

Зарубежные новые радиотелескопы и проекты

М. Мингалиев
САО РАН



LOFAR: The Low Frequency Array

- Телескоп LOFAR представляет собой низкочастотную антенную решётку – радиоинтерферометр.
- Построен Нидерландским институтом радиоастрономии ASTRON, стоимость порядка 100 млн. евро.



Состоит из базовой антенной решётки (поле дипольных антенн) в Нидерландах, удалённых станций и нескольких станций, расположенных в Германии, Великобритании, Франции и Швеции.



LOFAR: основные параметры

- Диапазон частот 10-240МГц
- Один пучок с полосой пропускания до 96МГц разбит на 488 поддиапазонов с 256-ти спектральными каналами (8-битный режим)
- Низкочастотная часть (Low Band Antenna, LBA), апертура порядка 75200 кв.м., 10-90МГц.
- Высокочастотная часть (High Band Antenna, HBA), апертура порядка 57000 кв.м., 110-240МГц.
- Коррелятор на основе кластера COBALT, 8 нод с 4-мя GPU на каждой ноде.
- Возможные конфигурации:
 - Ядро, базы от 150м до 3 км,
 - Удалённые станции, базы от 5 км до 90 км,
 - Международные станции, базы от 300 км до 1000км



LOFAR: научные задачи

- Эпоха реионизации;
- Глубокие внегалактические обзоры;
- Транзиентные радиоисточники и пульсары;
- Высокоэнергичные космические лучи;
- Магнитные поля в космосе;
- Солнечная физика и геомагнитные явления.

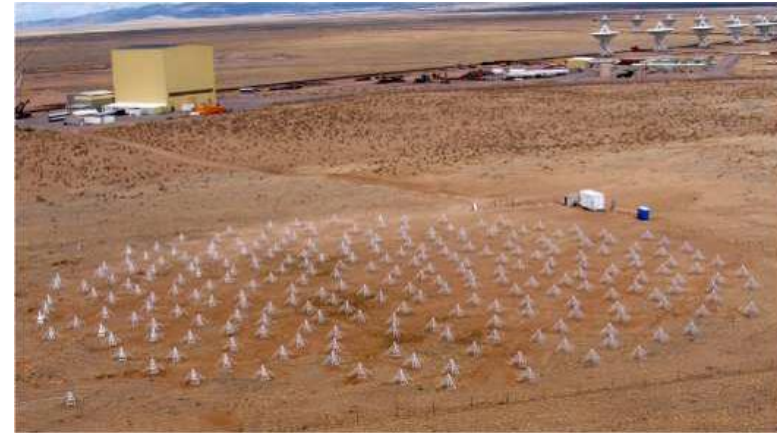
LOFAR: текущий статус

- 38 станций в Нидерландах, 5 в Германии, по одной в Великобритании, Франции и Швеции
- Порядка 20000 отдельных антенн (всенаправленные диполи)
- Диапазон изменения базы от 150 м до 1000 км
- Центр обработки данных в Гронингском Университете (суперкомпьютер IBM Blue Gene/P)
- Открыт приём заявок на наблюдательное время
- Планируется строительство новых станций в Польше и Финляндии.



LWA: The Long Wavelength Array

- Проект низкочастотного радиотелескопа в США, штат Нью-Мексико
- Коллаборация американских университетов и правительственных организаций
- Начало строительства первой очереди **LWA1** в 2009 г.
- Первый свет – апрель 2011 г.
- Тип телескопа – ФАР, по проекту состоящая из 50 станций с 256-ти диполями каждая (порядка 13000 антенн).
- Стоимость одной станции порядка US \$850 000 (оценка 2009 г).
- Проектный диаметр – 400 км, апертура 1 кв.км.



LWA1: основные параметры

- Находится рядом с VLA, 256 дипольных антенн;
- Антенны расположены на площадке 100 x 110 метров, среднее расстояние между антеннами 5.4 метра.
- Диапазон частот от 10 до 88 МГц;
- 4 пучка с независимым управлением;
- 2 центральных частоты на пучок, выбираемых независимо;
- Полоса пропускания порядка 17МГц x 2 x 4 пучка;
- $\text{FWHM} < 3.2^\circ \times [(74/\nu, \text{МГц})]^{1.5}$
- Чувствительность на пучок порядка 8Jy (5σ) за 1 сек на частоте 16 МГц в зените.

LWA: научные задачи

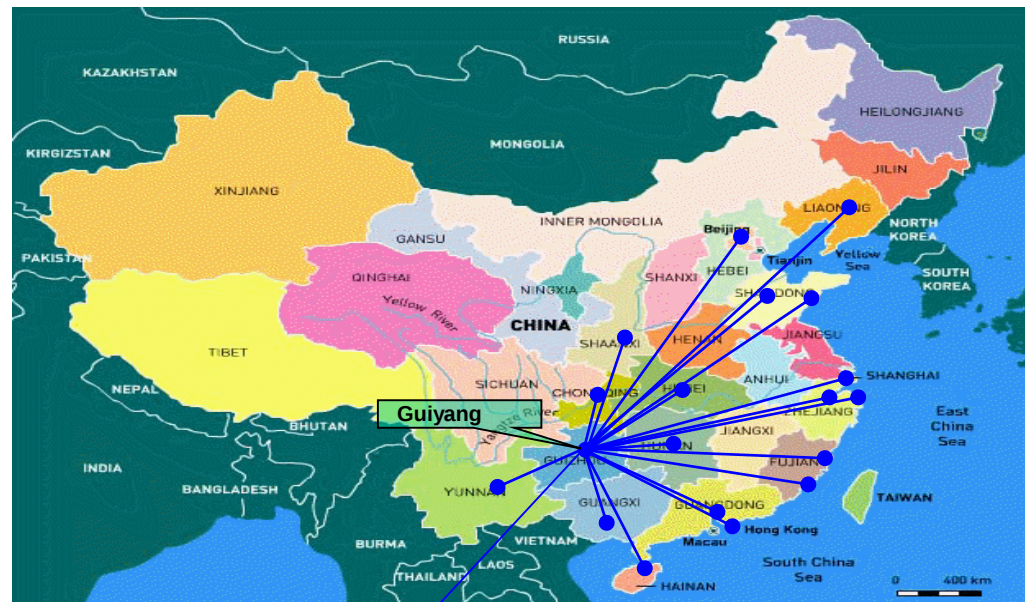
- Ускорение релятивистских частиц (SNRs, радиогалактики, космические лучи);
- Космологическая эволюция и Вселенная на больших красных смещениях (изучение первых чёрных дыр и поиск HI во время эпохи реионизации);
- Плазменная астрофизика, изучение межзвёздной среды;
- Изучение пульсаров на низких частотах;
- Физика ионосферы и метеорных явлений;

LWA: текущий статус

- Построена и запущена первая станция LWA1 из планируемых 50-ти, в 2012 г. открыт приём заявок на наблюдения;
- В 2011 г. начато строительство второй станции LWA2 в 19 км от первой, что позволит достичь разрешения порядка одной угловой минуты;
- В статье S.W. Ellingson et al, Design and Commissioning of the LWA1 Radio Telescope, [astro-ph/1307.0697](#) было отмечено, что дальнейший статус проекта неясен.

FAST: Five hundred meter Aperture Spherical Telescope

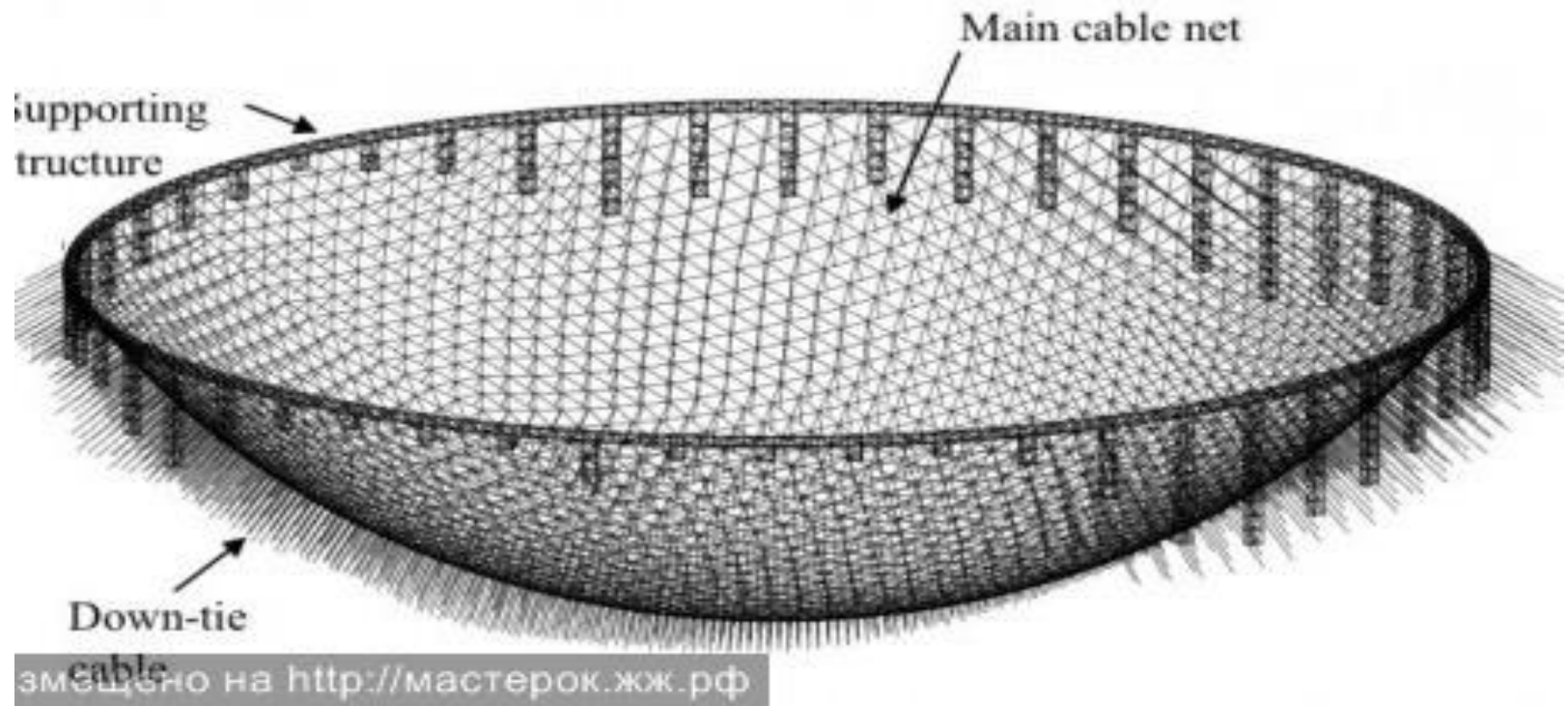
- Проект радиотелескопа в Китае (провинция Гуйчжоу), конструкция будет схожа с телескопом Аресибо.
- Заказчик строительства – Китайская Академия Наук (КАН), строительство началось в марте 2011 г.
- Диаметр порядка 500 м, антенна будет находиться в естественном карстовом углублении.
- Стоимость проекта порядка US \$100 млн, строительство планируется закончить в 2016 г.

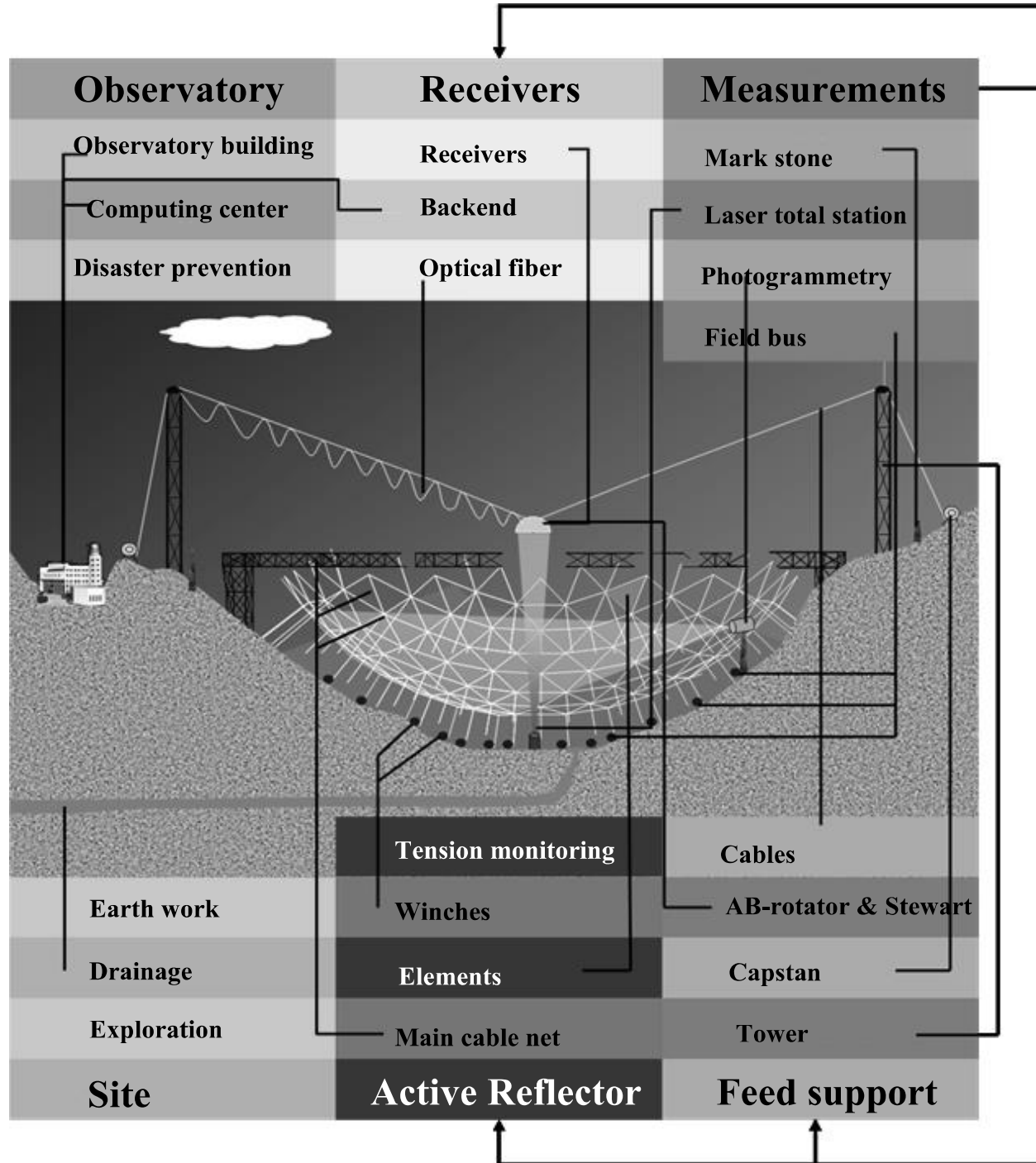


FAST: основные параметры

- Диаметр порядка 500м, диаметр эффективной апертуры порядка 300м;
- Главное зеркало с активной поверхностью из 4600 треугольных элементов, управляемых актуаторами
- Наблюдение в зоне $\pm 40^\circ$ от зенита ($\pm 60^\circ$ с потерями), сопровождение источника до 6 часов;
- Позиционирование платформы с приёмниками с точностью до 1 мм;
- Диапазон частот от 70МГц до 3ГГц (до 8ГГц после апгрейда);
- Разрешение (L-band, 1-2ГГц) – 2.9 угл. минуты;
- Точность наведения 8" ;
- До 19 пучков в режиме multibeam в диапазоне 1.23-1.53ГГц.
- «Тёплые» приёмники на частотах 70-560МГц, криогенные приёмники на частотах от 560МГц до 3ГГц.

В отличие от телескопа Аресибо, который имеет неподвижную параболическую систему, фокусирующую радиоволны, кабельная сеть телескопа FAST и система конструкции параболического отражателя позволят телескопу менять форму поверхности отражателя в режиме реального времени с помощью системы активного контроля.





FAST: научные задачи

- Обзоры в линии нейтрального водорода HI;
- Наблюдения HI на больших z в эпоху реионизации;
- Наблюдения пульсаров и транзиентов;
- Работа в сети VLBI;
- Исследования молекулярных линий (в т.ч. рекомбинационные линии, мазеры);
- SETI

FAST: Текущий статус - under construction



2009



2012



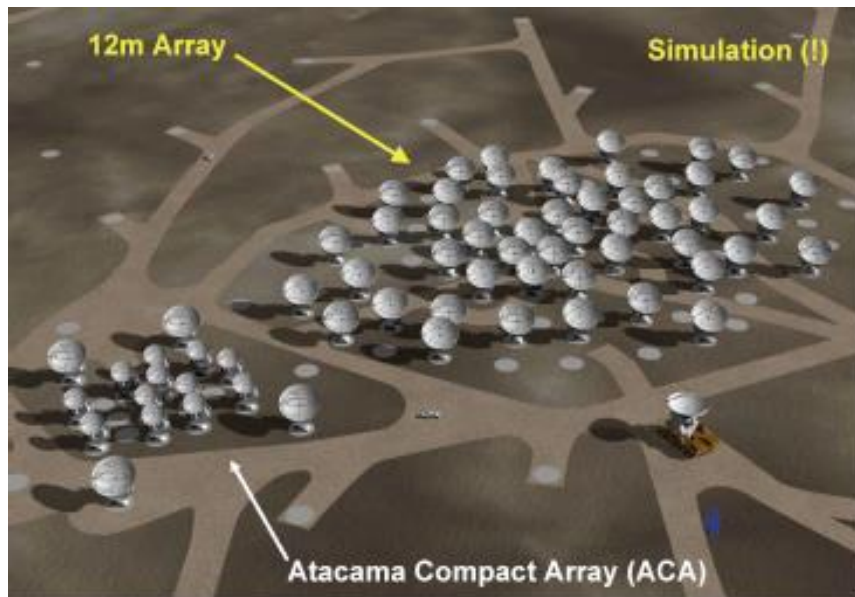
2016



2014

ALMA: Atacama Large Mm/submm Array

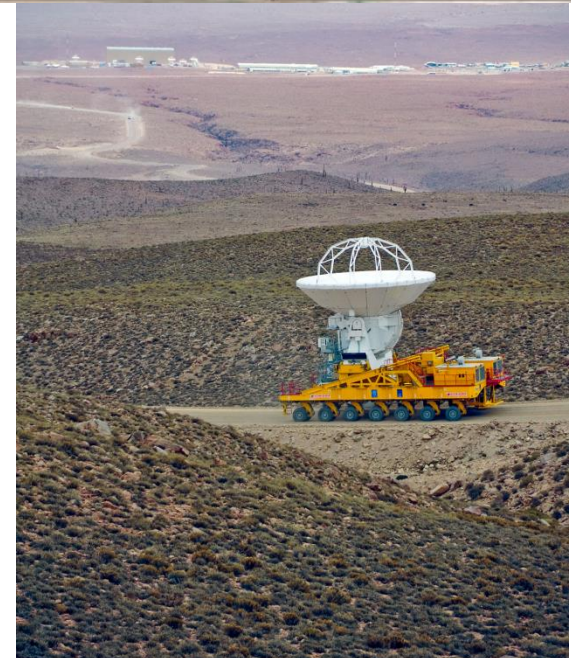
- Международная коллаборация – США, Канада, Европа (ESO), Япония, Тайвань, Чили.
- Антенны установлены на высоте 5км в пустыне Атакама, первый свет 30.09.2011
- Основной массив (**Main array**): 50 антенн диаметром 12 метров, монтировка альт-азимутальная
- Дополнительно:
 - **Total Power Array** – 4 антенны по 12 метров;
 - **Atacama Compact Array (ACA)** – 12 антенн по 7 метров.



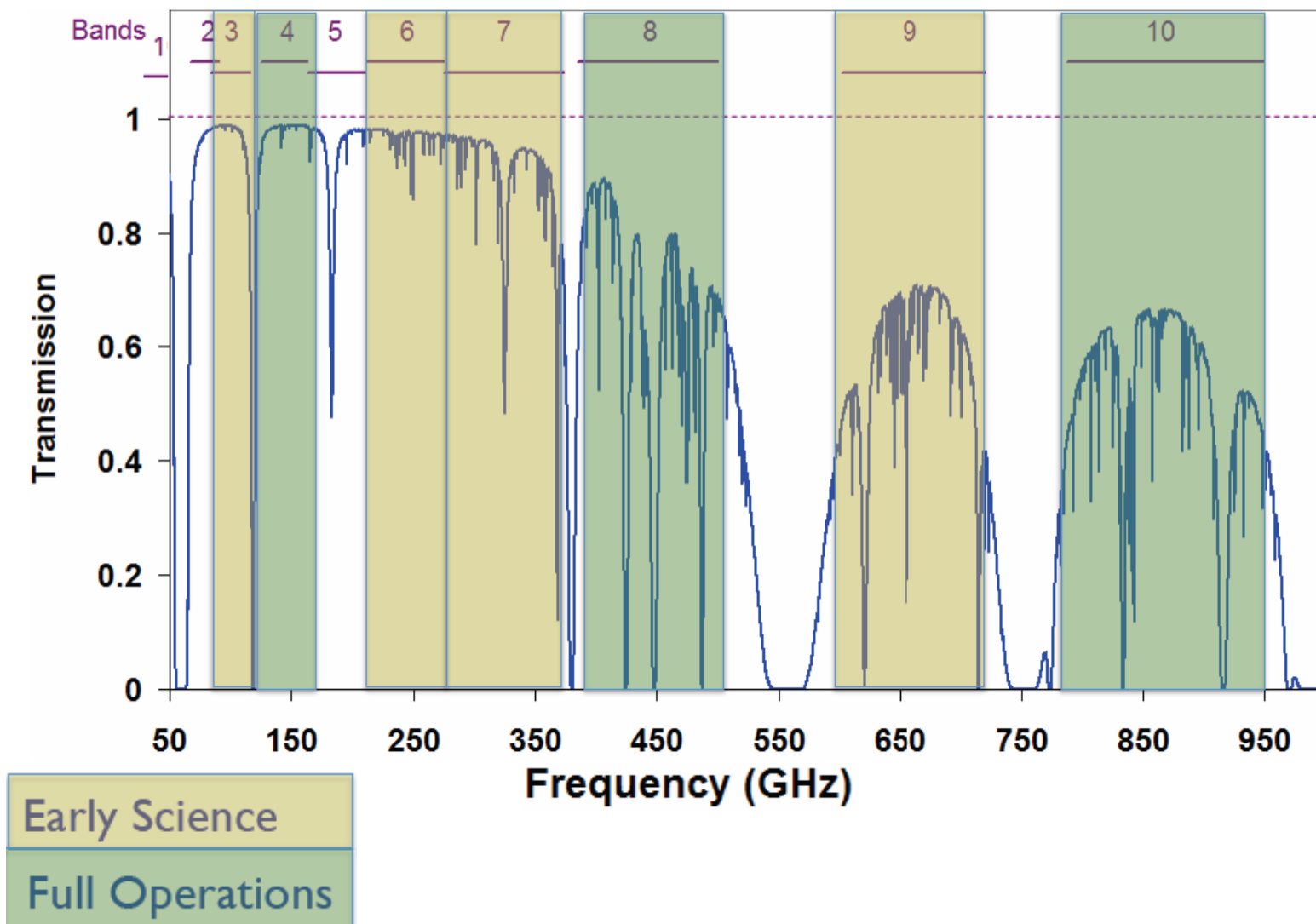
Оценка стоимости US \$1.3 млрд (2006 г)

ALMA: основные параметры

- Режим радиointерферометра в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах
- Длина базы до 15 км (0.015" на 300ГГц)
- Построение изображений на частотах от 84 до 950ГГц (от 3 мм до 315 микрон)
- Малошумящие широкополосные SIS приёмники (полоса до 8 ГГц)
- Возможность наблюдения в поляризации
- Поток данных порядка 1 Тб/сутки
- Чувствительность и угловое разрешение в 10-100 раз выше, чем у существующих наземных радиointерферометров миллиметрового диапазона
- Возможность подавать заявки на наблюдательное время для сторонних исследователей.



ALMA: диапазоны частот



ALMA: научные задачи

- Космология и Вселенная на больших красных смещениях, в т.ч. наблюдения далёких квазаров, источников гамма-всплесков, молекулярных линий в далёких объектах;
- Галактики и ядра галактик (AGNs, SMGs, U/LIRGs, центр Галактики, взаимодействующие галактики);
- Межзвёздная среда, звездообразование и астрохимия;
- Околосвёздные диски, экзопланеты и Солнечная система;
- Звёздная эволюция и Солнце.

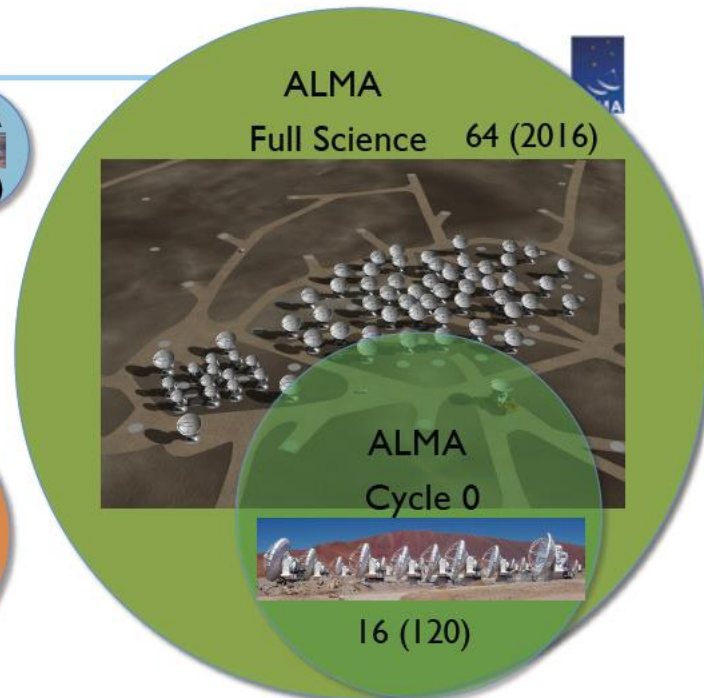
ALMA: сравнение с аналогичными проектами

ALMA in Context

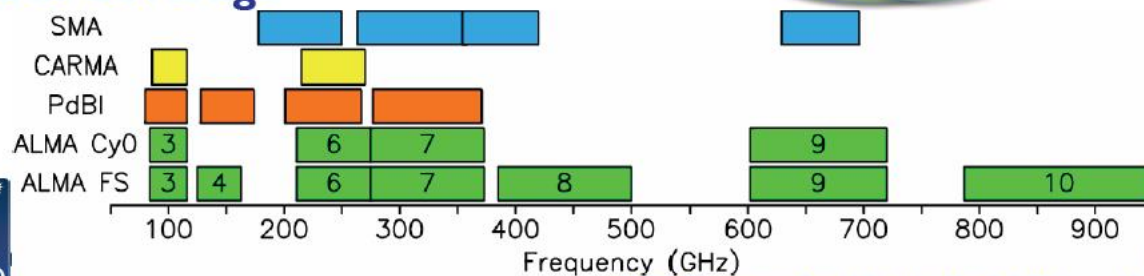
Collecting Area

of Antennas
(# of baselines)

- Sensitivity goes as collecting area
- Image fidelity goes as # of baselines



Spectral Coverage



ALMA: текущий статус



Инаугурация 13 марта 2013 г.
Последняя 66-я антенна доставлена
1 октября 2013 г.
Начало наблюдений ALMA Full Science —
конец 2013 года.



Фильм

About ALMA

SKA: Square Kilometre Array

- Проект радиоинтерферометра с общей эффективной площадью до 5 кв.км;
- Головной офис проекта находится в Великобритании, основная часть приёмных антенн будет установлена в Южной Африке и Австралии (небольшое количество антенн планируется установить в других странах Африки, а также в Новой Зеландии);
- В проекте участвуют порядка 20-ти стран, основные участники – Австралия, Канада, Китай, Италия, Новая Зеландия, Южная Африка, Швеция, Нидерланды и Великобритания;
- Общая стоимость проекта оценивается в 2 млрд евро, из которых 650 млн будет потрачено на первую фазу проекта SKA Phase1 (10% от эффективной площади), которую планируется завершить в 2020г, а в полном масштабе SKA планируется запустить в 2026-м году;
- Общее количество антенн в адаптивной антенной решётке оценивается в 2.5 – 3 миллиона, из которых порядка 500000 должны быть развёрнуты до 2020г в рамках первой фазы проекта;
- Длина базы интерферометра будет достигать 3000 км.



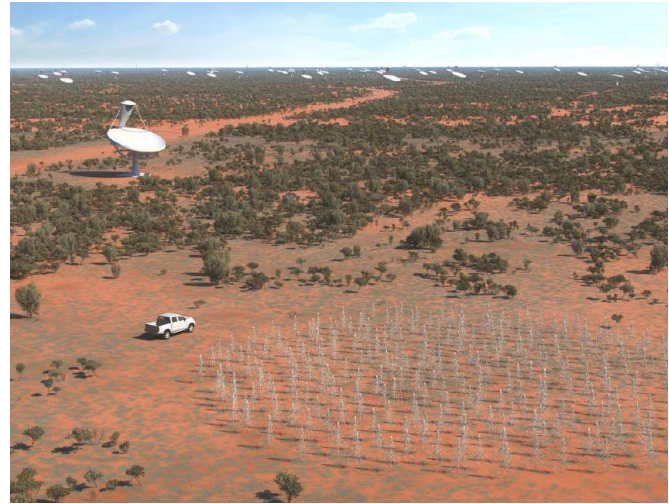
SKA: основные параметры

- Диапазон частот от 50МГц до 14ГГц (SKA Phase 1 и Phase 2), до 30ГГц в третьей фазе (SKA Phase 3);
- Несколько групп антенн, SKA-low array, SKA-mid array и SKA-survey array;
- SKA-low array, диполи для диапазона 50-350МГц, сгруппированы в станции диаметром в 100м по 90 антенн;
- SKA-mid array, несколько тысяч параболоидов для диапазона от 350МГц до 14ГГц, диаметром 12-15м;
- SKA-survey array, компактная фазированная решётка параболических антенн диаметром 12-15м в диапазоне от 350МГц до 14ГГц.

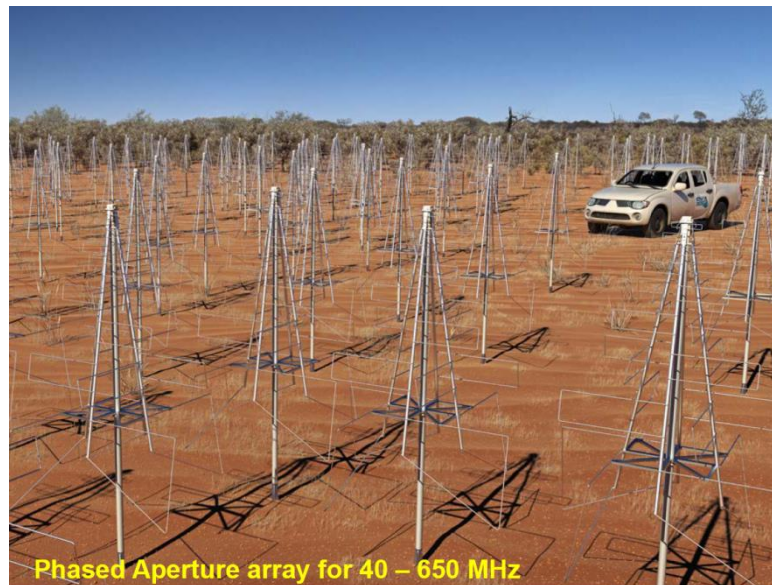
SKA: типы антенн



SKA-mid array



SKA-low array



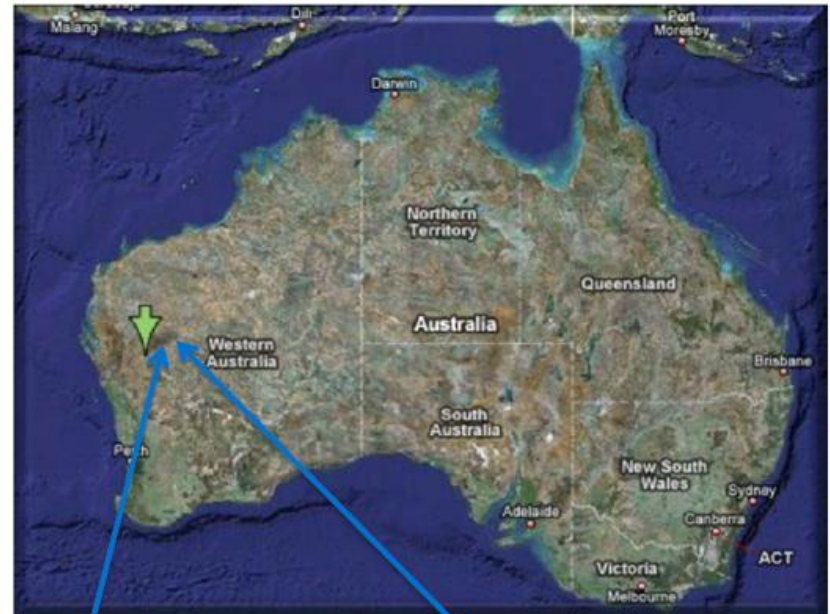
SKA Phase 1: завершение в 2020 г.



SKA1_Mid_Dish

250 15-метровых параболических антенн

SKA1_Survey



SKA1_Low

250000 антенн



ASKAP + 190 15-метровых антенн

SKA: петабайтные объёмы данных

Antennas



Digital Signal Processing (DSP)



Transfer antennas to DSP
2020: 20,000 PBytes/day
2028: 200,000 PBytes/day

Over 10's to 1000's kms

HPC Processing
2020: 300 PFlop
2028: 30 EFlop

To Process is HPC
2020: 100 PBytes/day
2028: 10,000 PBytes/day

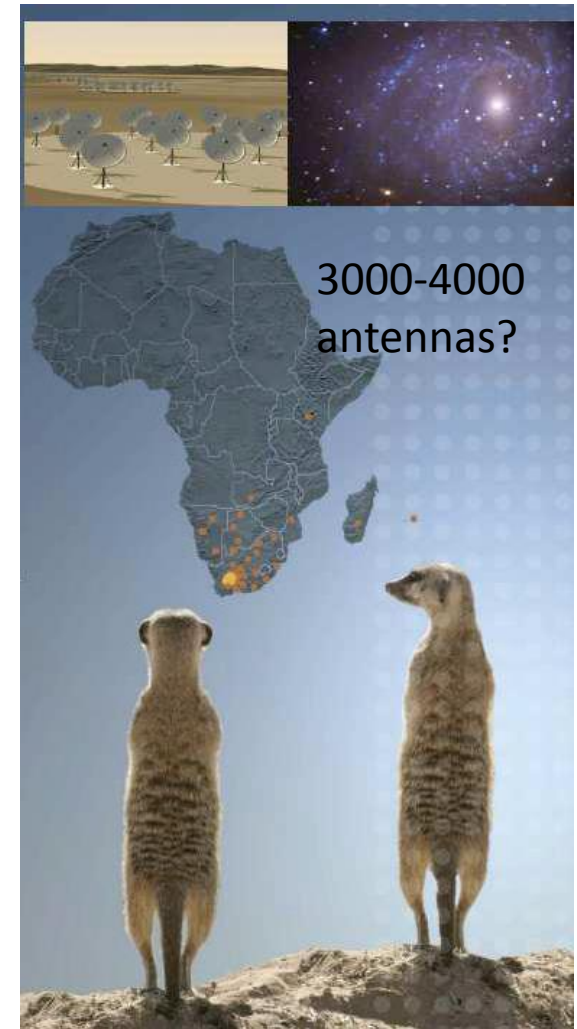
Over 10's to 1000's kms



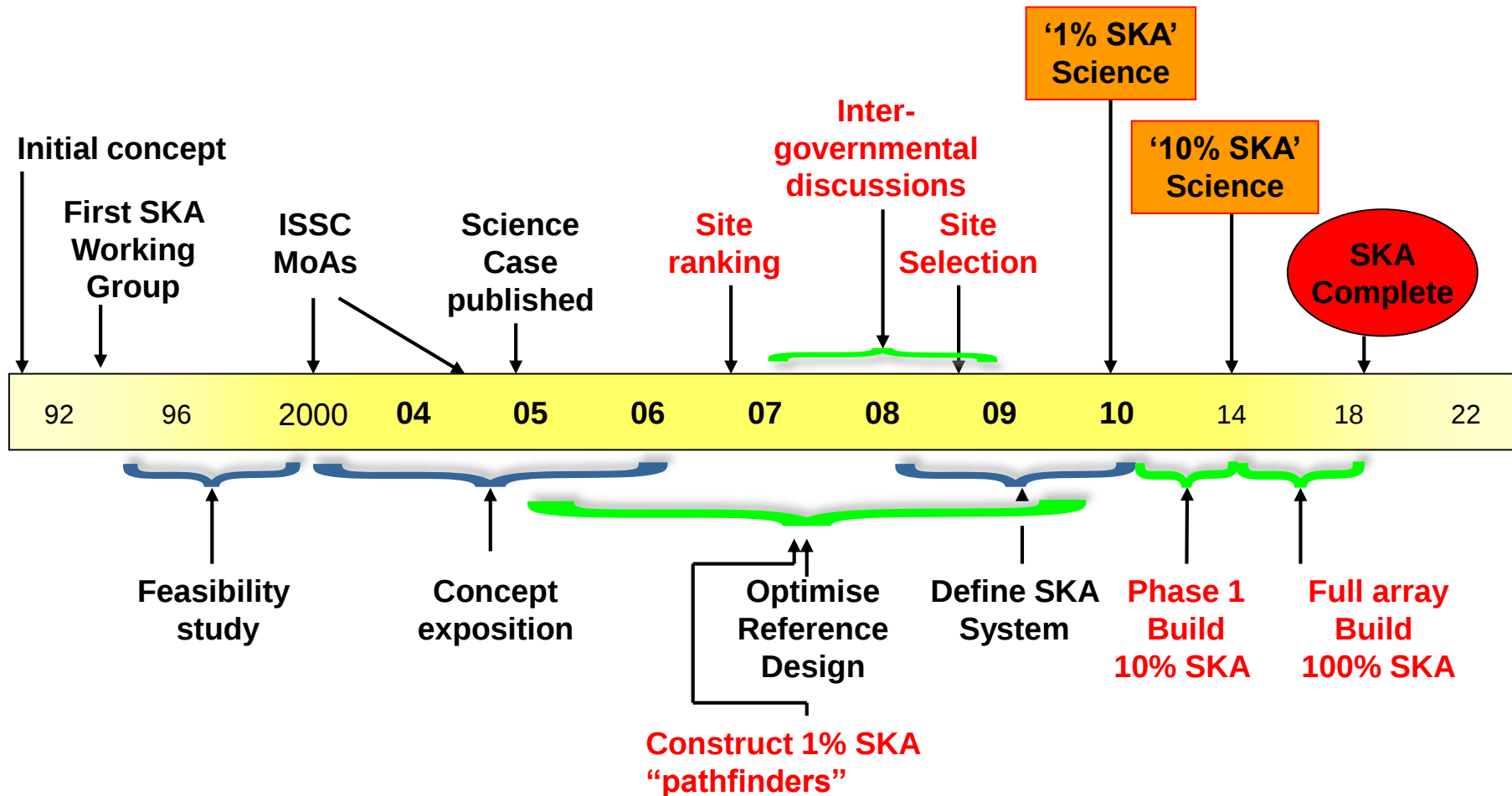
High Performance Computing Facility (HPC)

SKA: некоторые научные задачи

- Тесты Общей Теории Относительности;
- Космология, тёмная материя, тёмная энергия;
- Крупномасштабная структура Вселенной;
- Эпоха реионизации;
- Магнитные поля в космосе;
- Поиск транзиентных явлений, потенциально связанных с SETI.



SKA timeline



Более «скромные» проекты

- MeerKAT изначально назывался - KAT (Karoo Array Telescope)
- ASKAP - Australian Square Kilometre Array Pathfinder
- SPT - The South Pole Telescope
- LSPE - The Large Scale Polarization Explorer
- COrE - Cosmic Origins Explorer

MeerKAT: проект-прекурсор SKA

- Южноафриканский проект, предназначенный для тестирования технологий SKA, первый радиоинтерферометр в Южной Африке;
- Строительство ведёт Министерство Науки и Технологии Южной Африки совместно с National Research Foundation of SA и SKA SA project;
- Полный вариант будет состоять из 64-х параболических антенн диаметром 13.5 метров;
- Строительство, начатое в 2009г, было прервано в 2010-2012гг из-за недостатка финансирования;
- В рамках MeerKAT был построен прекурсор - радиоинтерферометр KAT-7, состоящий из семи более простых параболических антенн.

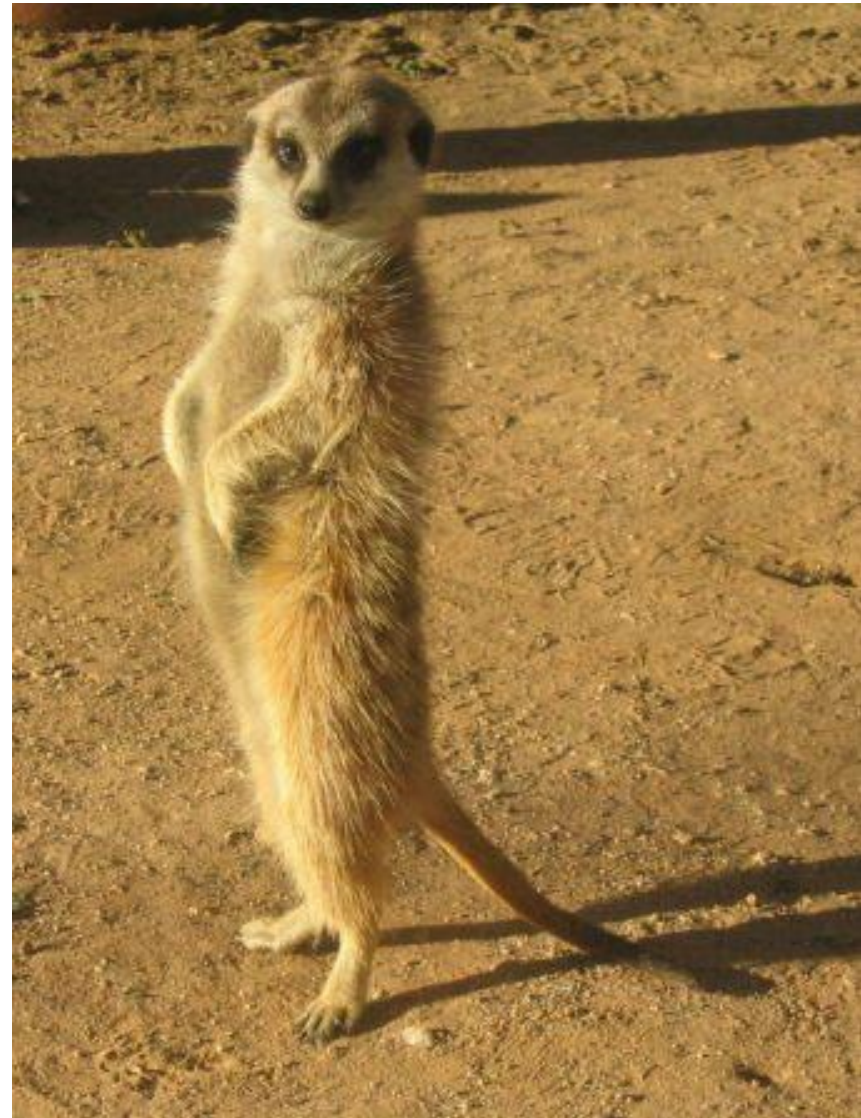
MeerKAT: основные параметры

- 64 антенны диаметром 13.5м по схеме Грегори, суммарная апертура 18000 кв.м;
- Диапазоны частот 1.00 – 1.75 (1-я фаза), 0.58-1.75ГГц, 8-14.5 ГГц;
- Полоса пропускания 0.75ГГц (1-я фаза), до 4 ГГц (2-я фаза);
- Длина базы интерферометра от 29 м до 8км (до 20км во 2-й фазе) ;
- 70% антенн группой с длиной базы до 1 км, 30% антенн размещены вокруг центральной группы с базами от 2.5 до 8 км. Во второй фазе проекта планируется размещение дополнительных антенн для получения базы в 20км.

MeerKAT

MeerKAT изначально назывался - Karoo Array Telescope (KAT) (20 антенн). MeerKAT - more of KAT (64 антенны).

meerkat - сурикат (*Suricata suricatta*) , небольшое млекопитающее из семейства мангустовых, проживающее в районе Karoo.



MeerKAT: научные задачи

- Тесты Эйнштейновской теории гравитации и гравитационного излучения;
- Обзор в линии нейтрального водорода;
- Поиск молекул в эпоху реионизации;
- Поиск абсорбционных линий OH в далёких источниках, излучающих в континууме;
- Наблюдения HI в близких галактических объектах;
- Транзиенты и пульсары;
- Обзор плоскости Галактики – исследование структуры и динамики Галактики, распределение ионизированного газа, рекомбинационные линии, межзвёздный молекулярный газ и мазеры;
- Наблюдения ранних радиогалактик в континууме;
- Поиск динамичных и взрывных радиотранзиентов (гамма-вспышки, новые и сверхновые, а также новые типы транзиентных радиоисточников).

MeerKAT: идёт строительство



Забетонированные площадки под антенны центральной группы, 03-2014



Установка первой антенны, 03-2014



Установленная антенна MeerKAT. Планируется установить еще 15 антенн в 2015г, и остальные в 2016г. По окончании первой фазы антенны будут оснащены приёмниками диапазона 1.0 – 1.75 ГГц с полосой 0.75ГГц.

ASKAP: Australian Square Kilometre Array Pathfinder

- Австралийский телескоп-прекурсор для SKA;
- Строительство велось австралийской комиссией по науке CSIRO с 2009 по 2012гг, запущен 5 октября 2012г.
- Выбранная для размещения телескопа местность является исключительно спокойной с точки зрения радиопомех.
- Стоимость инфраструктуры ASKAP порядка US \$30 млн.



ASKAP: основные параметры

- 36 параболических антенн 12 метров диаметром, общая площадь порядка 4000 кв.м.
- $T_{\text{sys}} < 50\text{K}$;
- Диапазон частот от 700МГц до 1.8ГГц;
- Полоса пропускания 300МГц, 36 независимых пучков;
- Длина базы до 6 км;
- Полная кросс-корреляция всех антенн;
- Суммарный поток данных до 2.5 ГБайт/сек, данные обрабатываются в суперкомпьютерном центре Пасвей (Pawsey HPC Centre for SKA Science), который будет задействован в последствии в проекте SKA.

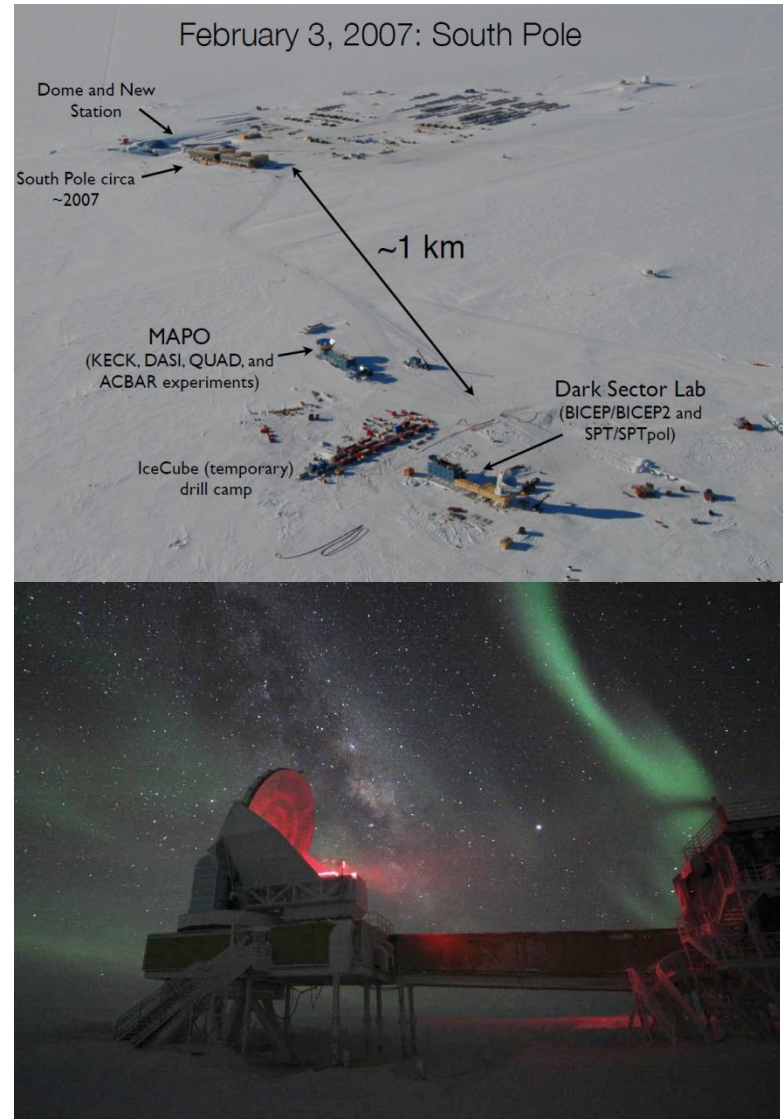


ASKAP: научные задачи

- В 2009 году CSIRO выбрало 10 основных проектов для ASKAP:
 - Evolutionary Map of the Universe (EMU)
 - Widefield ASKAP L-Band Legacy All-Sky Blind Survey (WALLABY)
 - The First Large Absorption Survey in HI (FLASH)
 - An ASKAP Survey for Variables and Slow Transients (VAST)
 - The Galactic ASKAP Spectral Line Survey (GASKAP)
 - Polarization Sky Survey of the Universe's Magnetism (POSSUM)
 - The Commensal Real-time ASKAP Fast Transients survey (CRAFT)
 - Deep Investigations of Neutral Gas Origins (DINGO)
 - The High Resolution Components of ASKAP: Meeting the Long Baseline Specifications for the SKA (VLBI)
 - Compact Objects with ASKAP: Surveys and Timing (COAST).
- Первые пять лет работы телескопа 75% времени будет зарезервировано за этими проектами (т.е. до 2017г).

SPT: The South Pole Telescope

- SPT – десятиметровый инструмент, размещённый на полярной станции Амундсена-Скотта на Южном Полюсе в Антарктиде, высота 2.5 км;
- Первый свет – в феврале 2007г;
- Модернизированный поляризационный приёмник – в 2012г;
- Коллаборация SPT включает в себя больше десяти институтов и университетов, в основном американских;
- Стоимость инструмента составила порядка US \$19 млн, но расходы на его содержание трудно отделить от расходов на саму полярную станцию, которые только в 2008г составили порядка US \$16 млн.

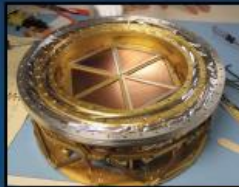


The South Pole Telescope (SPT)

- 10-meter sub-mm quality wavelength telescope
- At **100**, **150**, **220** GHz, angular resolution of **1.6**, **1.2**, **1.0** arcmin

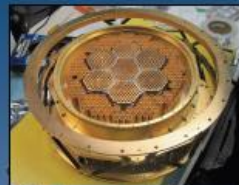
2007: SPT-SZ

960 detectors
100, 150, 220 GHz



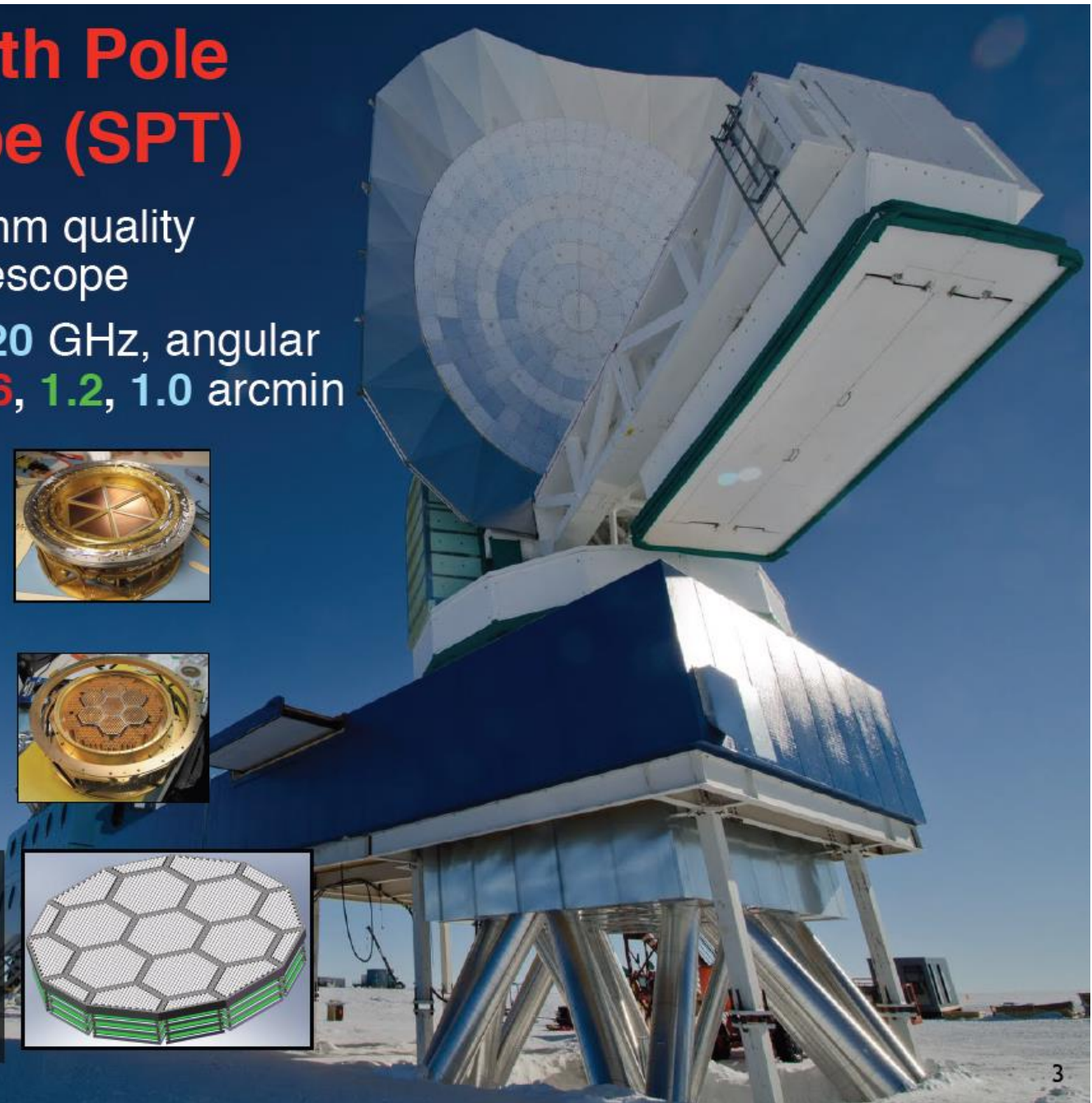
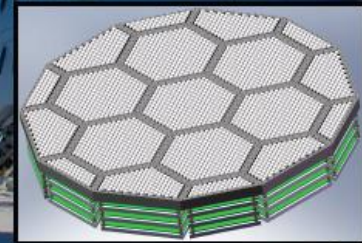
2012: SPTpol

1600 detectors
100, 150 GHz
+Polarization



2016: SPT-3G

~15,200 detectors
100, 150, 220 GHz
+Polarization

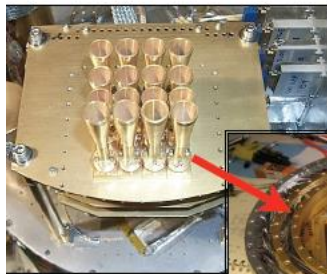


SPT: основные параметры

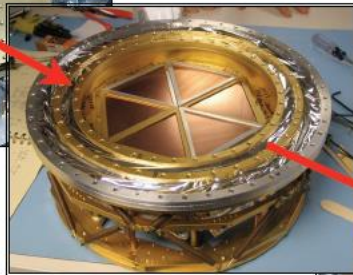
- 10-ти метровый телескоп, схема Грегори, альтазимутальная монтировка;
- Вторичное зеркало охлаждается до 10K;
- До 2012г была установлена камера SPT-SZ, с диапазонами 95, 150 и 220ГГц (только интенсивность);
- С 2012г установлена камера SPTpol на основе сверхпроводящей TES решётки болометров (наблюдения в интенсивности и поляризации);
- Диапазоны частот 90ГГц (360 детекторов) и 150ГГц (1176 детекторов), полоса пропускания порядка 20% от центральной частоты;
- Угловое разрешение $1' - 1.6'$.

Эволюция приёмников для наблюдения реликтового излучения

2001: ACBAR
16 detectors



2007: SPT
960 detectors



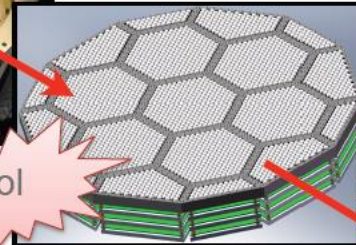
Stage-2

2012: SPTpol
~1600 detectors



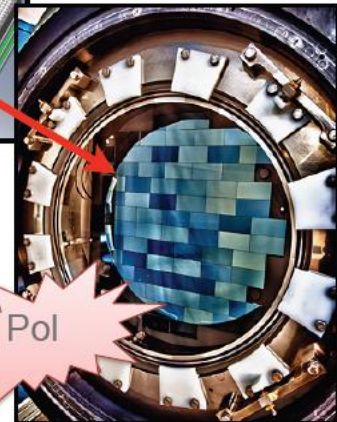
Pol

Stage-3
2016: SPT-3G
~15,200 detectors



Pol

Stage-4
2020?: CMB-S4
100,000+ detectors



Pol

Detector sensitivity has been limited by photon “shot” noise for last ~15 years; further improvements are made only by making ***more detectors!***

SPT: научные задачи

- Наблюдения эффекта Сюняева-Зельдовича в галактических кластерах (с камерой SPT-SZ);
- Определение углового спектра мощности РИ на мелких масштабах ($l > 2000$);
- Измерение B-mode в поляризационном спектре РИ;
- Уточнение инфляционных космологических моделей.

LSPE: The Large Scale Polarization Explorer

- 1) Балонный эксперимент (Италия);
- 2) Разрешение ~ 1.5 градусов (FWHM);
- 3) Большое поле зрения $\sim 30\%$ видимого неба;
- 4) Орбита - околополюсный полет
- 5) Решетка поляриметров на охлаждаемых HEMT:
 - 40 и 90 ГГц;
 - GHz and 90 GHz;
- 6) Болومتر на три диапазона - 90, 140 и 220 ГГц;

Цель:

- 1) Поляризация СМВ на больших угловых масштабах; ограничения на В-моду, которая должна быть в следствие тензорных пертурбаций в эпоху инфляции;
- 2) Поляризация фона синхротронного излучения и излучения межзвездного газа в нашей галактике.

COrE (Cosmic Origins Explorer)

Проект ESA на 2015-2025 годы (Jodrell Bank Centre for Astrophysics в кооперации France, Italy, Spain, UK)

- Картографирование всего неба с КА
- КА наподобие Planck
- 15 полос в диапазоне 45-795 ГГц
- Более 6000 детекторов
- Чувствительность будет лучше в 30 раз, чем у Planck

Задачи самые амбициозные:

- Происхождение Вселенной
- Масса нейтрино
- Происхождение звезд и магнитных полей

P. Gauguin:

Поль Гоген

D'ou venons nous? (Откуда мы?)

Que sommes-nous? (Кто мы?)

Ou allons-nous? (Куда мы идем?)



Спасибо за внимание!



В 1975-м году сотрудники Пушино (Дакгесаманский и Конюков) подарили Мартину Райлу самовар. Самовар вполне рабочий, на станине различается надпись "1-й сорт". Судя по отсутствию твёрдого знака в конце - это не царский, а вполне наш, советский самовар :)



Майк Хобсон, автор книг по ТОГ,
рассказывает заинтересованным студентам,
как работает самовар

