САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

Малогабаритные приборы изучения солнечного ветра для наноспутников типа CubeSat

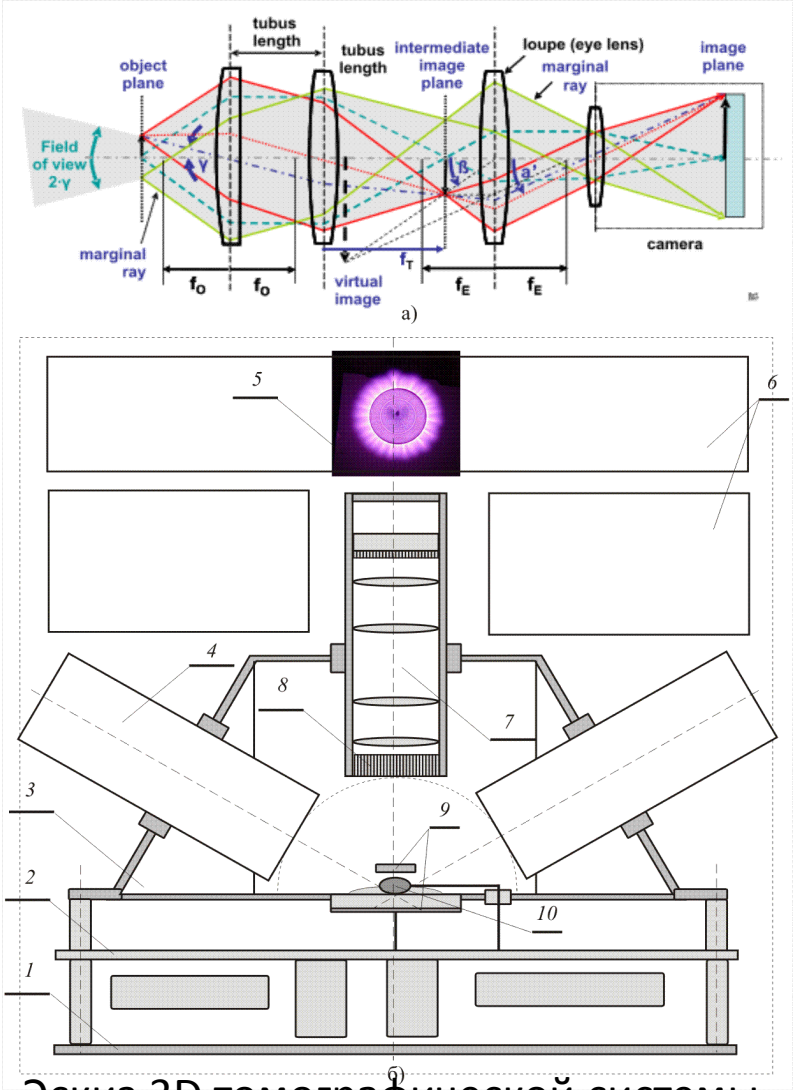
Профессор, д.т.н. Филонин О.В.

Самара, 2020 г.

ЗАДАЧИ ИСЛЕДОВАНИЙ

1. Разработка и исследование методами математического моделирования комплекса трёхмерных детекторов для анализа параметров солнечного ветра.
2. Исследование индуцированных плазменных разрядов в смесях инертных газов под воздействием протонов, гамма квантов, порождённых коронарными выбросами Солнца на околоземных орбитах.
3. Разработка многопроволочных трековых детекторов, для анализа параметров солнечного ветра (потоков протонов, гамма квантов) для наноспутников формата CubeSat.
4. Анализ и исследование бортовых возможностей наноспутников формата CubeSat для обработки данных с трёхмерных многопроволочных трековых детекторов.
5. Анализ требований к возможностям маневрирования нано аппаратов на заданных орбитах с точки зрения эффективности анализа параметров солнечного ветра

3D ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ОКОЛОСОЛНЕЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ



Эскиз 3D томографической системы формирования исходных данных

3D томографическая система сбора исходных данных содержит:

- плиту основание 1 на которой расположены плата высоковольтного блока питания 2,
- газовая камера 3.
- В последнюю вмонтировано пять цифровых микроскопов 4, 7, позволяющие собирать двумерные проекционные данные в сферо – тангенциальной геометрии.
- В основании камеры находятся электроды 9, разделённые изолятором и газовым промежутком, в котором инициируется газовый разряд.

В каждом микроскопе в качестве входного элемента используется стекловолоконная планшайба. Это позволяет реализовать плоскопараллельную гео-метрию формирования исходных проекционных данных.

Для оптически прозрачной плазмы:

$$I(p,\xi,\lambda)=\int_{\Delta l}\varepsilon(x,y,\lambda)dl$$

Преобразование Радона ***R*** от функции $\varepsilon\left(x,y,\lambda\right)$

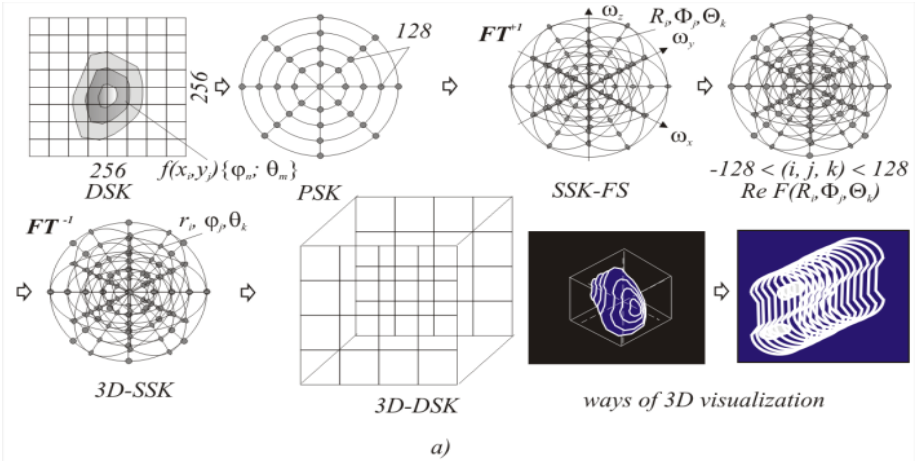
$$R\left[\varepsilon(x,y,\lambda)\right]=I(p,\xi,\lambda)$$

$$\varepsilon(x,y,\lambda)=\frac{1}{2\pi^2}\int_0^{\pi}d\xi\int_0^{\infty}\frac{\partial I(p,\xi,\lambda)}{\partial p}\cdot\frac{dp}{p_0-p}$$

$$p_0=r\sin(\theta-\xi)$$

$$\varepsilon(x,y,\lambda)=\frac{1}{2\pi}BH_Y D_Y I(p,\xi,\lambda)$$

ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПОРЯДКА ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ИСКОМОГО 3D РАСПРЕДЕЛЕНИЯ



а)

б)

Сущность метода реконструкции трёхмерных искомых функциональных зависимостей сводится к следующему.

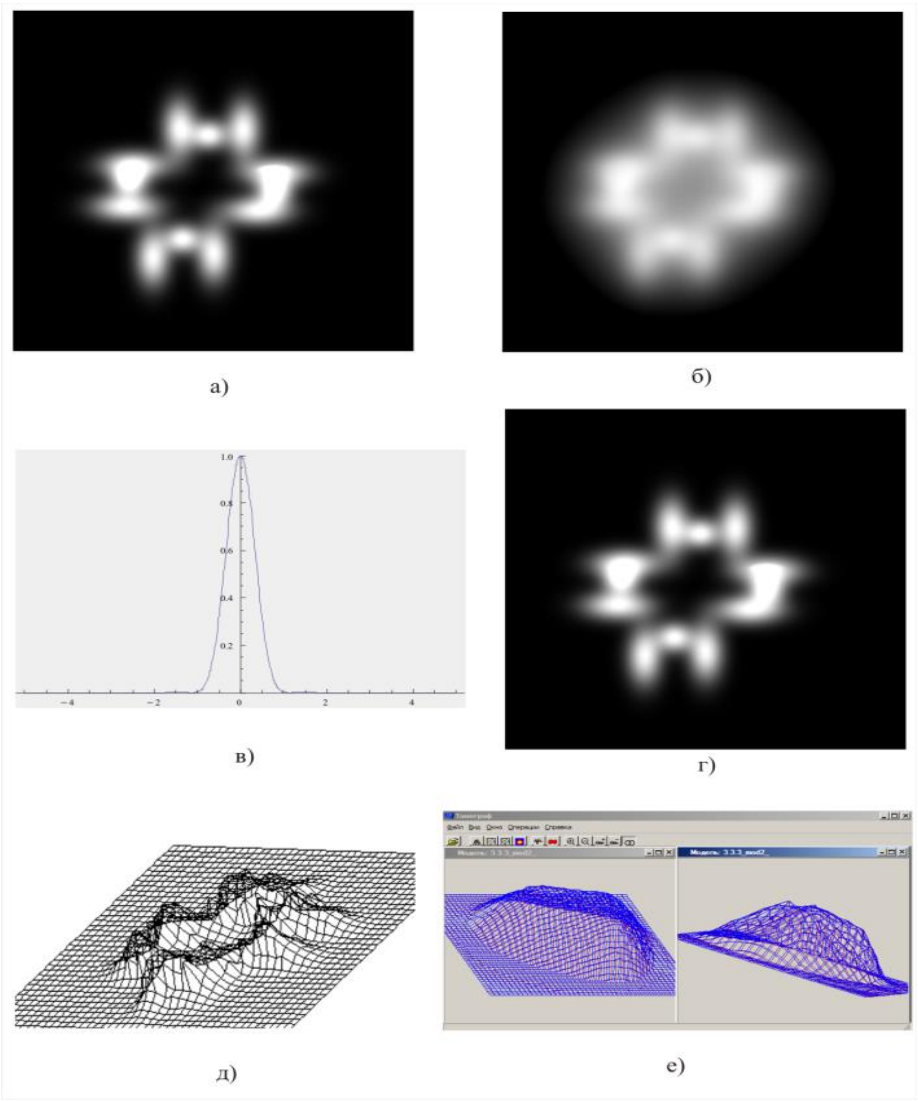
1 Полученный со спутника одномерный массив предварительно восстанавливается до «исходных» двумерных проекций заданных на полярных сетках в формате 128×128 отсчётов.

2. Для доопределения исходных объёмов данных можно воспользоваться теоремой о центральном сечении. Следовательно, для вычисления недостающих проекционных данных необходимо вычислить одномерные Фурье преобразования от всех одномерных массивов – «диаметров» для каждой 2D проекции, т.е.:

$$F^{+1}(P_n(r\delta(r-r_0);\Delta\varphi_i)) =$$

$$= \int_{R_0=1} P_n(r\delta(r-r_0);\Delta\varphi_i)\,\mathrm{e}^{-2\pi i(\omega-\omega_0)(r-r_0)}dr$$

ИЛЛЮСТРАЦИЯ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСКОМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ



а) – исходное (модельное) распределение интенсивности в заданном сечении,

б) – реконструкция по 4 2D – проекционным данным,

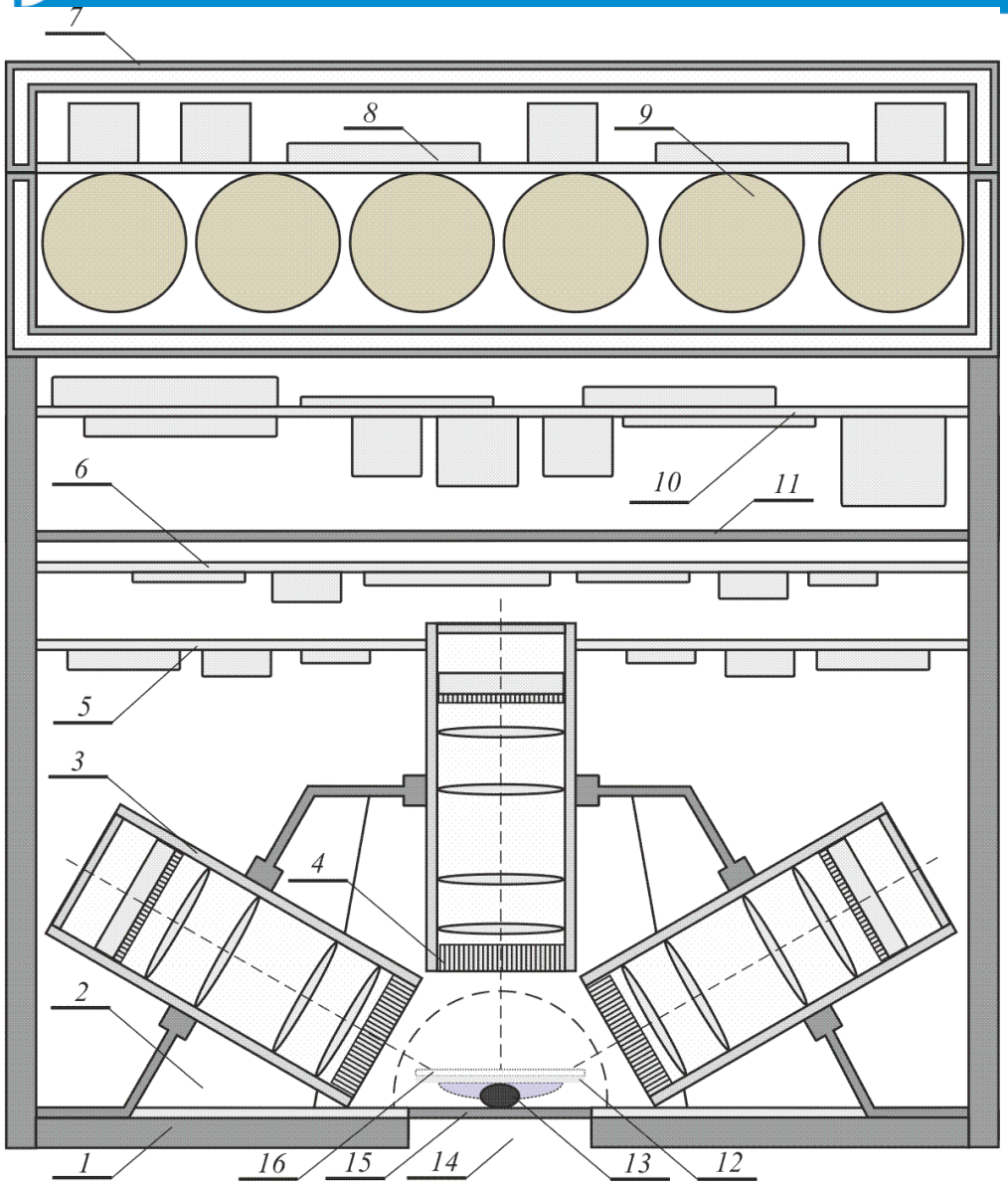
в) – вид ядра,

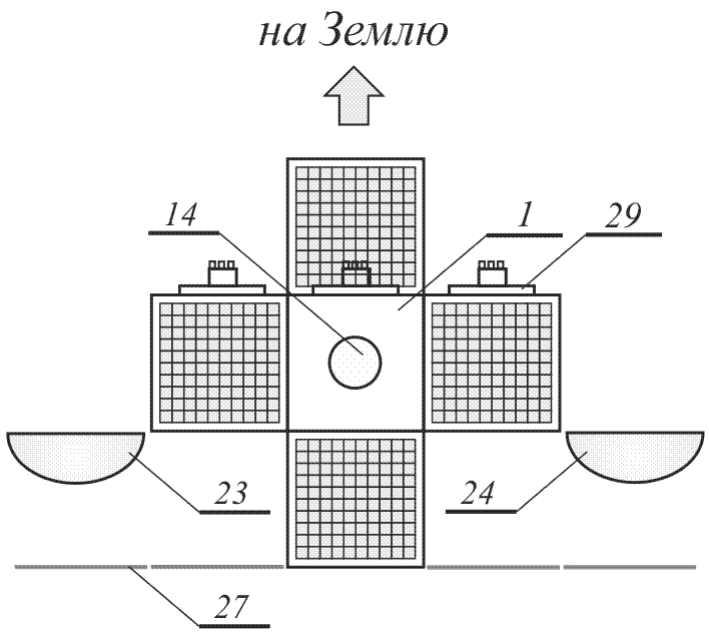
в) – реконструкция по одному набору данных,

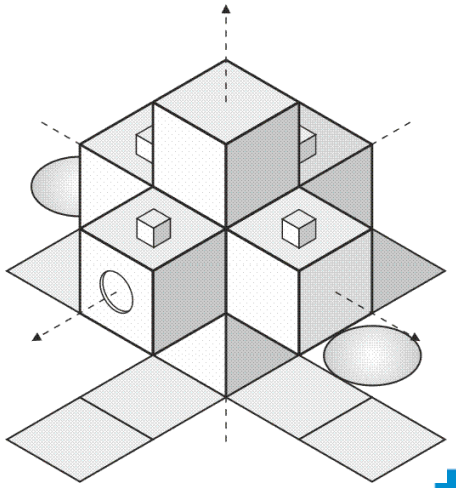
д) – проекционное отображение сечения в заданном ракурсе,

е) – стереоскопическое (проекционное) представление

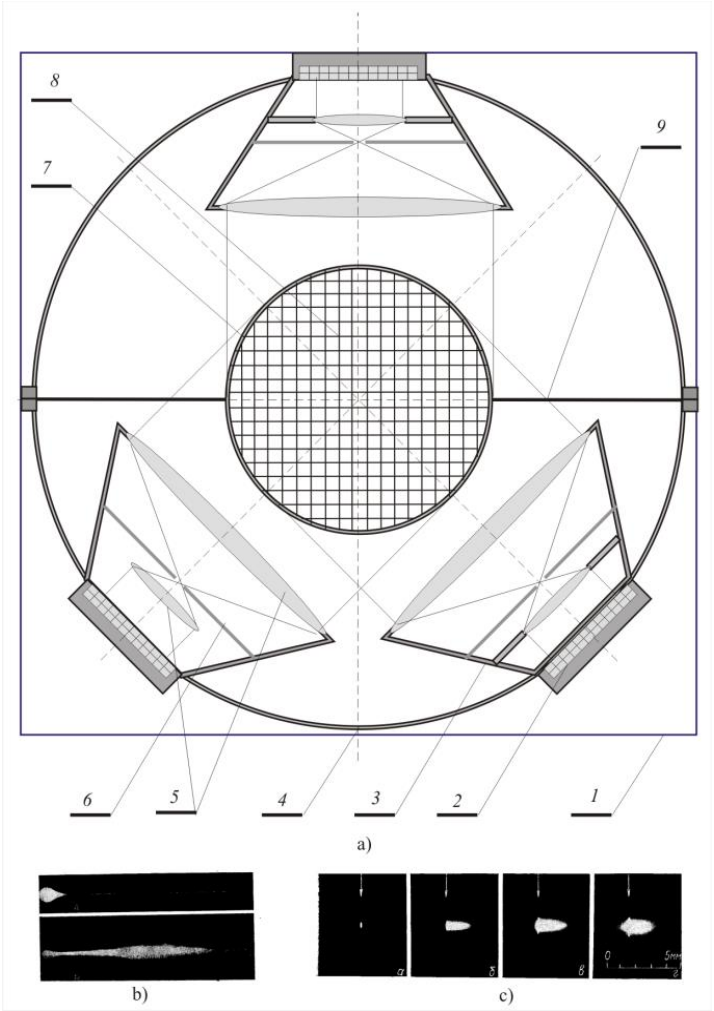
КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НС ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



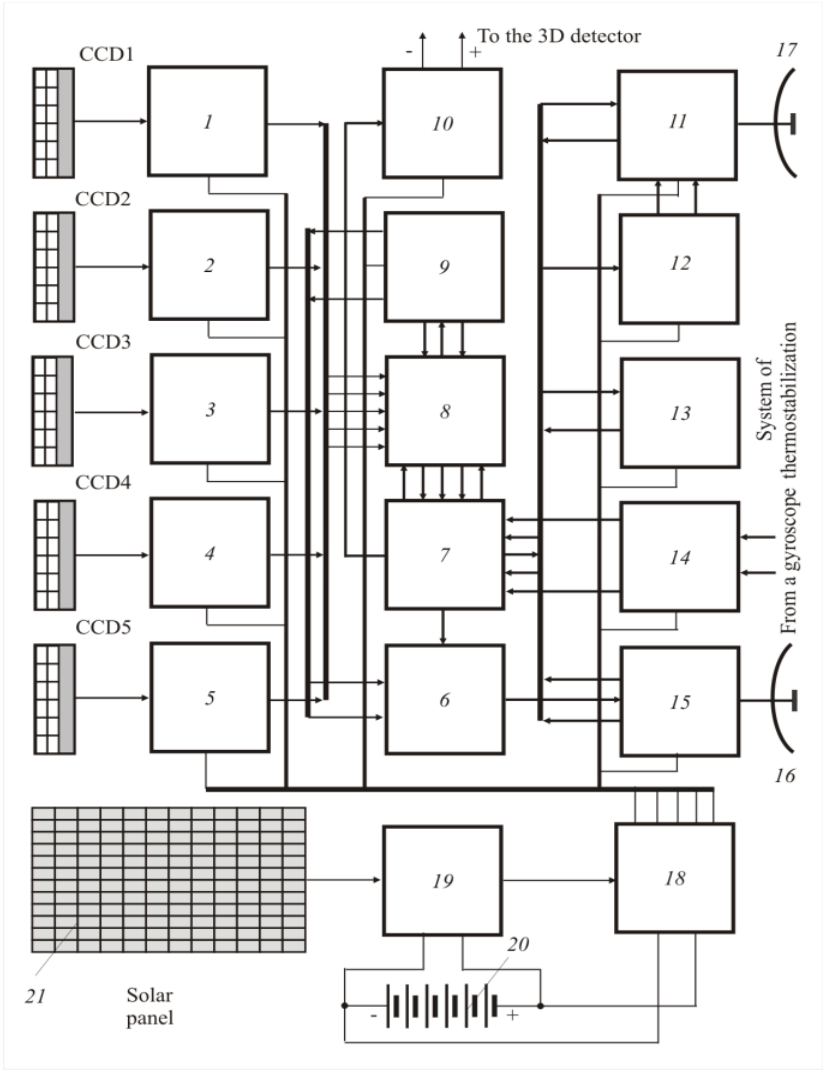




МАЛОГАБАРИТНЫЙ 3D МНОГОПРОВОЛОЧНЫЙ ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

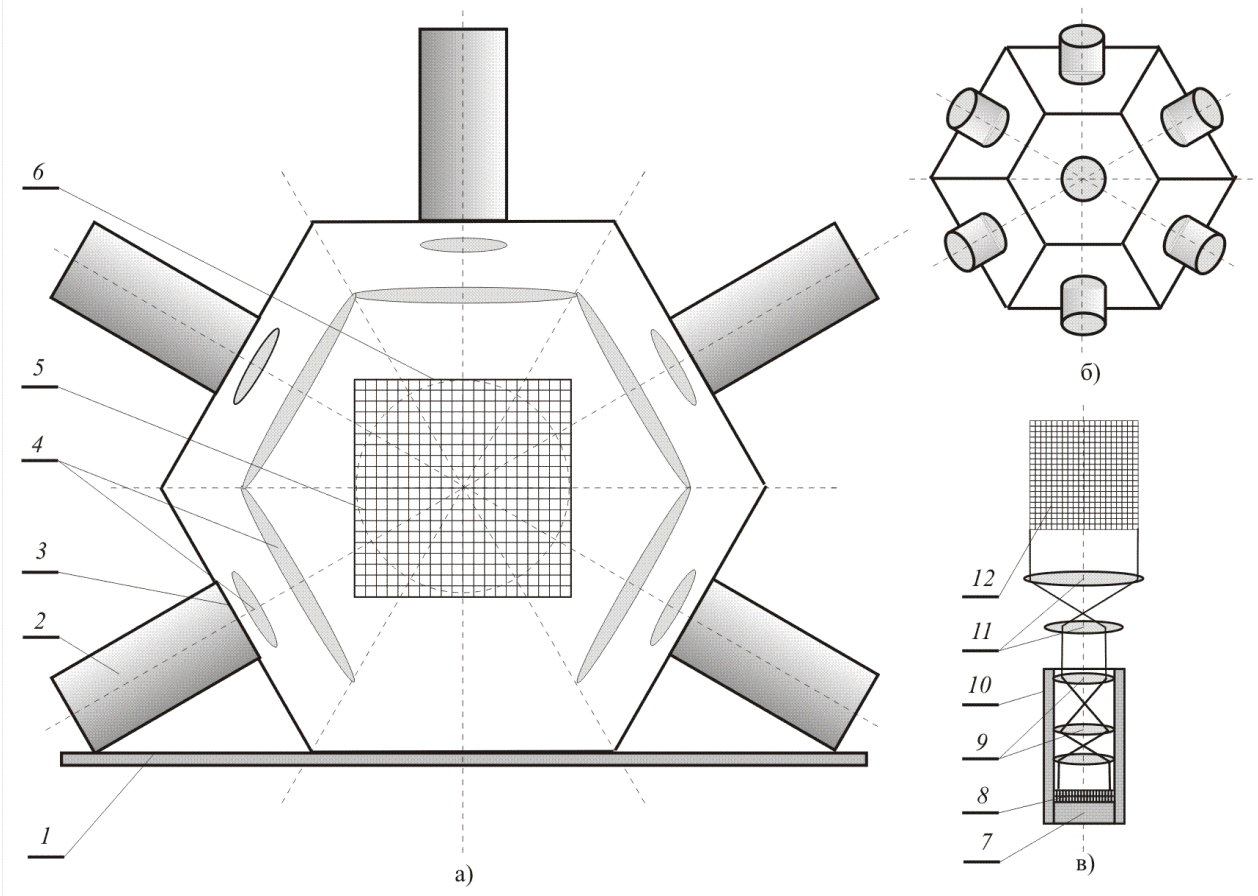


Эскиз малогабаритного проволочного детектора



Структурная схема управления 3D детектором

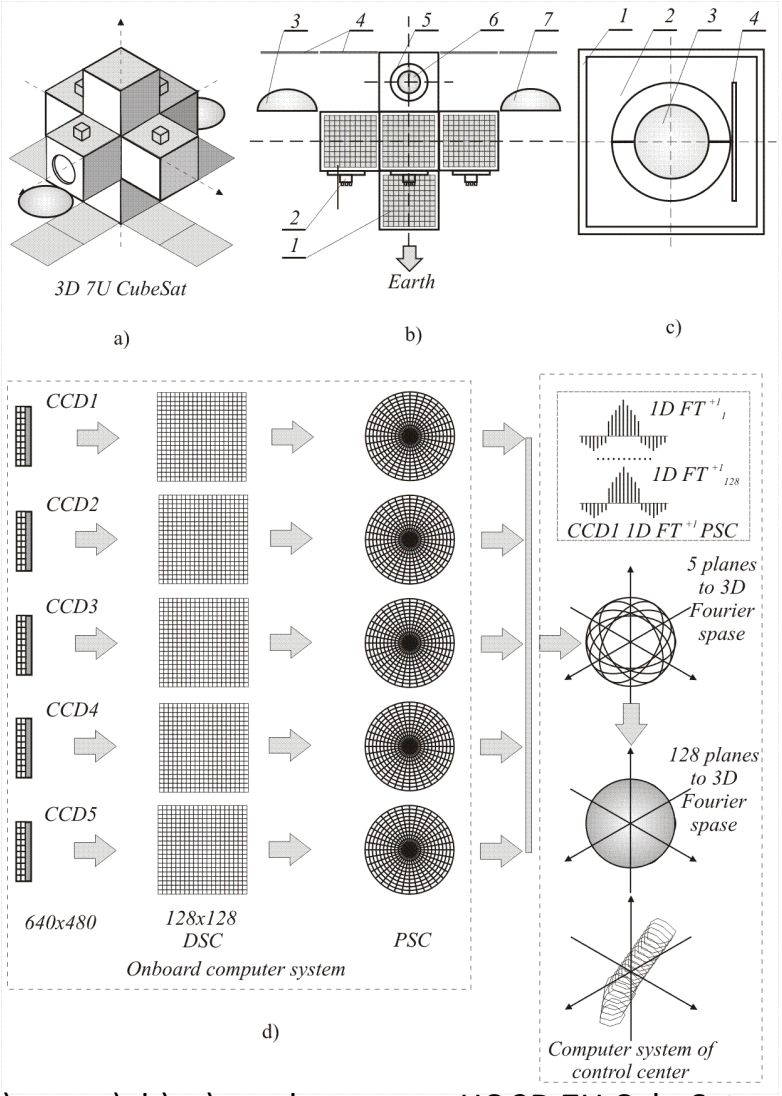
ВАРИАНТ КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОГО 3D МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ТРЕКОВОГОДЕТЕКТОР ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ



Плита -1, малогабаритные трёхлинзовые микроскопы – 2, корпус рабочей камеры – 3, конденсорные системы линз – 4, многопроволочный модуль активной зоны регистрации – 5.

Размер камеры (50×50×50) мм^3) состоит из параллельных слоёв тонких проводников. Направления проводников в соседних слоях взаимно ортогональны.
Диаметр провода ∅ = 0,01 мм. Расстояние между проводниками 1 мм, разность потенциалов прикладываемых к соседним слоям можно варьировать в пределах (500 ÷ 2000) В.
Камера заполняется смесью инертных газов Ar, Ne при давлении (0,01,…,0,2) бар

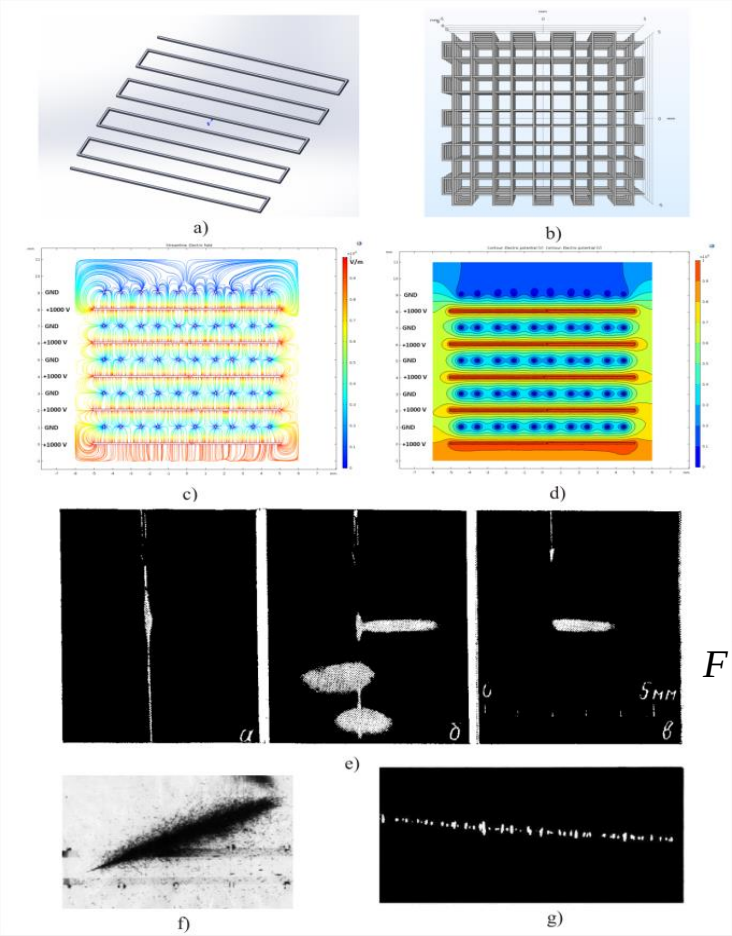
РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МИНИАТЮРНЫХ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ДЕТЕКТОАХ



a) поз. a), b), c) конфигурация НС 3D 7U CubeSat, поз. d) распределение режимов обработки данных,

1. В данном НС использованы однотипные микропроцессоры на базе МП Raspberry Pi 3 Model B. Это одноплатный микрокомпьютер, оснащённый 4-ядерным процессором ARM Cortex A53 1200 МГц (64 бит) имеет 1 Гбайт оперативной памяти.
2. Для эффективной работы данного 3D детектора 3 необходимо в модуле, где он расположен поддерживать постоянную температуру, поэтому он размещён в вакуумированной колбе 1 (см. рис. поз. 3), снабжённой шторкой 4, открывающейся на время процедуры измерения и установленной на «передней» грани 2 НС. На рис. а) поз. d) приведена схема распределения процедур обработки данных. На борту НС осуществляется предварительная обработка, сводящаяся к формированию 5×128×(128) одномерных массивов данных которые передаются на Землю.
3. На вычислительном комплексе средства доставки производятся вычисления одномерных Фурье преобразований в объёме 5×128×(128), синтезируется в пространстве Фурье набор плоскостей в соответствие с геометрией формирования исходных проекционных данных. Понятно, что для реконструкции объёма 128×128×128 вокселей необходимо, по крайней мере 1,5128×128×(128) двумерных проекций, поэтому в пространстве Фурье производится доопределение «недостающих» проекция.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МИНИАТЮРНЫХ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ДЕТЕКТОАХ



б) поз. a), b), c), d) результаты математического моделирования параметров 3D детектора, поз. e), f), g) примеры газовых разрядов в многопроволочных детекторах

В пропорциональном режиме в газовой среде, при попадании, например, высокоэнергетического нейтрона в объём многопроволочного модуля, протекают реакции:

$$n + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}H + {}^{1}H + 0.76\ Mev,$$

$$n + {}^{10}B \rightarrow {}^{7}Li^{*} + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He + \gamma(0.48Mev) + 2.3Mev, \qquad (93\%)$$

$$n + {}^{10}B \rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He + 2.8Mev \qquad (7\%)$$

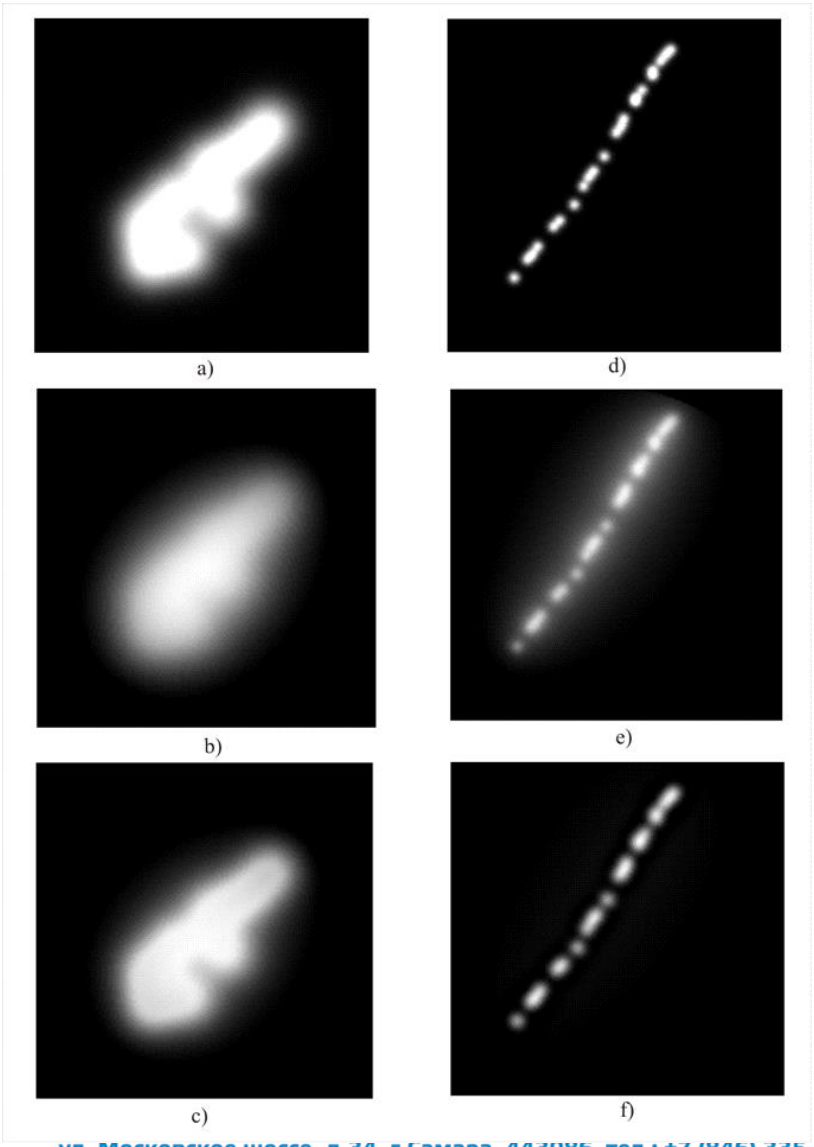
Вид функции ядра:

$$F^{+1}\left(q(l-l_i)\right) = F^{+1}\left(\mathrm{sinc}(4l_i) - a\cdot\mathrm{sinc}(2l_i - \pi) - a\cdot\mathrm{sinc}(2l_i + \pi)\right)\cdot\mathrm{sinc}(l_i)^2$$

Процедура фильтрации исходных и доопределённых проекционных данных

$$F^{+1}\left(g'(l;\theta)\right) = F^{+1}\left(\int_{-\infty}^{\infty} g(l_1;\theta)q(l-l_1)dl_1\right)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МИНИАТЮРНЫХ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ДЕТЕКТОАХ

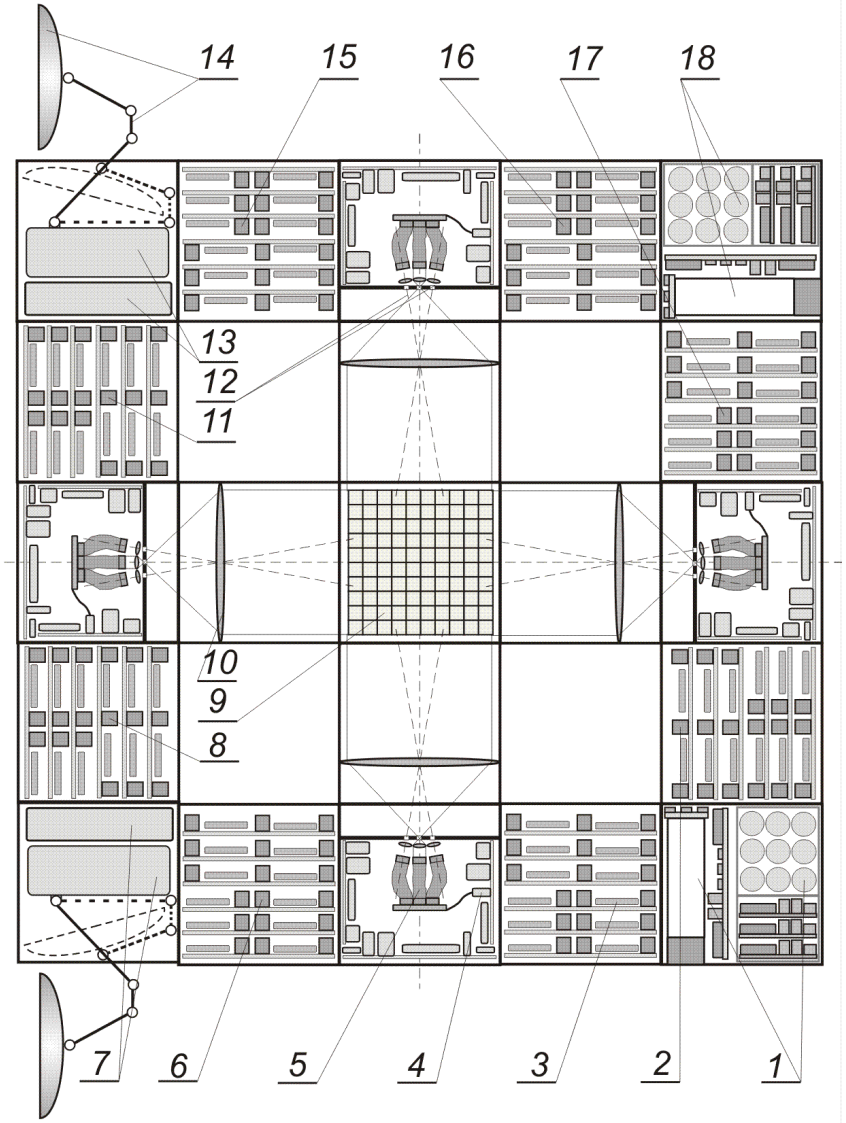


2D модельная функция

2D реконструкция с помощью алгоритма свёртки – фиксированное (жёсткое) ядро

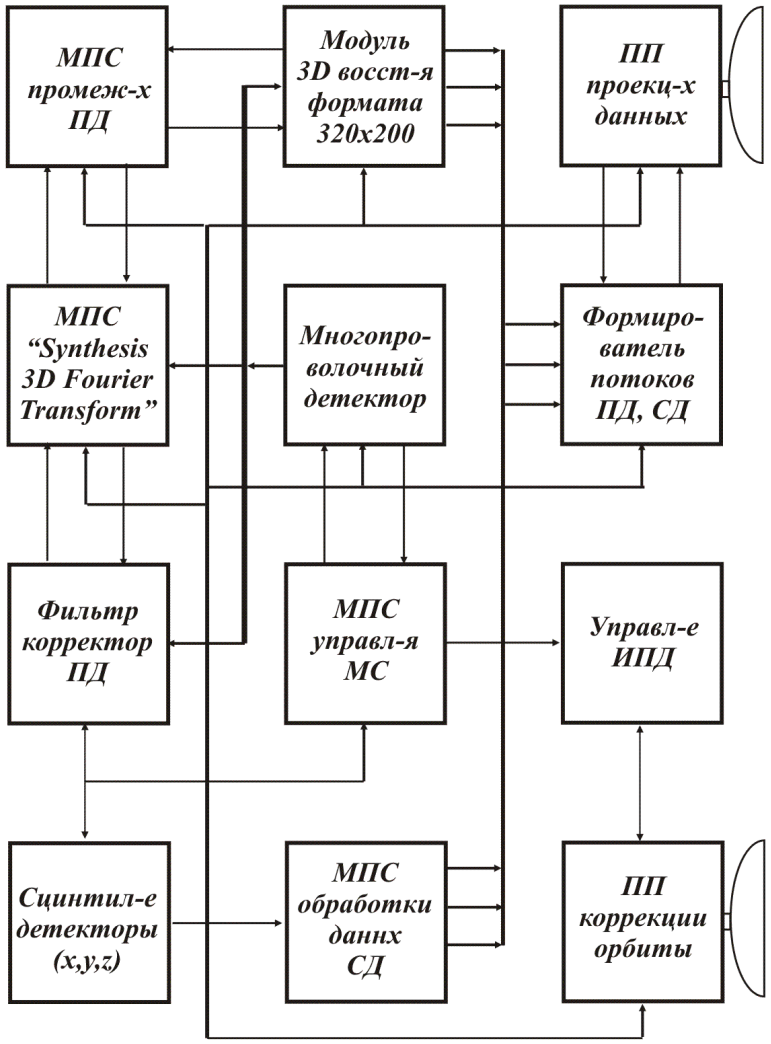
2D реконструкция с помощью алгоритма свёртки – динамическое ядро

МИКРОСПУТНИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ШИРОКОГО СПЕКТРА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА



1 – сцинтилляционный детектор (“y –axis”) гамма излучения, отсек аккумуляторов, 2,6,11,16 – микропроцессорный модуль обработки проекционных данных, 3, 15 - микропроцессорная система определения параметров потоков гамма излучения, 6 – модуль формирования радиосигналов (одномерных проекционных данных) для передачи в ЦУП, анализатор радиосигналов управления движением на траектории, 7 – приёмо передатчик для проекционных данных, 8 – микропроцессорный модуль управления микро спутником, 9 - зона формирования треков многопроволочного детектора, проекционная линза, 11 – вычислительный модуль доопределения исходных проекционных данных, 12 – оптическая система формирования двумерных проекций в побочных оптических осях, 13, 14 – приёмо передатчик сигналов коррекции орбиты - для связи с ЦУПом, бортом МКС, 17 – микропроцессорный модуль управления миниатюрными ионно – плазменными двигателями, 18 - сцинтилляционный детектор (“x –axis”) гамма излучения, отсек аккумуляторов

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА БОРТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА



МПС - микропроцессорная система, ПД - проекционные данные, ПП - приёмопередатчик, СД - сцинтиляционные детекторы

Бортовой многопроцессорный вычислительный комплекс решает следующие **основные задачи**:

1. Фильтрация и коррекция двумерных проекционных данных.
2. Пересчёт двумерных данных из ДСК в ПСК, выборка одномерных проекционных массивов.
3. Синтез 3D Фурье – образа.
4. Вычленение кольцевых гармоник в 3D пространстве Фурье.
5. Доопределение недостающих, неизвестных проекционных данных в 3D пространстве Фурье.
6. Пересчёт проекционных данных (полных наборов) в пространство сигналов, реконструкция по 2D сечениям искомых распределений в малоразмерных форматах – 320 x 320 элементов (24 слоя)

Сущность метода реконструкции трёхмерных искомых функциональных зависимостей сводится к следующему.

1. Полученный со спутника одномерный массив предварительно восстанавливается до «исходных» двумерных проекций заданных на полярных сетках в формате 128×128 отсчётов.

2. Для доопределения исходных объёмов данных можно воспользоваться теоремой о центральном сечении. Следовательно, для вычисления недостающих проекционных данных необходимо вычислить одномерные Фурье преобразования от всех одномерных массивов – «диаметров» для каждой 2D проекции, т.е.:

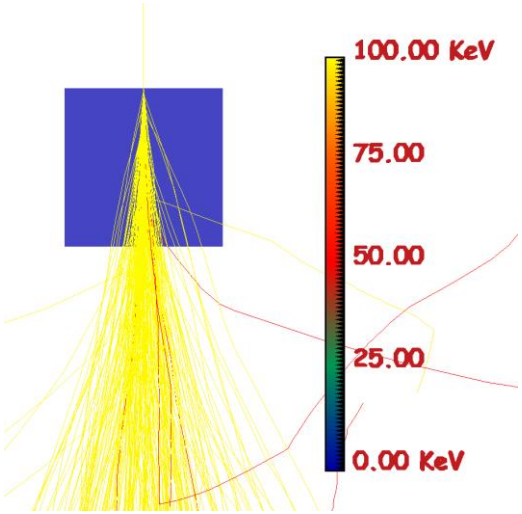
$$F^{+1}(P_n(r\delta(r-r_0);\Delta\varphi_i)) = \int_{R_0=1} P_n(r\delta(r-r_0);\Delta\varphi_i)\,\mathrm{e}^{-2\pi i(\omega-\omega_0)(r-r_0)}dr$$

ОСНОВНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕДУР МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось при следующих начальных параметрах:

1) Энергия электронного пучка – 100 кэВ
2) Геометрические размеры бомбардируемой области – 12x12x12 мм
3) Число моделируемых частиц – 1000
4) Число единовременно отображаемых траекторий – 200
5) Атомы мишени (рабочее тело детектора) – Ar
6) Плотность рабочего тела – 0,00016 гр/см3
7) Угол падения – 90º
8) Диаметр электронного пучка – 1 нм
9) Возникновение вторичного излучения – нет

Результаты моделирования представлены на рисунке



Оценка ионизационных потерь пучка протонов была выполнена с помощью модели Кинчина – Пиза:

Данная модель имеет 2 основных ограничения:

1) нет аннигиляции частиц;
2) столкновение является упругим;

ВЫВОДЫ

Для исследования свойств и характеристик солнечного излучения и свойств околосолнечного пространства на Межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета разработан и исследован ряд автоматических аппаратов нано класса формата CubeSat:

1. **3D газовый детектор дающий возможность исследовать параметры солнечного излучения (потоки протонов, нейтронов, быстрых электронов) путём трёхмерного анализа индуцированных плазменных образований в рабочей камере с помощью специализированных методов и средств малоракурсной томографии.**
2. **3D многопроволочный газовый детектор предназначенный для исследования гамма и рентгеновского излучения путём анализ треков инициируемых в рабочей камере.**
3. **Предложен новый метод исследования свойств солнечной короны с помощью группировок наноспутников, располагаемых на нескольких орбитах. Это даёт возможность получать трёхмерную информацию о состоянии короны в различных спектральных диапазонах, практически в реальном времени.**
4. **Для анализа состояния верхних областей короны предложен лидар-томографической способ исследования, что позволяет оценить пространственное распределение локальных значений концентраций электронной и ионной составляющих.**
5. **Для выведения нано аппаратов на заданные орбиты и создание группировок заданной конфигурации разработан ряд автоматических микропроцессорных систем отделения.**

САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

89083676652
phylonin@gmail.com

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26 , факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru