



## Overestimerer PARMA-modellen høyden til myonfluksmaksimum under norske vinterforhold?

Forfatter: Theo Christopher Riley, Vestby videregående skole

*Hensikten til denne studien var å undersøke PARMA-modellen som ble utviklet med Monte-Carlo simulasjoner kjørt med atmosfæriske parametere fra U.S Standard Atmosphere of 1976 (Sato et al, 2008, s.244). Dette er en atmosfærisk modell som reflekterer en betydelig varmere enn atmosfære enn ved nordligere breddegrader. Dette formulerte hypotesen for denne studien: PARMA-modellen overestimerer høyden der intensiteten til myonkomponenten av den kosmiske strålingen er størst i norske vinterforhold. For å teste hypotesen ble en myondetektor laget og løftet 23,3 km opp i atmosfæren med værballonger for å måle høyden til myonfluksmaksimum. Den empiriske målingen ble deretter sammenliknet med PARMA-modellen sine estimater for høyden til myonfluksmaksimum. Myondetektoren målte myonfluksmaksimum mellom 13,01 km – 13,23 km, og PARMA-modellen estimerte høyden til myonfluksmaksimum mellom 13,72 km – 13,76 km. Hypotesen støttes derfor av denne studien.*

### PARMA-modellen i norske vinterforhold: Overestimerer PARMA-modellen høyden til myonfluksmaksimum under norske vinterforhold?

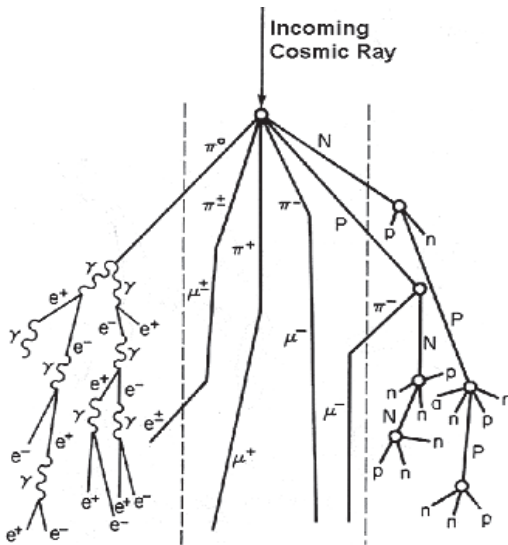
#### Innledning

Til ethvert sekund så kolliderer reisende kosmiske stråler fra andre galakser med atmosfæren. Denne kollisjonen med atmosfærens partikler danner flere partikler slik som pioner  $\pi$  og kaoner K. Disse partiklene vil enten henfalle eller kolliderer med flere atmosfæriske partikler, dette danner kaskader – en slags dusj - av sekundærstråler som regner ned mot jordoverflaten, se bildet B-1. Hvorav myoner er en viktig komponent som dannes av henfallet til pioner og kaoner, se L1 og L2 (Gaisser, 2016, s. 126 & 127).

Det japanske atomenergi byrået (JAEA) utviklet en analytisk model for å modellere fluksen av kosmisk stråling i atmosfæren, altså intensiteten av kosmisk stråling. Denne modellen ble kalt PARMA-modellen «PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere». Modellen er laget for bruk over hele kloden og tar hensyn til faktorer slik som breddegradseffekten, og solas aktivitetsnivå (Sato et al, 2008, s.244). Breddegradseffekten er et fenomen der intensiteten og energispekteret til innkommende primærstråling varierer på grunn av det geomagnetiske feltet, PARMA tar hensyn til breddegradseffekten med verdien «cutoff-rigidity» (Yavorsky & Pinsky, 1975, s. 450) & (Sato et al, 2008, s.245).

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (L1)$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (L2)$$



**KEY**

P	<b>Proton</b>	e	<b>Electron</b>
n	<b>Neutron</b>	μ	<b>Muon</b>
π	<b>Pion</b>	γ	<b>Photon</b>

B-1 Illustrasjon av kaskade forårsaket av kosmisk stråling. Hentet fra <https://neutronm.bartol.udel.edu/catch/cr2.html>

Sola utstråler ladde partikler som danner fluktuerende magnetfelt i heliosfæren. Når galaktiske kosmiske stråler beveger seg inn i heliosfæren så påvirkes de av disse magnetfeltene via lorentz-krefter, og dette tapper energien deres. Jo høyere solaktiviteten er, jo mer energi tappes fra den galaktiske kosmiske strålingen (Väisänen et al, 2023, s.1). PARMA-modellen tar hensyn til solas aktivitetsnivå med solmodulasjonspotensialet φ. PARMA-modellen tar også hensyn til atmosfæren med at dens underbyggende Monte-Carlo simulasjoner ble simulert med parametere fra «U.S Standard Atmosphere of 1976» (Sato et al, 2008, s.245).

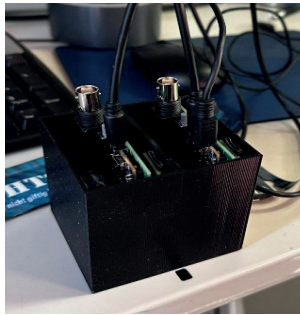
Denne atmosfæriske modellen reflekterer en varmere atmosfære sammenliknet med forholdene fra nordligere breddegrader. Det kan derfor undres om PARMA-modellen gir unøyaktige estimater for fluksen i atmosfærer som er særdeles kaldere enn den standard atmosfæren brukt i Monte-Carlo simulasjonene. Atmosfærer som er kaldere enn standard atmosfæren brukt i PARMA-modellen er tettere og lavere som resulterer i høyere sjanser for at den hadronske komponenten – delen av strålingen som kan kolliderer med andre partikler - av sekundærstrålingen kolliderer høyere opp i atmosfæren, men den totale atmosfæren blir lavere, grunnet atmosfærisk kompresjon og temperatureffekten (Berkova et al, 2011, s.2). For myonstråling så betyr dette at dens maksimum – høyden der intensiteten av myonstråling er størst – blir forskyvet nedover i atmosfæren. Høyden til myonfluksmaksimum vil altså være nærmere overflaten i kaldere atmosfærer enn i varmere atmosfærer. Dersom denne effekten er stor nok så kan den skape systematiske avvik i PARMA-modellens estimater for høyden til myonfluks i norske vinterforhold. Det er nettopp det denne studien undersøkte. Hypotesen var: PARMA-modellen overestimerer høyden til myonfluksmaksimum i norske vinterforhold.

## Metode

Studien gikk ut på å sammenlikne en empirisk måling av høyden til myonfluksmaksimum med PARMA-modellen sitt estimat. Dette ble gjennomført med en hjemmelaget myondetektor bestående av to Cosmic-Watch V2 plastscintillator sensorer, se B-2 og B-3. Disse ble operert i koinsidens for å isolere myonregistreringer, siden det er nesten bare myoner som kan skape registreringer hos begge sensorene når de er plassert ovenfor hverandre (Axani, 2018, s. 27). Myondetektoren lagret registreringene sine på et SD-kort og ble ikke kalibrert siden målet er å identifisere høyden til myonfluksmaksimum. Da trengs ikke den absolute fluksverdien, siden man trenger bare fluksmålinger som kan sammenliknes med hverandre for å finne et maksimum.



B-2 Bilde av en av de to CosmicWatch V2 sensorene



B-3 Bilde av myondetektoren



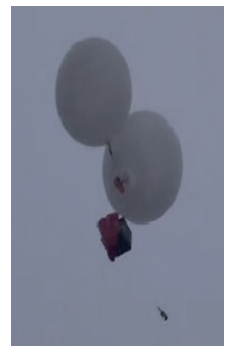
B-4 Bilde av payloadboksen før oppskytning

For å måle høyden til myonfluksmaksimum måtte myondetektoren fraktes høyt opp i atmosfæren. Målet var å frakte lasten 18 km - 20 km opp i atmosfæren for å forsikre at høyden til myonfluksmaksimum ble målt. Ved slike høyder kan temperaturene falle til mellom  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (NOAA, 2024 A). For å forsikre at myondetektoren kunne overleve slike temperaturer, ble det laget en payloadboks for å beskytte den. Denne payloadboksen bestod av 5 cm tykke isoporplater festet sammen med trelim og gaffateip, se B-4. Isopor ble brukt for payloadboksen siden det er ekstremt isolerende, billig og enkelt å få tilgang til.

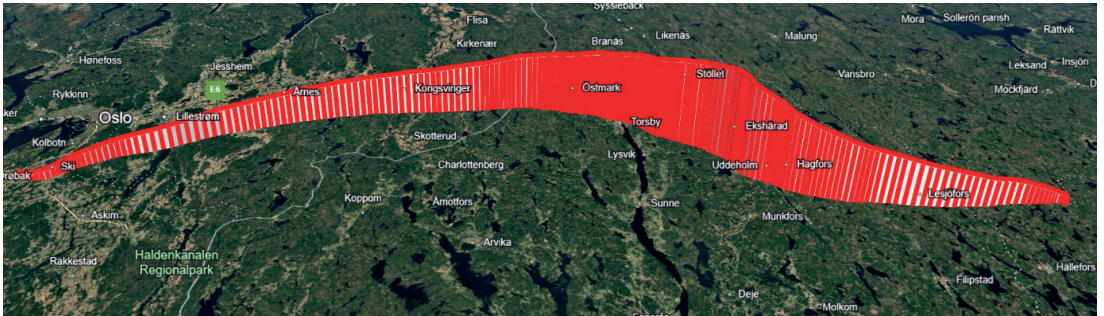
For å frakte ballongen opp i troposfæren (18 km – 20 km) ble det brukt værbaljoner. To 350 grams ballonger ekvivalente til Totex 350 værbaljoner ble festet til payloadboksen med strips og tråd. Oppskytningen ble gjennomført ved BIOKLIM stasjonen i Ås fra deres Vaisala Autosonde oppskytningsrampe i samarbeid med Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) og Meteorologisk Institutt (MET).

En Vaisala RS41 radiosonde ble festet til payloadboksen for å spore ballongen i flyvningen. Radiosonden loggførte også kritiske verdier slik som trykk og høyde som ble senere brukt i data prosesseringen. Flyvebanen til ballongen vises i B-6.

Etter flyvningen var gjennomført ble payloadboksen funnet og dataene registrert på SD-kortet ble prosessert sammen med høydedatane fra Vaisala radiosonden. Datasettene ble tidsynkronisert slik at spredningsplott med høyde imot antall myonregistreringer per 100 m kunne tegnes. Det ble deretter gjennomført en ikke-lineær regresjonsanalyse med sjettegradspolynomer for å modellere trendene imellom datapunktene. Dette funksjonsuttrykket ble deretter brukt for å finne toppunktet til myonfluksen altså høyden til myonfluksmaksimum, se B-8 og B-9.



B-5 Bilde av ballongen ved oppskytning



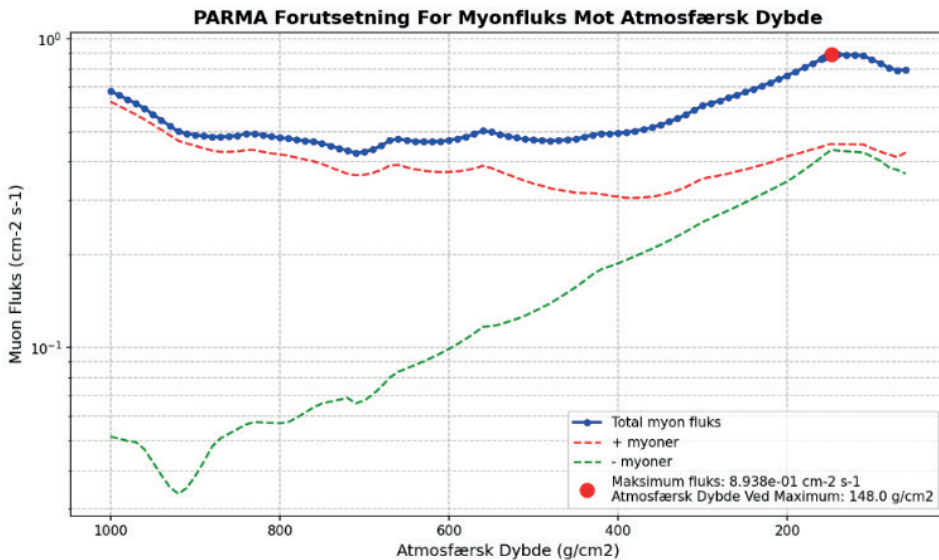
B-6 Illustrasjon av flyvebanen til ballongen. Oppskutt ved Ås og landet i Skogen nord-vest for Koparberg.

PARMA-modellen sine estimater ble funnet med bruk av C++ versjonen av PARMA-modellen. Et python program ble laget for å omregne den differensielle myonfluksen som C++ versjonen produserer til den integrale myonfluksen, altså den totale myonfluksen. Deretter ble den estimerte atmosfæriske dybden til myonfluksmaksimum funnet. Den geometriske høyden til myonfluksmaksimum ble deretter funnet med å omregne den atmosfæriske dybden til myonfluksmaksimum til trykk med den hydrostatiske likningen, se L3 og L4 nedenfor (NOAA, I.D B). Deretter ble den estimerte høyden til myonfluksmaksimum funnet med å se hvilke høydemålinger tilsvarte trykkmålinger nærmest mulig det estimerte trykket som ble funnet med L3 og L4 fra Vaisala RS41 radiosonden.

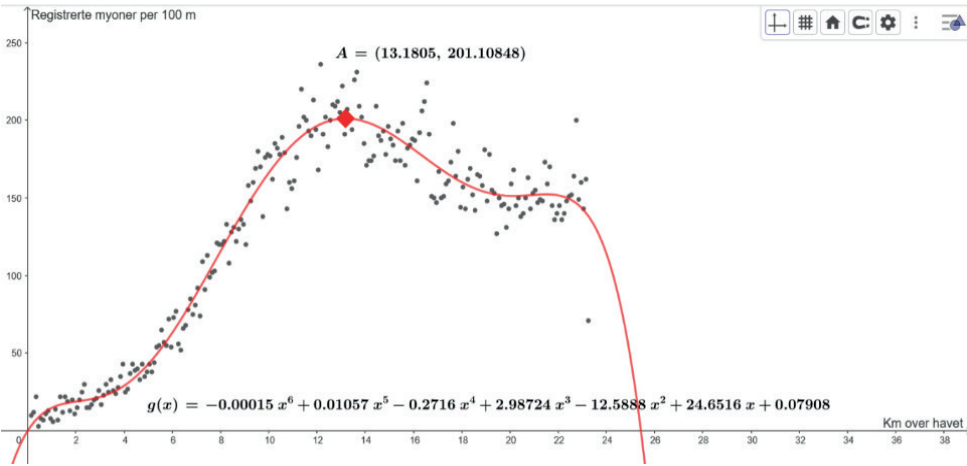
$$p(z) = \int_z^\infty g \rho dz \quad (L3)$$

$$p(z) = g * X \quad (L4)$$

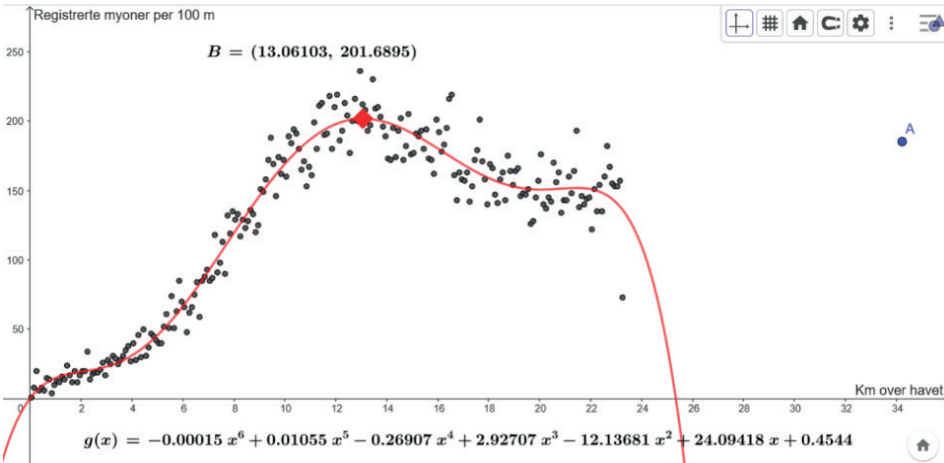
### Resultater



B-7 PARMA sine estimater for den totale myonfluksen over flere atmosfæriske dybder. Med solas modulasjons potensiale  $\phi$  lik 911 MV og cutoff-rigidity lik 1.20 GV. Myonfluksmaksimum er funnet ved 148 g/c, som tilsvarer en høyde mellom 13,72 km – 13.76 km.



B-8 Spredningsplott av høyde over havet imot registrerte myoner per 100 meter for starttidspunkt 10:40:00. Myonfluksmaksimum er funnet i punkt A, ved en høyde på 13.1805 km ± 0.05 km over havet.



B-9 Tidsynkronisert spredningsplott av høyde over havet imot registrerte myoner per 100 meter for starttidspunkt 10:40:59. Myonfluksmaksimum er funnet i punkt B, ved en høyde på 13.06103 km ± 0.05 km over havet.

B-7 viser PARMA-modellens estimater for total myonfluks ved spesifikke atmosfæriske dybder. Den forutså at den atmosfæriske dybden til myonfluksmaksimum var i mellom 147,5 g/c og 148,5 g/c. Dette tilsvarer høyder i mellom 13,72 km og 13,76 km, med bruk av den hydrostatiske likningen og trykkmålingene fra RS41 radiosonden under flyvningen.

B-8 og B-9 viser de empiriske målingene av antall myoner per 100 meter imot høyde i atmosfæren. B-8 inneholder det høyeste estimatet for høyden til myonfluksmaksimum i mellom 13,13 km og 13,23 km. B-9 inneholder det laveste estimatet for høyden til myonfluksmaksimum i mellom 13,01 km og 13,11 km. Alt i alt, så målte myondetektoren høyden til myonfluksmaksimum i mellom 13,01 km og 13,23 km.

## Diskusjon

Myondetektoren målte myonfluksmaksimum i mellom 13,01 km og 13,23 km. PARMA-modellen estimerte at høyden til myonfluksmaksimum i mellom 13,72 km og 13,76 km. Med minimumsforskjell på omtrent 490 meter og en maksimalforskjell på omtrent 750 meter mellom den empiriske målingen og PARMA-modellen sitt estimat så har PARMA-modellen betydelig overestimert høyden til myonfluksmaksimum.

Usikkerheten i den empiriske målingen skyldes at aktiveringstidpunktet til myondetektoren er bare kjent til nærmeste minutt. Myondetektoren ble aktivert i minuttet 10:40, og GPSen til radiosonden begynte å loggføre 14:35:05. For å forsikre at høyden til myonfluksmaksimum ble dekket av den empiriske målingen måtte det gjennomføres to tidsynkroniseringer, en der myondetektoren begynte å loggføre 10:40:00 og en der myondetektoren begynte 10:40:59. Dette danner to ulike datasett, som danner to ulike spredningsplott. Det er dette som skaper den brede usikkerheten til den empiriske målingen.

Målet var å måle høyden til myonfluksmaksimum, ikke den absolutte fluksverdien til myonfluksmaksimum. Derfor ble ikke myondetektoren kalibrert for å måle nøyaktig fluksverdi. En ukalibrert myondetektor kan måle relative endringer i myonfluks over ulike høyder men ikke eksakte fluksverdier. Ukalibrerte myondetektorer kan derfor brukes til å identifisere høyden til myonfluksmaksimum, men ikke den eksakte myonfluksen. Derfor er de relative fluksverdiene tilstrekkelig for å identifisere høyden til myonfluksmaksimum, men ikke for å finne de eksakte fluksverdiene.

PARMA-modellen baserer seg på Monte-Carlo simulasjoner kjørt med atmosfæriske parametere fra U.S Standard Atmosphere of 1976 (Sato et al, 2008, s.244). Denne standard atmosfæren er varmere enn den norske vinteratmosfæren. Temperatureffekten og atmosfærisk kompresjon kan være bidragende faktorer til at PARMA-modellen overestimerte høyden til myonfluksmaksimum. Temperatureffekten påvirker den hadronske komponenten av sekundærstrålingen med å komprimere atmosfæren. Dette vil medføre at myoner produseres nærmere bakken enn om temperatureffekten var ignorert, som igjen forskyver høyden til myonfluksmaksimum nærmere overflaten (Berkova et al, 2011, s.2). Med tanke på dette, så indikerer resultatene at PARMA-modellen overestimerer høyden til myonfluks i norske vinterforhold grunnet temperatureffekten og atmosfærisk kompresjon.

Hensikten til dette prosjektet var å undersøke gyldigheten til PARMA-modellen i atmosfærer med kaldere profil enn «U.S Standard Atmosphere of 1976». Det er derfor myonmålingene ble gjennomført vinteren mellom Ås og Stockholm. Men til tross for årstiden, så var det relativt varmt på oppskytningsdagen. Målinger fra BIOKLIM stasjonen i Ås på oppskytningstidspunktet viser at bakketemperaturen var omtrent 4.0 °C (Yr, 2025). Denne relativt høye temperaturen kan tyde på en atmosfærisk profil som ligner mer på den amerikanske standard atmosfæren av 1976. Enda en måling av myonfluksmaksimum på en kaldere dag vil muligens vise enda større forskjeller.

Trykkmålingene brukt for å oversette PARMA sine estimater fra atmosfærisk dybde til meter kom fra RS41 radiosonden som hang under lasten på ballongen. Radiosonden sine målinger kan ha blitt påvirket av lasten som hang over den. Dersom dette er tilfellet, så vil de tolkede estimatene fra PARMA være unøyaktige. Til eksakt hvilken grad dette kan være tilfelle, er ukjent, men det antas å være ubetydelig for hensikten til dette forsøket. For å forsikre at trykkmålingene ikke påvirkes av payloadboksen i liknende forsøk burde den henges langt under payloadboksen.

Det var bare gjennomført en empirisk måling av myonfluksmaksimum. Denne ene empiriske målingen bekreftet hypotesen. Siden at bare en måling ble gjennomført så kan daglige fluktuasjoner i solmodulasjonspotensialet og atmosfærisk temperatur under flyvningen ha påvirket resultatet. Flere målinger burde gjennomføres for å få mer konkrete resultater.

## Konklusjon

Myondetektoren målte høyden til myonfluksmaksimum mellom 13,01 km og 13,23 km. PARMA-modellen estimerte høyden til myonfluksmaksimum å være mellom 13,72 km og 13,76 km. I det mest ekstreme tilfellet overestimerte PARMA-modellen høyden til myonfluksmaksimum med omtrent 750 meter, og på det beste tilfellet med omtrent 490 meter. Mer praktisk forklart, dette forsøket indikerer at PARMA-modellen overestimerer høyden der intensiteten av myoner er størst i norske vinterforhold. Dette støtter hypotesen om at PARMA-modellen overestimerer høyden til myonfluksmaksimum i norske vinterforhold.

Denne studien baserer seg kun på en måling av myonfluksmaksimum. Dette gjør konklusjonen sensitiv til atmosfæriske tilfeldigheter og fluktuasjoner i solaktiviteten og det geomagnetiske feltet. En studie innholdende flere målinger bør gjennomføres for å konkludere med større sikkerhet.

## Referanser

- Axani, S, N. (20. desember, 2018). The Physics Behind the CosmicWatch Desktop Muon Detectors. <https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2/blob/master/Instructions.pdf>
- B. M. Yavorsky, A.A. Pinsky. (1975). *Fundamentals of Physics Volume 2: Vibrations And Waves: Quantum Physics of Atoms, Molecules And Solids: Physics Of the Nucleus And Elementary Particles*. Mir Publishers Moscow.
- Berkova, M, D. Belov, A, V. Eroshenko, E, A. Yanke, V, G. (2011). Temperature Effect of the Muon Component and Practical Questions for Considering It in Real Time. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2011, Vol. 75, No.6. s.820.
- Gaisser, K, T. Engel, R. Resconi, E. (2016). *Cosmic Rays And Particle Physics*. (2. utgave). Cambridge University Press.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA A). (20. august, 2024). Layers of the Atmosphere. [noaa.gov. https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere](https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA B). (I.D). *The Hydrostatic Equation*. Aoml. [noaa.gov. https://www.aoml.noaa.gov/ftp/hrd/annane/prelim\\_notes/hypsometric\\_equation.pdf](https://www.aoml.noaa.gov/ftp/hrd/annane/prelim_notes/hypsometric_equation.pdf)
- Sato, Tatsuhiko. Yasuda, Hiroshi. Niita, Koji. Endo, Akira. Sihver, Lembit. (2008). Development of PARMA: PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere. *Radiat Res*. 170(2). 244-59. 10.1667/RR1094.1
- Väisänen, P. Usoskin, I. Kähkönen, R. Koldobskiy, S, Mursula, K. (2023). Revised Reconstruction of the Heliosphere Modulation Potential for 1964-2022. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, s.128. <https://doi.org/10.1029/2023JA031352>
- Yr. (12. desember 2025). Ås. Yr.no <https://www.yr.no/nb/historikk/tabell/1-60637/Norge/Akershus/%C3%85s/%C3%85s?q=2025-12-12>
- Bildereferanser
- B-1 – «Illustrasjon av kaskade forårsaket av kosmisk stråling» - hentet fra <https://neutronm.bartol.udel.edu/catch/cr2.html>