

Статус поляризованного He^3 в ЛФВЭ ОИЯИ

В.В. Фимушкин

Поляризация ^3He возможна двумя разными методами:

Оптическая накачка с метастабильным обменом (Metastability Exchange Optical Pumping, MEOP)

Спин-обменная оптическая накачка (Spin-Exchange Optical Pumping, SEOP).

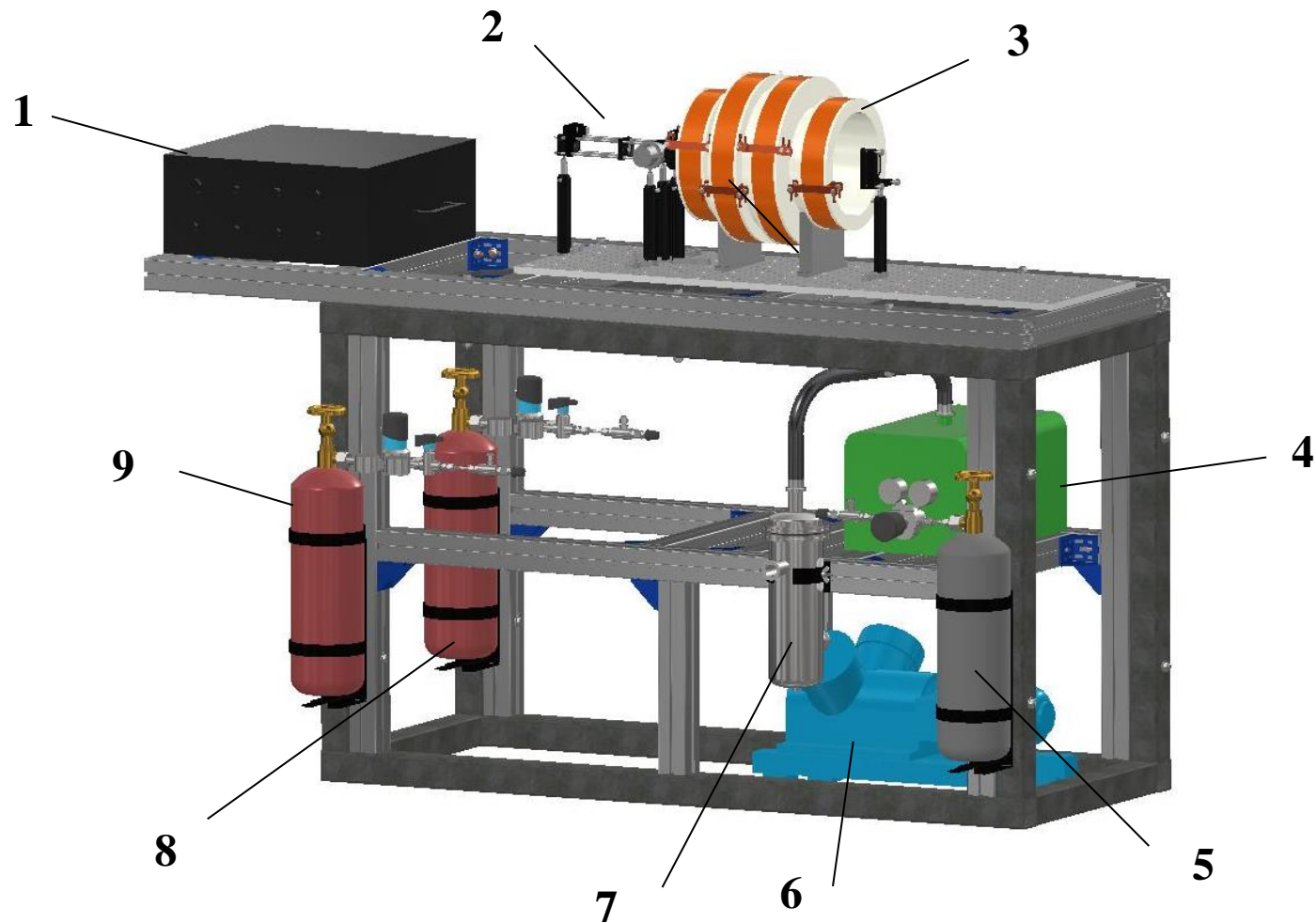
По методу SEOP ядра ^3He поляризуются при реализации спинового обмена при столкновениях с поляризованными щелочными металлами (Rb, K)

Разрабатываемый в ЛФВЭ ОИЯИ поляризатор ^3He по SEOP-методу позволит создать ^3He поляризованную мишень для физических экспериментов на выведенных поляризованных пучках из НУКЛОТРОНА

Наличие поляризатора ^3He позволит разработать источник поляризованных ионов $^3\text{He}^{++}$ по программе поляризационных исследований для NICA-коллайдера

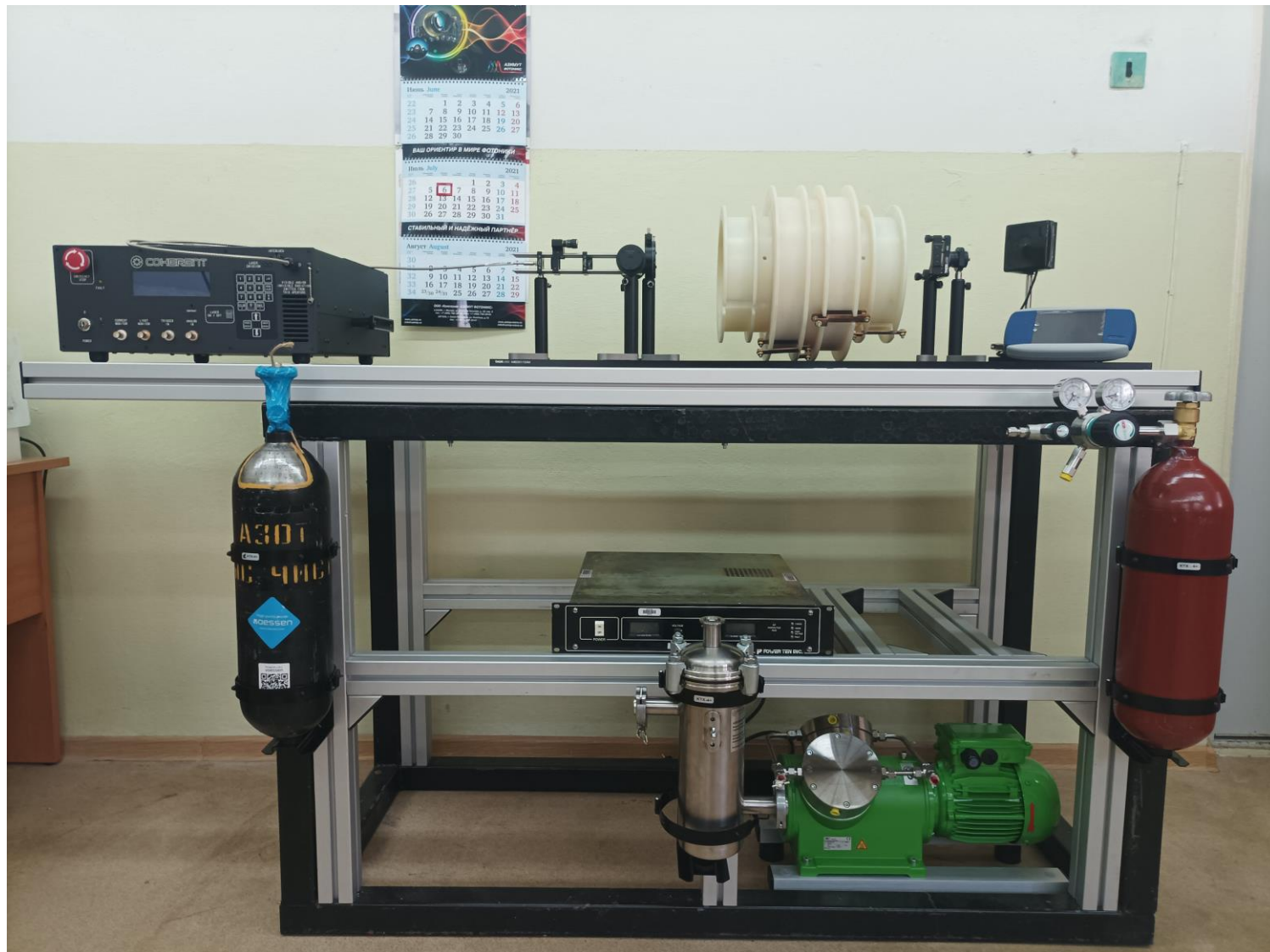
✓ Получение поляризованного ^{129}Xe (SEOP - метод) открывает возможность его использования в медицине как более дешевого газа в сравнении с поляризованным ^3He (современная томограф-диагностика легочных заболеваний, COVID-диагностика, в частности)

Общий вид стенда ^3He поляризатора



1- диодный лазер, 2 – оптическая сборка, 3 – магнит поляризатора, 4 – сухой спиральный насос, 5,8,9 – газовые баллоны с рабочими газами, 6 – мембранный вакуумный компрессор

Статус стенда ^3He поляризатора (июнь 2021)



Вакуумное оборудование

- – насос сухой спиральный Agilent IDP-7
- – азотная ловушка ВАКТРОН РЕ300 ДУ100 Газовое оборудование
- – мембранный вакуумный насос-компрессор N 630.1.2 ST.13E, KNF
- – клапан-натекатель вакуумный Chell CMV-VFM-1-P-33
- – регулятор давления для Гелия-3 ВЧ 6.0 – 2 шт
- – баллон ст. ГОСТ для азота, 5 л
- – клапан Valve, Chem-Vac™, Chem-Cap®, Hi-Vac, 90°, 0-8 mm Bore – 5 шт

Оптическая сборка

- – диодный лазер COHERENT FAP System, 795 нм, 35 Вт
- – кварцевое окно, покрытие NIR I (600 – 1050 нм), диаметр 30 мм, толщина 4 мм – 2 шт
- – поляризационный светоделительный куб, оправа 30 мм, рабочий диапазон 700 – 1300 нм
- – плоско-выпуклая линза, диаметр 1”, N-BK7, f = 75 мм, просветляющее покрытие 650 – 1050 нм
- – асферическая линза Geltech, f = 4.03 мм, NA = 0.64, просветляющее покрытие 600 – 1050 нм
- – кварцевая четвертьволновая пластинка нулевого порядка, диаметр 30 мм, 800 нм
- – диэлектрическое зеркало, диаметр 2”, отражение 750 – 1100 нм
- – поглотитель пучка, апертура 30 мм, рабочий диапазон 100 – 10000 нм, до 20 Вт – 2 шт
- – измерительная консоль Gentec-EO MAESTRO с измерительной головкой для измерения мощности лазерного излучения, диаметр 25 мм, до 40 Вт

Электронные устройства

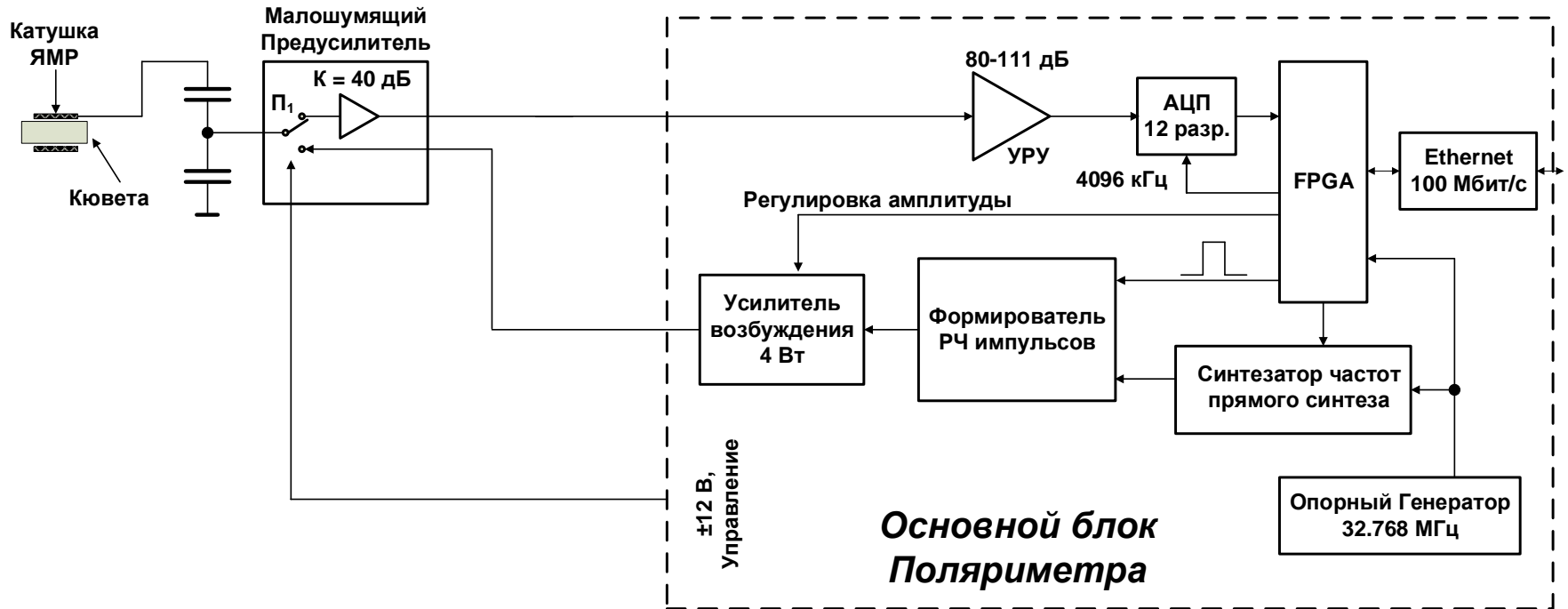
– электроника системы поляризации ядер ^3He и ^{129}Xe методом ЯМР

Материалы

- – рубидий металлический, ампула 40 мг (99.99+%) – 10 шт.
- – азот ОСЧ 6.0 (N2 99,9999%) в бал. 5 л – 1 шт., 4 490 руб
- - сверхчистый гелий-3 (в наличии)

Общая сумма затрат 40 000 \$. (ЛФВЭ) + диодный лазер COHERENT FAP System 30000 \$ (внешний источник)

Структурная схема ЯМР-поляриметра



Поляриметр включает в себя основной блок электроники и малошумящий Предусилитель. Основной блок генерирует РЧ импульсы возбуждения с калиброванной с точностью 2-3% вольт-секундной площадью

Амплитуда импульсов возбуждения регулируется в диапазоне от 5 до 20 В, длительность импульсов возбуждения регулируется с дискретностью 0.5 мкс.

Катушка на кювете с поляризованным газом является приемо-передающей. Переключение из режима передачи в режим приема осуществляется с помощью переключателя P_1

Малошумящий Предусилитель усиливает сигнал ЯМР в 100 раз
Усиление приемного тракта также является калиброванным. Поляриметр измеряет интеграл спектра сигнала и выдает результат относительных единиц.
Калибровка степени поляризации осуществляется путем получения сигнала от воды в той же кювете и с той же катушкой

Система измерения поляризации ^3He и ^{129}Xe методом ЯМР в слабом магнитном поле

- Система измерения поляризации ^3He должна обеспечивать измерение сигнала ЯМР ядер ^3He в газообразном состоянии в магнитном поле 100 гаусс (соответствующая частота ЯМР - 324,4 кГц) и измерение равновесного сигнала ЯМР протонов воды на той же частоте при комнатной температуре с точностью 3-4% для калибровки поляризации по ЯМР сигналу протонов воды
- Наряду с этим система измерения поляризации должна осуществлять аналогичные ЯМР-измерения ядер ^{129}Xe в газообразном ксеноне-129 в магнитном поле 100 гаусс (соответствующая частота ЯМР 117,8 кГц)
- Потери поляризации ядер ^3He и ^{129}Xe за одно измерение не должны превышать 1-2% от ее величины

Поляризованные ионы ${}^3\text{He}^{++}$

Some history

Laval University group (Canada, Slobodrian et al., 1984) polarized ${}^3\text{He}$ atoms in the metastable state 2^3S_1 (lifetime of 7860 s) with electron spin $J = 1$ and then ionized them to ${}^3\text{He}^+$ in an electron impact ionizer

The subsequent ionization to ${}^3\text{He}^{++}$ was effected by stripping in the base of the Van de Graaf accelerator at 7.5 MV

More inspiring example from Saclay (France)

SATURNE group (P.Y. Beauvais et al., 1994) reported the results of tests conducted with use of the known HYPERION polarized ion source fed with ${}^3\text{He}$ gas.

The ionizer with a reflex electron beam yielded mostly ${}^3\text{He}^+$ ions with a pulsed beam current of $50 \mu\text{A}$ and pulse duration 1 ms

Поляризованные ионы ${}^3\text{He}^{++}$

- ✓ Источники поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ для инжекции в ускорители высоких энергий должны иметь сравнительно высокую интенсивность
- ✓ На данный момент наиболее продвинутым является вариант источника, разрабатываемый в BNL. В источнике используется ионизация поляризованных атомов гелия в ионизаторе с электронным пучком (EBIS) в магнитном поле 5 Т. Поляризованные атомы получают методом оптической накачки атомов гелия-3 в метастабильном состоянии в сильном магнитном поле. Планируется получить интенсивность поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ около $2 \cdot 10^{11}$ ионов в импульсе и поляризацией 70% для ускорения пучка поляризованных ионов в RHIC

Ионизатор ${}^3\text{He}^{++}$

V. P. Ovsyannikov

Параметры ионного пучка:

Интенсивность ионного пучка – $1 \times 10^9 - 5 \times 10^9$ частиц в импульсе

Длительность ионного импульса – 250 микросекунд

Частота повторения – 1 Гц – 0,1 Гц

Электронно-лучевая ионная ловушка.

Для удовлетворительной интенсивности емкость ионной ловушки – 10^{10} эл. зарядов.

Ток электронного пучка – 0,3-0,5 А.

Энергия электронного пучка – 1 -3 кэВ.

Первеанс электронного пучка – $(5 - 10) A/V^{3/2}$

Ионизация.

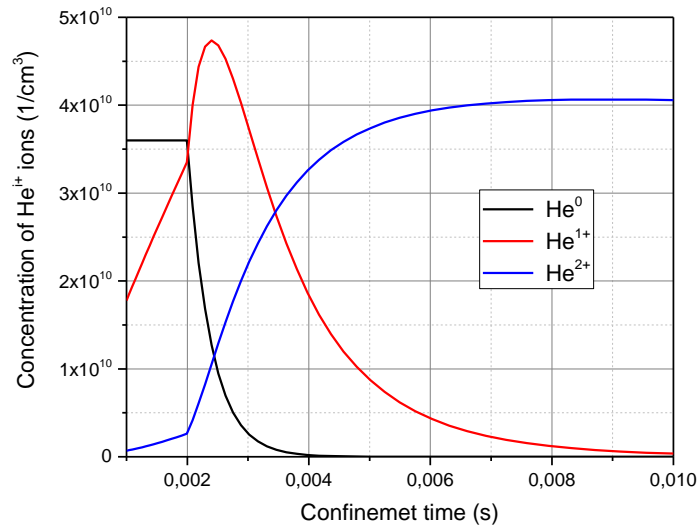
Расчеты ионизации проводились по программе IBIS_T для следующих параметров ионной ловушки:

- Базовый вакуум- 1×10^{-8} mbar (остаточный газ водород)

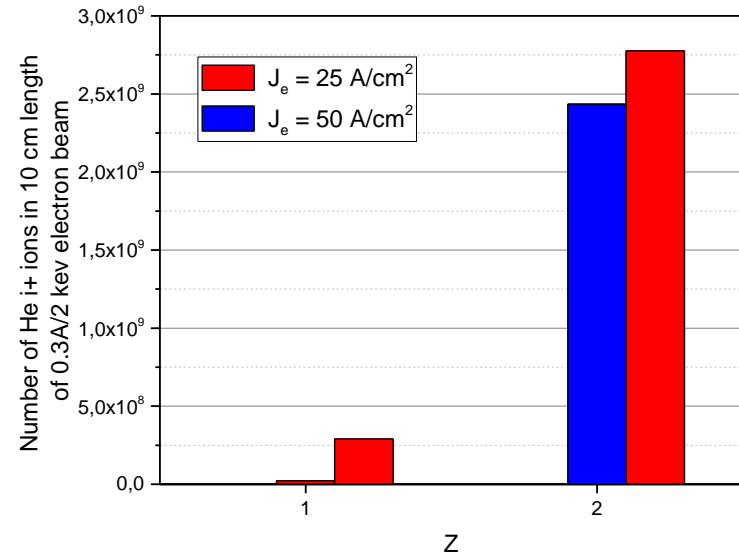
- Импульсный ввод рабочего газа ${}^3\text{He}$ представляет собой импульс длительностью 1-2 мс, при давлении в диапазоне 1×10^{-7} mbar- 1×10^{-5} mbar

Результаты моделирования для ионной ловушки с электронным током 0,3 А, энергией электронов 2 кэВ и электронной плотностью 25 А/см²

Давление в ловушке варьировалось в диапазоне 1×10^{-7} mbar- 1×10^{-5} mbar



a

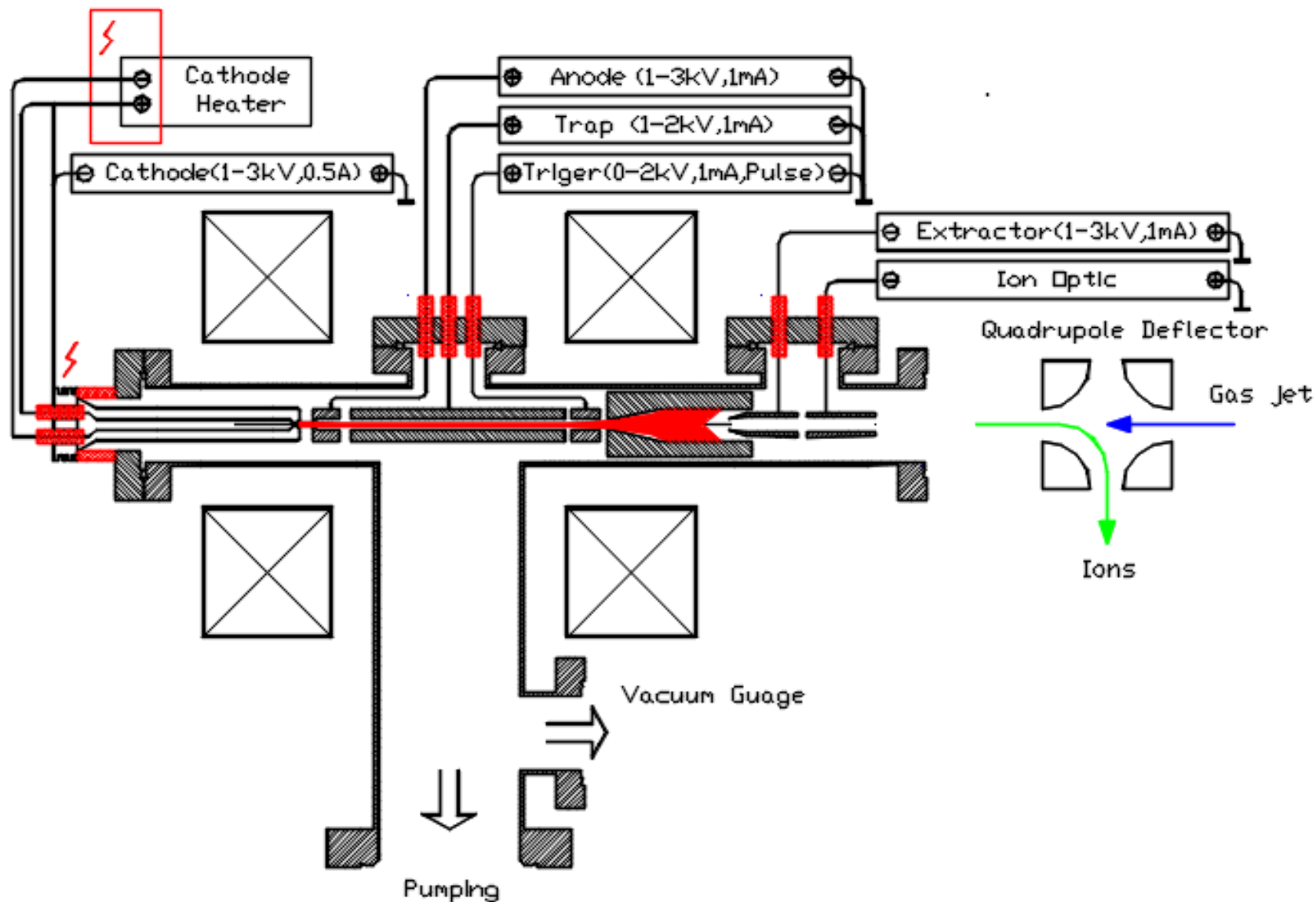


b

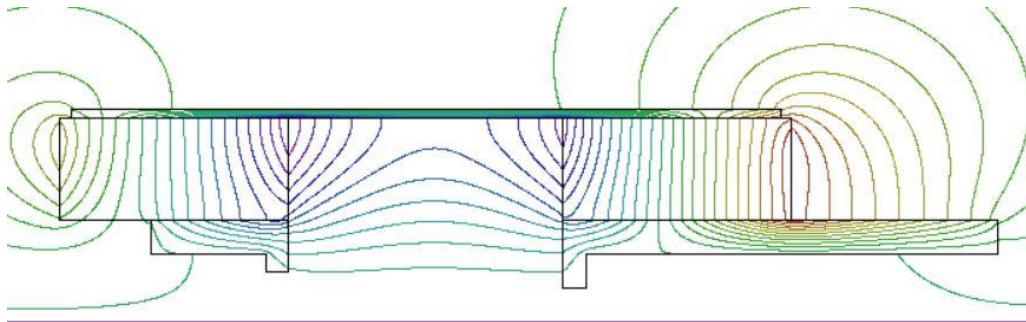
Ионизация 3He. а – Эволюция заряда в зависимости от времени удержания. Время инжекции составляет 2 мс. Давление за это время составляет 1×10^{-6} мбар.

б - Спектр в частицах для ионной ловушки длиной 10 см. Время ионизации составляет 10 мс.

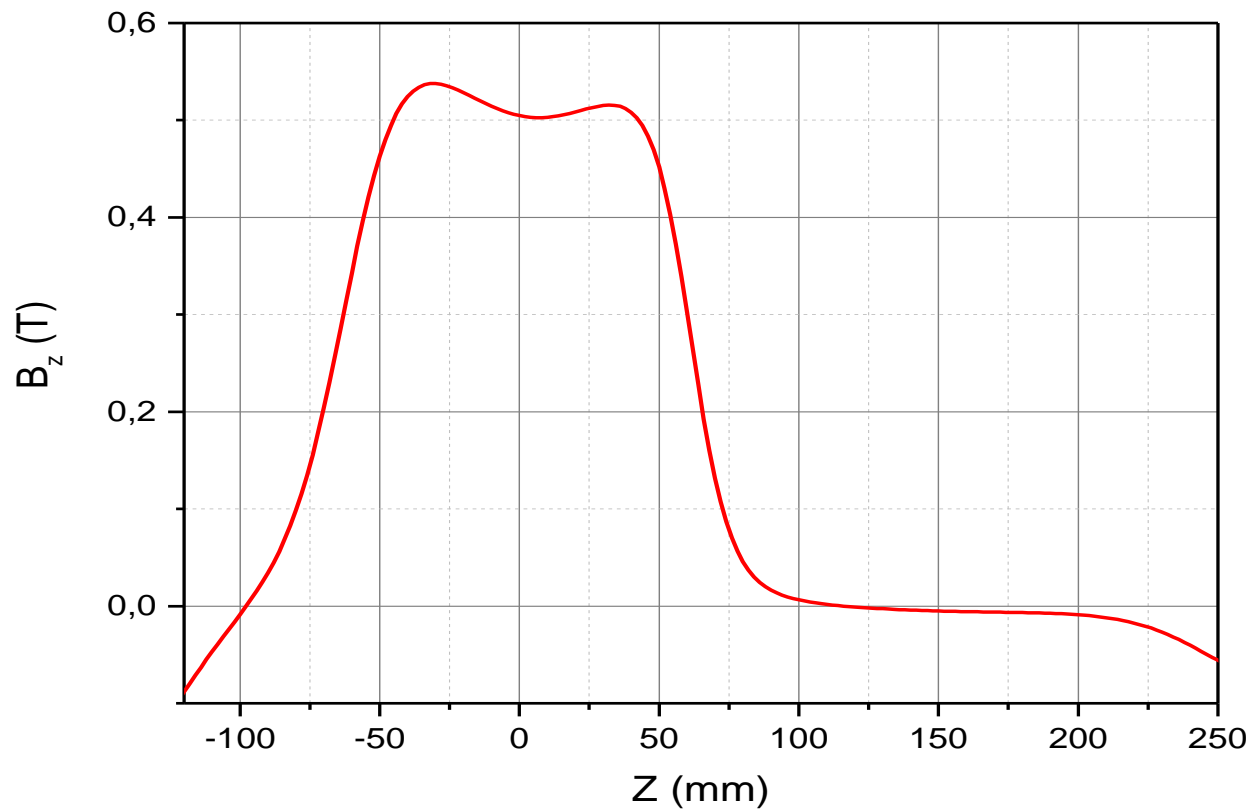
Схема Ионизатора ${}^3\text{He}^{++}$



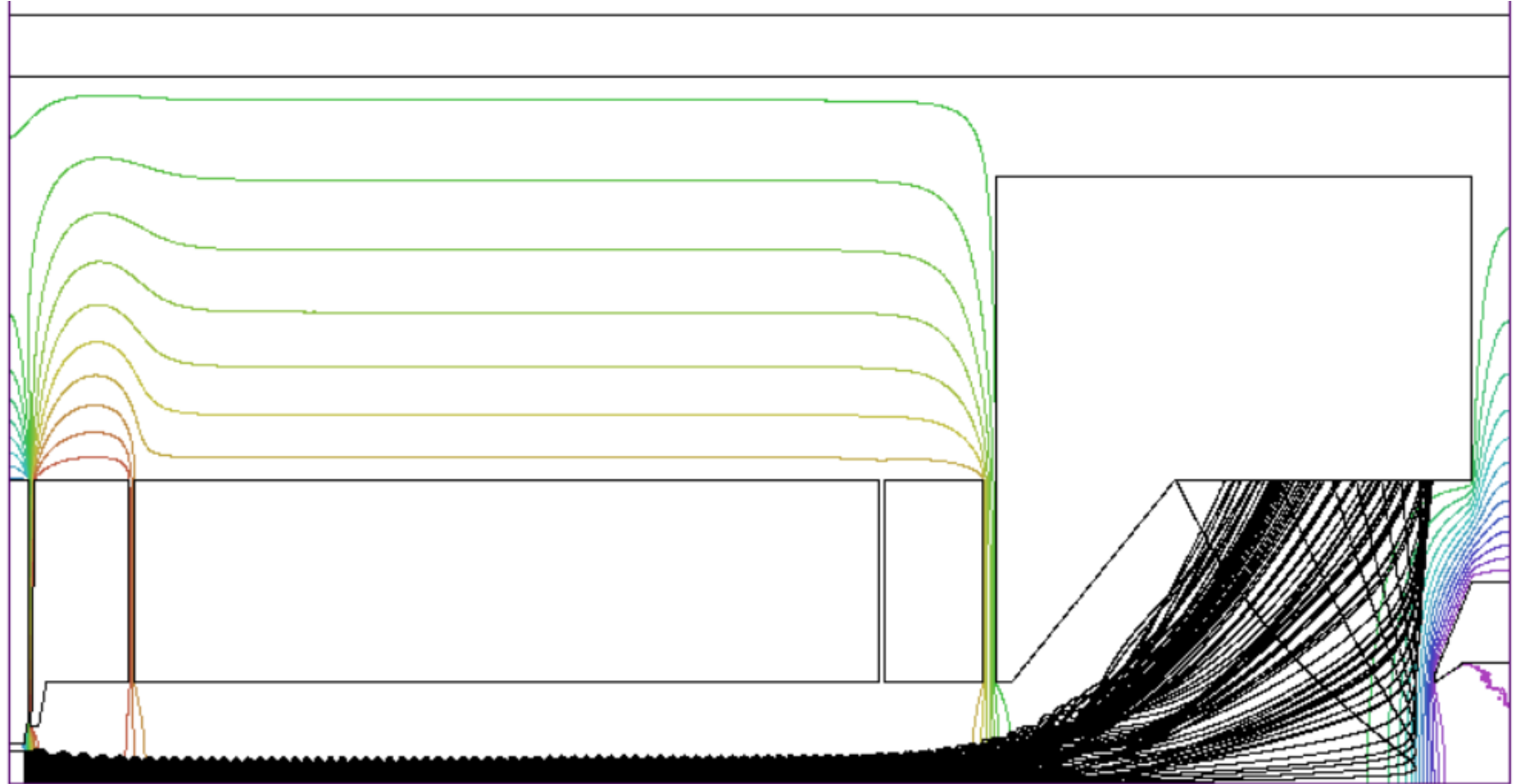
Магнитная фокусирующая система



Магнитное поле



Электронный пучок



Электронные траектории для 0.3 А и 2 keV

Вакуумная система.

Стандартная технология получения вакуума 10^{-8} мбар. Прогрев не нужен

Вакуумный стандарт CF66, CF35. (KF)

Состав:

- турбонасос 50л/с
- форвакуумный насос
- датчик вакуума (до 1×10^{-8} мбар)

Электроника.

Режим работы – импульсный

Длительность импульса электронного тока 100мс

Частота 0.1Гц

Состав:

- блок накала катода с выходом, изолированным на напряжение до 3кВ.
(параметры блока зависят от выбора катода)
- блок питания катода 0.5 А, 3кВ,
- потенциал анода 1-3кВ, 1мА,
- потенциал ловушки 1-2кВ, 1мА,
- блок управления ловушкой 0 – 2кВ, 1мА, импульс 1-100мс, частота 0.1 – 1 Гц,
- потенциал экстрактора 1-4кВ, 1мА,
- ионная оптика 1 – 3кВ, 1мА(?)

Инжекция рабочего газа – вдоль оси источника в виде газового импульса длительностью 1-2 мс.

Процесс инжекции гелия обеспечивает давление около $(1-2) \times 10^{-6}$ mbar в области ионной ловушки.

После ионизации ионы экстрагируются из источника и выводятся перпендикулярно оси источника с помощью квадрупольного дефлектора.

Предыдущий опыт



Аналогичная магнитная и электронно –оптическая система была реализована для Dresden EBIS -A

Статус проекта поляризованного He3 в ЛФВЭ ОИЯИ (июль 2021)

Поляризатор $^3\text{He}^{++}$

Базовое оборудование - 70-75 % приобретено

Электроника системы измерения поляризации ^3He и ^{129}Xe методом ЯМР в слабом магнитном поле (ИЯФ, Новосибирск – срок исполнения ноябрь 2021)

$^3\text{He}^{++}$ поляризованная мишень

Необходимо техническое задание (ЛФВЭ)

Ионизатор $^3\text{He}^{++}$

Техническое задание

Базовое оборудование - 25-30 % в наличии

Срок изготовления Ионизатора 4-5 месяцев по Договору