

# EXAMENSARBETE

## **Analyser av mätprofiler i Titans atmosfär**

**Reviderad version 2005-07-31**

**Erik Wikström**

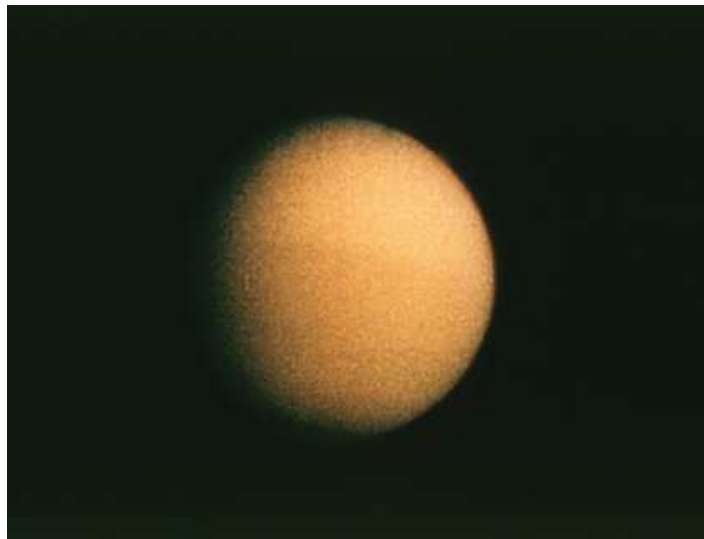
**Luleå tekniska universitet**

**CIVILINGENJÖRSPROGRAMMET  
RYMDTEKNIK**

Institutionen för Tillämpad fysik, maskin- och materialteknik  
Avdelningen för Fysik

# Examensarbete

## Analys av mätprofiler i Titans atmosfär



av

**Erik Wikström**

**Avdelningen för Fysik  
Luleå tekniska universitet**

**Examinator:** Dr. Johan Hansson, Avdelningen för Fysik, Luleå tekniska universitet

**Handledare:** Docent Jan-Erik Wahlund, Rymdplasmafysikprogrammet, Institutet för Rymdfysik, Uppsala

oktober 2005

# Innehållsförteckning

<b>SAMMANFATTNING .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>1 INTRODUKTION .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Syfte .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Cassini/Huygens-projektet .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Satelliten .....	4
1.2.2 Instrumenten .....	5
1.2.3 Vetenskapliga mål .....	6
<b>1.3 Langmuirsonden .....</b>	<b>8</b>
1.3.1 Vad är plasma? .....	9
1.3.2 Mekaniken hos Langmuirsonden .....	9
1.3.3 Vetenskapliga mål .....	10
<b>1.4 Saturnus .....</b>	<b>11</b>
1.4.1 Ringarna .....	11
1.4.2 Magnetosfären .....	12
<b>1.5 Titan .....</b>	<b>12</b>
1.5.1 Atmosfären .....	13
1.5.2 Ytan .....	14
1.5.3 Växelverkan med Saturnus .....	16
<b>2 TEORI .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Inledning .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Parametrar .....	17

2.2	<b>Energiekvationen</b> .....	18
2.2.1	Förluskällor .....	20
2.2.2	Uppvärmning .....	20
3	<b>METOD</b> .....	25
3.1	<b>Inläsning av data</b> .....	25
3.2	<b>MATLAB-programmering</b> .....	25
3.3	<b>Kontroll</b> .....	28
4	<b>RESULTAT</b> .....	31
4.1	<b>Grundläggande data</b> .....	31
4.2	<b>Energiekvationen</b> .....	32
4.2.1	$T_A$ .....	34
4.2.2	$T_B$ .....	38
4.2.3	Övriga förbiflygningar .....	40
4.2.4	Jämförelser mellan olika förbiflygningar .....	42
4.2.5	Jämförelser med reducerade data .....	46
4.2.6	Den teoretiska temperaturen .....	47
4.3	<b>Övriga resultat</b> .....	49
4.4	<b>Slutsats</b> .....	51
5	<b>DISKUSSION</b> .....	52
5.1	<b>Orsaker till resultaten</b> .....	52
5.2	<b>Metodanalys</b> .....	53
6	<b>FRAMTIDSUTSIKTER</b> .....	55
7	<b>TACK</b> .....	56
8	<b>REFERENSER</b> .....	57



<b>Program för plottning .....</b>	<b>Bilaga 1</b>
<b>Program för jämförelser av banor .....</b>	<b>Bilaga 2</b>
<b>Program för beräkning och plottning av jämviktskonstanten .....</b>	<b>Bilaga 3</b>

## Sammanfattning

Detta arbete är en studie av Saturnusmånen Titans jonosfär. Det som har undersökts är dess värmeledande förmåga, konduktivitet och avkylning, för de lägre delarna (1000-2000 km). Dessutom studerades möjliga förluskällor för elektroner. De resultat som produceras studerades och jämfördes med teorin.

Målet med arbetet var att utifrån förhandsdata skapa profiler av olika parametrar för de lägre delarna av jonosfären. Dessa profiler och data sammanställdes sedan i en teori som jämfördes med befintliga teorier, konduktiv eller termiskt ledande atmosfär. Detta gjordes för att besvara frågan om termisk ledning, dvs. energiflöde, via magnetfältslinjer från magnetosvansen kan förklara uppkomna elektrontemperaturer.

Den största delen av arbetet utfördes med MATLAB och bestod i att för olika förbiflygningar skapa olika parametrar såsom temperatur, densiteter, frekvens, avkylningsfaktorer och konduktivitet, visualisera dem och jämföra dem med varandra. Även en del resultat som inte direkt kommer ur denna analys redovisas.

Resultaten är huvudsakligen att alla parameterkurvor är ganska till mycket ”brusiga” troligen beroende på yttre påverkan, huvudsakligen från rymdfarkosten själv. För temperatur och densiteter ser man tydliga trender, att de ökar resp. minskar med ökande höjd. Frekvenser och avkylning som beror på temperatur och densitet visar båda tydliga trender, de minskar kraftigt med höjden. För frekvenserna, dvs. kollision-frekvenserna, är beroendet av kväve betydligt mindre än det av elektroner utom på lägre höjder. För avkylning är kväves inverkan betydligt större än metans utom på låga höjder. För konduktion finns en tydlig trend att den ökar för låga luftlager för att för höga bara uppvisa ”brus”.

Slutsatserna är att atmosfären är värmeledande och att detta beror på konduktion. Denna kan delvis kopplas till termisk ledning från magnetosvansen. Detta kan påvisas eftersom konduktionen inte motsvarar avkylningen vilket betyder ett nettoflöde av värme, och därmed energi, i jonosfären. Detta förutsätter att övrig värmetransport är mycket liten. Detta är emellertid inte alltid fallet eftersom då skulle avkylningen motsvara konduktionen.

## Abstract

This thesis comprises a study of the ionosphere at the Saturnian moon Titan. What has been analysed is its heat conduction and cooling for the lower parts (1000-2000 km). Furthermore possible lost terms for electrons have been studied. The results were examined and compared with the theory.

The proposal for the thesis was that from raw data make profiles for different parameters for the lower parts of ionosphere. These profiles and data were compiled to a theory that was compared to existing theories, conductive or thermal conductive atmosphere. All this was done to answer the question if thermal conduction, i.e. energy flux, can explain resulting electron temperatures.

The largest part of the work was done with MATLAB and consisted in creating different parameters like temperatures, densities, frequencies, cooling rates and conduction for a set of flybys, visualize them and compare them with each other. Also a few results that don't come directly from this analysis are shown.

The main results are mainly that all parametric curves are fairly to very "noisy" most likely due to external influence, mainly from the spacecraft itself. For temperatures and densities one can observe distinct patterns, they increase respectively decrease with increasing altitude. Frequencies and cooling rates that both depend on temperature and density also show distinct patterns, they decrease rapidly with higher altitude. Frequencies, i.e. collision frequencies, are much less dependant on nitrogen than on electrons except for low altitudes. For cooling rates the influence of nitrogen is much greater than the influence of methane except for low altitudes. Conduction shows a distinct pattern, it increases for low strata of air but shows only "noise" for higher.

The conclusions are that the atmosphere on Titan is heat conductive. This can partly be linked to thermal conduction for the magnetotail. This conclusion is due to the fact that the conduction does not correspond to the cooling rates, which means that there is a heat flow, and therefore energy flux, in the ionosphere. This is assuming that all other heat transport is very small. However, this is not the case at all times because then the cooling rates would be equivalent to conduction.

# 1 Introduktion

De första undersökningarna av Saturnus närområde genomfördes för över 25 år sedan av Pioneer-sonderna. Dessa gjorde inga djupgående undersökningar av Titan utan nöjde sig i stort med att konstatera att månen hade en atmosfär samt tog en del bilder av denna vilket avslöjade en rödaktig ”dimma” runt månen.

De första mätningarna av atmosfären på Titan genomfördes av satelliterna Voyager 1 och 2 1981 genom radio-ockultation. Det senaste femton åren har man utifrån dessa data gjort åtskilliga modeller av atmosfären, särskilt jonosfären. Dessa modeller har med utgångspunkt i mätvärden för temperatur, densitet, joner, radiofrekvenser samt yttre förhållanden, såsom solintensitet, solvindstryck och -hastighet och yttre magnetfält, genom jämförelser med liknande processer och uttryck i jordatmosfären skapat modeller och teorier om atmosfären av främst magnetohydrodynamisk och fotokemisk natur.

## 1.1 Syfte

Målet med detta examensarbete är att utifrån förhandsdata skapa profiler av olika parametrar för de lägre delarna (1000-2000 km) av Saturnusmånen Titans jonosfär. Samtidigt studeras möjliga förluskällor för elektronerna i jonosfären. Dessa profiler och data sammanställs sedan i en modell som jämförs med befintliga atmosfärteorier, konduktiv eller värmeledande atmosfär. Detta görs för att besvara frågan om termisk ledning, dvs. energiflöde, via magnetfältslinjer från Titans magnetosvans kan förklara observerade elektrontemperaturer. Om så inte är fallet så skall detta försöka förklaras.

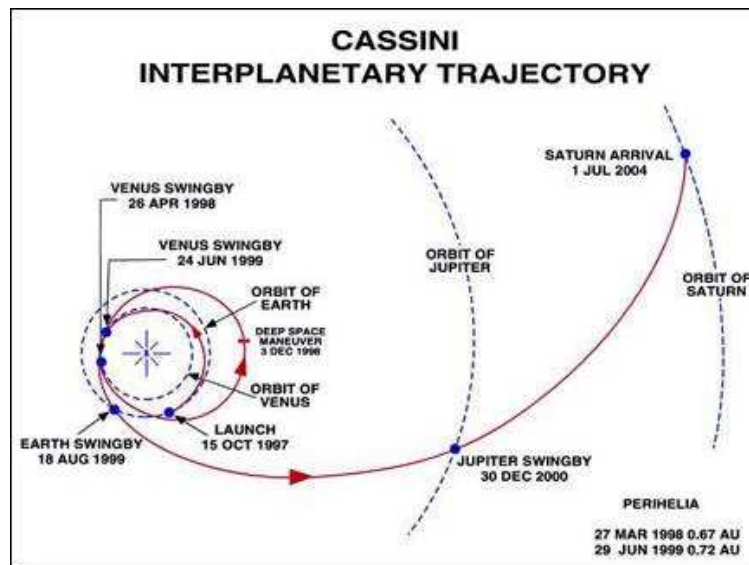
## 1.2 Cassini/Huygens-projektet

Cassini/Huygens är ett gemensamt NASA/ESA-projekt till Saturnus och dess måne Titan, och utgör den mest ambitiösa satsningen på utforskning av en av de yttre planeterna någonsin. Uppsändningen skedde från Cape Canaveral den 15 oktober 1997. Med en bredd (diameter) på över 4 meter och en höjd på 6,7 m (som en minibuss), en vikt på 5,82 ton varav satelliten 2125 kg, landaren Huygens 349 kg, instrument och annat 49 kg, material för landaren på satelliten 30 kg samt 3,1 ton drivmedel och en last av knappt tjugo vetenskapliga instrument ska satelliten (se bild 1) undersöka Saturnus och dess isiga månar i detalj under år 2004-2008. Den stora månen Titan med dess täta atmosfär är av speciellt intresse, och här släpptes Huygens ner och mjuklandade den 14 januari 2005.



**Bild 1:** En testmodell av Cassini på marken (källa: NASA)

Cassini anlände till Saturnus och gick in i omloppsbana den 1 juli 2004. På vägen har den passerat Venus två gånger, Jorden och Jupiter för att få lite extra fart. Detta gjort det möjligt för Cassini att nå Saturnus på "bara" sju år (se bild 2). Projektplaneringen startade 1982, och de flesta projekt började i slutet av 80-talet med modeller, testning och programmering och slutfördes oftast bara månader före uppskjutning med testmodeller.



**Bild 2:** Cassinis väg mot Saturnus (källa: NASA)

### 1.2.1 Satelliten

Satelliten är som nämnts ovan mycket stor och tung, faktiskt den största vetenskapliga satellit som någonsin skjutits upp. Detta, och det faktum att den skulle så långt bort som till Saturnus, gjorde att allt som fanns på den måste vara så lätt och effektivt som möjligt. Det är också skälet till att man utnyttjade gravitationen som extra kraftkälla ty annars skulle man behövt ha över 70 ton bränsle och det finns ingen raket idag som kan bära dessa vikter, förutom rymdfärjor och möjligen ryska Buran-raketer.

## 1.2.2 Instrumenten

De vetenskapliga instrumenten på Cassini indelas i tolv instrumentgrupper som finns i tabell 1 nedan. De sex vetenskapliga instrument som följde med Huygens ner till Titan finns förtecknade i tabell 2.

Namn	Förkortning	Huvudsaklig uppgift
Cassini Plasma Spectrometer	CAPS	Undersöka plasma (joniserad gas) nära och i Saturnus magnetfält
Cosmic Dust Analyser	CDA	Studera is och stoft nära Saturnus och i dess omgivningar
Composite Infrared Spectrometer	CIRS	Mäta infraröd energi från ytan, atmosfärer och ringarna hos Saturnus och dess månar
Ion and Neutral Mass Spectrometer	INMS	Undersöka neutrala och laddade partiklar nära Saturnus, Titan och övriga månar
Imaging Science Subsystem	ISS	Ta bilder i synligt, nära-ultraviolett och nära-infrarött ljus
Dual-Technique Magnetometer	MAG	Studera Saturnus magnetfält och dess växelverkan med solvinden, ringarna och månarna
Magnetospheric Imaging Instrument	MIMI	Studera Saturnus magnetosfär och dess växelverkan med solvinden
Cassini Radar	RADAR	Kartlägga Titans yta med radarbilder
Radio and Plasma Wave Spectrometer	RPWS	Undersöka plasmavågor, naturliga utbrott av radiovågor samt stoft
Radio Science Subsystem	RSS	Söka efter gravitationsvågor i universum samt undersöka atmosfären, ringarna och gravitationsfälten hos Saturnus och dess månar genom återspeglade radiovågor
Ultraviolet Imaging Spectrograph	UVIS	Mäta ultraviolett energi från atmosfärer och ringar
Visible and Infrared Mapping Spectrometer	VIMS	Identifiera de kemiska strukturerna hos ytor, atmosfärer och ringar till Saturnus och dess månar

Tabell 1: Instrumenten på Cassini

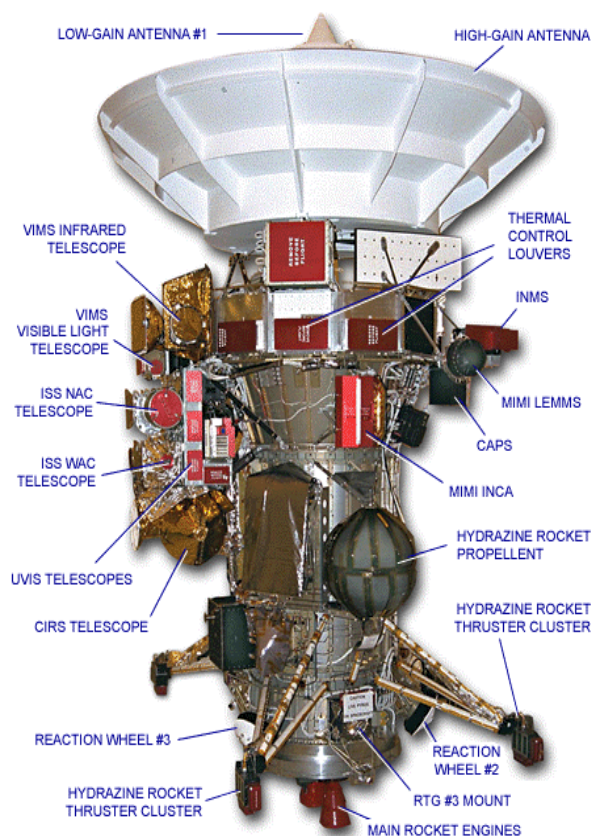
Namn	Förkortning	Huvudsaklig uppgift
Aerosol Collector and Pyrolyser	ACP	Samla in aerosoler för kemiska och strukturella analyser
Decent Imager / Spectral Radiometer	DISR	Ta bilder och göra spektralanalyser med sensorer över ett brett spektrum
Doppler Wind Experiment	DWE	Bedöma atmosfäregenskaper (främst vindstyrkor och -riktning samt dämpning) genom användande av radiosignaler
Gas Chromatograph and Mass Spectrometer	GCMS	Identifiera och beräkna mängderna av olika atmosfärgaser

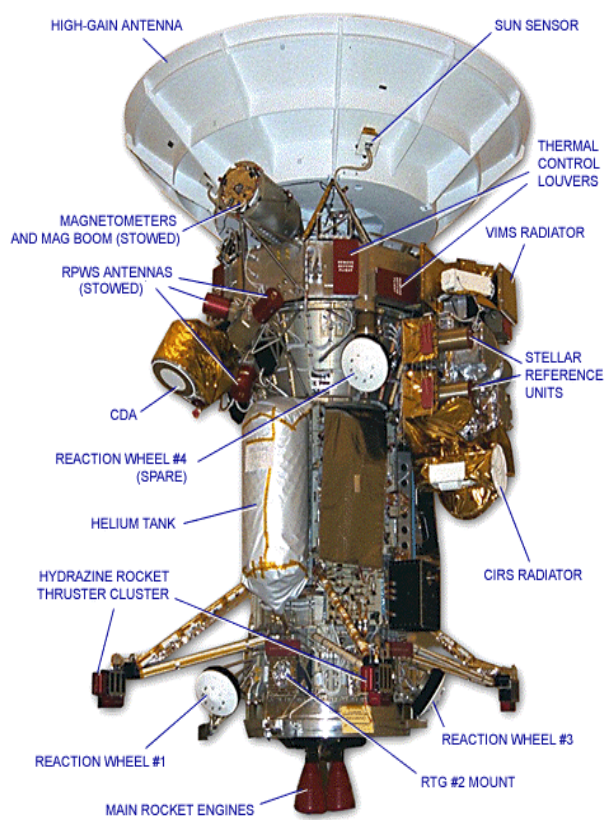
Namn	Förkortning	Huvudsaklig uppgift
Huygens Atmosphere Structure Instrument	HASI	Mäta de fysikaliska och elektriska egenskaperna hos atmosfären
Surface Science Package	SSP	Undersöka de fysikaliska egenskaperna och sammansättningen hos ytan vid nedslagsplatsen

Tabell 2: Instrumenten på Huygens

Men naturligtvis räcker det inte bara med vetenskapliga instrument på en satellit. Man måste också ha en samling tekniska och mekaniska instrument. Dessa utför olika uppdrag som kontroll av farkosten, främst temperatur och position; framdrivning, i form av motorer med bränsle; navigation; elektronik inkl. kablage; kommunikation, en radioenhet och flera antenner, samt databehandling. På Huygens finns dessutom ett system för bortkopplande från Cassini och en värmesköld. Alla dessa instrument är byggda i och runt ett skal.

För en detaljerad beskrivning av olika instruments läge på Cassini se bild 3 nedan.





**Bild 3:** Instrumenten på Cassini (**källa:** NASA)

### 1.2.3 Vetenskapliga mål



Man kan dela upp de vetenskapliga målen för Cassini/Huygens i tre olika avdelningar: de som rör Saturnus och dess atmosfär; de som rör magnetosfären och ringarna samt de som rör Titan, dess atmosfär och planetens övriga månar.

De mål som behandlar Saturnus är:

- Undersöka vilken värmekälla inuti Saturnus som producerar nästan dubbelt så mycket energi som planeten får från Solen genom solstrålning.
- Bestämma temperaturprofiler, molnutbredning och sammansättning hos Saturnus atmosfär.
- Mäta planetens storskaliga vindriktning och vågfält.
- Göra långtidsobservationer av molnformationer och studera deras tillväxt, utveckling och upplösning.
- Bestämma den inre strukturen och rotationen hos den lägre atmosfären.
- Studera dagliga variationer i växelverkan mellan jonosfären och planetens magnetfält och undersöka bakomliggande orsaker till denna växelverkan.
- Bestämma sammansättningen, värmeflödet och omgivningen, strålning och flöden under Saturnus bildande och utveckling.
- Undersöka källorna och egenskaperna hos Saturnus blixtrar.

De mål som behandlar Saturnus magnetosfär och ringar är:

- Bestämma utseendet på Saturnus magnetfält samt studera hur väl detta följer den skapade magnetosfären.
- Studera magnetfältets samband med Saturnus kilometriska radiostrålning.
- Undersöka strömmar, sammansättning, källor och koncentrationer av elektroner och protoner i magnetosfären.
- Bestämma strukturen hos magnetosfären och dess växelverkan med solvinden samt Saturnus månar och ringar.
- Undersöka ursprunget till Saturnus ringar.
- Studera ringarnas utseende och de dynamiska processerna som bidrar till ringarnas uppbyggnad.
- Kartlägga sammansättning och storleksfördelning hos ringarnas beståndsdelar.
- Undersöka det inbördes förhållandet mellan Saturnus ringar och månar.
- Bestämma fördelningen av stoft och meteorider i ringarnas närhet.
- Studera växelverkan mellan ringarna och Saturnus magnetosfär, jonosfär och atmosfär.

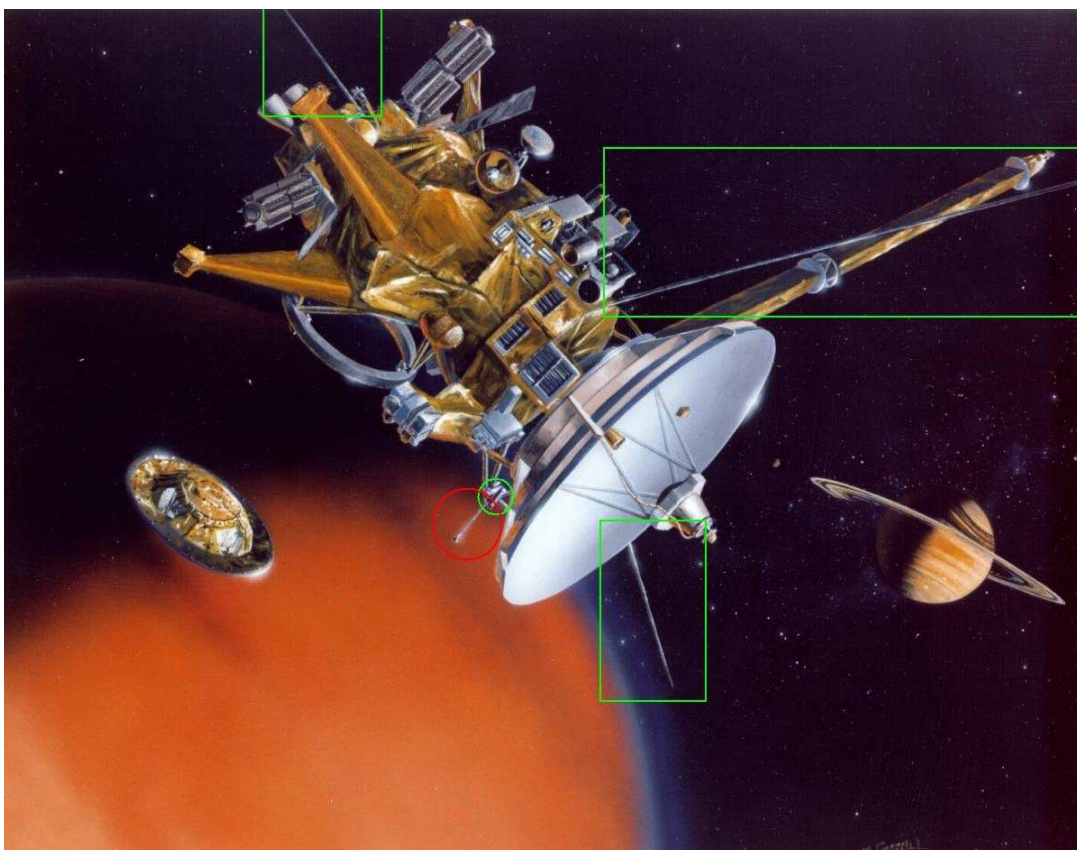
De mål som behandlar Titan och övriga månar är:

- ◆ Undersöka om det finns fler månar än vad som tidigare beskrivits.
- ◆ Analysera orsakerna till att månen Enceladus har en onormalt slät yta.
- ◆ Undersöka ursprunget till det mörka organiska materialet som täcker delar av månen Iapetus.
- ◆ Bestämma de troligaste scenarierna för bildandet och utvecklingen för Titan och dess atmosfär.
- ◆ Bestämma de vanligaste ämnena på Titans yta och i dess inre.
- ◆ Bestämma andelen hos de viktigaste ämnena i Titans atmosfär samt de kemiska reaktioner de ger upphov till.
- ◆ Studera de vertikala och horisontella fördelningarna av olika spårgaser.
- ◆ Leta efter komplexa organiska beståndsdelar och enkla biologiska molekyler.
- ◆ Undersöka energikällor för atmosfärisk kemi.
- ◆ Studera bildandet och sammansättningen hos atmosfäriska aerosoler.

- ◆ Undersöka orsakerna till förekomsten av metan i atmosfären samt möjliga källor på ytan.
- ◆ Mäta vindar och storskaliga temperaturer i atmosfären.
- ◆ Studera molnens fysik och sammansättning, cirkulation, säsongeffekter samt stormar och blixnar i Titans atmosfär.
- ◆ Bestämna det fysikaliska tillståndet och topografin hos Titans yta.
- ◆ Studera dess inre uppbyggnad.
- ◆ Avgöra om Titans yta är flytande "hav" eller fast eller en blandning samt vad dessa eventuella hav består av.
- ◆ Undersöka Titans övre atmosfär, dess jonisation och källa för neurala och joniserade partiklar i Saturnus magnetosfär.
- ◆ Studera hur Titan växelverkar med solvinden och Saturnus magnetosfärsplasma.

### 1.3 Langmuirsonden

Det instrument som jag har utgått ifrån är en Langmuirsond, en sorts "väderstation" för rymdbruk, som konstruerats vid Institutet för Rymdfysik i Uppsala och ingår i en större instrumentgrupp, kallad Radio and Plasma Wave Science (RPWS) och lett av Avdelningen för fysik och astronomi vid Universitetet i Iowa. RPWS inkluderar tre olika typer av sensorer: radioantennerna, en magnetometer och vår Langmuirsond (se bild 4). Men finns det något att mäta – är inte rymden bara vakuum? Med våra jordiska mått mätt är rymden ett ganska bra vakuum, faktiskt bättre än vad man för det mesta kan nå i de bästa laboratorier. Men helt perfekt är inte detta vakuum utan i stort sett överallt finns det en tunn gas av elektriskt laddade partiklar. En sådan gas av fria joner och elektroner kallas ett plasma, och det är detta interplanetära plasma som man undersöker med en Langmuirsond.



**Bild 4:** Instrumentgruppen RPWS på Cassini (källa: NASA/IRF)

Den röda ringen visar Langmuirsonden, den gröna ringen visar dess elektriska enhet och de gröna fyrkanterna är radioantenner.

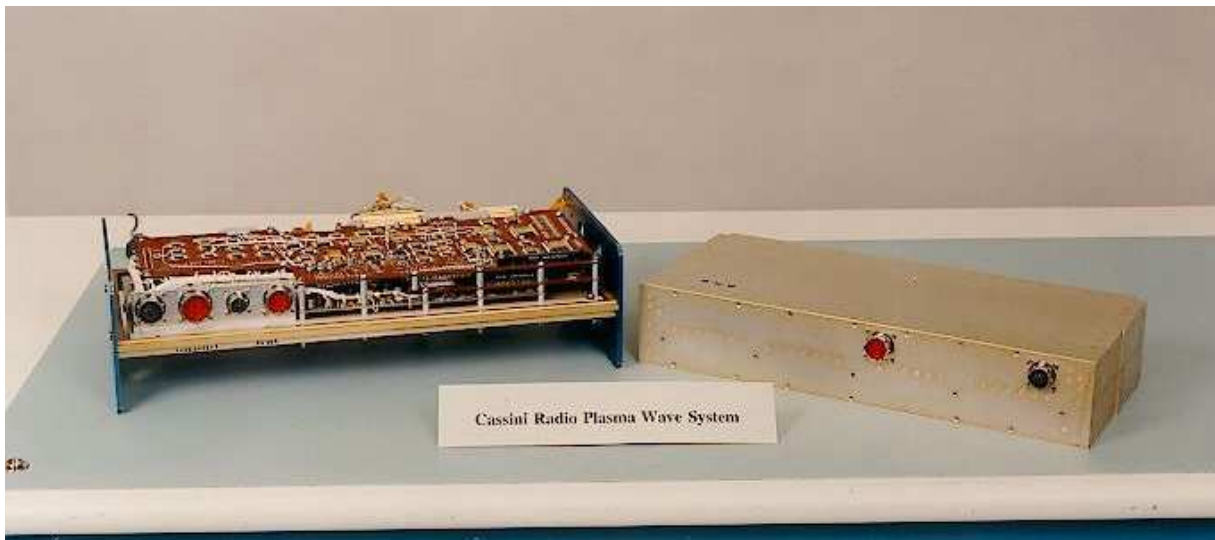
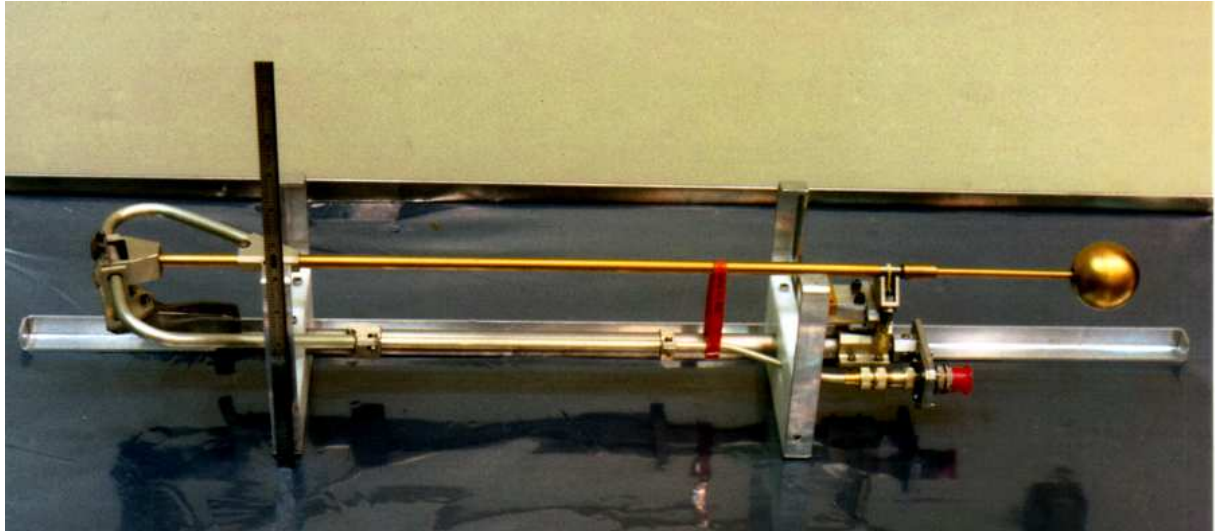
### 1.3.1 Vad är plasma?

Det mesta av det interplanetära plasmat är partiklar från solens atmosfär, koronan, som förs vidare ut i solsystemet med den s.k. solvinden med hastigheter på 250-800 km. Detta solvindsplasma är tätare närmare Solen och glesare längre ut. Runt himlakropparna, planeter, månar och kometer, skapas också plasma genom olika typer av solstrålning. För kroppar med både atmosfär och magnetfält, huvudsakligen runt planeterna, bildas en stor ”bubbla” av plasma runt kroppen, en s.k. magnetosfär, som skyddar planeten för kraftig inverkan av solvindsplasma. För kroppar med atmosfär som ett fåtal månar, t.ex. Titan, och de flesta kometer reglerar solstrålning med de övre lagren av atmosfären, den s.k. jonosfären, och laddade joner och elektroner bildar ett jonosfärplasma som hindrar solvinden att reagera med de lägre delarna och ytan. För kroppar utan atmosfär vilka inkluderar de flesta månar, t.ex. Månen, reglerar solvinden direkt med ytan varvid joner ”stöts ut” från ytan, s.k. sprättning, och förs vidare med solvinden, s.k. pick-up, varvid en mycket tunt plasma bildas på framsidan (sett från Solen) nära månytan som sträcker sig flera månradier längs ”sidorna” på månen. Samtidigt bildas ett område utan plasma bakom månen, en s.k. wake (vak). Detta gäller även för månar med atmosfär med då är dessa fenomen mycket kraftigare även om storleken är ungefär densamma förutom att plasmat på framsidan befinner sig i jonosfären. För magnetosfärer bestäms storleken av styrkan på kroppens magnetfält. Dessutom innehåller magnetfält en del inducerade fenomen, van Allen-bälten, norrsknen och sydsken, magnetiska stormar, radioekon osv., som troligtvis inte förekommer hos omagnetiserade kroppar.

### 1.3.2 Mekaniken hos Langmuirsonden

Grundtanken bakom en Langmuirsond är enkel: låt en liten elektriskt ledande kropp, till exempel en kula, sticka ut från rymdfarkosten, och anslut sedan denna kula till en positiv spänning. Eftersom kulan då blir positiv drar den till sig elektronerna i plasmat, vilket gör att det flyter en ström till proben. Mät denna ström: ju fler elektroner, desto högre ström, så har man fått ett instrument för att mäta elektrontätheten i rymden. Genom en del mer invecklade överväganden går det också att få fram temperaturen och ibland också plasmats hastighet. Man får alltså en sorts väderstation i rymden, som mäter några av de mest fundamentala storheterna för alla jordiska väderstationer: temperatur, vindhastighet och tryck som vi får från tätheten och temperaturen.

Detta kan låta enkelt, men det finns förstås en massa komplikationer. Att konstruera lågbrusig elektronik för mätning av strömmar ner till bråkdels nanoampère är svårt nog, speciellt när det inte får väga mycket, inte dra mycket ström, ska klara vibrationer vid uppsändningen och strålning under bortåt 15 år i rymden samt att man saknar möjlighet att byta ut någon del. Dessutom finns det en mängd faktorer som krånglar till den enkla bilden som upp målades i förra stycket, t. ex är spänningen inte konstant och det finns inget direkt samband mellan ström och elektrontäthet. Bild 5 visar Langmuirsonden på Cassini i infällt läge, utfälld är sonden ungefär 1 m från satelliten, gyllene på grund av ytbehandling med titannitrid för bästa egenskaper i rymden och dess elektriska enhet. Kulans diameter är 50 mm.



**Bild 5:** Langmuirsonden i infällt läge och dess elektriska enhet (källa: University of Iowa/IRF)

### 1.3.3 Vetenskapliga mål

Huvudmålet för Langmuirsonden är att undersöka det tunna plasmat runt Saturnus och den övre atmosfären på Titan. Magnetosfären runt Saturnus liknar på många sätt Jordens magnetosfär, men skiljer sig helt på andra sätt. Att reda ut precis på vilka sätt och varför de är lika respektive olika är viktigt, inte minst för förståelsen av andra magnetiserade objekt i universum. Fördelningen av plasma runt Saturnus, hur plasmat påverkas av, och påverkar, ringarna är en del av de saker som man vill veta mer om.

Speciellt intressant är Titans jonosfär, dvs. de översta joniserade atmosfärlagren. Till viss del liknar Titans och jordens atmosfärer varandra – åtminstone om man betraktar hur det såg ut på jorden i dess barndom, innan livet fick rejält fotfäste och tillförde en massa syre genom fotosyntes. På Titan består luften liksom på jorden mest av kväve, men på Titan finns också stora mängder metan och andra kolväten. Att få studera Titans jonosfär i detalj under de många förbiflygningar som Cassini ska göra över Titan är kanske det mest intressanta under detta projekt.

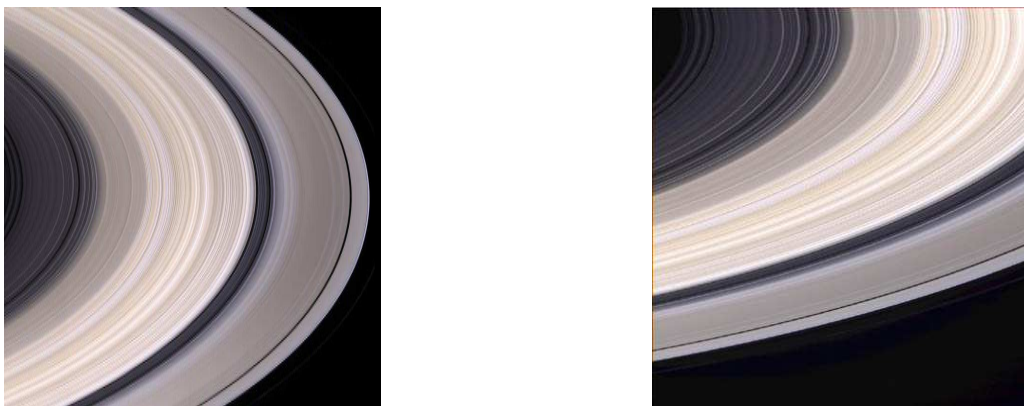
## 1.4 Saturnus

Saturnus är den yttersta av de planeter som är synliga med blotta ögat och den sjätte räknat från Solen med ett medelavstånd av 9,54 AU (ungefär 1 427 miljoner km). Dess omloppstid är 29,46 år. Den är den näst största planeten i vårt solsystem efter Jupiter och är liksom denna en stor gasjätte av nästan uteslutande väte (96 %) och helium (4 %) i tre lager, ytterst en atmosfär av gasformiga ämnen, innanför denna ett skikt av flytande molekyllärt väte och slutligen ett inre lager av metalliskt väte, med små mängder vatten särskilt som is närmast kärnan runt en fast kärna av sten och metaller. Det faktum att den innehåller så stor andel väte gör den mycket ”lätt”, dess densitet är bara  $0,69 \text{ g/cm}^3$ , vilket gör att Saturnus skulle flyta på vatten. Den väger ca  $5,69 \times 10^{26} \text{ kg}$  (som 95 jordklot). Saturnus är tydligt tillplattad vid polerna med en ekvatorialdiameter på 120 536 km och en polardiameter på 108 728 km p.g.a. sin snabba rotation av 10 h 39 min. Saturnus är en av solsystemets kallaste planeter med en temperatur på ”ytan”, som definieras som gränsskiktet mellan atmosfären och det flytande lagret, av 88 K medan temperaturen i molntopparna är 148 K.

För närvarande har Saturnus 31 namngivna månar men minst 3 ännu inte namngivna, totalt minst 34 st. (flest i solsystemet), i storleksordningen några kilometer till tusentals km i diameter som ligger på ett avstånd av mellan 133 583 och 23 100 000 km från Saturnus centrum. Före Cassini/Huygens-projektet var bara 18 upptäckta men genom nya studier av Voyager-bilder hittades ytterligare 13.

### 1.4.1 Ringarna

Det mest utmärkande draget hos Saturnus är dess ringar. Dessa ringar upptäcktes 1610 av Galileo Galilei som beskrev dem såsom två stora ”månar” på bägge sidor av planeten. 1655 konstaterade holländaren Christiaan Huygens att dessa ”månar” var en tunn skiva runt planeten men dessa idéer lanserades redan 1646 av Fontana. 1675 konstaterade italienaren Jean-Domenique Cassini att det i själva verket fanns en yttre och en inre ring delad av en mörkare band, idag kallad Cassinis delning. Senare har flera astronomer funnit fler ringar och idag finns det sju erkända ringar men dessa sju ringar byggs upp av betydligt många fler åtskilda av mellanrum (se bild 6). Ringarna är i medeltal bara några tiotals meter tjocka och sträcker sig längs ekvatorn men i  $27^\circ$  vinkel mot ekvatorialplanet mellan 66 900 km från centrum ut till 483 000 km. Ringarna består av miljontals större, upp till tiotals meter, och mindre stenar, sandkorn och isklumpar. Inuti ringsystemet finns det några månar, framför allt Pan, Atlas, Promethus och Pandora, som jämnar till ringarna, upprätthåller mellanrummen mellan dem samt håller områdena ovanför och mellan ringarna fria från material.



**Bild 6:** Saturnus ringar (källa: NASA/ESA)



## 1.4.2 Magnetosfären

Saturnus magnetosfär är en jättestor bubbla runt planeten, inneslutande hela ringsystemet och de flesta av månarna som skapas när solvinden, laddade partiklar från Solen, möter Saturnus starka magnetfält. Detta magnetfält orienterat längs rotationsaxeln hos planeten är ännu inte helt klarlagt. Den kan variera i storlek p.g.a. solvindens varierande hastighet men sträcker sig vanligen 20 till 35 Saturnusradier (mellan 1 200 000 och 2 100 000 km) från planeten mot Solen där det bildas en chockvåg när de två krafterna möts. På baksidan drar solvinden med sig det plasma som bildas inuti magnetosfären till en lång svans över 500 Saturnusradier (30 000 000 km).

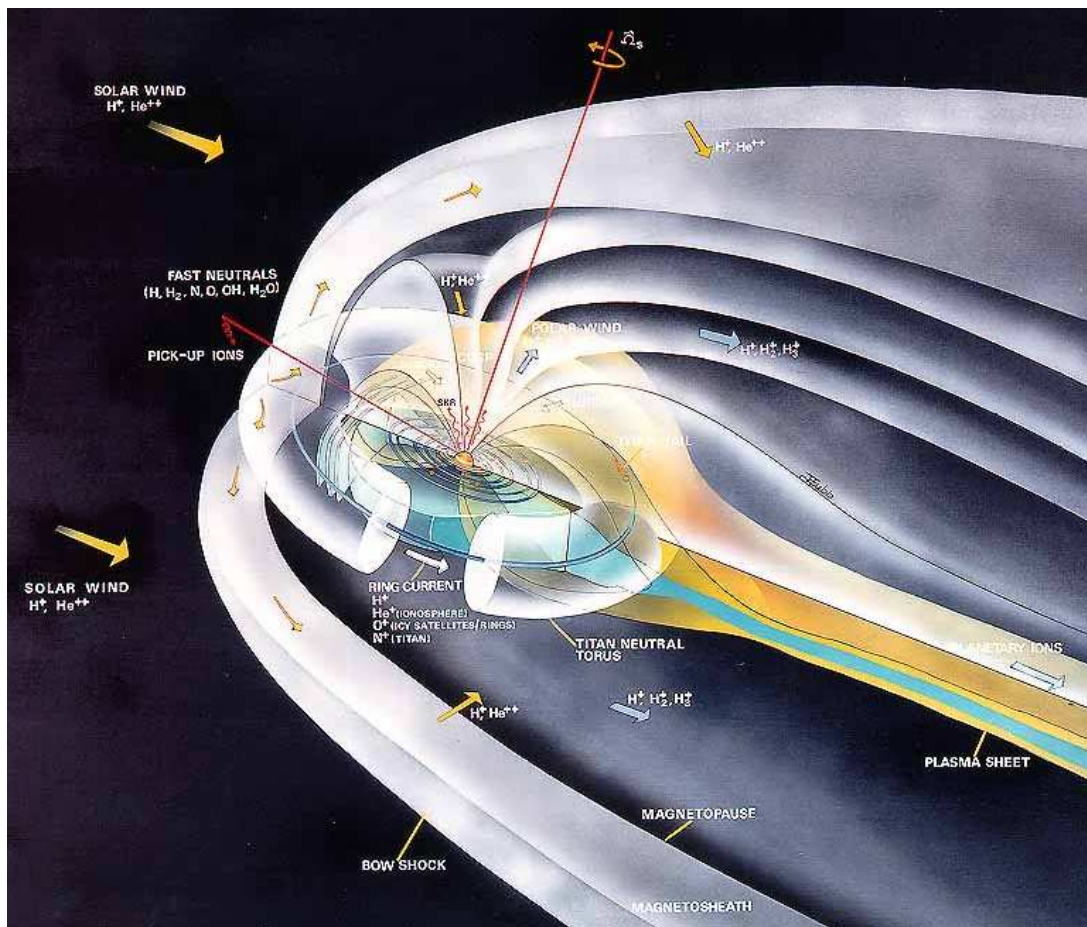


Bild 7: Saturnus magnetosfär (källa: NASA)

## 1.5 Titan

Titan upptäcktes 1655 av Christiaan Huygens som Saturnus första måne. Den är Saturnus största, och solsystemets näst största måne, med en diameter på 5150 km. Medelavståndet till sin moderplanet är 1 221 850 km och denna bana tar 15 d 22 h. Det tar Titan exakt lika lång tid (15 h 22 d) att rotera ett varv, den har s.k. synkron rotation liksom de flesta månar. Densiteten på Titan är ganska låg, bara  $1,881 \text{ g/cm}^3$  vilket tyder på att månen till största delen borde bestå av flyktiga ämnen. Dessa är vatten, främst som is; ammoniak samt möjligen metan och andra kolväten såsom etan och acetylen. Eventuellt har den en kärna av sten och/eller is. Detta gör att Titan väger ca  $1,345 \times 10^{23} \text{ kg}$  (ungefär 1/45 av Jordens).

### 1.5.1 Atmosfären

Titan är unik på så sätt att den är den enda måne som har moln och en tjock och tät atmosfär, 1,5 bar vid ytan, vilket upptäcktes 1944 av tysken Gerard Kuiper. Denna har en enorm utsträckning i förhållande till månen och sträcker sig minst 2 Titanradier (över 5000 km) från ytan om man betecknar ”hela” atmosfären man bara ut till ungefär 500 km om man räknar den neutrala atmosfären. Längst ut är den emellertid mycket tunn och benämns exosfär. En bit längre in finns ett område ungefär mellan 1000 och 2500 km där solstrålning reagerar med atmosfären och skapar joner, laddade partiklar, vilka bildar en jonosfär. Under denna höjd, som är starkt varierande, fungerar atmosfären som en transportör av luftmassor och joner ner till ca 50-300 km där dessa ämnen bildar en tät dimma (se bild 8).



**Bild 8:** Titans atmosfär på nära håll (källa: NASA)

Det svarta är Titans yta, det rödbruna är den täta dimman och det blå den resterande atmosfären. Jonosfären och exosfären är nästan genomskinliga (mörkt indigo i denna bild).

Titans atmosfär består till största delen av kväve (minst 90 %), metan (2-8 %) och argon (upp till 2 %) samt små mängder väte; kolväten, t.ex. etan, acetylen, etyn, propan, bensen; vätecyanid och derivat därav, s.k. polycyanider; nitriler, organiska kväveföreningar; vatten samt koloxider. Det är också troligt att Titans atmosfär innehåller små mängder ammoniak men detta ämne har än så länge inte hittats. Detta borde vara en god approximation för hur atmosfären på Jorden såg ut för 4 miljarder år sedan, dvs. innan livet började producera syre och andra ämnen. Titans atmosfär är nämligen så gott som helt fri från fritt syre och innehåller bara små mängder i föreningar i vatten och koloxider.

Den nedre delen av jonosfären fungerar som en kemisk fabrik där solpartiklar och strålning sönderdelar kvävgas som sedan reagerar med metan. Detta skapar fri vätgas som försvinner ut i rymden; kolkväveföreningar och –joner; kolvätejoner samt cyanväte som sedan reagerar med varandra och mer kväve och bildar, förutom det som nämns ovan, kolväten; cyanider och kanske t.o.m. enkla aminosyror. Det är framför allt kolväten och i viss mån nitriler som bygger upp den täta dimman. Den täta dimman har två huvudsakliga konsekvenser. Dels gör dimman det omöjligt att observera Titans yta genom vanliga teleskop utan man måste studera Titan med radar eller infrarött ljus. Dimmans största förtjänst är att den skyddar Titans yta mot Solens ultravioletta strålning som ozonlagret på Jorden. Dessutom är metan en växthusgas som värmer upp Titans yta.

## 1.5.2 Ytan

En av de mest omtvistade frågorna när det rör Titan är dess yta. Består den av kolväten eller sten eller is eller någon blandning av alla dessa? Är den fast eller flytande? Eller är den rent av ett träsk av halvflytande kolväten där stora komplicerade molekyler simmar omkring? Finns det liv på ytan? Är ytan konstant torr eller förekommer regn? Finns det ”vulkaner” som sprutar upp metan eller vatten från områden djupt i månens inre? Finns det moln av vatten eller kolväten under dimman? Dessa är frågor som forskare diskuterat i årtionden. Med Cassini har vi en god möjlighet att få svar på de flesta av dem, förmodligen inte alla, men också ge upphov till nya frågor.

Före Huygens landade på Titan ansågs allmänt att yta bestod av fast vattenis och hav, sjöar och floder av flytande kolväten, främst etan,. 10 till 20 km över ytan bildas moln av metan som möjligen skapar nederbörd. Metan kommer från haven eller från gasutsläpp från månens inre eller ett lager nära ytan eftersom metan hela tiden måste tillföras atmosfären för att balansen ska behållas. När Huygens landade så gjorde den mätningar som delvis bekräftade dessa teorier. Man fann dock inga hav utan landade i något träskliknande som beskrevs som brylépudding och som upptäcktes bestå av kolväten. Under nerfärden såg man något som liknade Grand Canyon med ett utbrett flodsystem möjligen rinnande mot en sjö. Strandkanten var ganska tydlig och man såg också någon sorts dimma av metan eller etan längs stranden. Ytan bestod av vattenis med spår av fruset ammoniak och lättare, huvudsakligen flytande, kolväten. På ytan fanns ett skikt av kolväten och andra organiska ämnen men inga ”livs-molekyler” kunde upptäckas.

Metan utsöndrades från ytan när farkosten landade, eftersom den värmdes upp ytan, samtidigt som halten metan ökade ju närmade ytan man kom. Dessutom kunde spår av både metanmoln och möjlig nederbörd, regn eller snö av metan och etan, upptäckas. Det var rent av så att man fann bevis för att metan skapar ett sorts eget enkelt vädersystem där metan förs upp från ytan kondenseras i moln och faller ner som nederbörd. Därför är det sannolikt att den del av träsket ibland släpper ifrån sig stora mängder metan som sedan försvinner upp i atmosfären via detta vädersystem.

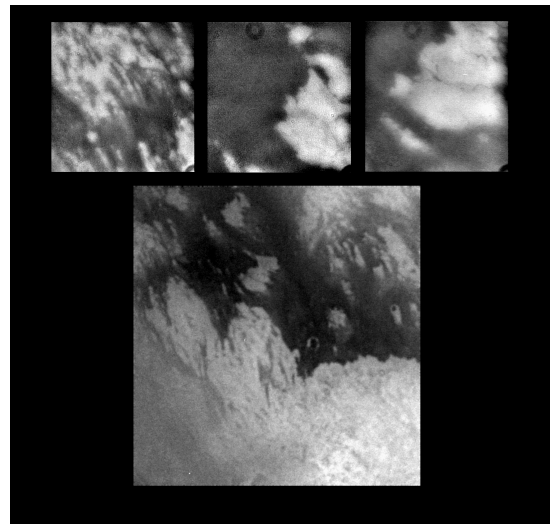
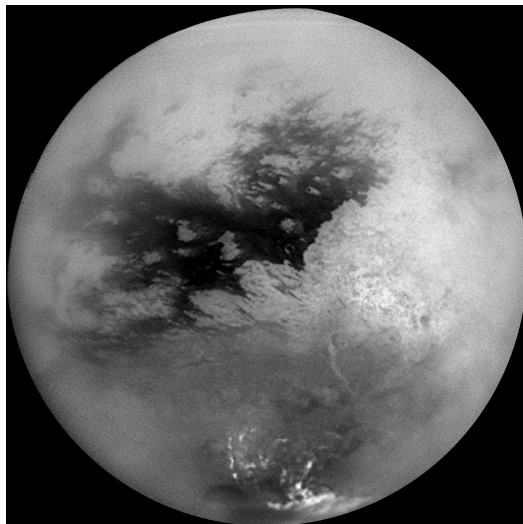
Titans har extremt varierande struktur som trots allt är mycket platt, högsta höjd som uppmätts är drygt 100 m över medelytan. Dessutom är ytan inte särskilt gammal, högst några tusen år. Detta kan sägas eftersom nästan inga meteoritkratrar kunde upptäckas vilket betyder att något måste ha utplånat dem, förmodligen något flytande från planetens inre. Således borde det finnas någon sorts värmekälla i Titans inre som ibland håller vatten delvis flytande. Emellanåt bildas troligen sprickor i is-ytan där vattnet väller upp som en vulkan. Titan är således en geologiskt levande himlakropp med vattenvulkaner och troligtvis aktiv än idag. Dessutom är den som beskrivs ovan klimatologisk aktiv med hav/träsk, sjöar och floder samt vädersystem. Titan är en av de aktivaste månarna i solsystemets tillsammans med de galileiska månarna.

Så till den eviga frågan: Finns det liv på Titan? Den frågan är säkerligen omöjlig att svara på om man inte hittar jordliknande liv på Titan. Men låt mig bena ut problemet lite. De flesta forskare tror inte att det finns liv på Titan. Detta beror främst på att Titan har en yttemperatur av 94 K (-180°C) vilket gör att alla kemiska reaktioner går 1000 gånger långsammare än på Jorden. Visserligen kan det periodvis finnas flytande vatten på ytan som är täckt av enkla organiska ämnen, även om mer komplicerade organiska ämnen än så länge inte har hittats.

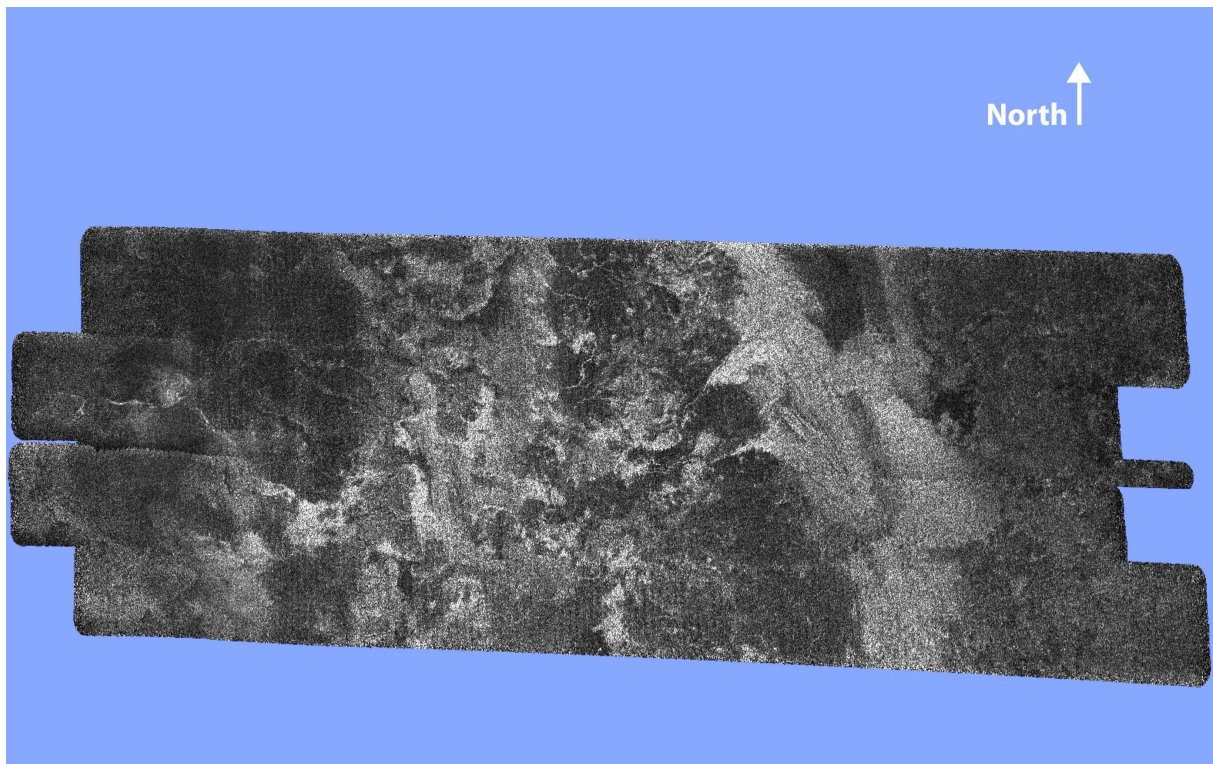


Liv kan eventuellt finnas i dess flytande innandöme där flytande vatten finns, i alla fall periodvis. En fransk forskare, Francois Raulin, har förslagit en annan möjlighet, nämligen att ammoniak upplöst i kolväten kan spela samma roll som vatten. Men hursomhelst, hittills har man inte funnit några som helst tecken på liv i denna främmande värld.

I bilderna nedan syns bilder av Titans yta. De första (bild 9) är tagen med en infraröd kamera under den första förbiflygningen. Även radarbilder har gjorts av ytan och en av dessa syns i bild 10.



**Bild 9:** En infraröd bild av Titans yta sammansatt av flera små bilder resp. detaljer av denna (källa: NASA) De mörka områdena är träsk/hav av kolväten och de ljusare av is. De vita stråken nära sydpolen är metanmoln.



**Bild 10:** Radarbild av ytan (källa: NASA)

### 1.5.3 Växelverkan med Saturnus

Titans växelverkan med Saturnus är komplex och beror till stor del hur omgivningarna ser ut. I regel befinner sig Titan innanför Saturnus magnetosfär och utsätts då för ett bombardemang av energirika partiklar, som accelererats inuti Saturnus magnetfält, och ultraviolett ljus från Solen. Detta sätter igång de katalytiska processerna i den nedre jonosfären. Vid sällsynta tillfällen befinner sig månen helt eller delvis utanför magnetosfären och då reagerar atmosfären direkt med solvinden varvid delar av atmosfären blåser bort. Båda dessa processer resulterar i att atmosfären långsamt tunnare ut, främst försvinner metan och väte men även kväve minskar. Detta märks som en svans efter Titan i dess rörelseriktning. Beräkningar tyder på att atmosfären har varit minst 30 gånger tätare för några miljarder år sedan. Med den takt som atmosfären försvinner idag borde allt metan försvinna inom 20 miljoner år.

Titans växelverkan med Saturnus ger upphov till mer invecklade processer. Bl.a. bildas en skyddande torus av joner bestående av  $H^+$ ,  $N^+$  från Titan,  $He^+$  från Saturnus jonosfär samt  $O^+$  från de inre isiga månarna runt Titans omloppsbanan. Dessutom skapar detta en stark ström, en ringström, på 600 000 A (se bild 7). Titan har dessutom förmodligen något att göra med de omfattande och kraftiga polarsken som syns på Saturnus.

## 2 Teori

För de flesta av ekvationerna nedan har, där annat ej anges, använts allmänt kända och erkända ekvationer. För dessa hänvisas till mig och Jan-Erik Wahlund.

### 2.1 Inledning

För att bestämma den teoretiska elektrontemperaturen utgår man ifrån att jonosfären är i relativ jämvikt, dvs. att jonosfärtrycket precis motsvarar Saturnus magnetosfärtryck. Då erhålls förutsatt att elektrontätheten,  $n_e$ , är ungefär lika stor som jontätheten,  $n_i$ :

$$\frac{3}{2} n_e k_B (T_e + T_i) = \frac{1}{2} n_e m_i v_i^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \Leftrightarrow p_T = p_k + p_B \quad (1)$$

Om elektrontemperaturen,  $T_e$ , är mycket större än jontemperaturen,  $T_i$ , och det magnetiska trycket,  $p_B$ , är mycket större än det kinetiska trycket,  $p_k$ , kan (1) förenklas till:

$$\frac{3}{2} n_e k_B T_e \approx \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \Rightarrow T_e = \frac{1}{3} \frac{1}{n_e k_B} \frac{B^2}{\mu_0} [K] \quad \left( T_e = \frac{1}{3} \frac{1}{n_e e} \frac{B^2}{\mu_0} [eV] \right) \quad (2)$$

Observera att detta inte är den verkliga elektrontemperaturen men att denna kan användas som temperatur i beräkningar. Denna temperatur gäller bara i den allra yttersta delen av svansen varför den ”verkliga” elektrontemperaturen måste beräknas på ett annat sätt.

Normalt råder inte jämvikten i ekv. 1 utan istället gäller:

$$\frac{1}{2} n_e m_i v_{i,ionos}^2 + \frac{3}{2} n_e k_B (T_e + T_i) = \frac{1}{2} n_e m_i v_{i,magn}^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \Leftrightarrow p_{k,ionos} + p_T = p_{k,magn} + p_B \quad (3)$$

#### 2.1.1 Parametrar

De viktigaste parametrarna fås från elektronströmmen:

$$I_e = I_{e0} (1 - \chi_e) \quad (4a)$$

$$\text{där} \begin{cases} I_{e0} = +en_e A_{LP} \sqrt{\frac{v_e^2}{16} + \frac{eT_e}{2\pi m_e}} [eV] \\ \chi_e = - \frac{U_{bias}}{\frac{m_e v_e^2}{2e} + T_e [eV]} \end{cases} \quad (4b)$$

Formeln ovan gäller endast för en klotformig Langmuirsond och en positiv biasström,  $U_{bias}$ . Eftersom hastighetskomponenterna vanligen är mindre än temperaturkomponenterna erhålls följande:

$$I_e = +en_e 4\pi r_{LP}^2 \sqrt{\frac{eT_e}{2\pi m_e}} \left(1 - \frac{U_{bias}}{T_e}\right) = +e^{3/2} n_e r_{LP}^2 \sqrt{\frac{8\pi T_e}{m_e}} \left(1 - \frac{U_{bias}}{T_e}\right) \quad (5)$$

Ur detta kan man erhålla värden för elektrontemperatur,  $T_e$ , och elektrontätheten,  $n_e$ .

Andra betydelsefulla parametrar fås från jonströmmen:

$$I_i = I_{i0} (1 - \chi_i) \quad (6a)$$

$$\text{där } \begin{cases} I_{i0} = -en_i A_{LP} \sqrt{\frac{v_i^2}{16} + \frac{eT_i}{2\pi m_i}} [eV] \\ \chi_i = -\frac{U_{bias}}{\frac{m_i v_i^2}{2e} + T_i} \end{cases} \quad (6b)$$

Formeln ovan gäller endast för en klotformig Langmuirsond och en positiv biasström,  $U_{bias}$ . Eftersom hastighetskomponenterna normalt är mycket större än temperaturkomponenterna erhålls följande:

$$I_i = -en_i A_{LP} \sqrt{\frac{v_i^2}{16}} \left(1 - \frac{U_{bias}}{\frac{m_i v_i^2}{2e}}\right) = -en_i \pi r_{LP}^2 v_i \left(1 - 2e \frac{U_{bias}}{m_i v_i^2}\right) \quad (7)$$

Om quasineutralitet råder,  $n_i \approx n_e$ , kan man ur detta beräkna jontätheten,  $n_i$ , jonhastigheten,  $v_i$ , samt jonmassan,  $m_i$ , om övriga parametrar är kända eller kan beräknas. Detta tillsammans med den kända biasströmmen,  $U_{bias}$ , ger värden på elektrontemperaturen,  $T_e$ , elektrontätheten,  $n_e$ , samt magnetfältet,  $B$ .

## 2.2 Elektrontemperaturen

Elektrontemperaturen erhålls ur energiekvation (energins bevarande) för elektroner (efter Schunk och Walker, Schunk och Nagy samt Roboz och Nagy):

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_e k \frac{\delta T_e}{\delta t} = & -\sin I \frac{kT_e J}{e} \left[ \frac{1}{n_e} \frac{\delta v_e}{\delta z} - \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{\delta T_e}{\delta z} \right] + \sin I J \frac{\delta \beta}{\delta z} + \sin^2 I \frac{\delta}{\delta z} \left( K_e \frac{\delta T_e}{\delta z} \right) + \\ & + \frac{J^2}{\sigma} + \sum Q_e + \sum L_e \end{aligned} \quad (8)$$

där  $I$  är inklinationen hos det magnetiska fältet och  $K_e$  är en konduktivitetsfaktor.

Den första termen är termisk uppvärmning, den andra är kinetisk uppvärmning, den tredje elektromagnetisk uppvärmning, den fjärde konduktiv uppvärmning och den femte neutralgas-uppvärmning (Joule-Thompson effekt). De två sista termerna är extern uppvärmning resp. avkylning.

Om den termiska ledningsförmågan,  $\sigma$ , är mycket större än strömmen,  $J$ , vilket nästan alltid är fallet, så är strömledningsförmågan mycket liten vilket ger:

$$J \approx 0 \quad (9)$$

$$(9) \text{ i } (8) \Rightarrow \frac{3}{2} n_e k \frac{\delta T_e}{\delta t} = \sin^2 I \frac{\delta}{\delta z} \left( K_e \frac{\delta T_e}{\delta z} \right) + \sum Q_e + \sum L_e \quad (10)$$

$$I \approx 90^\circ \Rightarrow \sin^2 I = 1 \text{ längs med de magnetiska fältlinjerna} \quad (11)$$

Konduktivitetsfaktorn,  $K_e$ , fås som (efter Rees):

$$K_e = \frac{5}{2} \frac{k^2 T_e n_e}{m_e v_e} \quad (12)$$

$$(11) \text{ och } (12) \text{ i } (10) \Rightarrow \frac{3}{2} n_e k \frac{\delta T_e}{\delta t} = \frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\delta}{\delta z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\delta T_e}{\delta z} \right) + \sum Q_e + \sum L_e \quad (13)$$

Om termisk ledning från vaken, magnetosvansen, dominerar så råder en relativ jämvikt vilket ger att elektrontemperaturen,  $T_e$ , fås ur:

$$0 = \frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\delta}{\delta z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\delta T_e}{\delta z} \right) + \sum Q_e + \sum L_e \quad (14)$$

Detta är energitransportekvationen för ett konduktivt idealt plasma.

I Titans atmosfär kan elektronfrekvensen delas upp i elektron-jon kollisioner och elektron-kväve kollisioner (efter Banks och Kockarts):

$$v_e = v_{e,i} + v_{e,N_2} \quad (15)$$

$$\begin{cases} v_{e,i} = 54,5 \times \frac{n_e}{T_e^{3/2}} \\ v_{e,N_2} = 2,33 \times 10^{-11} n_{N_2} [1 - 1,2 \times 10^{-4} T_e] T_e \end{cases} \quad (16)$$

$$(16) \text{ i } (15) \Rightarrow v_e = 54,5 \times \frac{n_e}{T_e^{3/2}} + 2,33 \times 10^{-11} n_{N_2} [1 - 1,2 \times 10^{-4} T_e] T_e \quad (17)$$

## 2.2.1 Förluskällor

Samtliga förluskällor innehåller nästan uteslutande bidrag från kväve, ca 90-95 viktprocent i atmosfären, och metan, ca 2-8 procent:

$$\sum L_e = \sum L_{e|N_2} + \sum L_{e|CH_4} \quad (18)$$

Avkylningen kan delas upp i rotationsdel, vibrationsdel och kollisionsdel:

$$\sum L_e = \sum L_{e,rot} + \sum L_{e,vib} + \sum L_{e,koll} \quad (19)$$

De enskilda källorna redovisas nedan (efter Banks och Kockarts):

$$L_{e,rot|N_2} = -2 \times 10^{-14} n_e n_{N_2} \frac{T_e - T_n}{\sqrt{T_e}} \left\{ eVcm^{-3}s^{-1} \right\} \quad (20)$$

$$L_{e,vib|N_2} = -1,3 \times 10^{-4} n_e n_{N_2} \left[ 1 - e^{-3200 \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_n} \right)} \right] A \left\{ eVcm^{-3}s^{-1} \right\} \quad (21a)$$

$$\text{där } A = \begin{cases} 5,715 \times 10^{-8} e^{-3352,6/T_e} & T_e < 1000K \\ 2 \times 10^{-7} e^{-4605,2/T_e} & \text{för } 1000K \leq T_e < 2000K \\ 2,53 \times 10^{-6} \sqrt{T_e} e^{-17620/T_e} & T_e \geq 2000K \end{cases} \quad (21b)$$

$$L_{e,koll|N_2} = -1,2 \times 10^{-19} n_e n_{N_2} \left[ 1 - 1,2 \times 10^{-4} T_e \right] T_e (T_e - T_n) \left\{ eVcm^{-3}s^{-1} \right\} \quad (22)$$

$L_{e|CH_4}$  finns samtliga som bilder och förlustandelar i Gan och Cravens.

## 2.2.2 Uppvärmning

Det finns tre möjliga orsaker till extern uppvärmning i en jonosfär. Dessa är fotojonisation, kollisionsuppvärmning (impact-heating) och kemisk uppvärmning. I Titans jonosfär är det sannolikt bara den första som är relevant även om impact-heating kan ha viss betydelse för sekundära elektroner.

Fotojonisation sker när energirik strålning, vissa typer av UV-strålning samt kosmisk och gammastrålning, med intensiteten  $I_\infty$  träffar ett tunt skikt i atmosfären,  $dz$ , med infallsvinkeln  $\chi$  och sedan reflekteras ut igen. Både kosmiska och gammastrålning är förmodligen oväsentliga vad det gäller Titan. I fall energin i den inkommande strålningen är större än bildningsenergin hos den molekyl den stöter på sker en sönderdelning enligt formeln nedan:



Summan är alltså att en extra elektron bildas. Denna kan vara en sekundär elektron; en s.k. Augerelektron, en elektron utsänd från ett av de inre elektronskalen genom strålningslös övergång från ett högt exciterat tillstånd till ett lägre energitillstånd, eller en termisk elektron. I de två första fallen kan den nya elektronen, om den är tillräckligt energirik, sönderdela nya molekyler. I det sista fallet sker uppvärmningen.

I skiktet  $dz$  antas plan vågutbredning i riktning  $\hat{s} = 1/(\cos \chi)\hat{y}$ , endast ett molekylslag, ingen transport, konstant neutraltemperatur,  $T_n$  och inga tidsvariationer ( $\delta t \rightarrow 0$ ).

Då blir intensitetsförlusterna i skiktet med cross-section  $\sigma_{abs}$  (efter Chamberlain och Hunten samt Banks och Kockarts):

$$-\frac{dI}{ds} = \sigma_{abs} n_n I \Rightarrow \frac{dI}{I} = -\frac{\sigma_{abs}}{\cos \chi} n_n dz \Rightarrow [\ln I]_{I_\infty}^I = -\frac{\sigma_{abs}}{\cos \chi} \int_z^\infty n_n dz \quad (24)$$

Neutralt densiteten,  $n_n$ , kan beskrivas enligt formeln nedan:

$$n_n = n_0 e^{-\frac{z}{H}} \quad (25a)$$

$$\text{där } H \text{ är skalhöjden} \left( H = \frac{k_B T}{mg} \right) \quad (25b)$$

$$(25a) \text{ i } (24) \Rightarrow I(z) = I_\infty e^{-\left[ \frac{\sigma_{abs} n_0 H}{\cos \chi} e^{-\left(\frac{z}{H}\right)} \right]} \quad (26)$$

Ur detta kan man beräkna fotojonisationsgraden:

$$q_i = \sigma_i n_n I \quad (27)$$

Plasmats densitet ges av kontinuitetsekvationen:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \underline{v}_e) = q_i - l \quad (28)$$

Via rekombination fås om quasineutralitet ( $n_{XY^+} \approx n_e$ ) råder:

$$XY^+ + e^- \rightarrow X + Y \Rightarrow l = \alpha n_{XY^+} n_e \approx \alpha n_e^2 \quad (29)$$

där  $\alpha$  är en rekombinationsfaktor.

Enligt de föresättningar som råder ges (efter Chamberlain och Hunten samt Banks och Kockarts):

$$\begin{cases} v_e = 0 \\ \partial t \rightarrow 0 \end{cases} \Rightarrow l = q_i \Leftrightarrow \alpha n_e^2 = \sigma_i n_n I(z) \Rightarrow n_e^2 = \frac{\sigma_i n_n I(z)}{\alpha} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} (26) \text{ i } (30) &\Rightarrow n_e^2 = \frac{\sigma_i n_0}{\alpha} e^{\left(-\frac{z}{H}\right)} I_\infty e^{\left[\frac{\sigma_{abs} n_0 H e^{\left(-\frac{z}{H}\right)}}{\cos \chi}\right]} \Rightarrow \\ &\Rightarrow n_e = \sqrt{\frac{\sigma_i n_0 I_\infty}{\alpha}} e^{\left[\frac{z}{2H} - \frac{\sigma_{abs} H n_0}{2 \cos \chi} e^{\left(-\frac{z}{H}\right)}\right]} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\frac{n_0 H}{\cos \chi} = e^{\left(\frac{z_m - z}{H}\right)} \quad (32)$$

där  $z_m$  är den höjd  $z$  där  $\cos \chi = 1$

$$(32) \text{ och } (27) \text{ i } (31) \Rightarrow n_e = \sqrt{\frac{q_m}{\alpha}} e^{\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{z - z_m}{H} - \frac{1}{\cos \chi} e^{\left(-\frac{z - z_m}{H}\right)} \right] \right\}} \quad (33)$$

Denna formel har stora likheter med en s.k. Chapman-funktion (efter Kivelson och Russell):

$$Q = Q_m e^{\left[ 1 + \frac{h_m - h}{H_n} - e^{\left(\frac{h_m - h}{H_n}\right)} \right]} \quad (34)$$

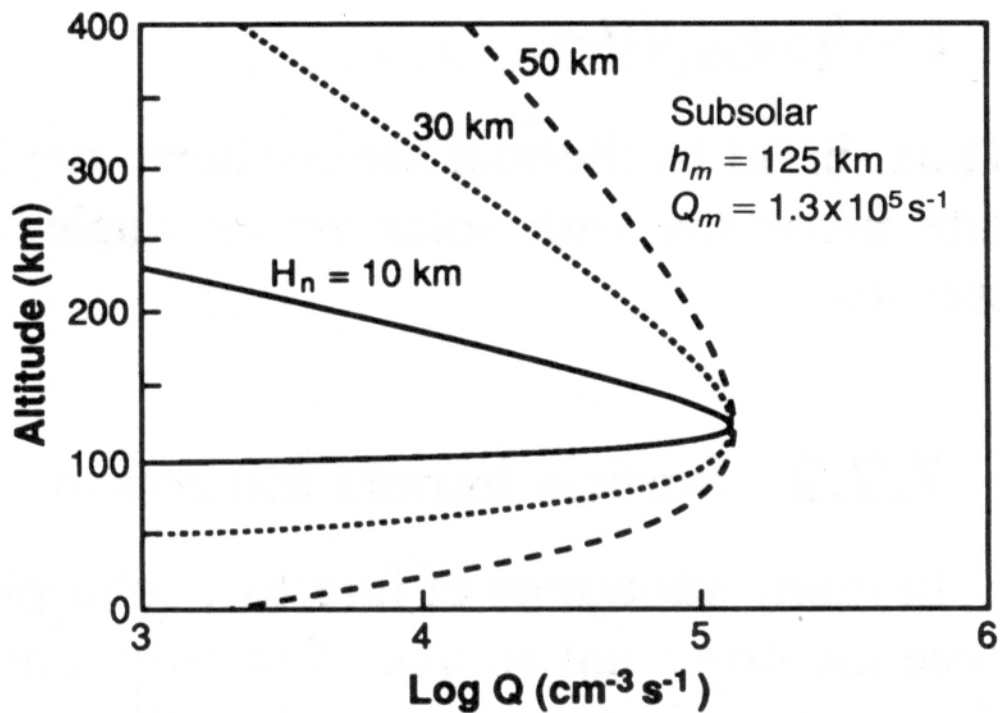
där  $Q$  är jonisationsgraden (jonproduktionsgraden),  $Q_m$  är produktionsmaximum,  $h_m$  är höjden för produktionsmaximum och  $H_n$  är skalhöjden.

För en sådan funktion bildas ett s.k. Chapman-lager. Avbildningen av ett Chapman-lager visas i bild 11 för  $\chi=0^\circ$  och olika värden på skalhöjden  $H_n$ . På Jorden verkar atmosfären uppbyggd av flera, alltid minst två men ibland så många som fyra, Chapman-lager (se bild 12), kallade  $F_2$ -,  $F_1$ -, E- resp. D-lagret uppifrån och ner. Oftast är det D-lagret som är svårast att se medan  $F_2$ - och E-lagren är de tydligaste och alltid förekommande.

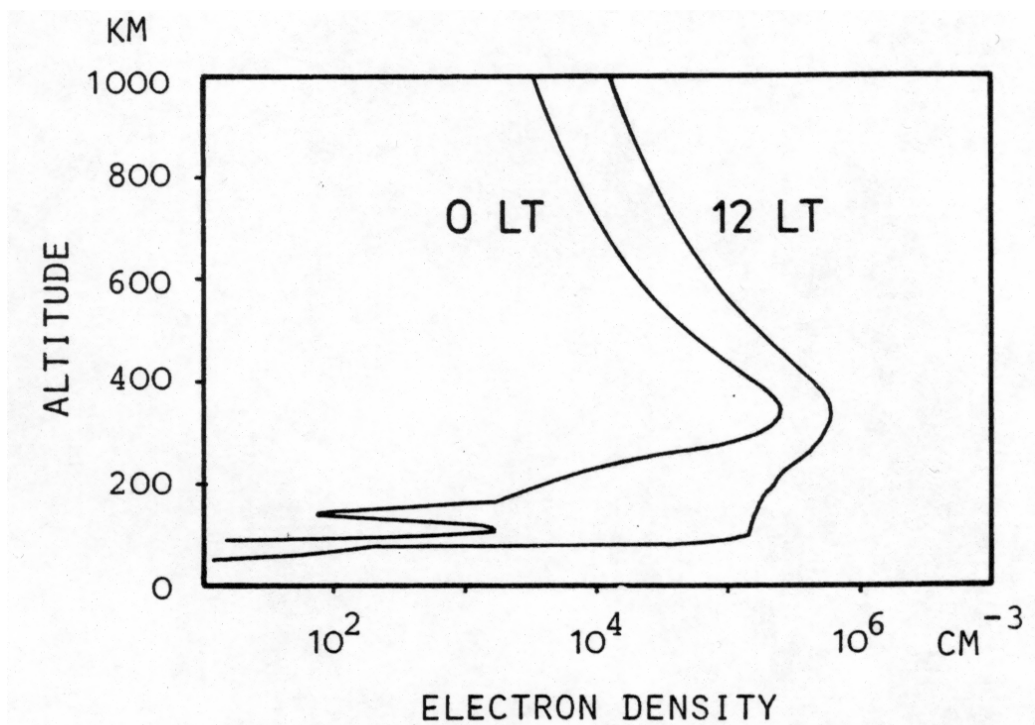
Kollisionsuppvärmning beskriver ungefär samma processer som fotojonisation men istället för energirik strålning påverkas atmosfären här av energirika elektroner från rymden, magnetfältselektroner, solvindselektroner m.m., enligt nedan:







**Bild 11:** Bild av ett Chapman-lager (källa: Kivelson och Russell)  
 OBS! Enheten på  $Q_m$  bör vara  $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  (fel i bilden).



**Bild 12:** Elektrondensiteten som funktion av höjden (källa: Köhnlein)

För 0 LT syns tre lager: F<sub>2</sub> (översta utbuktningen), F<sub>1</sub> (knäet i figuren) och E (den undre utbuktningen).

För 12 LT syns tre lager: F<sub>2</sub> (översta utbuktningen), E (det tydliga knäet) och D (knäet i den nedre delen av kurvan). En antydning av ett F<sub>1</sub>-lager kan skönjas i den övre delen av kurvan (en svag utbuktning nära 200 km).

Kemisk uppvärmning kan ses som ett direkt efterled till de båda andra processerna. Om en kemisk reaktion äger rum under påverkan av antingen en elektron eller en positiv eller negativ jon där nya reaktionsprodukter bildas kommer det antingen att avges eller upptas energi från omgivningen. I de flesta fall sker enorma mängder reaktioner samtidigt som det totala värmeflödet är ungefär lika med noll.

För en närmare beskrivning av kvävet's reaktioner se Nagy och Cravens. För detaljerade beskrivningar av vätekarbonaternas joner och reaktionsvägar, varav de flesta också innehåller delar av kvävet's reaktioner, se Fox och Yelle, Keller et. al. samt Capone et. al. För en fullständig beskrivning av de flesta fotokemiska reaktioner på Titan se Toublanc et. al., Yung et. al. samt Ip.

## 3 Metod

Detta arbete innehåller i stort sett tre olika moment: inläsning och modifiering av data från Langmuirproben; bearbetning och plottning av inläst data med MATLAB samt kontroll och jämförelser med data från RPWS och INMS.

### 3.1 Inläsning av data

De mätningar som görs av Langmuirproben samlas in och skickas tillsammans med andra data från Cassini som radiovågor från High-Gain Antenna till ett nätverk, DSN (Deep Space Network), av mottagarstationer bestående av parabolantennor på tre platser på Jorden (Canberra, Madrid och Goldstone i Texas) beroende på vilken som står bäst i förhållande till Saturnus. Nätverket skickar vidare informationen till JPL inom NASA som sedan analyserar datat och skickar ut delar till olika PI (Primary Investigators) –grupper runt om i världen. För RPWS är detta en grupp vid University of Iowa. Dessa PI-grupper skickar i sin tur vidare informationen till olika Co-I (Co-Investigators) –grupper som utför själva bearbetningarna och analyserna. För Langmuirproben är detta Institutet för rymdfysik (IRF) i Uppsala under ledning av Jan-Erik Wahlund. Denna informationskedja tar 84 minuter från Cassini till DSN, ungefär 30 minuter från DSN till JPL, från några minuter till dagar från JPL till PI-grupperna och ytterligare från ett fåtal minuter upp till dagar från PI-grupperna till Co-I-grupperna. Totalt tar processen från Cassini till IRF mellan en dag och en vecka.

På IRF kommer datat först till ett nätverk, ISDAT, som är C<sup>++</sup>-baserat. Informationen lagras sedan på ett lokalt nätverk och via en databashanterare (disco:33) kan data börja användas. De data som kommer från Cassini är inte färdiga för analys utan måste behandlas innan forskarna kan göra sina analyser. Detta har gjorts med MATLAB. De går i huvudsak ut på att ta in rådata och utifrån detta bearbeta dessa till olika parametrar, t.ex. temperaturer, magnetfält, elektrondensiteter, jonmassor och potentialer. Utifrån dessa parametrar görs sedan analyserna.

### 3.2 MATLAB-programmering

Eftersom inläst data skapas som olika typer av MATLAB-filer är det naturligt att använda detta för analyserna. Dessutom är MATLAB fördelaktigt ur en annan synvinkel, nämligen att det slags analys som gjorts här kräver någon sorts matematikbaserat programmeringsverktyg och då är MATLAB lämpligt.

Själva programmeringen delas upp i tre olika program för varje förbiflygning samt tre extra program för jämförelser, alla skrivna på engelska för att alla ska kunna använda dem. Huvudprogrammet Energy.m inkl. JWEgrad.m är ett program som tar in modifierad indata och utifrån dessa bearbetade data skapar olika parametrar av betydelse, t.ex. avkylning och konduktiv uppvärmning. De två andra programmen för alla banor, Plotall.m och Plotboth.m, är program för grafisk visualisering (plottning) av olika parametrar, temperatur, elektrontäthet, frekvens, avkylning och konduktiv uppvärmning, gentemot höjden över Titans yta (altituden). Det andra av programmen delar upp parametrarna i inflygning och utflygning. De tre extra programmen, Plot\_TaTb.m, Plot\_TaT5.m och Plot\_comp.m, är till för jämförelser av förflygning  $T_A$  med resp.  $T_B$ ,  $T_5$  och reducerade  $T_A$ -värden.

Dessutom skapades även en teoretiskt jämviktskonstant,  $\tau$ , den tid det tar för atmosfären att under rådande förhållanden för temperatur och tryck återställa jämvikten. Dessa beräkningar utgick från den förenklade energiekvationen (ekv. 13) och under antagande att  $\sum Q_e = 0$ :

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_e k \frac{\partial T_e}{\partial t} &= \frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum L_e \Rightarrow \frac{\partial t}{\partial T_e} = \frac{3}{2} n_e k \frac{1}{\frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum L_e} \Rightarrow \\ \Rightarrow \partial t = \Delta t &= \frac{3}{2} n_e k \frac{1}{\frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum L_e} \Delta T_e \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \tau = \Delta t &= \frac{2}{3} k \frac{n_e}{\frac{5}{2} \frac{k^2}{m_e} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{n_e T_e}{v_e} \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum L_e} \Delta T \end{aligned} \quad (36)$$

Denna beräkning har gjorts genom MATLAB-programmering. Ett program (Const.m) tar in indata och skapar utifrån dessa enligt steg 4, det sista steget, i formeln ovan den teoretiska jämviktskonstanten. I samma program finns också en del som plottar jämviktskonstanten gentemot höjden.

För en mer detaljerad beskrivning av huvudprogrammet som enbart gäller för  $T_A$ , övriga är praktiskt taget likadana men har andra indata, se nedan. För detaljerade beskrivningar av plot-programmen se bilaga 1. För detaljerade beskrivningar av de jämförande programmen för  $T_A$  se bilaga 2. För en detaljerad beskrivning av programmet som behandlar jämviktskonstanten för  $T_5$  se bilaga 3.

```
%%%%%%%%%%%%%%
%
% Energy.m
%
% Script that reads Cassini RPWS LP data and calculates various
% electron energy transport terms for Titan.
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%%%%%

% Read data.
load Ta

% Prepare data
Te = 11594.*real( Te1 ); % K
Ne = real( Ne3 ); % cm(-3)
r = (Rt-1) .* R_Titan; % km

% Some constants
k_Boltz = 1.38e-23; % J/K
mN2 = 2*14*mH; % kg

%%% Create Neutral Atmosphere (Taken from INMS Ta data)
```

```

%%%%%%%%%
% Nitrogen
r0 = 1265; % km
N0 = 2.7e8; % cm(-3)
C1 = 26356;
N_N2 = N0.*exp( -C1*(1/r0-1./r) ); % cm(-3)

% Methane
r0 = 1200; % km
N0 = 2e7; % cm(-3)
C2 = 15288;
N_CH4 = N0.*exp( -C2*(1/r0-1./r) ); % cm(-3)

% Exosphere Temperature
Tn = 149; % K

%%% Calculate Cooling Terms
%%%%%%%%%
% Nitrogen Rotation
L_N2_rot = 2e-14 .* Ne .* N_N2 .* (Te - Tn)/sqrt(Te); % eVcm(-3)s(-1)

% Nitrogen Vibration
C3 = (1 - exp( 3200.*(1./Te - 1/Tn) ));

A = zeros( size(Te) );
ind1 = find( Te < 1000 );
ind2 = find( Te >= 1000 & Te < 2000 );
ind3 = find( Te >= 2000 );
A(ind1) = 5.715e-8 .* exp( -(3352.6./Te(ind1)) );
A(ind2) = 2e-7 .* exp( -(4605.2./Te(ind2)) );
A(ind3) = 2.53e-6 .* sqrt(Te(ind3)) .* exp( -(17620./Te(ind3)) );

L_N2_vib = 1.3e-4 .* Ne .* N_N2 .* C3 .* A; % eVcm(-3)s(-1)

% Nitrogen Electronic
C4 = (1 - 1.2e-4.*Te) .* Te .* (Te - Tn);
L_N2_col = abs( 1.2e-19 .* Ne .* N_N2 .* C4 ); % eVcm(-3)s(-1)

% Nitrogen Total (Rotation + Vibration + Electronic)
L_N2 = L_N2_rot + L_N2_vib + L_N2_col; % eVcm(-3)s(-1)

% Methane Total (Rotation + Vibration + Electronic,
% following Gan & Cravens, 1992)
load CH4.dat

L_tmp = CH4(1:41);
T_tmp = CH4(42:82);

L_Te = interp1( T_tmp, L_tmp, Te );
L_CH4 = Ne.* N_CH4 .* L_Te; % eVcm(-3)s(-1)

% Total Cooling (Methane + Nitrogen)
L_tot = L_CH4 + L_N2; % eVcm(-3)s(-1)

%%% Calculate Electron Heat Conduction
%%%%%%%%%
dTedz = JWEgrad( Te, r ) .* 1e-3; % K/m

```

```

nu_e_i = 54.5 * Ne ./ Te.^1.5; % s(-1)
nu_e_N = 2.33e-11 * N_N2 .* (1 - 1.2e-4 .* Te) .* Te; % s(-1)
nu_e = nu_e_i + nu_e_N; % s(-1)

Ke = (5/2*k_Boltz^2/me) * Ne.*Te./nu_e .* 1e6; % JK(-1)m(-1)s(-1)
Qe = Ke .* dTedz; % Jm(-2)s(-1)

Cond_SI = JWEgrad( Qe, r ) .* 1e-3; % Jm(-3)s(-1)
Cond = Cond_SI .* 1e-6 ./ qe; % eVcm(-3)s(-1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function dPdr = JWEgrad( P, r )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% JWEgrad.m
%
% P is a array of parameter values, and r is a corresponding array
% of location points.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

dr = diff( r );
dP = diff( P );

dPdr = dP ./ dr;

last = length(dPdr);
dPdr = [dPdr; dPdr(last)];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Tabell 3:** Detaljerad beskrivning av Energy.m (för T<sub>A</sub>) och JWEgrad.m

### 3.3 Kontroll

Kontrollen kan delas upp i tre olika delar. Först gjordes en enhetsanalys av förekommande parametrar, särskilt konduktionen. Dessa jämfördes med verkliga enheter och konduktionen dessutom med avkylningen som hade en enhet i formeln. Om enheterna inte stämde gjordes kontrollerades formeln för parametern och eventuellt reviderades. Sedan gjordes en ny enhetskontroll och när alla enheter stämde fortsatte kontrollen.

Här nedan följer enhetskontrollen för konduktionen vilket även innehåller en del andra parametrar:

$$T_e (= T_e) = [K] \tag{37}$$

$$N_e (= n_e) = [cm^{-3}] \tag{38}$$

$$\nu_e (= \nu_e) = [Hz] = [s^{-1}] \tag{39}$$

$$dT_{edz} \left( = \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) = [K / km] = [Kkm^{-1}] = 10^{-3} [Km^{-1}] \tag{40}$$

$$k\_Boltz (= k_B) = [J / K] = [JK^{-1}] \quad (41)$$

$$m_e (= m_e) = [kg] \quad (42)$$

$$\begin{aligned} Ke (= K_e) &= \frac{5}{2} \frac{k^2 T_e n_e}{m_e v_e} = \frac{5}{2} [JK^{-1}]^2 \left[ \frac{1}{kg} \right] \left[ \frac{Kcm^{-3}}{s^{-1}} \right] = \frac{5}{2} [J^2 K^{-2} kg^{-1} Kcm^{-3} s] = \\ &= \frac{5}{2} [J^2 K^{-1} kg^{-1} cm^{-3} s] = \frac{5}{2} \times 10^3 [J^2 K^{-1} kg^{-1} m^{-3} s] \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} Qe \left( = K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) &= \frac{5}{2} \times 10^3 [J^2 K^{-1} kg^{-1} m^{-3} s] \times 10^{-3} [Km^{-1}] = \frac{5}{2} [J^2 K^{-1} kg^{-1} m^{-3} s Km^{-1}] = \\ &= \frac{5}{2} [J^2 kg^{-1} m^{-4} s] \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} Cond\_SI \left( = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right)_{SI} \right) &= \left[ \frac{1}{km} \right] \frac{5}{2} [J^2 kg^{-1} m^{-4} s] = \frac{5}{2} [km^{-1}] [J^2 kg^{-1} m^{-4} s] = \\ &= \frac{5}{2} \times 10^{-3} [m^{-1}] [J^2 kg^{-1} m^{-4} s] = \frac{5}{2} \times 10^{-3} [J^2 kg^{-1} m^{-5} s] \end{aligned} \quad (45)$$

$$[J] = [Nm] = [kgm / s^2] [m] = [kgms^{-2}m] = [kgm^2 s^{-2}] \quad (46)$$

$$\begin{aligned} (46) \text{ i } (45) \Rightarrow Cond\_SI &= \frac{5}{2} \times 10^{-3} [J] [kgm^2 s^{-2}] [kg^{-1} m^{-5} s] = \\ &= \frac{5}{2} \times 10^{-3} [Jkgm^2 s^{-2} kg^{-1} m^{-5} s] = \frac{5}{2} \times 10^{-3} [Jm^{-3} s^{-1}] \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} Cond \left( = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) \right) &= \frac{5}{2} \times 10^{-3} \times \frac{1}{1,602 \times 10^{-19}} \left[ \frac{eV}{J} \right] [Jm^{-3} s^{-1}] \approx \\ &\approx 1,560 \times 10^{16} [eVJ^{-1} Jm^{-3} s^{-1}] = 1,560 * 10^{16} [eVm^{-3} s^{-1}] = 1,560 \times 10^{16} \times 10^{-6} [eVcm^{-3} s^{-1}] = \\ &= 1,560 \times 10^{10} [eVcm^{-3} s^{-1}] \end{aligned} \quad (48)$$

$$L\_tot (= \sum L_e) = [eVcm^{-3} s^{-1}] \text{ (enligt Banks och Kockarts samt Gan och Cravens)} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_e k \frac{\delta T_e}{\delta t} &= \frac{3}{2} [cm^{-3}] [JK^{-1}] \left[ \frac{K}{s} \right] = \frac{3}{2} [cm^{-3} JK^{-1} Ks^{-1}] = \frac{3}{2} \times \frac{1}{1,602 \times 10^{-19}} \left[ \frac{eV}{J} \right] [cm^{-3} Js^{-1}] \approx \\ &\approx 9,362 \times 10^{18} [eVJ^{-1} cm^{-3} Js^{-1}] = 9,362 \times 10^{18} [eVcm^{-3} s^{-1}] \end{aligned} \quad (50)$$

Som synes fås samma enhet på de tre sista termerna, konduktiv uppvärmning, total avkylning resp. elektronenergi. Dock skiljer sig faktorerna framför vilket beror dels på inducerade element (5/2 resp. 3/2) och dels på omvandlingar (km–m, cm<sup>-3</sup>–m<sup>-3</sup> och J–eV) men dessa faktorer borde inte ha någon inverkan på enheternas sanningsvärde. Teorin stämmer alltså, i alla fall enhetsmässigt.

Men allt kan inte kontrolleras med enhetsanalys, vilket är tydligt vid analys av frekvens och avkylning enligt nedan:

$$\nu_{e,i} (= \nu_{e,i}) = 54,5 \times \frac{n_e}{T_e^{3/2}} = 54,5 \left[ \frac{cm^{-3}}{K^{3/2}} \right] = 54,5 \left[ cm^{-3} K^{-3/2} \right] \neq [Hz] (= [s^{-1}]) \quad (51)$$

$$\begin{aligned} L_{N2,col} (= L_{e,koll|N_2}) &= -1,2 \times 10^{-19} n_e n_{N_2} \left[ 1 - 1,2 \times 10^{-4} T_e \right] T_e (T_e - T_n) = \\ &= -1,2 \times 10^{-19} \left[ cm^{-3} \right] \left[ cm^{-3} \right] (1 - 1,2 \times 10^{-4} [K]) [K] ([K] - [K]) = \\ &= -1,2 \times 10^{-19} \left[ cm^{-3} cm^{-3} \right] (1 - 1,2 \times 10^{-4} [K]) [KK] = \\ &= -1,2 \times 10^{-19} \left[ cm^{-6} K^2 \right] (1 - 1,2 \times 10^{-4} [K]) \neq [eV cm^{-3} s^{-1}] \end{aligned} \quad (52)$$

Dessa uttryck får dock anses som vedertagna numeriska modeller och inte som absolut sanna formler. Dessa uttryck gäller inte bara i Titans atmosfär utan också i t.ex. Jordens vilket dock gör dessa uttryck till närmast vedertagna formler. Men detta får inte tolkas som att uttrycken ger en sann enhet. Enheten för frekvenser är alltid Hz (=s<sup>-1</sup>) och för avkylning i allmänhet eVcm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>, något som skiljer sig mot enheterna för de beräknade uttrycken ovan.

Nästa steg är att beräkna värden ”för hand” via MATLAB. Detta går till så att man stegvis beräknar värdet av olika parametrar för en viss mätpunkt och jämför den med det av programmet beräknade värdet. Om värdena skiljer sig åt granskas både programmet och den stegvisa beräkningen för att hitta fel. Om fel hittas åtgärdas dem.

Det beräknade värdet ger för förbiflygning T<sub>A</sub> vid en höjd av 1425 km under inflygningen värdet 17,7263 eVcm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> på konduktionen. Motsvarande värde för programmet är 17,7263 eVcm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>. Detta gör att det beräknade värdet mycket väl motsvarar det som skapas av programmet. Faktum är att alla mätpunkter ger extremt god samstämmighet med ett fel på mellan 10<sup>-11</sup> och 10<sup>-15</sup> vilket är en försvinnande liten skillnad om man jämför med de värden som skapas av programmet som har en spännvidd på mellan ca 6,2 och ca 7,1×10<sup>6</sup>, om man bortser från en felaktig punkt. Dessa uppkomna fel är att betrakta som avrundningsfel skapade av MATLAB. De värden som programmet skapar är alltid de som är lite större utom i de fall där samstämmigheten är fullständig.

Det sista steget är att kontrollera de slutgiltiga bearbetade data med data från RPWS, huvudsakligen temperatur och elektrontätheter men även radiofrekvenser, och INMS, främst jontätheter men även viss temperatur, hastigheter och jonmassor. En del av dessa parametrar används inte i programmering utan är bara en kontroll mot indata. Om fel upptäcks i några av de förkommande data kontrolleras indata och processen börjar om igen.



## 4 Resultat

Resultaten kan delas upp i tre avdelningar: resultat som fås som en följd av analyser och beräkningar av grundläggande data, resultat som fås som en följd av energiekvationen samt övriga resultat som inte direkt kan kopplas till grundläggande data eller energiekvationen.

### 4.1 Grundläggande data

Vad gäller resultat baserade på grundläggande data redovisas bara sådana som skiljer sig från det förväntade eller också presenteras resultaten för att förtydliga vissa förhållanden. I bilderna nedan (bild 13 och 14) syns de viktigaste.

För bild 13 syns ganska stabila kurvor för  $N_e$  och  $T_e$  under inbound (inflygning) medan de är tydligt mer varierande under outbound (utflygning). Liknande förhållande syns också för  $m_i$  som dessutom har en tydlig låg topp av tunga kalla joner. Dessa fenomen är inte uteslutande kopplade till bana  $T_A$  utan finns mer eller mindre tydliga för all förbiflygningar utom de tunga jonerna vilka inte existerar i  $T_B$  och är svårdefinierad i  $T_4$ .

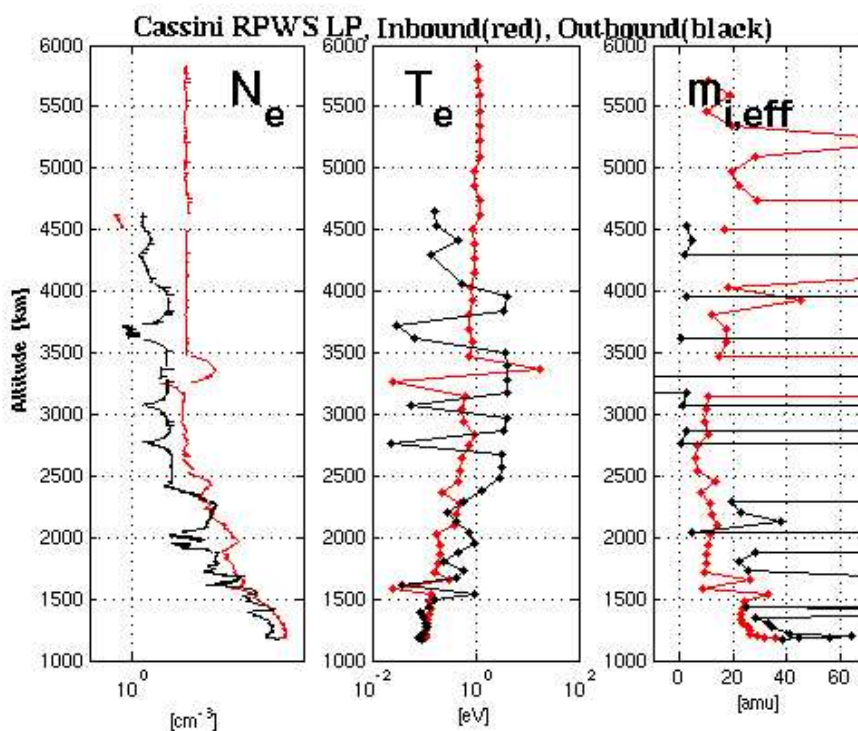


Bild 13: Huvudparametrarna för  $T_A$ .

För bild 14 syns också tydligt denna topp i jonmassan som verkar bero av elektrondensiteten. Så är inte fallet eftersom elektrondensiteten bör öka ju längre ner i atmosfären man kommer. Dessutom syns en koppling mellan jontemperatur och elektrontäthet särskilt före 15:30. Detta är lite svårare att bortförklara eftersom densitet och temperatur i en gas om vi antar att atmosfären är homogen och i relativ jämvikt står i förhållande till varandra enligt ideala gaslagen:

$$pV = nRT \quad (54)$$

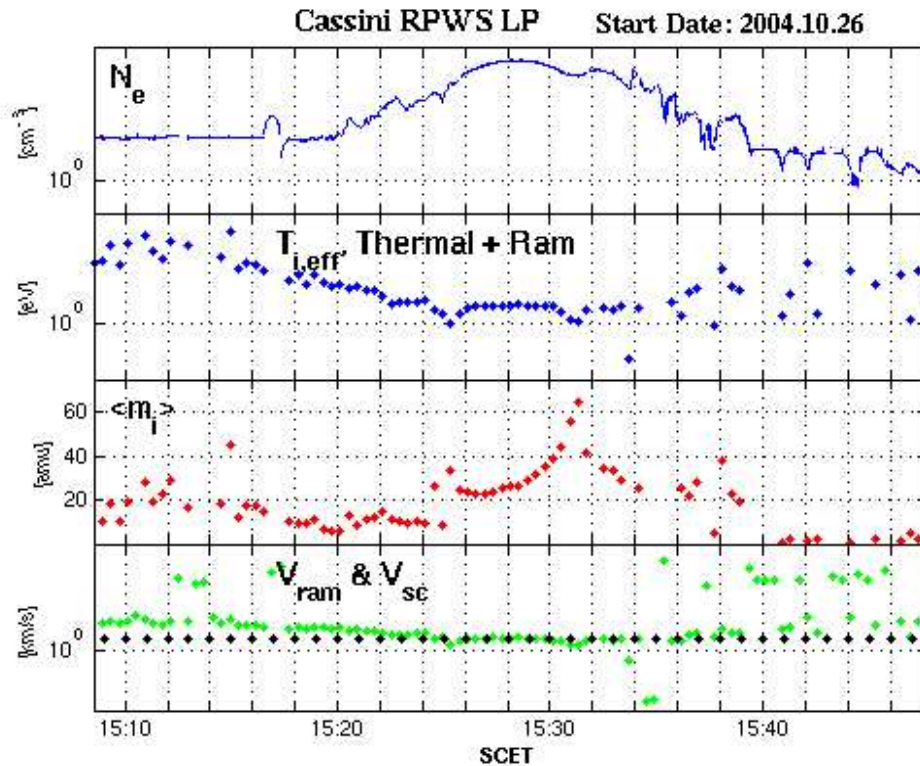


Bild 14: Jonparametrarna för  $T_A$

## 4.2 Energiekvationen

Resultat från energiekvationen redogör för temperaturer, elektrondensiteter, frekvenser, avkylning och konduktioner som fås fram av programmen för respektive förbiflygningar (se tabell 4 nedan) samt de jämförelser som gjorts mellan  $T_A$  och andra banor ( $T_B$ ) och mellan fullständiga och reducerade data för bana  $T_A$ . Orsaken till att beräkningarna av  $T_5$  inte redovisas i denna rapport är att bearbetningen av data slutfördes för sent för att de skulle kunna ingå utom för den teoretiska temperaturen.

Förbiflygning	Datum	Tid (UTC)	Altitud (km)	Anmärkning
$T_A$	2004-10-26	15:30	1 176	Beräkningar gjorda
$T_B$	2004-12-13	11:38	1 193	Beräkningar gjorda
$T_C$	2004-12-25	02:00	—	Huygens
$T_D$	2005-01-14	11:12	60 000	Ej studerad
$T_3$	2005-02-15	06:58	1 580	Kontroll
$T_4$	2005-03-31	20:05	2 408	Kontroll
$T_5$	2005-04-16	19:12	1 030	Beräkningar gjorda, resultat inte redovisade utom för jämviktskonstanten (se 4.2.6)
$T_6$	2005-08-22	08:53	3 758	Studier görs förmodligen ej
$T_7$	2005-09-07	08:01	1 025	Studier görs mest troligt
$T_8$	2005-10-28	04:04	1 451	Studier görs sannolikt
$T_9$	2005-12-26	18:59	10 409	Studier görs förmodligen ej

Förbiflygning	Datum	Tid (UTC)	Altitud (km)	Anmärkning
T10	2006-01-15	11:41	2 043	Studier tveksamma
T11	2006-02-27	08:25	1 813	Studier tveksamma
T12	2006-03-19	00:06	1 951	Studier tveksamma
T13	2006-04-30	20:58	1 855	Studier tveksamma
T14	2006-05-20	12:18	1 879	Studier tveksamma
T15	2006-02-07	09:21	1 906	Studier tveksamma
T16	22-2006-07	00:25	950	Studier görs mest troligt
T17	2006-09-07	20:13	950	Studier görs mest troligt
T18	2006-09-23	18:54	950	Studier görs mest troligt
T19	2006-10-09	17:25	950	Studier görs mest troligt
T20	2006-10-25	15:53	950	Studier görs mest troligt
T21	2006-12-12	11:37	950	Studier görs mest troligt
T22	2006-12-28	10:02	1 500	Studier görs sannolikt
T23	2007-01-13	08:36	950	Studier görs mest troligt
T24	2007-01-29	07:13	2 726	Studier görs förmodligen ej
T25	2007-02-22	03:10	950	Studier görs mest troligt
T26	2007-03-10	01:47	950	Studier görs mest troligt
T27	2007-03-26	00:21	950	Studier görs mest troligt
T28	2007-04-10	22:57	950	Studier görs mest troligt
T29	2007-04-26	21:31	950	Studier görs mest troligt
T30	2007-05-12	20:08	950	Studier görs mest troligt
T31	2007-05-28	18:51	2 426	Studier görs förmodligen ej
T32	2007-06-13	17:46	950	Studier görs mest troligt
T33	2007-06-29	17:02	1 944	Studier tveksamma
T34	2007-07-19	00:37	1 300	Studier görs sannolikt
T35	2007-08-31	06:35	3 212	Studier görs förmodligen ej
T36	2007-10-02	04:54	950	Studier görs mest troligt
T37	2007-11-19	00:58	950	Studier görs mest troligt
T38	2007-12-05	00:06	1 300	Studier görs sannolikt
T39	2007-12-20	22:53	950	Studier görs mest troligt
T40	2008-01-05	21:25	950	Studier görs mest troligt
T41	2008-02-22	17:39	950	Studier görs mest troligt
T42	2008-03-25	14:35	950	Studier görs mest troligt
T43	2008-12-05	10:10	950	Studier görs mest troligt
T44	2008-05-28	08:33	1 348	Studier görs sannolikt

**Tabell 4:** Förbiflygningarna av Titan

UTC står för Coordinated Universal Time är en vetenskaplig standardtid baserad på kvartsur med mycket stor exakthet. Detta gör att UTC måste kompenseras med extrasekunder p.g.a. oregelbundenheter i Jordens rotation.

Tiden är när Cassini befinner sig närmast Titans yta (closest approach) och detta gäller även höjden.

Värdena för banorna T6-T44 är preliminära och kan komma att ändras, likaså benämningen. Däremot är värdena för banorna T<sub>A</sub> och T<sub>B</sub> korrekta utifrån data och officiellt erkända medan för T3-T5 är höjden endast beräknade utifrån data och ingen av värden ännu bekräftade även om datumen och tiderna är korrekta.

#### 4.2.1 T<sub>A</sub>

För förbiflygning T<sub>A</sub> redovisas resultaten i bilderna nedan.

Elektrontemperaturen (se bild 15) är mellan 276 och  $2,1 \times 10^5$  K. Elektrontätheten (se bild 16) är maximalt  $4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  och minimalt  $4 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ , även om två troligen felaktiga punkter har betydligt lägre värden. Elektronfrekvenserna (se bild 17) varierar mellan  $5 \times 10^{-6}$  och  $33 \text{ s}^{-1}$ . Den totala avkylningen (se bild 18 och 20) har minvärdet  $2,3 \times 10^{-7} \text{ eVcm}^{-3}\text{s}^{-1}$  och maxvärdet  $11,4 \text{ eVcm}^{-3}\text{s}^{-1}$ , även om fristående och troligen felaktiga punkter har avsevärt lägre resp. högre värden. Konduktionen (se bild 19 och 20) uppvisar variationer mellan  $6,2 \text{ eVcm}^{-3}\text{s}^{-1}$  och  $7,1 \times 10^7 \text{ eVcm}^{-3}\text{s}^{-1}$ .

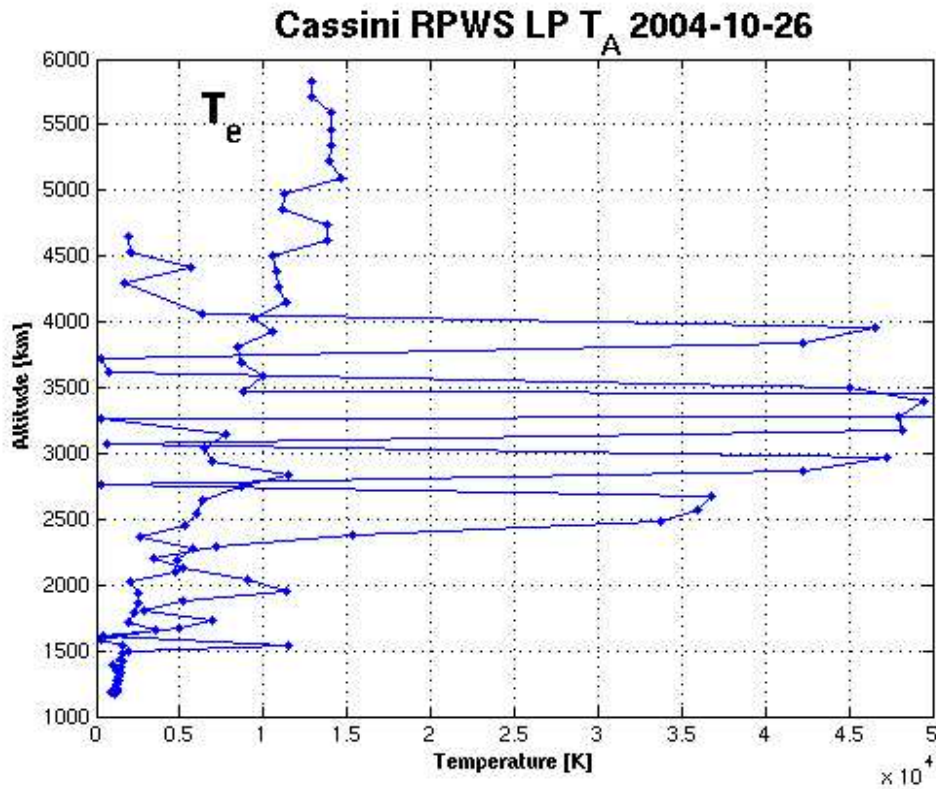


Bild 15: Temperaturen för  $T_A$

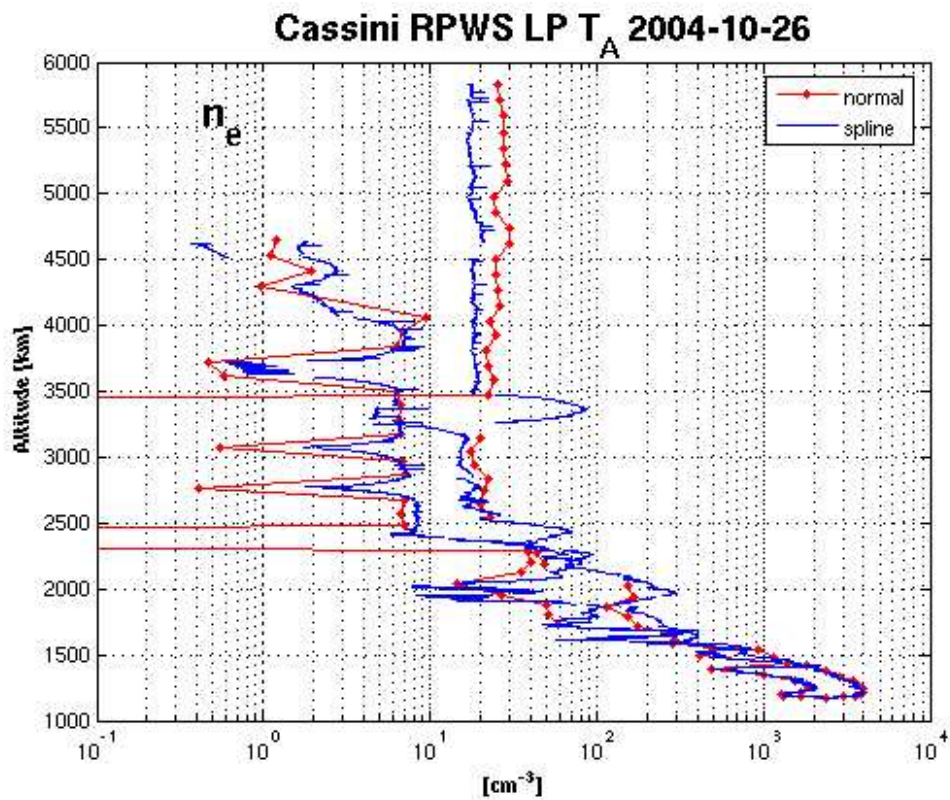


Bild 16: Elektronensiteten för T<sub>A</sub>

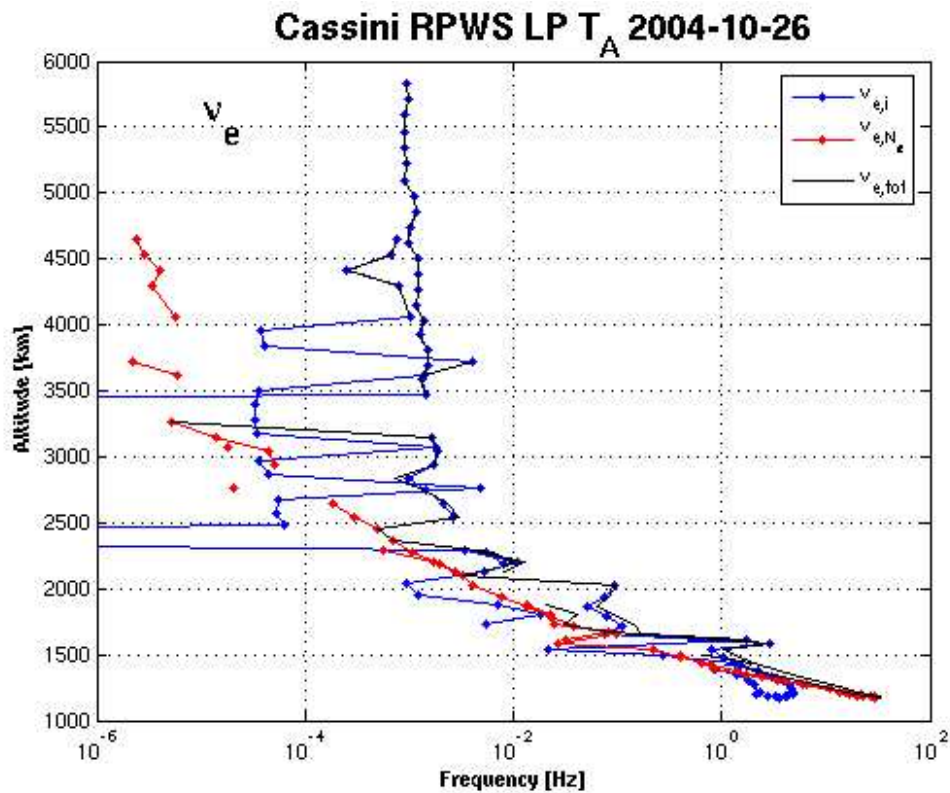


Bild 17: Elektronfrekvenser för T<sub>A</sub>



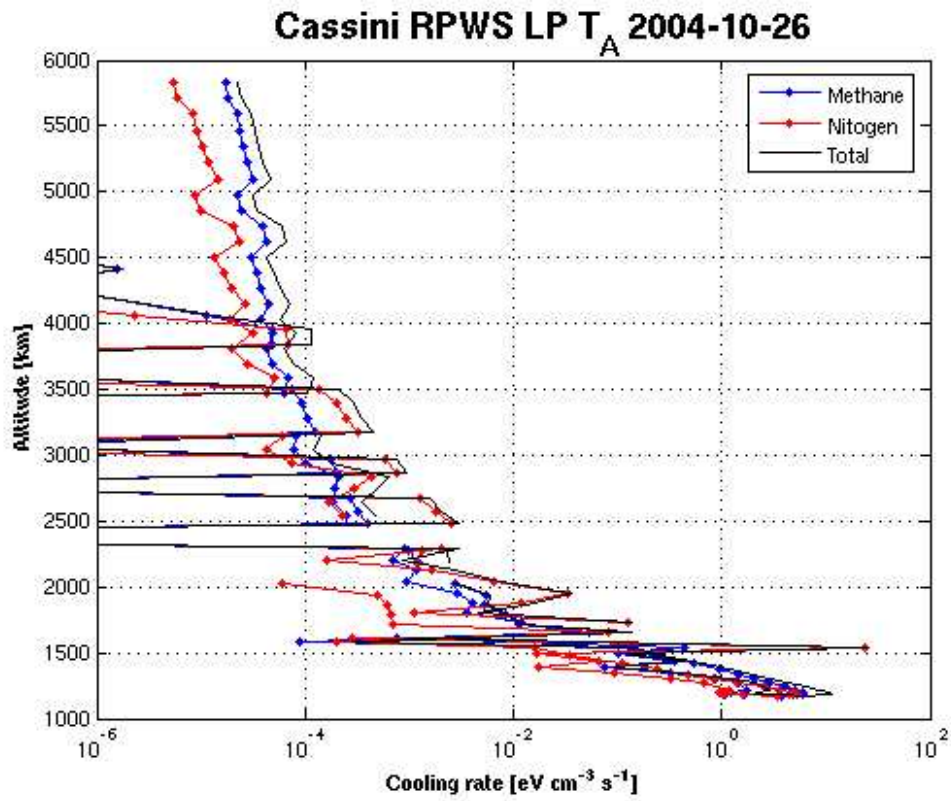


Bild 18: Avkylningen för T<sub>A</sub>

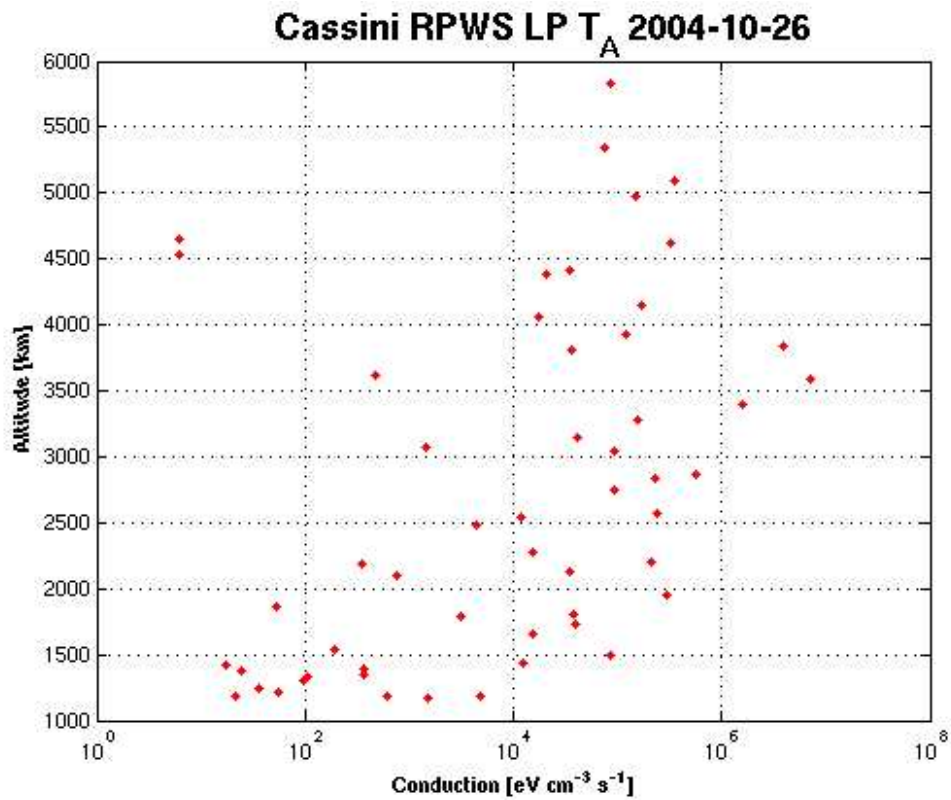


Bild 19: Konduktionen för T<sub>A</sub>

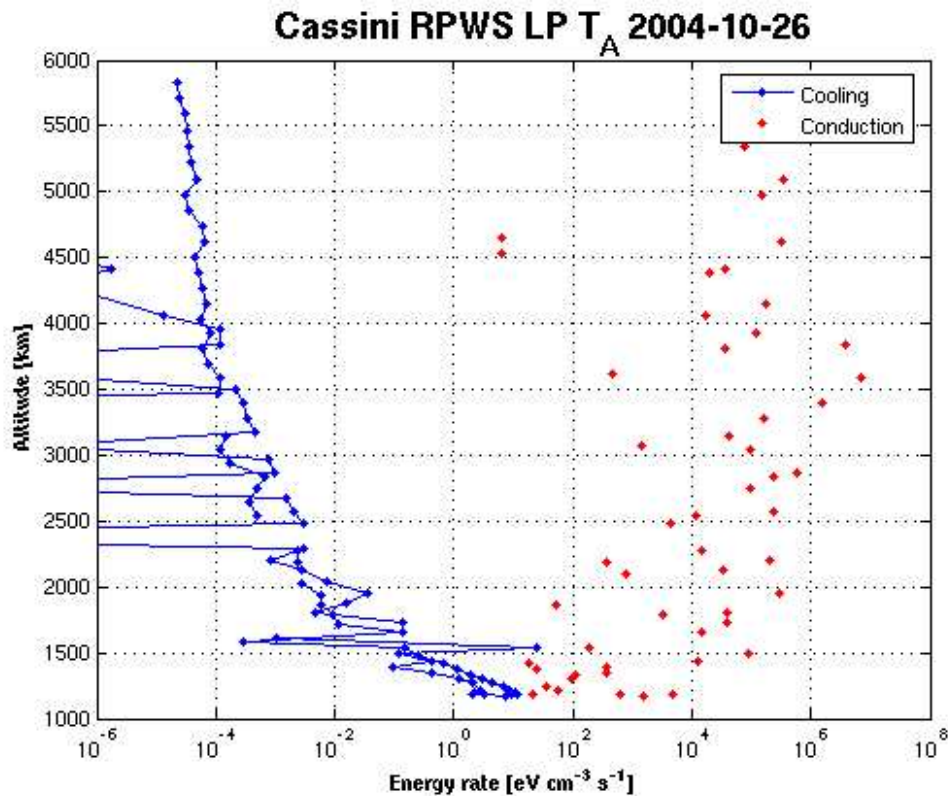


Bild 20: Energidistributionen för  $T_A$

#### 4.2.2 $T_B$

För förbiflygning  $T_B$  redovisas resultaten i bilderna nedan. I de fall där resultaten skiljer sig avsevärt anges detta. Allmänt kan sägas att  $T_B$  är ”brusigare” än  $T_A$  vilket delvis beror på att sträcker sig över ett större höjdiintervall som gör att mätpunkterna visuellt ligger tätare. Men den orsaken är sannolikt att  $T_B$  grundar sig på rådata där felaktiga mätvärden inte tagits bort.

Elektrontemperaturen (se bild 21) är mellan 116 och  $1,6 \times 10^5$  K, även om två troligen felaktiga punkter har betydligt högre värden. Elektrontätheten (se bild 22) är maximalt  $2,4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  och minimalt  $2,3 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ , även om en troligen felaktig punkt har betydligt högre värden. Båda dessa parametrar verkar för  $T_B$  ha två delar som möts för höga höjder (över 20000 km), något som för  $T_A$  inte existerar för  $T_e$  eller alltid är åtskilda för  $n_e$ .

Elektronfrekvenserna (se bild 23) varierar mellan  $3,4 \times 10^{-6}$  och  $24 \text{ s}^{-1}$ , även om två troligen felaktiga punkter har betydligt högre värden. Den totala avkylningen (se bild 24 och 26) har minvärdet  $1,6 \times 10^{-9} \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  och maxvärdet  $182 \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ , även om fristående, troligen felaktiga, punkter har avsevärt lägre värden. Konduktionen (se bild 25 och 26) uppvisar variationer mellan  $1,3 \times 10^{-3} \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  och  $4,3 \times 10^7 \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ , även om fristående, troligen felaktiga, punkter har avsevärt högre värden. Denna verkar bestå av två delar, en under 10000 km och en över denna höjd, båda med liknande tendenser nämligen att konduktionen ökar med ökande höjd. I energidistributionen (se bild 26) kan man dessutom se att avkylningen i ett flertal punkter närmar sig konduktionen även om det skiljer en faktor på åtminstone 100 gånger mellan dem.

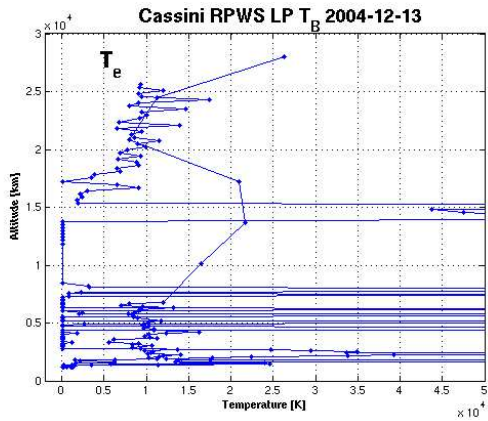


Bild 21: Temperaturer för  $T_B$

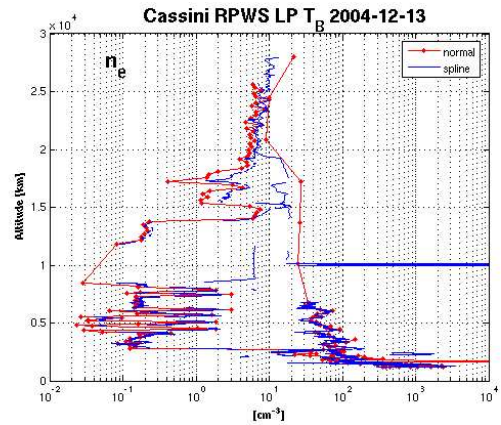


Bild 22: Elektrondensiteten för  $T_B$

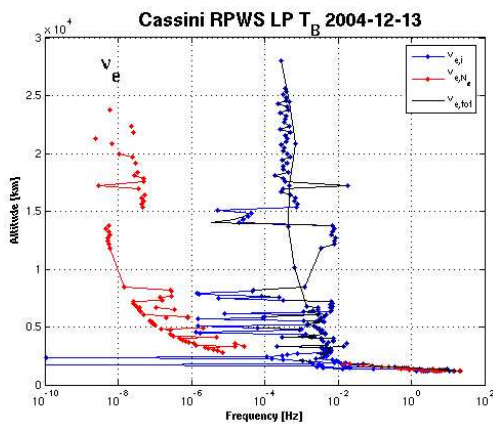


Bild 23: Frekvenser för  $T_B$

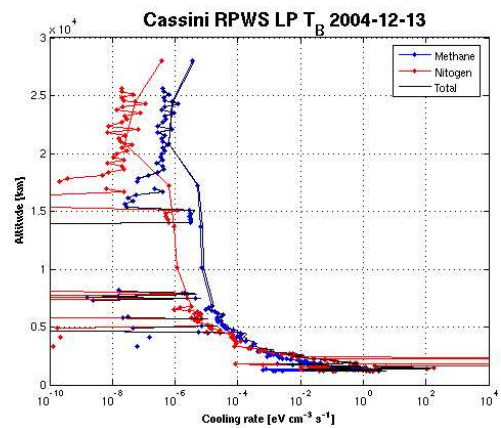


Bild 24: Avkylningen för  $T_B$

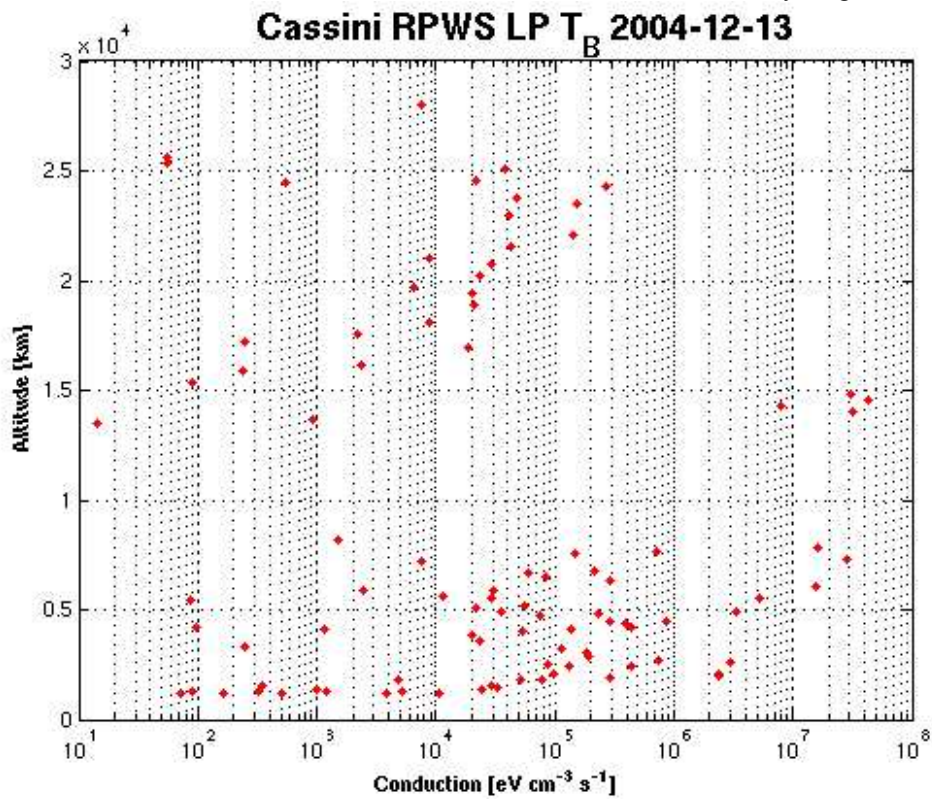


Bild 25: Konduktioner för  $T_B$



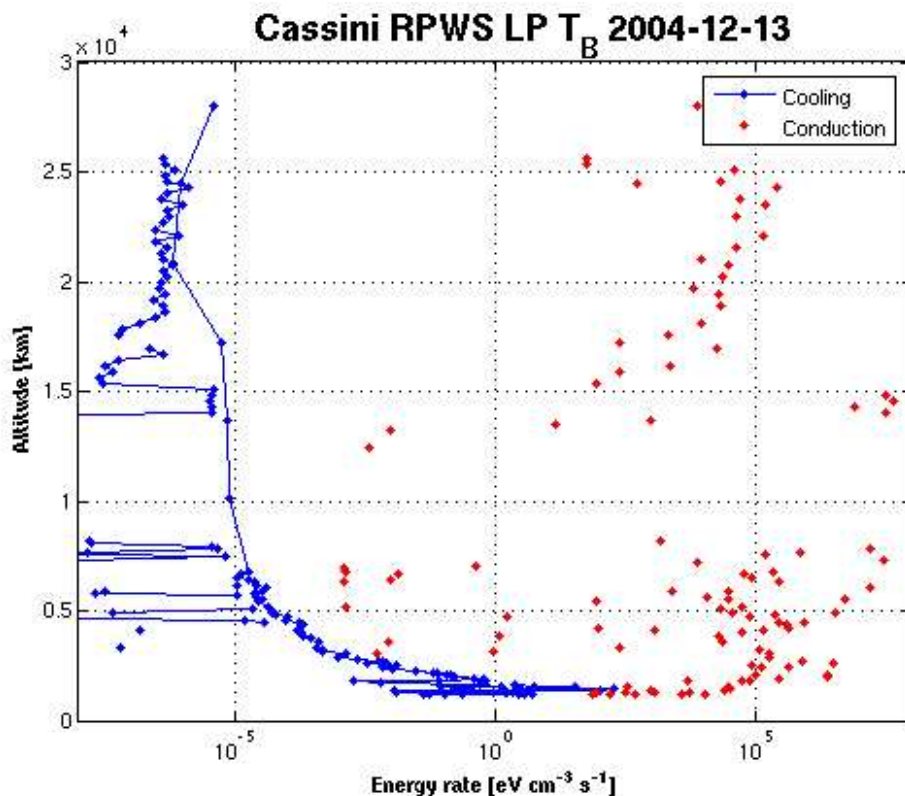


Bild 26: Energidistributionen för  $T_B$

#### 4.2.3 Övriga förbiflygningar

För förbiflygningarna T3 och T4 visas endast resultat om de skiljer sig avsevärt från  $T_A$  eller  $T_B$  eller redovisas som jämförelse. Generellt gäller att både T3 och T4 är relativt ”brusiga” och svåravlästa.

För elektrontemperaturerna (se bild 27 och 28) är skillnaderna påfallande, liksom för  $T_B$ , och varken T3 eller T4 uppvisar inte några tydliga trender även om båda har några punkter som verkar ligga efter en linje liknande  $T_A$  och  $T_B$ . För elektrondensiteterna (se bild 29 och 30) är skillnaderna ganska stora även om T3 liknar en ”brusig”  $T_B$  utom i övre delen (över 13000 km i T3) och T4 liknar  $T_A$ . För elektronfrekvenserna (se bild 31) är skillnaderna mindre och både T3 och T4 uppvisar likheter med  $T_A$  om än mycket ”brusigare” men trenderna är tydliga. Den totala avkylningen (se bild 32 och 33) har också samma tendens, de påminner om ”brusigare” varianter av  $T_A$ . T3 uppvisar dock en liten egenhet (se bild 32) som visar sig som förhöjd frekvens mellan 13000 och 17000 km. För konduktionerna (se bild 33 och 34) är de nästan avbildningar av  $T_A$ . De är dock inte lika utspridda som i  $T_A$  utan verkar ligga i tydliga energiområden, i synnerhet T3 (se bild 34), och visar inga motsvarigheter med den uppdelade fördelningen hos  $T_B$ .

För T5 redovisas inga resultat enligt skälen ovan.

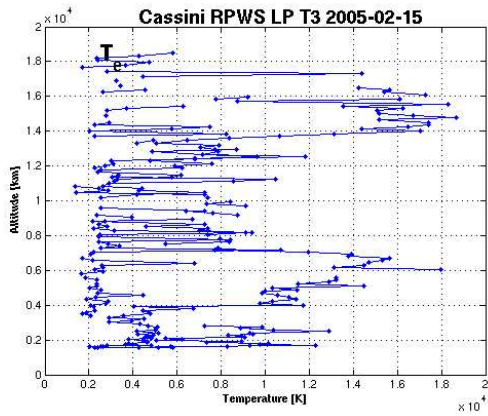


Bild 27: Temperaturen för T3

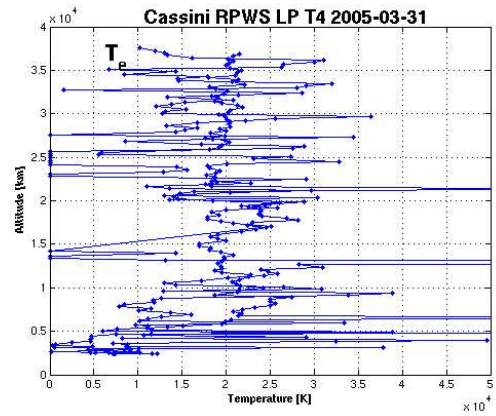


Bild 28: Temperaturen för T4

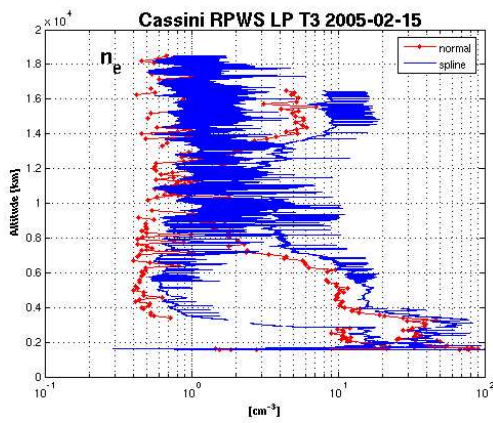


Bild 29: Elektrondensiteten för T3

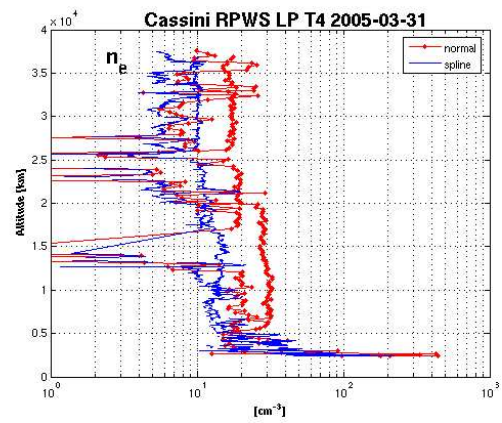


Bild 30: Elektrondensiteten för T4

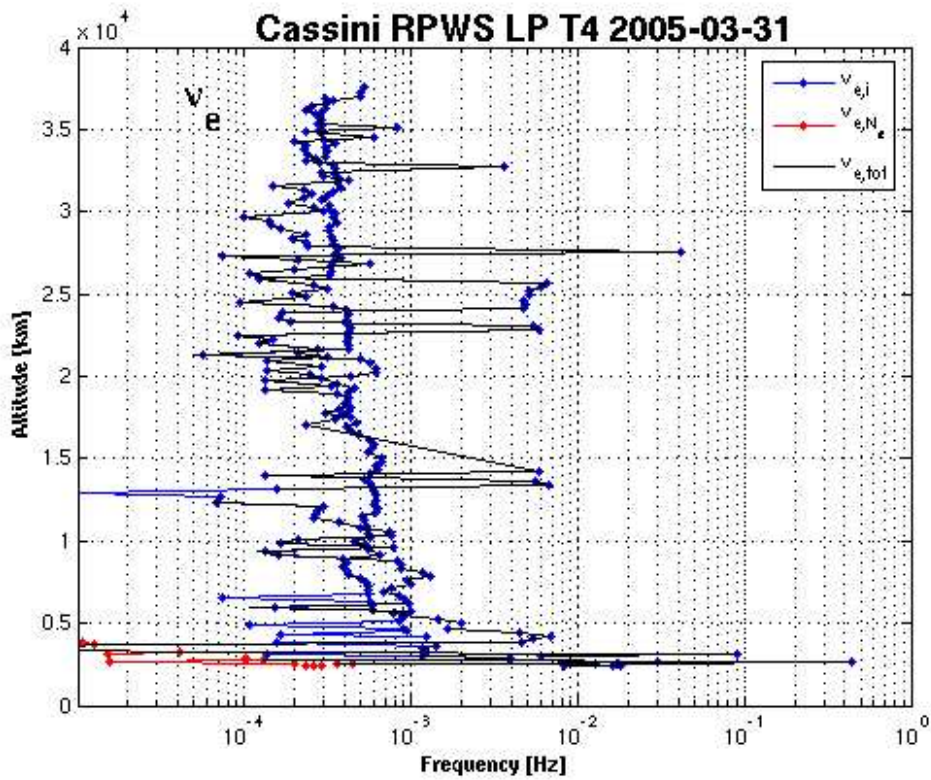


Bild 31: Elektronfrekvenser för T4

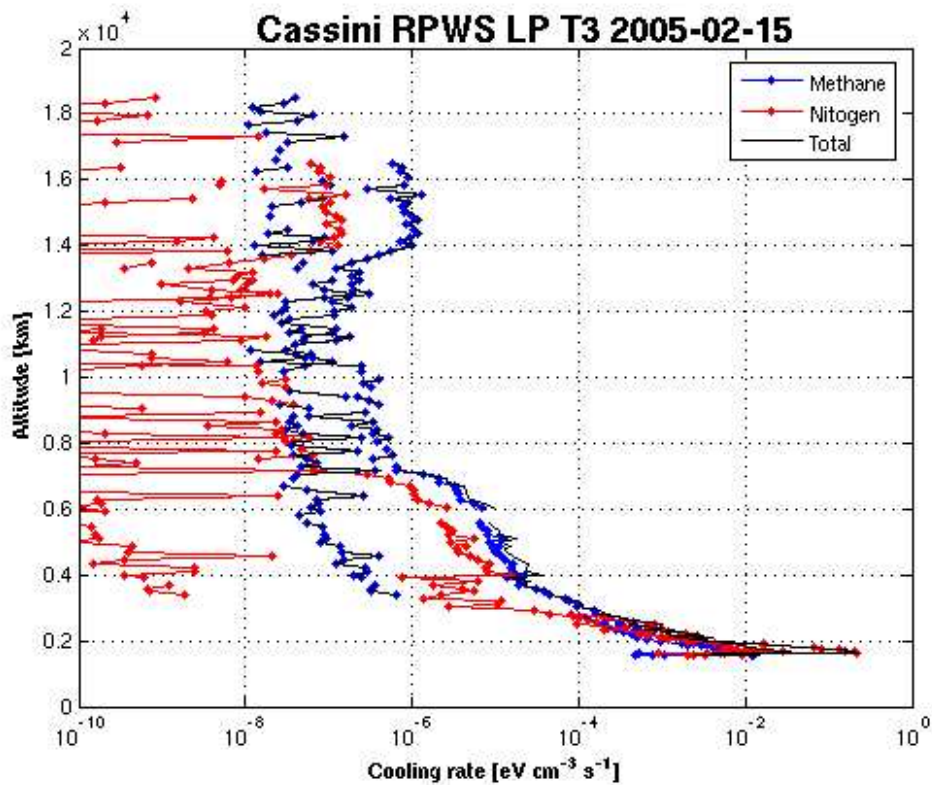


Bild 32: Avkylningen för T3

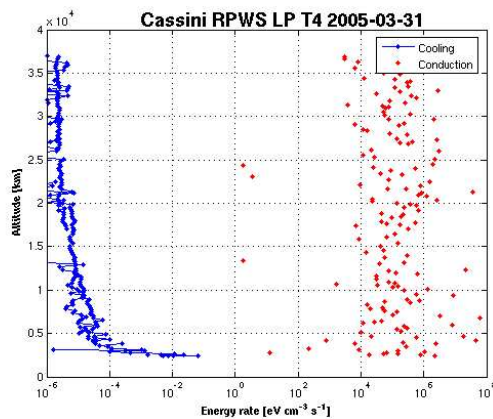


Bild 33: Energidistributionen för T4

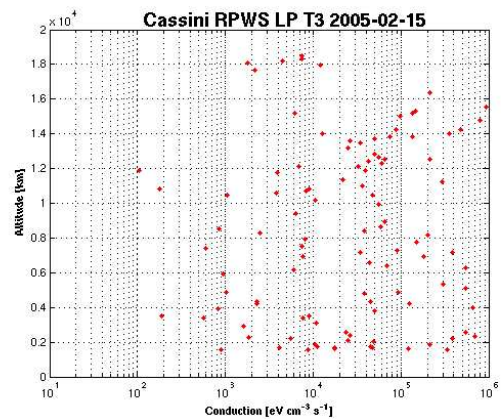


Bild 34: Konduktionen för T3

#### 4.2.4 Jämförelser mellan olika förbiflygningar

Om man jämför olika förbiflygningar så blir skillnaderna mellan dem naturligtvis stora vad gäller värden och enskilda punkter och små områden. För stora områden kan dock liknande tendenser upptäckas. För temperaturer och elektrontätheter är skillnaderna direkta. För elektronfrekvenser, avkylning och konduktion är skillnaderna inducerande då de beror på temperaturer och densiteter. En intressant företeelse är att för avkylning är skillnaderna minst medan de för konduktionen är varierande. Samtliga dessa parametrar har jämförts mellan banorna  $T_A$  och  $T_B$ .



För temperaturer (se bild 35 och 36) syns att för höjder över 2700 km motsvarar de olika banorna i stort sett varandra förutom ”brus” och de låga temperaturerna som fås i  $T_B$ . Bruset är tydligast för  $T_A$  på höjder mellan 2500 och 4000 km medan bruset för  $T_B$  är kraftigast för övriga höjder. På låga höjder är värdena för  $T_B$  normalt större än de för  $T_A$  medan det på högre höjder oftast är tvärtom.

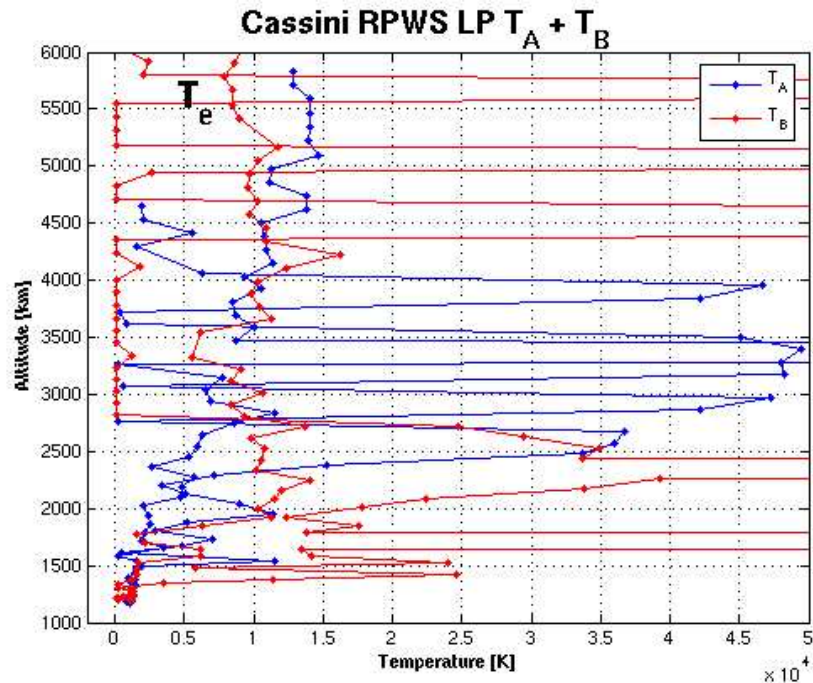


Bild 35: Temperaturer (linjär) för  $T_A$  (blå kurva) och  $T_B$  (röd kurva)

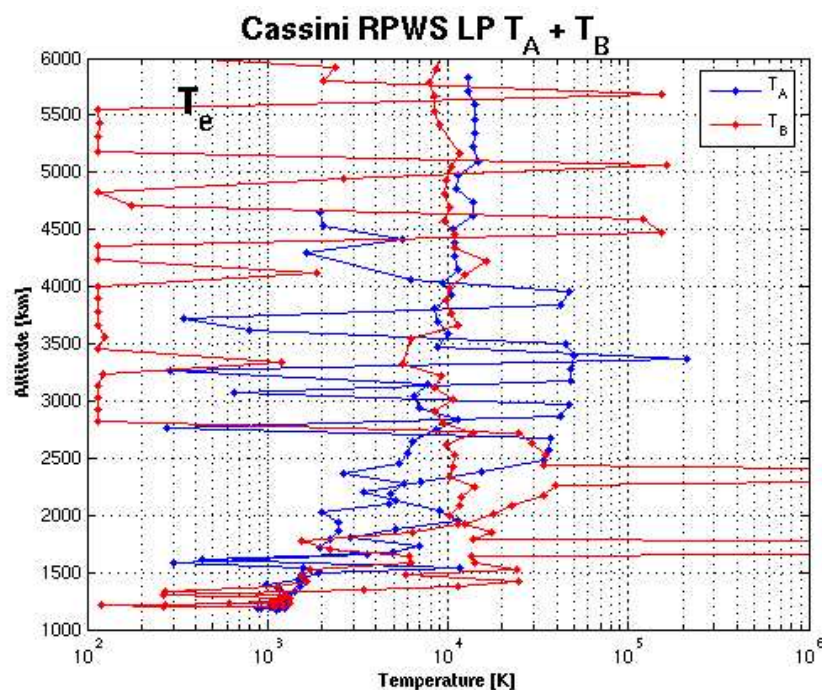
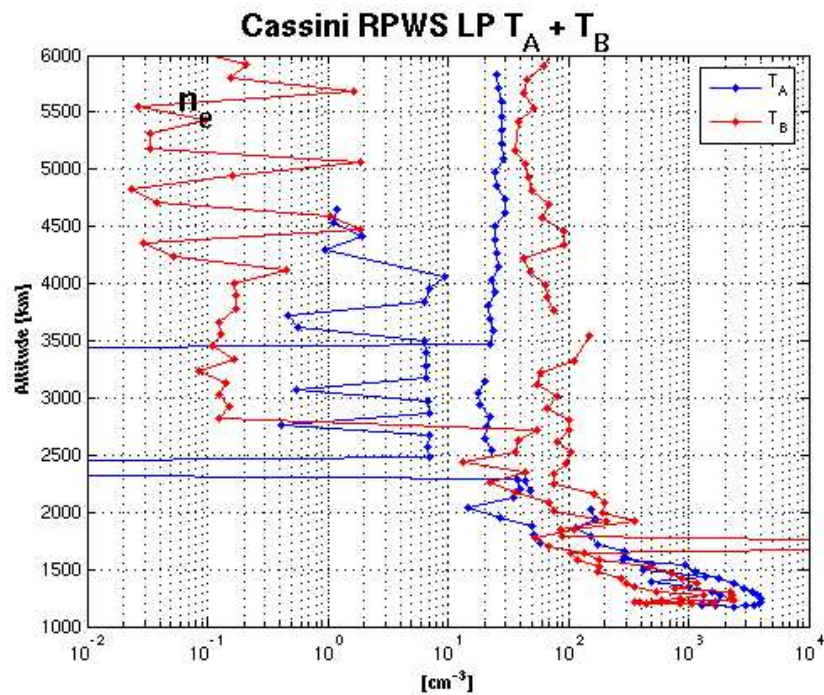


Bild 36: Temperaturer (logaritmisk) för  $T_A$  (blå kurva) och  $T_B$  (röd kurva)

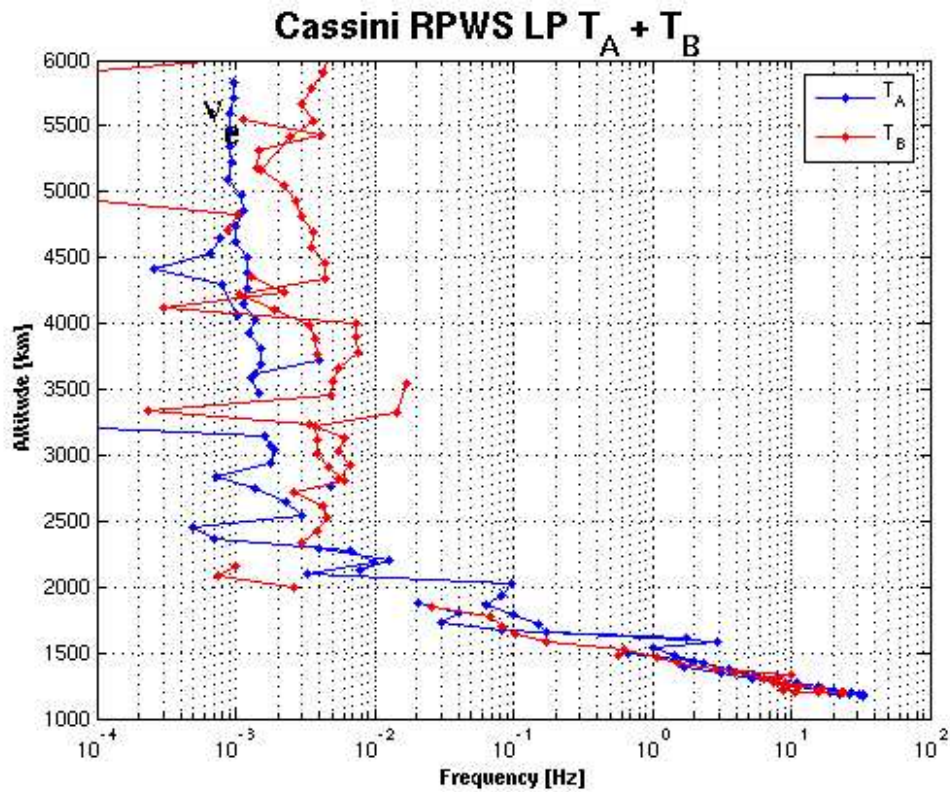
För elektrondensiteter (se bild 37) syns skillnaderna främst i ”bruset”, låga värden på höjder över 2300 km för  $T_A$  och över 4000 km samt en på låg höjd (1700 km) för  $T_B$ . Notera dock

att de normala kurvorna även har låga men stabila värden på höjder mellan 2500 och 4000 km. Frånsett mycket låg höjd (under 2000 km) och de låga, stabila värdena mellan 2500 och 4000 km är värdena för  $T_B$  alltid större än de för  $T_A$ .



**Bild 37:** Elektrondensiteter för  $T_A$  (blå kurva) och  $T_B$  (röd kurva)

För elektronfrekvenser (se bild 38) syns att "bruset" finns över hela kurvan och inte är koncentrerade till enskilda områden även om bruset för  $T_A$  nästan uteslutande finns på låga höjder (under 3500 km) och det för  $T_B$  finns främst på höga höjder (över 3000 km). Likheten med skillnaderna mellan kurvorna för elektrontäthet, att  $T_B$  alltid är större än  $T_A$  utom under 2000 km, är tydlig.



**Bild 38:** Elektronfrekvenser för  $T_A$  (blå kurva) och  $T_B$  (röd kurva)

För avkylning (se bild 39) syns ”bruset” tydligt för låga höjder (under 2000 km) samt mellan 2000 och 4500 km för  $T_A$  och över 4500 km för  $T_B$ . Värdena för  $T_B$  är, utom för mycket låga höjder (under 1500 km), högre än de för  $T_A$ . Skillnaderna minskar med höjden och över 5000 km är kurvorna praktiskt taget sammanfallande.



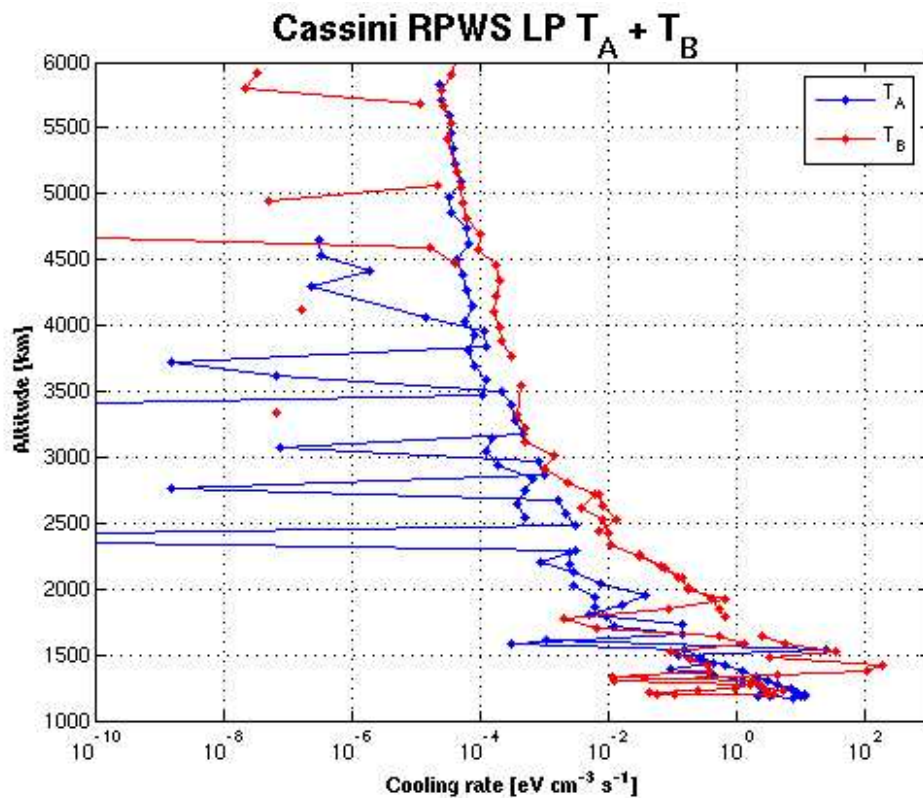


Bild 39: Total avkylning för  $T_A$  (blå kurva) och  $T_B$  (röd kurva)

För konduktionen (se bild 40) är bilden mycket komplicerad och något verkligt ”brus” är svårt att upptäcka. Någon verklig tendens är också svår att se då värdena för  $T_B$  omväxlande är högre och lägre utan synbar ordning. Resultatet är kaos.

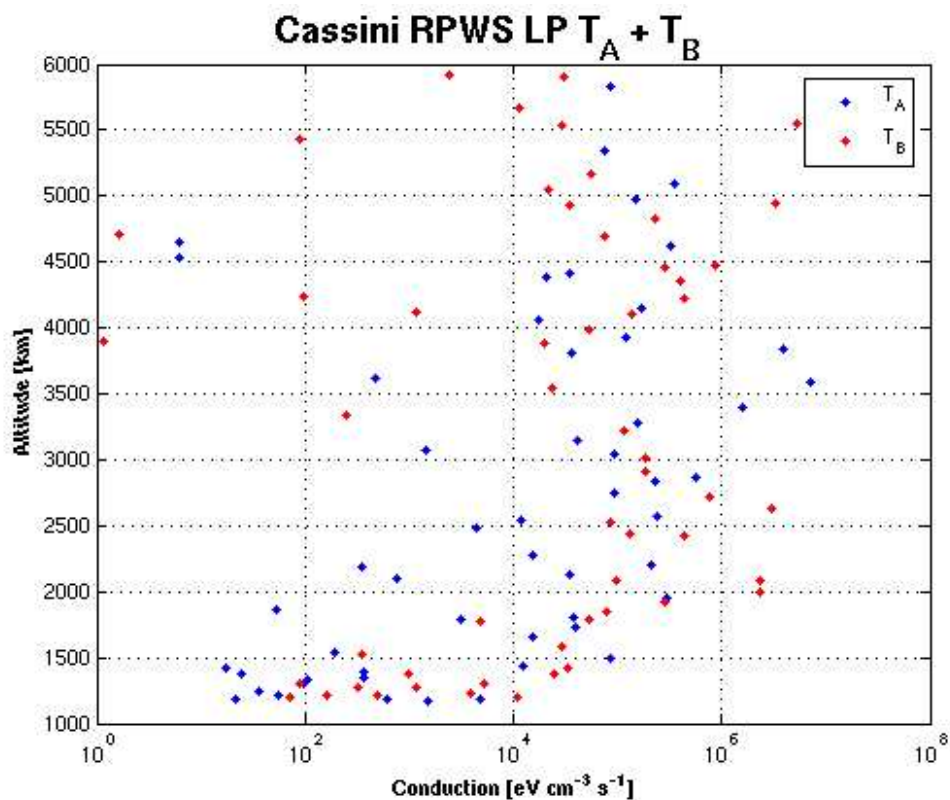
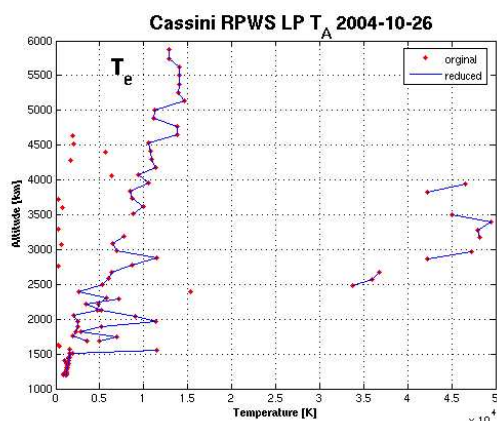


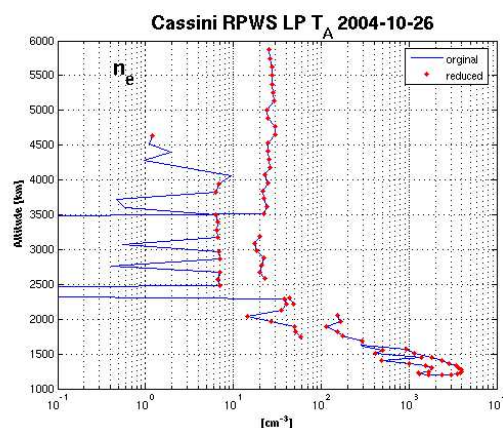
Bild 40: Konduktion för  $T_A$  (blå punkter) och  $T_B$  (röda punkter)

## 4.2.5 Jämförelser med reducerade data

Mellan fullständiga och reducerade data, där felaktig eller ofullständig indata har valts bort, är skillnaderna i huvudsak små och inte av betydelse. För temperatur och elektrondensitet (se bild 41 och 42) är skillnaderna endast att vissa punkter som förekommer hos de fullständiga värdena saknas i de reducerade eftersom de vid inläsningen valdes bort p.g.a. misstänkt felaktiga eller ofullständiga mätvärden.

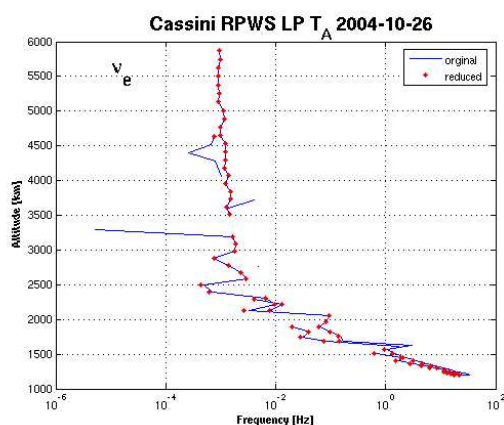


**Bild 41:** Jämförelser av temperatur mellan fullständiga (röda punkter) och reducerade (blå linje) data för  $T_A$ .

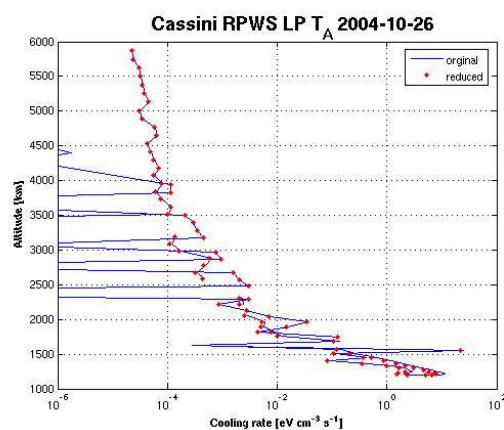


**Bild 42:** Jämförelser av elektrondensitet mellan fullständiga (blå linje) och reducerade (röda punkter) data för  $T_A$ .

För elektronfrekvenser, avkylning och konduktion är skillnaderna mer tydliga eftersom dessa beror på temperatur och elektron täthet. I samtliga dessa fall finns det punkter där värden tydligt skiljer sig åt. För frekvenser och avkylning (se bild 43 och 44) ger reducerade data lägre värden upp till ungefär 2500 km för frekvenser och upp till ca 3200 km för avkylningen (även om enskilda punkter över dessa höjder visar åtskilda värden).



**Bild 43:** Jämförelser av elektronfrekvensen mellan fullständiga (blå linje) och reducerade (röda punkter) data för  $T_A$ .

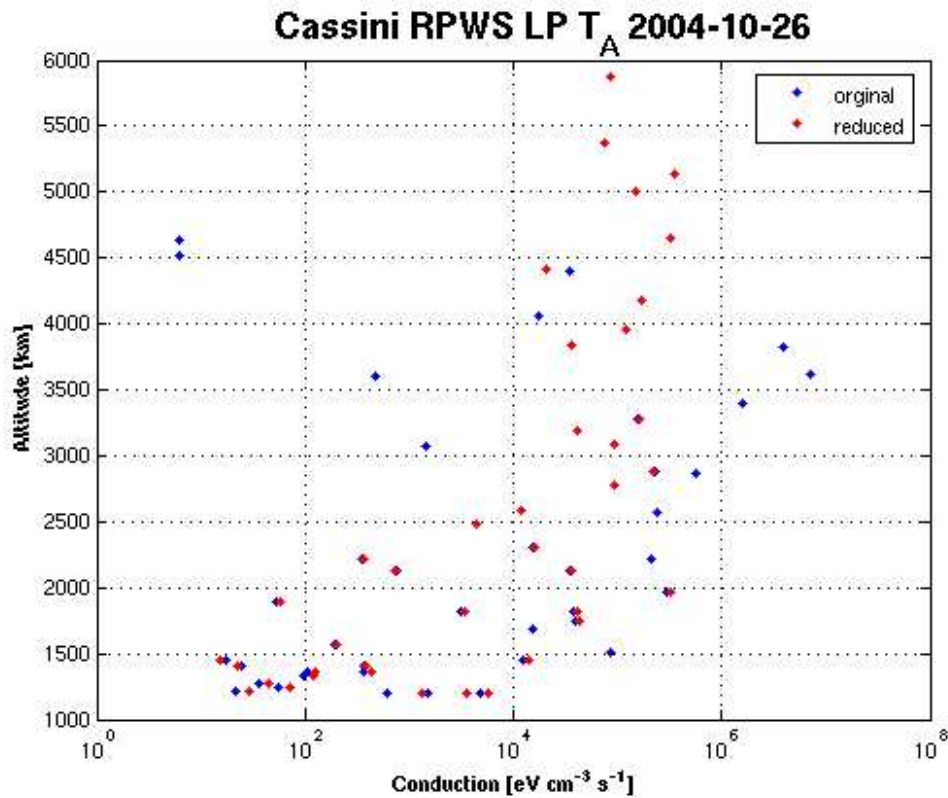


**Bild 44:** Jämförelser av total avkylning mellan fullständiga (blå linje) och reducerade (röda punkter) data för  $T_A$ .

För konduktion (se bild 45) är bilden mer komplicerad. Hos denna parameter finns vissa punkter där värdena överlappar varandra, huvudsakligen för höga höjder (över 2500 km), men de flesta punkter har tydligt åtskilda värden och omväxlande är reducerade värden lägre och högre utan synbar ordning. En förklaring till detta kaos kan vara att konduktionen även har uträknade negativa värden som inte borde existera enligt teorin och kurvan har skapats genom att ta absolutbeloppet av dessa värden.



De uppkomna skillnaderna kan vara så stora som upp till fem gånger men vanligast är skillnader mellan 1 och 2 gånger. I en punkt förekommer dessutom en skillnad som motsvarar ungefär 50000 gånger men detta är ingen verklig skillnad utan den har uppstått eftersom denna punkt är den sista och konduktionen för fullständiga data där motsvarar den närmast förgående medan den näst sista punkten saknas för reducerade data varvid man kan beräkna ett korrekt värde.



**Bild 45:** Jämförelser av konduktion mellan fullständiga (blå punkter) och reducerade (röda punkter) data för T<sub>A</sub>.

#### 4.2.6 Jämviktskonstanten

Uträkningarna av den teoretiska jämviktskonstanten ger ett resultat som varierar, men i stort sett är minskande, med höjden. För bana T<sub>A</sub> (se bild 46) är denna ungefär mellan  $6 \times 10^{-14}$  och  $2,3 \times 10^{-4}$  s, även om en troligen felaktig punkt har ett betydligt lägre värde. För bana T5 (se bild 47) är variationerna liknande, ungefär mellan  $2,8 \times 10^{-14}$  och  $1,9 \times 10^{-4}$  s. Notera att kurvorna minskar kraftigt upp till ungefär 2500 km för att däröver vara ungefär konstanta. Detta beror på att kurvorna i stort sett domineras av konduktionen vilken ökar upp till ungefär denna höjd och därefter bara uppvisar ”brusiga” variationer.

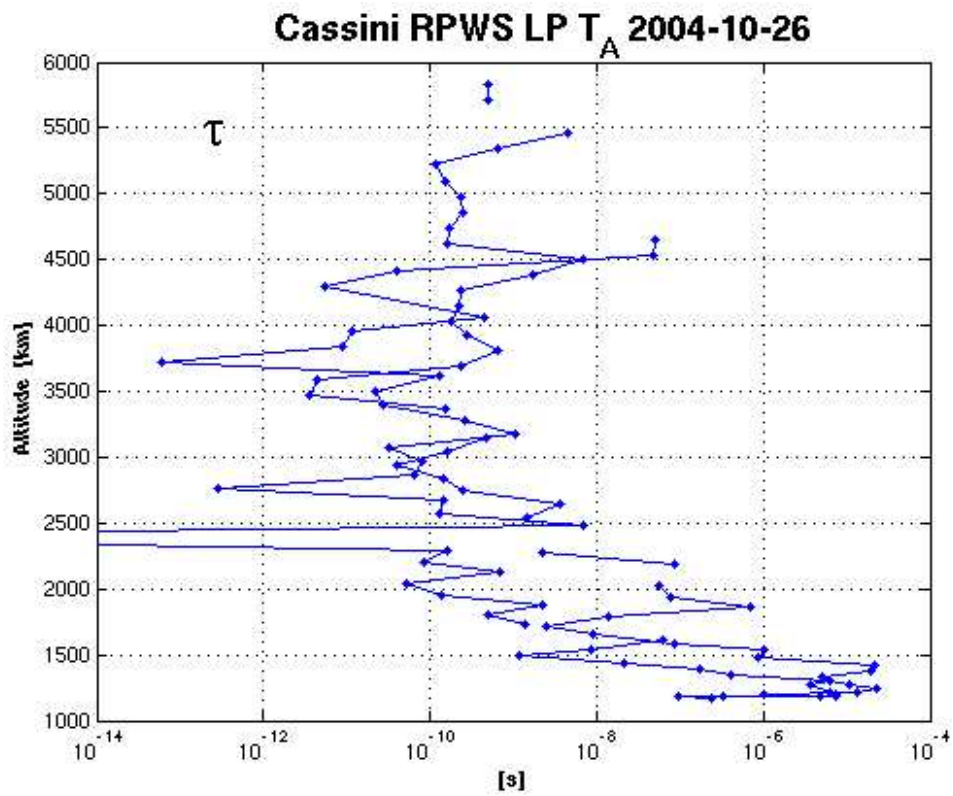


Bild 46: Jämviktskonstanter för T<sub>A</sub>

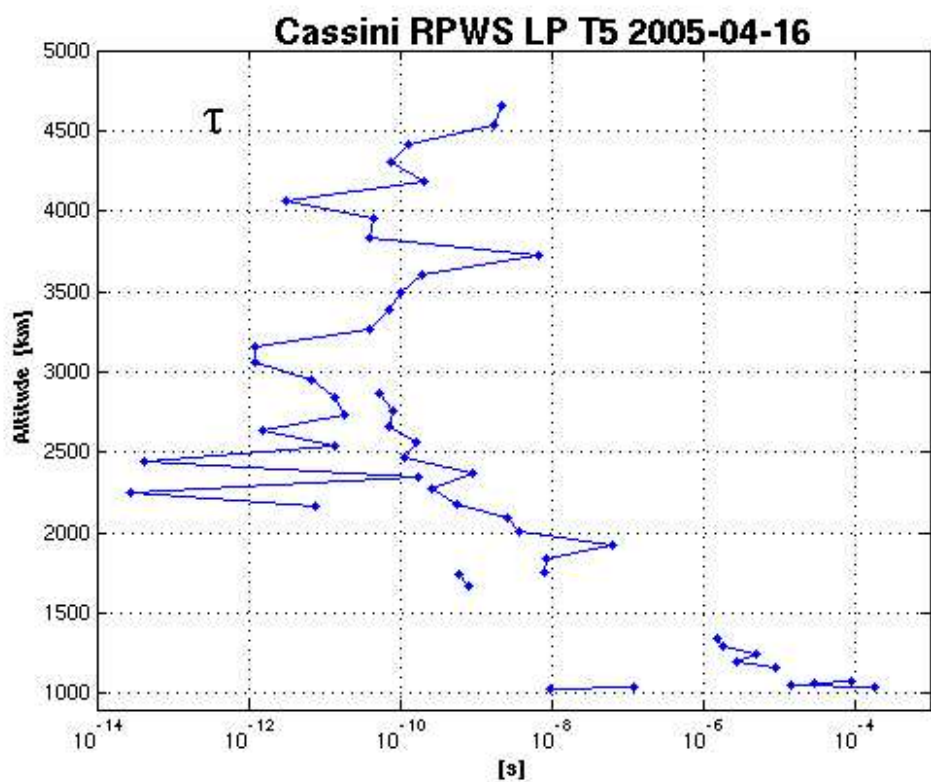


Bild 47: Jämviktskonstanter för T5

### 4.3 Övriga resultat

Övriga resultat behandlar endast resultat som är oförväntade eller förtydligande. Detta innefattar två fenomen: cross-section (avkylning utan inflytande av någon form densitet) för kväve och metan samt skillnader i deras effektivitet som kylningsmedel.

Cross-section som en funktion av temperatur beskrivs av bild 48 resp. 49 nedan.

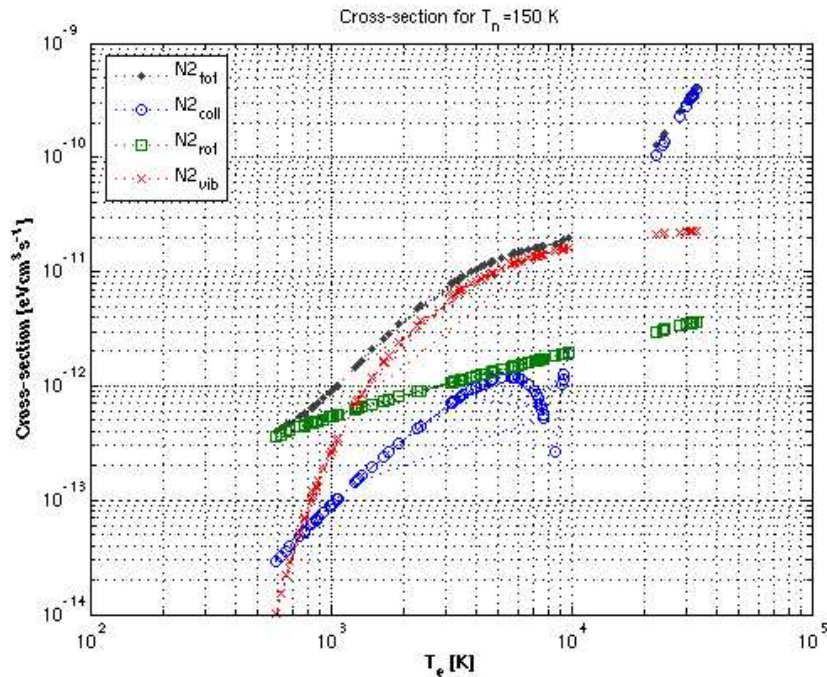


Bild 48: Kvävets cross-section

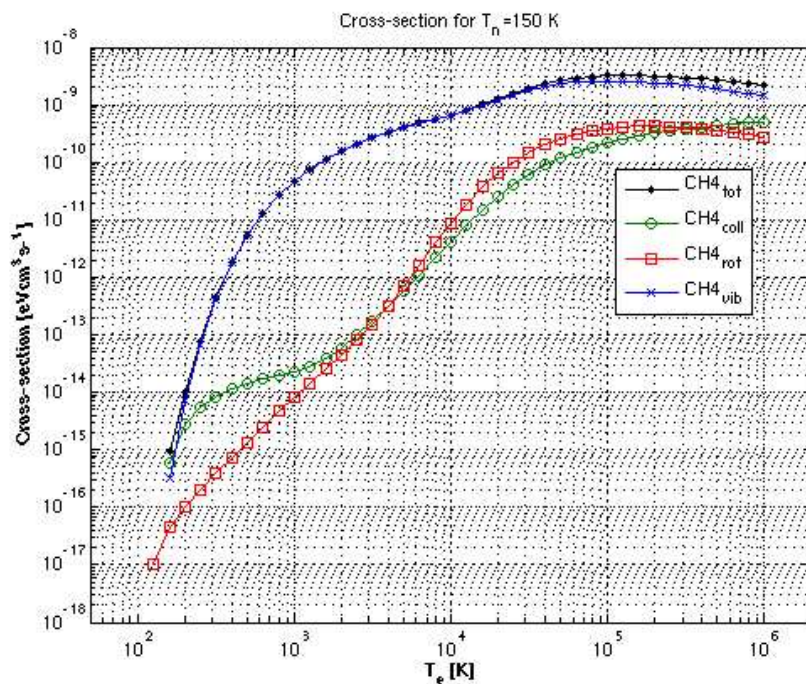
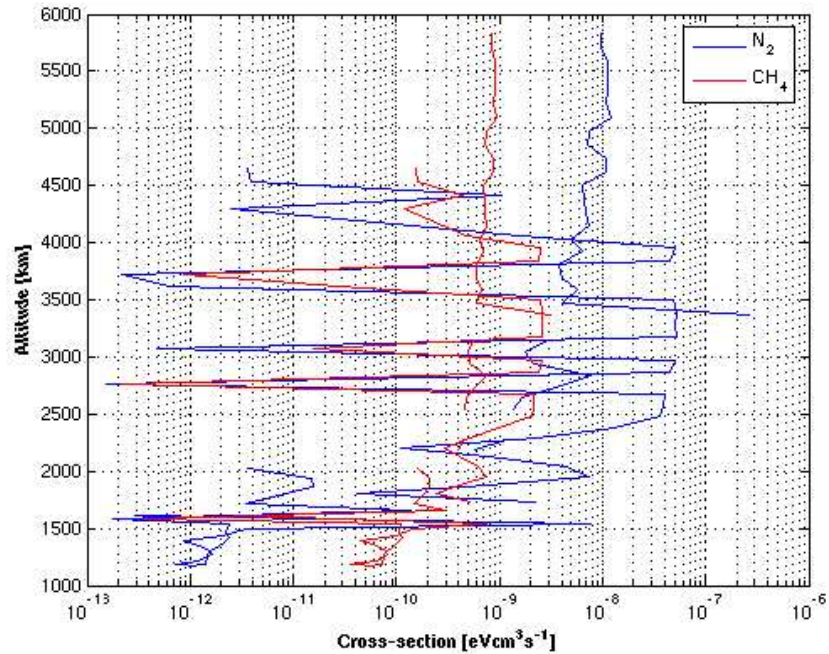


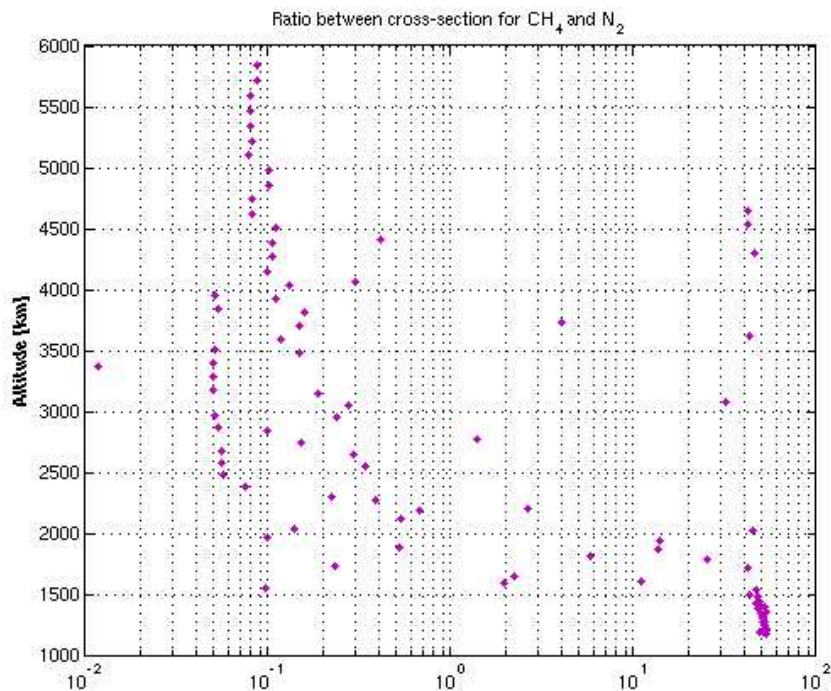
Bild 49: Metans cross-section



Vad gäller effekten av de olika ämnena avseende avkylning blir saken invecklad (se bild 50 och 51). Metan är mycket effektivare som kylningsmedel än kväve för låga höjder (under 1550 km) om man tar bort alla effekter av densiteter, ungefär 50 (mellan 42 och 54) gånger effektivare, men för högre höjder (över 2000 km) är kväve effektivare än metan, ökande från cirka 0,4 till ungefär 12 gånger (varierande mellan 11,5 och 12,9), även om enskilda punkter har värden under eller över dessa siffror.



**Bild 50:** Cross-section för  $T_A$ .  
Den blå kurvan är kväves och den röda metans.



**Bild 51:** Förhållandet mellan metan och kväves effektivitet som kylningsmedel.

## 4.4 Slutsats

Vilka slutsatser kan man då dra utifrån dessa resultat? Det främsta är svaret på frågan som ställs i syftet: Är atmosfären termiskt ledande? Svaret på denna fråga är otvetydigt: Ja! Detta eftersom det tydligt finns en konduktion (värmeledning) för alla förbiflygningar och denna verkar öka med höjden. Denna motsvaras inte av avkylningen vilket betyder ett nettoflöde av värme, och därmed energi, i jonosfären. Om detta flöde kan kopplas till magnetosvansen är oklart men det faktum att temperaturen är större i utflygningen (outbound) där magnetosfären påverkar kurvan. Dessutom syns att temperaturen verkar öka med ökande höjd. Termisk konduktion är emellertid en tillräcklig upphettningskälla för att förklara de observerade temperaturerna för de förlustprocesser som förekommer.

Ytterligare slutsatser som kan dras är att den förenklade energiekvationen (ekv. 14) inte är korrekt ty i sådant fall skulle konduktionen och avkylningen vara likvärdiga och det är de uppenbarligen inte. Detta faktum kan bero på fyra saker: att den grundläggande energiekvationen (ekv. 8) inte är korrekt, att de förenklingar som gjordes i ekv. 9 och 11 inte är korrekta, att inverkan av extern uppvärmning från fotojonisation och impact-heating är påtaglig eller att atmosfären inte befinner sig i relativ jämvikt. De två första omständigheterna borde inte vara relevanta eftersom energiekvationen antas vara korrekt i hela detta arbete och ingen av förenklingarna är felaktiga enligt mätningar,  $J$  är mycket liten och  $I = 91,1^\circ$ . Den externa uppvärmningen har inte beräknats och inte heller uppskattats och detta lämnar fältet öppet. Den sista faktorn är troligen den viktigaste eftersom en mycket liten jämviktskonstant ger upphov till en stor term för den tidberoende temperaturfaktorn och då råder inte relativ jämvikt.

## 5 Diskussion

Denna diskussion fokuserar på två saker, orsakerna till resultatet och varför de ser ut som de gör samt en metodanalys.

### 5.1 Orsaker till resultat

En del resultat ovan kan verka lite märkliga. Detta gäller kanske främst det faktum att alla extremt låga temperaturer verkar ha samma värde. Detta beror på att de har det, värdet är 115,94 K, eftersom känsligheten i proben är 0,01 eV vilket gör att den minsta temperatur som kan mätas är 0,01 eV vilket motsvarar 115,94 K (enligt definition).

Ett annat fenomen som förekommer är ”brus”, mätvärden som ändrar sig kraftigt och/eller har värden som ligger utanför de normala värdena. Dessa kan uppkomma på tre sätt: fel i mätningen, felaktiga mätvärden p.g.a. yttre påverkan från satelliten, laddade partiklar från dess yta s.k. sprättning eller strömmar, eller för långa tidsavstånd då mätningarna utfördes var 24:e sekund varvid farkosten avverkade mellan 100 och 140 km i höjddled utom närmast ytan där det var ner till mellan 1 och 5 km. Alternativ två verkar vara det mest sannolika för de mesta av bruset eftersom detta brus förekommer i samma punkter för både temperaturen och elektrondensiteten vilket betyder att mätningarna troligtvis är korrekta. Visserligen står temperatur och densitet i direkt relation till varandra enligt ideala gaslagen med detta borde inte ge mätfel för båda två. Den skillnad som stora avstånd i höjddled ger kan delvis också förklara bruset särskilt på låga höjder men klargör inte orsakerna till de riktighetsändringar som förekommer. En del punkter är dock uppenbara mätfel, t.ex. en temperatur på över  $5,2 \times 10^{17}$  K vilket motsvarar mer än 30 miljarder gånger temperaturen i Solens centrum.

Men allt kan inte förklaras med ”brus”, även en del partiklar eller strömmar från magnetosfären eller solvinden verkar påverka mätningarna. Detta är kanske inte underligt eftersom detta fenomen inträffar också för Jupiters måne Io som ur ren magnetosfäriskt avseende liknar Titan, främst magnetosfärpartiklar, och Jorden, solvindspartiklar. Hur och med vilken intensitet dessa partiklar inverkar i Titans jonosfär är ännu så länge okänt. Dessutom kan andra typer av inducerade partiklar, metan från Titans yta eller joner från högre höjder, inverka på mätresultaten. Även påverkan från kraftigt störda magnetiska och elektriska fält borde inverka på mätresultatet. I detta arbete har inverkan av dessa faktorer konsekvent inte beaktas eftersom de inte borde påverka de slutliga resultatet för de flesta fall utan bara ”bruset” även om magnetfältsstörningar påverkar både temperatur och densitet.

Den effektivitetsskillnad som metan och kväve uppvisar är mycket underlig eftersom båda dessa ämnen har ungefär lika värmekapacitet per mol, metans effektiva värmekapacitet är emellertid ungefär tre gånger högre per massenhet. Detta gäller enbart för ideala gaser under konstanta förhållanden. För varierande temperaturer är inte värmekapaciteten konstant utan varierar med temperatur, och denna variation är mycket kraftigare för metan än för kväve i det rådande temperaturintervallet, även om metans värmekapacitet blir lägre för mycket låga temperaturer (under ca 1000 K) och där närmar sig kväves. Det är underligt att det förefaller finnas två olika typer av förhållanden, dels ett under 1500 km med konstanta förhållanden och dels ett över 2000 km med temperaturberoende värden. Ännu mer mystiskt blir det om man beaktar att för det första fallet är det metan som är kraftigast och för det andra fallet är

det kvävet. Möjligen kan man tänka sig att den undre delen också är beroende av kväve men eftersom det då är mycket ineffektivare än metan påverkar ändå metan kurvan.

Det är emellertid omöjligt att få dessa hypoteser verifierade på Titan utan att direkt mäta värmekapaciteten och dess variation med temperaturen. All den teori som resonemanget ovan bygger på är resultat och teorier i Jordens atmosfär. Även andra förklaringar, som t.ex. att metans cross-section och därmed avkylning för rotation är mycket högre eftersom metan har nio frihetsgrader för rotation gentemot kväve som bara har en eller att metan verkar förhärskas på höjder över 2000 km vilket kan leda till färre kollisioner för kväve än för metan, kan bidra med en del av effekten. Men rent ut sagt vet ingen orsaken och ytterligare undersökningar och analyser behövs.

## 5.2 Metodanalys

Orsaken till valet av MATLAB som programmeringsspråk och grafikverktyg är dels att de indata jag fick redan var på MATLAB-form och dels att MATLAB är ett enkelt matematiskt bearbetningsverktyg som både innehåller möjligheter att skriva dataprogram för att göra mer ingående analyser av data och verktyg att visualisera dessa.

Fördelarna med MATLAB är att det är det verktyg som är mest allmänt och minst komplicerat att använda. Nackdelarna är att detta verktyg inte är det som normalt ger bäst resultat eftersom det är matrisberoende och behandlar objektbaserad grafik. Därmed behandlas enskilda mätvärden inte som enskilda punkter utan som en del av en matris. Men detta är godtagbart för denna studie eftersom den behandlar mätvärden i form av matriser.

Inläsningen av data var inte mitt huvudansvar utan jag fick dessa data som färdiga filer och program. Själva huvudprogrammet är relativt enkelt och innehåller främst olika matematiska operationer. Ett undantag är dock mini-programmet JWEgrad.m som används för att beräkna gradienter. Detta ger upphov till ett litet fel eftersom den sista punkten i mätserien då saknar gradient och måste ersättas med föregående värde. Eftersom slutresultatet är en följd av två sådana operationer blir de två sista punkterna för konduktion i förbiflygningarna tveksamma och den sista troligen helt felaktig. Observera också att programmet innehåller en delning med elementarladdningen  $q_e$  men detta är bara en enhetslös konstant och inte en parameter.

En komplikation som inte kan bortses ifrån är att effektivitetsgraden för avkylning av metan bygger på punktvisa mätvärden, som kan vara negativa, och inte en funktion av temperatur som sedan interpolerats till en kurva vilken sedan används som underlag för beräkningar av värden för avkylning med metan. Detta borde dock inte påverka slutresultatet mer än ett par procent men resultatet, total avkylning, borde inte bli fullständigt korrekt. Detsamma gäller densiteterna för kväve och metan som bygger på mätvärden från INMS och inte på funktioner av höjd. Dessa mätvärden har sedan interpolerats så att de överensstämmer så bra som möjligt med en verklig funktion. Dessa kurvor gäller dock endast till en höjd av ca 2500 km varefter mätningarna upphörde. Detta och det faktum att densiteterna kan variera mellan olika förbiflygningar gör att resultatet för avkylning (metan, kväve och totalt), frekvens som delvis men inte i hög grad utom för låga höjder beror på kvävedensitet samt konduktion inte borde bli fullständigt korrekt även om de fel som uppkommer borde vara små.

För beräkningar av den teoretiska jämviktskonstanten måste två saker påpekas. Enligt formeln i ekv. 37 beror denna på konduktionen och avkylningen som båda beror av elektrontemperaturen,  $T_e$ , och för konduktionen även av en gradient till denna. Båda dessa faktorer kan dock beräknas oberoende av jämviktskonstanten eftersom  $\Delta T$  inte är en funktion

av  $T_e$  utan bara en allmän temperaturgradient. Dessutom används vid programmering redan uträknade faktorer för konduktionen och avkylningen.

Vid programmeringen används parametrarna  $Cond$  och  $L_{tot}$  som båda har enhet  $eVcm^{-3}s^{-1}$ . Om man sätter i detta i formeln får man inte ut temperaturen med enheten K. Detta är dock inte fallet i programmeringen eftersom denna innehåller en enhetslös korrektionsfaktor ( $qe$ ) vilken ger korrekt enhet.

Enhetskontroll är ett bra sätt att undersöka en komplicerad funktion om man har något känt underlag, en term, uttryck el. dyl., att jämföra med. En viktig del i denna jämförelse är att omvandla allt till likvärdiga enheter. De faktorer som därmed bildas är ofta av underordnad betydelse och kan inte användas för att avfärda att en formel eller ett uttryck som inte korrekt.

Beräkningen ”för hand” är endast ett sätt att kontrollera programmet och kan inte avgöra sanningshalten i några formler eftersom alla data används på samma sätt som i programmet. Nu kanske någon invänder att man borde få samma resultat både genom beräkningarna och programmet och det håller jag med om men det är just det som är meningen. Det är om resultatet skiljer sig åt som det blir viktigt att undersöka varför.

Jämförelserna med data från RPWS och INMS är de kanske viktigaste eftersom de är de enda som kan antyda att det föreligger några fel i processen från indata till resultat. Detta eftersom enhetsanalysen bara kontrollerar om formlerna och uttrycken stämmer och beräkningarna ”för hand” endast kontrollerar programmet. Även om ingen av dessa kontroller ger några fel så betyder det inte att resultatet är korrekt eftersom fel som uppkommer vid moduleringar av data i programmet ser likadana ut för både programmet och beräkningar som utgår från samma data. Dessutom är det data från RPWS och INMS som sedan blir officiella och publicerade i olika medier och detta antas vara korrekt. Därför är kontrollen mot dessa data viktig.



## 6 Framtidsutsikter

Framtidsutsikterna för detta examensarbete anses mycket goda. Det program som skapades under arbetets gång är användbart på mätningar vid alla genomflygningar i Titans atmosfär under hela Cassini-projektets livstid med ändringar vid inläsning av nya data och möjligen förändringar för nya parametrar. Man kan dock tänka sig att göra felanalyser eller modeller, t.ex. med Monte Carlo-metoden, för att stabilisera mätvärdena. Resultatet av detta arbete kan också fungera som en förstudie för vidare analyser, t.ex. genom att infoga uppvärmning genom fotojonisation eller genom att undersöka vissa energiprocesser på olika höjder i Titans atmosfär. En annan möjlighet är att studera hela processen men detta är en mycket komplicerad och krävande uppgift som säkerligen skulle ta flera år och kräva långa och komplicerade beräkningar och uttryck. Men bara det faktum att programmet under i alla fall den närmaste framtiden kommer att fungera som underlag för olika forskare vid undersökningar av Titans jonosfär gör framtidsutsikterna för detta arbete mycket goda.

## 7 Tack

Författaren önskar visa sin djupaste tacksamhet mot Institutet för Rymdfysik i Uppsala för möjligheten att göra detta examensarbete och dess anställda, särskilt Jan-Erik Wahlund, för hjälp, råd och stöd under arbetets fortskridande. Ett tack även till NASA/ESA och grupperna RPWS, framför allt University of Iowa, och INMS för information och bilder. Dessutom tackas särskilt Ingo Müller-Wodarg på Imperial Collage i London för hjälp och råd om konduktion, Thomas E. Cravens på Department of Physics and Astronomy vid University of Kansas för hjälp och råd om fotojonisation och metans avkylning, Marina Galand på Center for Space Physics vid Boston University för hjälp, råd och tolkandet av resultat (avkylning) samt Jan Alsins på Fysikalisk-kemiska institutionen vid Uppsala universitet för tolkandet av resultat (metans effektivitet). Tack även till Johan Hansson, Björn Graneli och Sverker Fredriksson vid Luleå tekniska universitet för råd och stöd. Slutligen tack till min familj.

## 8 Referenser

### Böcker

Andrews, David G. (2000); *An Introduction to Atmospheric Physics*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-512-62958-6

Atkins, Peter W. och de Paula, Julio (2002); *Atkins' Physical Chemistry (7 ed.)*; Oxford University Press, New York; ISBN 0-19-879285-9

Banks, P. M. och Kockarts, G. (1973); *Aeronomy (2 delar)*; Academic Press, New York

Barin, Ihsan; Knacke, Ottmar och Kubaschewski, Oswald (1973/1977); *Thermochemical Properties of Inorganic Substances (2 delar inkl. supplement)*; Springer-Verlag, Berlin; ISBN 3-540-06053-7/3-540-08031-7

Bauer, Siegfried J. (1973); *Physics of Planetary Ionospheres*; Springer-Verlag, Berlin; ISBN 3-540-06173-8

Beatty, J. Kelly; Petersen, Carolyn Collins och Chaikin, Andrew (1999); *The New Solar System (4 ed.)*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-521-64183-7

Bowhill, S. A. (edit.) (1972); *The Upper Atmosphere*; D. Reidel Publishing Company, Dordrecht; ISBN 90-277-0213-6

Chamberlain, Joseph W. och Hunten, Donald M. (1986); *Theory of Planetary Atmospheres: An Introduction to Their Physics and Chemistry (2 ed.)*; Academic Press, Orlando; ISBN 0-12-167254-1

Chapman, Sydney och Cowling, T. G. (1990[1970]); *The Mathematical Theory of Non-uniform Gases: An Account of the Kinetic Theory of Viscosity, Thermal Conduction and Diffusion in Gases (3 ed., reissued with foreword by Carlo Cerignani)*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-521-40844-X

Chen, Francis F. (1984); *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (2 ed.); Volume 1: Plasma Physics*; Plenum Press, New York; ISBN 0-306-41332-9

Frihagen, Jon (edit.) (1966); *Electron Density Profiles in Ionosphere and Exosphere*; North-Holland Publishing Company, Amsterdam

Hastings, Daniel och Garrett, Henry (1996); *Spacecraft-Environment Interactions*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-521-47128-1

Huygens, Christiaan (1774); *Cosmotheoros eller verlds beskådare, det är: betraktelser öfver himla-klotens värde, förträfflighet och prydnad*; Uppsala

Kivelson, Margaret G. och Russell, Christopher T. (1995); *Introduction to Space Physics*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-521-45714-9

Lewis, Gilbert Newton och Randall, Merle (1961); *Thermodynamics (2 ed., revised by Kenneth S. Pitzer and Leo Brewer)*; McGraw-Hill, New York

Marcus, Marvin (1993); *Matrices and MATLAB™: a Tutorial*; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; ISBN 0-13-562901-2

McCormac, Billy M. (edit.) (1975); *Atmospheres of Earth and the Planets*; D. Reidel Publishing Company, Dordrecht; ISBN 90-277-0575-5

McCormac, Billy M. (edit.) (1973); *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*; D. Reidel Publishing Company, Dordrecht; ISBN 90-277-0283-7

Nordling, Carl och Österman, Jonny (1999); *Physics Handbook for Science and Engineering (6 ed.)*; Studentlittertur, Lund; ISBN 91-44-00823-6

Pärt-Enander, Eva; Sjöberg, Anders; Melin, Bo och Isaksson, Pernilla (1996); *The MATLAB® Handbook*; Addison-Wesley, Harlow; ISBN 0-201-877570

Pärt-Enander, Eva och Sjöberg, Anders (2003); *Användarhandledning för MATLAB® 6.5*; Avdelningen för teknisk databehandling, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet (dist.), Uppsala; ISBN 91-506-1690-0

Rees, Manfred Hugh (1989); *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*; Cambridge University Press, Cambridge; ISBN 0-521-32305-3

Råde, Lennart och Westergren, Bertil (1998); *Mathematics Handbook for Science and Engineering (BETA)*; Studentlitteratur, Lund; ISBN 91-44-00839-2

Schunk, Robert W. och Nagy, Andrew F. (2000); *Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry*; Cambridge University Press, New York; ISBN 0-521-63237-4

Sonntag, Richard E., Borgsnakke, Claus och Van Wylen, Gordon, J. (1998); *Fundamentals of Thermodynamics (5<sup>th</sup> ed.)*; John Wiley and Sons, Inc., New York; ISBN 0-471-18361-X

Weast, Robert C. (edit.) (1988); *Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data (69<sup>th</sup> ed.)*; CRC Press, Cleveland; ISBN 0-8493-0740-6

Whitten, R. C. och Poppoff, I. G. (1971); *Fundamentals of Aeronomy*; John Wiley and Sons, Inc., New York; ISBN 0-471-94120-4

Whitten, R. C. och Poppoff, I. G. (1965); *Physics of the Lower Ionosphere*; Prentice-Hall, Inc., Eaglewood Cliffs

## Artiklar

Anicich, Vincent G. och McEwan, Murray J.; *Ion-molecule chemistry in Titan's ionosphere*; Planetary and Space Science, vol. 45, nr. 8 (Aug. 1997), s. 897-921 ISSN 0032-0633

Banaszkiewicz, M.; Lara, L. M.; Rodrigo, R.; López-Moreno, J. J. och Molina-Cuberos, G. J.; *A Coupled Model of Titan's Atmosphere and Ionosphere*; Icarus, vol. 147, nr. 2 (Okt. 2000), s. 386-404; ISSN 0019-1035

Banaszkiewicz, M.; Lara, L. M.; Rodrigo, R.; López-Moreno, J. J. och Molina-Cuberos, G. J.; *Upper atmosphere and ionosphere of Titan: a coupled model*; Advances in Space Research, vol. 26, nr. 10 (2000), s. 1547-1550; ISSN 0273-1177

Blanc, M.; Bolton, S.; Bradley, J. Burton, M.; Cravens, T. E.; Dandouras, I.; Dougherty, M. K.; Festou, M. C.; Feynman, J.; Johnson, R. E.; Gombosi, T. G.; Kurth, W. S.; Liewer, P. C.; Mauk, B. H.; Maurice, S.; Mitchell, D.; Neubauer, F. M.; Richardson, J. D.; Shemansky, D. E.; Sittler, E. C.; Tsurutani, B. T.; Zarka, Ph.; Esposito, L. W.; Grün, E.; Gurnett, D. A.; Kliore, A. J.; Krimigis, S. M.; Southwood, D.; Waite, J. H. och Young, D. T.; *Magnetospheric and Plasma Science with Cassini-Huygens*; Space Science Reviews, vol. 104, nr. 1-4 (2002), s 253-346; ISSN 0038-6308

Capone, L. A.; Whitten, R. C.; Durbach, J.; Prasad, S. S. och Huntress Jr., W. T.; *The Lower Ionosphere of Titan*; Icarus, vol. 28, nr. 3 (Jul. 1976), s. 367-378; ISSN 0019-1035

Cravens, T. E.; Vann, J.; Clark, J.; Yu, J.; Keller, C. N. och Brull, C.; *The ionosphere of Titan: An updated theoretical model*; Advances in Space Research, vol. 33 (2004), s. 212-215; ISSN 0273-1177

Cravens, T. E.; Robertson, I. P. Clark, Wahlund, J-E.; Waite, J. H. jr.; Ledvina, Niemann, H. B.; Yelle, R. V.; Kasprzak, W. T.; Luhmann, J. G.; McNutt, R. L.; Ip, W.-H.; de la Haye, V.; Müller-Wodarg, I.; Young, D. T. och Coates, A. J.; *Titan's Ionosphere: Model Comparisons with Cassini TA Data*; Geophysical Research Letters (ännu opublicerade)

Flasar, F. M.; Achterberg, R. K.; Conrath, B. J.; Gierasch, P. J.; Kunde, V. G.; Nixon, C. A.; Bjoraker, G. L.; Jennings, D. E.; Romani, P. N.; Simon-Miller, A. A.; Bézard, B.; Coustenis, A.; Irwin, P. G. J.; Teanby, N. A.; Brasunas, J.; Pearl, J. C.; Segura, M. E.; Carlson, R. C.; Mamoutkine, A.; Schinder, P. J.; Barucci, A.; Courtin, R.; Fouchet, T.; Gautier, D.; Lellouch, E.; Marten, A.; Prangé, R.; Vinatier, S.; Strobel, D. F.; Calcutt, S. B.; Read, P. L.; Taylor, F. W.; Bowles, N.; Samuelson, R. E.; Orton, G. S.; Spilker, L. J.; Owen, T. C.; Spencer, J. R.; Showalter, M. R.; Ferrari, C.; Abbas, M. M.; Raulin, F.; Edgington, S.; Ade, P. och Wishnow E. H.; *Titan's Atmospheric Temperatures, Winds, and Composition*; Science, vol. 308, nr. 5724 (13 Maj 2005), s. 975-978; ISSN 1095-9203

Fox, J. L. och Yelle, R. V.; *Hydrocarbon ions in the ionosphere of Titan*; Geophysical Research Letters, vol. 24, nr. 17 (1 Sep. 1997), s. 2179-2182; ISSN 0094-8534

Galand, Marina; Lilensten, Jean; Toubanc, Dominique och Maurice, Sylvester; *The Ionosphere of Titan: Ideal Diurnal and Nocturnal Cases*; Icarus, vol. 140, nr. 1 (Jul. 1999), s. 92-105; ISSN 0019-1035

Gan, L. och Cravens, T. E.; *Electron Impact Cross-sections and Cooling Rates for Methane*; Planetary and Space Science, vol. 40, nr. 11 (Nov. 1992), s. 1535-1544; ISSN 0032-0633

Gan, L.; Keller, C. N. och Cravens, T. E.; *Electrons in the ionosphere of Titan*; Journal of Geophysical Research, vol. 97, nr. A8 (1 Aug. 1992), s. 12137-12151; ISSN 0148-0227

Gurnett, D. A.; Scarf, F. L. och Kurth, W. S.; *The structure of Titan's wake from plasma wave observations*; Journal of Geophysical Research, vol. 87, nr. A3 (1 Mar. 1982), s. 1395-1403; ISSN 0148-0227

Ip, W.-H.; *Titan's upper ionosphere*; Astrophysical Journal, vol. 362, nr. 1 (10 Okt. 1990), s. 354-363; ISSN 0004-637X

Keller, C. N. och Cravens, T. E.; *One-dimensional multispecies magnetohydrodynamic models of the wakeside ionosphere of Titan*; Journal of Geophysical Research, vol. 99, nr. A4 (1 Apr. 1994), s. 6527-6536; ISSN 0148-0227

Keller, C. N.; Anicich, V. G. och Cravens, T. E.; *Model of Titan's ionosphere with detailed hydrocarbon ion chemistry*; Planetary and Space Science, vol. 46, nr. 9/10 (Sep/Okt. 1998), s. 1157-1174; ISSN 0032-0633

Keller, C. N.; Cravens, T. E. och Gan, L.; *A model of the ionosphere of Titan*; Journal of Geophysical Research, vol. 97, nr. A8 (1 Aug. 1992), s. 12117-12135; ISSN 0148-0227

Keller, C. N.; Cravens, T. E. och Gan, L.; *One-dimensional multispecies magnetohydrodynamic models of the ramside ionosphere of Titan*; Journal of Geophysical Research, vol. 99, nr. A4 (1 Apr. 1994), s. 6511-6525; ISSN 0148-0227

Köhnlein, W.; *Electron Density Models of the Ionosphere*; Reviews of Geophysics and Space Science, vol. 16, nr. 3 (Aug. 1978), s. 341-354; ISSN 0034-6853

Lellouch, Emmanuel; Hunten, Donald M.; Kockarts, Gaston och Coustenis, Athena; *Titan's Thermosphere Profile*; *Icarus*, vol. 83, nr. (2 Feb. 1990), s. 308-324; ISSN 0019-1035

Nagy, Andrew F. och Cravens, Thomas E.; *Titan's ionosphere: A review*; Planetary and Space Science, vol. 46, nr. 9/10 (Sep/Okt. 1998), s. 1149-1155; ISSN 0032-0633

Roboz, A. och Nagy, A. F.; *The energetics of Titan's ionosphere*; Journal of Geophysical Research, vol. 99, nr. A2 (1 Feb. 1994), s. 2087-2093; ISSN 0148-0227

Schunk, Robert W. och Nagy, Andrew F.; *Electron Temperature in the F Region of the Ionosphere: Theory and Observations*; Reviews of Geophysics and Space Science, vol. 16, nr. 3 (Aug. 1978), s. 355-399; ISSN 0034-6853

Schunk, Robert W. och Walker, James C. G.; *Transport Properties of the Ionospheric Electron Gas*; Planetary and Space Science, vol. 18, nr. 11 (Nov. 1970), s. 1535-1550; ISSN 0032-0633

Smith, Gerald R.; Strobel, Darrell F.; Broadfoot, A. L.; Sandel, B. R.; Shemansky, D. E. och Holberg, J. B.; *Titan's upper atmosphere: Composition and temperature from the EUV solar occultation results*; Journal of Geophysical Research, vol. 87, nr. A3 (1 March 1982), s. 1351-1359; ISSN 0148-0227

Toublanc, D.; Parisot, J. P.; Brillet, J.; Gautier, D.; Raulin, F. och McKay, C. P.; *Photochemical Modelling of Titan's Atmosphere*; *Icarus*, vol. 113, nr 1 (Jan. 1995), s. 2-26; ISSN 0019-1035

Wahlund, J.-E; Boström, R; Gustafsson, G.; Gurnett, D. A.; Kurth, W. S.; Pedersen, A.; Averkamp, T. F.; Hospodarsky, G. B.; Persoon, A. M.; Canu, P.; Neubauer, F. M.; Dougherty, M. K.; Eriksson, A. I.; Morooka, M. W.; Gill, R.; André, M.; Eliasson, L. och Müller-Wodarg, I.; *Cassini Measurements of Cold Plasma in the Ionosphere of Titan*; Science, vol. 308, nr. 5724 (13 Maj 2005), s. 986-989; ISSN 1095-9203

Wahlund, Jan-Erik och Boström, Rolf; *Titan får svenskt besök*; Forskning och Framsteg, vol. 39, nr. 5 (Jul-Aug. 2004), s. 16-21; ISSN 0015-7937

Wahlund, Jan-Erik; *Dimmorna över mystisk Titan börjar klarna*; Populär Astronomi, vol. 6, nr. 1 (Mar. 2005), s. 8-13; ISSN 1650-7177

Wahlund, Jan-Erik; *Ionospheric Response to Particle Precipitation within Aurora*; IRF Scientific Report, nr. 208 (Mar. 1992); ISSN 0284-1703-2 (0282-7468)

Waite, J. Hunter Jr.; Niemann, Hasso; Yelle, Roger V.; Kasprzak, Wayne T.; Cravens, Thomas E.; Luhmann, Janet G.; McNutt, Ralph L.; Ip, Wing-Huen; Gell, David; De La Haye, Virginie; Müller-Wodarg, Ingo; Magee, Brian; Borggren, Nathan; Ledvina, Steve; Fletcher, Greg; Walter, Erin; Miller, Ryan; Scherer, Stefan; Thorpe, Rob; Xu, Jing; Block, Bruce och Ken Arnett; *Ion Neutral Mass Spectrometer Results from the First Flyby of Titan*; Science, vol. 308, nr. 5724 (13 Maj 2005), s. 982-986; ISSN 1095-9203

Whitten, R. C.; Capone, L. A.; McCulley, L. och Michelson, P. F.; *The Upper Ionosphere of Titan*; *Icarus*, vol. 31, nr. 1 (Maj 1977), s. 89-96; ISSN 0019-1035

Yung, Yuk L.; *An Update of Nitrile Photochemistry on Titan*; *Icarus*, vol. 72, nr. 2 (Nov. 1987), s. 468-472; ISSN 0019-1035

Yung, Yuk L.; Allen, Mark och Pinto, Joseph P.; *Photochemistry of the atmosphere of Titan: Comparison between model and observations*; Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 55, nr. 3 (Jul. 1984), s. 465-506; ISSN 0067-0049

## Övrigt

Nationalencyklopedien

Jan Alsins (personlig kontakt)

Marina Galand (personlig kontakt)

Ingo Müller-Wodarg (personlig kontakt)

Jan-Erik Wahlund (personlig kontakt)

<http://www.space.irfu.se/> (Space Plasma Physics Research Programme [Rymdplasmafysik] vid Swedish Institute of Space Physics [IRF], Uppsala)

<http://www.space.irfu.se/cassini/> (Cassini-projektet på IRF [på engelska])  
el. [http://www.space.irfu.se/cassini\\_sv/](http://www.space.irfu.se/cassini_sv/) [på svenska])

<http://www-pw.physics.uiowa.edu/plasma-wave/cassini/home.html> (Cassini RPWS: Radio and Plasma Wave Science- instrumentgruppen IRF deltar i)

<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=34954> (Science & Technology: Instruments- överblick över instrumenten på Cassini)

<http://ciclops.lpl.arizona.edu/index.php> (Ciclops: Cassini Imaging- bilder från Cassini)

<http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm> (Cassini-Huygens hemsida på NASA)

<http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/index.html> (Cassini-Huygens hemsida på ESA)

```

%%%%%%%%%%
%
% Plotall.m
%
% Script that reads Cassini LP data and plots various terms for Titan
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset;

%%%%%%%% 1:st Plot Temperature %%%
%%%%%%%%%%
plot (Te, r, '-. ');
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Temperature [K] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0 50000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Making note
texth = text( dummy, dummy, '{ \bf T_e }' );
set( texth, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9] );

% Header
header_str = [ '\bf Cassini RPWS LP T_A 2004-10-26' ];
texth = text( dummy, dummy, header_str );
set( texth, 'Units', 'normalized', ...
    'Position', [0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18 );

%%%%%%%% 2:nd Plot (Electron density) %%%
%%%%%%%%%%
figure;

% Prepare data
r_Ne = (Rt_Ne-1) .* R_Titan;

% Plotting
semilogx( Ne, r, '-r' );
hold on;
semilogx( abs(Ne_20), r_Ne, 'b' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf [cm^{-3}] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0.1 10000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

```





```

semilogx( L_N2, r, '-r' );
semilogx( L_tot, r, 'k' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Cooling rate [eV cm^{-3} s^{-1}] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [1e-6 100] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'Methane', 'Nitogen', 'Total' )

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A 2004-10-26'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth,'Units','normalized', ...
      'Position',[0.2 1.03], ...
      'FontName', 'Helvetica', ...
      'FontSize', 18);

%% 5:th Plot (Energy) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( L_tot, r, '-.' );
hold on;
semilogx( Cond, r, 'r' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Energy rate [eV cm^{-3} s^{-1}] }' );
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' );
set( gca, 'XLim', [1e-6 1e8] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'Cooling', 'Conduction' )

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A 2004-10-26'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth,'Units','normalized', ...
      'Position',[0.2 1.03], ...
      'FontName', 'Helvetica', ...
      'FontSize', 18);

drawnow;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Tabell 5:** Detaljerad beskrivning av Plotall.m (för T<sub>A</sub>)

```

%%%%%%%%%%
%
% Plotboth.m
%
% Script that reads Cassini LP data and plots various terms for Titan
% for both inbound and outbound
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset;

t0 = t_sweep(1);
Dt = abs( t_sweep(length(t_sweep)) - t0 );
t1 = interp1( r, t_sweep, min(r) );
ind4 = find( t_sweep < t1 );
ind5 = find( t_sweep >= t1 );

%%%%%%%% 1:st Plot (Temperature) %%%%
%%%%%%%%%%
% Plotting
plot( Te(ind4), r(ind4), '-r' );
hold on;
plot( Te(ind5), r(ind5), '-k' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Temperature [K] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0 5e4] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Making note
texth = text( dummy, dummy, '{ \bf T_e }' );
set( texth, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP {Inbound (red), Outbound (black)}'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth,'Units','normalized', ...
    'Position',[0 1.05], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%%%%%%%% 2:nd Plot (Electron density) %%%%
%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( Ne(ind4), r(ind4), '-r' );
hold on;

```



```

% Plotting
semilogx( L_tot(ind4), r(ind4), '-r' );
hold on;
semilogx( L_tot(ind5), r(ind5), '-k' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '\bf Cooling rate [eV cm^{-3} s^{-1}] ')
ylabel( '\bf Altitude [km] ')
set( gca, 'XLim', [1e-10 100] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP {Inbound (red), Outbound (black)}'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth,'Units','normalized', ...
      'Position',[0 1.05], ...
      'FontName', 'Helvetica', ...
      'FontSize', 18);

%% 5:th Plot (Conduction) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( Cond(ind4), r(ind4), 'r' );
hold on;
semilogx( Cond(ind5), r(ind5), 'k' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '\bf Energy rate [eV cm^{-3} s^{-1}] ');
ylabel( '\bf Altitude [km] ');
set( gca, 'XLim', [1 1e7] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP {Inbound (red), Outbound (black)}'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth,'Units','normalized', ...
      'Position',[0 1.05], ...
      'FontName', 'Helvetica', ...
      'FontSize', 18);

drawnow;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Tabell 6:** Detaljerad beskrivning av Plotboth.m (för T<sub>A</sub>)

```

%%%%%%%%%%
%
% Plot_TaTb.m
%
% Script that reads Cassini LP data and plots various terms for Titan
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset;

%%% 1:st Plot Temperature %%%
%%%%%%%%%%
plot (Te_A, r_A, '-');
hold on;
plot (Te_B, r_B, '-r');
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '\bf Temperature [K] ')
ylabel( '\bf Altitude [km] ')
set( gca, 'XLim', [-5000 20000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T_B' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '\bf T_e ');
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
      'FontSize', [20], ...
      'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = [\bf Cassini RPWS LP T_A + T_B];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
      'Position',[0.2 1.03], ...
      'FontName', 'Helvetica', ...
      'FontSize', 18);

%%% 2:nd Plot (Electron density) %%%
%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( Ne_A, r_A, '-');
hold on;
semilogx( Ne_B, r_B, '-r');
hold off;
grid;

```

```

% Setting axes
xlabel( '{ \bf [cm^{-3}] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0.01 10000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T_B' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '{ \bf n_e }' );
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A + T_B'];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%% 3:rd Plot (Frequency) %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
figure;

% Plotting
semilogx( nu_e_A, r_A, '-.' );
hold on;
semilogx( nu_e_B, r_B, '-r' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Frequency [Hz] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [1e-4 100] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T_B' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '{ \bf \nu_e }' );
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A + T_B'];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%% 4:th Plot (Cooling) %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
figure;

```





```

%%%%%%%%%%
%
% Plot_TaT5.m
%
% Script that reads Cassini LP data and plots various terms for Titan
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset;

%%% 1:st Plot Temperature %%%
%%%%%%%%%%
plot (Te_A, r_A, '-');
hold on;
plot (Te_5, r_5, '-r');
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Temperature [K] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0 50000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T5' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '{ \bf T_e }' );
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = [ '\bf Cassini RPWS LP T_A + T5' ];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%%% 2:nd Plot (Electron density) %%%
%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( Ne_A, r_A, '-');
hold on;
semilogx( Ne_5, r_5, '-r');
hold off;
grid;

```

```

% Setting axes
xlabel( '{ \bf [cm^{-3}] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [0.1 10000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T5' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '{ \bf n_e }' );
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A + T5'];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%% 3:rd Plot (Frequency) %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
figure;

% Plotting
semilogx( nu_e_A, r_A, '-.' );
hold on;
semilogx( nu_e_5, r_5, '-r' );
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '{ \bf Frequency [Hz] }' )
ylabel( '{ \bf Altitude [km] }' )
set( gca, 'XLim', [1e-4 1000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'T_A', 'T5' )

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '{ \bf \nu_e }' );
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A + T5'];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%% 4:th Plot (Cooling) %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
figure;

```



```

%%%%%%%%%%
%
% Plot_comp.m
%
% Script that reads original and reduced Cassini LP data and
% plots comparing terms for different parameters on Titan
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset;

%%% 1:st Plot Temperature %%%
%%%%%%%%%%
% Plotting
plot (Te, r, 'r');
hold on;
plot (Te_red, r, '-');
hold off;
grid;

% Setting axes
xlabel( '\bf Temperature [K] ');
ylabel( '\bf Altitude [km] ');
set( gca, 'XLim', [0 50000] );
set( gca, 'YLim', [1000 6000] );

% Insert legend
legend( 'original', 'reduced')

% Making note
textx = text( dummy, dummy, '\bf T_e ');
set( textx, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [20], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T_A 2004-10-26'];
textx = text(dummy,dummy,header_str);
set( textx,'Units','normalized', ...
    'Position',[0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%%% 2:nd Plot (Electron density) %%%
%%%%%%%%%%
figure;

% Plotting
semilogx( Ne, r, '-');
hold on;
semilogx( Ne_red, r, 'r');
hold off;
grid;

```







```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Const_5.m
%
% Script that calculates and plots a timefactor for setting steady-state at Titan.
%
% Erik Wikström, Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, 2005.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

run Energy_5

%%%%%%%% Calculate timefactor
%%%%%%%%

% Setting konstant
C_T = 3/2*k_Boltz; %JK(-1)

% Editing parameter
factor_5 = (1./Ne_5 .* (abs(Cond_5) - L_tot_5)); %eVs(-1)

ind = find(factor_5==Inf | factor_5==-Inf);
factor_5(ind) = NaN;

% Calculating timefactor
dt_5 = C_T .* Te_5 ./factor_5/qe/1e6; %s

%%%%%%%% Ploting
%%%%%%%%

% Prepare plotting
dummy = 0.1;

clf;
close all;
cla reset

% Ploting
semilogx(dt_5,r_5,'-');
grid;

% Setting axes
xlabel('\bf [s]')
ylabel('\bf Altitude [km]')
set( gca, 'XLim', [1e-14 1e-3] );
set( gca, 'YLim', [900 5000] );

% Making note
texth = text( dummy, dummy, '{ \bf \tau}');
set( texth, 'Units', 'normalized', ...
    'FontSize', [24], ...
    'Position', [0.1 0.9]);

% Header
header_str = ['\bf Cassini RPWS LP T5 2005-04-16'];
texth = text(dummy,dummy,header_str);
set( texth, 'Units', 'normalized', ...
    'Position', [0.2 1.03], ...
    'FontName', 'Helvetica', ...
    'FontSize', 18);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Tabell 10:** Detaljerad beskrivning av Const\_5.m (Const.m för T5)