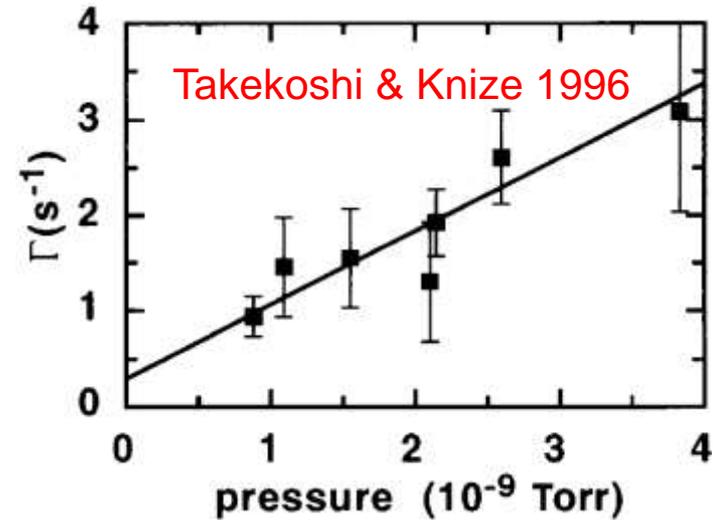
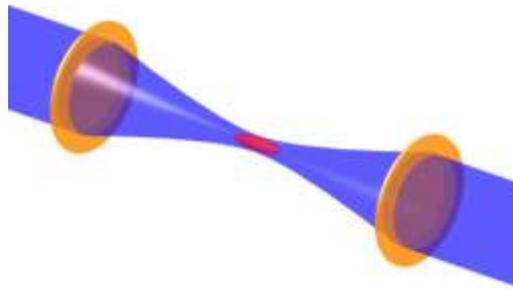
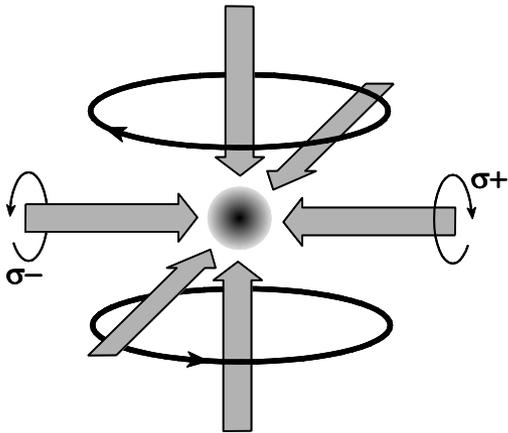


Вакуометр на основе пленённого газа атомов

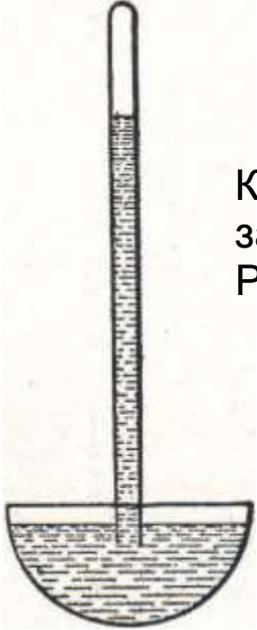
Андрей Турлапов
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород



Primary vacuumometer based on an ultracold gas in a shallow optical dipole trap

Вакуометрия сегодня

ПЕРВИЧНАЯ вакуометрия:



$$P \equiv \frac{F}{S}$$

Колонна Торричелли,
заполненная маслом
 $P_{\min} = 10^{-1}$ Па

РЕКОРДНАЯ вакуометрия:

ионизационный датчик
с горячим катодом по
Баярду-Альперту

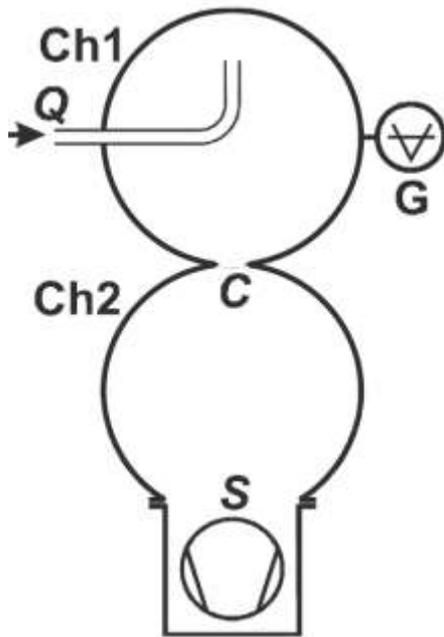
$P_{\min} = 5 \cdot 10^{-12}$ (Watanabe 2012)



- требует калибровки;
- нет калибровки на все рабочие давления;
- сильная зависимость от газа и неопределённость зависимости (коэффициент пересчёта с N_2 на He составляет 5,6 – 8,3);
- характеристики меняются со временем.

Стандарты давления и ионизационные датчики

СТАНДАРТЫ ДАВЛЕНИЯ по методу
постоянного расширения
 $P_{\min} = 10^{-10}$ Па



РЕКОРДНАЯ вакууметрия:

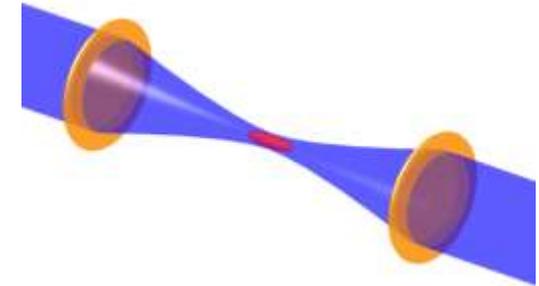
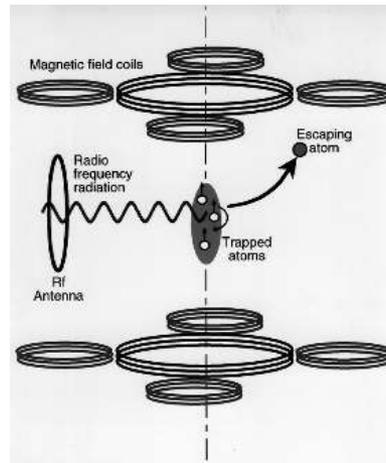
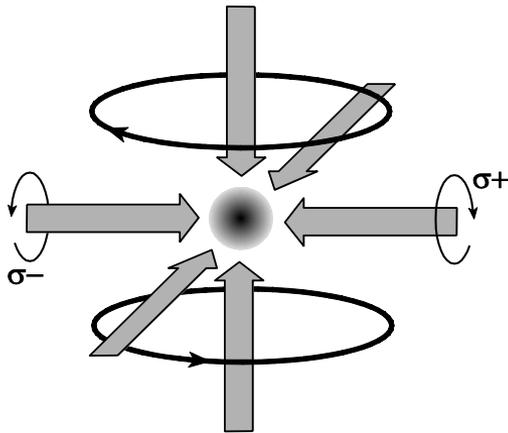
ионизационный датчик
с горячим катодом по
Баярду-Альперту

$P_{\min} = 5 \cdot 10^{-12}$ (Watanabe 2012)

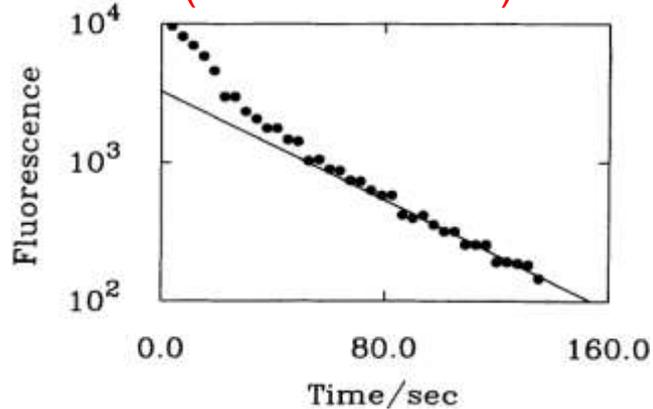


- требует калибровки;
- нет калибровки на все рабочие давления;
- сильная зависимость от газа и неопределённость зависимости (коэффициент пересчёта с N_2 на He составляет 5,6 – 8,3);
- характеристики меняются со временем.

Вакууметрия на основе холодных атомов

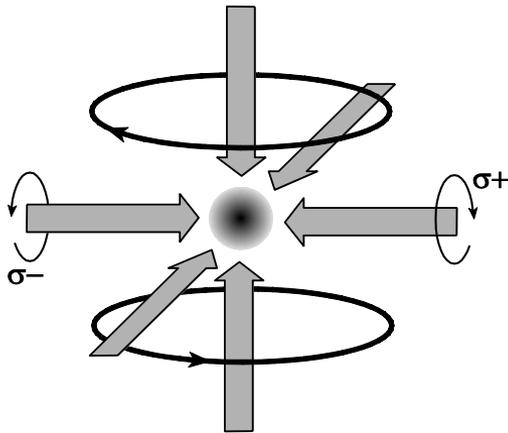


1-я МОЛ (Raab et al 1987)



ВСЕ КАНАЛЫ ПОТЕРЬ:
выбивание из ловушки
нагрев из-за малоугловых столкновений
майорановский переворот спина
релеевское рассеяние
рамановское рассеяние
нагрев флуктуациями ловушки
упругое столкновение
столкновение с переворотом спина
3-частичные неупругие столкновения

Вакуометрия на основе холодных атомов



Вторичный вакууметр на основе МОЛ
[Канада 2012]:

$P_{\min} = 3,3 \cdot 10^{-8}$ Па (по ионизационному датчику)

Предложен первичный вакууметр на основе магнитной или дипольной ловушки [2014 патент США] на основе анализа 2 каналов потерь:
выбивание из ловушки
нагрев из-за малоугловых столкновений

ВСЕ КАНАЛЫ ПОТЕРЬ:
выбивание из ловушки
нагрев из-за малоугловых столкновений
майорановский переворот спина
релеевское рассеяние
рамановское рассеяние
нагрев флуктуациями ловушки
упругое столкновение
столкновение с переворотом спина
3-частичные неупругие столкновения

Первичный вакууметр на основе ультрахолодных атомов

Подход - занулить все каналы потерь, кроме прямого выбивания из ловушки

Охлаждаемые атомы:

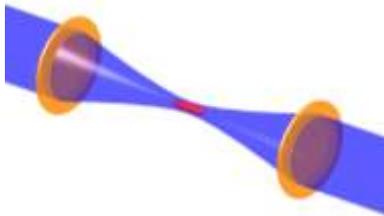
щелочные металлы - Li, Na, K, Rb, Cs, Fr;

метастабильные благородные газы - He, Ne, Ar, Kr, Xe;

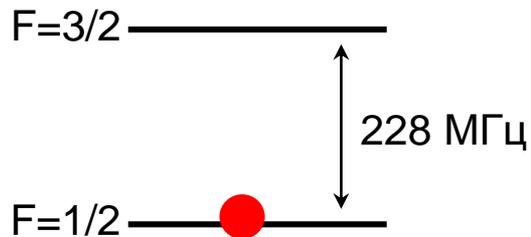
лантаноиды - Eu, Dy, Ho, Er, Tm, Yb;

группа II - Mg, Ca, Sr, Ba, Cd, Hg;

серебро, хром



${}^6\text{Li}$ - давление насыщенных паров при комнатной температуре 10^{-18} Па (Na - $4 \cdot 10^{-9}$ Па)

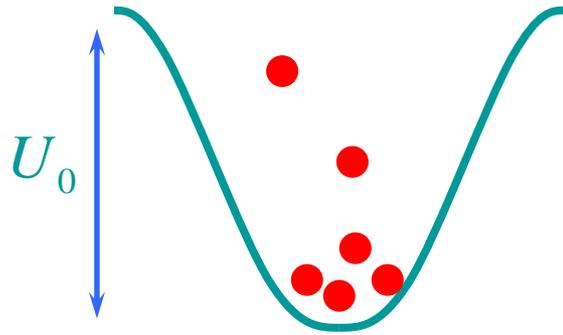
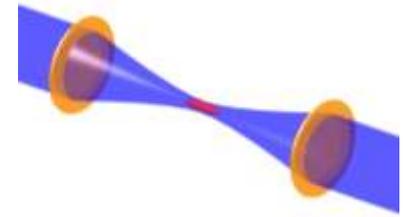


$\lambda = 10,6$ мкм

Время нагрева из-за релеевского рассеяния

$$\tau_{\text{ph}} \sim \frac{U_0}{2\Gamma_{\text{Rayleigh}} E_{\text{rec}}} = \frac{3}{128\pi^5} \frac{m\lambda^5}{\alpha\hbar} \cdot = 4 \cdot 10^7 \text{ с}$$

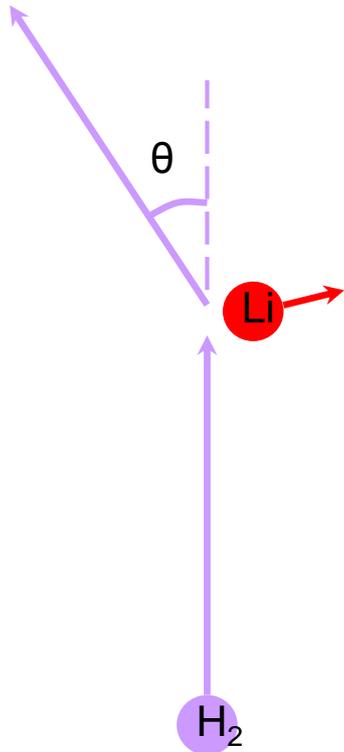
Подавление столкновительного нагрева



$$\theta < \theta_0 \equiv \frac{\sqrt{2m_{\text{Li}}U_0}}{\mu v}$$

- атом может остаться в ловушке при таких углах рассеяния

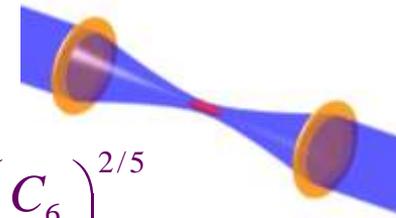
$$\mu \equiv \frac{m_{\text{Li}}M}{m_{\text{Li}} + M}$$



Нежелательные столкновения в режиме дифракции $\theta_0 < \theta_d \equiv \frac{\lambda_{\text{de Broglie}}}{\pi r_0}$

Вероятность остаться в ловушке $= \frac{\theta_0^2}{\theta_d^2} = \frac{U_0}{E_d}, \quad E_d \equiv \frac{2\hbar^2}{m_{\text{Li}}r_0^2}$

Формула вакууметра



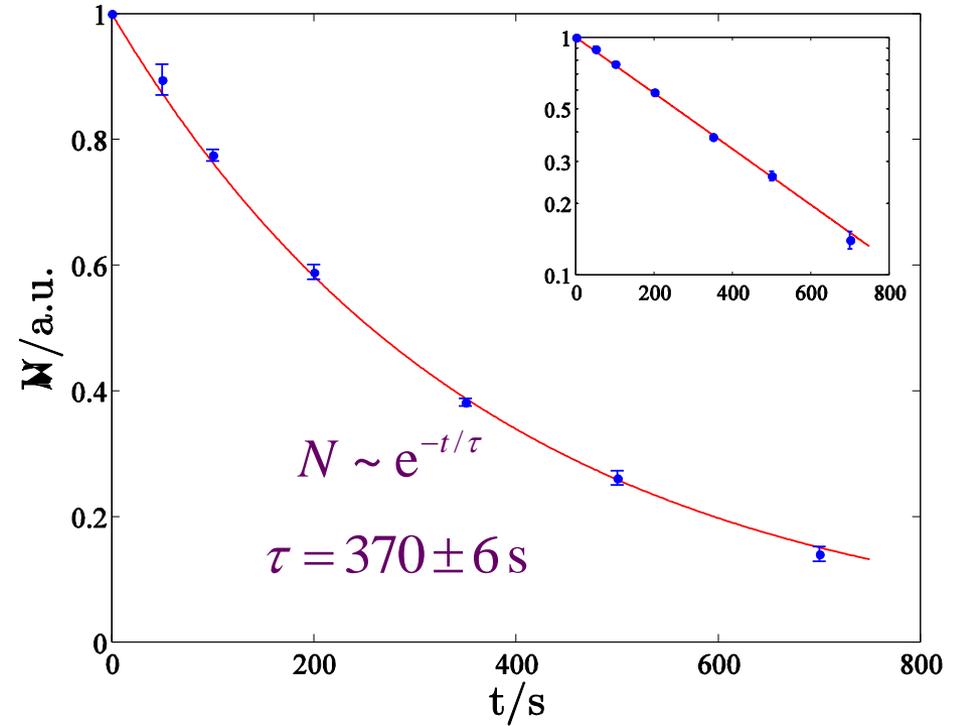
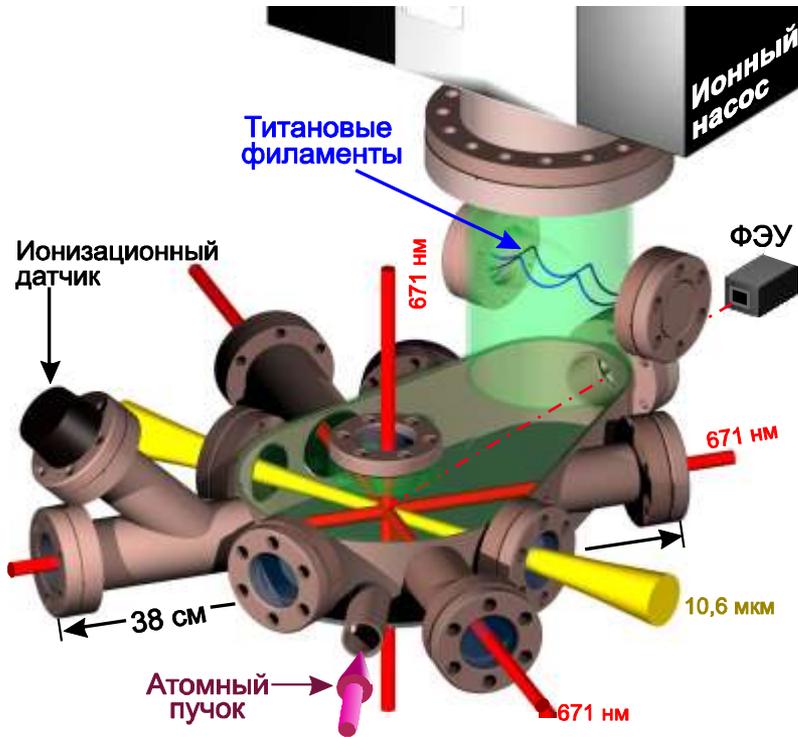
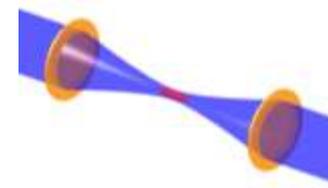
Полное сечение столкновений (Ландау-Лифшиц-Шифф): $\sigma = 8,08 \left(\frac{C_6}{\hbar v} \right)^{2/5}$

$$P = 0.096 \frac{\hbar^{2/5} T^{7/10} M^{3/10}}{\tau C_6^{2/5}}$$

τ – время спада числа атомов по уровню $1/e$
 C_6 – вад-дер-ваальсов коэффициент
 T – температура вак. камеры

Gas	H ₂	He	N ₂	Ar
C_6 (atomic units)	83	22	180	180
$M^{3/10}/C_6^{2/5}$ (atomic units)	2.0	4.2	3.2	3.6
Ion gauge correction factor	0.46	0.18	1	1.3

Эксперимент

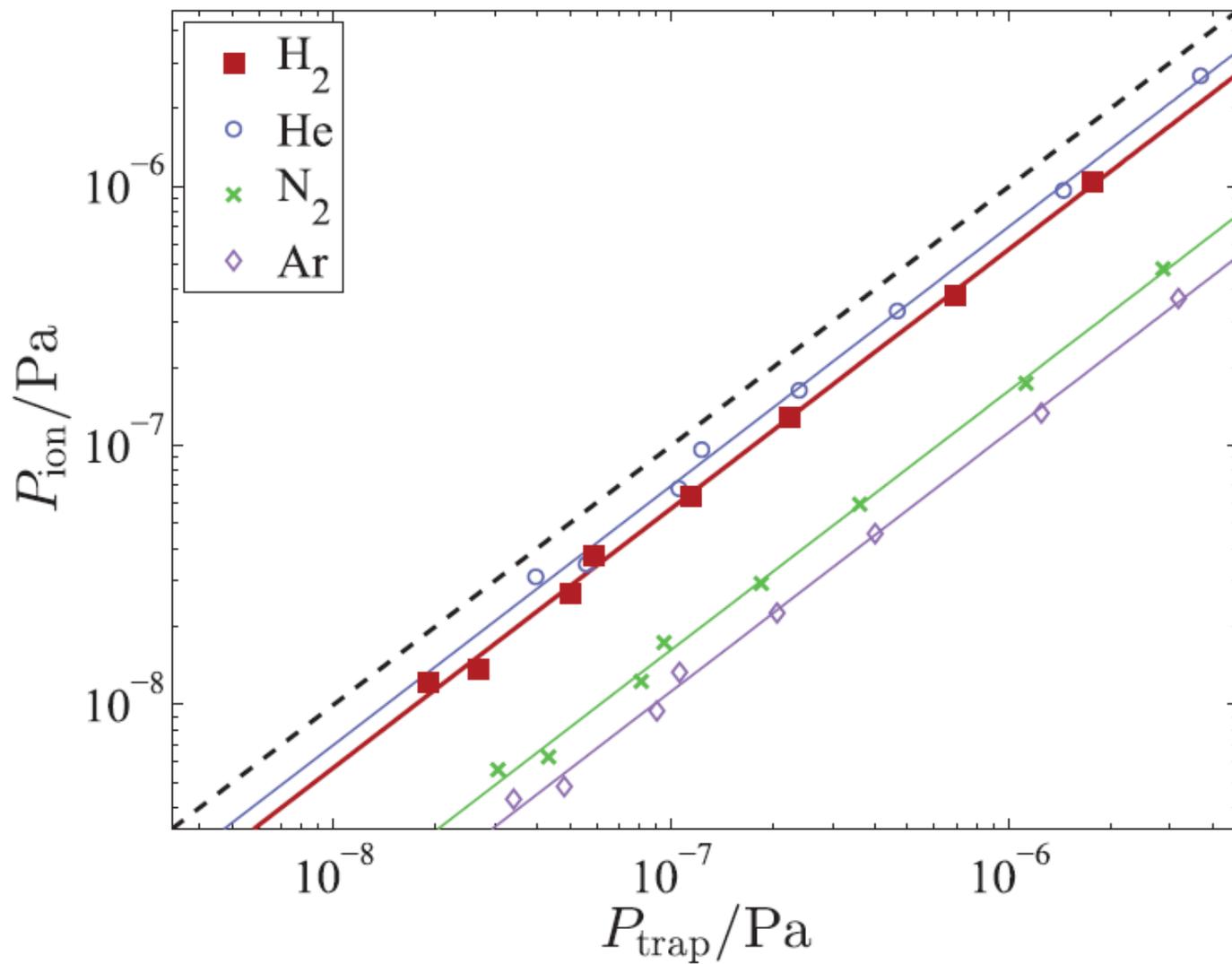


Основной газ в камерах из нержавеющей стали – водород

$$P = 2,8 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \quad (2,1 \cdot 10^{-11} \text{ торр})$$

неопределённость 4% из-за 10%-й неопределённости в C_6 для Li-H_2

Сравнение с ионизационным датчиком



ПРИМЕНЕНИЕ:

- калибровка вторичных датчиков;
- проверка стандартов давления;
- измерения в системах с большим загрязнением (литография в ЭУФ, эпитаксия молекулярным пучком)

ДОСТОИНСТВА относительно ионизационных датчиков

- локальность;
- нечувствительность к внешним электрическим и магнитным полям;
- меньшая ошибка из-за неизвестного состава газа (2-кратная вместо 8-кратной);
- нет ошибок из-за старения электродов

НЕДОСТАТКИ

- требуется оптический доступ;
- большое время измерения (например, 300 с при 10^{-9} Па)

