

MYONTOMOGRAFI

POTENTIEL ANVENDELSE AF MYONTOMOGRAFI I DANSK ARKÆOLOGI



Søren Rexbye Hansen & Rasmus Rexbye Hansen

CAA-konference 2026

Fjerndetektering & ikke-destruktiv arkæologi



INTRODUKTION

- Om os
 - Søren Rexbye Hansen
 - *cand.mag.* i arkæologi
 - Rasmus Rexbye Hansen
 - *cand.scient* i astrofysik
 - *dip.ed.* i astronomi, fysik

INTRODUKTION

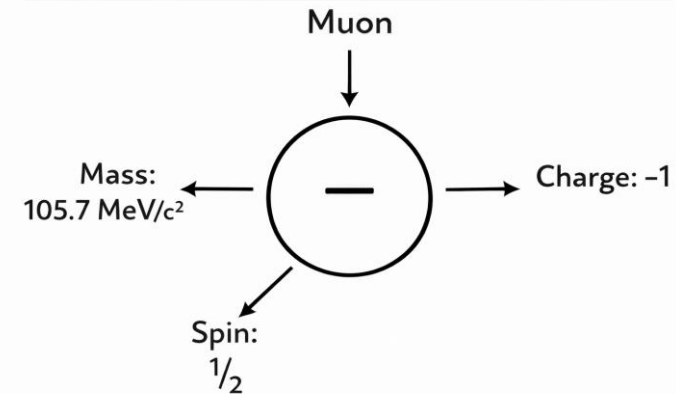
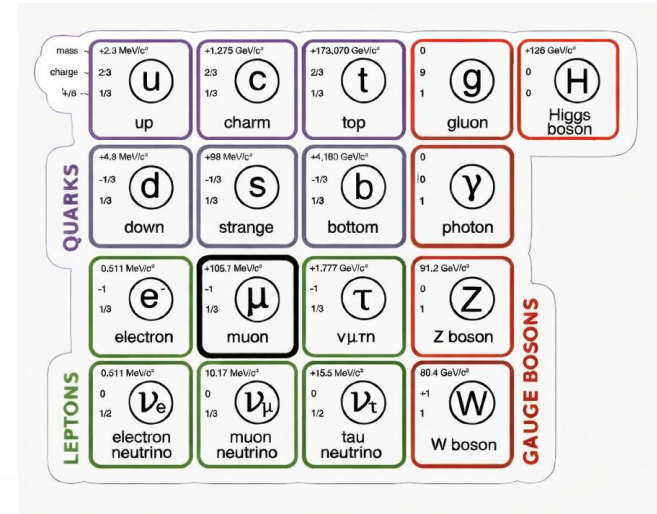


- Om os
- Om projektet
 - Afprøve myografi i DK
 - Udvikle grundmetoden til arkæologi
 - Tværfaglige undervisningsforløb
 - Finde en ukendt skat

MYONEN (μ^\pm)

- Partikelegenskaber

- II. generations lepton (fermion)
- Højere masse-energi ækvivalens end e^\pm
 - $m_\mu = 105,66 \frac{\text{MeV}}{c^2} \sim 200 m_e$
- Myon paradokset
 - Levetid på $2,2\mu\text{s}$
 - Relativisk dynamik



MYONEN (μ^\pm)

- Partikelegenskaber
- Kosmisk stråling

I. Hadronstråling

- 87% protoner (1_1H) & 12% α -partikler (4_2He)
- Termosfæren (ca. >80 km.o.h.)

II. Mesonstråling

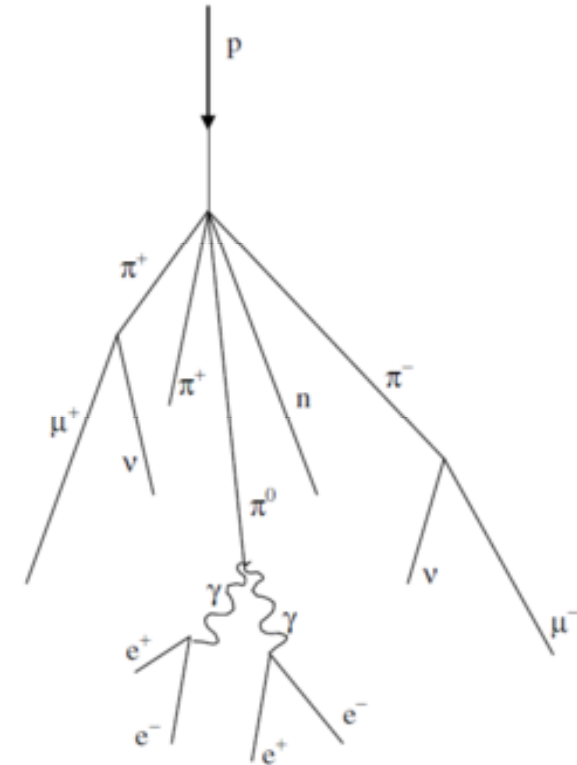
- Piondannelse (ca. 60 km.o.h.)
- Mesosfæren (ca. 50-80 km.o.h.)

III. Leptonstråling

- Myondannelse (ca. 30 km.o.h.)
- Stratosfæren (ca. 12–50 km.o.h.)
- Troposfæren (0-12 km.o.h.)

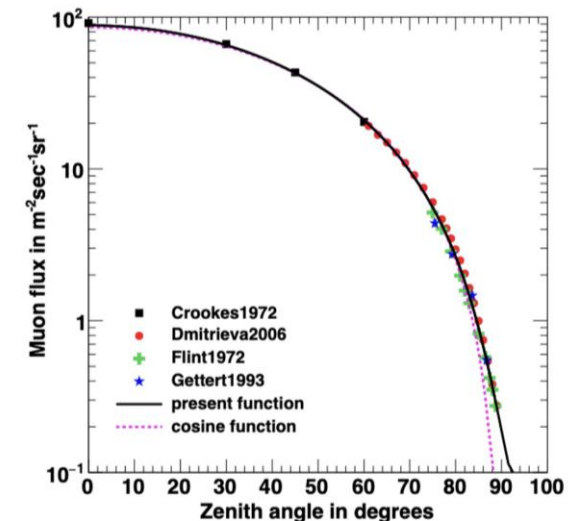
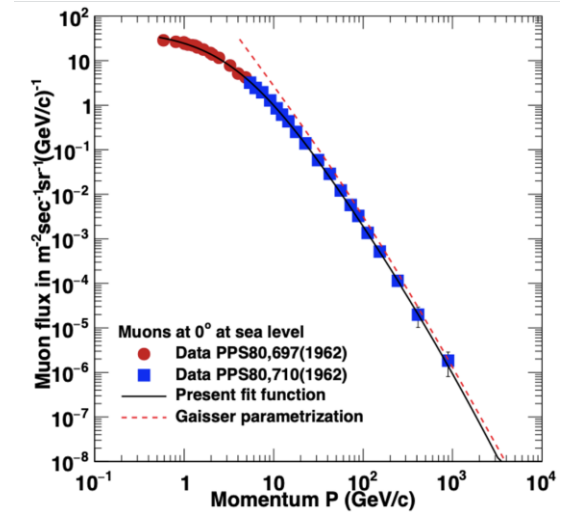
$$n \rightarrow p^+ + \pi^-$$
$$p \rightarrow n + \pi^+$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



MYONEN (μ^\pm)

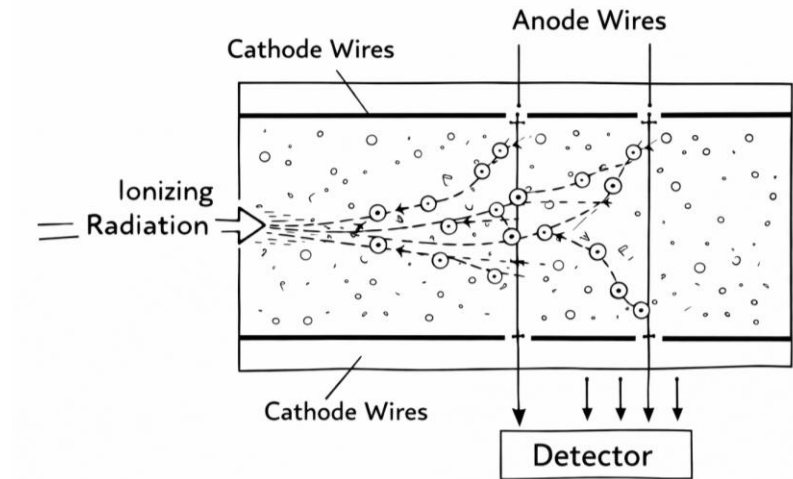
- Partikelegenskaber
- Kosmisk stråling
- Myonstråling
 - Myosfæren (30 km.o.h.- 10 km.u.h.)
 - Højenergisk ioniserende stråling
 - Dyb penetreringsevne
 - Omnidirektionel indstråling



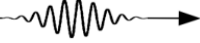
MYONDETEKTOREN



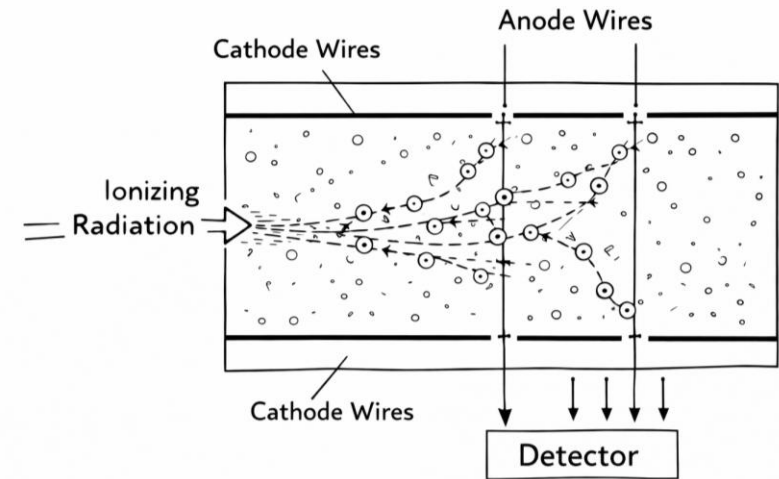
- Detektortypen
 - Multi-Wire Proportional Chamber
 - Måler partikelsporet
 - Ioniserende gas
 - Argon-Isobutan, Ar/C_4H_{10}



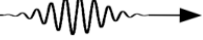
MYONDETEKTOREN



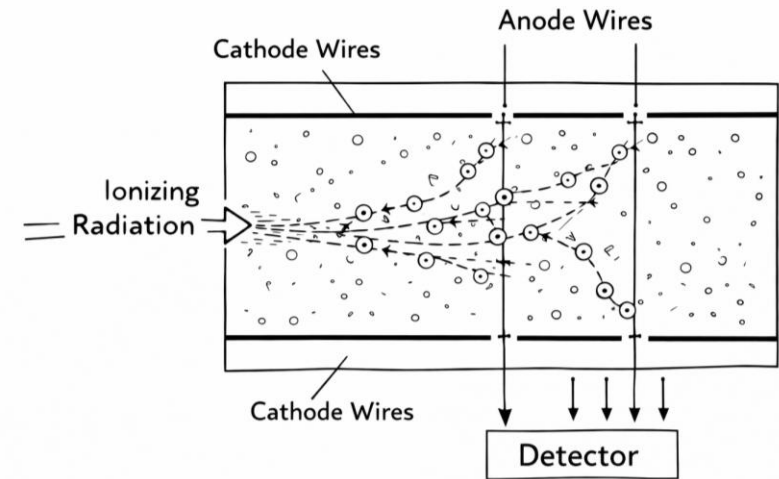
- Detektortypen
- Tekniske spesifikasjoner
 - Dimensioner $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ ($0,8\text{m}^2$)
 - Masse $\sim 10\text{kg}$
 - Strømforbrug $\sim 10\text{W}$
 - Direkte strømforsyning
 - 3 Litiumbatterier
 - GPS



MYONDETEKTOREN



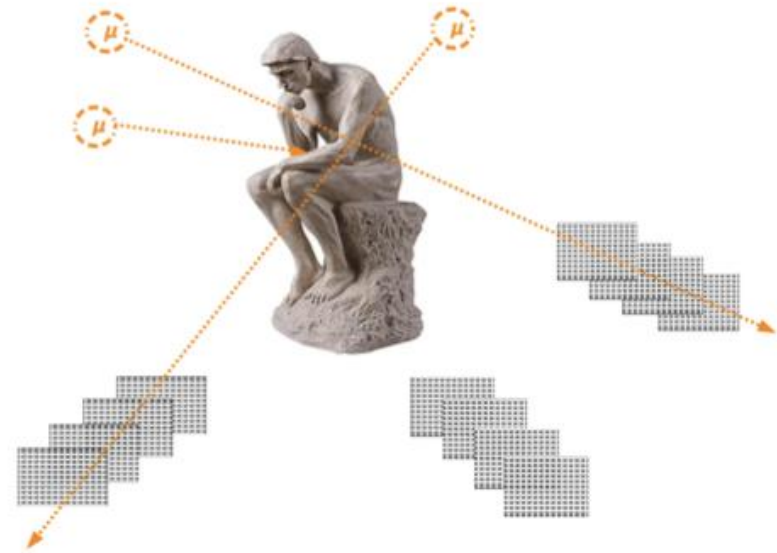
- Detektortypen
- Tekniske specifikationer
- Dataopsamling
 - $N_{\mu} > 10^6$ pr. detektor
 - Tager ca. 1 uge pr. detektor
 - Datavolumen $< 100 \frac{MB}{mdr}$
 - WiFi vha. Raspberry Pi



MYOGRAFI



- Myontomografi
 - Rumlig gengivelse af μ^\pm -baner
 - Kræver 3 forskellige dektektorpositioner
 - Tid vs. detaljer (nytteværdi)

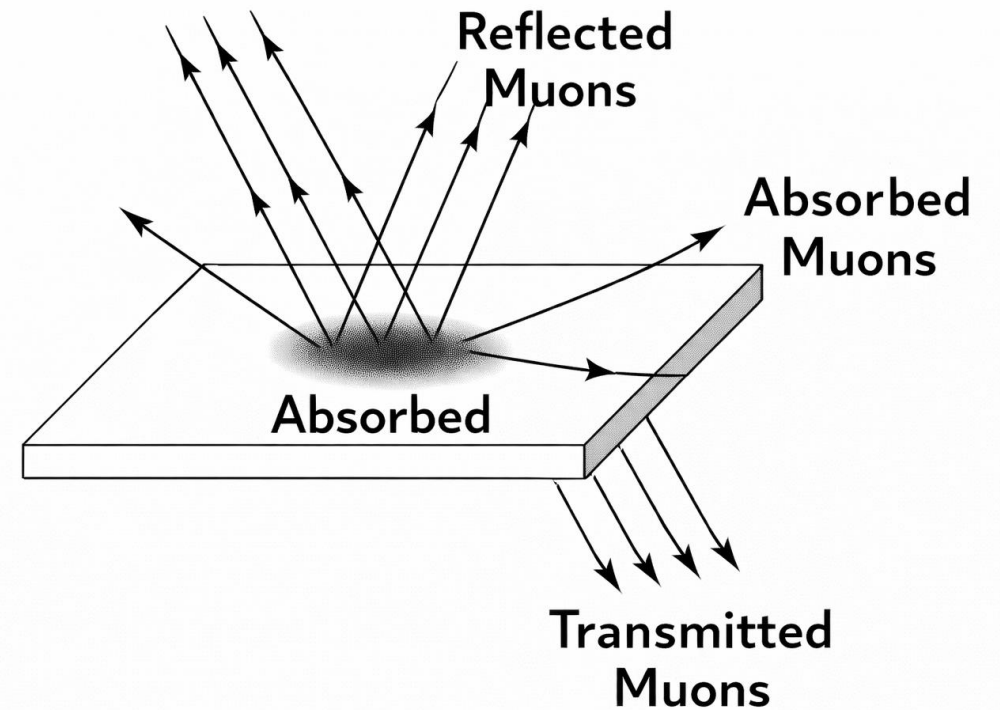


MYOGRAFI



- Myontomografi
- Transmissionsvariation
 - Estimeret myonfluks

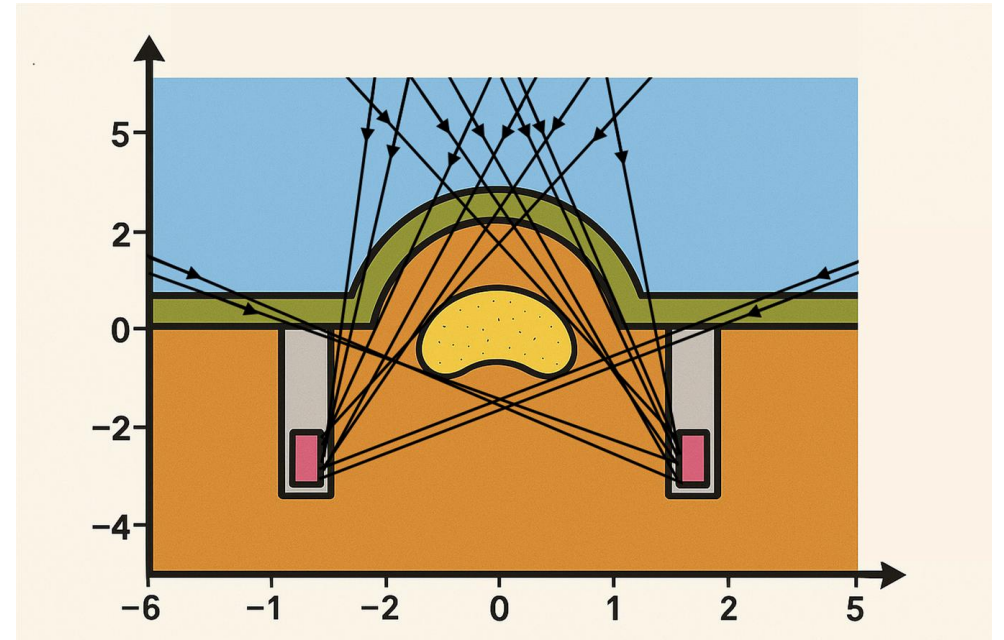
$$T(\alpha, \phi, \rho) = \frac{\int_{E_{min}}^{\infty} \Phi(\alpha, \phi, E) dE}{\int_{E_0}^{\infty} \Phi(\alpha, \phi, E) dE}$$



MYOGRAFI



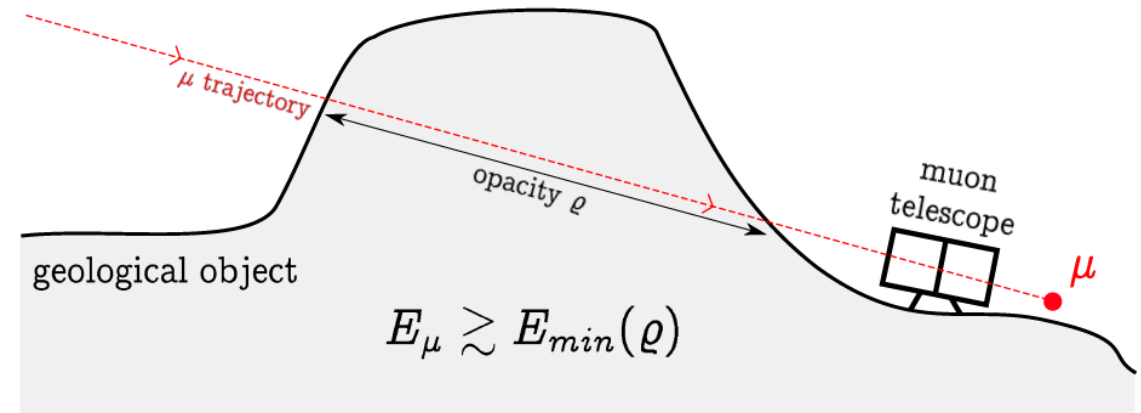
- Myontomografi
- Transmissionsvariation
- Uniform partikelintensitet
 - Intensitetsforskelle
 - $dE_\nu = I_\nu(\vec{r}, \hat{n}, t) \cos(\theta) dv dA d\Omega dt$



MYOGRAFI



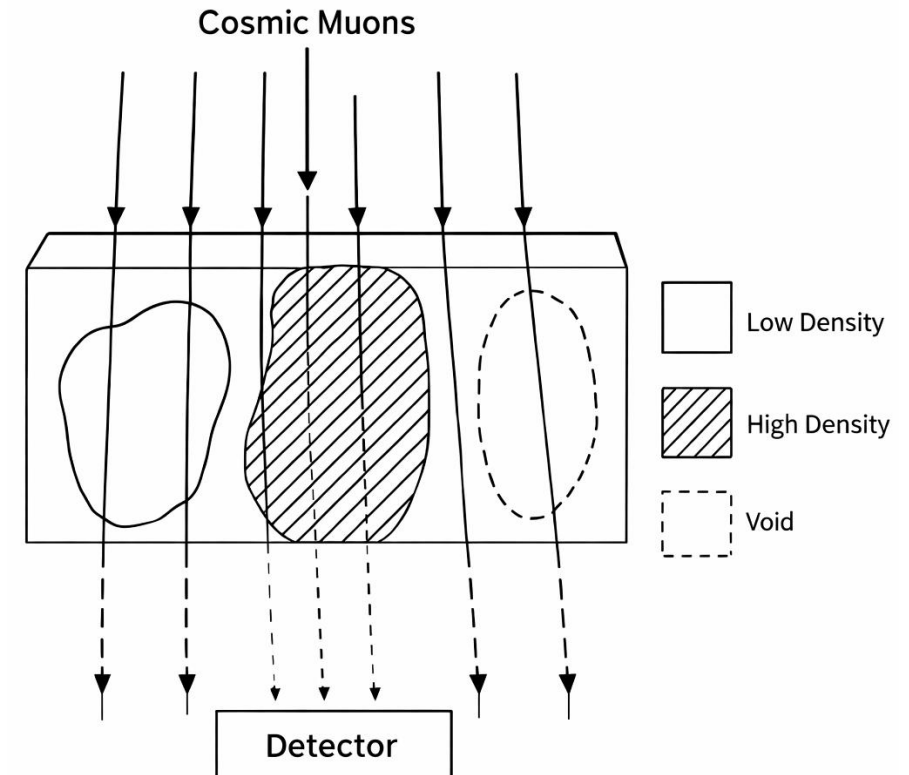
- Myontomografi
- Transmissionsvariation
- Uniform partikelintensitet
- Absorptionsgradient
 - Densitetsanomali
 - $I_\nu = I_{\nu,0} \exp(-\int \kappa_\nu \rho ds)$



MYOGRAFI



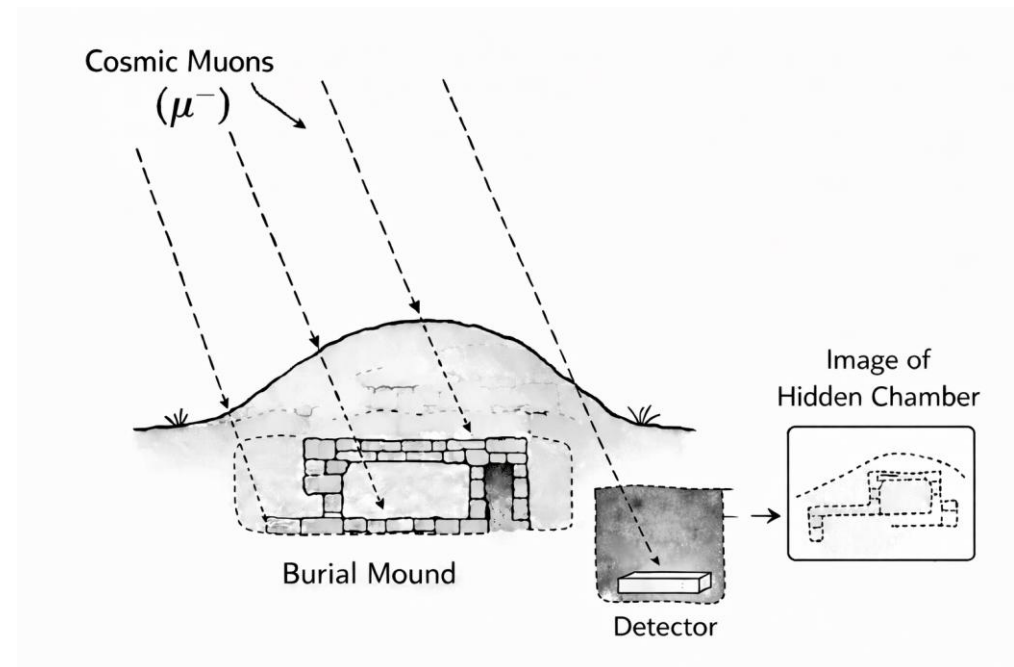
- Myontomografi
- Transmissionsvariation
- Uniform partikelintensitet
- Absorptionsgradient
- Overordnet
 - Stedet (transmission)
 - Skyggen (intensitet)
 - Styrken (absorption)



ARKÆOLOGISK MYOGRAFI

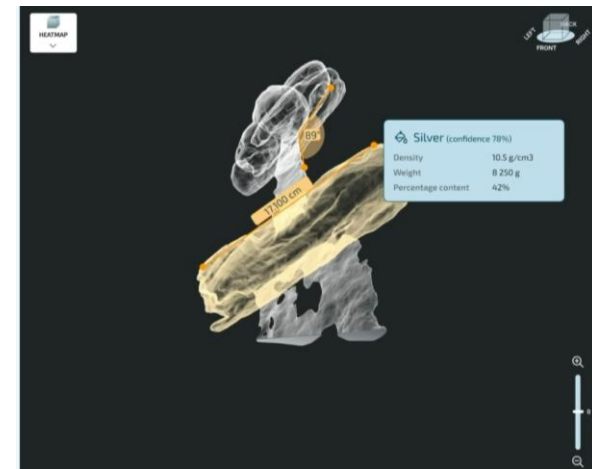


- (Semi) non-invasive undersøgelse
 - Nedgravning af detektor
 - Afstand vs. dybde



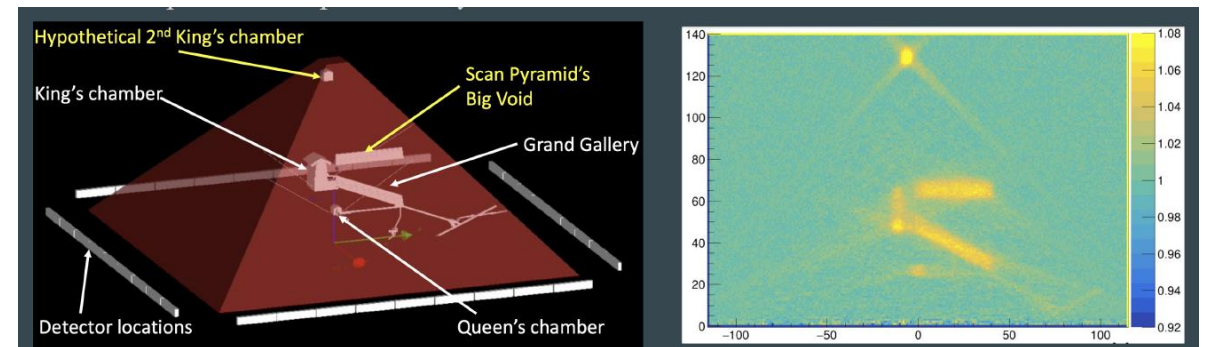
ARKÆOLOGISK MYOGRAFI

- (Semi) non-invasive undersøgelser
- Analyse af udgravningsindhold
 - Volumetrik
 - Sted/lokation
 - Størrelse/form
 - Komposition
 - Materialetyper
 - $\Delta\rho \sim 0,1 \frac{g}{cm^3}$
 - Simmulering
 - Voxel model
 - Grannulering



ARKÆOLOGISK MYOGRAFI

- (Semi) non-invasive undersøgelser
- Analyse af bl.a. udgravningsindhold
- Tidligere anvendelse
 - Keopspyramiden
 - Egypten (2017)
 - ScanPyramids
 - Fandt 30m langt kammer



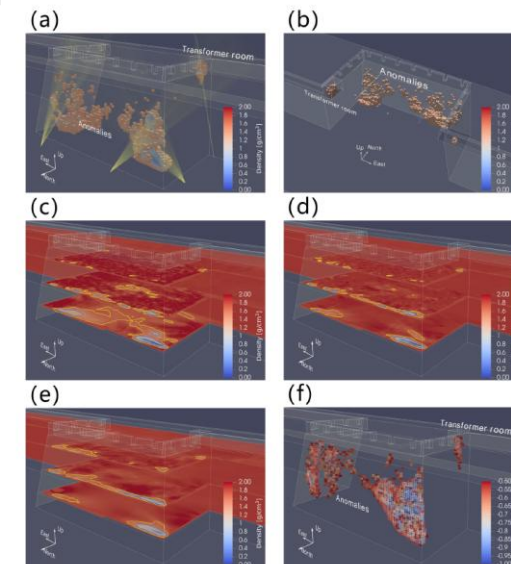
ARKÆOLOGISK MYOGRAFI



- (Semi) non-invasive undersøgelser
- Analyse af bl.a. udgravningsindhold
- Tidligere anvendelse
 - Keopspyramiden
 - Xi'an forsvarsmuren
 - Kina (2021)
 - Opdagede strukturelle skader fra jordskælv



FIG. 4. Measurement location layout used in the on-site survey. Up to six detector locations (Nos. 1-6) were carefully selected with proper rotational angles facing the main body of the rampart, and two open-sky locations (a) and (b) were used to collect muon flux data without interference from any solid objects.



ARKÆOLOGISK MYOGRAFI



- (Semi) non-invasive undersøgelser
- Analyse af bl.a. udgravningsindhold
- Tidligere anvendelse
 - Keopspyramiden
 - Xi'an forsvarsmuren
 - Kofun gravhøj
 - Japan (2024)
 - Kortlagde gravhøjens strukturer



Fig. 1 A panoramic view of the Tsukuriyama-kofun burial mound, captured by drone. Points P1 and P2, indicated in the figure, represent locations where muographic measurements were conducted.

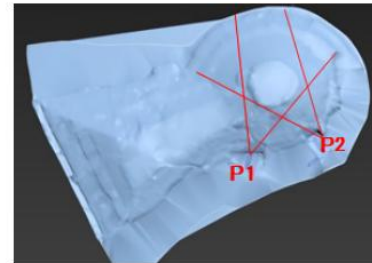


Fig. 6 3D model of the burial mound. P1 and P2 are measurement locations. A surface model was created from the contour map and converted to a voxel model and used for muon transmission length calculations.

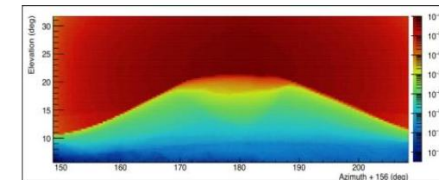
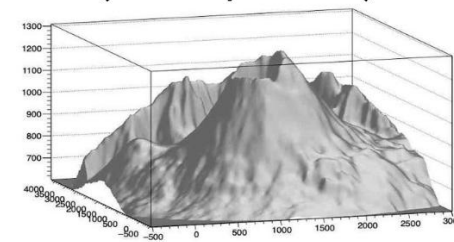
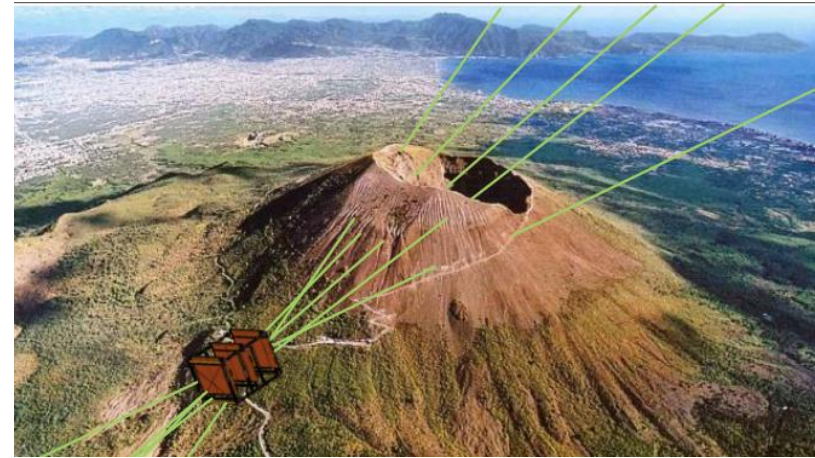


Fig. 3 Measurement device installed at location P1. The device was placed horizontally, oriented toward the central axis of the mound in the posterior circle.

ARKÆOLOGISK MYOGRAFI



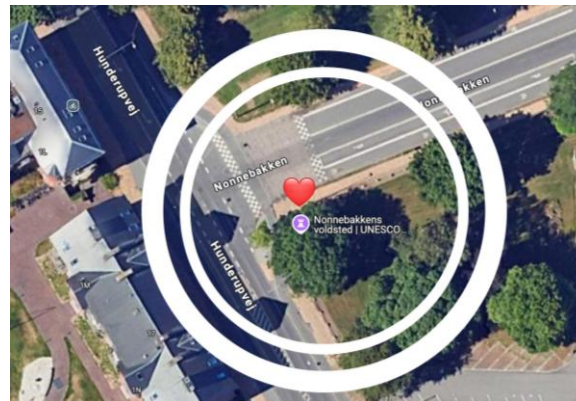
- (Semi) non-invasive undersøgelser
- Analyse af bl.a. udgravningsindhold
- Tidligere anvendelse
 - Keopspyramiden
 - Xi'an forsvarsmuren
 - Kofun gravhøj
 - Vesuv
 - Italien (2022)
 - Muraves Collaboration
 - Målte vulkansk aktivitet



MYOGRAFI I DANMARK



- Potentiel anvendelse
 - Gravhøje
 - Ringborge
 - Byarkæologi
 - Fladeudgravninger?
 - Fredede fortidsminder

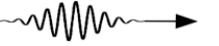


MYOGRAFI I DANMARK



- Potentiel anvendelse
- Brugbarhed
 - Forundersøgelser?
 - Undersøge bevaringstilstand
 - Geometrisk simmulering
 - Digitaltvilling
 - 3D printe fund
 - Bruges til besværlige områder
 - Byer
 - Skovområder

FORDELE & ULEMPER



- Fordele

- Naturligt forekommende stråling
- Dyb penetreringsevne ift. lign. metoder
- Bedst til store kompakte genstande
- Kortlægge positionen af artefakter
- Afbildede indre strukturer
- Gengive kompositionen af artefakter

- Ulemper

- Tidskrævende (grannulering)
- Nedgravning (semi-noninvasiv)
- Dybde vs. Afstand
- Nytteværdi (omkostning)

TAK!

