

Физика и техника получения гиперполяризованных газов

^3He и ^{129}Xe

Ю.А. Плис

Тепловая поляризация

В тепловом равновесии для ^3He

$$\frac{n_{\downarrow}}{n_{\uparrow}} = e^{-2\mu B/kT} \approx 1 - 2\mu B/kT,$$

$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}.$$

При $2\mu B \ll kT$

$$P = \frac{\mu B}{kT}.$$

$\mu(^3\text{He}) = -1,07 \times 10^{-26}$ Дж/Т, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

При $B = 1$ Т и $T = 300$ К

$$P \approx -2,6 \times 10^{-6}.$$

Для ^{129}Xe с $\mu = -3,92 \times 10^{-27}$ Дж/Т

$$P \approx -9,5 \times 10^{-7}.$$

Оптическая накачка поляризации

Существуют два метода увеличения поляризации ядер с использованием оптической накачки: спиновый обмен при столкновении с поляризованными щелочными атомами (Rb, K и др.) (SEOP) и прямая ориентация атомов ^3He в метастабильном состоянии (MEOP).

Далее рассматривается только метод SEOP, применимый как для ^3He , так и для ^{129}Xe .

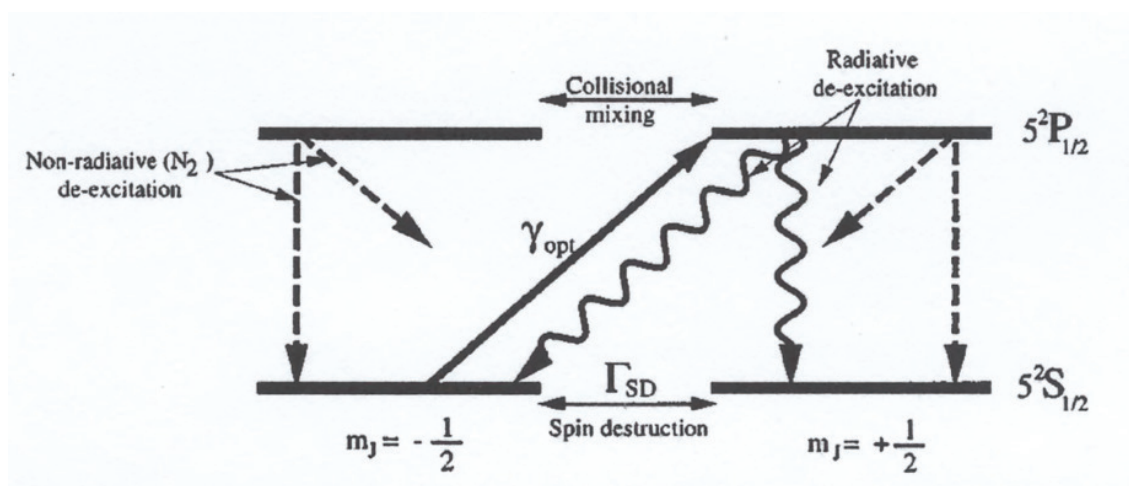


Figure 1: Принцип оптической накачки Rb

В результате оптической накачки происходит депопуляция атомов в состоянии с $m_J = -1/2$.

Обычно время накачки поляризации составляет примерно 10 ч.

Газ ^3He находится в стеклянном сосуде под давлением 1 - 10 бар с добавлением азота $\sim 0,1$ бар чтобы избежать захвата излучения от радиационного распада возбуждённых атомов Rb и $\sim 0,1$ г Rb или Rb-K смеси.

Сосуд с Rb или смесью Rb-K нагревается до температуры ≈ 170 или 220°C , соответственно, чтобы установить плотность паров щелочного металла в области $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

$$P_{Rb} = \frac{\gamma_{opt}}{\gamma_{opt} + \Gamma_{SD}},$$

где Γ_{SD} , скорость разрушения поляризации электронного спина Rb,

$$\gamma_{opt} = \int I(\nu)\sigma(\nu)d\nu.$$

Интенсивность света зависит от длины пути в газе, поэтому поляризация Rb неоднородна по объёму сосуда. Улучшает ситуацию двукратное прохождение света с отражением от диэлектрического зеркала. Для достижения высокой поляризации должно быть $\gamma_{opt} \gg \Gamma_{SD}$. Для плотности Rb 10^{15} см^{-3} требуется поглощаемая мощность $0,2 \text{ Вт/см}^3$.

Спиновая релаксация Rb происходит от столкновений Rb-Rb (доминирует при низкой плотности ^3He) и столкновений Rb- ^3He (при высокой плотности ^3He). Также вклад дают Rb-N₂ столкновения.

Скорость релаксации для столкновений К-К примерно в 5 раз меньше, чем для Rb-Rb.

Сборка диодных лазеров с мощностью порядка 100 Вт и длиной волны 794,7 нм имеет широкий спектральный профиль (примерно 2 нм или 900 ГГц). Это плохо согласуется с шириной линии атомов Rb $5S_{1/2} - 5P_{1/2}$ (0,38 нм или 180 ГГц при 10 бар ^3He). Внешние резонаторы могут сократить ширину линии лазера до 0,2 нм (90 ГГц).

После прохождения сосуда с газом спектр лазера меняется и по его изменению можно судить об эффективности накачки. Для этого требуется оптический спектрометр с разрешением не хуже, чем 0,05 нм.

Рост поляризации ^3He при оптической накачке

$$\frac{dP_{He}}{dt} = k_{se}n_{Rb}(P_{Rb} - P_{He}) - \frac{P_{He}}{T},$$

где T - время релаксации поляризации ядер ^3He ,
 n_{Rb} - плотность атомов Rb, $k_{se} \approx 6 \times 10^{-20}$ см³/с.

Для нулевой поляризации в начальный момент

$$P_{He} = P_{Rb} \frac{k_{se}n_{Rb}}{k_{se}n_{Rb} + T^{-1}} \left(1 - e^{-(k_{se}n_{Rb} + T^{-1})t} \right).$$

В стационарном состоянии

$$P_{He} = P_{Rb} \frac{k_{se}n_{Rb}}{k_{se}n_{Rb} + T^{-1}}.$$

Более точно

$$P_{He} = P_{Rb} \frac{k_{se}n_{Rb}}{k_{se}(1 + X)n_{Rb} + T^{-1}}.$$

Происхождение "X фактора" не вполне ясно, $X \approx 0,3$

Это определяет предельное значение поляризации

$$P_{He\infty} = \frac{1}{1 + X}$$

для 100%-ной поляризации Rb и пренебрежимо малой величины T^{-1} .

$$P_{He\infty} = 75 - 80\%.$$

Механизмы релаксации ^3He

Магнитное дипольное взаимодействие $^3\text{He} - ^3\text{He}$

$$\Gamma_{dipol} = T^{-1} = \frac{[\text{He}]}{744} \text{ h}^{-1},$$

где $[\text{He}]$ - плотность атомов ^3He в ед. амага.

Для плотности ^3He 10 амага $\Gamma_{dipol} \approx 1/70 \text{ ч}^{-1}$.

Столкновения со стенками дают $\Gamma_{wall} \approx 1/60 \text{ ч}^{-1}$.

$$\frac{1}{T} = \Gamma_{dipol} + \Gamma_{wall} \approx 1/30 \text{ h}^{-1}.$$

Релаксация, вызванная неоднородностью удерживающего магнитного поля,

$$\Gamma_{\nabla B} = D \frac{|\nabla B_x|^2 + |\nabla B_y|^2}{B_z^2},$$

где D коэффициент самодиффузии атомов ^3He .

В типичных условиях $T_{\nabla B} \approx 10^4 \text{ ч}$.

Для $n_{Rb} = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$

$$k_{se} n_{Rb} = 0,1 \text{ h}^{-1} \gg T^{-1}.$$

Время накачки поляризации ^3He составляет около 10ч.

Гиперполяризация ксенона-129

$$P_{Xe} = \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{SE} + \Gamma_{Xe}} P_{Rb},$$

где γ_{SE} зависит от плотности Rb и от давления Хе.

При этом скорость накачки поляризации существенно больше по сравнению с ^3He .

$$P_{Rb} = \frac{\gamma_{opt}}{\gamma_{opt} + \Gamma_{SD}},$$

где Γ_{SD} , скорость разрушения поляризации электронного спина, зависящая от давления и состава газа.

Хе менее подходит для уширения линии поглощения Rb из-за высокой скорости разрушения спина Rb.

Смесь 3% Хе, 10% N₂, 87% Не даёт ширину линии поглощения 0,038 нм/амага.

Измерение поляризации

Чаще всего применяются два метода измерения поляризации:

- 1) быстрое адиабатическое прохождение резонанса,
- 2) импульсный метод по сигналу свободной прецессии намагниченности ядер после воздействия на них радиочастотного импульса возбуждения на частоте ЯМР с последующим быстрым Фурье-преобразованием сигнала свободной индукции ядер и вычислением соответствующих площадей спектров ЯМР.

В магнитном поле 10 мТ частота ЯМР для ^3He составляет 324,4 кГц, соответственно, для ^{129}Xe - 117,8 кГц. Оба метода являются относительными. Для калибровки поляризации измеряется спектр равновесного сигнала ЯМР протонов воды на той же частоте при комнатной температуре. Калибровочные измерения равновесного сигнала ЯМР протонов воды проводятся с накоплением.

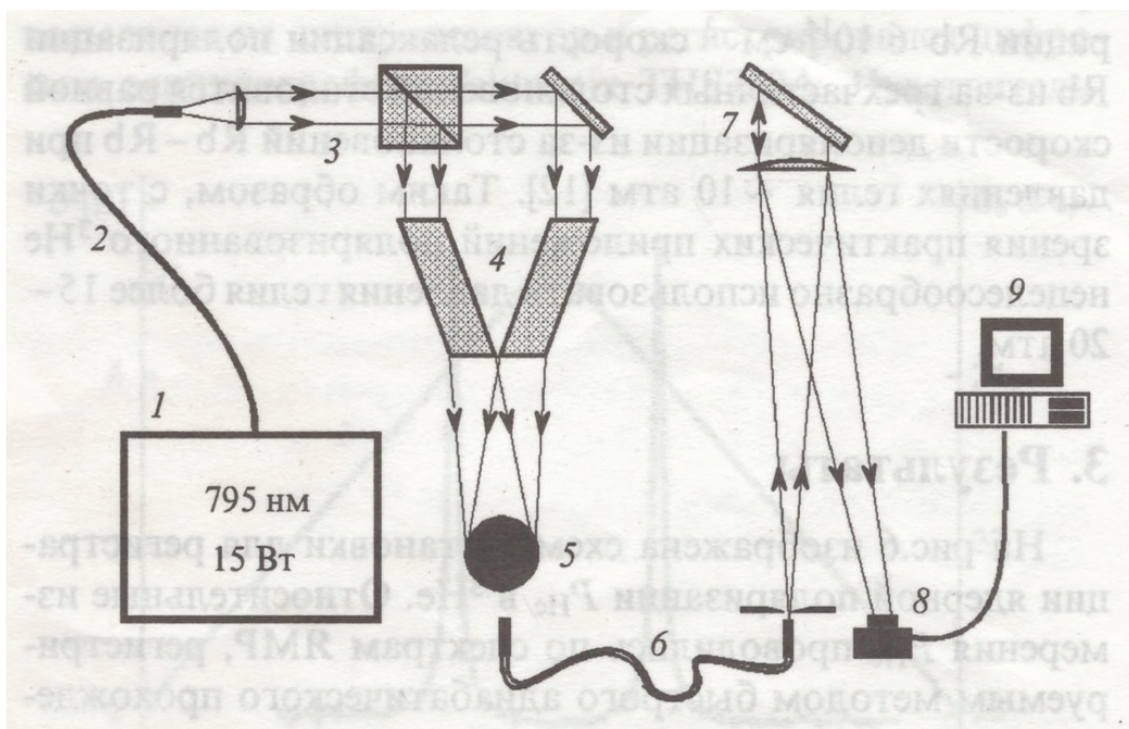


Figure 2: Схема эксперимента ФИАН: 1 - диодный лазер; 2 - лазерный световод с расширителем пучка; 3 - поляризационный куб; 4 - ромбы Френеля; 5 - кювета; 6 - световод; 7 - спектрограф; 8 - видеокамера; 9 - компьютер

Применения

Поляризованный ^3He обеспечивает разумное приближение к поляризованной нейтронной мишени. Спины протонов спарены, и 87% спина ^3He содержит единственный нейтрон. Внешние мишени с непрерывной накачкой ^3He использовались для рассеяния

электронов, фотонов, протонов, нейтронов и пионов. Поляризованные мишени ^3He и ^{129}Xe нашли применение в магнитной резонансной томографии. Для МРТ развитие идёт, в основном, для ^{129}Xe ввиду ограниченной доступности ^3He .

МРТ с использованием ксенона позволяет в динамике измерять вентиляцию лёгких, диффузию в паренхиме, перфузию газа в сосудистую систему. Ксенон хорошо растворяется в липидах и нервной ткани. Это открывает возможности функциональной диагностики мозга.

В последнее время появились работы описывающие изучение состояния лёгких пациентов, переболевших Ковидом.

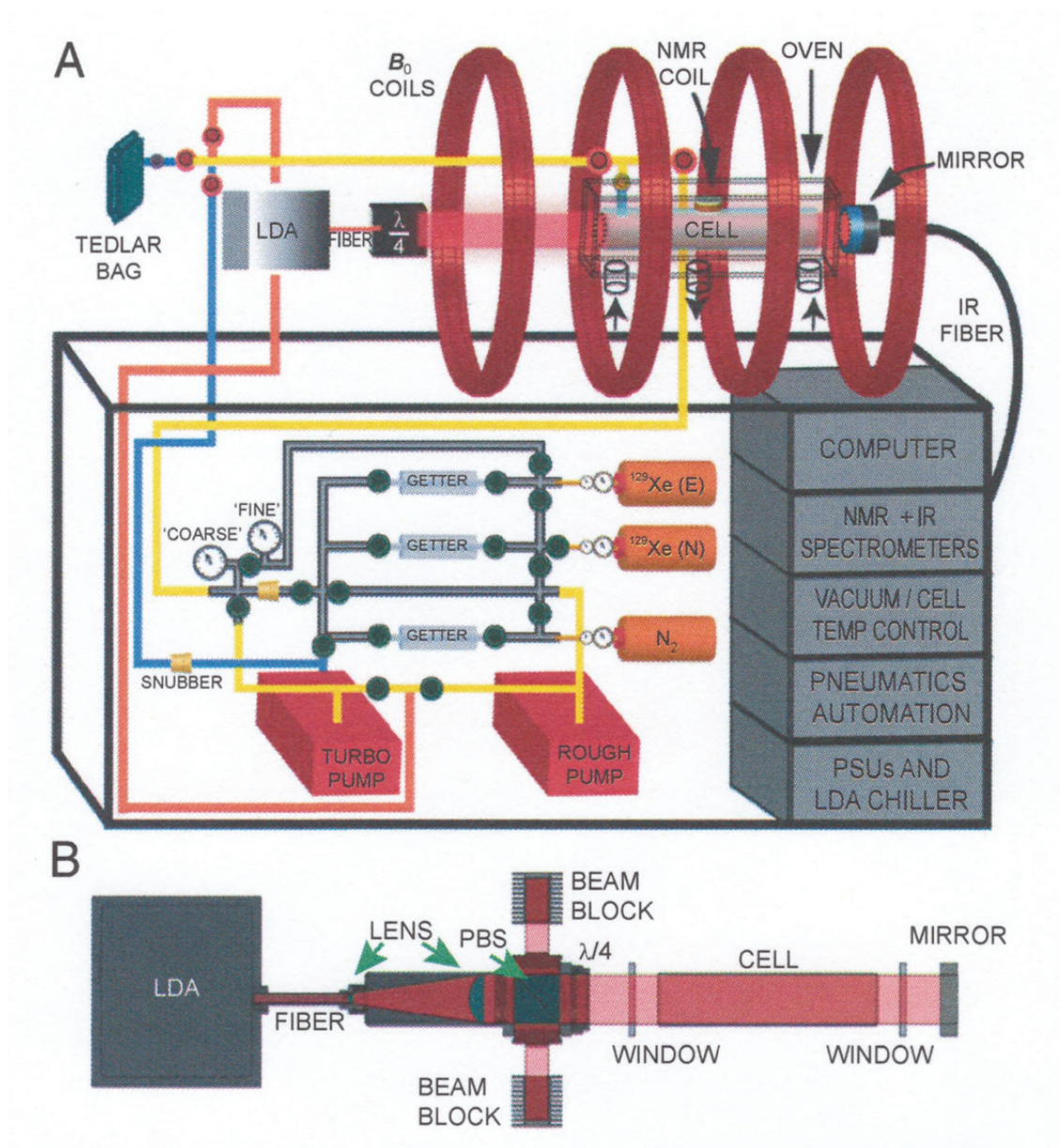


Figure 3: Поляризатор ^{129}Xe , 200 Вт лазер, 794,8 нм, FWHM 0,27 нм, 1800 Торр, 500 мл, 1 л/час, $P = 28\%$, (PNAS, 2013, v. 110, p. 14150)

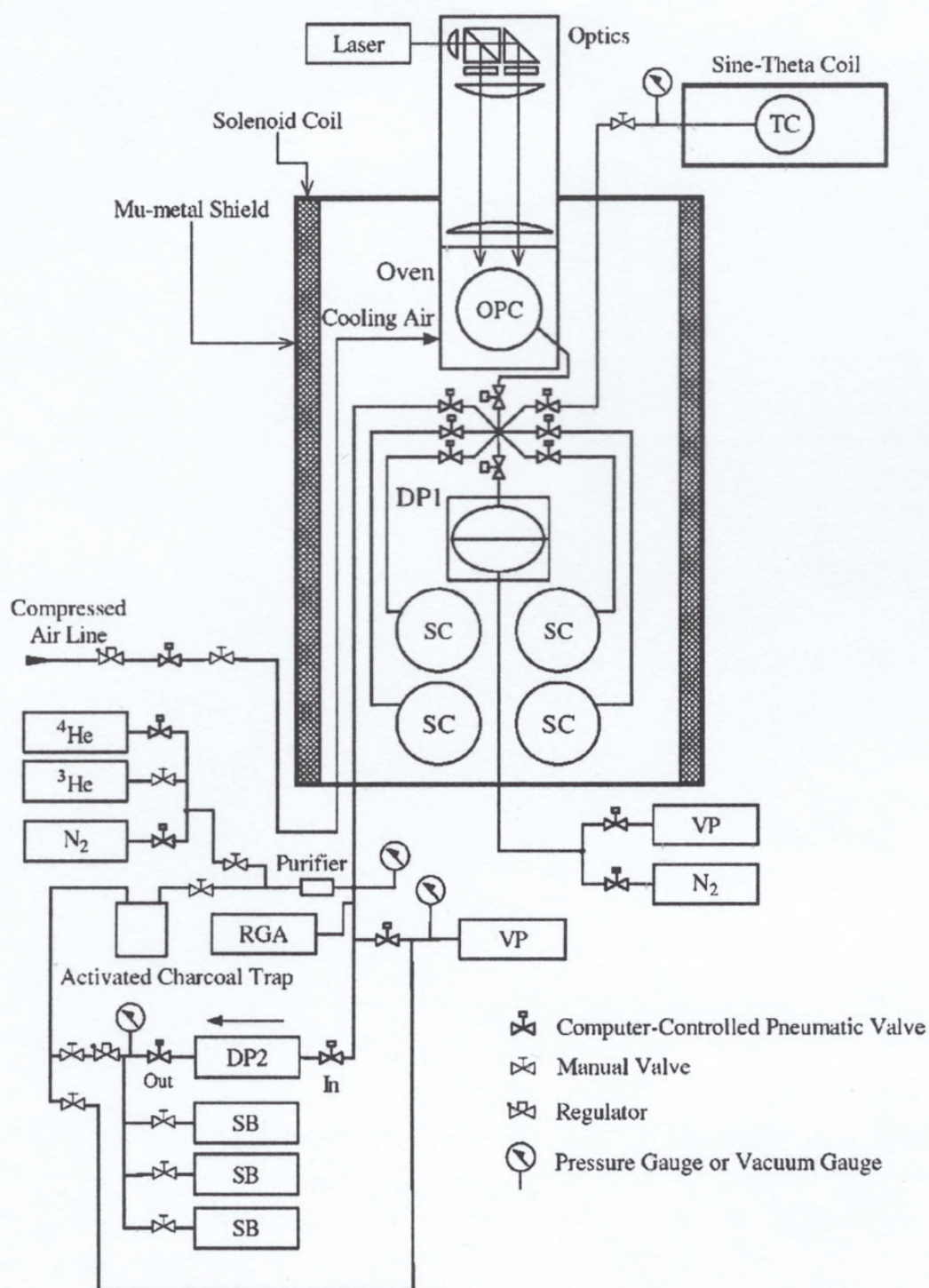


Figure 4: Схема поляризованной мишени ^3He TUNL

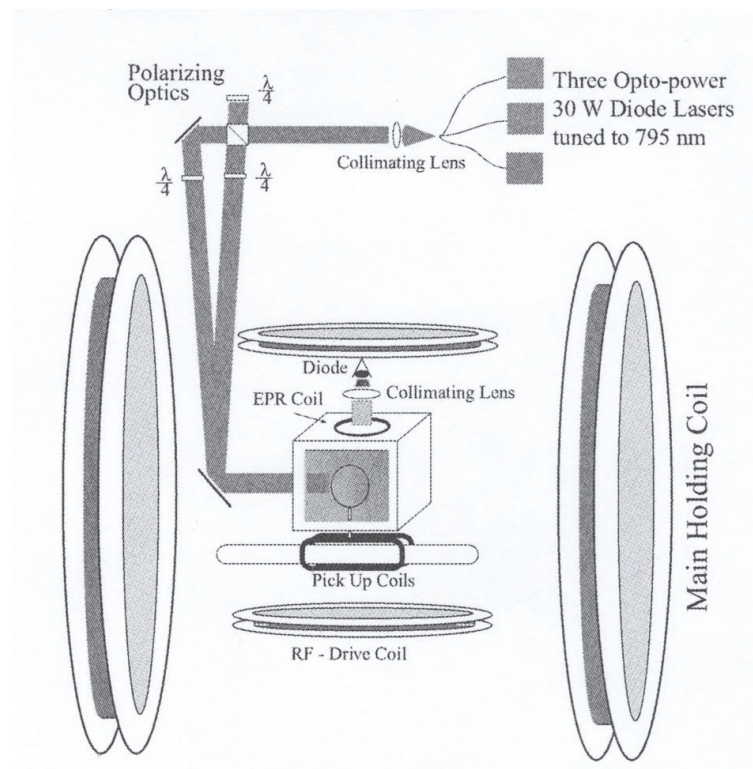


Figure 5: Поляризованная мишень ^3He JLab

P. A. M. DOLPH *et al.*

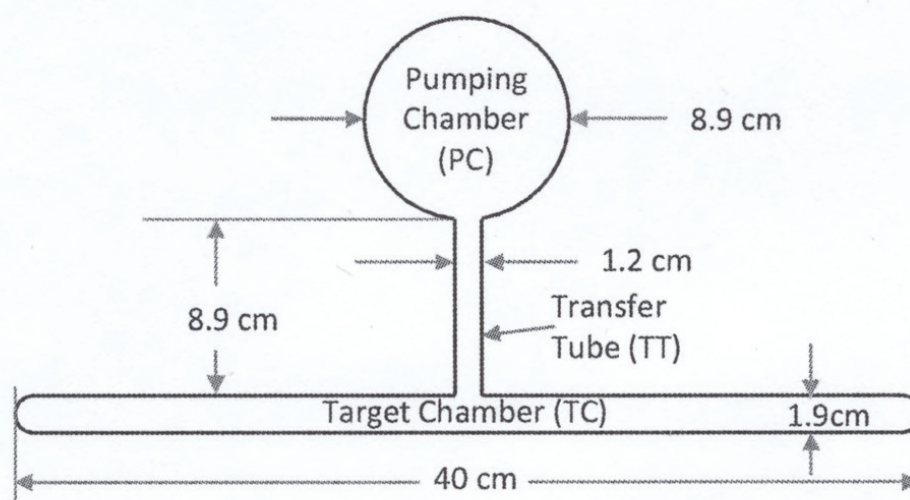


FIG. 1. (Color online) Shown is the geometry of a two-chambered glass cell used for polarized ^3He targets. The dimensions shown are typical of those used in a recent JLab experiment to measure the electric form factor of the neutron [3].

Figure 6: Геометрия двухкамерной поляризованной мишени ^3He JLab

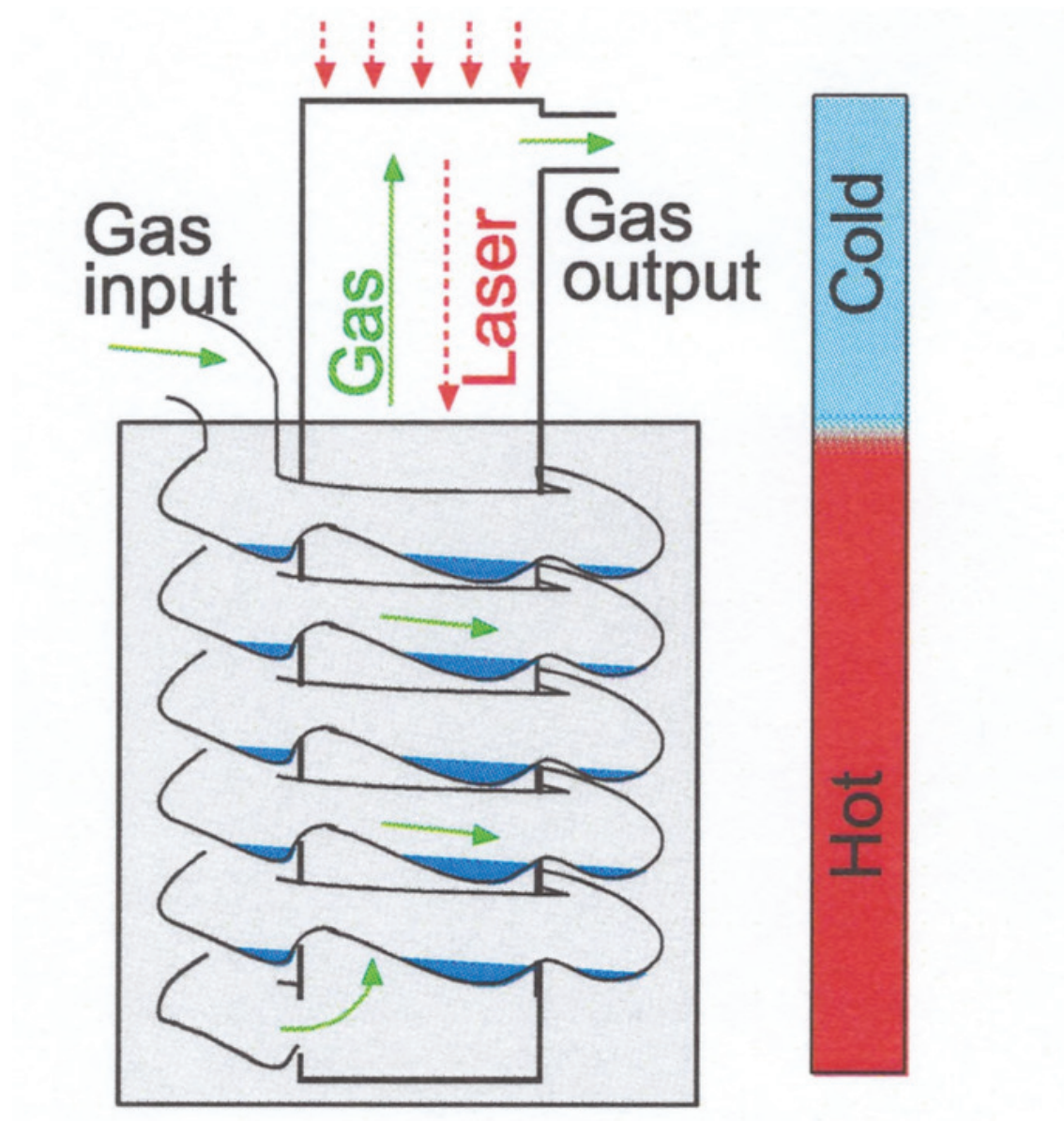


Figure 7: Поляризатор ^{129}Xe , 2 л/час, 60%, 720 Вт, 0,3 нм, (Hersman)

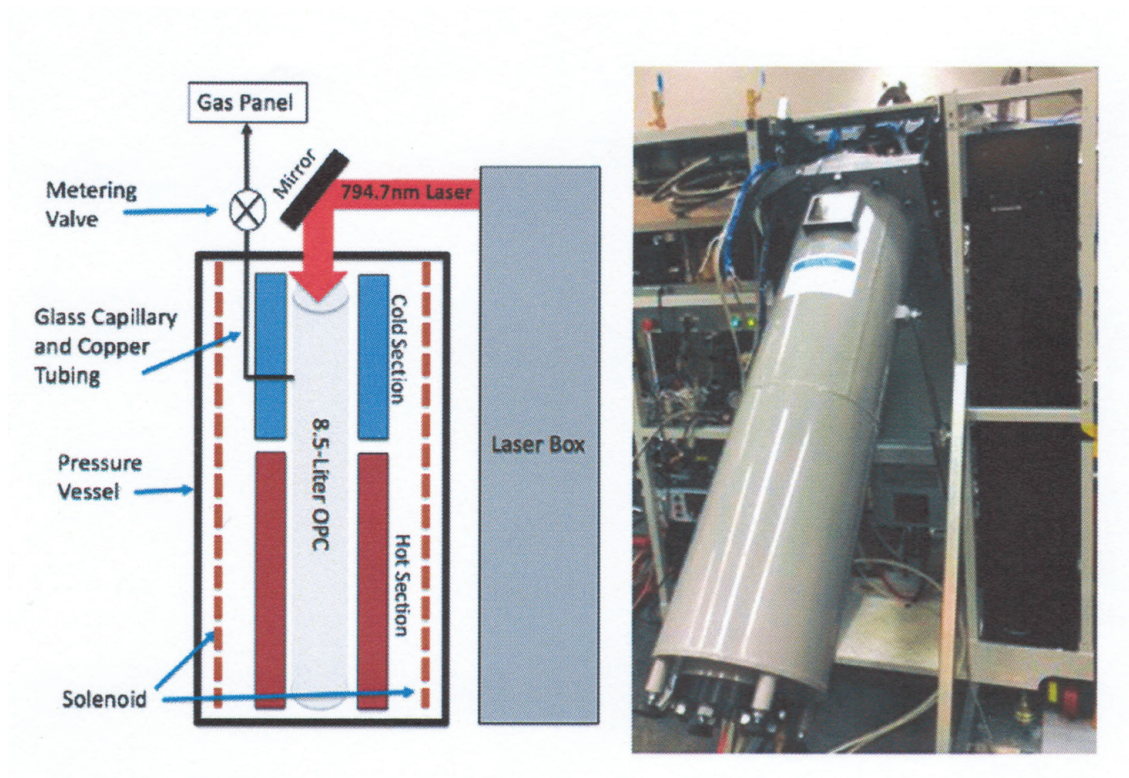


Figure 8: Поляризатор ^3He 8 л

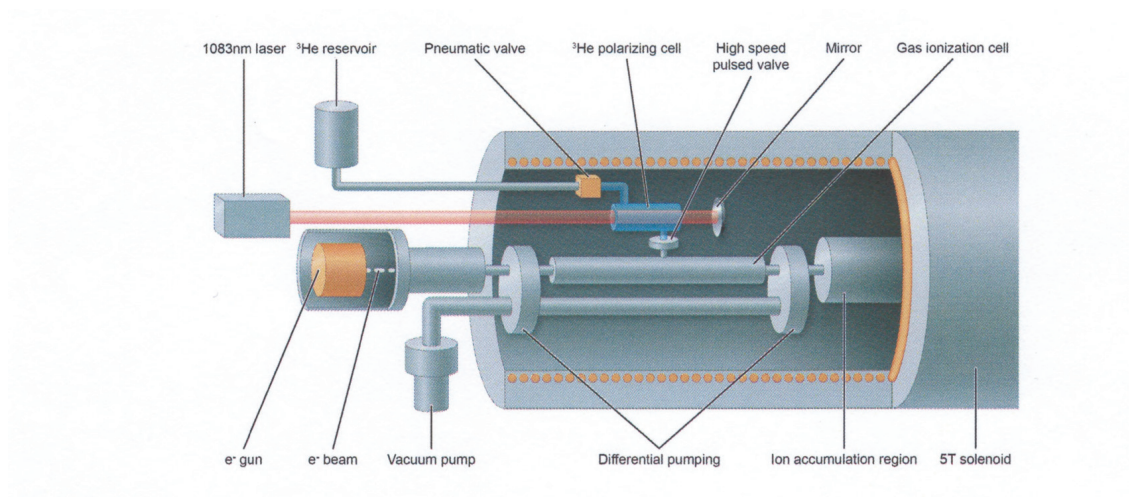


Figure 9: Схема источника поляризованных ионов $^3\text{He}^{++}$ BNL, 5 T, $2,5 \times 10^{11}$ /имп, поляризация 70%, ток 10 А, 20 Кв, 1,5 м, импульс 20 мкс

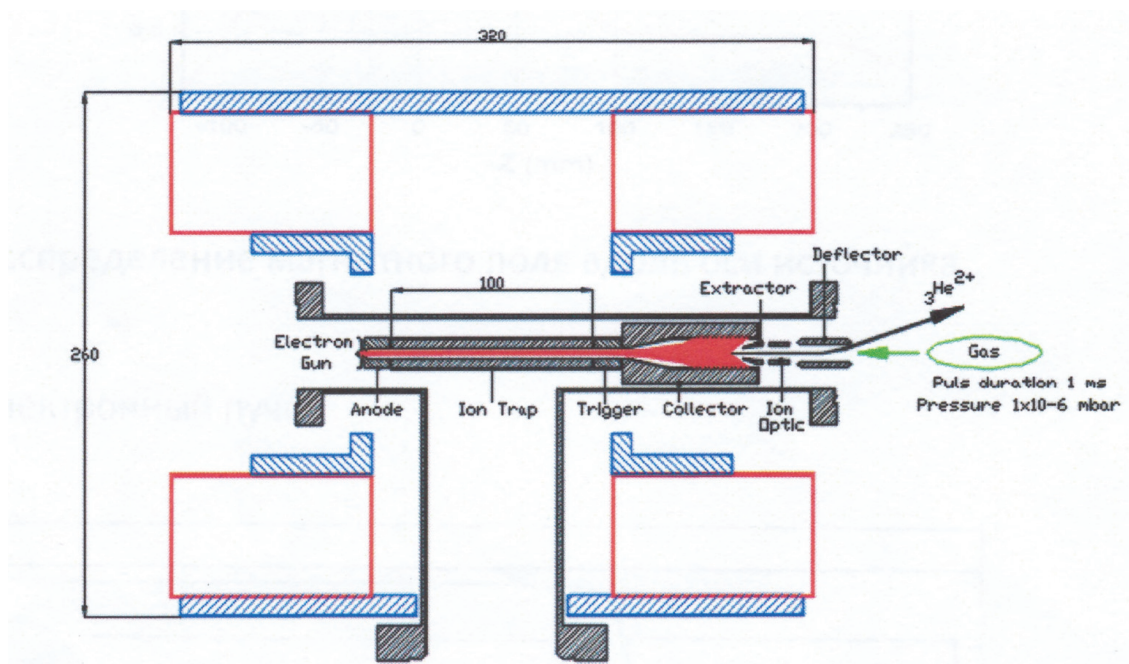


Figure 10: Ионизатор Овсянникова, до 5×10^9 част./имп., 1-2 кВ, 0,5 А