

The Square Kilometre Array: a challenge for 2020 to which Spain can contribute in 2012

Lourdes Verdes-Montenegro¹ & Juan de Dios Santander-Vela¹

¹ Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)

Abstract

The SKA, composed of several hundreds of three different types of antennas with separations up to 3.000 km, and up to 200 square degrees field of view, will be the largest, most sensitive radio telescope ever built. It will be able to provide fundamental answers in areas such as the dark era, when gas in galaxies was first turned into stars and the first black holes formed, star formation in nearby galaxies from stellar birth to death, faint extragalactic emission, magnetism in galaxies, extrasolar planets, or confrontation of Einstein predictions with pulsars and black hole observations. The technological challenges involved offer an unprecedented opportunity to collaborate in the development of hardware and software technologies. The energy requirements of the SKA provide an opportunity to accelerate technology development in scalable renewable energy generation, distribution, storage and demand monitoring and reduction. Data transport will reach over a hundred times the current global internet traffic data rates, delivering as much data as the full World Wide Web. Processing this data torrent in real time will require high-performance distributed computing as well as data storage and innovative retrieval technologies in the exascale. This way to do science, based on data-intensive interdisciplinary cooperation, is the base of the concept of e-Science, which necessarily includes outreach as an indissoluble part of the knowledge-based human progress. The scientific and technological challenges and opportunities that SKA can bring to the Spanish community will be described in this talk.

1 Introduction

El SKA (Square Kilometre Array) constituye un proyecto destacado en el *Roadmap ESFRI* en el área de *Physical Sciences and Engineering*, así como en el *ASTRONET Infrastructure Roadmap* [2], donde se consideró, junto con el E-ELT, una de las dos máximas prioridades en infraestructuras de tierra por su potencial para realizar avances fundamentales en un amplio rango de campos científicos. Tiene como objetivo la construcción de un radiointerferómetro

con un área colectora de 1 km^2 y varios miles de antenas distribuidas a escala continental, con separaciones de hasta 3.000 km^2 . Cubrirá un rango de frecuencias entre 70 MHz y $\geq 25 \text{ GHz}$, contando con un gran campo de visión ($200 \text{ deg}^2 @ 1 \text{ GHz}$). SKA supondrá un enorme avance con respecto a los radiointerferómetros actuales, al poder realizar cartografiados con máxima resolución angular de amplias zonas del cielo, con una velocidad más de un millón de veces superior a instrumentos líderes en este momento, como el *Expanded Very Large Array*.

Los proyectos clave (KSP) definidos para el SKA son [1, 4]:

- KSP1: La edad oscura.
- KSP2: Evolución de las galaxias, cosmología, materia oscura.
- KSP3: El origen y evolución del magnetismo cósmico.
- KSP4: Tests de relatividad general con púlsares y agujeros negros.
- KSP5: La cuna de la vida.

La realización de los objetivos de dichos programas científicos supone un enorme desafío a nivel tecnológico [3], pues para ello SKA deberá estar compuesto de unas 1.000 a 1.500 antenas de un diámetro aproximado de 15 m distribuidas en una zona central de $\sim 200 \text{ km}$, y una cantidad similar distribuida en varios miles de kilómetros. La construcción de SKA constituye una empresa de gran envergadura. No obstante, al tratarse de un interferómetro puede ser construido de forma incremental, y su implementación se llevará a cabo en tres fases:

- SKA1, es el despliegue del 20% inicial del interferómetro en el rango de frecuencias bajas ($70\text{--}450 \text{ MHz}$, aperture array disperso) y medias ($450 \text{ MHz} \text{--} 3 \text{ GHz}$, interferómetro de antenas con *single pixel feed*), y es un subconjunto de la fase 2. Al mismo tiempo se llevará a cabo un programa de instrumentación avanzada en tecnologías punta (*dense aperture arrays* y antenas con receptor multipixel PAF *-phased array feeds*).
- SKA2 desplegará el área colectora completa, a frecuencias bajas y medias ($\sim 70 \text{ MHz} \text{--} 10 \text{ GHz}$).
- SKA3 implementará las altas frecuencias hasta $\geq 25 \text{ GHz}$.

Tratándose de un telescopio de síntesis de apertura, una implementación secuencial permite el comienzo de operaciones antes de su despliegue total. El calendario para las frecuencias bajas y medias está dividido en 6 fases principales:

- Preparatoria (2008-2012).
- Pre-construcción (2013-2015).
- Construcción de SKA1 (2016-2019).
- Operaciones de SKA1 (2020-).
- Construcción de SKA2 (2018-2023).
- Operaciones de SKA2 (2024-).

No hay fechas definidas aún para SKA3. El coste estimado de SKA1 es de 350 M€ , y el del interferómetro completo (SKA1+2) se estima en torno a los 1.500 M€ . No hay estimaciones para SKA3. Los costes de operación se esperan del orden de $100 \text{ M€}/\text{año}$.

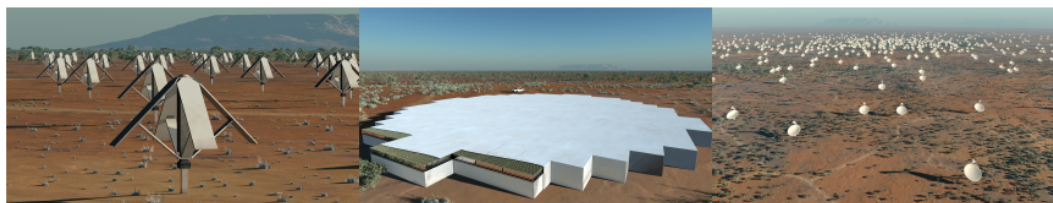


Figure 1: Visión artística de los tres tipos de antenas que compondrán SKA. Crédito: SKA Organisation/TDP/DRAO/Swinburne Astronomy Productions

2 Tipos de antenas

El rango de frecuencias de 70 MHz a 10 GHz, que abarca más de dos décadas, requiere el uso de diferentes tecnologías, por lo que el SKA contará con series de tres tipos de elementos[3] (ver Fig. 1):

- Bajas frecuencias (SKA–low, 70 a 450 MHz): formado por lo que se llama “phased array” de antenas de tipo dipolo agrupadas en estaciones de unos 100 elementos.
- Frecuencias intermedias (SKA–mid, 200 a 500 MHz): se cubrirían con “dense phased arrays”, formadas por una matriz de pequeños elementos receptores, y sintetizando de manera digital, a partir de la señal recogida por los elementos individuales, un haz coherente en una dirección concreta. Esas matrices se agruparían a su vez en estaciones AA (*aperture array*) de 60 m de diametro, volviendo a formar un nuevo haz que permitiría cubrir un área extensa del cielo.
- Antenas de tipo plato (450 MHz a 10 GHz), inicialmente con un solo pixel (y alcanzando los 2 GHz), y posteriormente con *arrays* en el plano focal (*phased array feeds* - PAFs) que permitirán observar en un campo mucho más amplio.

Parte de los desarrollos asociados a estos elementos se realizará en el marco del Programa de Instrumentación Avanzada (*Advanced Instrumentation Program* - AIP), que incluye los PAFs para las antenas parabólicas, las *dense aperture arrays* (AA-mid), y la ampliación del ancho de banda accesible por las antenas de tipo plato (*wide-band single-pixel feeds* - WBSPPFs).

3 Ubicación

Un factor clave en la selección de un emplazamiento para SKA es su ubicación en zonas sin poblar, para evitar la contaminación que suponen las interferencias a longitudes de onda de radio. Las cuatro candidaturas iniciales (Sudáfrica, Australia, Argentina y China) se redujeron a dos, tras ser eliminadas Argentina y China. A la de Sudáfrica se añadieron 8 países africanos (Botswana, Ghana, Kenia, Madagascar, Mauricio, Mozambique, Namibia y Zambia) y a la australiana, Nueva Zelanda, proporcionando un aumento significativo en ambos casos en las líneas de base del interferómetro. En Mayo de 2012, el *Site Options*

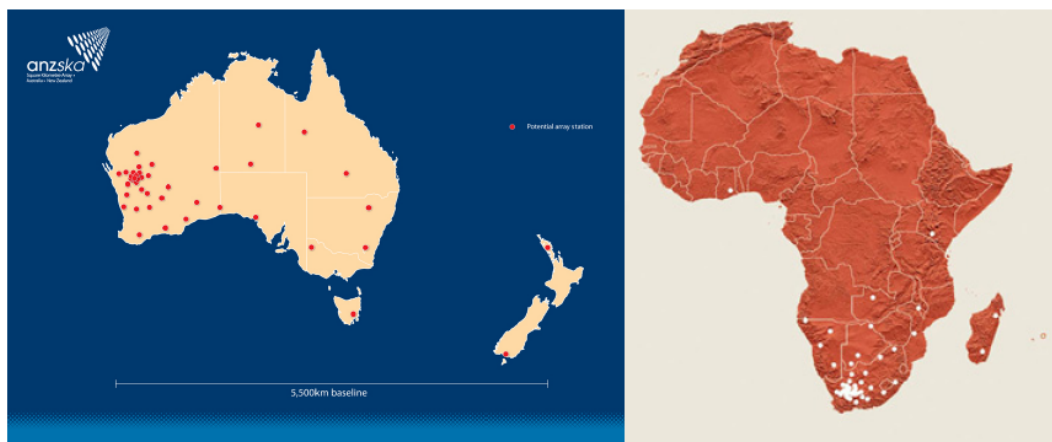


Figure 2: *Izda.*: Distribución potencial del emplazamiento de las estaciones de SKA en Australia y Nueva Zelanda, indicando la línea de base máxima de 5.500 km. Crédito: CSIRO. *Dcha.*: Posible distribución de antenas de SKA en el continente africano. Crédito: SKA Africa.

Working Group estudió la posibilidad de distribuir SKA entre las dos candidaturas (ver Fig. 2), la cual fue considerada viable por dicho comité. La distribución final para SKA1 consiste en desplegar las frecuencias intermedias en Sudáfrica, uniendo a las 64 parábolas del precursor MeerKAT 190 más de SKA. Las 60 antenas restantes, de las 250 previstas, se ubicarían en Australia dotándolas de PAFs e integrándolas con el precursor ASKAP.

4 Las fases de SKA y sus principales casos científicos

Los 5 KSP arriba indicados definen las especificaciones para la construcción de SKA, aunque se implementarán a distinto nivel en SKA1 y SKA2 [4]. SKA1 se va a centrar en dos subconjuntos de dichos casos. Por una parte estudiará la historia del hidrógeno atómico (HI) desde la "edad oscura" hasta la actualidad, proporcionando las primeras medidas directas del contenido bariónico dominante del universo temprano, y trazando las estructuras a gran escala (KSP1 y KSP2). Por otra testará las teorías sobre la gravedad mediante la detección y medición de periodos de púlsares y buscando perturbaciones debidas a ondas gravitatorias (KSP4). SKA1 podrá detectar en torno a 2000 púlsares, mientras que con SKA2 se podrá llegar a 10.000 - 20.000 púlsares, midiendo sus periodos con precisiones inferiores a 100 nanosegundos.

SKA2 aprovechará tanto la muy superior resolución angular proporcionada por las líneas de base a escala continental, como el mayor campo de visión proporcionado por el AIP para, por ejemplo, completar un mapeo de la época de reionización, así como, a $z \sim 2$ un estudio de miles de millones de galaxias, el *Billion Galaxy Survey*, que medirá la formación de las galaxias a partir del gas atómico y su transformación en estrellas, u oscilaciones bariónicas en el hidrógeno neutro, de valor cosmológico. A modo de ejemplo diremos que el tiempo aproximado necesario para detectar el HI de una galaxia como nuestra Vía Láctea a $z = 0.1$

es de 120 horas con Parkes (3200 m²), 7 minutos con SKA1 y 5 segundos con el SKA completo.

Aún siendo el estudio del magnetismo cósmico (KSP3) un proyecto formalmente clave en SKA2, etapa en la que se abordará el estudio de su origen, distribución o evolución, SKA1 podrá recibir la información completa de polarización, lo cual permitirá su aplicación a la calibración de proyectos de dicha etapa.

La capacidad de SKA2 para llegar a los 10 GHz permitirá asimismo detectar una amplia gama de moléculas interestelares, así como obtener imágenes de la emisión térmica en las regiones internas de los discos proto-planetarios, clave en el estudio de la formación de planetas (KSP5).

5 Situación actual del SKA

Las actividades encaminadas al diseño, fabricación, instalación y operación del *Square Kilometre Array* (SKA) están especificadas en el *SKA Project Execution Plan*[3], que las divide en distintas fases. La fase en la que se encuentra el SKA actualmente es la de preparación de la Stage 1 (*Stage 1 Preparatory-Phase*), cuya finalización está prevista para comienzos de 2013. Al término de dicha fase preparatoria comenzará la Stage 1 propiamente dicha, en la que los consorcios internacionales a los que la *SKA Project Office* (SPO) asigne los diferentes paquetes de trabajo, partirán de los diseños conceptuales aprobados y revisados mediante las *Conceptual Design Reviews* (CoDR). El resultado final de esta fase será un *Preliminary Design* que será validado en una *Preliminary Design Review* a finales de 2013. A partir de la *Preliminary Design Review* comenzará la fase de *SKA Phase 1 Pre-Construction* que durará tres años, consistente en la elaboración de un *Detailed Design*, listo para construcción. El último año de la Pre-Construcción será en el que se implementen los cambios identificados durante la *Critical Design Review*.

6 Paquetes de trabajo

El desafío tecnológico asociado está siendo abordado mediante la formación de consorcios internacionales y agrupaciones empresariales, que facilitan colaboraciones y negocios internacionales. Cada uno de los paquetes de trabajo de la fase de pre-construcción, se asignará a un consorcio internacional. A continuación listamos dichos paquetes de trabajo.

- SKA.TEL.DSH. Dish Arrays. Conjunto de platos de frecuencia media y alta (mayor de 450 MHz), con receptores de gran ancho de banda (*Wideband receivers*).
- SKA.TEL.AA. Aperture Arrays. Conjunto de antenas en frecuencia baja y media (70–450 MHz, 450 MHz –10 GHz).
- SKA.TEL.SADT. Signal & Data Transport. Red de transporte de: datos, señales de marca de tiempo, y sincronización del interferómetro.
- SKA.TEL.SAT. Synchronisation & Timing. Sistema para la gestión y sincronización de la referencia de tiempo para los sistemas de SKA.

- SKA.TEL.CSP. Central Signal Processing. Pre-procesado de señal, eliminación de ruido, correlación.
- SKA.TEL.SDP. Science Data Processor. Software de computación científica: reducción de datos científicos al archivo de datos, herramientas de visualización, etcétera.
- SKA.TEL.MGR. Telescope Manager. Software para la gestión del telescopio: monitorización y control, programación de observaciones, etcétera.
- SKA.TEL.PWR. Power. Distribución de energía en SKA, tanto en el núcleo central (SKA grid) como a las estaciones periféricas.
- SKA.TEL.INFRA. Site & Infrastructure. Actividades relativas a la infraestructura necesaria para soportar las operaciones de SKA.
- SKA.TEL.MGT. Project Management. Gestión de las actividades del proyecto.
- SKA.TEL.SE-SRR. System Level System Engineering. Soporte de ingeniería a todos los paquetes inter-relacionados, decisiones sobre arquitectura de los distintos subsistemas, etcétera.
- SKA.TEL.SCI. Science. Paquete para el seguimiento de los requerimientos sobre SKA derivados de los casos científicos del instrumento.

7 Desafíos tecnológicos

La realización de SKA supone un desafío global en áreas como diseño y construcción de antenas o ingeniería de sistemas. Pero los dos grandes retos de esta mega-infraestructura científica residen en el transporte masivo, almacenamiento y procesamiento de datos, y en el suministro de energía a todos los procesos implicados (antenas, transmisión en fibra, computación, etc), tanto en un núcleo central, equivalente a una población, como en áreas aisladas y remotas.

SKA requiere de computación de altas prestaciones, pero la tecnología actual no puede manejar la gran cantidad de datos que SKA va a producir. En SKA1 se espera que se produzca del orden de varios Terabytes s^{-1} en promedio, con picos mayores, lo cual daría lugar a unos costes inasequibles en almacenamiento. Posteriormente se alcanzaría 1 exabyte por día, del orden del doble del tráfico global actual diario de Internet. Y este valor hay que multiplicarlo por 100 o incluso mil cuando se combinen entre las diferentes partes del interferómetro.

Por ello será necesario almacenar los datos por un tiempo máximo y proceder con rapidez a su procesamiento y análisis. Producir los haces, correlacionando las señales tal y como se ha indicado más arriba, implica procesos en la escala de los Petaflops, y trabajar sobre esos datos, por ejemplo para buscar señal de HI, o emisión de un pulsar, sube a la escala de los Exaflop s^{-1} . Una extrapolación de la potencia de cálculo de los 500 mayores ordenadores del mundo (<http://www.top500.org>) indica que para 2018 se podría alcanzar dicho valor. Sin embargo en el mejor escenario actual cada Gigaflop s^{-1} requiere 0.5 W, lo cual implicaría un consumo para 1 Exaflop s^{-1} de 500 MW.

El objetivo de consumo de energía de SKA está en unos 100 MW, lo cual obviamente requiere un gran esfuerzo en innovación. Y no se trata sólo del cuanto sino del cómo: lejos

de poblaciones que puedan generar interferencias, y por tanto de suministro de energía, distribuida geográficamente, operando 24 horas al día 7 días por semana, requiriendo enfriado de la electrónica en el desierto, y de forma estable. Tal demanda energética, para un tiempo de operaciones previsto de unos cincuenta años, hace que la comunidad de científicos e ingenieros implicados en SKA aspire a ver unidos dos conceptos como las nuevas tecnologías y el desarrollo energético sostenible, aspirando a funcionar veinticuatro horas al día con energías renovables. Aún imaginando todos estos desafíos resueltos, la extracción de información científica relevante a partir de los inmensos volúmenes de datos supone que no será posible hacer ciencia de la misma forma que se ha venido haciendo hasta ahora. SKA constituye el ejemplo por excelencia de proyecto de e-Ciencia, por la naturaleza distribuida de sus sensores, el requerimiento de contar con computación distribuida para poder procesar los grandes volúmenes de datos, o la necesidad de crear herramientas para ciencia colaborativa.

8 SKA en España

En Mayo de 2011 tuvo lugar la Reunión Abierta de la Red de Infraestructuras en Astronomía (RIA) “Oportunidades científicas y tecnológicas del SKA”, celebrada en la sede del CSIC en Madrid, donde la comunidad astronómica española tuvo oportunidad de expresar su interés en SKA. Este interés se concreta en dos proyectos complementarios y coordinados entre sí que actualmente articulan las actividades de SKA en España. La Red científica española para SKA (IP: J. C. Guirado, Univ. Valencia) está enfocada en la ciencia con SKA y sus precursores, y en ella participan la Universidad de Valencia, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Centro de Astrobiología (CSIC), Observatorio Astronómico Nacional, Universidad de Barcelona, Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña, Universidad de Granada, Universidad de Jaén, Instituto de Astrofísica de Canarias, Instituto de Física de Cantabria (CSIC) y Universidad Politécnica de Cataluña. Asimismo se está llevando a cabo el Estudio de Viabilidad de Participación Industrial Española en SKA dentro del proyecto VIA-SKA (PI: L. Verdes-M., IAA-CSIC, <http://www.via-ska.es/ska/>), cuyas actividades y participantes explicamos en más detalle a continuación.

8.1 VIA-SKA

El principal objetivo del proyecto VIA-SKA es la identificación de nichos tecnológicos en los que la industria española pueda contribuir, así como el contacto con empresas y centros con desarrollo tecnológico con capacidades para participar en SKA, con los que discutir en detalle las oportunidades que SKA brinda, concretando su posible participación.

El proyecto comenzó a final de 2011 con la colaboración con la SPO en la elaboración de la *Work Breakdown Structure* y *Statements of Work* para la Fase 1 de SKA, en concreto en los paquetes de trabajo: *Dish Arrays*, *Aperture Arrays*, *Science Data Processor*, *Power* y *Science*.

En colaboración con Fractal y con el Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables (CTAER), se diseñó, como primera actividad, un dossier recopilando la información

técnica sobre SKA relevante para una posible participación española tecnológica en SKA, que condujo a que 47 empresas españolas mostraran su interés expreso en participar en el proyecto. Desde principios de mayo VIA-SKA está recopilando información detallada de las empresas anteriores, y registrándolas en el portal <http://www.via-ska.es/ska/>. Esta información incluye, tanto capacidades técnicas, como un mapeo de sus intereses y capacidades con los paquetes de trabajo de SKA.

VIA-SKA ha sido formalmente invitada a participar en el European SKA Consortium (ESKAC) desde el pasado 9 de septiembre, representando al Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC), Centro de Astrobiología (CAB, CSIC), Instituto de Física de Cantabria (IFCA, CSIC), Universidad de Valencia, Universidad de Barcelona, Universidad de Granada, Universidad de Cantabria, Observatorio Astronómico Nacional (OAN, Instituto Geográfico Nacional), Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Institut de Ciències de l'Espai (IEEC, CSIC), Universidad Politécnica de Cartagena e Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Recordamos que ESKAC tiene como objetivo promover actividades científicas y técnicas, europeas y globales, relacionadas con el SKA.

Motivado por el papel relevante que España, junto con Portugal, puede jugar en el paquete de trabajo de *Power* de SKA, VIA-SKA organizó a petición de la SPO una visita a las instalaciones de energía solar concentrada PS10 y PS20 de Abengoa (emplazadas en Sanlúcar la Mayor, Sevilla) el pasado 28 de Mayo, y también participó en la organización de un workshop sobre opciones de energías renovables para SKA, que tuvo lugar en Moura (Portugal) los pasados 20 y 21 de junio de 2012 (<http://www.av.it.pt/workshops/pcska/>).

En los últimos meses VIA-SKA ha facilitado el contacto de los equipos españoles con los protoconsorcios que se están constituyendo de cara a la Stage 1 de SKA, resultando de ello la participación en 6 de dichos protoconsorcios que planean presentar una oferta a la *Request for Proposal* que se abrirá por la SKA Organization a comienzos de 2013 para sendos WPs.

Acknowledgments

VIA-SKA es un proyecto financiado por el MICINN (AIC-A-2011-0658), AYA2011-30491-C02, co-financiado por el MICINN y fondos FEDER. Sin la contribución de los participantes de VIA-SKA, así como de Fractal SLE y del CTAER esta presentación no habría sido posible.

References

- [1] Carilli, C. & Rawlings, S. (eds). Science with the SKA, 2004, New Astronomy Reviews, Vol 48, pp 979-1563
- [2] de Zeeuw P.T., Molster F.J., (eds) A Science Vision for European Astronomy, 2007, ASTRONET, ISBN 978-3-923524-62-4, ASTRONET Science Vision
- [3] Schilizzi R.T., et al., 2011, SKA document, Project Execution Plan
- [4] SKA Science Working Group, The Square Kilometre Array Design Reference Mission: SKA-mid and SKA-lo, report, v1.0, February 2010