

第14回宇宙環境シンポジウム 2017年11月6-8日 神戸大学

EISCAT_3D

(次世代欧州非干渉散乱レーダー)

による宇宙環境研究と監視(2)

宮岡 宏¹、小川 泰信¹、西村耕司¹、中村 卓司¹、野澤 悟徳²、大山 伸一郎²、
藤井 良一³、C.Heinselmann⁴

¹国立極地研究所 ²名古屋大学宇宙地球環境研究所
³情報・システム研究機構 ⁴EISCAT 科学協会



NiPR
National Institute of Polar Research



ISEE
宇宙地球環境研究所
Institute for Space-Earth Environmental Research



EISCAT

EISCAT_3D (次世代欧州非干渉散乱レーダー) 計画

○日本が加盟する欧州非干渉散乱(EISCAT)科学協会が1982年より運用を開始したEISCATレーダーに代わる次世代レーダーとして2002年頃より検討を始めた**世界初(最大級)の多局式フェーズドアレイ大気レーダーシステム**である。

○EUの大型研究計画ロードマップESFRIに2008年に採択され、FP-6 Design Study (2005-09)、FP-7 Preparatory Study (2010-14)、H2020 EISCAT-PfP (2015-17)等の支援を受けて準備を進めてきた。

○2014年以降、加盟国である北欧3か国(ノルウェー、スウェーデン、フィンランド)の整備予算が順次内定し、残る英国、日本、中国の予算措置を待って着工を決定する状況となっていた。

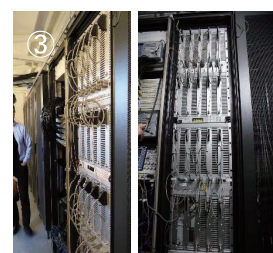
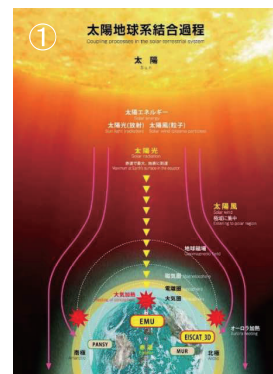
○2017年3月に英国が6Mポンド(約8億円)の予算措置を決定し、既内定額と合わせ、**第1期分整備経費685MSEK(約88億円)の約86%が確保**された。これを受けて、引き続き日本、中国の予算化を期待しつつ、全4期計画のうち、**第1期分の整備を本年9月1日より開始**することを5月31日、6月1日に開催したEISCAT評議会(極地研)で正式決定した(別紙1)。2021年末までに整備を完了し、**定常運用を開始**する。

○2017年9月7日にトロムソ大学及び主局予定地であるシーボトン(ノルウェー)において、各国関係者や現地コミュニティ代表者など約80名が参加して**EISCAT 3D起工式が開催**された。日本からは藤井機構長とEISCAT評議会委員2名(宮岡、野澤名大准教授)が参加した。

○日本は、極地研と名大太陽地球環境研究所(現宇宙地球環境研究所)を中心に、国内研究コミュニティの意見を集約して研究計画を立案し、EISCAT本部とも連携しつつ、**2013年以降**、大型予算の獲得に向けて**概算要求**を進めてきた(別紙2)。

○2014年に「**太陽地球系結合過程の研究基盤形成**」(代表:津田敏隆京大生存圏研究所教授、現ROIS理事)の一部として**マスタープラン2014(日本学術会議)及びロードマップ2014(文部科学省)の重点大型研究計画**に採択。2017年2月に改訂後のマスタープラン2017にも採択された(計28件)。**6月にロードマップ2017の最終選考(計21件)まで進んだが、採択には至らず**(①)。

○平成26年度より**内部予算を用いてEISCAT 3D用レーダー送信機の自主開発**を進めてきたが、**平成28年度に「多点大型レーダー計画の推進」(8800万円)の予算措置**を受け、**技術実証用送信機19台を開発製造**し、本年6月以降トロムソ観測所の試験用サブアレイ装置に組み込み、**実証試験を実施中**。難易度の高いEISCAT_3Dの要求性能をクリアするとともに安定した動作状況が高く評価されている(②、③)。



EISCAT (European Incoherent Scatter) レーダーとは？

Associate countries and institutes

Contributing:

- EISCAT科学協会 (1975年設立、1996年に日本加盟)
- UHFレーダー、VHF3局レーダー、電離層加熱装置
- スバル第1、第2レーダー

北欧レーダーの更新計画 (EISCAT 3D)

Tromsø VHF radar (22.4MHz) 1986~

Tromsø UHF radar (2.2MHz) 1981~

EISCAT Svalbard radar (500MHz)
① 32m antenna 1996~
② 42m antenna 1999~

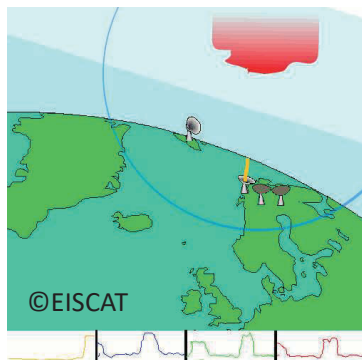
Kiruna UHF radar

Sodankylä UHF radar

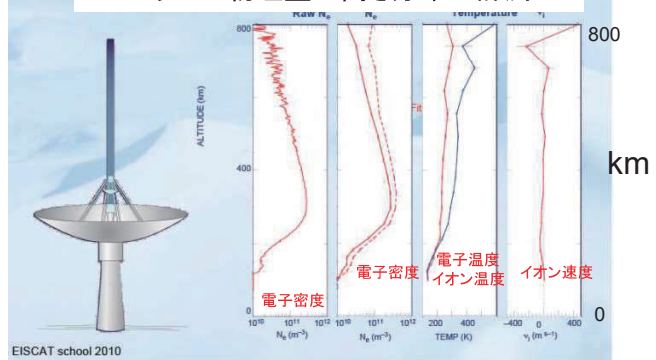
非干渉散乱 (Incoherent Scatter) レーダーとは？

高度70kmから1,000km以上の広範囲を高精度に観測できる強力な大型大気レーダー
 大気中の電子によって散乱される微弱な電波を用いて、電子密度や温度などの物理量を測定する。微弱な電波から物理量を測定するには、**大口径 (直径30m以上) の送受信アンテナと大きな送信出力 (1メガワット以上) が**必要。

3局方式のEISCATレーダー



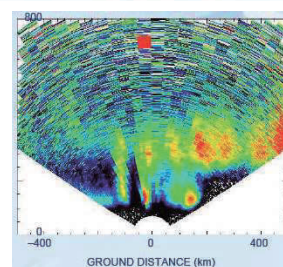
プラズマ物理量の高さ分布の計測



直接観測できる物理量:
電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度 (ベクトル)

$$E = -\vec{v}_i \times B \rightarrow E \text{ (ベクトル)}$$

E: 電場
 \vec{v}_i : イオン速度
B: 磁場



アンテナ掃引による2次元電子密度観測

EISCAT 3D

*EISCAT 3D is the major upgrade of the existing EISCAT mainland radars, with a **multi-static phased array system** composed of **one central active (transmit-receive) site** and **4 receive-only sites** to provide us **50-100 times higher temporal resolution** than the present system.*

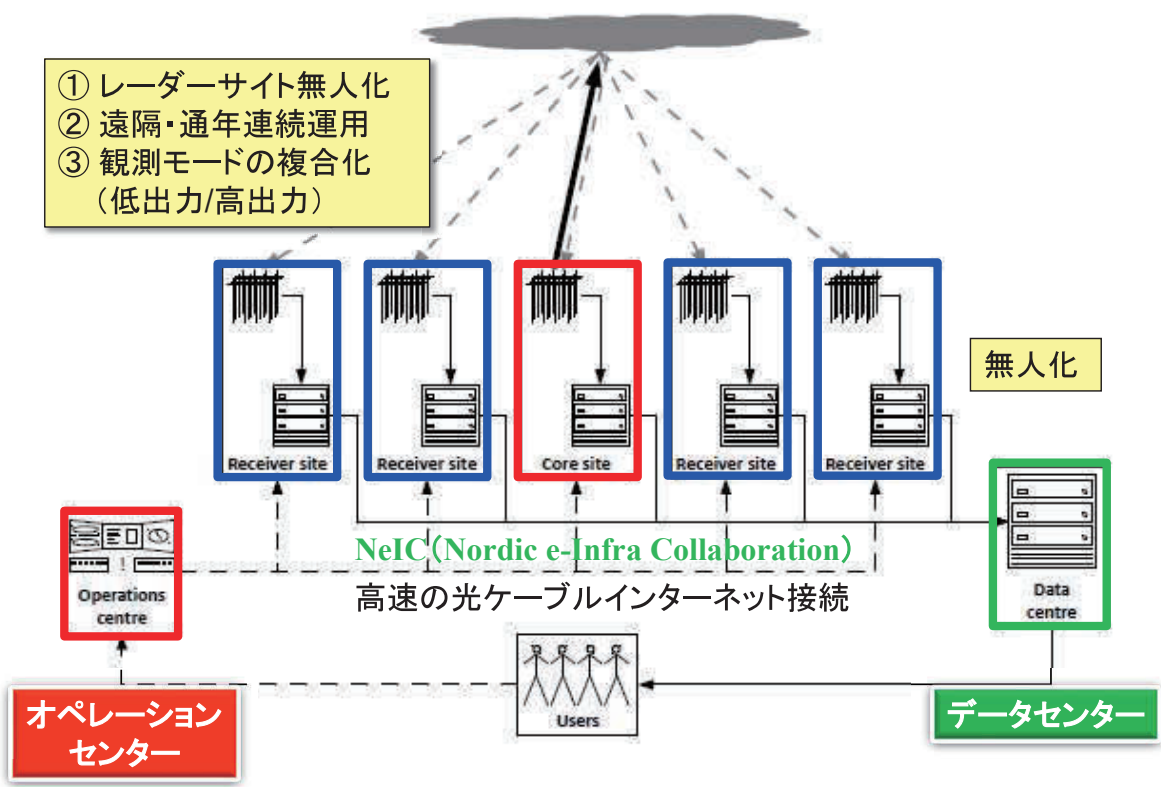
Map showing sites: Tromsø (T/R (Core)), Kiruna, and four Receive (R) sites.

3D visualization of the radar beams from the Core site.

Core/Receive sites: Receive 1, Receive 2, Receive 3, Receive 4, and Core.

Phased Array antennas.

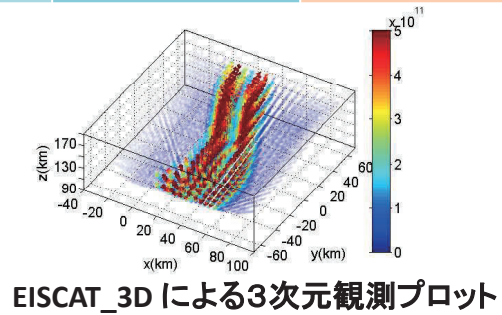
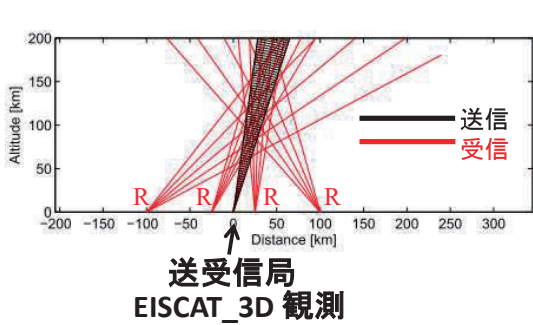
EISCAT_3Dレーダーのシステム構成



観測性能(時間分解能)が飛躍的に向上

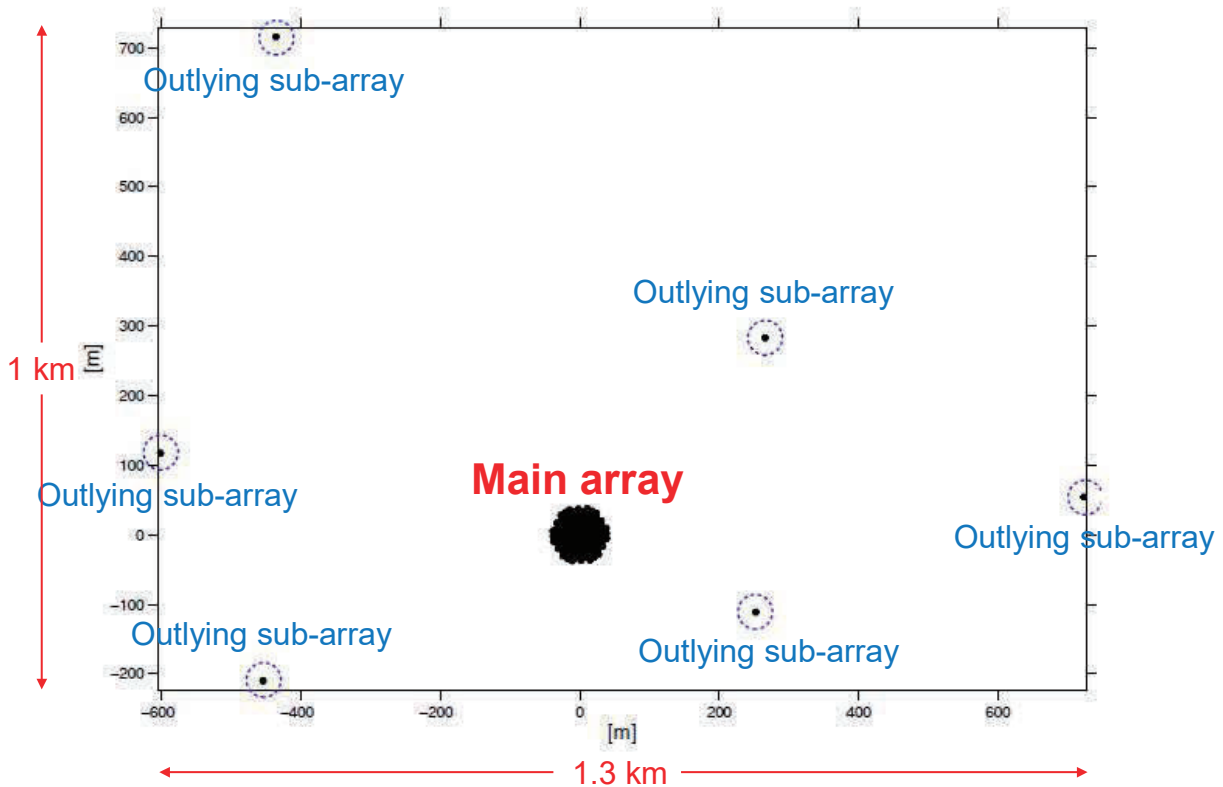
送信機出力やアンテナ開口面積が増えることにより、1回(点)の観測に要する時間は1/100程度まで短縮され、時間分解能が飛躍的に向上する。(時間分解能=1回の観測に要する時間)

大気の密度・温度・速度 (観測高度)	EISCATの 時間分解能	EISCAT_3Dの 時間分解能	性能向上指数
電子密度・イオン温度・電子温度(110km)	5 秒	0.05 秒	100 倍
電子密度・イオン温度・電子温度(300km)	20 秒	0.3 秒	67 倍
3次元イオン速度(110km)	500 秒	10 秒	50 倍
3次元イオン速度(300km)	100 秒	1 秒	100 倍



7

干渉法による高解像度化





EISCATトロムソ観測所内に設置された 技術実証試験用サブレイシステム

EISCAT_3D起工式 2017年9月7日
トロムソ大学キャンパス及びシーボトン野外施設



トロムソ大学学長挨拶



シーボトン野外施設

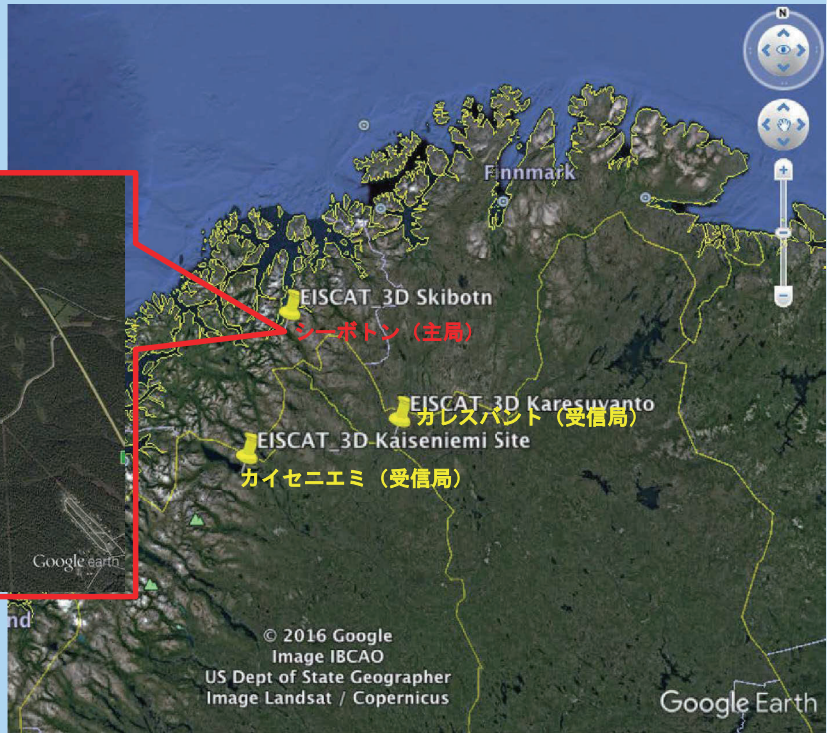
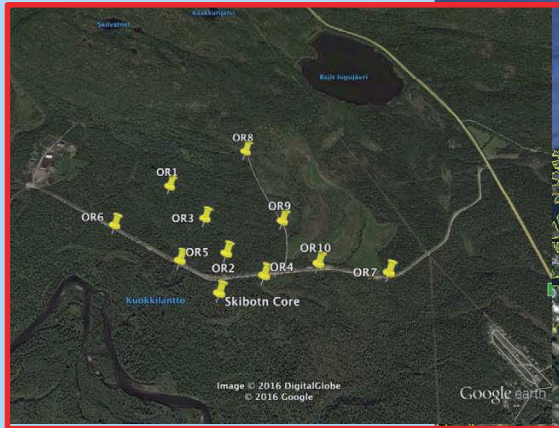


EISCAT_3D 定礎



EISCAT_3D 第1段階整備計画

主局にはメインアンテナの他に空間分解能を上げる目的で10箇所の干渉計用サブアレイを追加する



Stage 1

1 core site (5MW) +
2 remote sites

Start partial operation in 2021

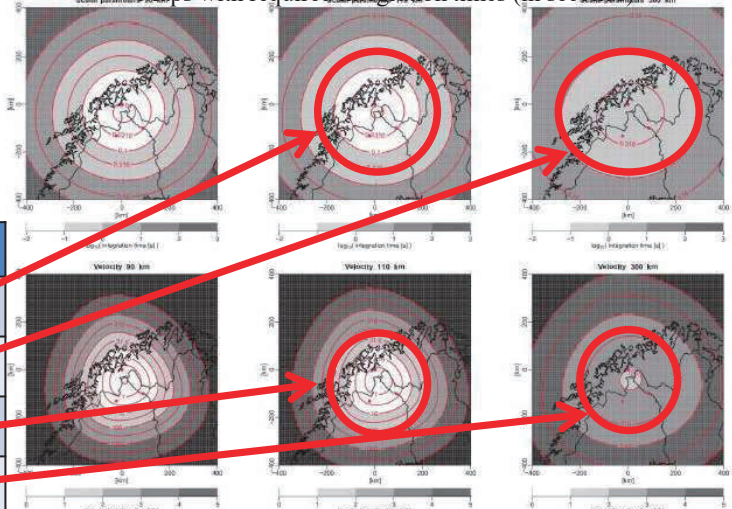


Stage 1 configuration.

Maps with required integration times (in seconds)

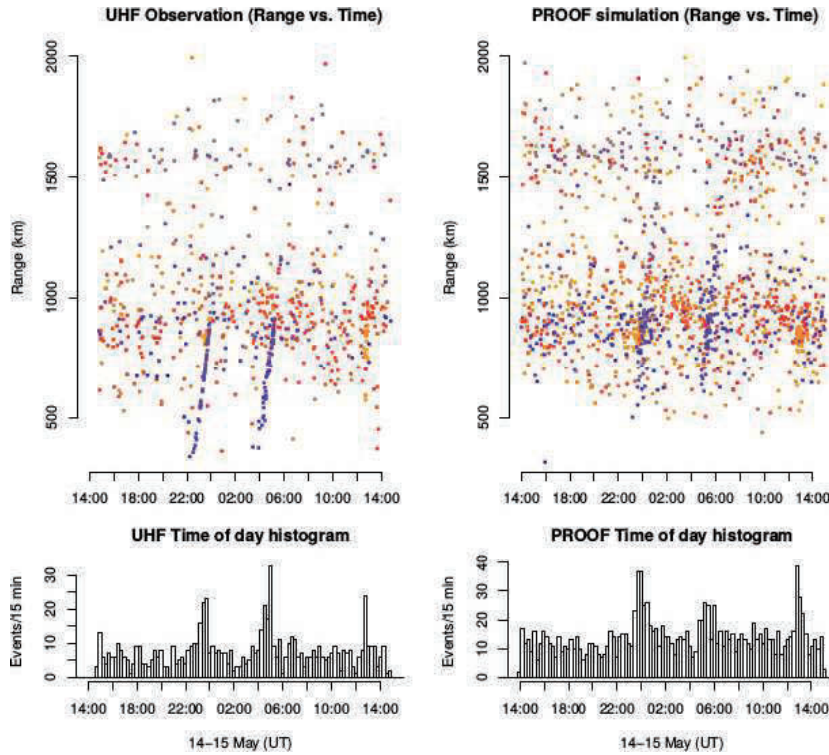
Required integration times to reach 1% standard deviation of isotropic parameters and vector velocity

parameters@height	EISCAT_3D
Ne,Ti,&Te@110km	0.3 sec
Ne,Ti,&Te@300km	1 sec
Vector Vi@110km	100 sec
Vector Vi@300km	300 sec



Stage 1 performance.

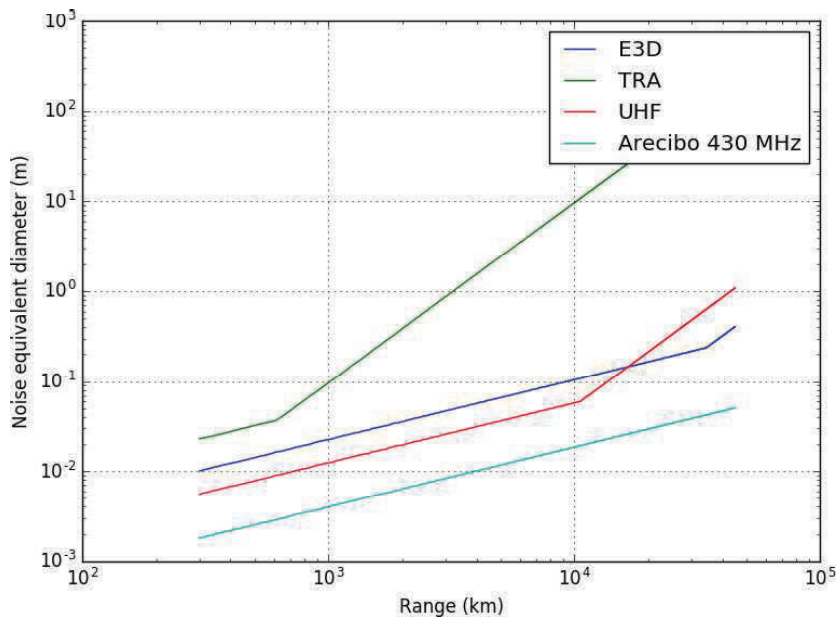
Existing EISCAT capabilities (beam park)



Iridium-Cosmos debris (Vierinen et.al., 2009)

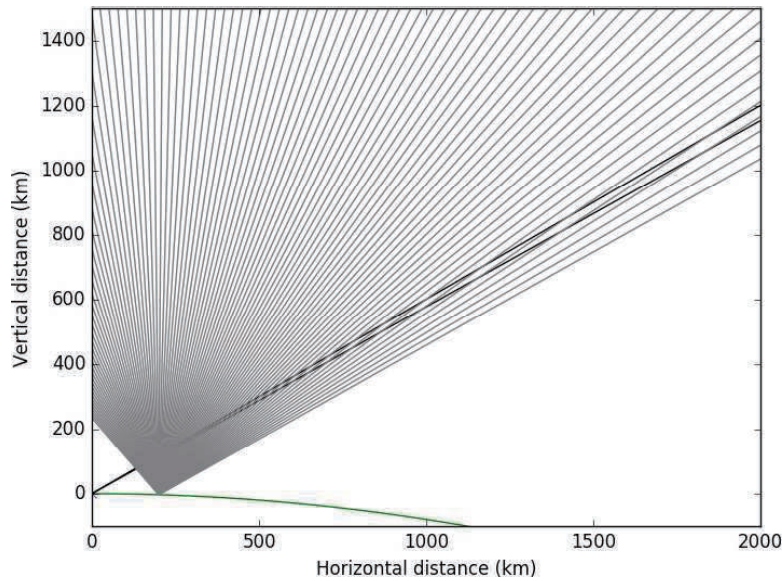
4 / 34

System noise equivalent diameter (metallic sphere)



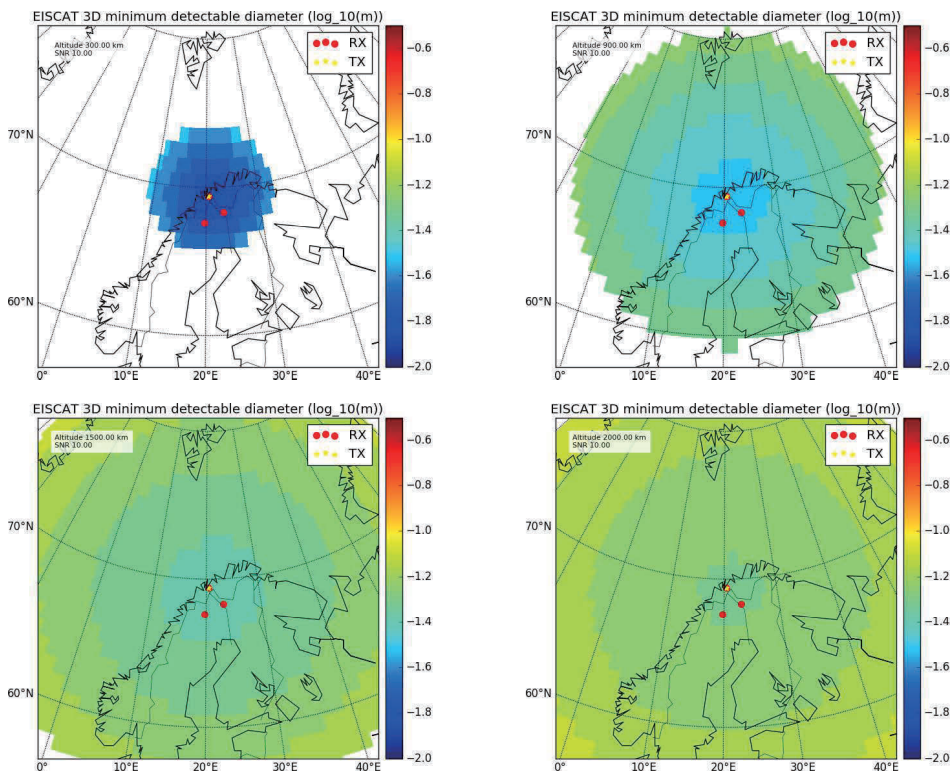
Receiver noise equivalent diameter as a function of range for E3D. For comparison, the EISCAT UHF (930 MHz, 2 MW) and EISCAT Svalbard Radar (500 MHz, 1 MW) performance is shown. (Vierinen et.al., 2017)

Bi-static receivers can form up to 100 beams

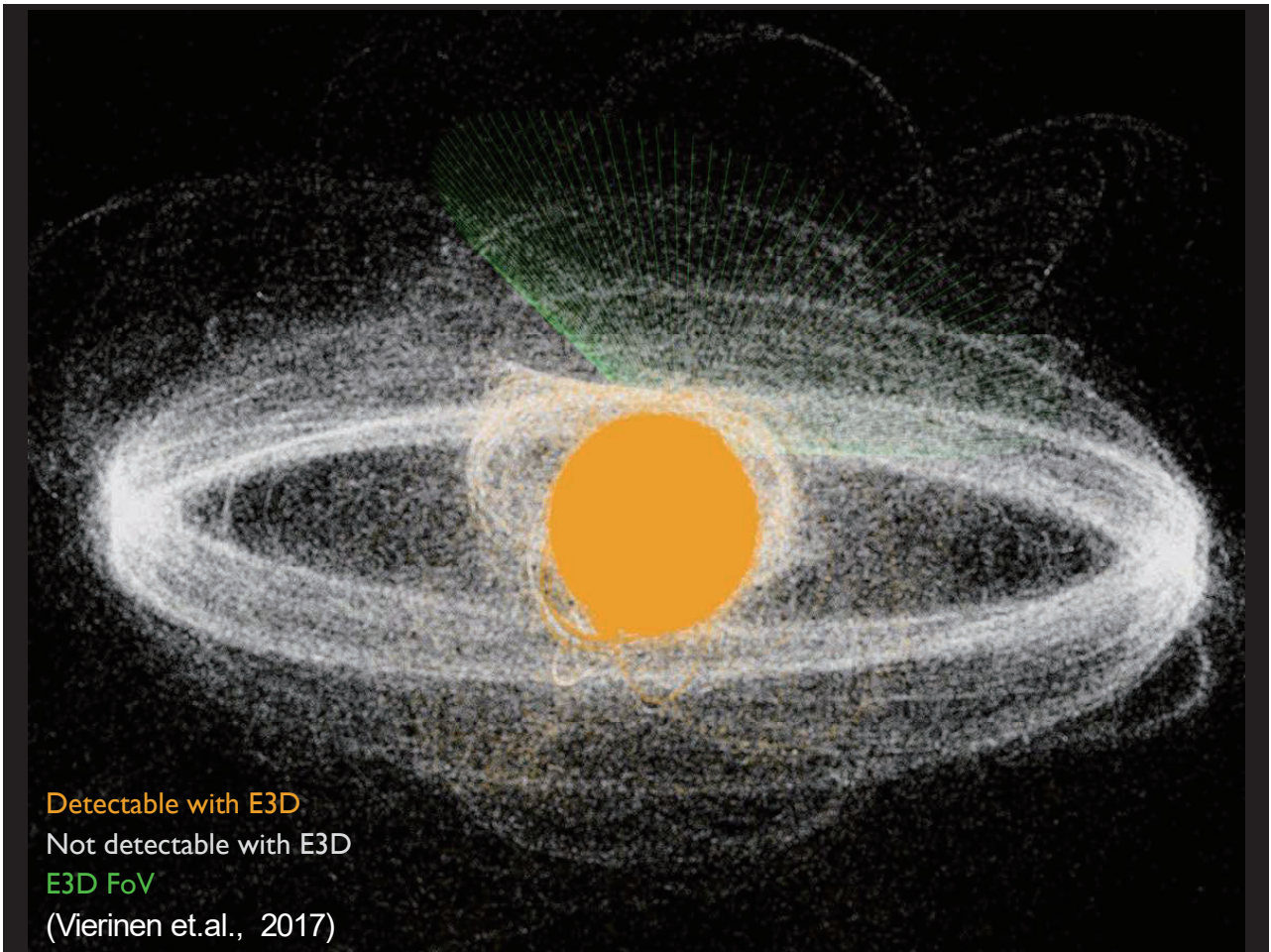


Conceptual diagram of a 1 ° transmit beam intersected by 100 receive beams to cover a full range of altitudes. This is at an extreme elevation angle of 60 ° off zenith. (Vierinen et.al., 2017)

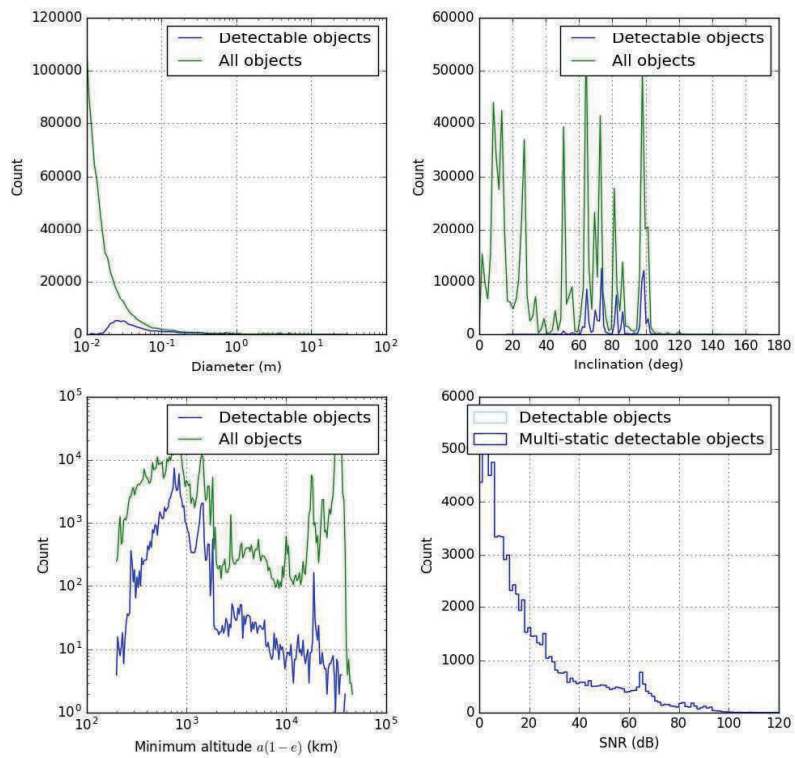
Minimum detectable diameter (SNR=10)



FoV at 300, 900, 1500 and 2000 km altitudes. (Vierinen et.al., 2017)

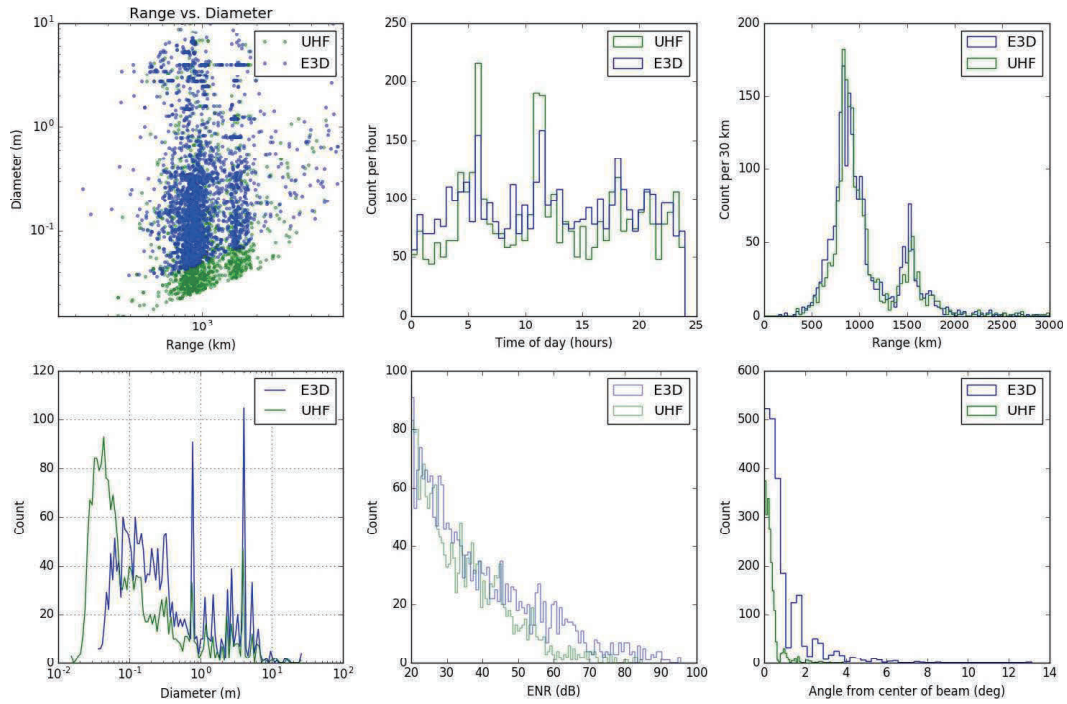


Detectable objects ($\approx 10\%$ of objects > 1 cm)



(Vierinen et.al., 2017)

Discovery of unknown objects (2000 per day)



Beam park detections per day. EISCAT UHF (930 MHz) is shown for reference. (Vierinen et al., 2017)

EISCAT_3D整備年次計画

年/月	2017/09	2018/01	2018/05	2018/09	2019/01	2019/05	2019/09	2020/01	2020/05	2020/09	2021/01	2021/05	2021/09	2022/01
技術実証試験 (トロムソ)														
試験システム更新														
試験・オペレーション														
主局 (シーボトン)														
設計														
現地工事														
ハードウェア設置														
試験・オペレーション														
受信局 (カイセニエミ)														
設計														
現地工事														
ハードウェア設置														
試験・オペレーション														
受信局 (カレスバント)														
設計														
現地工事														
ハードウェア設置														
試験・オペレーション														
EISCAT_3Dコミショニング														
EISCAT_3D運用 (第1期)														

SUMMARY

1. 北欧3か国＋英国の予算内定(608MSEK=約78億円)を受け、本年6月にEISCAT_3D計画の整備開始を正式に決定した。第1段階の整備を2021年末までに完了し、本格運用を開始する。 9/7に現地で起工式を開催した。
2. EISCAT_3Dレーダーは、その大きな送信出力、開口面積、多局フェーズドアレイシステムにより、スペースデブリの検出をはじめとする宇宙環境監視の強力なツールとなることが期待される。
3. 日本が開発・製造した送信機用増幅器(SSPA)18台を技術実証用サブアレイに組み込み、性能評価試験を開始。EISCAT_3Dの要求仕様を満たし、高い評価を得ている。今年度中の最終量産モデルの確定に向けて開発を継続中。