

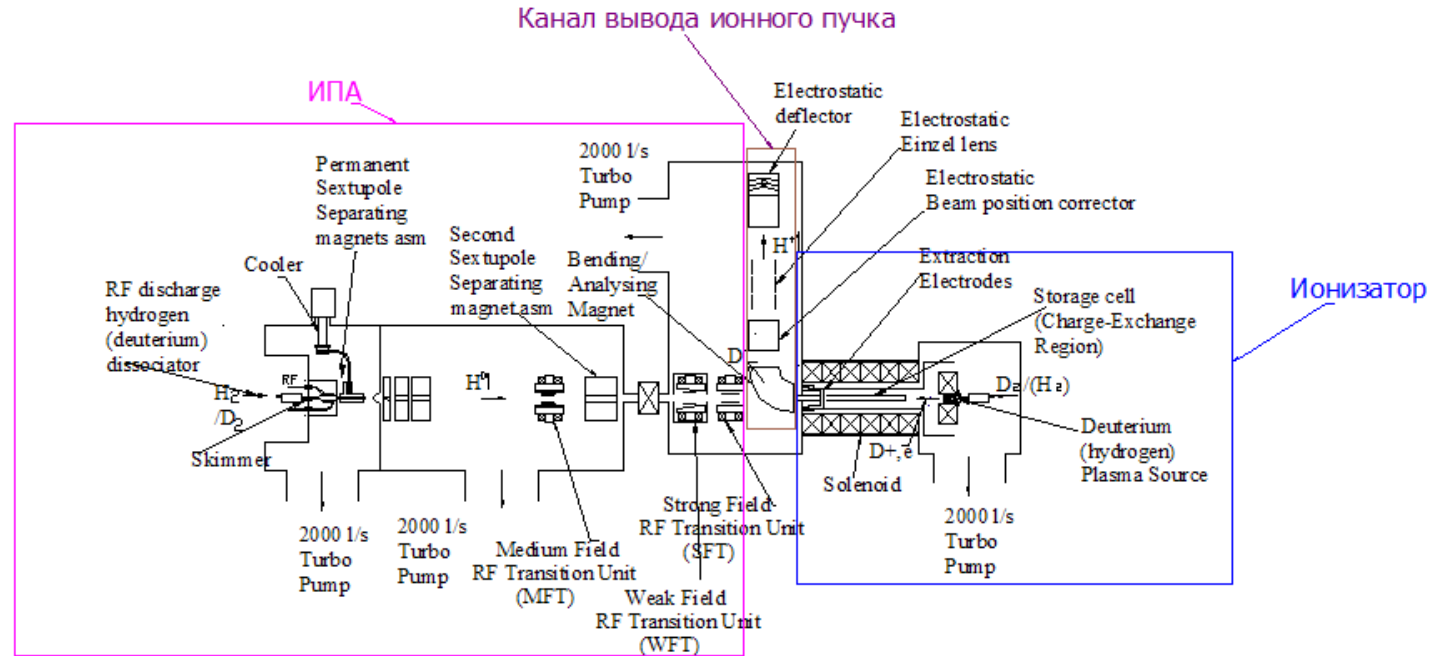
Перезарядный плазменный ионизатор  
с Т-образной накопительной ячейкой

А. С. Белов  
ИЯИ РАН, Троицк, Москва

30.10.2024

## Схема SPI

- В источнике SPI используется схема с инъекцией поляризованных атомов в накопительную ячейку, установленную на оси соленоида перезарядного плазменного ионизатора, как показано на рисунке. Устройства канала вывода поляризованного ионного пучка в такой схеме находятся между источником поляризованных атомов и ионизатором.
- При этом атомарный пучок инжектируется в накопительную ячейку в ионизаторе через полюса поворотного магнита и через электроды ионно-оптической системы (ИОС) ускорения ионов.
- Расстояние между источником поляризованных атомов и накопительной ячейкой можно уменьшить, используя Т-образную накопительную ячейку. Качество пучка поляризованных ионов можно при этом улучшить.



## Качество пучка поляризованных ионов

$$\Phi K = P^2 I / \text{Эм}^2$$

$P$  – поляризация,  $I$  – ток,  $\text{Эм}$  – эмиттанс пучка поляризованных ионов

Учет эмиттанса требуется, когда есть акцептансные ограничения. В этом случае прохождение пучка пропорционально  $(\text{Акс}/\text{Эм})^2$ .

Для коллайдеров с поляризованными пучками критерием качества является  $\Phi K^2$ .

### Поляризация:

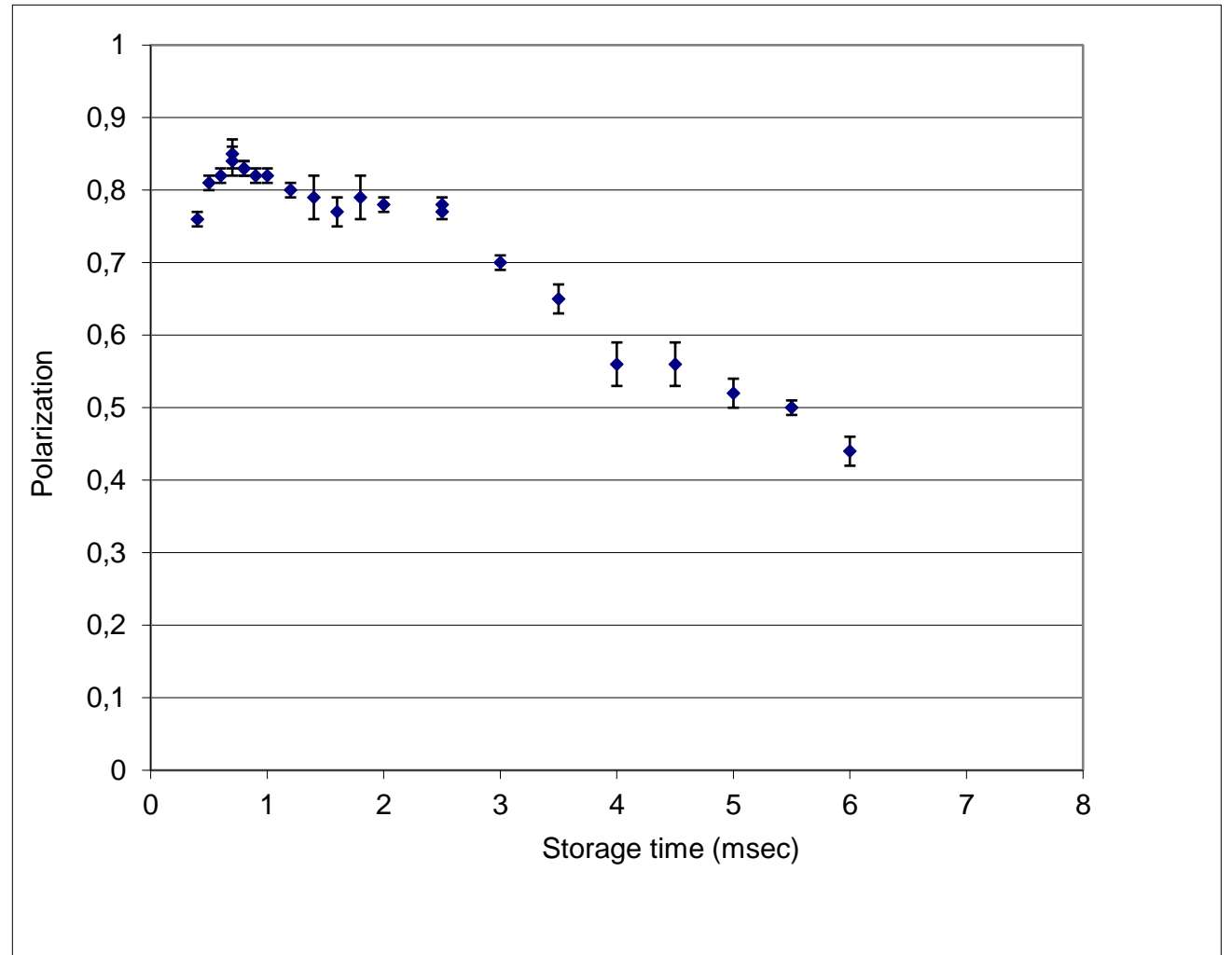
- Поляризация атомов в атомарном пучке зависит от степени сепарации атомов в разных спиновых состояниях разделительными магнитами, от эффективности блоков вч переходов.
- Для источников с атомарным пучком поляризация атомов достигает 90% и выше.
- Эффективность вч переходов достигает 99%, но важно иметь он-лайн поляриметр для их быстрой настройки (магниты блоков вч переходов имеют гистерезис, настройка резонаторов ...).
- Поляризация протонного пучка снижается из-за разбавления поляризованных ионов фоновыми неполяризованными протонами, которые образуются в плазме ионизатора из водородосодержащих молекул остаточного газа ( в частности, при диссоциации в плазме молекул воды). Для увеличения поляризации следует увеличивать отношение тока поляризованных протонов к фоновому току.

Измерения поляризации пучка из источника поляризованных протонов с накопительной ячейкой ИЯИ РАН (A. S. Belov et. al., 1999):

Накопительная ячейка из алюминиевого сплава диаметром 15 мм, длиной 250 мм.

Деполяризация в ячейке незначительна при времени накопления до 2.5 мсек

Максимальная поляризация получена при времени накопления ~1 мсек.



## Интенсивность

$$I_{D^+\uparrow} = I_{H^+} W_{ce} = I_{H^+} t \sigma_{ce}$$

$I_{H^+}$  - ток пучка неполяризованных ионов

$t$  – толщина мишени, образованной поляризованными атомами в нак. ячейке

$\sigma_{ce}$  - сечение перезарядки протонов на поляризованных атомах дейтерия

Стационарный пучок:

$$t = I_{D^0\uparrow} \frac{L_{sc}/2}{C_{sc}}$$

$L_{sc}$  -длина ячейки

$C$  - вакуумная проводимость ячейки

$$t \sim \frac{I_{D^0\uparrow}}{\sqrt{T/M}} \frac{L_{sc}^2}{D_{sc}^3}$$

$T, M$  – температура и масса атомов в ячейке

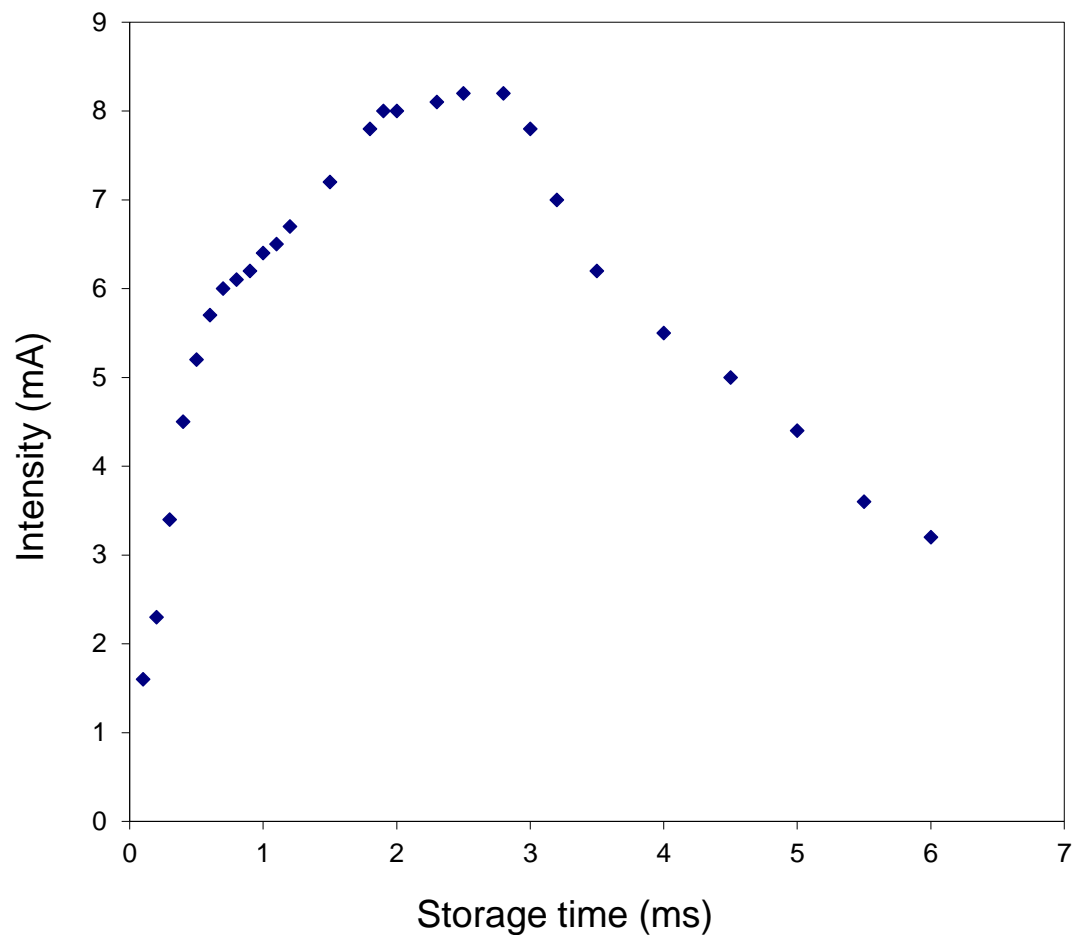


Интенсивность пучка из источника поляризованных протонов с накопительной ячейкой ИЯИ РАН (A. S. Belov et. al., 1999):

$$I_{H+\uparrow} = I_{D+} t \sigma_{ce}$$

$$I_{D+} = 40 \text{ mA}, t = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \sigma_{ce} = 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2.$$

$$I_{H+\uparrow} = 0.2 I_{D+}$$



# Эмиттанс

## Механизмы роста эмиттанса пучка поляризованных ионов:

1. Разброс поперечных скоростей поляризованных ионов, возникающих в плазме в результате реакции перезарядки и при транспортировке в плазме к ускоряющим электродам.

$$\mathcal{E}_{M_1} \sim R_{em} \left( \frac{kT_i}{A} \right)^{1/2}$$

2. Возникновение азимутальной скорости ионов в пучке из-за выхода из продольного магнитного поля.

$$\mathcal{E}_{M_2} \sim R_{em}^2 B_{em}$$

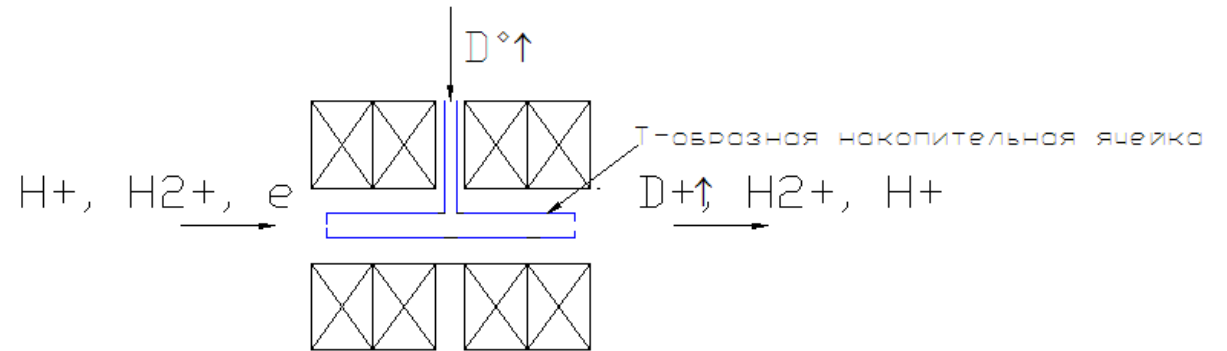
3. Возникновение разброса поперечных скоростей в ионно-оптической системе из-за радиальной неоднородности плазменного шнура в магнитном поле в ионизаторе в сеточных ИОС.

$$\mathcal{E}_{M_3} \sim R_{em} \Delta X'$$

4. Аберрации при формировании и транспортировке ионного пучка.

# T-образная ячейка

- Инжекция атомарного пучка и выход ионов плазмы из ячейки в этой геометрии развязаны.
- Диаметр атомарного пучка  $\sim 10$  мм
- Эмиссионный диаметр можно изменять варьируя распределение магнитного поля.
- Если уменьшить эмиссионный диаметр в два раза (8мм вместо 16 мм), то ожидаем уменьшение эмиттанса в два раза и увеличение ФК пучка в 4 раза.

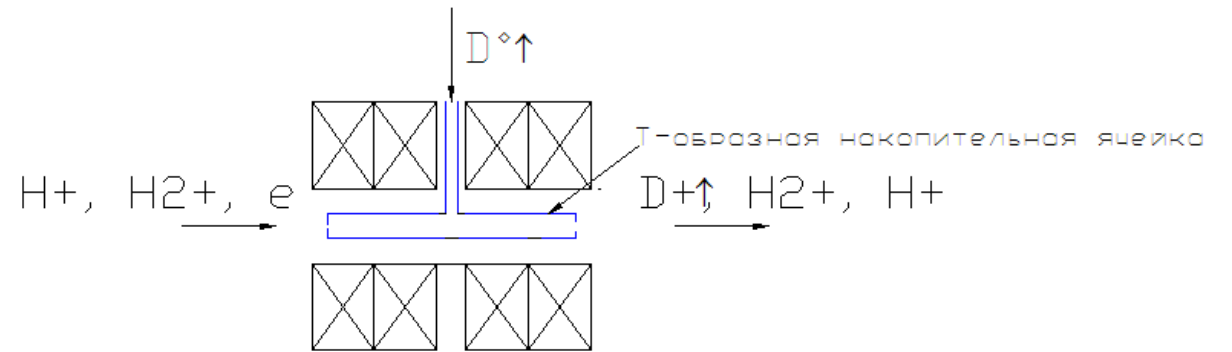




## T-образная ячейка

- Проводимость ячейки для выхода поляризованных атомов уменьшается.

- Это приводит к росту плотности атомов и увеличению толщины мишени из поляризованных атомов.



# Схема источника с Т-образной ячейкой для накопления поляризованных атомов

К преимуществам схемы с Т-образной ячейкой также относятся:

1. **Возможность установки поляриметра Брейт-Раби постоянно** и соответствующая возможность настройки блоков вч переходов, что важно для повышения поляризации ионных пучков из источника.
2. **Отсутствие жестких ограничений (таких, как в SPI) на размеры поворотного магнита**, что существенно для повышения энергии ускоренного в ИОС ионного пучка.

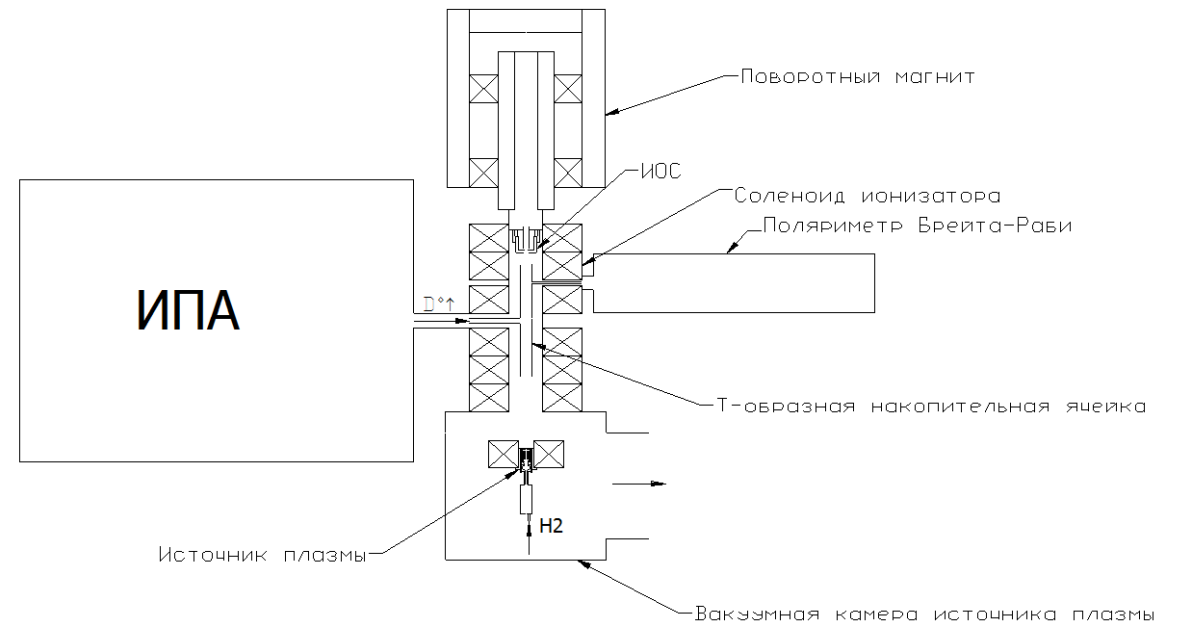


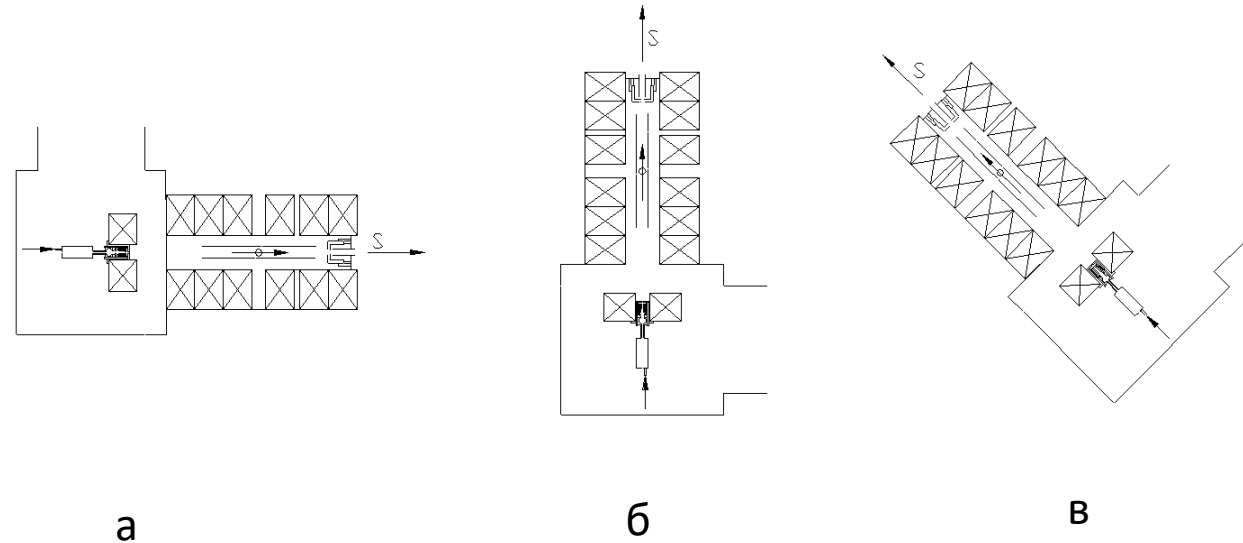
Схема источника поляризованных ионов с Т-образной накопительной ячейкой (вид сверху).

## Варианты схемы канала вывода поляризованного пучка при использовании Т-образной накопительной ячейки

- Адиабатичность спинового движения для тепловых атомов водорода и дейтерия приводит к тому, что направление квантования спина поляризованных ионов, возникающих в ионизаторе, совпадает с направлением магнитного поля соленоида ионизатора.

- В SPI положение соленоида ионизатора по отношению к ИПА фиксируется: ось соленоида совпадает с осью ИПА.

- В источнике с Т-образной накопительной ячейкой положение оси соленоида можно менять, соответственно, будет изменяться начальное направление оси квантования спина поляризованных протонов (дейтронов).



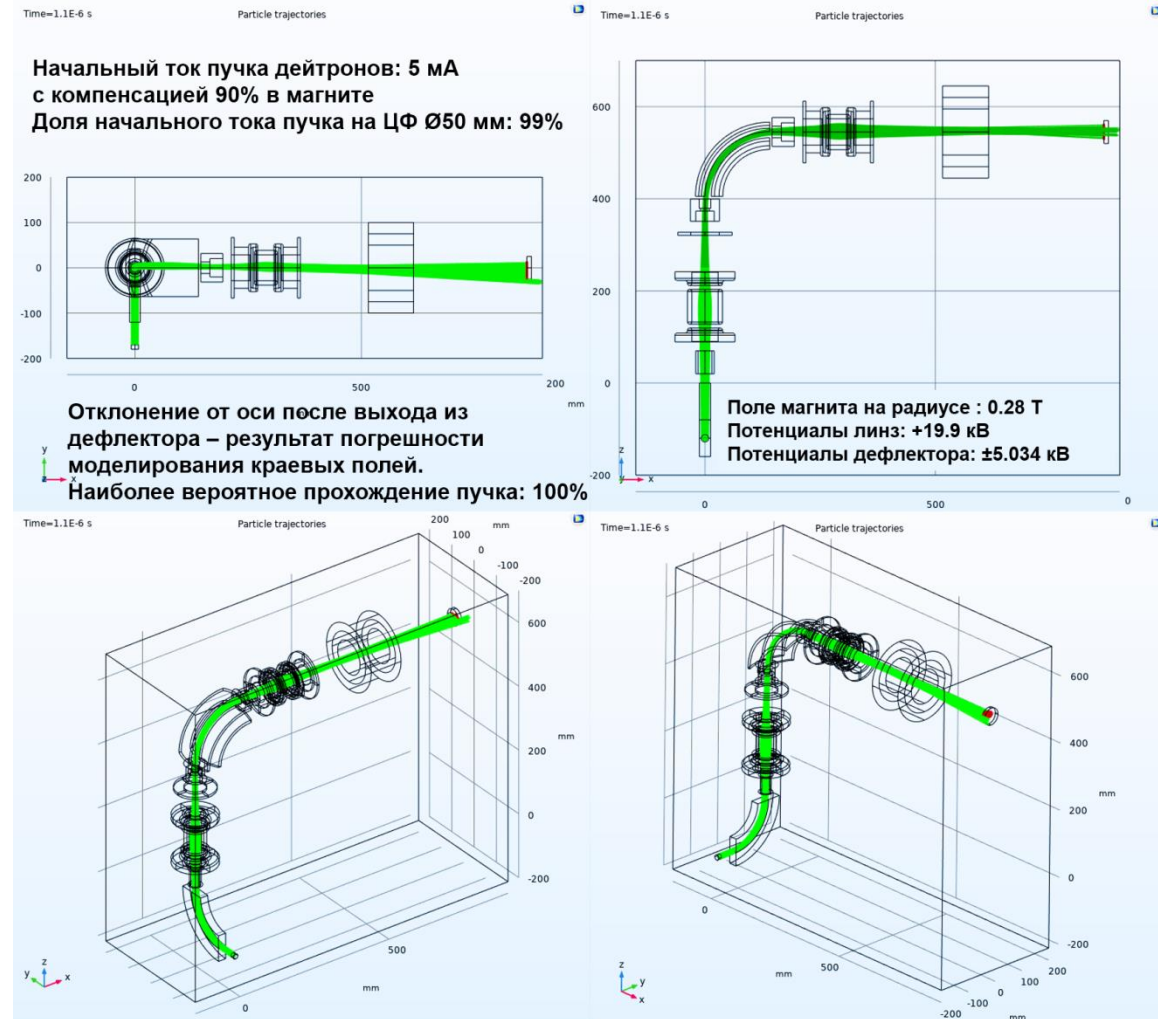
Различные возможные пространственные положения соленоида ионизатора в схеме источника с Т-образной ячейкой (вид со стороны поляриметра Брейта-Раби).

## Варианты схемы канала вывода поляризованного пучка при использовании Т-образной накопительной ячейки

1. Накопительная ячейка в горизонтальной плоскости,  $90^\circ$  поворотный магнит,  $90^\circ$  эл. ст. deflectор и спин-ротатор (как в SPI).
2. Накопительная ячейка в вертикальном направлении, магнитная линза и  $90^\circ$  эл. ст. deflectор.
3. Накопительная ячейка в вертикальном направлении,  $90^\circ$  поворотный магнит и фильтр Вина для поворота спина поляризованных ионов в вертикальное направление.

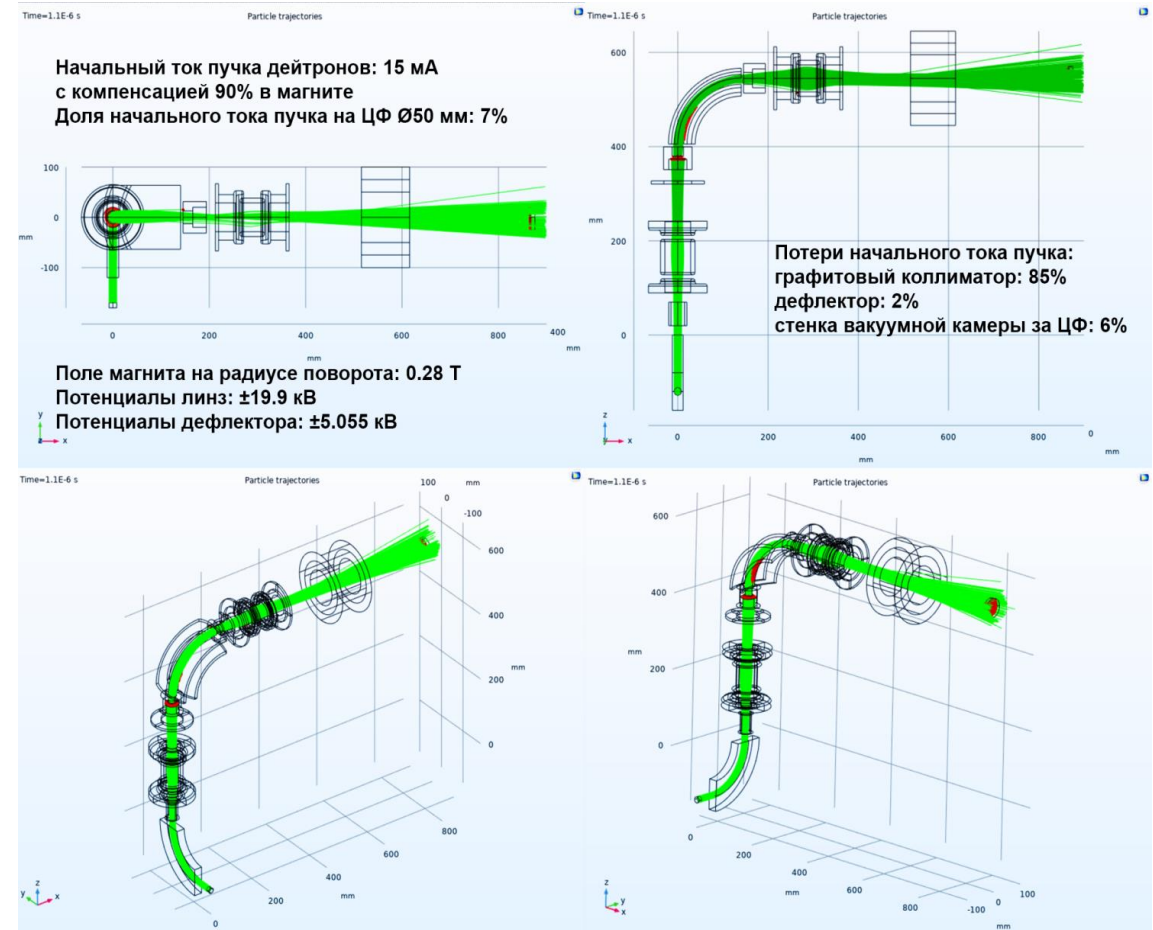
## Схема с поворотным магнитом, эл. ст. дефлектором и спин-ротатором

В этой схеме, также как в SPI, ячейка располагается в горизонтальной плоскости,  $90^\circ$  поворотный магнит поворачивает ускоренный пучок из горизонтальной плоскости в вертикальное направление, **при этом в магнитном поле поворотного магнита происходит разделение поляризованного ионного пучка от сильноточного неполяризованного**. Затем поляризованные ионы поворачиваются в эл. ст. дефлекторе на  $90^\circ$  снова в горизонтальную плоскость, а спин и у дейтронов и протонов остается в плоскости, перпендикулярной импульсу. Затем при прохождении спин-ротатора (соленоида) спин дейтронов или протонов поворачивается в вертикальное направление. Угол поворота спина в спин-ротаторе для протонов равен  $19^\circ$ , а для дейтронов -  $13^\circ$ . На рисунке показан пример моделирования прохождения пучка дейтронов с током 5 мА через такую ионно-оптическую систему (Гаврилов С. А. –COMSOL MP).



# Схема SPI с поворотным магнитом, эл. ст. дефлектором и спин-ротатором

- Ограничение тока пучка ионов, транспортируемых в канале вывода, наступает при суммарном токе пучка дейтронов и ионов  $H2+$  на уровне 10 мА (примерно 5 мА ионов  $H2+$  и 5 мА  $D+$  - предел тока пучка по пространственному заряду).
- На рисунке показан пример моделирования транспортировки пучка дейтронов с начальным током 15 мА. Потери равны 93% от начального тока.
- Потери можно уменьшить, увеличив энергию ускоренного в ИОС ионизатора ионного пучка до  $\sim 45$  кэВ. Можно ожидать увеличения тока в  $(45/27)^{3/2} = 2.15$  раза до 20 мА суммарного тока ионного пучка ( $D+$  ↑ и  $H2+$ ).
- Ограничение тока по пространственному заряду относится ко всем вышеперечисленным схемам вывода пучка из источника, так как и в эл. ст. дефлекторе и в фильтре Вина компенсация пространственного заряда пучка нарушается.



## Схема с поворотным магнитом, эл. ст. дефлектором и спин-ротатором

- Для ускорения ионного пучка до 45 кэВ требуется подать потенциал 45 кВ относительно высоковольтной платформы, на источник плазмы, накопительную ячейку и плазменный электрод ИОС.

- Чтобы уменьшить проблемы с пробоями в соленоиде ионизатора и возможные проблемы с влиянием высокого напряжения на плазму в накопительной ячейке целесообразно соленоид ионизатора также разместить под потенциалом 45 кВ.

- Высоковакуумный насос камеры источника плазмы с форвакуумным насосом целесообразно оставить под потенциалом высоковольтной платформы, также как оборудование ИПА, оборудование канала вывода пучка из источника и поляриметр.

- Необходимо установить несколько вакуумно-плотных изоляторов на 45 кВ, а также опорные изоляторы на 45кВ для соленоида и вакуумной камеры источника плазмы.

- Магнитное поле на оси пучка с энергией 45 кэВ в поворотном магните с радиусом поворота пучка 15 см  $B=0.144$  Тл. При зазоре между полюсами на оси пучка  $d_m=2.5$  см ампер-витки обмоток магнита  $I W_m = 2.9 \cdot 10^3$  А·витков.

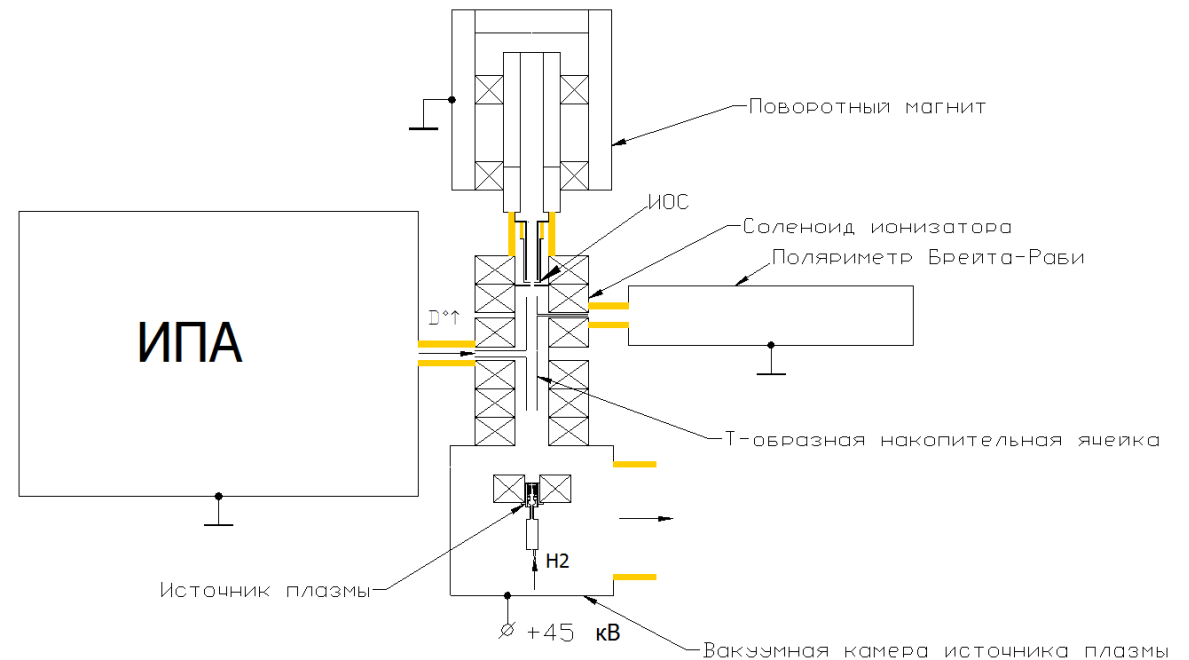


Схема источника поляризованных ионов с Т-образной накопительной ячейкой (вид сверху). Выделены изоляторы на 45 кВ.

## Схема с магнитной линзой и эл. ст. дефлектором

- В этой схеме ось соленоида ионизатора и ось накопительной ячейки расположены вертикально, направление квантования спина протонов и дейтронов тоже вертикально.
- Поэтому прохождение пучка через магнитную линзу (соленоид) не изменяет направление спина дейтронов и протонов.
- После прохождения эл. ст. дефлектора спин протонов и дейтронов направлен вертикально, а импульс – горизонтально.
- Фокусировка ионного пучка магнитной линзой различна для ионов с разной массой, протоны фокусируются сильнее, чем дейтроны. Поэтому фокусировка ионов с заданной массой в отверстие коллиматора приводит к разделению по массам ионов в пучке после прохождения коллиматора. Степень разделения (доля неполяризованных ионов в поляризованном пучке) зависит от силы линзы, эмиттанса поляризованного пучка и размера отверстия в коллиматоре.

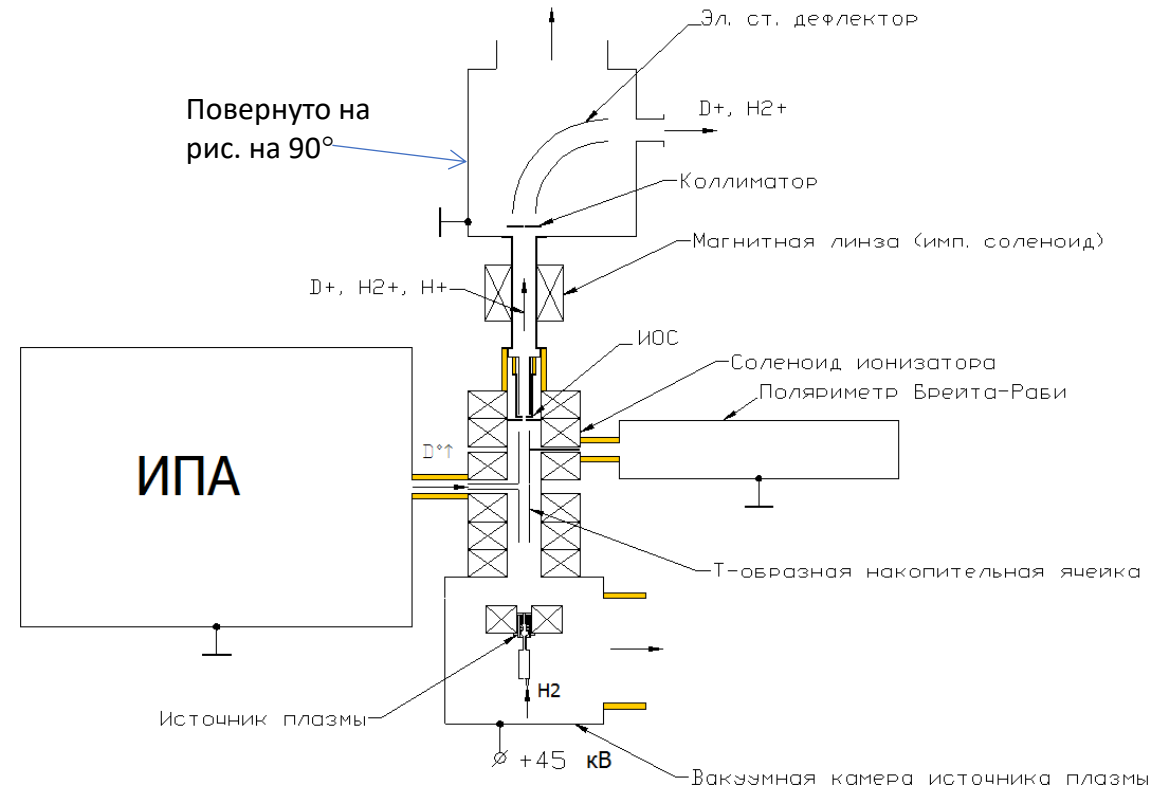
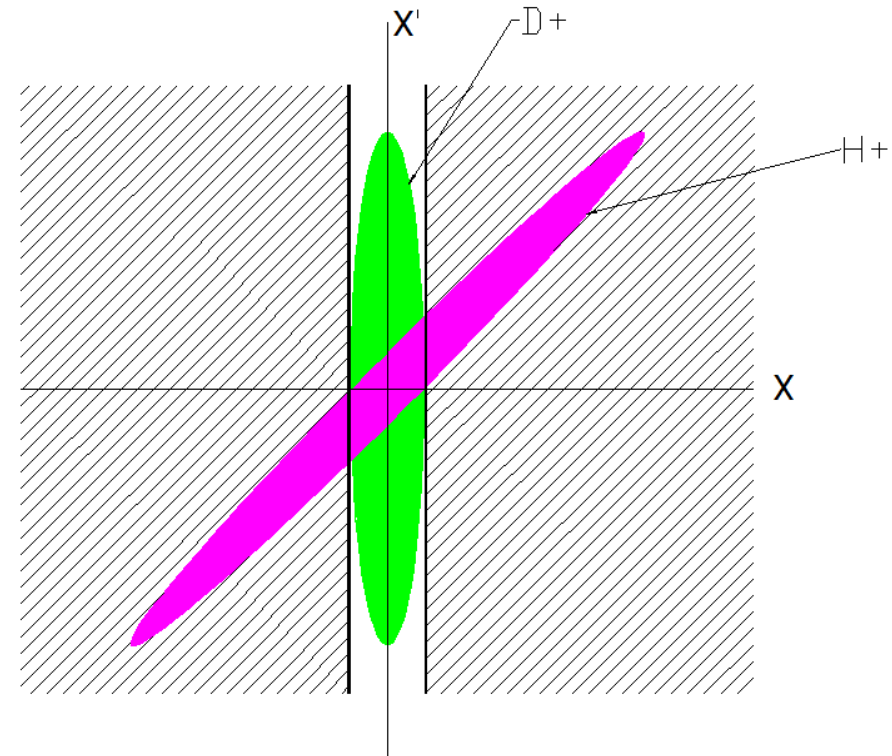


Схема ионизатора с вертикально расположенным соленоидом, магнитной линзой и эл. ст. дефлектором.



## Схема с магнитной линзой и эл. ст. дефлектором

- Рисунок фазовых портретов ионных пучков в области коллиматора иллюстрирует частичное разделение по массам после прохождения коллиматора.
- Требуется уменьшение тока пучка неполяризованных ионов  $H^+$  до уровня  $\sim 1\%$  от начального тока без потерь поляризованных ионов.
- Сила линзы зависит от интеграла магнитного поля. Оценочно, для поляризованных дейтронов, при фокусном расстоянии  $\sim 15$  см ампер-витки магнитной линзы должны быть около  $70 \cdot 10^3$  А·витков ( 200 витков, 350 А).
- Эл. ст. дефлектор: для энергии ионов 45 кэВ, расстоянии между пластинами - 4 см и радиусом поворота 15 см, напряжение на пластинах дефлектора -  $\pm 12$  кВ.



Фазовые портреты ионов  $D^+$  и  $H^+$  при прохождении через коллиматор после фокусировки магнитной линзой.

## Схема с поворотным магнитом и фильтром Вина

- В этой схеме ось магнита ионизатора направлена вертикально. После ускорения в ИОС пучок ионов разделяется по массам в  $90^\circ$  поворотном магните, после магнита пучок проходит через фильтр Вина, в котором спин поляризованных дейтронов (протонов) поворачивается на  $67^\circ$  в вертикальное направление.
- Магнит фильтра Вина создает магнитное поле, направленное перпендикулярно скорости ионов и в горизонтальной плоскости. Вектор электрического поля направлен вертикально.
- Интеграл магнитного поля для 45 кэВных дейтронов в фильтре Вина должен быть равен  $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ Т} \cdot \text{м}$  (для поворота спина дейтронов на  $67^\circ$ ). При длине полюсов вдоль оси пучка 20 см  $B=1,7 \text{ кГс}$ . При расстоянии между полюсами в области пучка  $d_M=6 \text{ см}$ , ампер-витки обмотки магнита фильтра Вина  $IW= 8,1 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{витков}$ .
- Электрическое поле в фильтре Вина  $E= 3.5 \text{ кВ/см}$ . При расстоянии между пластинами  $d_E= 4 \text{ см}$ , напряжение на пластинах  $\pm 7 \text{ кВ}$ .

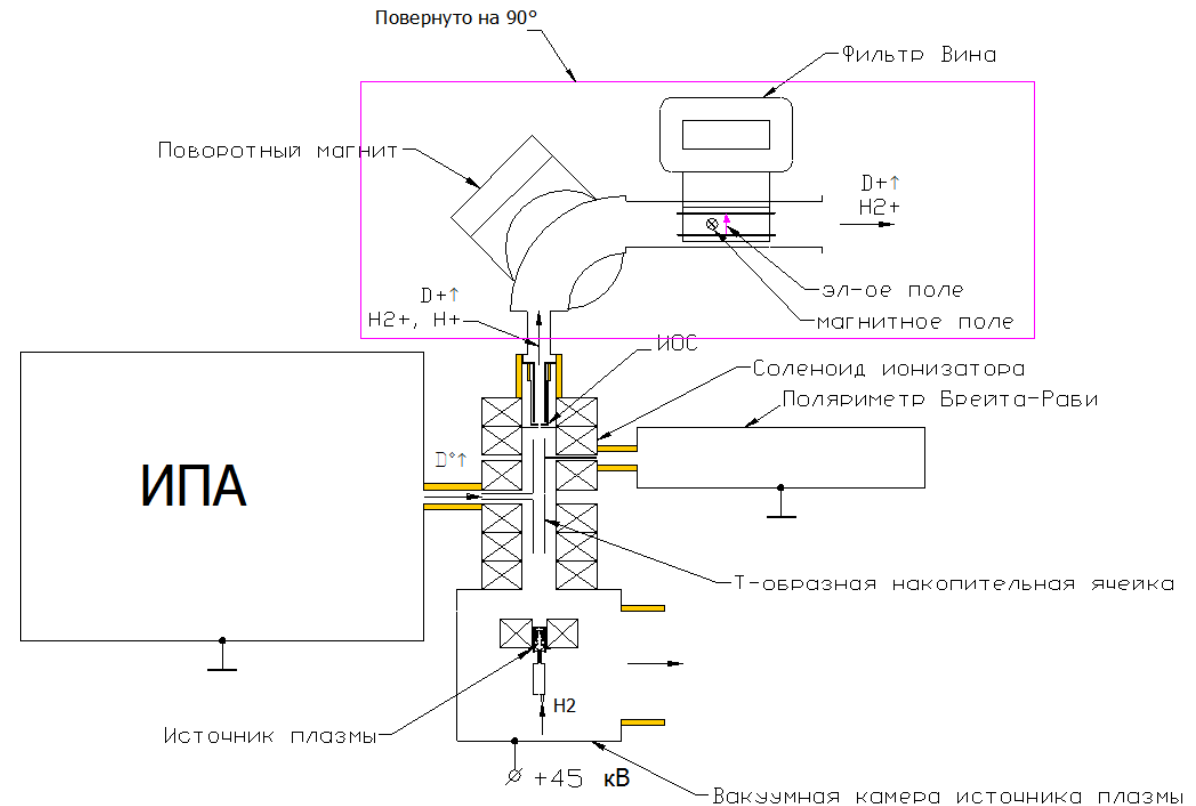
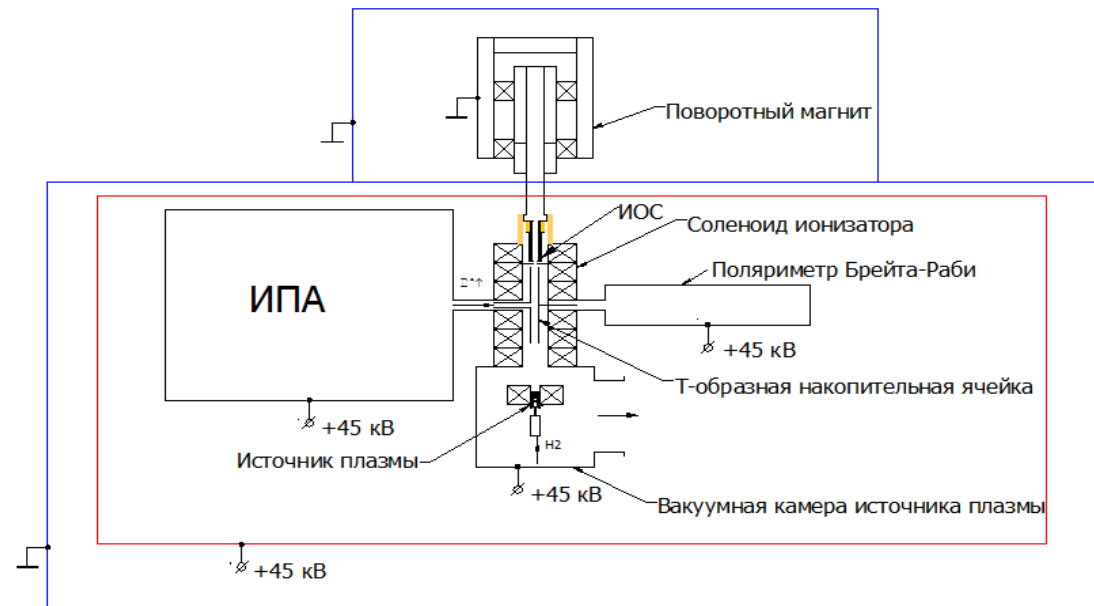


Схема ионизатора с вертикально расположенным соленоидом, поворотным магнитом и фильтром Вина.

Схема с поворотным магнитом, эл. ст. дефлектором и спин-ротатором (ИПА, ионизатор, поляриметр под потенциалом +45 кВ).



## Выводы:

- Схема с T – образной ячейкой имеет ряд преимуществ: меньшее расстояние между ИПА и входом в накопительную ячейку, возможность постоянной установки и использования поляриметра Брейта-Раби, возможность уменьшить эмиссионный диаметр и благодаря этому уменьшить эмиттанс поляризованного пучка, отсутствие ограничений на размеры ИОС и поворотного магнита.
- В рассмотренных схемах канала вывода ионного пучка из источника присутствуют узлы с электрическим полем (эл. ст. дефлектор или фильтр Вина), в которых заведомо нарушается компенсация пространственного заряда ионного пучка электронами. Поэтому существует ограничение по току пучка на транспортировку в канале вывода, особенно существенное для поляризованных дейтронов, так как, во-первых, масса дейтронов в два раза больше, чем у протонов, а, во-вторых, вместе с дейтронами из источника извлекаются ионы  $H_2^+$  на уровне 5-10% от тока неполяризованного протонного пучка. Снизить ограничение интенсивности можно, увеличивая начальную энергию ионных пучков до 35-45 кэВ.

- Для вывода пучка поляризованных ионов из ионизатора с вертикальным направлением спина можно использовать три схемы канала вывода:

1. Канал как в SPI , то есть при горизонтальном расположении соленоида ионизатора канал включает  $90^\circ$  поворотный магнит, эл. ст. дефлектор и соленоид-спин-ротатор.
2. При вертикальном положении соленоида ионизатора, канал включает магнитную линзу (импульсный соленоид) и эл. ст. дефлектор.
3. При вертикальном положении соленоида ионизатора , канал включает поворотный  $90^\circ$  поворотный магнит и фильтр Вина.

Схема с магнитной линзой и эл. ст. дефлектором, по-видимому, дает худшее разделение на поляризованного интенсивного пучка от поляризованного. Степень разделения зависит, в частности, от эмиттанса разделяемых пучков. Априори расчеты и моделирование будут содержать неопределенные параметры. Более надежными представляются схемы с поворотным магнитом для разделения ионных пучков по массам. Для выбора между схемой с фильтром Вина и SPI-type требуется моделирование транспортировки пучка через фильтр Вина с учетом краевых эффектов, которые могут влиять на рост эмиттанса пучка из-за «неправильной» компенсации эл. ст. и магнитных сил в краевых полях.