

Fragmentation of Meteoroids detectable with 3D Spectrograms of Meteor Head Echoes

14.1.2025

Wilhelm Sicking

Abstract: (The graphical abstract can be found at the end of the document.)

Viele 3D-Spektrogramme von Meteor Kopfechos zeigen ein identisches Bild: Kurz vor dem Ende habe die Spektrogramme eine bauchige Form und einen Einbruch in der Signalintensität, die oft bis auf Null zurückgeht. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurde kürzlich eine zweite Meteor-Empfangsanlage installiert. Dabei wurden interessante Spektrogramme von Kopfechos aufgenommen: Sie zeigen Pulsationen verschiedenster Art. Laut Literatur können Fragmentierung der Meteoroiden und die daraus resultierenden Interferenzen die Ursache sein. Um die Kopfechos genauer zu untersuchen, werden nun 2D- und 3D-Spektrogramme parallel verwendet. In diesem Artikel werden erste Aufnahmen der Kopfechos mit dem neue Setup gezeigt. Drei der Abbildungen zeigen Echos von Fragmenten, die nach der Explosion des Meteoroiden ihren Flug fortsetzen. Je kräftiger der Trail ist, um so weniger Material bleibt für den Weiterflug – so ein erster Eindruck.

1 Introduction

Kopfechos entstehen durch Reflexionen am Plasma, das den Meteoroiden direkt umgibt und bewegen sich mit etwa gleicher Geschwindigkeit wie der Meteoroid. (Close et al., 2007) Die Kopfechos der aufgezeichneten Meteore haben in der verwendeten 3D-Darstellung kurz vor ihrem Ende oft eine bauchige Form und die Signale fallen bis auf Null ab. Kopfechos in meinen bisherigen Spektrogrammen reichen allerdings weit über den Rand des Plots hinaus und sind daher unvollständig, siehe Abbildung 1, oberes Bild. Der Grund hierfür ist, dass bei der Auswertung bisher mehr Wert auf die Spurechos gelegt wurde. Sei Kurzem werden die Meteorechos auch mit einem zweiten System aufgezeichnet, das die Kopfechos vollständig aufzeichnet (Sicking, 2025). Auf den Kopfechos sind Bauchungen und Einbrüche zu erkennen.

Pulsierende Meteorereignisse wurden mit dem EISCAT UHF-Radarsystem beobachtet (Kero et al., 2008). Die Autoren postulieren, dass Reflexionen

an Fragmenten zu Interferenzen führen und die Pulsationen verursachen. Den Hinweis auf Fragmentierungen der Kopfechos habe ich von Prof. Asta Pellinen-Wannberg erhalten. Ich hatte sie gefragt ob sie Literatur zu "Schwingungen" auf Kopfechos kennt.

2 Setup

Das Setup wurde im vorigen Artikel (Sicking, 2025) im Detail beschrieben. Um die Kopfechos genau untersuchen zu können, zeichnet nun eine Anlage 2D-Spektrogramme auf, die andere Anlage loggt die Daten in dem bisher verwendeten 3D-Format. Die 2D-Darstellung hat den Vorteil, dass der zeitliche Verlauf des Kopfechos erkennbar ist. So lässt sich an dem 2D-Spektrogramm ablesen, ob Fragmente in der Flugrichtung des Meteoroid weiterfliegen. Amplitudenänderungen wie zB die Pulsationen und relative Größen der Echos sind aber nur in der 3D-Darstellung zu erkennen, sodass 3D für mich die beste Art der Darstellung ist. Der direkte Vergleich von 2D und 3D wird in Zukunft für die Untersuchung der Kopfechos eingesetzt.

3 Result and Discussion

Das Spektrogramm in Abbildung 1 unten zeigt ein Beispiel vom 2. Januar um 0:14 Uhr. Es zeigt zusätzlich zur Ausbuchtung vor dem Zerfall starke Pulsationen über den gesamten Frequenzbereich. Wie oben geschrieben, erklären Kero et al. Pulsationen am Kopfecho durch Interferenzen, die durch Reflexionen an ionisierten Fragmenten verursacht werden. Im Detail: Die von parallel fliegenden ionisierten Teilchen reflektierten Radarwellen addieren sich je nach Phasenlage oder sie schwächen sich gegenseitig ab. Diesen Vorgang nennt man Interferenz oder Fading. Ursachen für die Phasenverschiebung können der sich ändernde Abstand und die Faraday-Rotation sein. Die Schwankungen sehen zunächst aus wie Oszillationen, aber es handelt sich nicht um solche, da auf der X-Achse die Dopplershift aufgetragen ist. Ich bevorzuge den Begriff Fading.

Das obere Spektrogramm ist ein Beispiel von den Geminiden 2024. Es wurde nahe am Radiantendurchgang von 180° aufgenommen. An dem Bild ist zu sehen, wie in der Darstellung Kopfechos an der rechten Seite

abgeschnitten werden. Neben Kopfechos mit leichten Pulsationen sind auch zwei gezackte Echos enthalten. Pulsationen und Einbrüche gibt es in allen Strömen und bei sporadischen Meteoren.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen weitere interessante Kopfechos. In Abbildung 2 oben interferieren offenbar nur zwei Teilchen sehr harmonisch, während in Abbildung 2 unten mehrere Teilchen interagieren. Hier sind die Trümmer schon so weit zerfallen, dass der eigentliche Meteor gar nicht zu sehen ist. Das zweite Kopfecho im unteren Bild stammt offenbar von nur einem Partikel.

In den Abbildungen 1- 3 scheinen Fragmente nach der Explosion weiter zu fliegen. Ich habe im August 2023 einen Perseid aufgenommen, an dessen Spitze ebenfalls Teilchen den Flug fortsetzen, s. Bild 4. In den Bildern 1-3 ist aber schwer zu erkennen, ob Partikel weiterfliegen. Daher ist es notwendig, auch in 2D aufzuzeichnen.

2D und 3D laufen parallel

Momentan sind beide Systeme so konfiguriert, dass sie Kopfechos optimal aufzeichnen. Ein System zeichnet in 2D auf, das andere in 3D. Am 2D-Plot lässt sich der Verlauf des Kopfechos erkennen. Auch lässt sich erkennen, ob Fragmente nach dem Zerfall im Zusammenhang mit dem Kopfecho stehen oder ob es sich nur um einen GRAVEs Glitch handelt.

In den Abbildungen 5 bis 8 wurde die 2D-Aufnahme mit dem Grafikprogramm IrfanView in Y-Richtung, also in der Zeitachse, gedehnt. In einem freien Bereich wurde dann der entsprechende 3D-Plot eingefügt. In Abbildung 5 sind die Zeit- und Frequenzachsen eingezeichnet.

Weitere Informationen stehen in den Figure Captions.

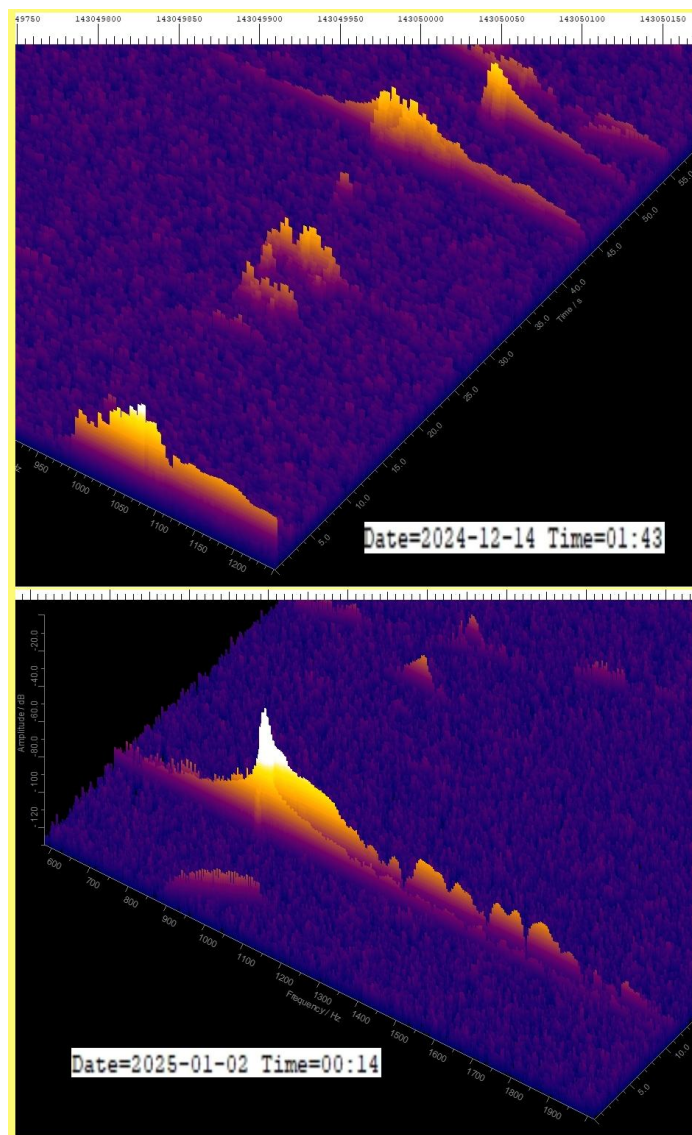


Figure 1 – Das Spektrogramm unten vom 2. Januar 2025 0:14 Uhr zeigt neben der Ausbuchtung komplexe Pulsationen über den gesamten Bereich. Das obere Spektrogramm stammt von den Geminiden 2024. Es zeigt, dass in der Darstellung Kopfechos unvollständig sind.

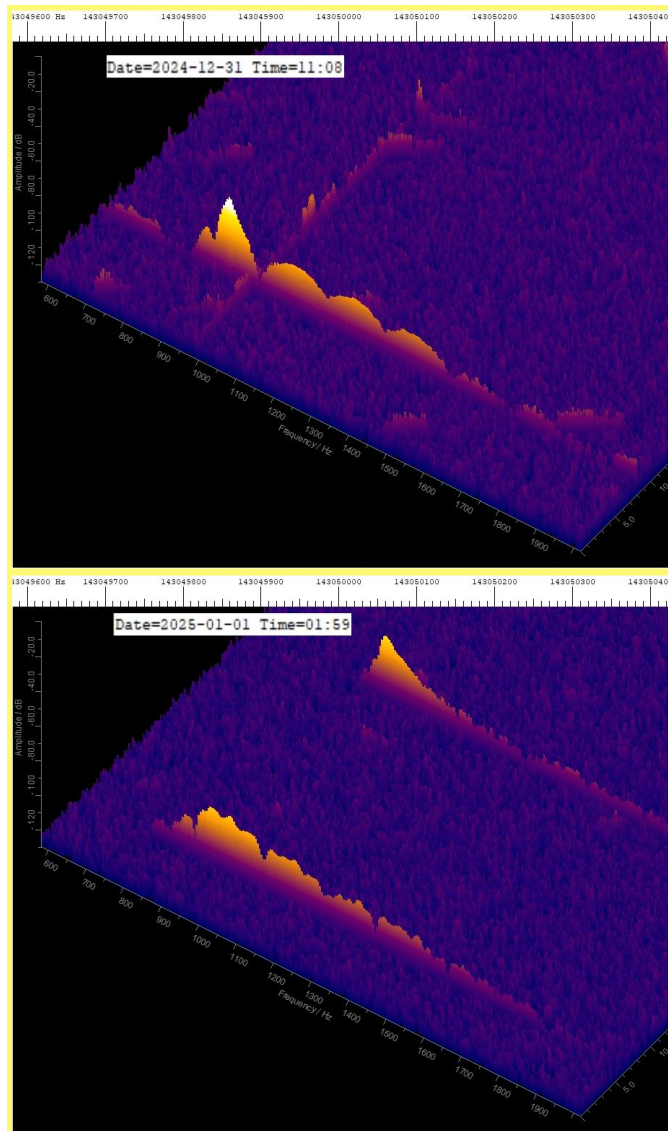


Figure 2 – Unteres Bild: Zwei Kopfechos von 1.1.2025 1:59 h. Das vordere Echo zeigt komplexe Pulsationen. Das Spektrogramm im oberen Bild vom 31.12.2024 11:08 h zeigt sehr harmonische Pulsationen. An den Headechos ist zu erkennen, dass möglicherweise Partikel weiterfliegen. Um das beurteilen zu können, werden weiter unten 2D Spektrogramme hinzugezogen, die es hier noch nicht gab.

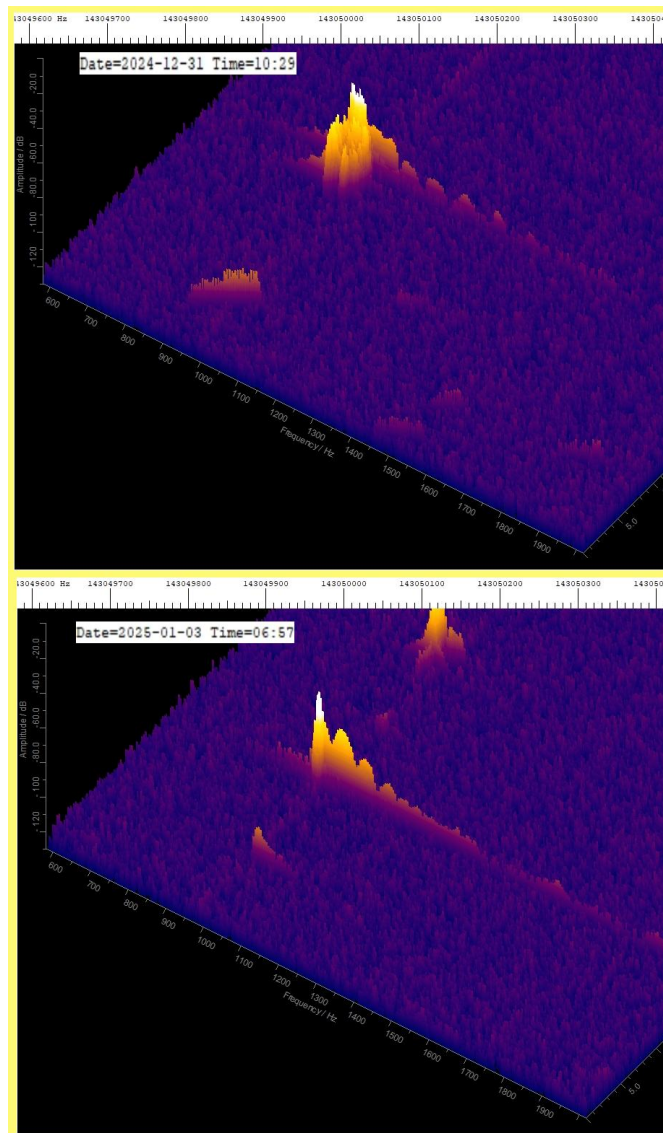


Figure 3 – Zwei Kopfechos mit höherfrequenten Pulsationen vom 3.1. 2025 6:57 h und vom 31.12.10:29h. In beiden Fällen scheinen nicht verglühte Partikel weiter zu fliegen.

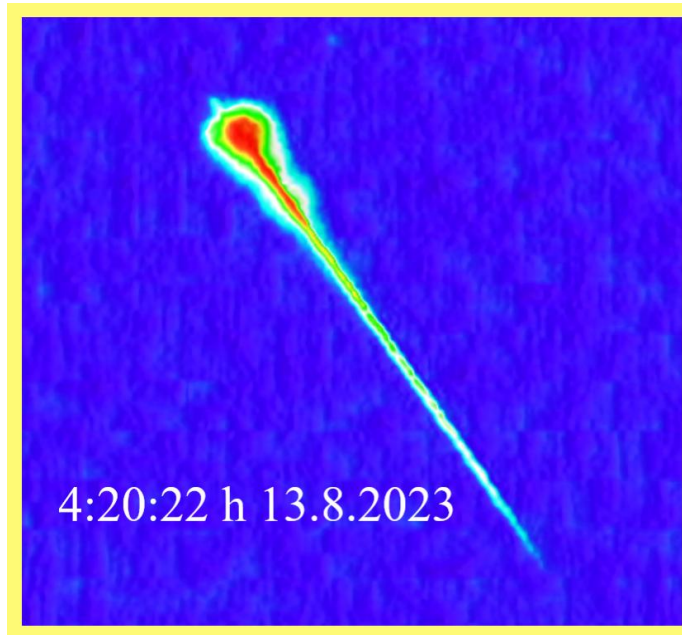


Figure 4 – Aufnahme eines Perseiden vom 13. August 2023. Es ist schön zu erkennen, dass es mehrere Explosionen gibt und das Teilchen unverdampft weiterfliegen. Das Bild wurde mit eine USB-Kamera und einem Python Script vom Autor aufgenommen und mit IrfanView und ImageJ bearbeitet.

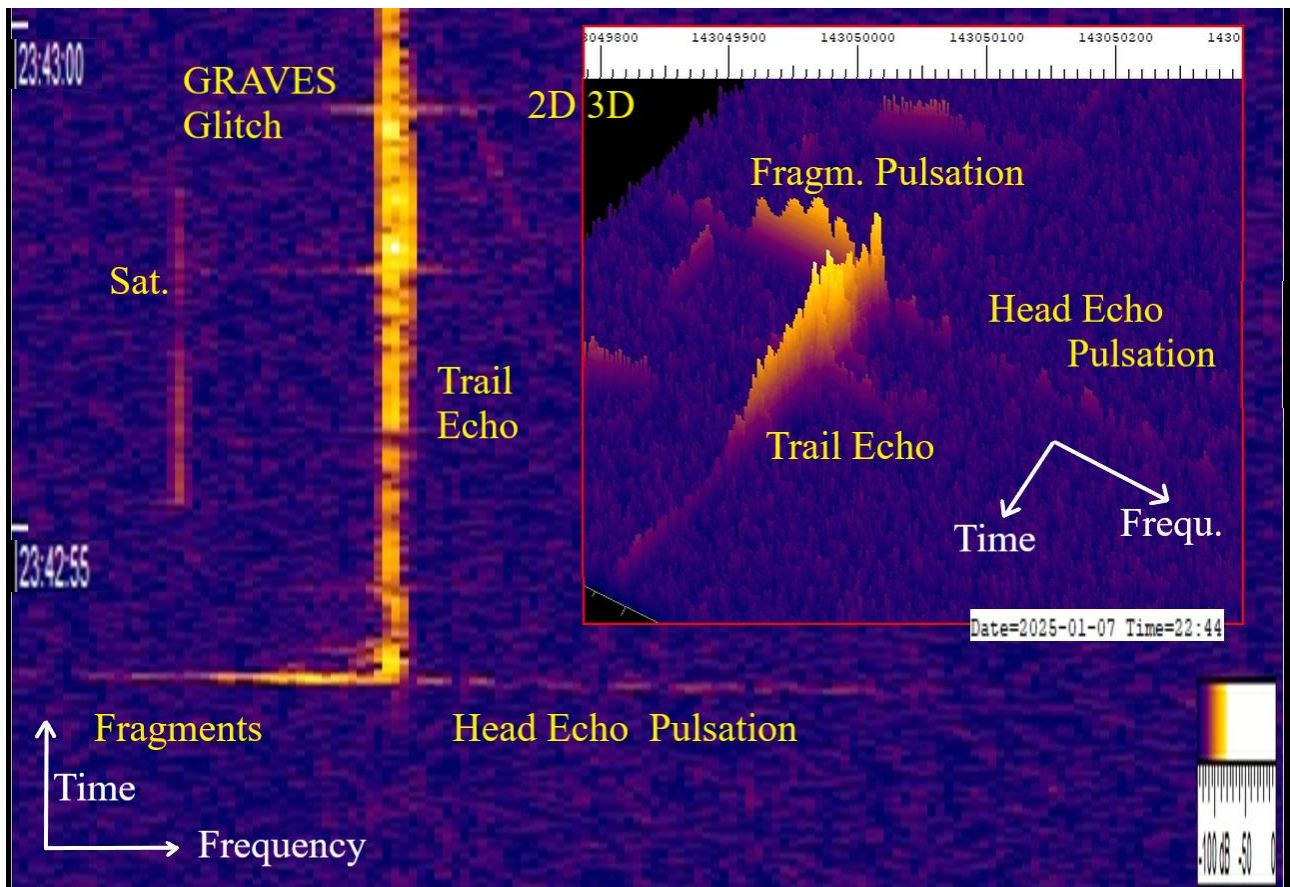


Figure 5 – Das Bild zeigt eine 2D- und eine 3D-Darstellung von ein- und desselben Meteorecho. Es ist ein schwaches Kopfecho mit Pulsationen zu erkennen. Nach der Explosion setzt viel Materie den Flug fort und verursacht deutliche und sehr schöne Pulsationen im 3D Spektrogramm. In dieser Abbildung sind Achsen für Zeit und Frequenz eingezeichnet. Die Aufnahme stammt vom 7.1.25 um 22:44 h UT. Links am Bildrand wird die Lokalzeit angezeigt. Die beiden Aufnahme-PC haben die identische Zeiteinstellung. Trotzdem zeigt Spektrum Lab eine Differenz von einer Minute an. Die Ursache ist noch nicht bekannt.

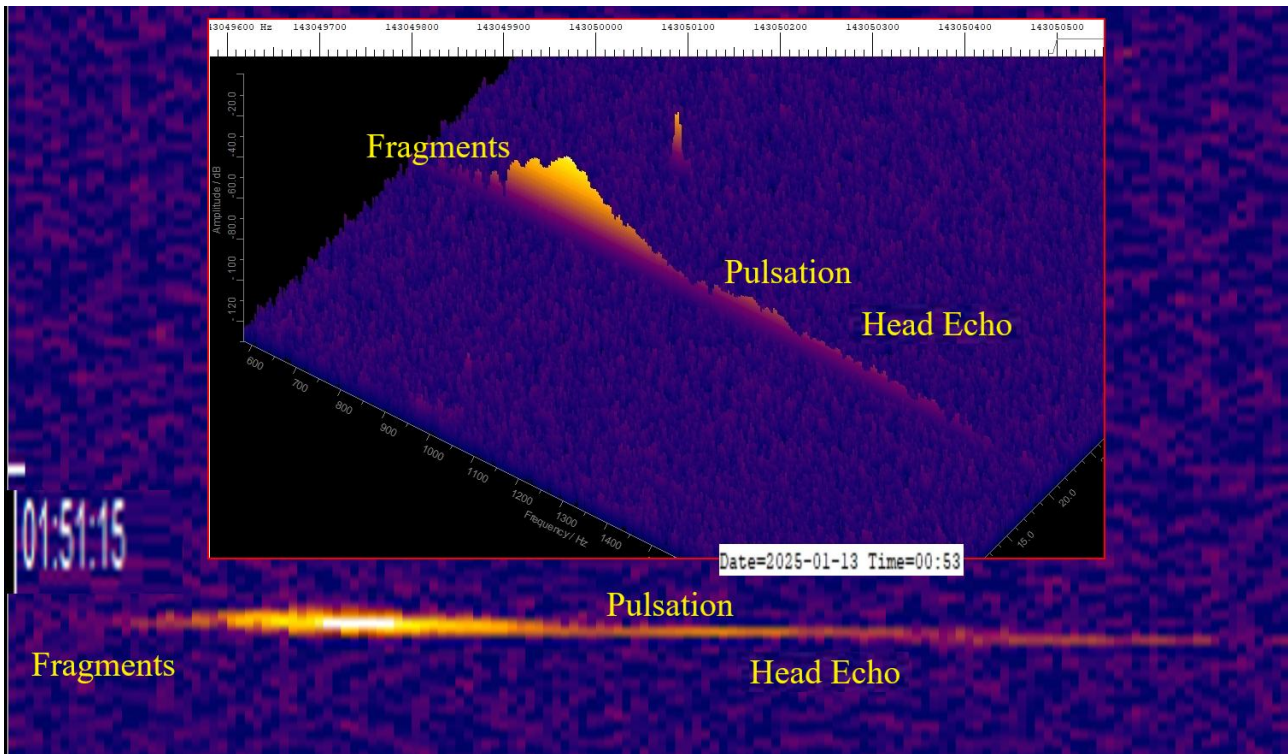


Figure 6 – Ein schönes Meteorecho mit Kopfecho und Fragmentierungen. Für einen Trail hat es nicht mehr gereicht.

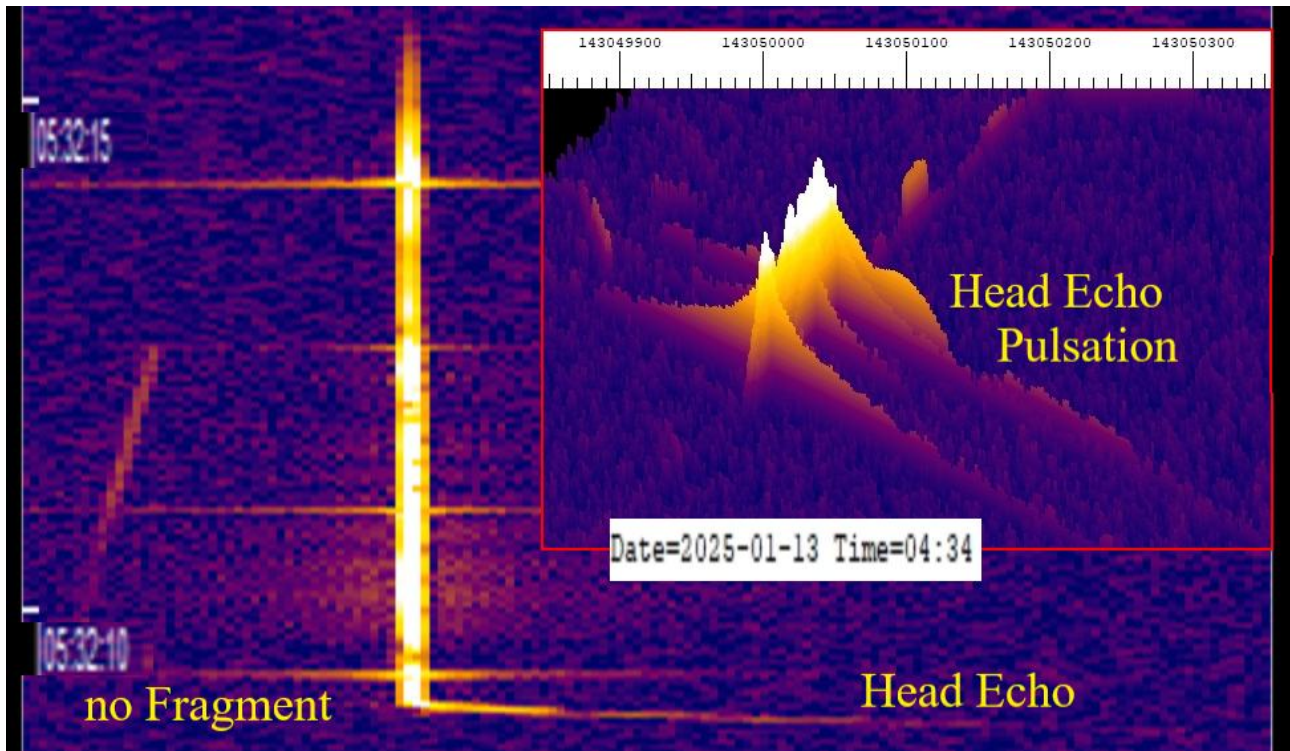


Figure 7 – Hier wurde die gesamte Materie verdampft und endet als Trail. Weiterfliegende Fragmente gibt es nicht. Das Kopfecho zeigt, wie schon häufig gezeigt, den Bauch. Die GRAVES Glitches dienen hervorragend als Marken.

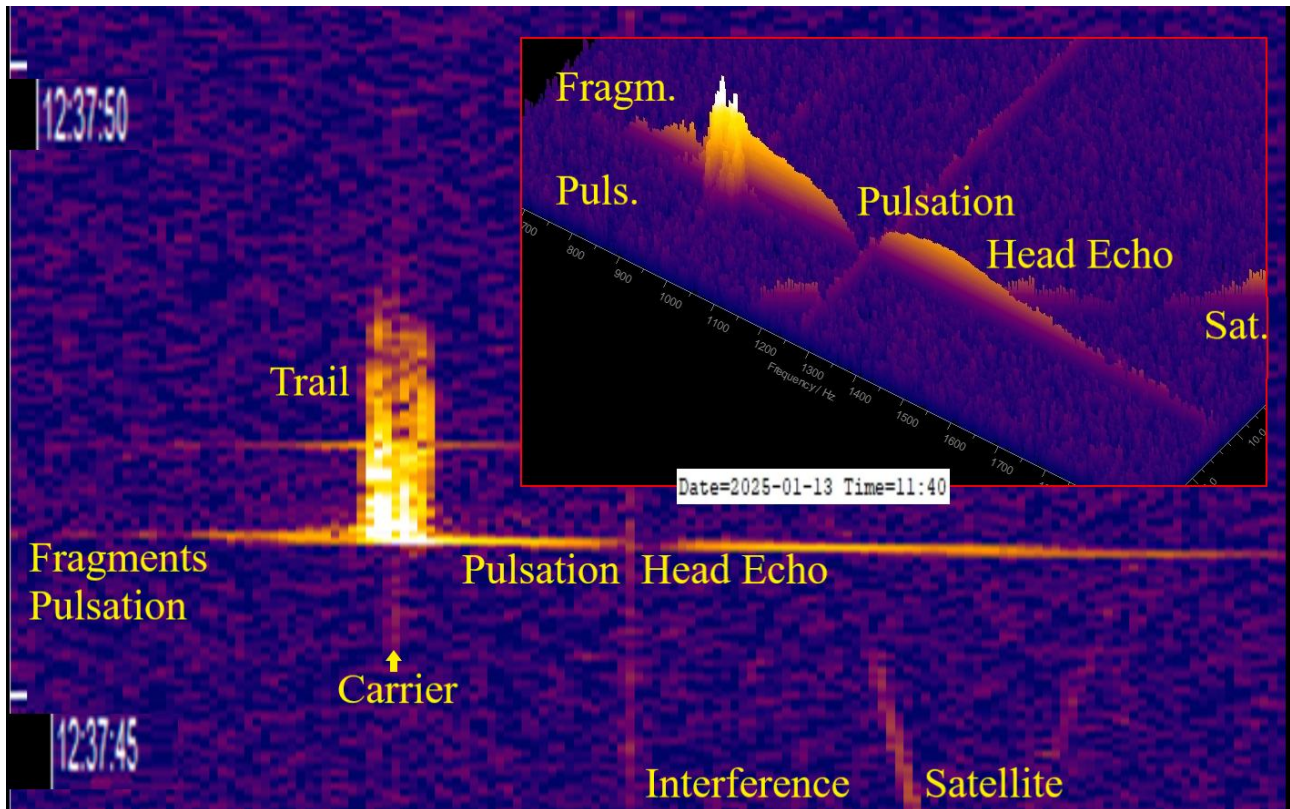


Figure 8 – Hier ist der Trail schwächer als im Bild 7, dafür bleibt aber mehr Materie für den Weiterflug. Das Kopfecho zeigt eine ausgeprägte Pulsation. Gelegentlich gibt es eine Störung, die in der Mitte des 2D-Bildes zu sehen ist. Satellitenechos sind immer vorhanden. Mit Carrier ist der GRAVES Träger gekennzeichnet.

4 Conclusion

Die 3D-Darstellung der Spektrogramme, die mit Hilfe des leistungsstarken GRAVES-Radar erstellt wurden, erlauben interessante Einblicke in das Plasma des Kopfechos. Fading bzw Pulsation im Spektrogramm des Kopfechos zeigt an, wann ein Meteoroid in Bruchstücken unterwegs ist. Ferner kann man erkennen, ob Teilchen nach der Explosion ihren Flug fortsetzen.

Meine früheren Arbeiten hatten schon gezeigt, dass man am 3D-Spektrogramm erkennen kann, wann Meteoroiden und Radarstrahlen parallel verlaufen. Es wird sehr spannend, weitere Ströme zu erkunden.

Acknowledgements

Literature

Close S., Brown P., Campbell-Brown M., Oppenheim M., Colestocka P. (2007). "Meteor head echo radar data: Mass–velocity selection effects". *Icarus*, **186**, 547–556.

Kero, J., Szasz, C., Pellinen-Wannberg, A., Wannberg, G., Westman, A., and Meisel, D. D. (2008). "Three-dimensional radar observation of a submillimeter meteoroid fragmentation". *Geophysical Research Letters*, **35**, L04101.

Sicking W. (2025). "About Spectrograms of Meteor Echoes at Different Stages of the Radiant Position of the Quadrantids 2025 – an AI/ML- Investigation". *eMetN*, to be published.

Graphical Abstract

