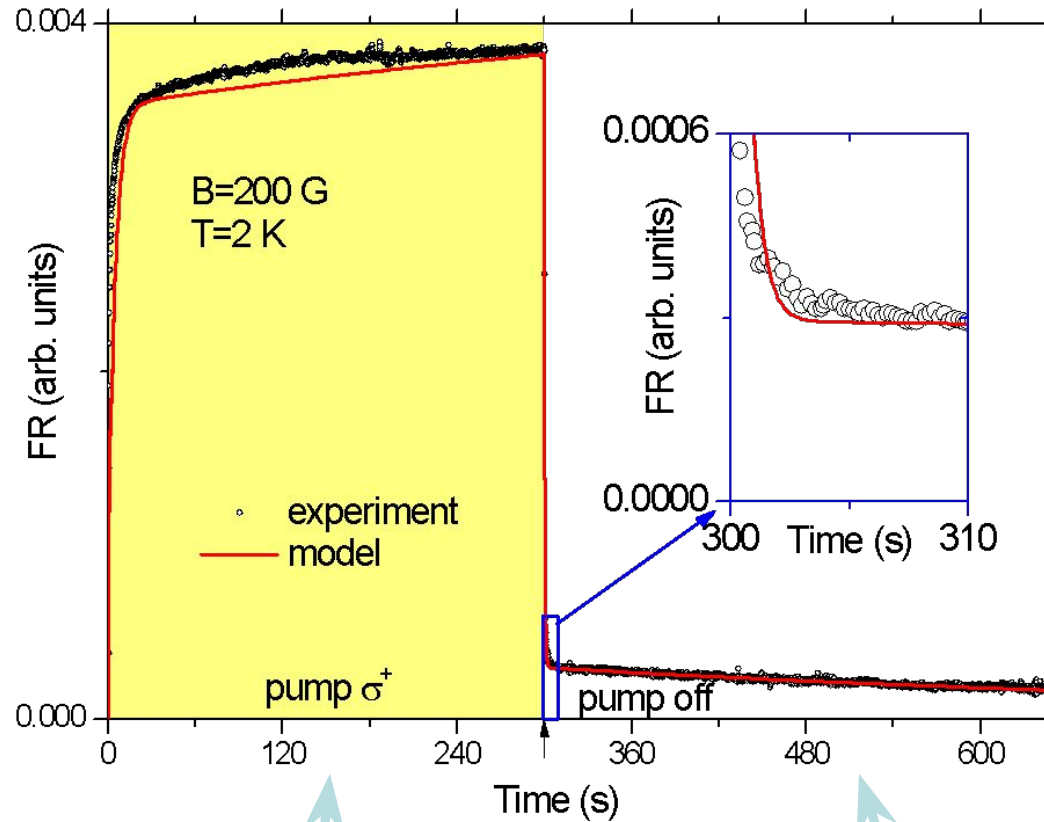




Экспериментальная техника: лазерная поляриметрия, структуры с микрорезонаторами



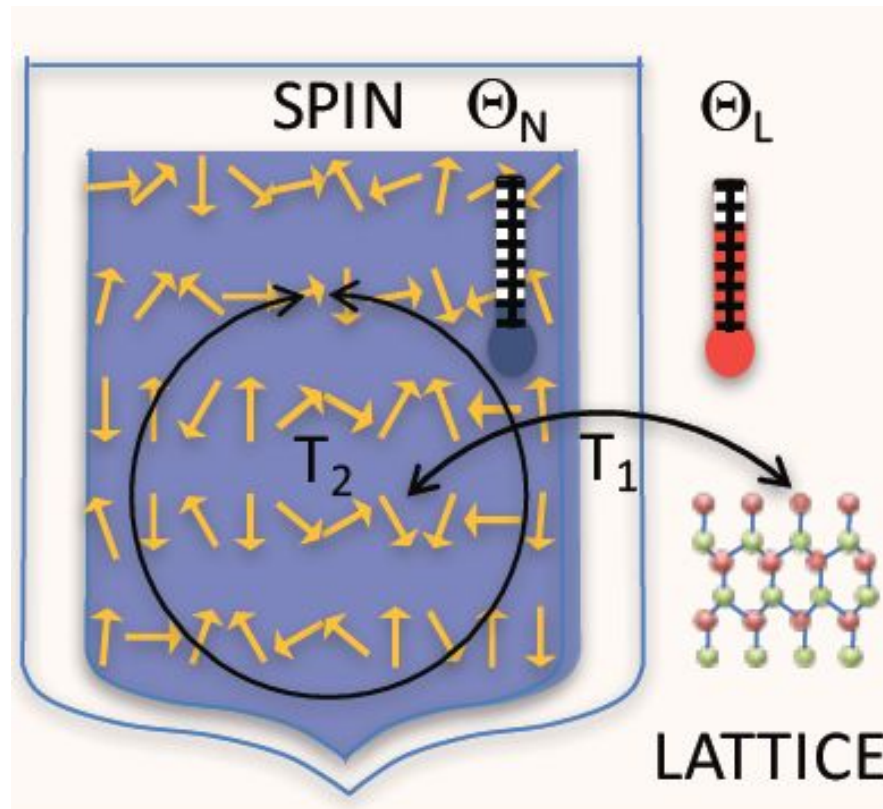
Пример сигнала фотоиндуцированного Фарадеевского вращения



Ориентированные спины электронов

Охлаждённые спины
ядер решётки

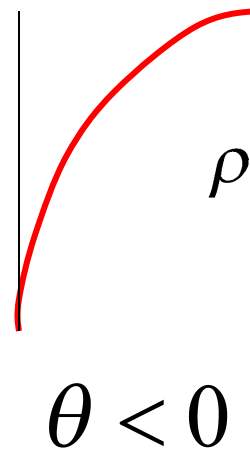
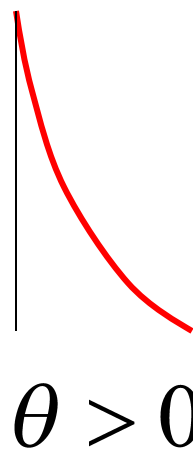
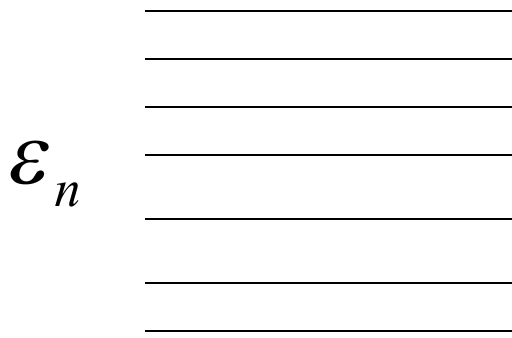
Спиновая температура ядер решётки



Spin temperature concept

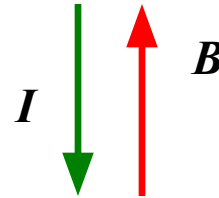
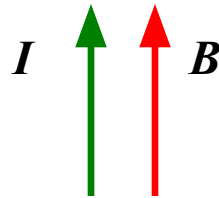
E.M.Purcell and R.V.Pound,
Phys.Rev.81, 279 (1951)

Спиновая температура во внешнем магнитном поле



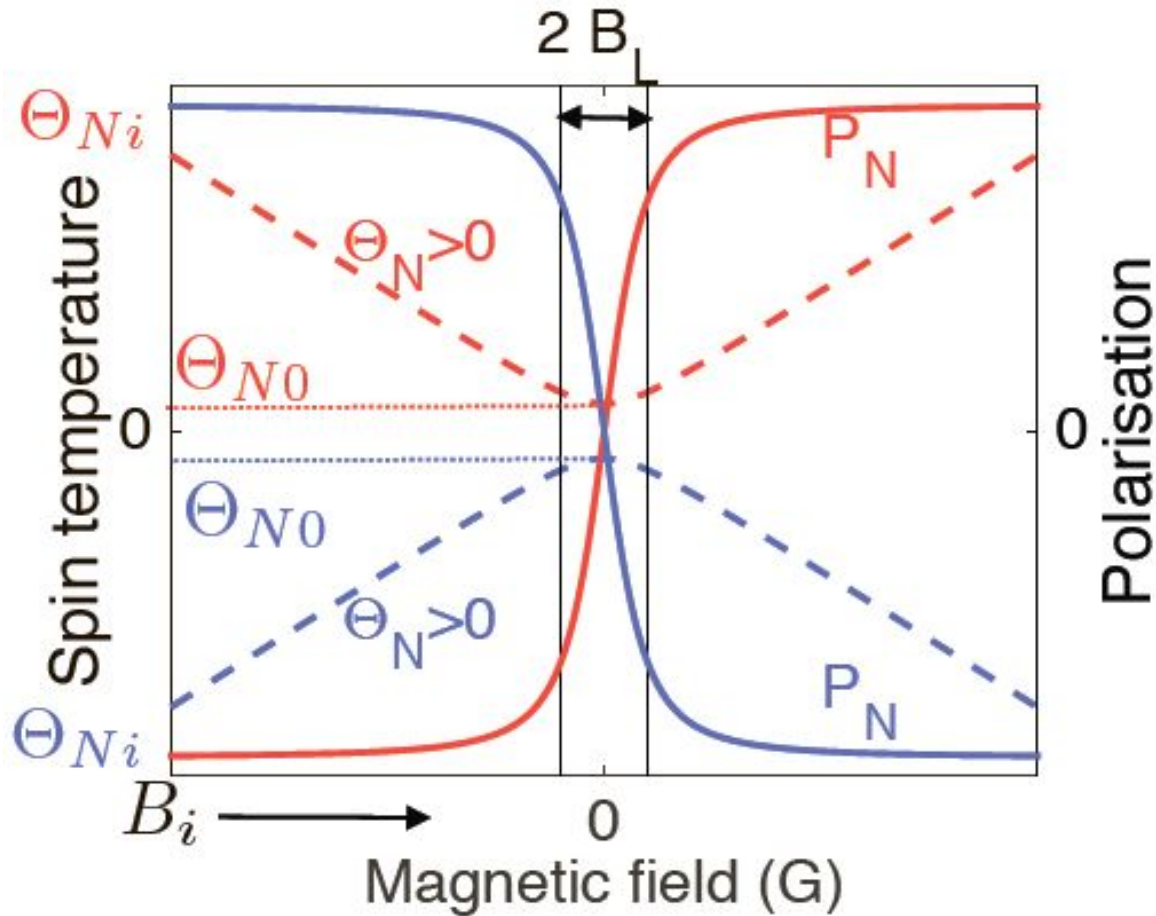
$$\rho_{nm} = \frac{\exp(-\varepsilon_n / k\theta)}{\sum_n \exp(-\varepsilon_n / k\theta)} \delta_{nm}$$

Охлаждение при
оптической
накачке



$$k_B \theta_0 = \frac{1}{3} I(I + 1) \frac{\hbar \gamma_N B_0}{\langle I_0 \rangle}$$

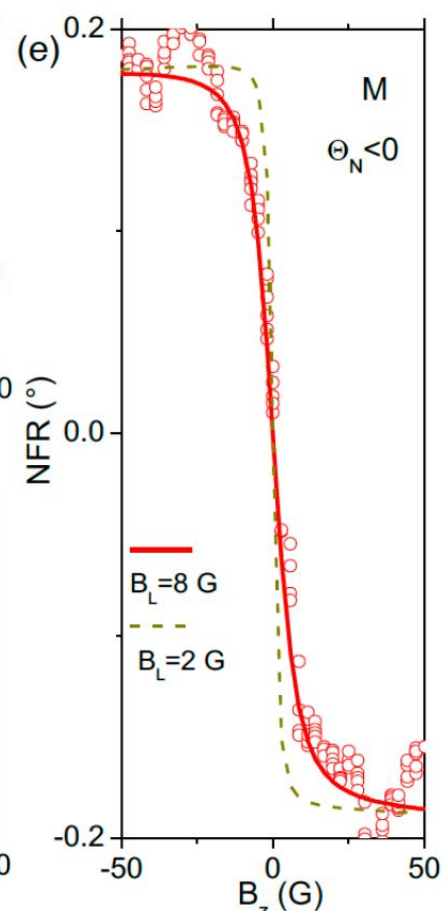
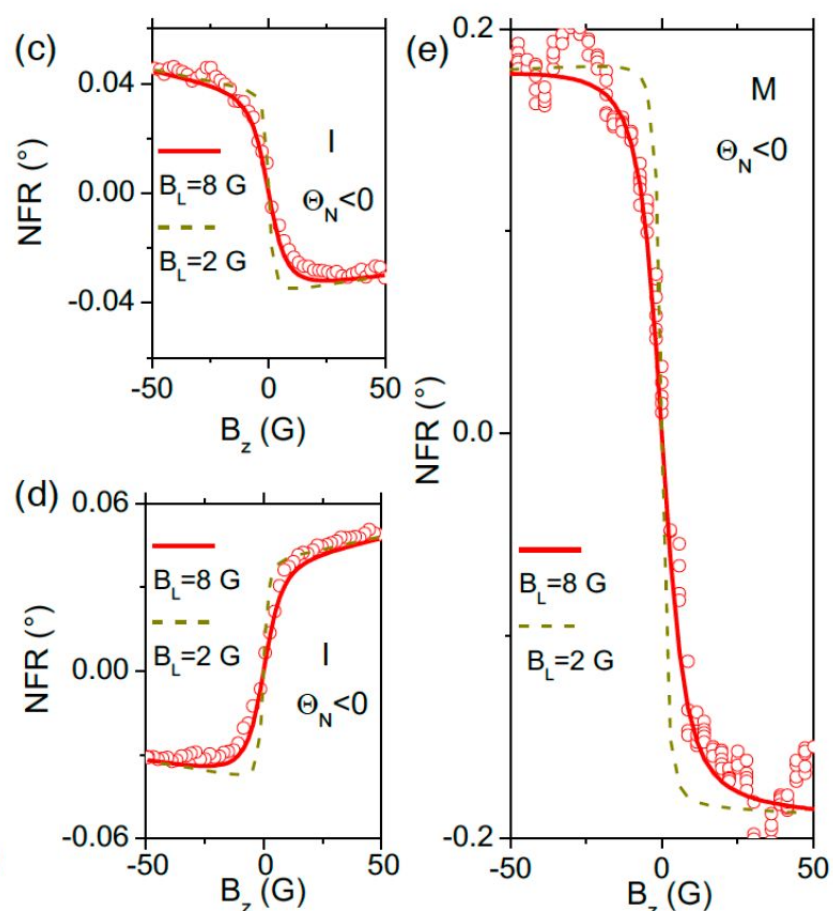
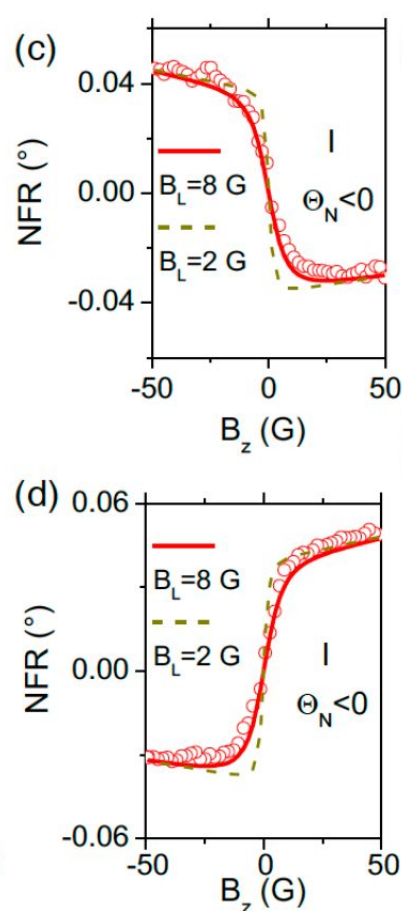
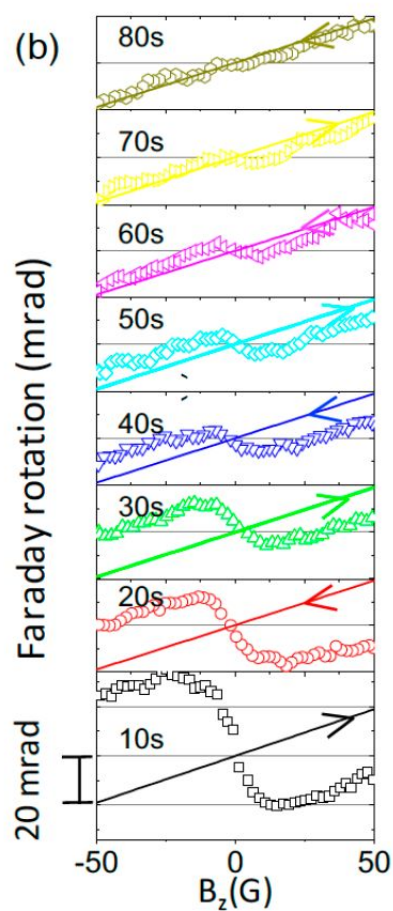
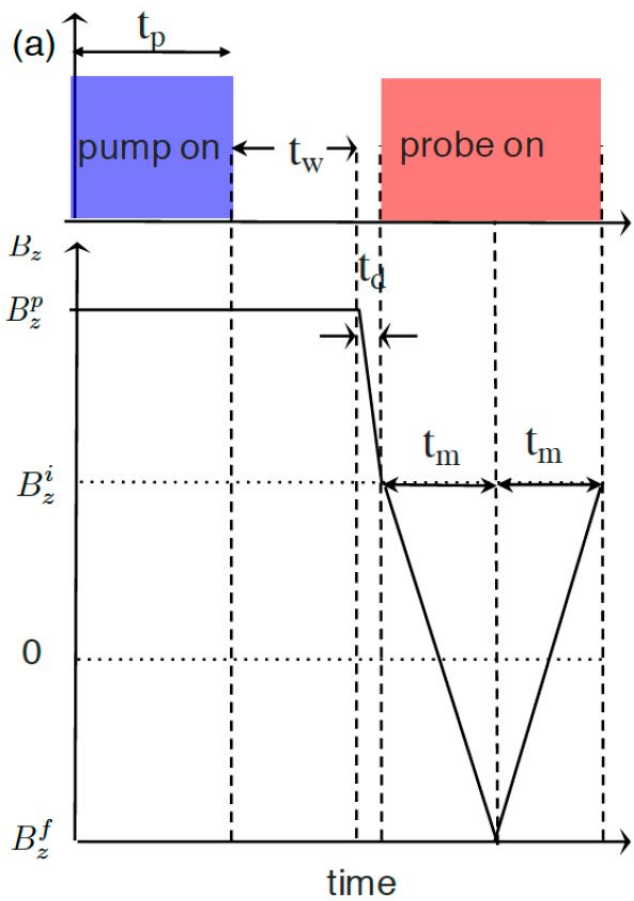
Размагничивание: ориентация спинов исчезает, а спиновая температура только понижается!



$$\theta_N = \theta_N^i \cdot \frac{\sqrt{B^2 + B_L^2}}{\sqrt{B_i^2 + B_L^2}}$$

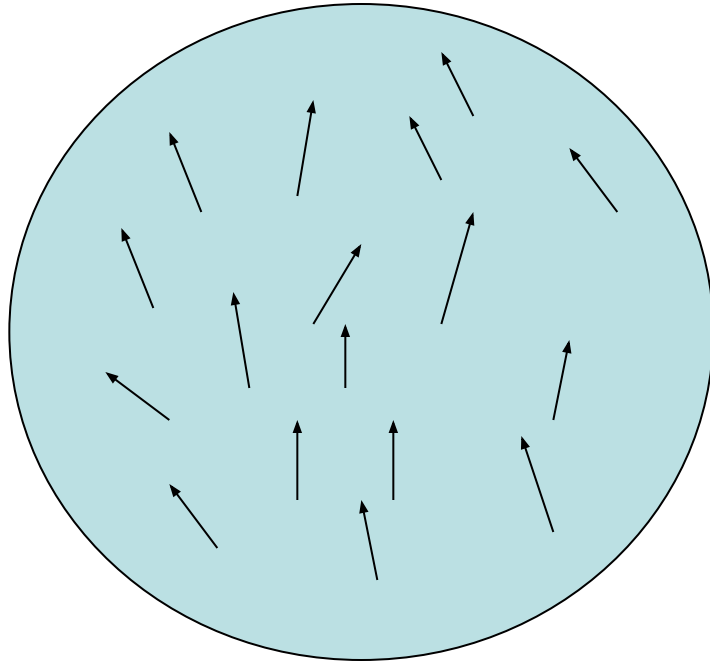
Закон Кюри:

$$P_N = \frac{B}{3k_B \Theta_N} \hbar \langle \gamma_N (I + 1) \rangle$$



Faraday rotation

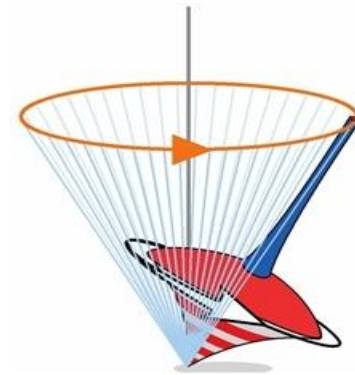
Магнитное поле ядер, действующее на электронные спины (поле Оверхаузера)



$$\hat{H}_{hf} = \sum_n a_n (\vec{s} \cdot \vec{I}_n)$$

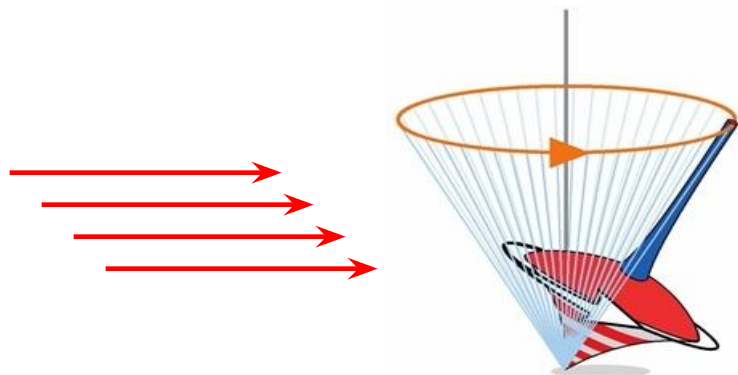
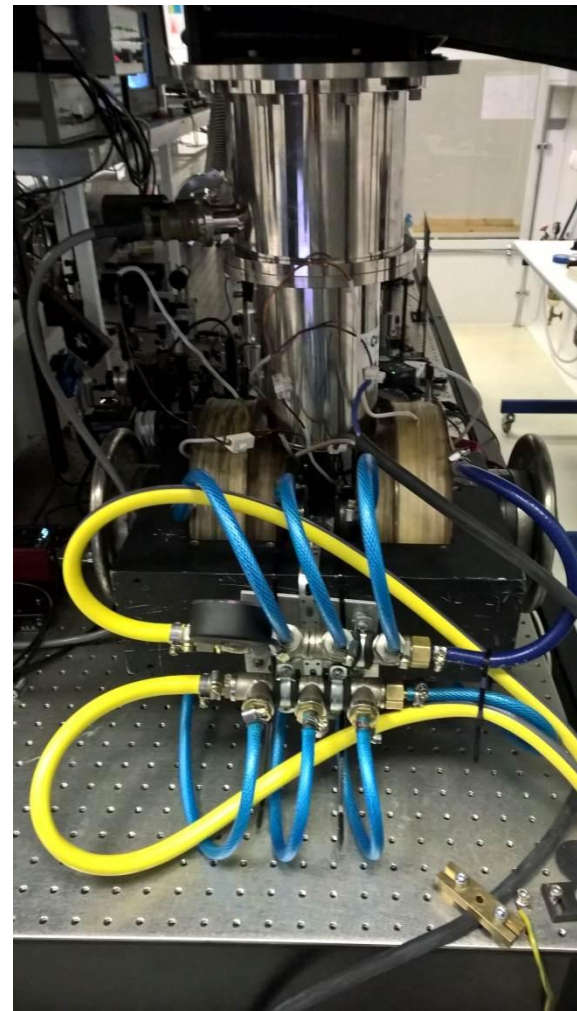
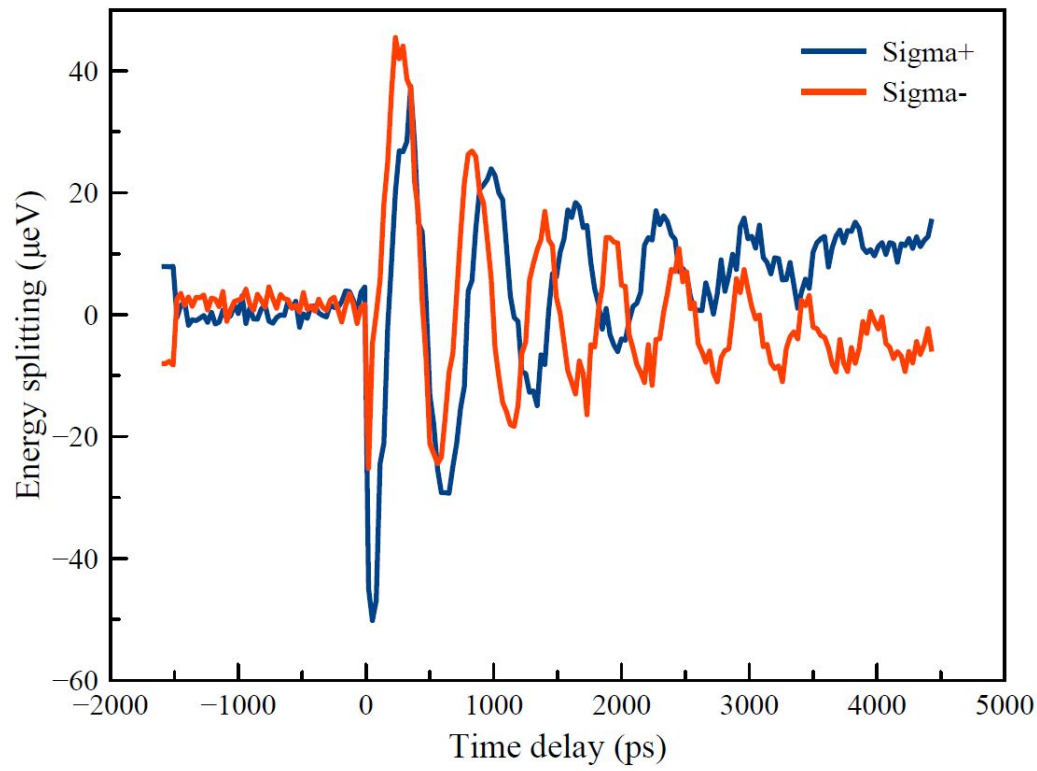


$$\vec{B}_N = \frac{A}{\mu_B g_e} \langle \vec{I} \rangle$$

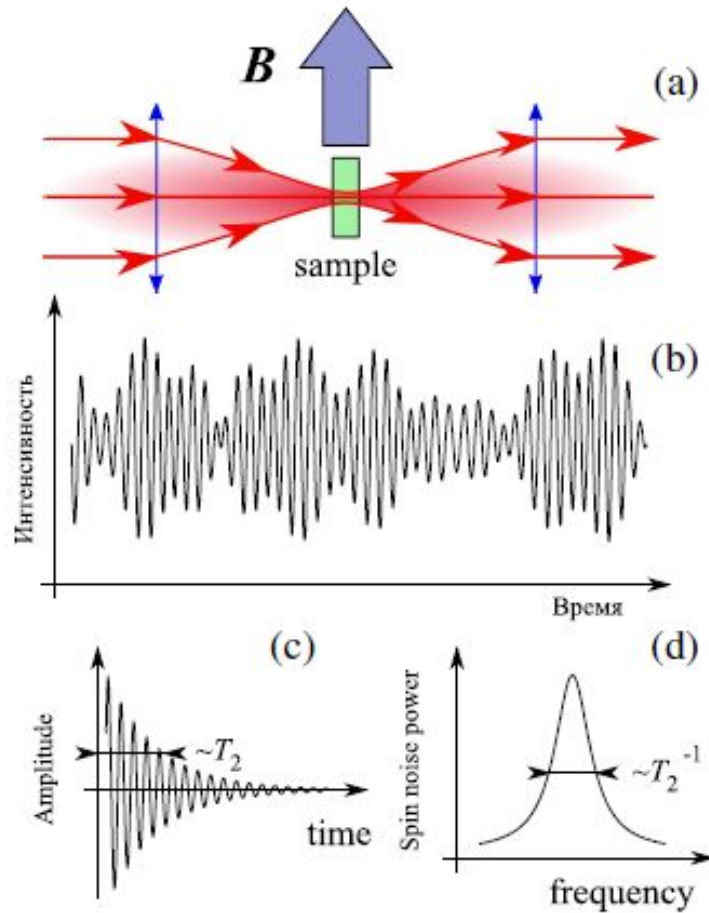


Ларморова прецессия
электронных спинов

$$f_L = \gamma_e (B + B_N)$$

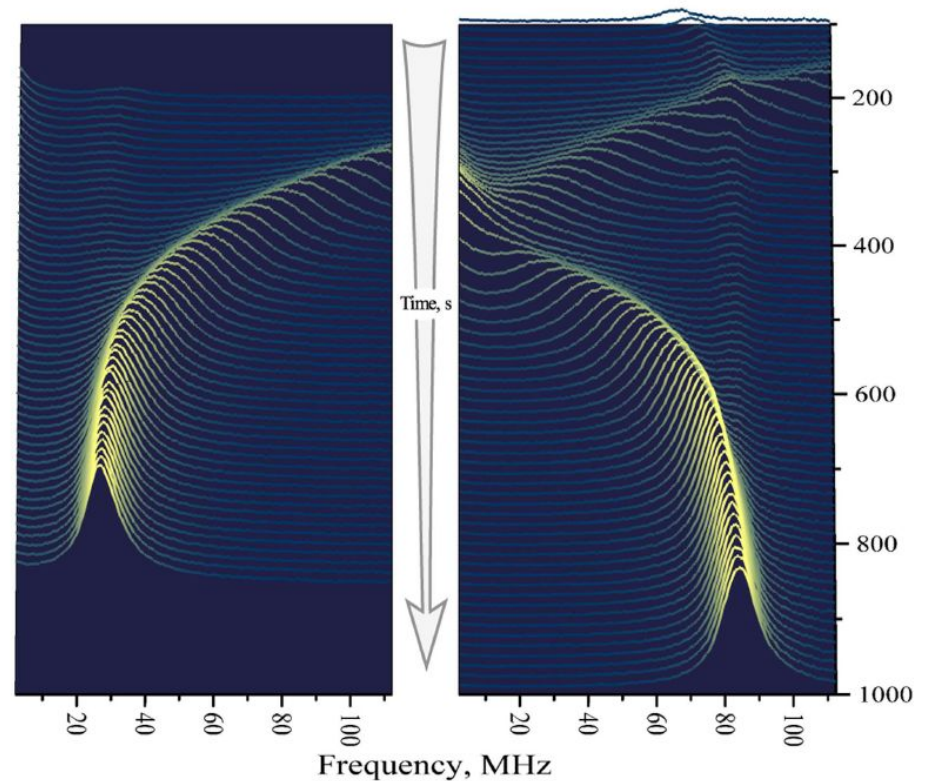


Спектроскопия спиновых шумов



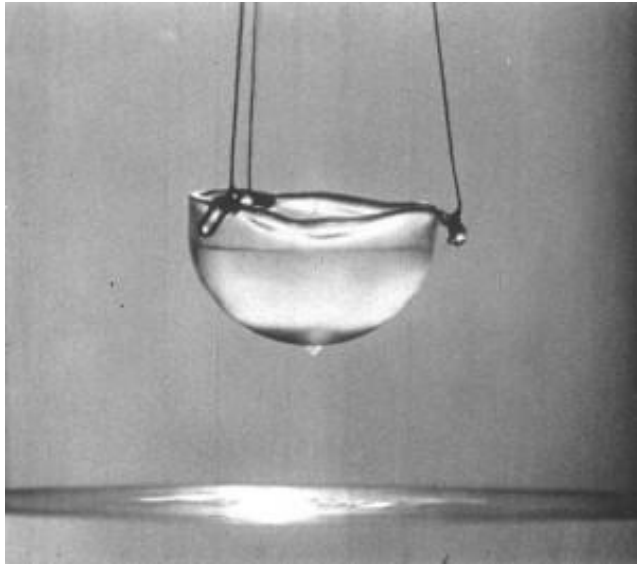
I.I. Ryzhov, S.V. Poltavtsev, K.V. Kavokin, M.M. Glazov, G.G. Kozlov, M. Vladimirova, D. Scalbert, S. Cronenberger, A.V. Kavokin, A. Lemaître, J. Bloch, V.S. Zapasski, "Measurements of nuclear spin dynamics by spin-noise spectroscopy" *Applied Phys. Lett.* 106, 242405 (2015).

I. I. Ryzhov, G.G. Kozlov, D. S. Smirnov, M. M. Glazov, Y. P. Efimov, S. A. Eliseev, V. A. Lovtcius, V. V. Petrov, K. V. Kavokin, A.V. Kavokin, and V.S. Zapasski, "Spin noise explores local magnetic fields in a semiconductor", *Sci. Rep.* 6, 21062 (2016)



Температура реликтового излучения

$2,72548 \pm 0,00057$ K

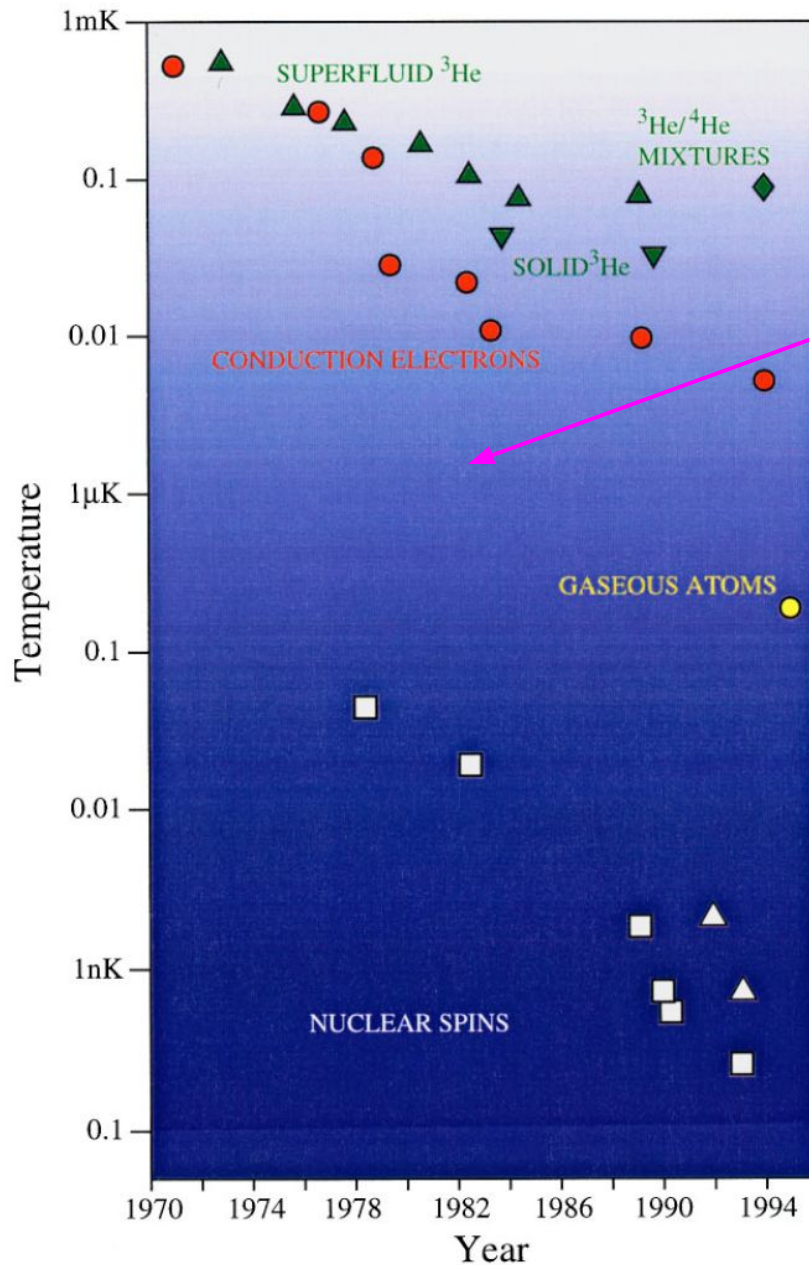


Сверхтекучий жидкий гелий
~ 2 К



Кристалл GaAs в криостате
замкнутого цикла ~ 5К

Ядерную спиновую систему в этом кристалле можно охладить до + 2мкК или - 2мкК

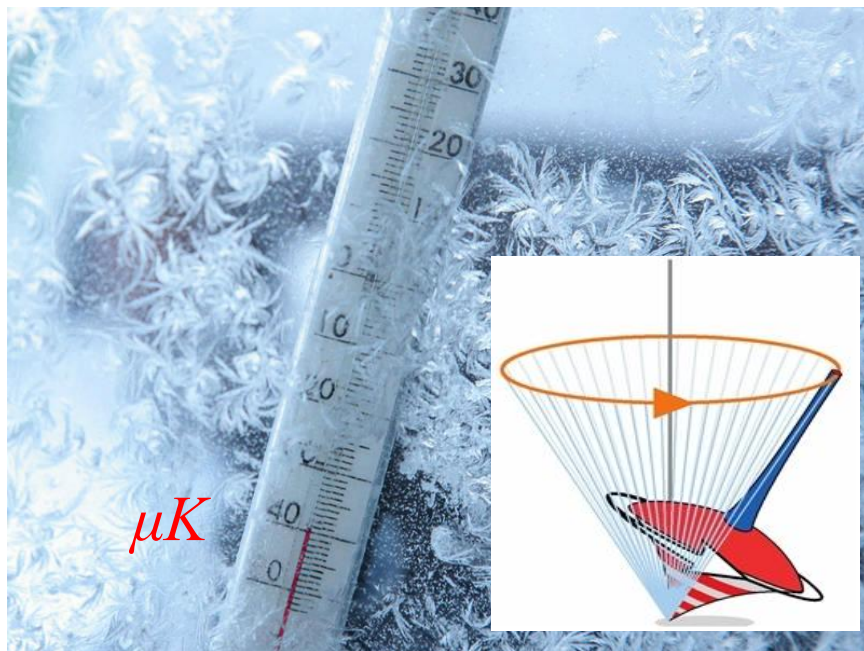


Ядерные спины в
полупроводниках

FIG. 132. Low-temperature records: green triangles, superfluid ^3He ; green inverted triangles, solid ^3He ; green diamond, $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture; red spheres, conduction electrons in copper; yellow sphere, Bose-Einstein condensation in gaseous Rb; white squares, nuclear spins in Cu, Ag, or Rh; white triangles, negative nuclear-spin temperatures in Ag or Rh. For references, see Sec. XVI.C.

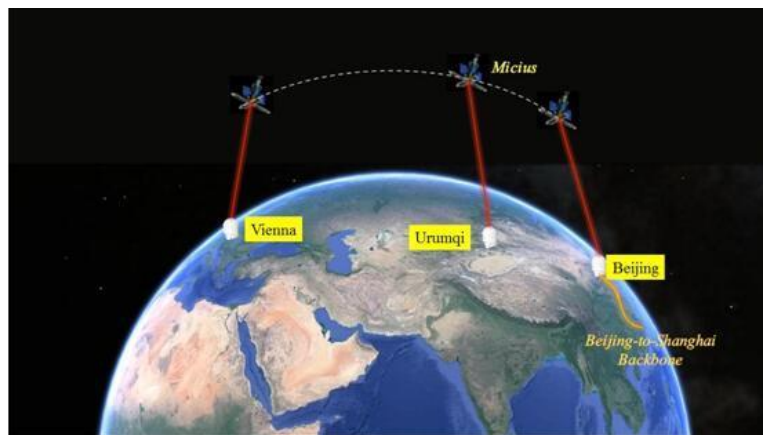
...а зачем?

...а зачем?



консервация спиновой когерентности

для задач квантовой коммуникации?

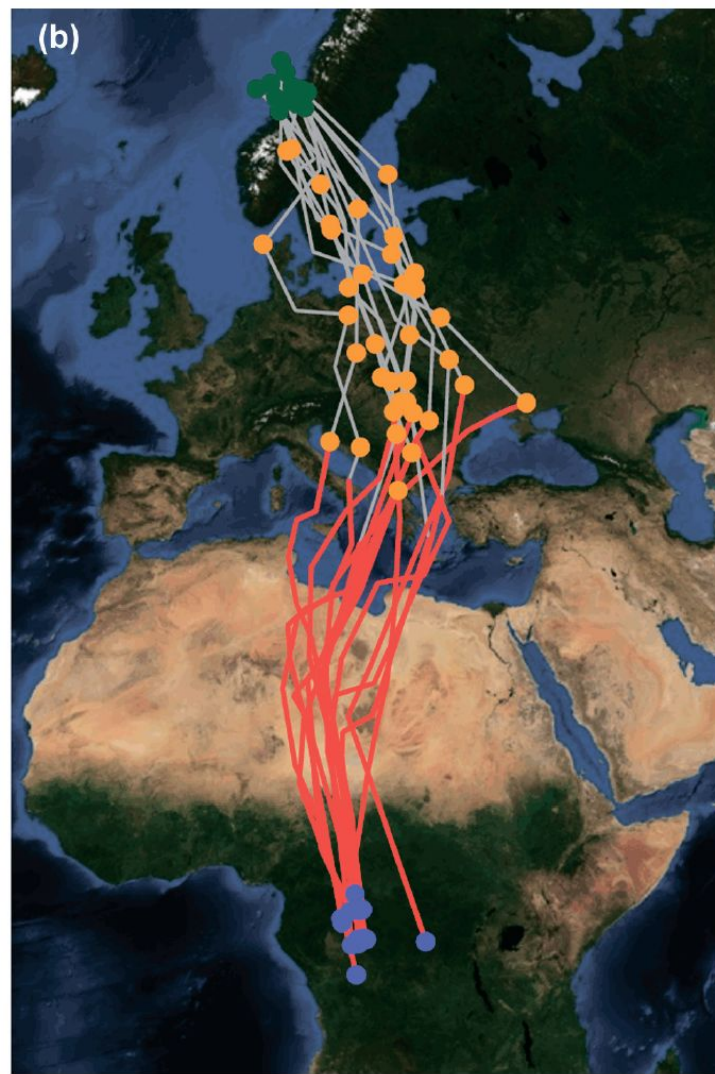
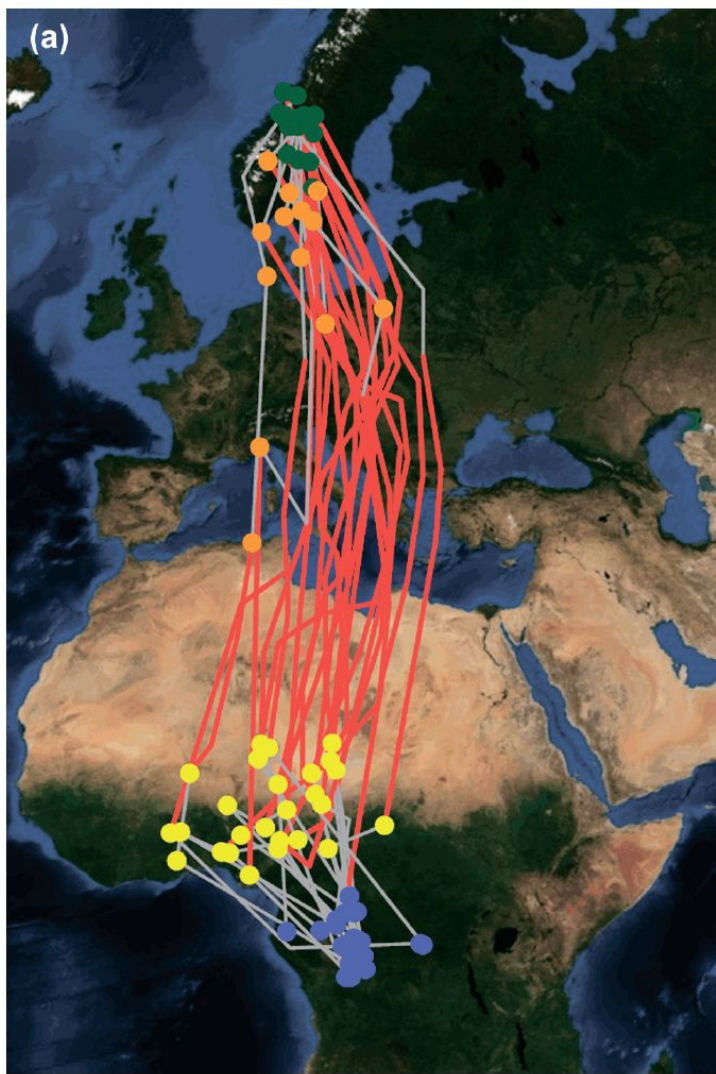




Как кто летит?



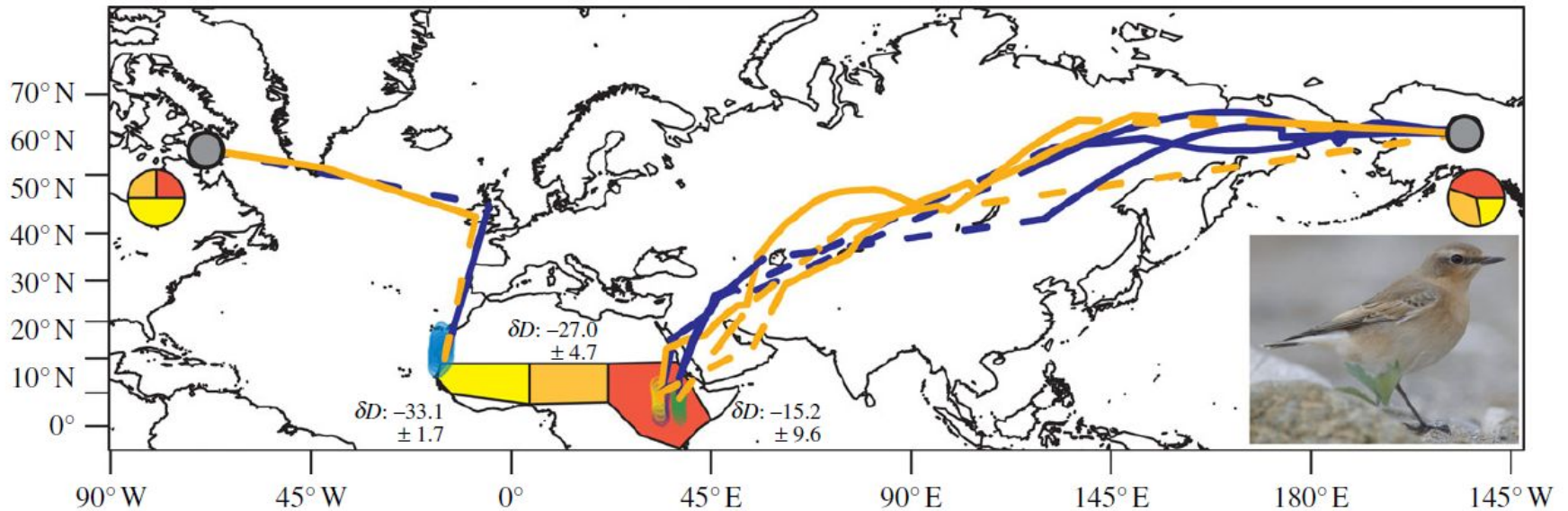




Осенняя и весенняя миграция дупеля (*Gallinago media*)

Åke Lindström, Thomas Alerstam, Peter Bahrenberg, Robert Ekblom, James W. Fox,
Johan Råghall and Raymond H. G. Klaassen

Journal of Avian Biology 46: 001–014, 2015



Маршруты миграции каменки (*Oenanthe Oenanthe*)

Franz Bairlein¹, D. Ryan Norris², Rolf Nagel¹,
 Marc Bulte¹, Christian C. Voigt³, James W. Fox⁴,
 David J. T. Hussell⁵ and Heiko Schmaljohann^{1,*}

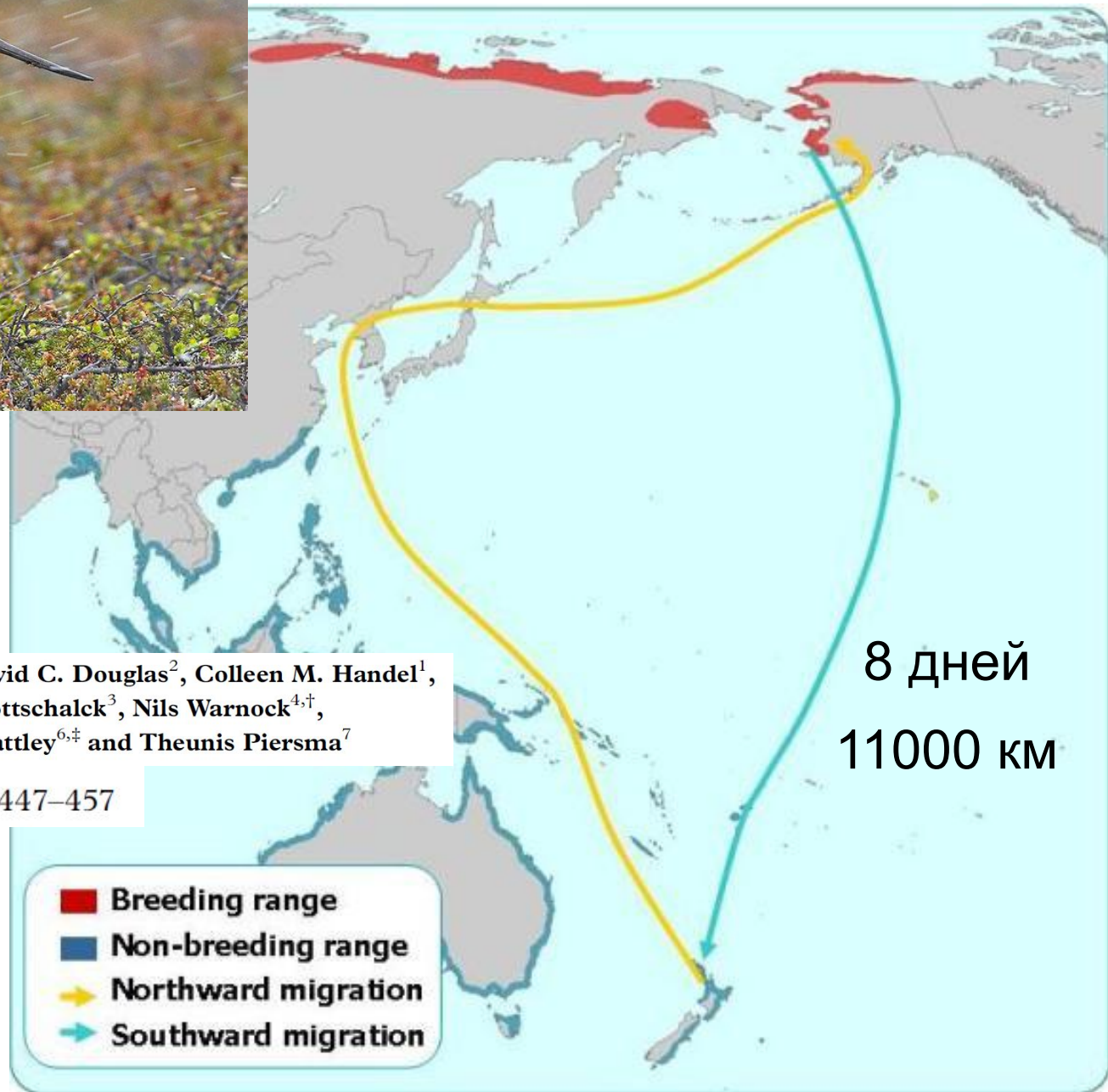
Biol. Lett. (2012) 8, 505–507



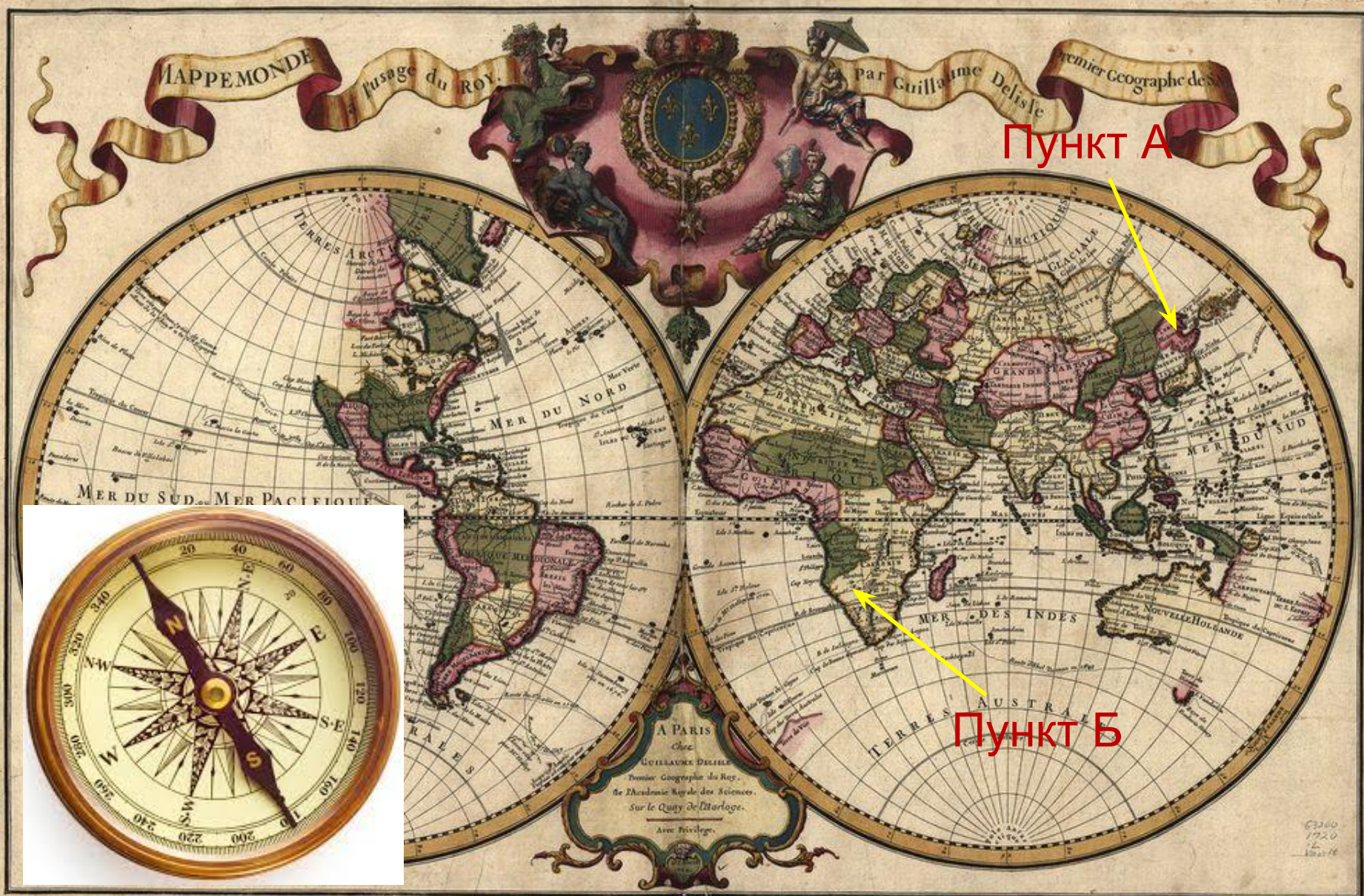
Малый веретенник (*Limosa lapponica*)

Robert E. Gill Jr^{1,*}, T. Lee Tibbitts¹, David C. Douglas², Colleen M. Handel¹,
Daniel M. Mulcahy¹, Jon C. Gottschalck³, Nils Warnock^{4,†},
Brian J. McCaffery⁵, Philip F. Battley^{6,‡} and Theunis Piersma⁷

Proc. R. Soc. B (2009) 276, 447–457



Навигация: карта и компас

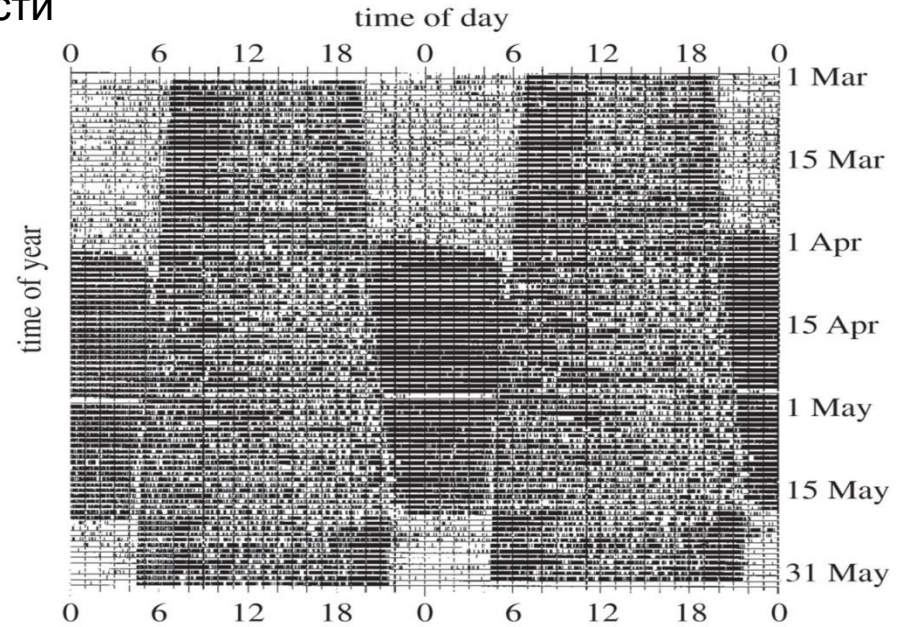


Миграционное состояние птиц

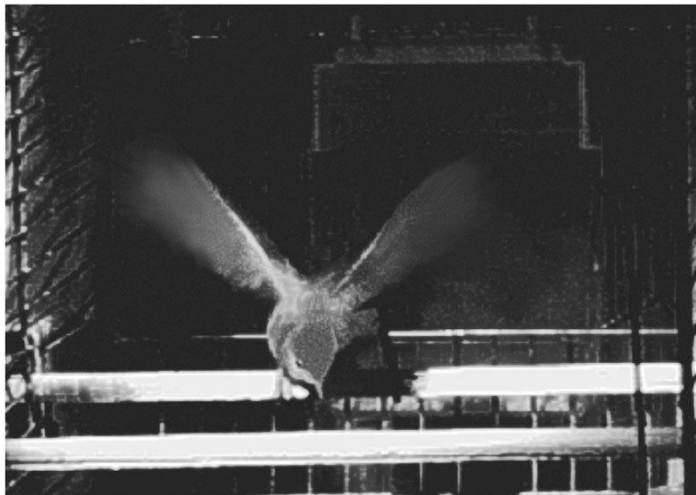
Миграционное увеличение веса тела



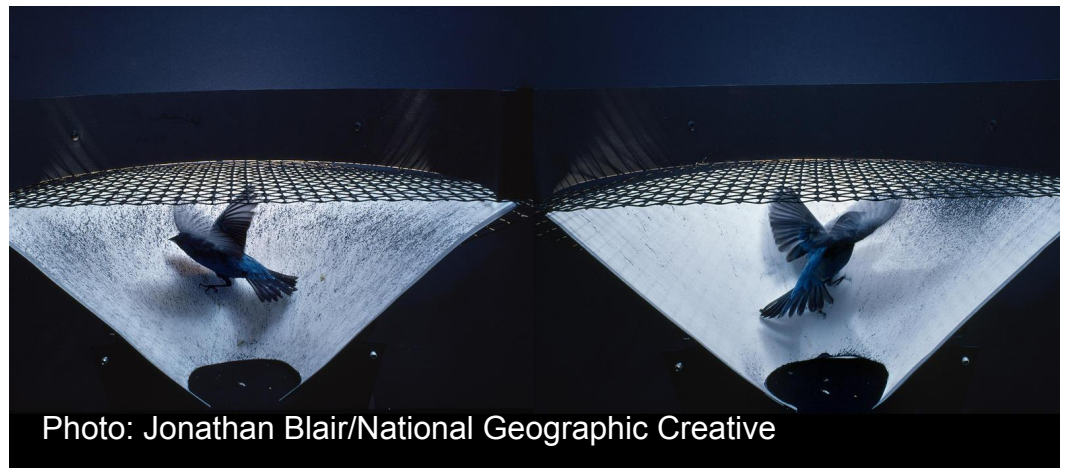
Формирование миграционного ритма суточной активности



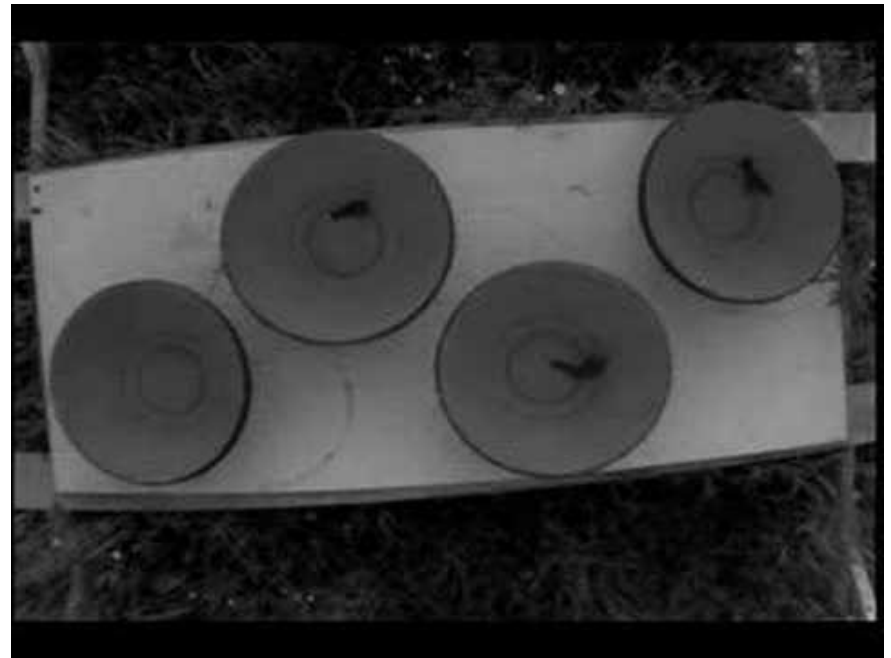
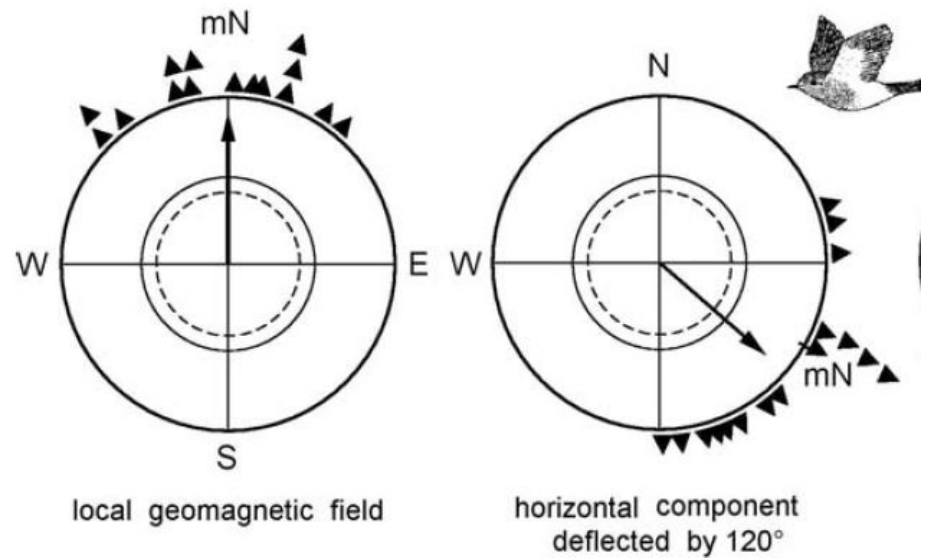
Миграционное беспокойство



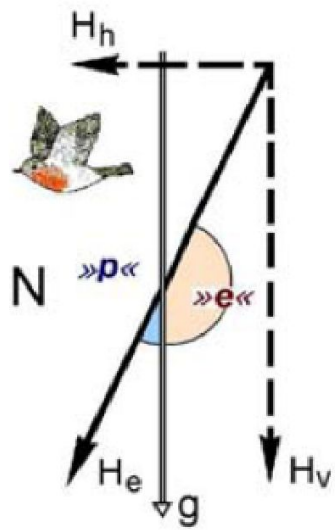
Развитие миграционной ориентации



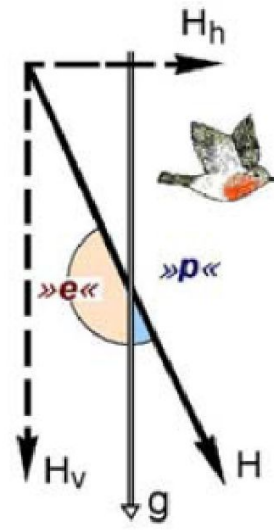
Wolfgang Wiltschko



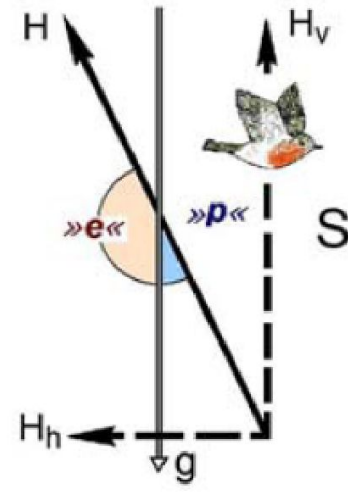
Wiltschko W, Wiltschko R. 1972. Magnetic compass of European robins. *Science* 176:62–64



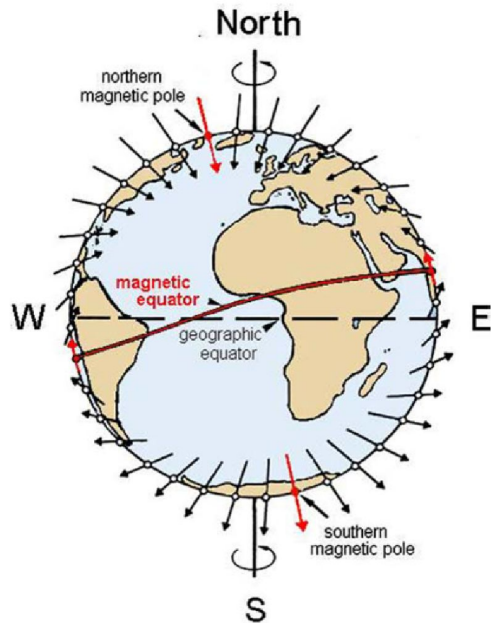
local geomagnetic field



horizontal component reversed



vertical component inverted



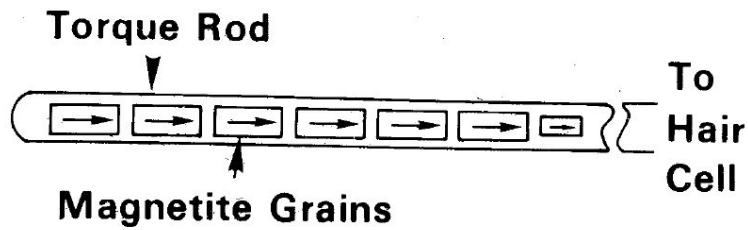
- И что же, по вашему мнению, является самым важным открытием за эти тринадцать лет?
- Сам факт Посещения.

А. И Б. Стругацкие, «Пикник на обочине»

Магниторецептор, использующий постоянные магниты

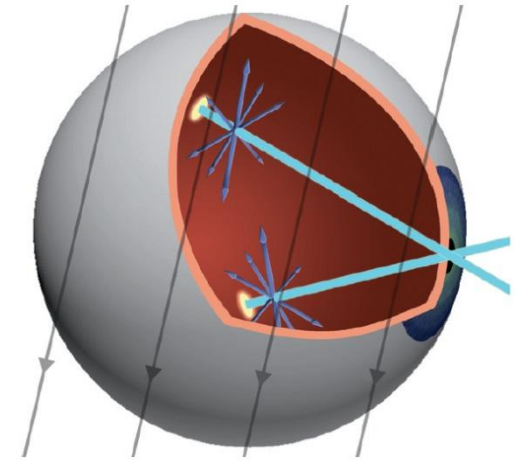
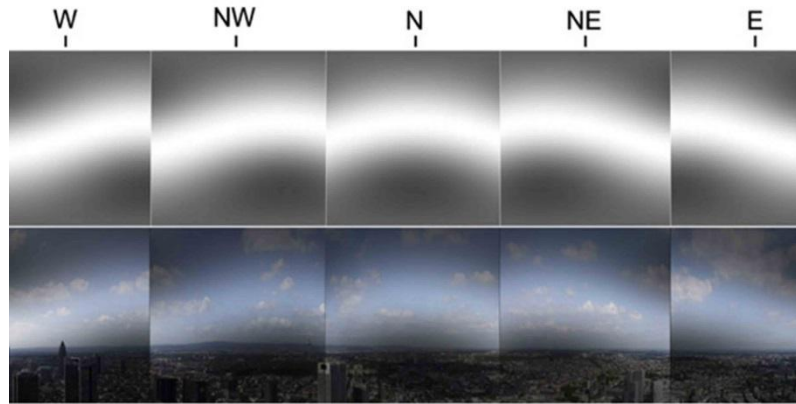


Joe Kirshvink

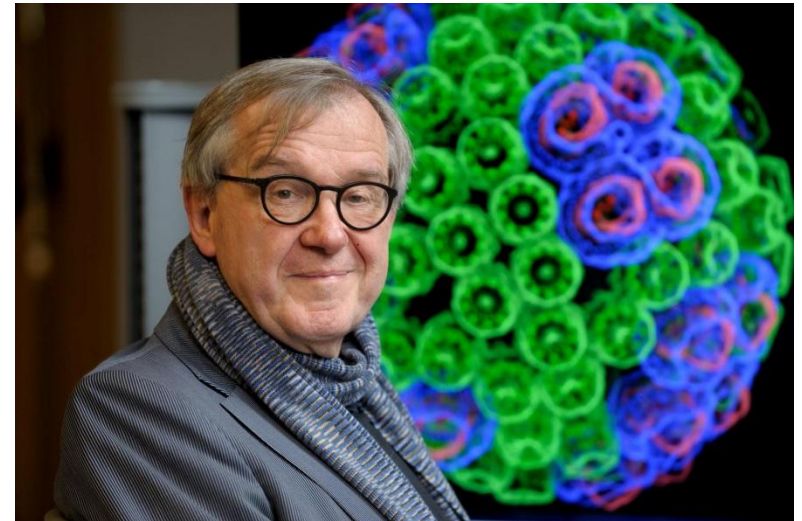
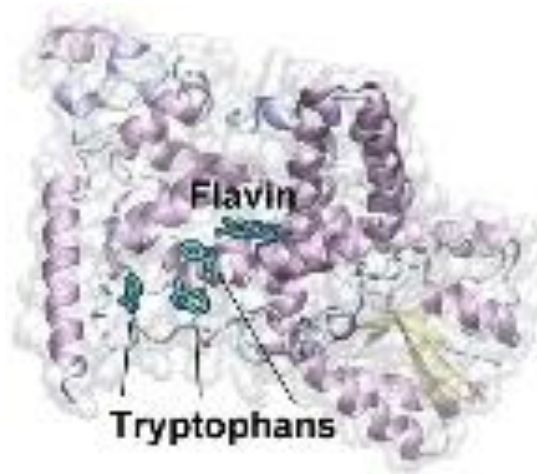


Kirschvink, Gould 1981

Зрительный компас: бирадикальные реакции в криптохроме



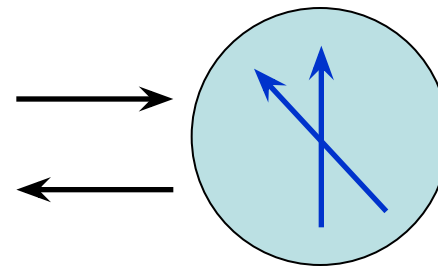
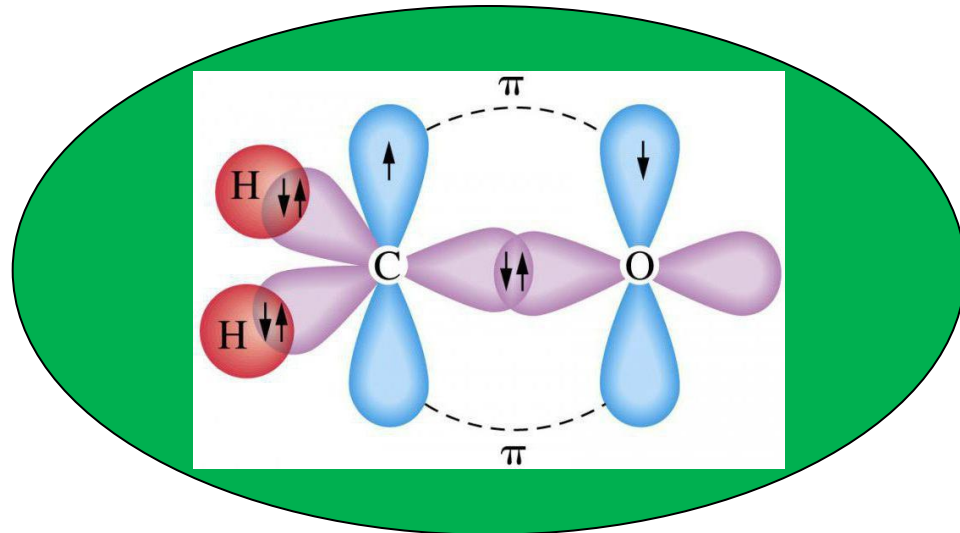
Thorsten Ritz



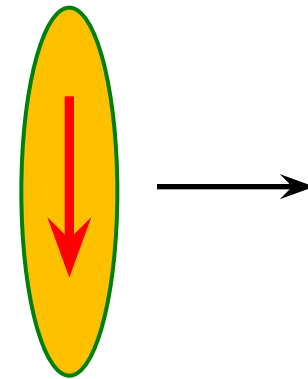
Klaus Schulten

Schulten K, Swenberg CE and Weller A.
A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field
modulated coherent electron spin motion. *Z. Phys. Chem. (NF)*. 1978.

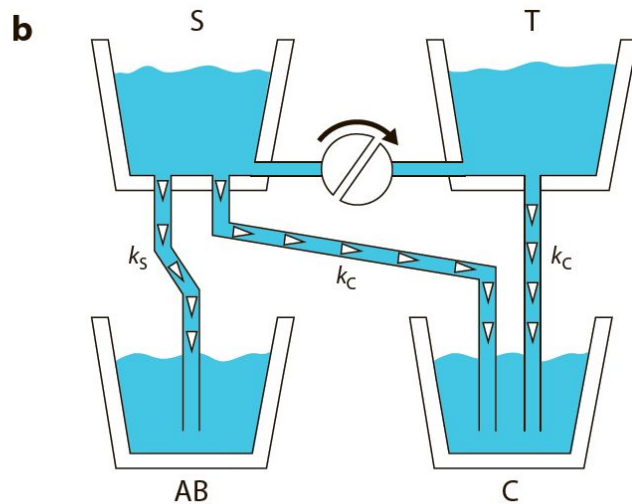
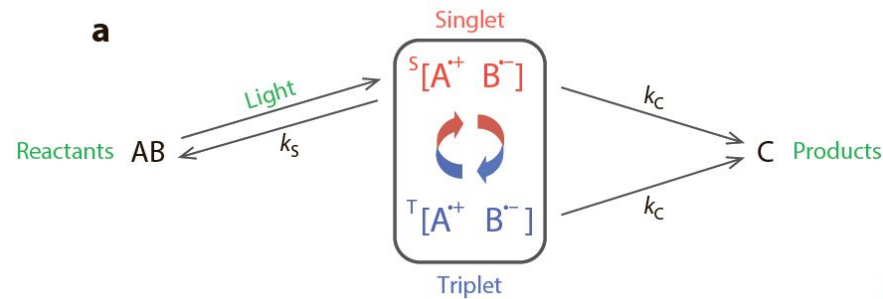
Ritz T., Adem S., Schulten K. 2000. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds // *Biophys. J.* V. 78. № 2. P. 707–718.

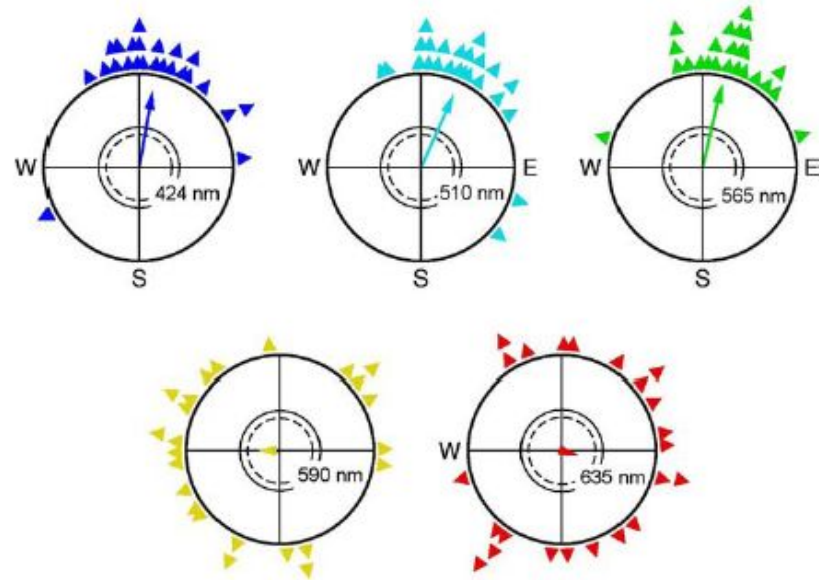


Свободно
вращается



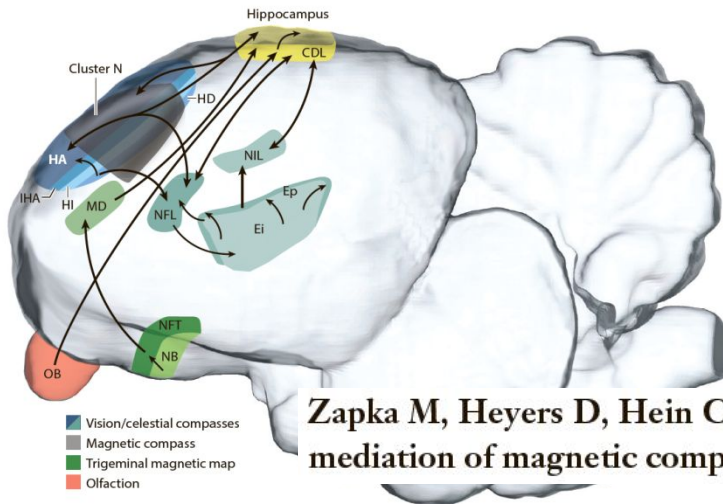
Привязан к оси
молекулы





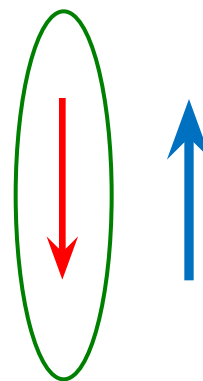
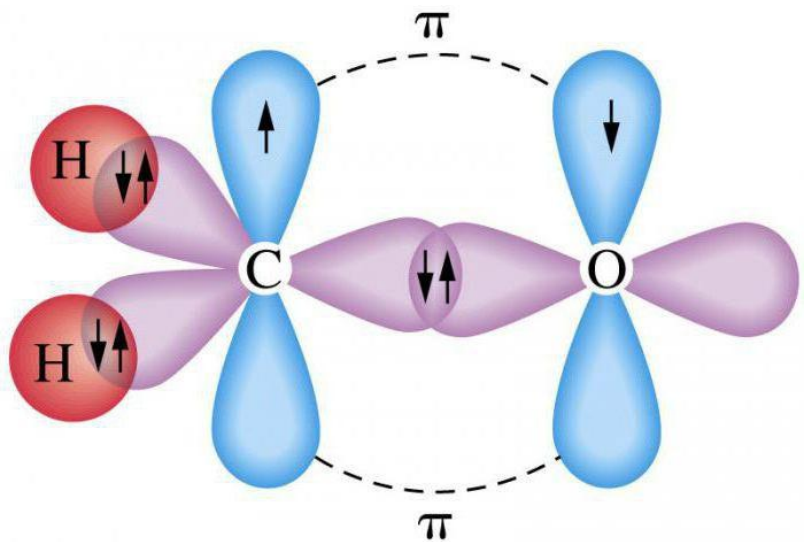
W. and R. Wiltschko

Для ориентации необходима коротковолновая подсветка



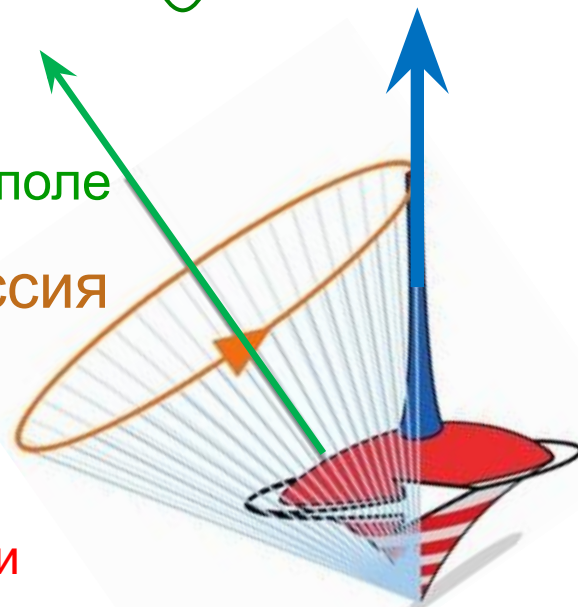
Сигналы магнитного компаса обрабатываются в «кластере N» зрительной коры

Zapka M, Heyers D, Hein CM, Engels S, Schneider N-L, et al. 2009. Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird. *Nature* 461:1274–77



Магнитное поле

прецессия



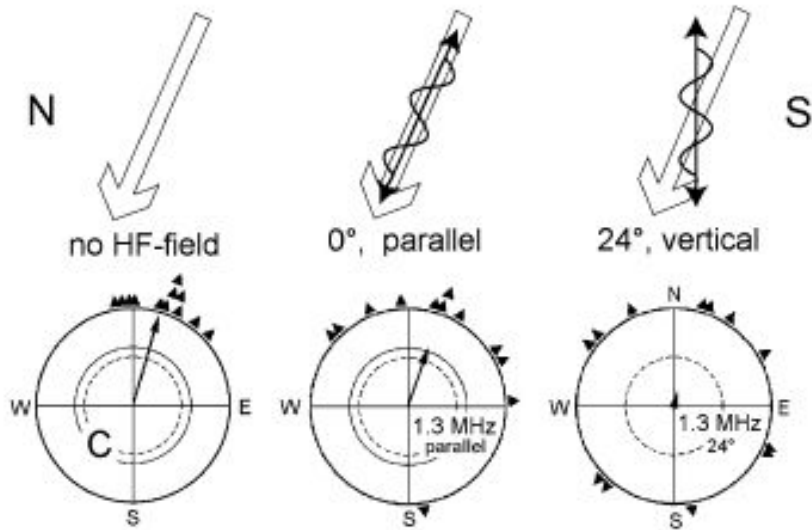
Период прецессии спина электрона
в геомагнитном поле - 0.6 мкс

Внутренний магнитный шум, созданный магнитными
моментами ядер в молекуле криптохрома, приводит к потере ориентации
электронного спина за 1 микросекунду.

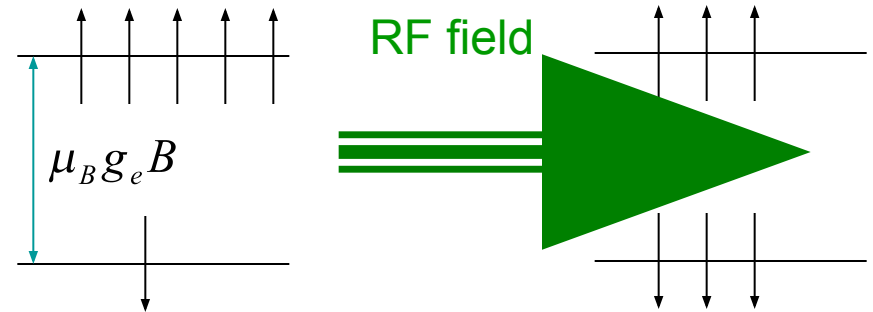
(Kattnig DR, Solov'yov I, Hore PJ. *Electron spin relaxation in cryptochrome-based magnetoreception. Phys.Chem.Chem.Phys.* 2016. **18**: 12443-12456)

Эксперименты с осциллирующими магнитными полями

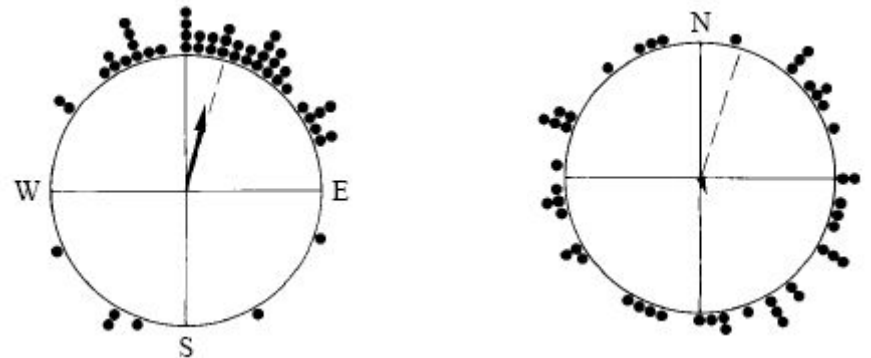
Ritz et al, 2004; Thalau et al, 2005



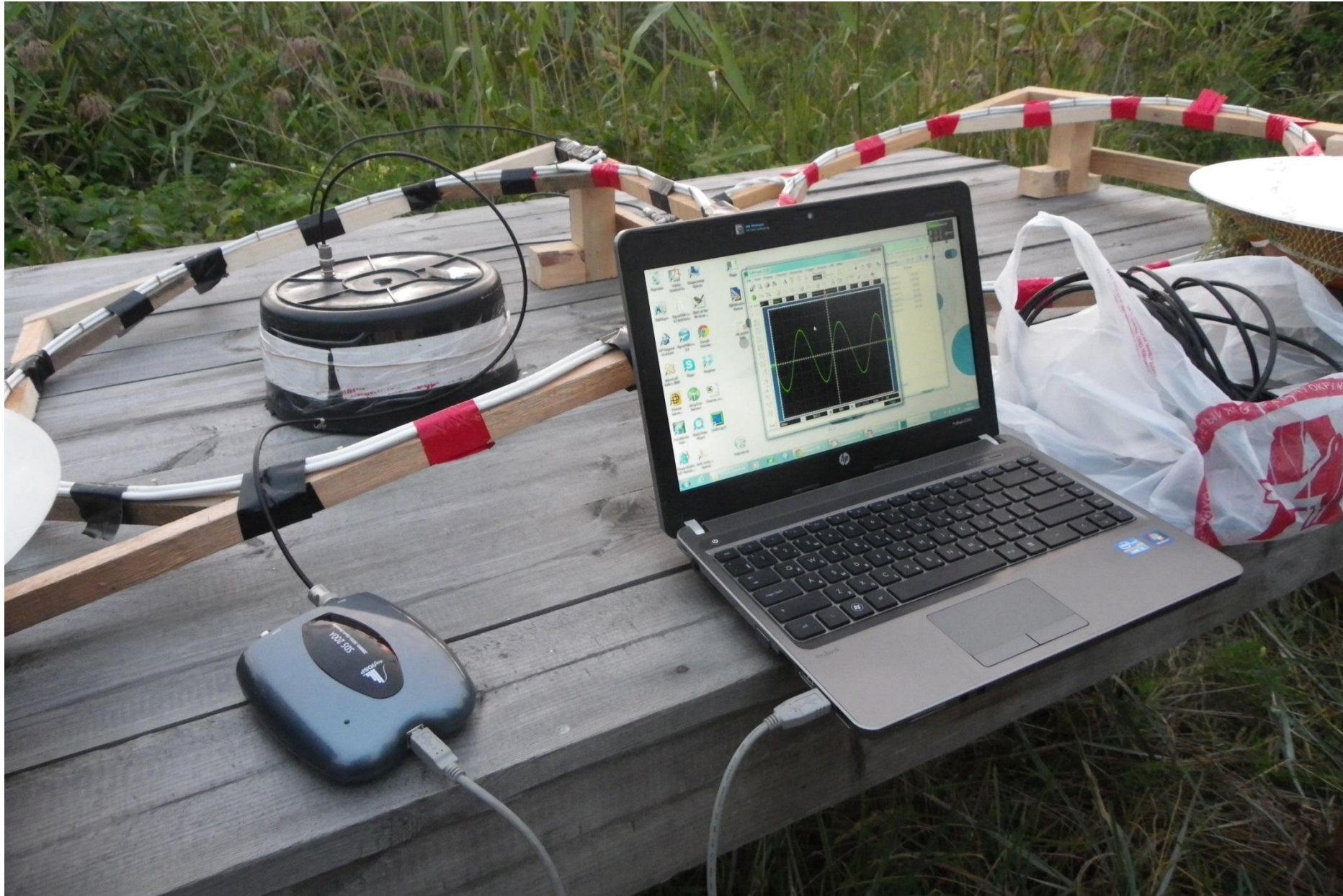
Поведенческая спектроскопия магнитного резонанса

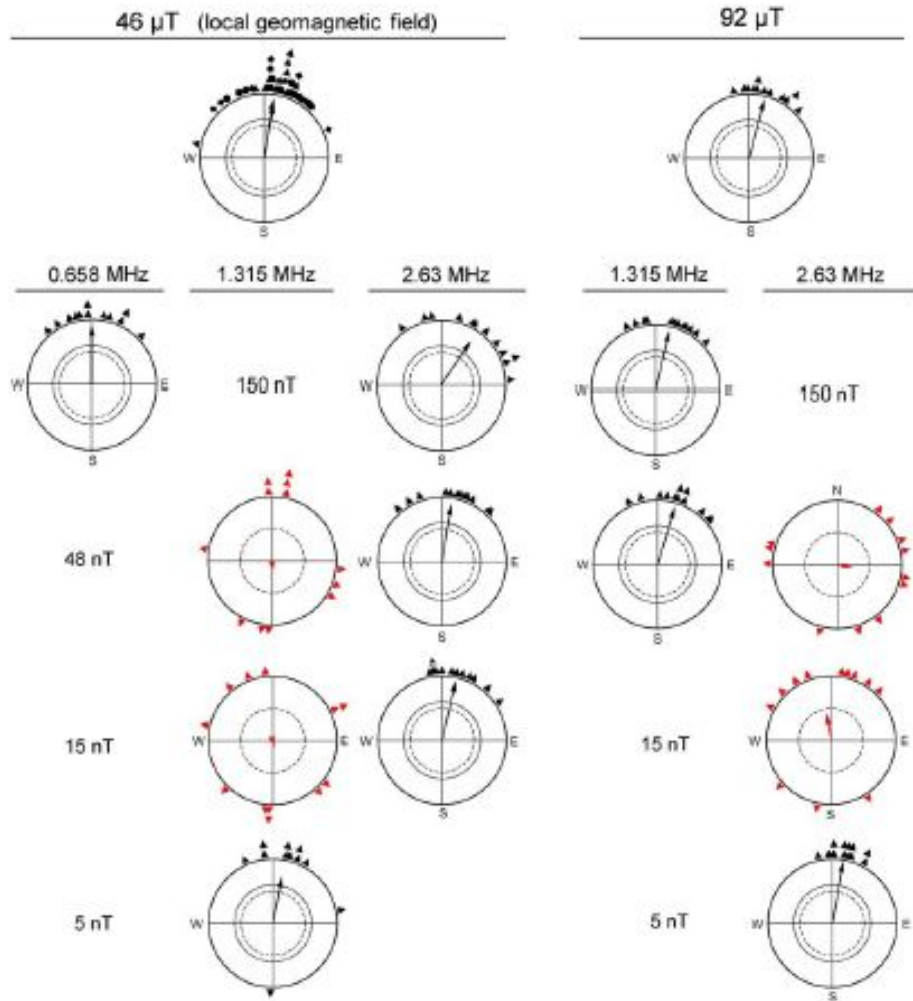


Радиочастотные магнитные поля действительно нарушают работу магнитного компаса птиц!



Kavokin KV. The puzzle of magnetic resonance effect on the magnetic compass of migratory birds. *Bioelectromagnetics*. 2009. 30: 402–410



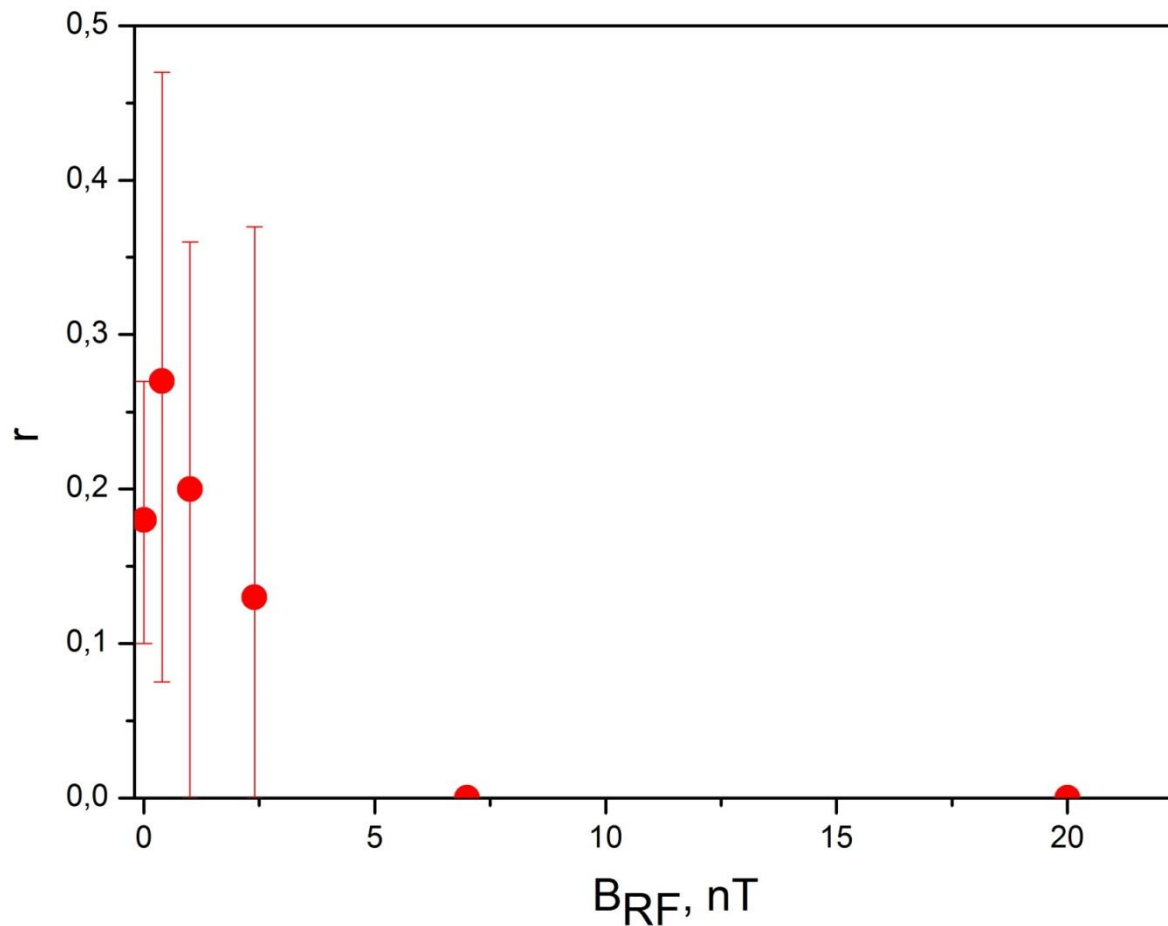


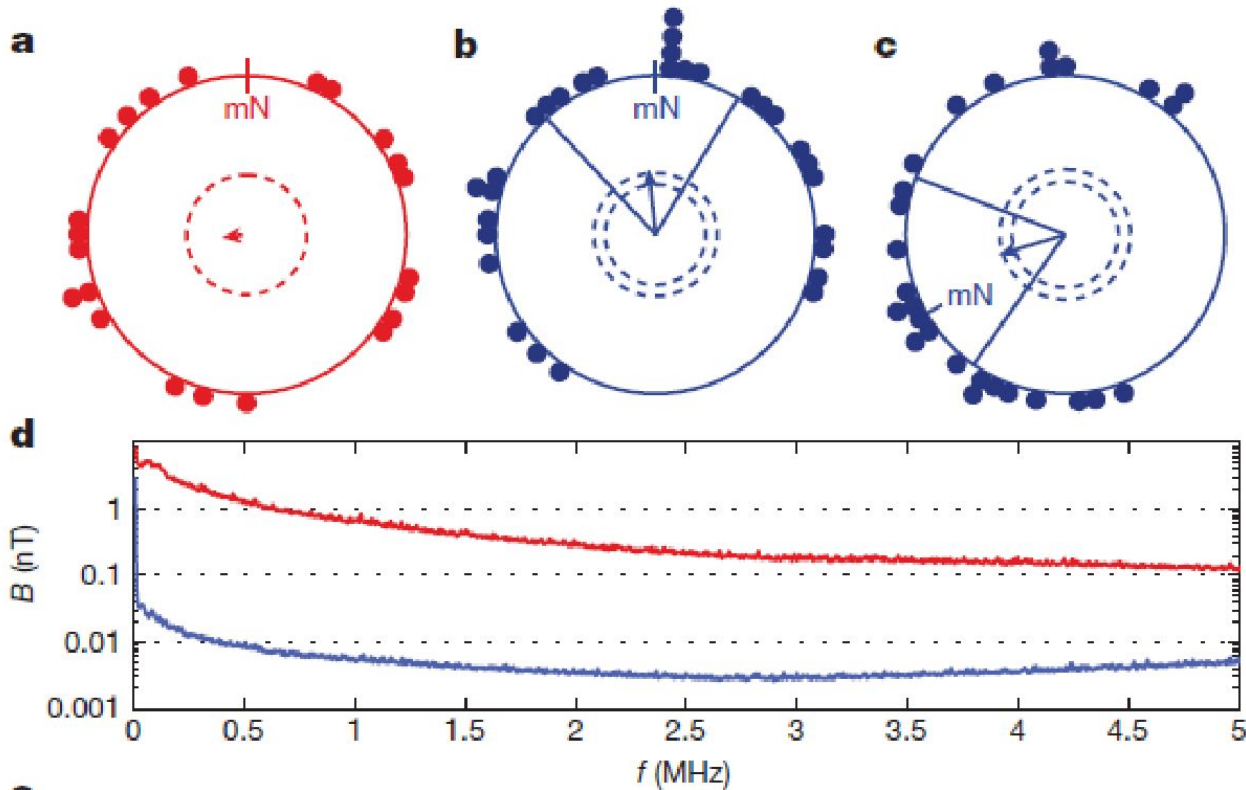
Ritz, T., Wiltschko, R., Hore, P. J., Rodgers, C. T., Stapput, K., Thalau, P., Timmel, C. R., and Wiltschko, W.,
 Magnetic compass of birds is based on a molecule with optimal directional sensitivity,
Biophys. J. (2009)

Биологическая станция «Рыбачий» ЗИН РАН, Куршская коса



A Pakhomov, J Bojarinova, R Cherbunin, R Chetverikova, PS Grigoryev, K Kavokin, D Kobylkov, R Lubkovskaja, N Chernetsov,
“Very weak oscillating magnetic field disrupts the magnetic compass of songbird migrants”
Journal of The Royal Society Interface 14 (133), 20170364





Engels S, Schneider N-L, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, et al. 2014. Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature* 509:353–56

Disruption of Magnetic Compass Orientation in Migratory Birds by Radiofrequency Electromagnetic Fields

Hamish G. Hiscock,¹ Henrik Mouritsen,^{2,3} David E. Manolopoulos,¹ and P. J. Hore^{1,*}

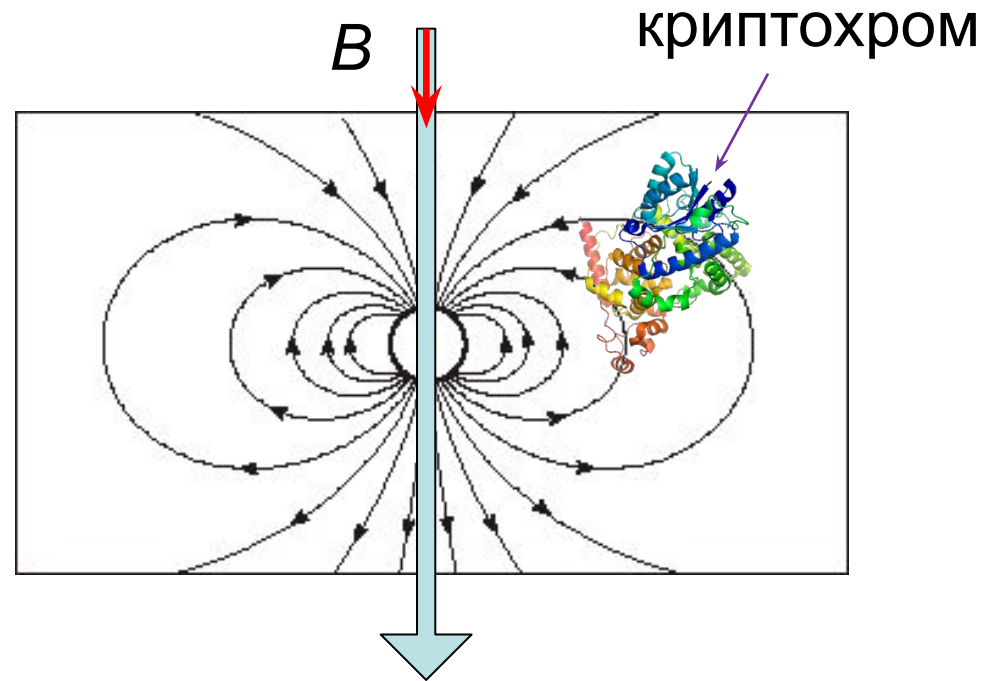
¹Department of Chemistry, University of Oxford, Physical and Theoretical Chemistry Laboratory, Oxford, United Kingdom; ²Institut für Biologie und Umweltwissenschaften and ³Research Centre for Neurosensory Sciences, Carl von Ossietzky University of Oldenburg, Oldenburg, Germany

ABSTRACT The radical-pair mechanism has been put forward as the basis of the magnetic compass sense of migratory birds. Some of the strongest supporting evidence has come from behavioral experiments in which birds exposed to weak time-dependent magnetic fields lose their ability to orient in the geomagnetic field. However, conflicting results and skepticism about the requirement for abnormally long quantum coherence lifetimes have cast a shroud of uncertainty over these potentially pivotal studies. Using a recently developed computational approach, we explore the effects of various radiofrequency magnetic fields on biologically plausible radicals within the theoretical framework of radical-pair magnetoreception. **We conclude that the current model of radical-pair magnetoreception is unable to explain the findings of the reported behavioral experiments.** Assuming that an unknown mechanism amplifies the predicted effects, we suggest experimental conditions that have the potential to distinguish convincingly between the two distinct families of radical pairs currently postulated as magnetic compass sensors. We end by making recommendations for experimental protocols that we hope will increase the chance that future experiments can be independently replicated.

Гибридный магниторецептор

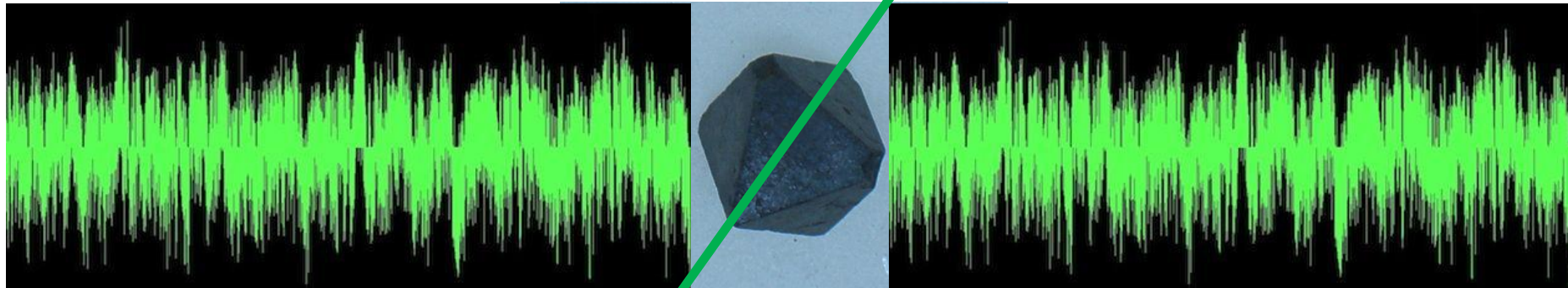
Binhi V., Do naturally occurring magnetic nanoparticles in the human body mediate increased risk of childhood leukaemia with EMF exposure? International Journal of Radiation Biology, . 2008.84: 569-579.

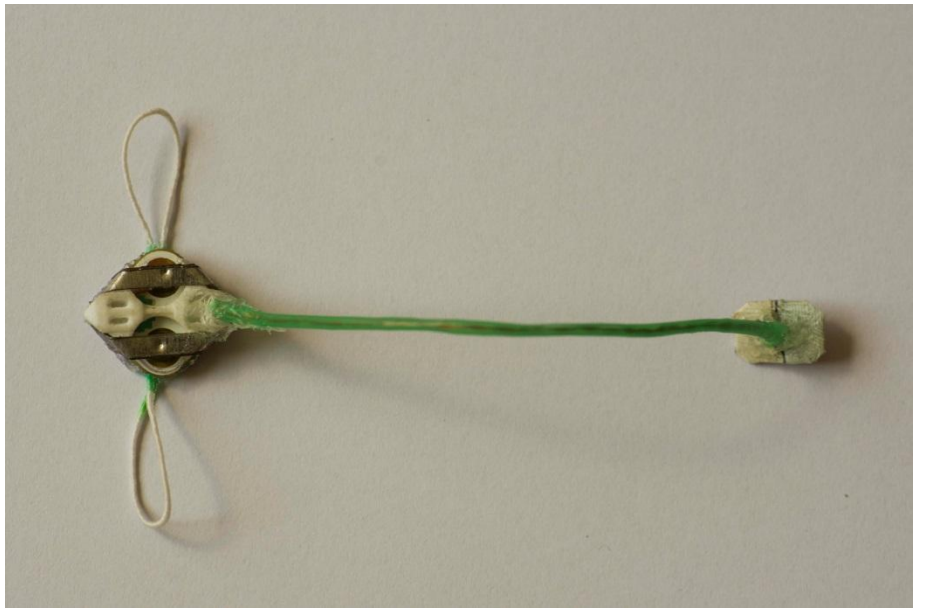
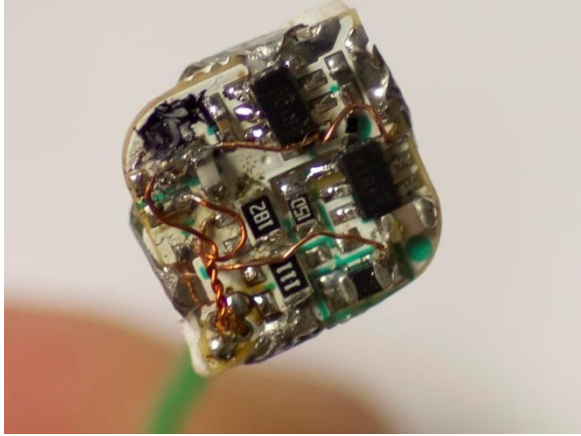
Cai J. Quantum probe and design for a chemical compass with magnetic nanostructures. Phys. Rev.Lett. 2011. **106**: 100501



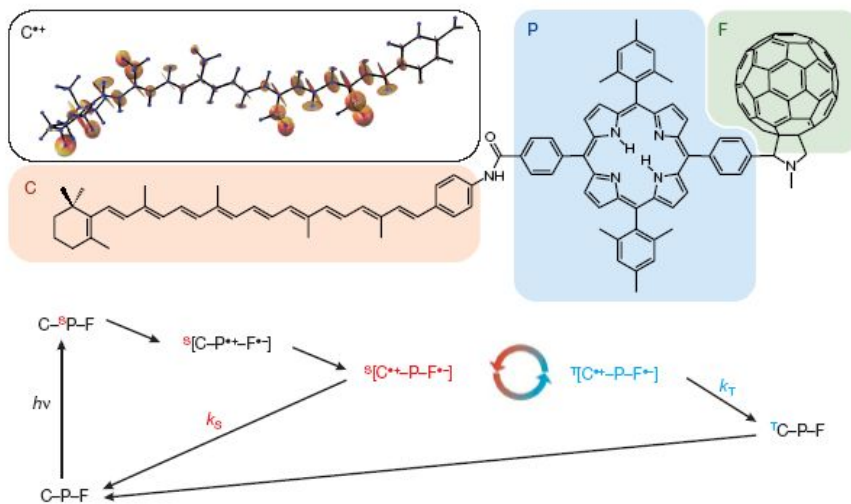
K.Kavokin, «Can a hybrid chemical-ferromagnetic model of the avian compass explain its outstanding sensitivity to magnetic noise?»

PloS One 12 (3), e0173887 (2017)





“Chemical compass”



K. Maeda, K. B. Henbest, F. Cintolesi, I. Kuprov, C. T. Rodgers, P. A. Liddell, D. Gust, C.R.Timmel, P. J. Hore,

Nature **453**, 387 (2008)



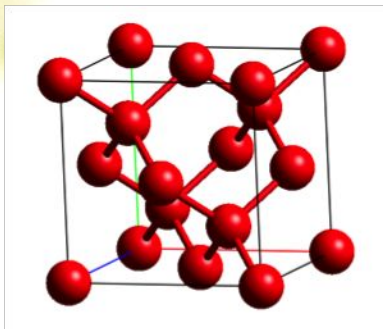
Corpus Christi College, Oxford



P.J.Hore

Что стоит запомнить:

Физика - это не только
Большой адронный
коллайдер



А биология –
не только ДНК!

Можно найти много
интересных задач...

...в том числе в Лаборатории оптики спина
(НИИФ комн. 411-420 М)