

Магнитооптические резонансы ЭИА в атомах щелочных металлов и их приложение к квантовой магнитометрии

Д.В. Бражников*, В.И. Вишняков, А.О. Макаров, А.Н. Гончаров

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Э. Алипиева, К. Андреева, Е. Таскова

Институт электроники, Болгарская академия наук, г. София, Болгария

В.М. Энтин, И.И. Рябцев

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поддержка:

- Российский фонд фундаментальных исследований (20-02-00075, 20-52-18004)
- Российский научный фонд (17-72-20089)



* x-kvant@mail.ru

Области применения

Биология: биомагнетизм растений, клеточные исследования

Космические исследования: сейсмология, магнитосфера ...

Медицинская диагностика: МКГ, МЭГ и многие другие

Поиск полезных ископаемых, в том числе немагнитных

Поиск частиц Тёмной Материи и ЭДМ частиц

Навигация

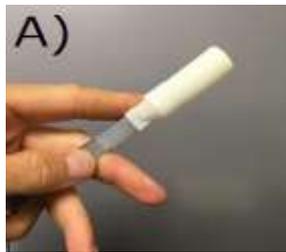
Преимущества атомных магнитометров в медицине и биологии

- Высокая чувствительность: $\delta B \sim 10 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}} - 10 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$
- «Комнатная» температура: не требуются криогенные температуры ($\approx -270^\circ\text{C}$), как в случае с **SQUID** сенсорами
- Малые размеры и энергопотребление: $P \sim 1 \text{ Вт}, V \sim 1 - 20 \text{ см}^3$
- Близкое расположение к образцу ($L \sim 5 - 10 \text{ мм}$) и подвижность
- Лучшее пространственное разрешение по сравнению с **ЭЭГ** и мониторинг всей области в реальном времени в отличие от **MPT** (при этом хорошо работает связка **MPT + AM**)
- Невысокая стоимость сенсора, простота его обслуживания (в сравнении с **SQUID** технологией)

Передовые образцы атомных магнитометров для медицины



[**QuSpin Inc.**] J. Osborne et al.,
SPIE Proc. **10548**, 105481G (2018)



[Mechanical Engineering & **Fieldline Inc.**]
V. Gerginov et al., SPIE Proc. **11296**,
112963C (2020)



Пример SQUID магнитометра

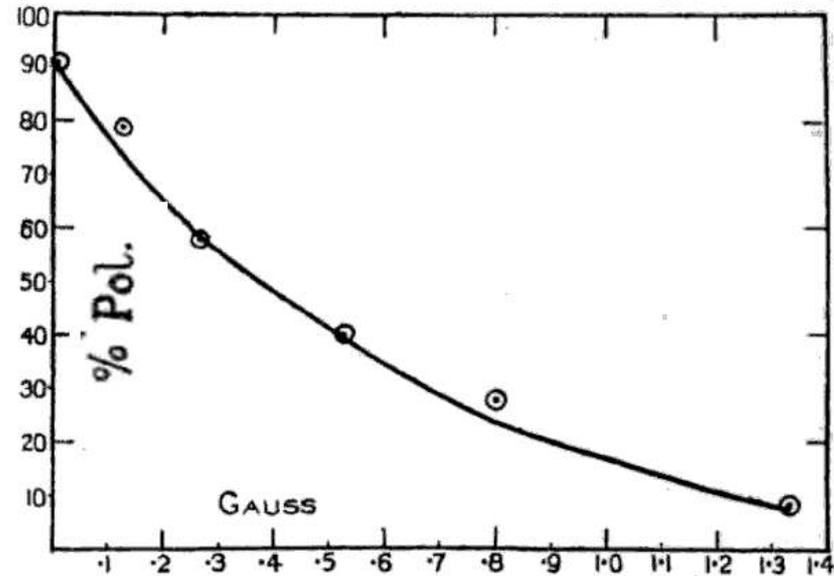
<https://www.universite-paris-saclay.fr/en>

Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Исследования поляризации резонансной флуоресценции атомов ртути в магнитном поле ~ 1 Гс (100 мкТл):



Роберт Вуд (1868-1955)



R. W. Wood and A. Ellet, *On the influence of magnetic fields on the polarisation of resonance radiation*, Proc. Roy. Soc. 103, 396 (1923)

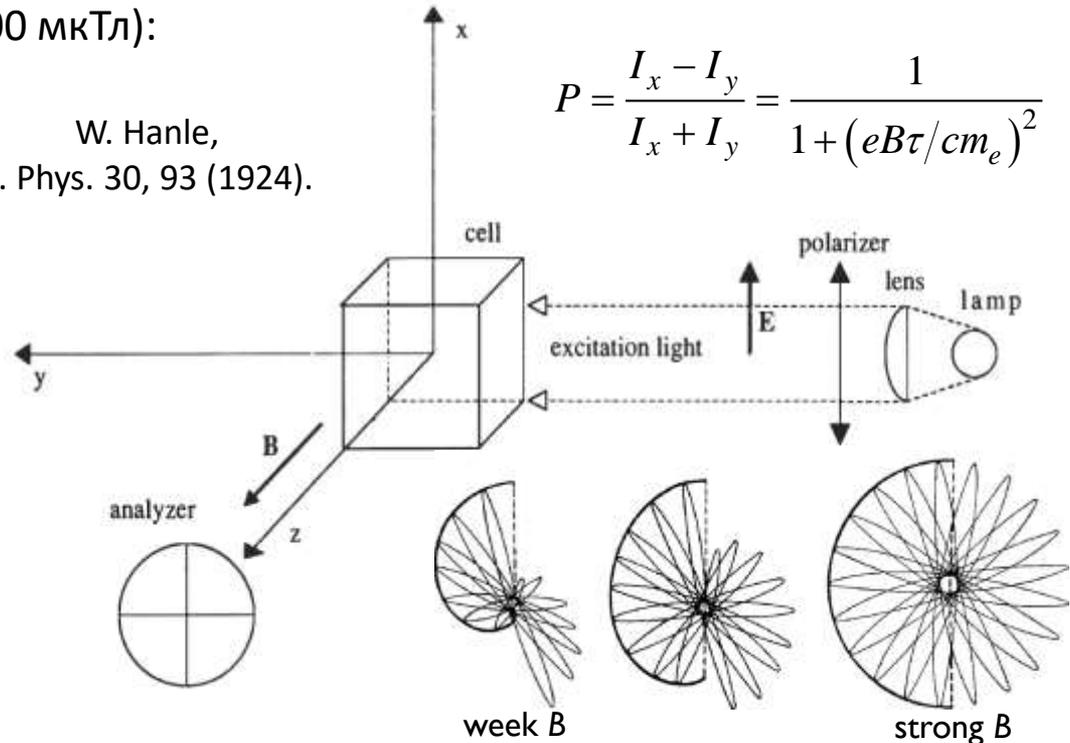
Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Исследования поляризации резонансной флуоресценции атомов ртути в магнитном поле ~ 1 Гс (100 мкТл):



Вильгельм Ханле (1901-1993)

W. Hanle,
Z. Phys. 30, 93 (1924).



Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Исследования поляризации резонансной флуоресценции атомов ртути в магнитном поле ~ 1 Гс (100 мкТл):



Григорий Брейт (1899-1981)

G. Breit, *Quantum theory of dispersion (continued).*
Parts VI and VII, Rev. Mod. Phys. 5, 91 (1933)

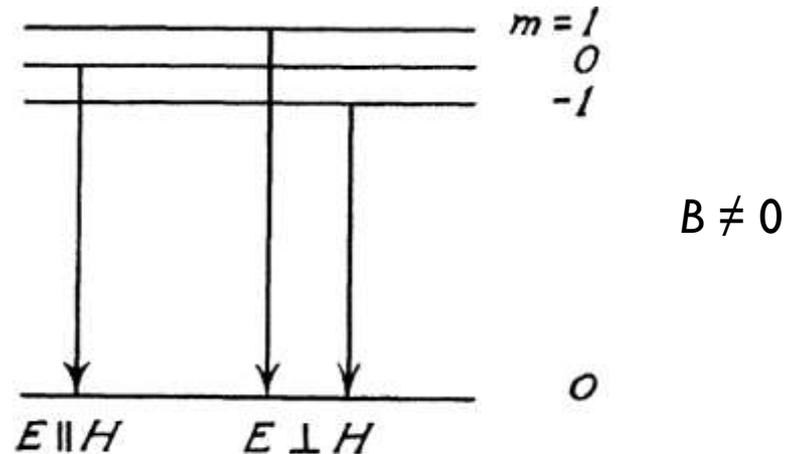
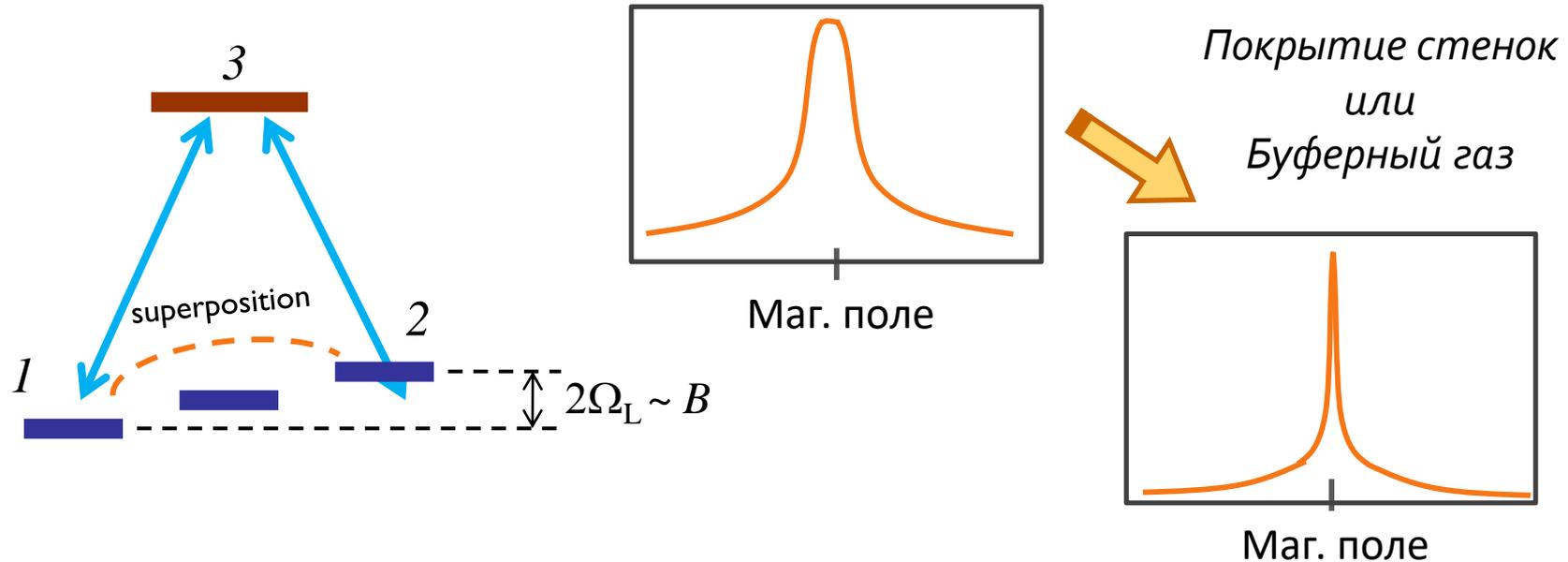


FIG. 3. Zeeman diagram for $\lambda 2537$ of mercury.

Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Эффект Ханле в основном состоянии атома:



E.B. Aleksandrov et al., Optics and Spectroscopy, vol. 23, p. 151 (1967).

J. Dupont-Roc, S. Haroche and C. Cohen-Tannoudji, Physics Letters A, vol. 28, p. 638 (1969).

Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Первые эксперименты с рекордной чувствительностью:

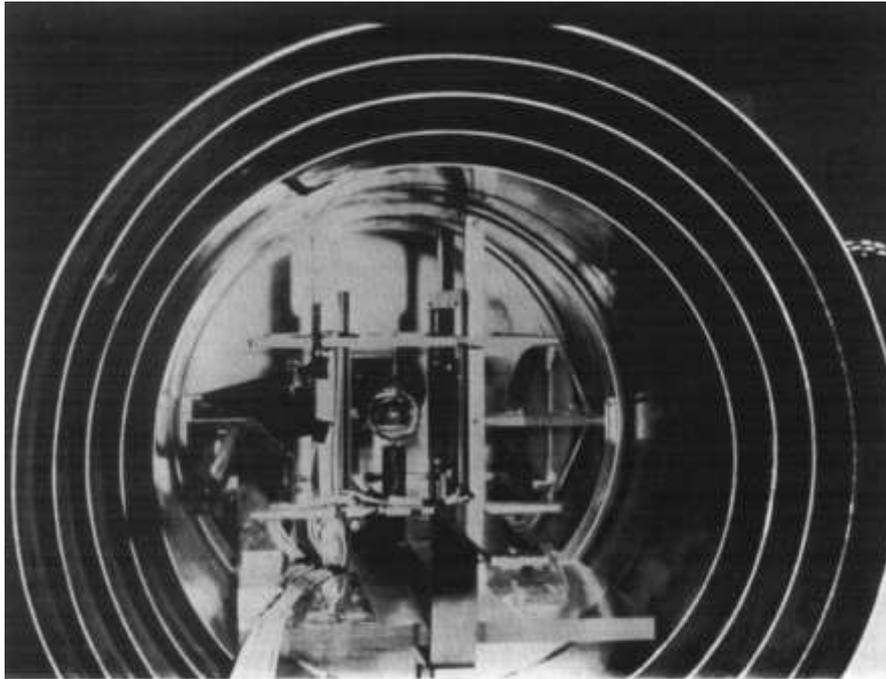
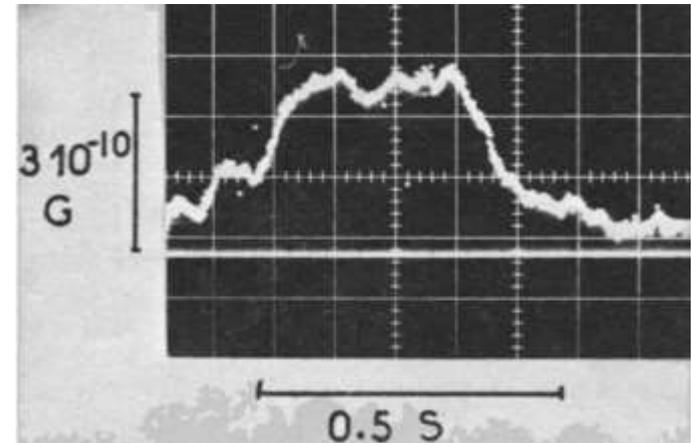


Fig. 6. Apparatus used by Cohen-Tannoudji and Haroche for measuring small magnetic fields.

J. Dupont-Roc et al., Phys. Lett. A 28, 638 (1969).
A. Kastler, Nuclear Instr. Methods 110, 259 (1973).



$$\delta B \approx 30 \text{ фТл} \quad (\Delta f \approx 1 \text{ Гц})$$

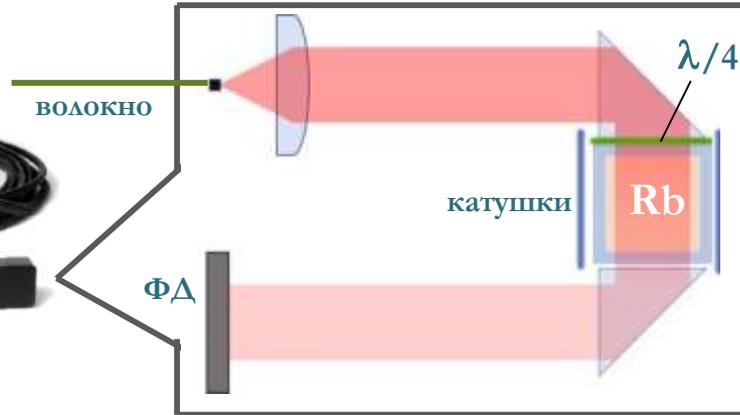
Принцип действия АМ. Эффект Ханле. Резонанс ЭИП

Ханле сенсоры:



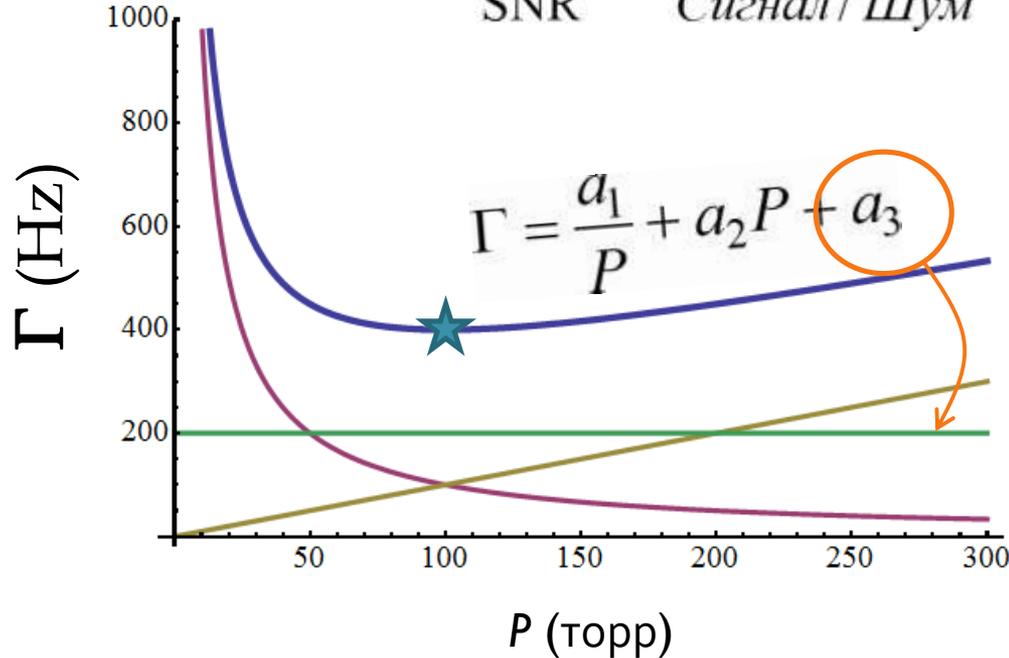
11 см

QuSpin Inc. (США)



Чувствительность измерений (мин. регистрируемое поле)

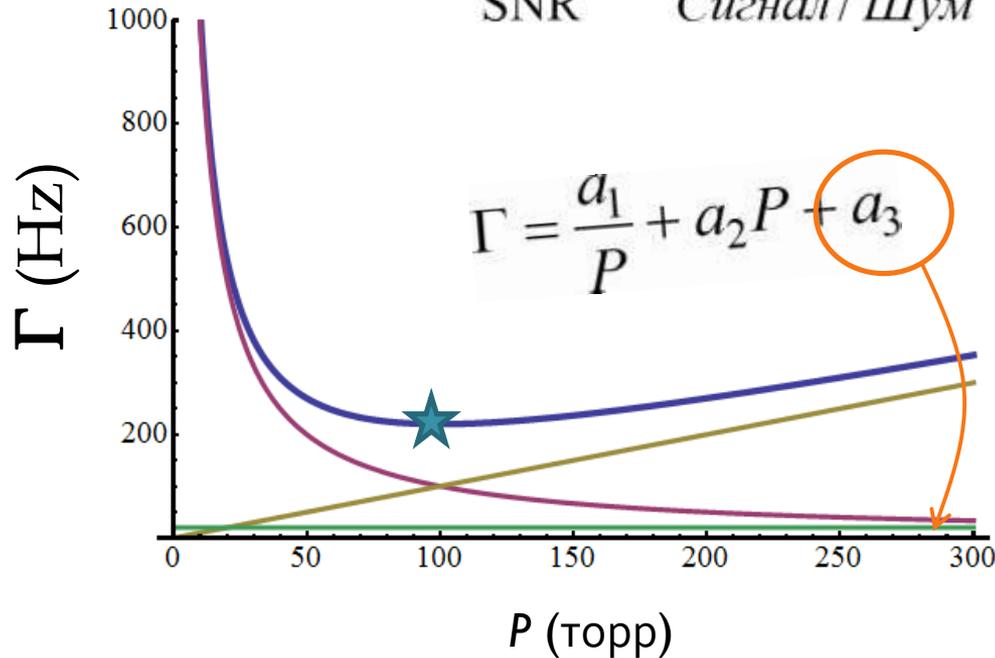
$$\delta B \approx \frac{\text{FWHM}}{\text{SNR}} = \frac{\text{Ширина}}{\text{Сигнал / Шум}} = 10 - 10\,000 \text{ фТл} / \sqrt{\Gamma \text{ц}}$$



$$\text{FWHM} = \text{Pump} + \Gamma$$

Чувствительность измерений (мин. регистрируемое поле)

$$\delta B \approx \frac{\text{FWHM}}{\text{SNR}} = \frac{\text{Ширина}}{\text{Сигнал / Шум}} = 10 - 10\,000 \text{ фТл} / \sqrt{\Gamma \text{ц}}$$



$$\text{FWHM} = \text{Pump} + \Gamma$$

Spin-Exchange-Relaxation-Free
Regime

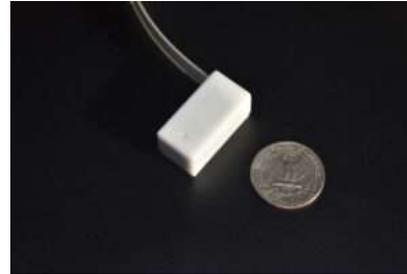
↑ n (T) (SERF)

W. Happer and H. Tang
Phys. Rev. Lett.
vol. 31, p. 273 (1973)

Особенности режима SERF:



QuSpin Inc., Gen 1



FieldLine Inc.



TwinLeaf LLC

- Относительно высокая температура: **150 – 200°C**
- Малый диапазон измерений:
не более **100 нТл** (Земное поле / 500)
- Высокое **тепловыделение**, особенно в многоканальном режиме

Высококочувствительная магнитометрия вне рамок SERF:

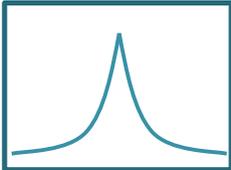
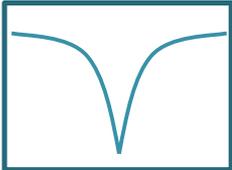
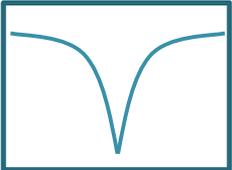
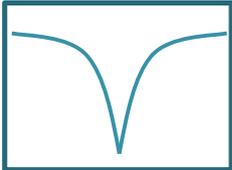
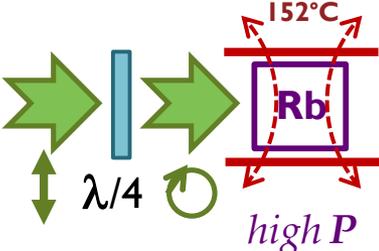
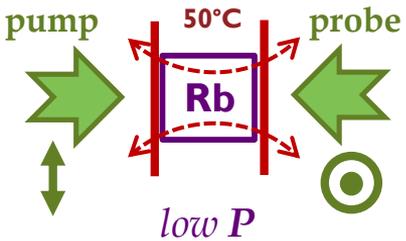
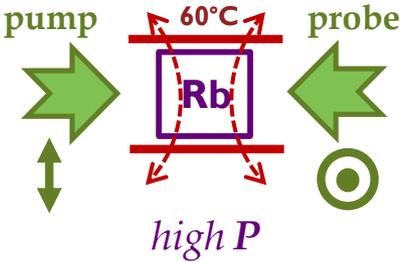
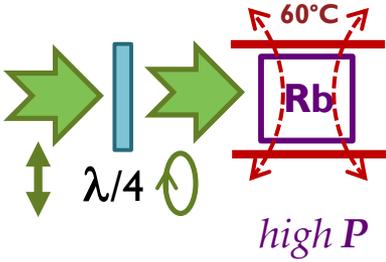
$$\delta B \approx \frac{\text{FWHM}}{\text{SNR}}$$

SNR ~ Contrast

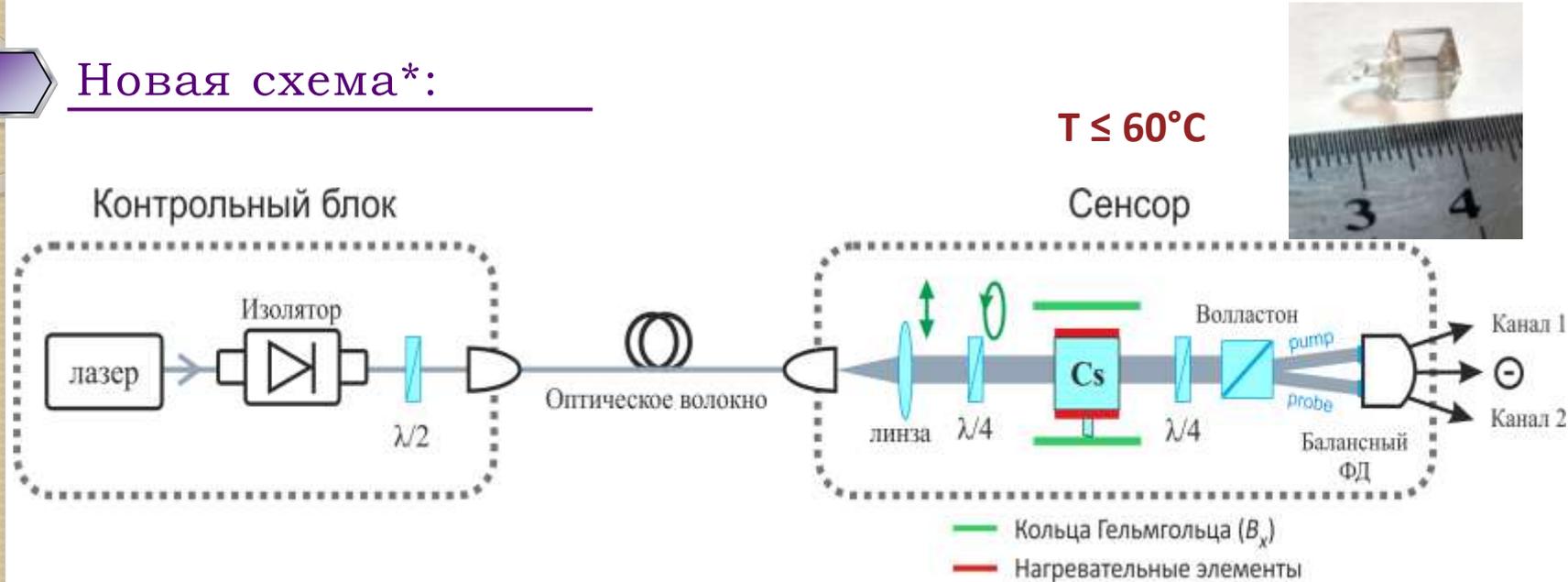
Стандартные схемы Ханле-сенсоров с одним линейно или циркулярно поляризованным пучком демонстрируют низкий контраст резонансов при невысоких температурах ($\leq 60^\circ\text{C}$) в маленьких ячейках ($\sim 0.1 \text{ см}^3$).

Требуется разработка новых схем спектроскопии атомов щелочных металлов, пригодных для миниатюрных сенсоров с невысокой T атомов.

Разработка новых схем для возбуждения Ханле-резонансов:

Стандартная	lin \perp lin	$\sigma^+\sigma^-$	ϵ
<p>ЭИП</p> 	<p>ЭИА</p> 	<p>ЭИА</p> 	<p>ЭИА</p> 
 <p>V. Shah et al. Nature Photonics vol. 1, 649 (2007)</p>	<p>постер А.О. Макарова</p>  <p>J. Phys. B: At. Mol. Opt. vol. 52, 215002 (2019)</p>	 <p>Appl. Phys. Lett. vol. 119, 024001 (2021)</p>	 <p>Phys. Rev. A, vol. 106 013113 (2022)</p>

Новая схема*:



$$E(t, z) = E_{pump}(z) \vec{e}_{+1} e^{-i\omega t} + E_{probe}(z) \vec{e}_{-1} e^{-i\omega t} + c.c.$$

$$\epsilon \approx 40^\circ$$

$$I_{pump} \gg I_{probe}$$

постер Владислава Вишнякова

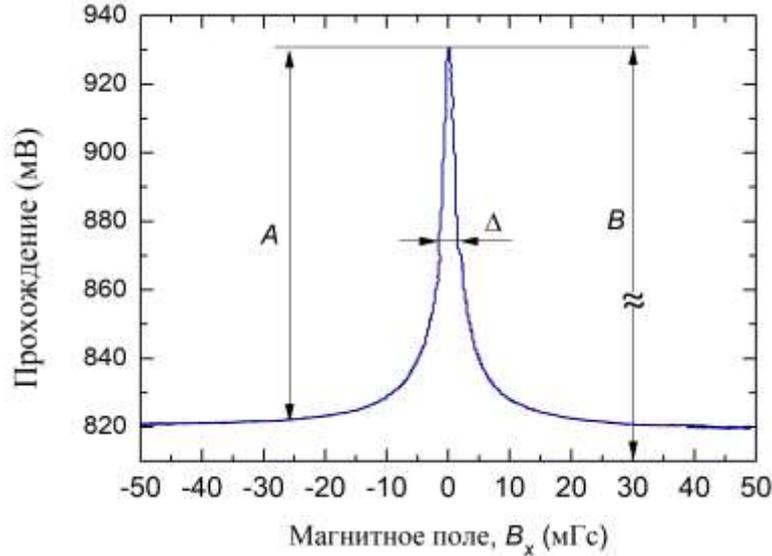
*D.V. Brazhnikov et al., Physical Review A, vol. 106, 013113 (2022).

Новая схема. Резонансы ЭИП vs. ЭИА

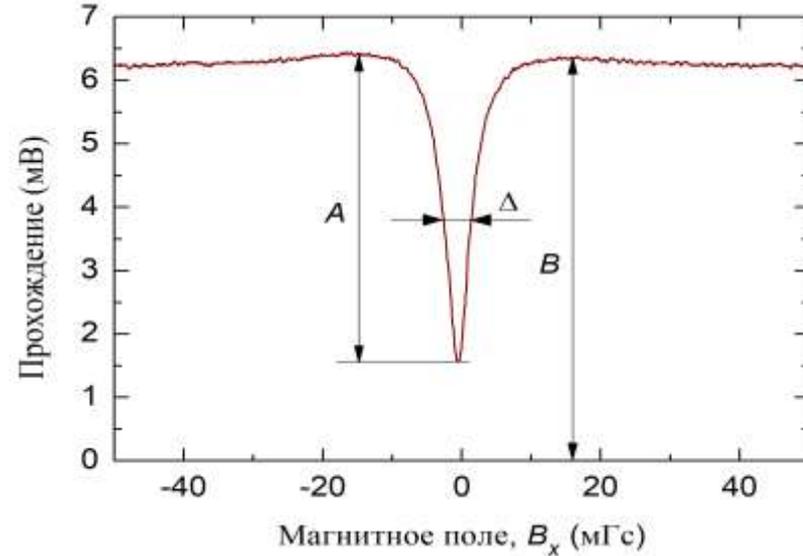
Канал 1: ЭИП

$T \approx 60^\circ\text{C}$

Канал 2: ЭИА

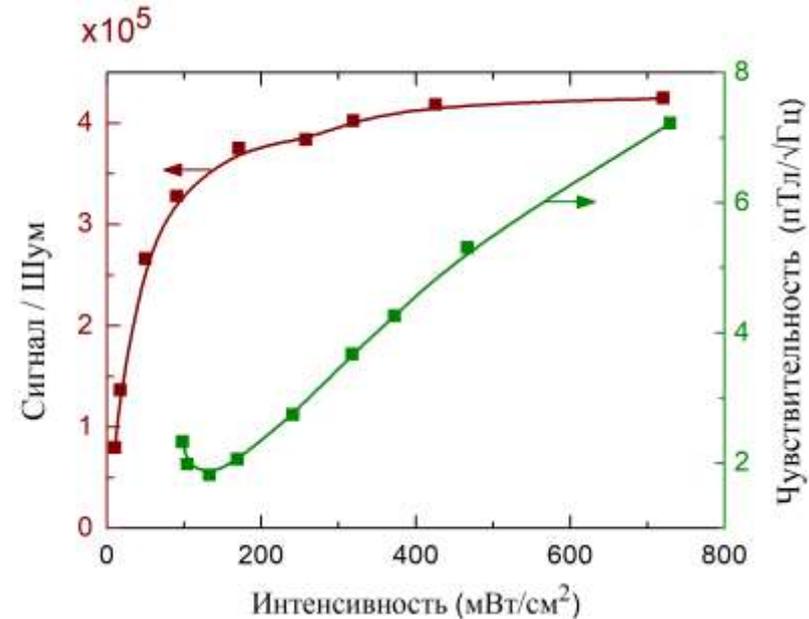
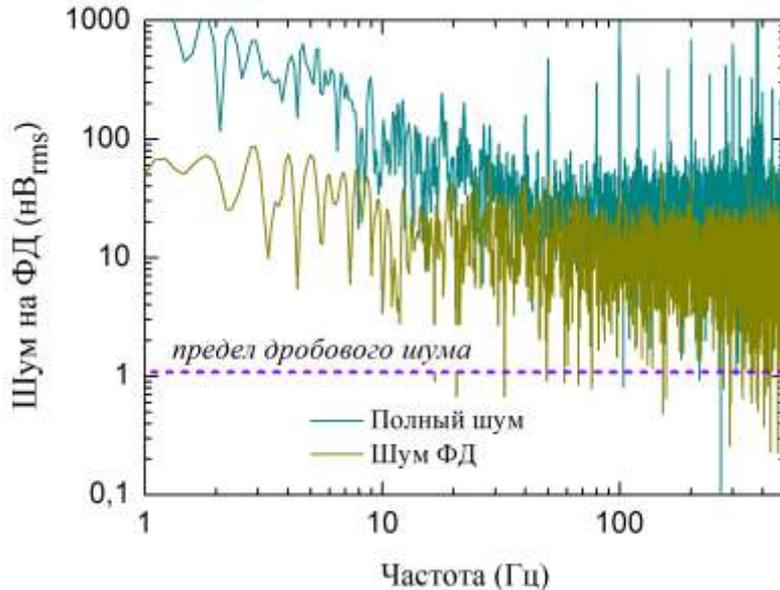


$$C = A / B \approx 12\%$$



$$C = A / B \approx 77\%$$

Новая схема*: Чувствительность



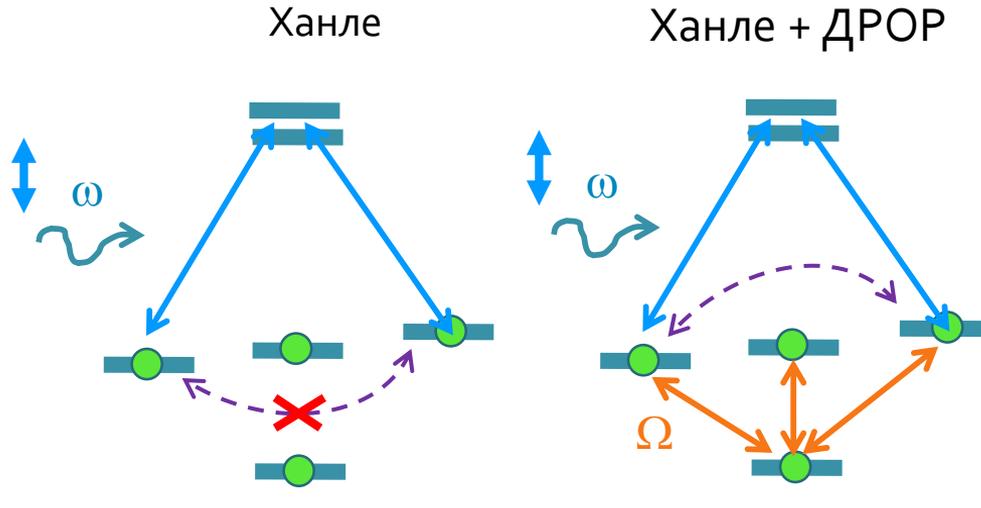
$$\delta B \approx 1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}, \text{ в пределе до } \approx 60 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$$

*D.V. Brazhnikov et al., Physical Review A, vol. 106, 013113 (2022).

ОСОБЕННОСТИ НОВОЙ СХЕМЫ:

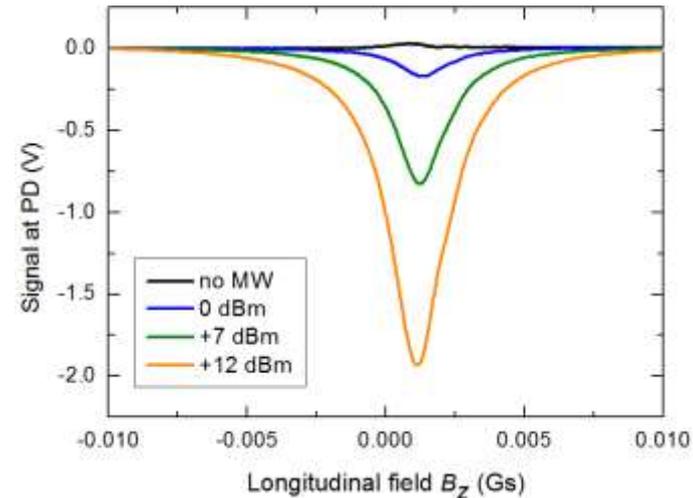
- ★ Более низкая температура сенсора: 60°C против 150°C
- ★ Сниженное энергопотребление и тепловыделение
- ★ Повышенный динамический диапазон измерений (до 1 мкТл)
- ★ Возможность дальнейшего развития на 2D и 3D режимы
- ★ Динамического диапазона 200 Гц будет достаточно для медицинских приложений

ДРОР + Ханле спектроскопия при большом P_{buff} :



Нет ни ЭИА, ни ЭИП!

Большой
резонанс
ЭИА!



^{87}Rb + 100 торр Ar
ячейка $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$



Спасибо за внимание !