

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**Studium vlivu interakcí komet se sluneční korunou na jejich
fyzikálně-chemické vlastnosti**

Bakalářská práce

Evariste Boj

Školitel: RNDr. Petr Jelínek, Ph.D.

České Budějovice 2015/2016

Boj, E., 2016: Studium vlivu interakcí komet se sluneční korunou na jejich fyzikálně-chemické vlastnosti. [Study of the effects of the interaction of comets with the solar corona to their physical and chemical properties. Bc. Thesis, in Czech] - p. 43, Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem možných chemických reakcí, které mohou proběhnout na kometách při jejich průletu v blízkosti Slunce. V teoretické části práce jsou stručně popsány vlastnosti komet spolu s procesy, které mají vztah k chemickým procesům probíhajících ve vnitřní komě. Pro výpočet vzdálenosti komety od Slunce byla odvozena Keplerova rovnice a dále byl odvozen vztah pro průběh teploty při adiabatickém rozpínání sublimovaných plynů z jádra komety. V praktické části práce byla jako modelový příklad zvolena kometa C/1995 O1 Hale-Bopp. K odůvodnění navržených chemických reakcí byla vypočtena vzdálenost této komety od Slunce a na základě toho pak byla vypočtena teplota na povrchu komety a v její blízkosti. V závěru praktické části jsou pak navrženy chemické reakce pro vznik osmi sloučenin majících vztah k živé přírodě.

Annotation

The presented bachelor thesis presents possible chemical reactions that may occur in comets during their flyby near the Sun. The theoretical part of the thesis is devoted to the description of comets including the description of processes connected with chemical reactions ongoing in the inner coma. To calculate the distance between the comet and the Sun, we have derived the Kepler equation and then has been derived the formula for the temperature curve during the adiabatic expansion of sublimated gas out of the nucleus of the comet. In the practical part we used the comet C/1995 O1 Hale-Bopp as a model. To justify the proposed chemical reactions we have calculated the distance of C/1995 O1 Hale-Bopp from the Sun and based on this the surface temperature has been determined. In the end of the practical part of this bachelor thesis, we proposed chemical reaction for the creation of eight chemical compounds related to the living nature.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Evariste Boj

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Petru Jelínkovi za důvěru, kterou mi dal při výběru tématu a za jeho trpělivé vedení při sepisování této práce a také mému otci, Sylvainu Bojovi, že mě přivedl k fyzice.

Obsah

A. Teoretická část	1
1. Úvod	1
2. Komety	6
2.1 Původ komet.	7
2.2 Struktura komet	8
2.2.1 Jádru komety	9
2.2.2 Koma komety	10
2.2.3 Ohon komety	10
2.3 Popis vybraných komet	11
2.3.1. Elementy dráhy	11
2.3.2 Kometa C/2011 W3 Lovejoy	12
2.3.3 Kometa C/1995 O1 Hale-Bopp	13
3. Pohyb komety kolem Slunce	15
4. Fyzikální procesy probíhající na kometě	17
4.1 Procesy probíhající na povrchu komety	17
4.2 Procesy probíhající ve vnitřní komě komety	18
5. Chemické reakce probíhající na kometě.	21
5.1 Reakční mechanismy organických reakcí.	21
5.2 Rozdělení organických reakcí	22
5.2.1 Radikálové reakce	24
5.2.2 Iontové reakce	24
6. Praktická část	25
6.1 Úvod	25
6.2 Výpočet dráhy a povrchové teploty komety	26
6.3 Výpočet teploty ve vnitřní komě komety	28
6.4 sloučeniny nalezené na kosmických objektech	30
6.5 Vznik komplexních sloučenin na kometách	33
7. Závěr	38
8. Seznam obrázků.	40
9. Seznam tabulek	41
10. Seznam literatury	41

A. Teoretická část

1. Úvod

Již od dávných časů pozorovali lidé oblohu. Z počátku nejvíce poutalo jejich pozornost Slunce, Měsíc a hvězdy a jasné světelné padající objekty, které nyní nazýváme meteority a meteory, podle toho zda dopadnou nebo nedopadnou na Zemi. Později lidé rozpoznali mezi hvězdami odlišně se pohybující objekty - planety. Velkou pozornost na sebe strhávaly taktéž malé objekty, které se na obloze rychle pohybovaly, zvětšovaly se a posléze zmizely. Tyto objekty byly nazvány kometami. Byly natolik zajímavé, že v případě, že se objevily, byl tento jev zaznamenáván v kronikách, což historikům pomáhá při datování historických událostí.

Nejnápadnějším objektem na obloze je Slunce. Již dlouhá tisíciletí Slunce ohromovalo lidstvo a bylo proto předmětem zájmu lidí všude na světě. Ještě před objevením písma (Sumer, 3500 př.n.l.) se mnoho kultur oddávalo kultu slunečního disku. Pozůstatky tohoto kultu jsou patrné ještě dnes například megality ve Stonehenge či v Carnacu.



Obr. 1.1. Řady menhirů v Carnacu-Morbihan, Francie (mapio.net).

Velké sezónní rituály během slunovratů a rituály vzdávání díky k dobré úrodě jsou dnes považovány za sluneční rituály.

Ve starém Egyptě bůh slunce Ra (nebo také Amon-Ra), byl prezentován mužem nosícím solární disk na hlavě. V roce 1364 př.n.l. Amenofis IV vládl Egyptu a zcela proměnil církevní praktiky používané do této doby. Zakázal kult boha Amona a nastolil kult boha Slunce jménem Aton, od této chvíle se vladař nechal nazývat Akhenatonem (ten, který se líbí slunečnímu disku). U všech indoevropských národů nacházíme kult slunečních bohů jako například Apollo Phoibos (Apolo zářící), Římský Sol Invictus (neporažené Slunce) a perský Mithras.

Slunce bylo též uctíváno Inký a Aztéky v Jižní a Střední Americe. Ve Francii ještě v 17. století, termín Slunce-soleil symbolizoval královskou moc. Ludvík XIV si nechal vyzdobit palác ve Versailles slunečními symboly a nechával se prezentovat jako “ le roi soleil ” (král slunce).

Slunce má i dnes stále svou symbolickou hodnotu pro mnohé národy, jak je patrné u vlajek států, např. Argentina, Japonsko, Kiribati.

Slunce je největším tělesem sluneční soustavy. Svou velikostí a hmotností převyšuje všechna ostatní tělesa naší sluneční soustavy, představuje 99,9% její hmotnosti. Jádro Slunce se vytvořilo gravitačním zhroucením náhodného shluku částic vzniklého v mračnech molekulárního vodíku při dosažení kritické hodnoty hmotnosti. Při adiabatickém zhroucení došlo k ohřevu tohoto jádra a vývoj Slunce přešel do stadia protohvězdy, v jejímž jádru pak došlo k zažehnutí jaderných reakcí.

Základní fakta o Slunci:

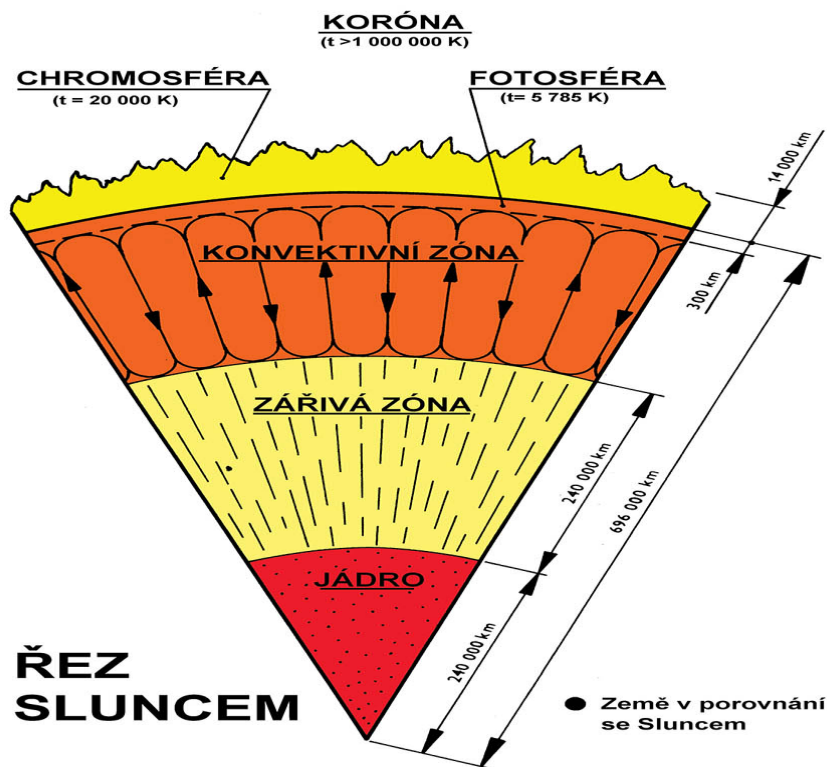
Stáří:	$4,5 \cdot 10^9$ let
Hmotnost:	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg (cca 330 000 hmotností Země)
Poloměr:	696 000 km (cca 109 poloměrů Země)
Průměrná hustota:	$1408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Průměrná vzdálenost od Země:	1 AU = $150 \cdot 10^6$ km
Gravitační zrychlení na povrchu:	$274 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Úniková rychlost na povrchu:	$618 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
Zářivost:	$3,84 \cdot 10^{26}$

Perioda rotace na rovníku:	26 dní
Úbytek hmotnosti za sekundu:	$5 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Efektivní teplota fotosféry:	5778 K

Vnější vrstvy Slunce

Struktura Slunce není stejnorodá, můžeme ji rozčlenit na několik vrstev, jak je znázorněno na obr. 1.2. Vrchní vrstvy Slunce tvoří:

Fotosféra – sluneční vrstva o tloušťce 100 až 200 km a teplotě 5800 K představuje viditelný povrch Slunce, na němž pozorujeme např. granulace, sluneční skvrny nebo protuberance.



Obr. 1.2 Sluneční vrstvy (nevsedni-svet.cz)

Chromosféra – sluneční vrstva o tloušťce menší než 4000 km, jejíž teplota se pohybuje v rozmezí 6000 K až 30 000 K

Sluneční koróna – vrchní část sluneční atmosféry, která má tloušťku několika milionů kilometrů. Je rozdělena na tři vrstvy F, K, E. Teploty ve sluneční koruně jsou extrémně

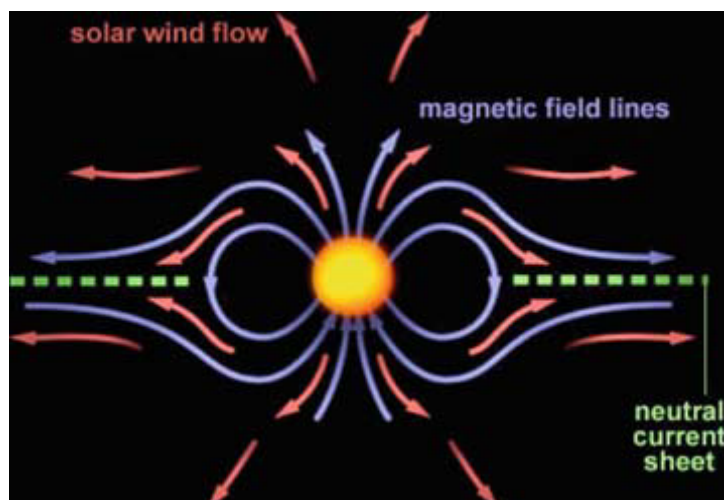
vysoké a mohou dosahovat až 3 MK, na rozdíl od teploty slunečního povrchu (5770 K) a teploty chromosféry (7000 K).

Tabulka 1.1 Chemické složení fotosféry (Dougerty, 2001)

Prvek	Relativní hmotnost
Vodík: H ₂	73,46
Helium: He	24,85
Kyslík: O ₂	0,77
Uhlík: C	0,29
Železo: Fe	0,16
Neon: Ne	0,12
Dusík: N ₂	0,09
Křemík: Si	0,07
Hořčík: Mg	0,05

Sluneční vítr

Sluneční vítr je tvořen plazmatem, které působením magnetického pole Slunce je uvolňováno ze sluneční koróny, viz obr. 1.3. Je tvořeno částicemi, z nichž největší podíl mají protony a elektrony. Teoretické vysvětlení těchto procesů podal (Parker, 1958).



Obr. 1.3. Vznik slunečního větru (spacephysics.ucr.edu).

Vlastnosti slunečního větru jsou uvedeny v tab. 1.2.

Tabulka 1.2 Parametry slunečního větru ve vzdálenosti 1 AU od Slunce

	průměr	medián	minimum	maximum
Rychlost (km/s)	440	415	260	2140
Hustota (cm ⁻³)	7,3	5,7	0,1	135
Teplota (K)	83 000	69 000	6 000	3 800 000
mag.indukce (nT)	6,7	5,9	0,26	72
He ⁺⁺ /H ⁺ (%)	4	4,1	0,1	30

2. Komety

Komety jsou astronomické objekty, které se od asteroidů liší tím, že komety mají ve svém okolí plynný obal tvořený sublimujícím ledem a prachovými částicemi, které tvoří jejich jádro. Studium komet nám dává možnost blíže poznat procesy, probíhající při vzniku sluneční soustavy.

Komety se pohybují většinou po velice výstředných eliptických nebo parabolických drahách kolem Slunce, které v prvním přiblížení určuje jejich dráhy. V závislosti na gravitačním působení planet se může dráha komet změnit na hyperbolickou a následkem čehož, kometa definitivně opustí sluneční soustavu. Na Zemi pozorujeme především ohon komet, obr. 2.1, který se skládá z osvětlených částic prachu a zářícího plynového oblaku.



Obr. 2.1. Obrázek komety C/1975 V1 West s bílým prachovým a modrým plynovým ohonem (www.zmescience.com)

Experimentální podklady pro studium struktury komet jsou získávány především na podkladě astronomických a spektroskopických pozorování. Dnes se tato oblast výzkumu komet stala samostatným oborem. Díky tomu je v současné době možno data o poloze a složení komet získat z publikací. Proto nebylo třeba vyhledávat spektra, abychom získali informace o složení komet.

Komety jsou klasifikovány podle svých oběžných dob (period) na krátkoperiodické, dlouhoperiodické a jednonávratové.

Krátkoperiodické komety mají oběžné doby kratší než 200 let a jejich dráha se nachází v rovině ekliptiky, stejně tak jako u planet.

Dlouhoperiodické komety mají oběžné doby delší, ale stále zůstávají gravitačně závislé na Slunci. Jejich dráhy jsou veliké a jsou rozloženy na obloze bez jakéhokoli směru. Pro dlouhoperiodické komety byla navržena řada různých modelů vysvětlujících, proč jsou komety odkloněny do velmi excentrických drah. Patří mezi ně přiblížení k jiným hvězdám na cestě Slunce naší Galaxií, působení hypotetického průvodce Slunce Nemesis a nebo působení, zatím neznámých transneptunických těles, jako například hypotetické Planety X. Nejpřijímanější hypotéza je, že k těmto poruchám drah dochází náhodně vzájemným ovlivňováním se těles v Oortově mračnu.

Jednonávratové komety mají parabolické či hyperbolické oběžné dráhy, které je vynesou navždy mimo sluneční soustavu po jediném průletu okolo Slunce. Opačným extrémem je krátkoperiodická Enckeova kometa, která má oběžnou dráhu, která jí nedovolí se vzdálit od Slunce dál než k oběžné dráze Jupitera.

2.1 Původ komet

Rozdělení komet do dvou skupin dle jejich periodicity vedlo astronomy postulovat existenci dvou na sobě nezávislých zásobníků komet a tím jsou Kuiperův pás a Oortův oblak.

Oortův oblak: Oortův oblak byl pojmenován podle holandského astronoma Jana Hendrika Oorta (1900-1992), který vyslovil v průběhu 50. let teorii, podle které existuje rezervoár malých objektů nacházejících se na konci sluneční soustavy ve vzdálenosti jdoucí od 20 000 do 100 000 AU (až 1,5 ly) (Oort, 1950). Je velmi pravděpodobné, že Oortův oblak se vytvořil v raném stádiu vytváření sluneční soustavy. Externí hranice Oortova oblaku je také gravitační hranicí slunečního systému. Oortův oblak je zásobníkem pro komety s dlouhou periodou a obsahuje stovky miliard kosmických objektů.

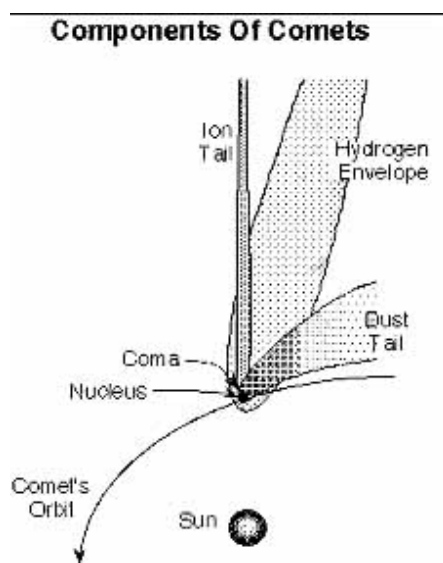
Kuiperův pás: Gérard Kuiper (1905-1973) v roce 1951 vyslovil hypotézu, podle které existuje za drahou Neptunu oblast nacházející se v zóně ekliptiky, ve kterém se nachází

jádra komet a asteroidy všech velikostí. Tato hypotéza umožňuje vysvětlit původ komet s krátkou periodou. Tento pás se velmi pravděpodobně nachází zhruba ve vzdálenosti 30 AU až 100 AU od Slunce.

Odhaduje se, že Kuiperův pás obsahuje více než 200 milionů malých ledových těles, která se mohou stát kometami. Jde o podobné seskupení těles, jako je hlavní pás planetek, ovšem mnohem větší, přibližně 20 krát širší a 20 až 200 krát hmotnější (Jewitt and Senay, 1994). Podobně jako hlavní pás asteroidů se Kuiperův pás sestává zejména z malých těles, která zde zůstala z počátku vývoje sluneční soustavy. Zatímco hlavní pás se skládá převážně z kamenných a kovových těles, objekty Kuiperova pásu, též označované zkratkou KBO (z anglického výrazu Kuiper Belt Objects), jsou tvořeny především zmrzlými prchavými látkami jako metan, amoniak či voda. Jeho součástí jsou mimo jiné také tři trpasličí planety – Pluto, Haumea a Makemake. Existence Kuiperova pásu byla potvrzena v roce 1992, když vědci našli těleso 1992 QB1 ve vzdálenosti 30 AU.

2.2 Struktura komet

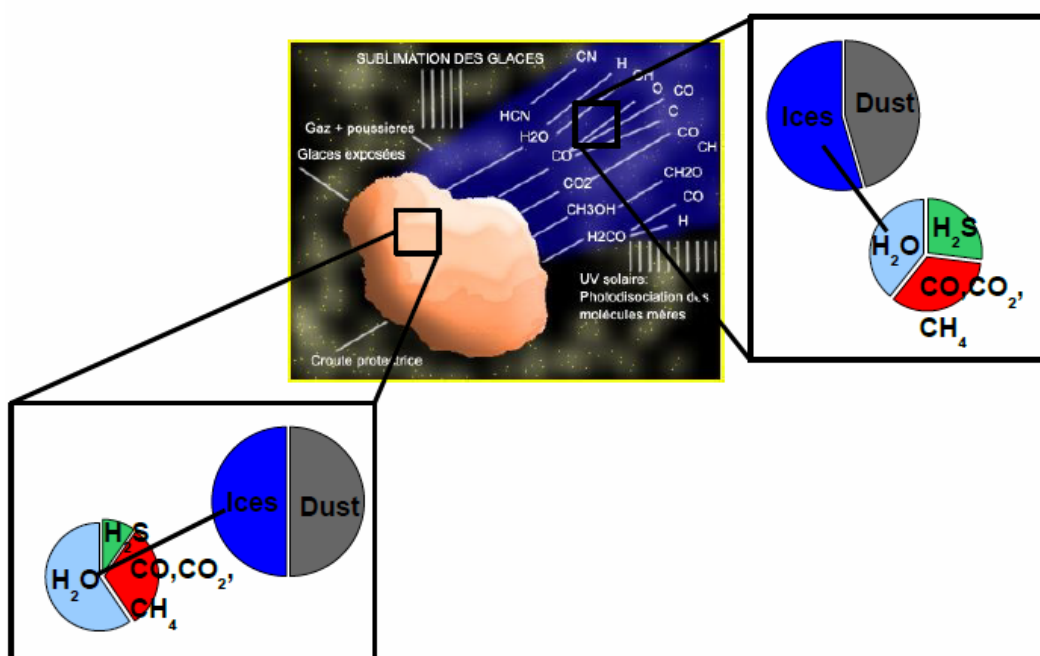
Komety se skládají z jádra, komy a ohonu (Samarasinha et al., 2004). Jádro komety představuje pevnou část komety, zatímco koma a ohon komety představují její plynnou část, která je viditelná na obloze viz obr. 2.2. Většinu znalostí o pohybu komet máme z jejich pozorování ze Země. O jejich složení máme informace z analýzy spekter.



Obr. 2.2. Schéma struktury komety (abyss.uoregon.edu)

2.2.1 Jádru komety

Jádru komety tvoří pevnou část komety o velikosti v řádu kilometrů až desítek kilometrů (většina kolem 16 km) (Huebner, 1990). Kometární jádra vznikala kondenzací uhlíkatých a křemičitých látek na periférii systému planet, na které namrzala voda. Díky tomu je jádro komety tvořeno prachovými částicemi, které jsou spojeny vodním ledem, tuhým oxidem uhličitým, oxidem uhelnatým, dalšími zmrzlými plyny, které pak nacházíme v komě a částečně i v ohonu komety, viz obr. 2.3. V prachových částicích je obsažen Mg, Si, C, O (Wang et al., 2005).



Obr. 2.3. Struktura jádra komety (obspm.fr).

Kometární jádra patří mezi nejčernější známé objekty ve sluneční soustavě. Sonda Giotto například zjistila, že jádro Halleyovy komety odráží přibližně 4 % dopadajícího světla. Sonda Deep Space 1 podobně zjistila, že povrch komety Borrelly odráží jen mezi 2,4 % až 3,0 % dopadajícího světla. Pro porovnání, asfalt odráží 7 % dopadajícího světla. Všeobecně se zastává názor, že tuto tmavou povrchovou látku tvoří složité organické sloučeniny s dlouhým řetězcem, které zůstávají na povrchu komety, zatímco teplo ze Slunce vypuzuje prchavé složky. Velmi tmavý povrch jádra komet způsobuje silnou absorpci slunečního záření a tím i ohřev jádra komet. V roce 1996 se překvapivě zjistilo,

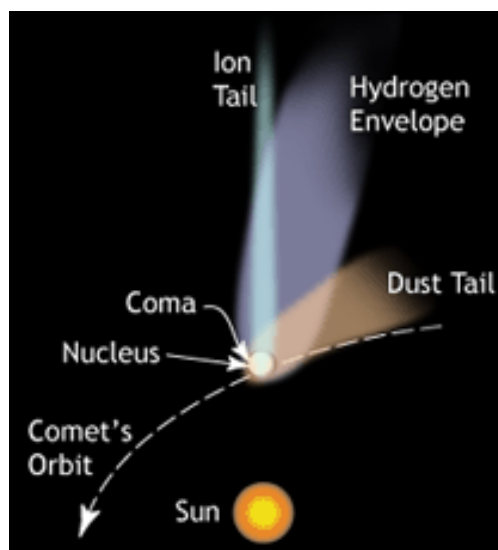
že komety vyzařují i rentgenové záření (Lise et al., 1998), které je pravděpodobně generováno srážkami vysokoenergetických iontů ve slunečním větru s kometárními atomy a molekulami.

2.2.2 Koma komety

V případě, že se kometa dostane do blízkosti Slunce, dochází k sublimaci jádra (Jewitt and Senay, 1994). Vzniká tak koma, představující plynnou část komety nacházející se v okolí jádra komety. Uvolňované částice difundují přes tenkou porézní povrchovou vrstvu a dochází tak k úniku vody a dalších plynných sloučenin, včetně úniku prachových částic. Při interakci plynných sloučenin komy se slunečním zářením dochází k částečné fotoionizaci a ve větších vzdálenostech od jádra komy potom navíc dochází k výměně nábojů se slunečním větrem. Při vzájemných srážkách molekul v komě dochází k chemickým reakcím, jejichž mechanismus je značně odlišný od mechanismu chemických reakcí probíhajících v pozemských podmínkách. Chemické reakce v komě probíhají v silně zředěném prostředí, kde jsou jen částečně splněny podmínky termodynamické rovnováhy. Strukturu komy proto rozdělujeme na vnitřní a vnější část, podle toho nakolik je v obou částech splněna podmínka termodynamické rovnováhy.

2.2.3 Ohon komety

Ve větší vzdálenosti od jádra komety se koma rozděluje a přechází do části, kterou nazýváme ohon, obr. 2.4. U komety, která má jádro o průměru kolem 50 km, může mít



Obr. 2.4. Obrázek komety s bílým prachovým a modrým plynovým ohonem (cse.ssl.berkeley.edu).

ohon větší než Slunce a může dosáhnout délky 150 milionů km i více.

Existují čtyři druhy ohonů, z toho dva jsou viditelné:

1) **Plynný** ohon je tvořen sublimovanými plyny. Tyto plyny se pohybují velmi rychle a unikají směrem od Slunce, vypadá jako stín komety, protože je odtlačován slunečním větrem. Ohon komety je rovný a je převážně tvořen plazmatem, teplými plyny a ionizovanými plyny jemně modré barvy.

2) **Prachový** ohon je tvořen prachovými částicemi, které se pohybují daleko pomaleji než plyny a proto je prachový ohon zakřiven směrem k dráze komety.

3) **třetí** ohon je pozorovatelný pouze optickými přístroji. Je tvořen molekulárním vodíkem nebo sodíkem.

4) Některé komety mají **anti ohon**, je tvořen objemnějšími částicemi než ostatní ohony, proto jsou méně dotčené radiačním tlakem Slunce, tak částice antiohonu sledují dráhu komety.

2.3 Popis vybraných komet

2.3.1. Elementy dráhy

Jednoznačný popis dráhy nějakého tělesa ve vesmírném prostoru vyžaduje stanovení tzv. elementů dráhy, které určují velikost i tvar dráhy a její orientaci vzhledem ke smluvené rovině, viz obr 2.5. U těles sluneční soustavy je to rovina dráhy Země, tedy rovina proložená ekliptikou. Jednotlivé elementy eliptické dráhy jsou:

Ω - délka vzestupného uzlu, je oblouk mezi přímkou procházející Sluncem a jarním bodem a tzv. Uzlovou přímkou tj. průsečnicí roviny dráhy s rovinou ekliptiky.

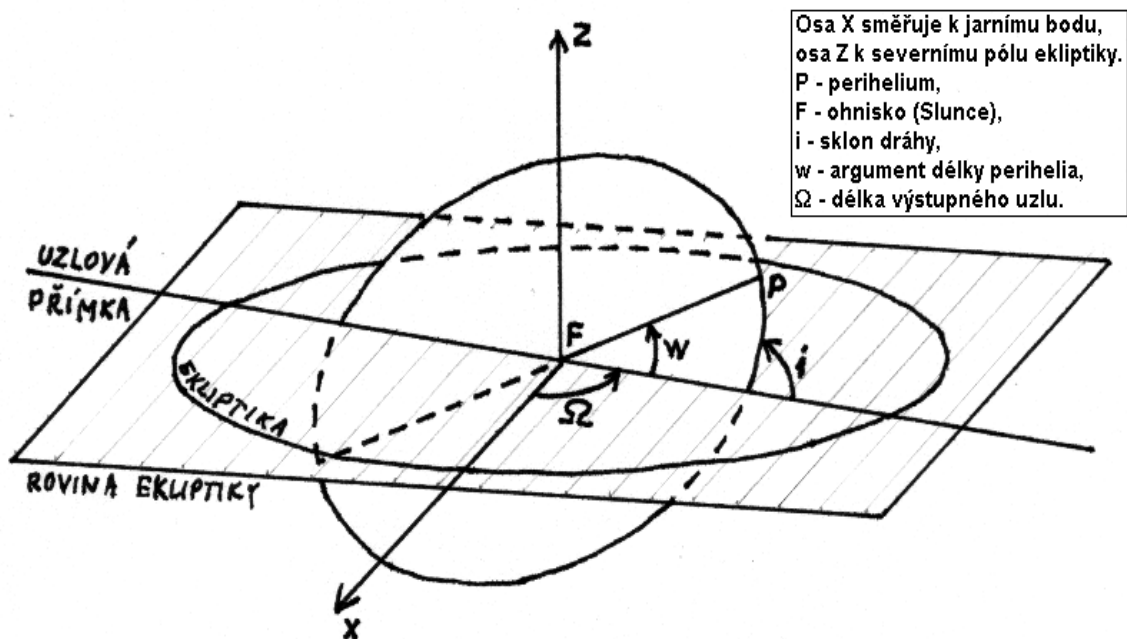
i sklon dráhy, je úhel sevřený rovinou ekliptiky s rovinou dráhy

ω - argument perihelu, čili délka perihelu ve dráze, je úhel mezi průsečnicí obou rovin a poloosou dráhy, měřený od směru výstupního uzlu k perihelu, nabývá hodnot 0° až 360°

a - velká poloosa dráhy, vyjadřuje střední vzdálenost kosmického tělesa od těžiště soustavy.

e - lineární excentricita dráhy, vyjadřuje relativní velikost odchylky dráhy tělesa od dokonalé kružnice.

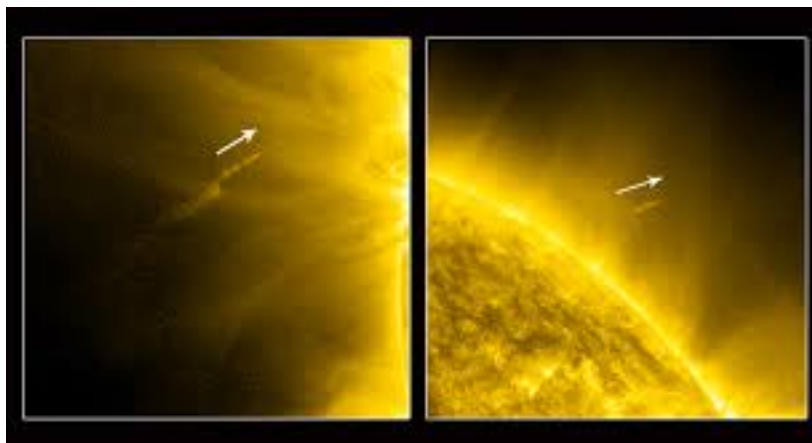
T - okamžik průchodu periheliem, je okamžik průchodu tělesa periheliem, umožňuje určit okamžitou polohu tělesa ve dráze.



Obr. 2.5 Elementy dráhy pro popis pohybu komety kolem slunce (nebmech.astronomy.cz).

2.3.2 Kometa C/2011 W3 Lovejoy

Kometa C/2011 W3 Lovejoy je nejdůležitější sungrazer kometa a první kometa, která byla detekována v rentgenové oblasti dalekohledem (Hinode-2007). Sungrazer kometa je název komety, která prochází během svého perihelia extrémně blízko Slunce a občas prolétne i pouhých několik tisíc kilometrů od slunečního povrchu. Perihélium komety C/2011 W3 Lovejoy bylo pouhých 0,2 R_S od fotosféry. Bylo to poprvé, kdy bylo možné zpozorovat a změřit důsledky průchodu komety korunou. Dráhové elementy komety C/2011 W3 Lovejoy jsou popsány níže (Sekanina, Chodas, 2012).



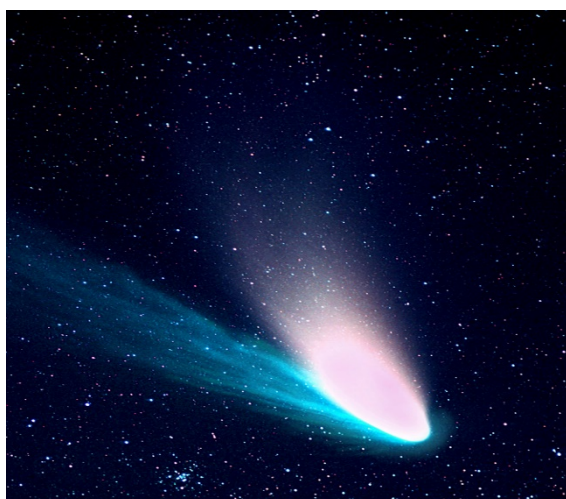
Obr. 2.6. Průlet komety C/2011 W3 Lovejoy sluneční korunou (nasa.gov).

Tabulka 2.1. Dráhové elementy komety C/2011 W3 Lovejoy (<http://ssd.jpl.nasa.gov>)

elementy	hodnoty	Směrodatná odchylka	jednotka
e	0,99993	$2,236 \cdot 10^{-7}$	
a	78,68294	0,24975	AU
q	0,00555	$1,0909 \cdot 10^{-7}$	AU
i	134,35581	0,00180	stupeň
Ω	326,36915	0,00419	stupeň
peri	53,50921	0,00307	stupeň
M	359,98586	$6,7391 \cdot 10^{-5}$	stupeň
t_p	2455911,51181	$6,2161 \cdot 10^{-5}$	JD
perioda	697,96	3,323	rok
Q	157,36033	0,49948	AU

2.3.3 Kometa C/1995 O1 Hale-Bopp

Kometa C/1995 O1 známa pod názvem C/1995 O1 Hale-Bopp je považována za nejpozorovanější kometu XX. století. Je také jednou z nejjasnějších komet posledních desetiletí. Byla vidět pouhým okem po dobu 18 měsíců, což je rekord, v porovnání s předešlým rekordem, zaznamenaným Velkou Kometou z roku 1811.



Obr. 2.7. Obrázek komety C/1995 O1 Hale-Bopp s bílým prachovým a modrým plynovým ohonem (www.celestronimages.com 1997).

Tabulka 2.2. Hodnoty dráhových elementů komety C/1995 O1 Hale-Bopp
(<http://ssd.jpl.nasa.gov/>)

elementy	hodnoty	Směrodatná odchylka	jednotka
e	0,99508	$8,9166 \cdot 10^{-7}$	
a	185,8643	0,0338	AU
q	0,91413	$7,734 \cdot 10^{-7}$	AU
i	89,43015	$9,3333 \cdot 10^{-6}$	stupeň
node	282,47085	$6,0982 \cdot 10^{-6}$	stupeň
peri	130,58949	$5,6168 \cdot 10^{-5}$	stupeň
M	359,97116	$7,8823 \cdot 10^{-6}$	stupeň
t_p	2450539,63729	$3,2687 \cdot 10^{-5}$	JD
perioda	2533,97	0,6919	rok
Q	370,81452	0,067501	AU

3. Pohyb komety kolem Slunce

Z fyzikálního hlediska je pohyb komety popsán v prvním přiblížení diferenciálními rovnicemi popisujícími pohyb hmotné částice v centrálním poli. Z druhého Keplerova zákona plyne, že plošná rychlost je konstantní. Proto pro rychlosti v_a, v_p ve vzdálenosti Q, q komety od Slunce v aféliu a perihéliu platí:

$$v_a Q = v_p q. \quad (3.1)$$

Ze zákona zachování energie plyne pro rychlosti v_a, v_p vztah:

$$\frac{1}{2}mv_a^2 - \kappa \frac{mM}{Q} = \frac{1}{2}mv_p^2 - \kappa \frac{mM}{q}, \quad (3.2)$$

kde M je hmotnost Slunce a m je hmotnost komety. Po dosazení do vztahu (3.2) za v_a ze vztahu (3.1) dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_p^2 \frac{q^2}{Q^2} - \kappa \frac{mM}{Q} &= \frac{1}{2}mv_p^2 - \kappa \frac{mM}{q}, \\ \kappa M \frac{Q-q}{qQ} &= \frac{1}{2}v_p^2 \left(\frac{Q^2 - q^2}{Q^2} \right). \end{aligned}$$

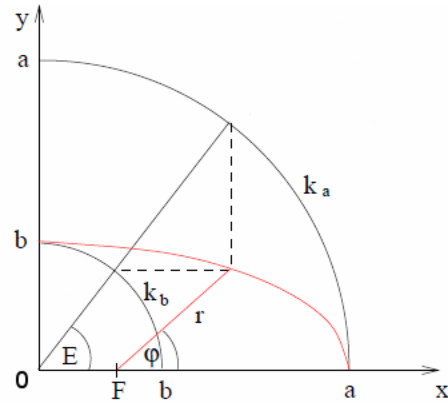
Pro rychlost v perihéliu:

$$v_p = \sqrt{\frac{2\kappa M}{q+Q} \frac{Q}{q}}. \quad (3.3)$$

Pro plošnou rychlost w platí vztah:

$$w = \frac{1}{2}v_p q = \frac{a-e}{2} \sqrt{\frac{2\kappa M}{a} \frac{a+e}{a-e}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\kappa M}{a} (a^2 - e^2)} = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{2\kappa M}{a}}, \quad (3.4)$$

kde a, b jsou hlavní a vedlejší poloosy eliptické dráhy komety, jak je patrné z obr. 3.1, na němž se Slunce nachází v ohnisku F elipsy. Proměnná e je tzv. lineární výstřednost pomocí níž jsme dosadili za Q a q vztahy $Q = a + e$ a $q = a - e$.



Obr. 3.1. Znázornění polohy tělesa a excentrické anomálie E pro odvození vztahů pro výpočet dráhy.

Při dalším odvozování vyjdeme z obr. 3.1, z něhož je vidět, že pro souřadnice x a y určující polohu komety vůči ohnisku F platí:

$$x = a \cos E - e, \quad (3.5)$$

$$y = b \sin E, \quad (3.6)$$

přičemž vzdálenost r od tohoto ohniska je podle Pythagorovy věty rovna

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (3.7)$$

Obsah plochy S opsané průvodičem za dobu t pak můžeme podle vztahu (3.4) a obr. 3.1 vyjádřit pomocí tzv. excentrické anomálie E ve tvaru:

$$S = wt = \frac{bt}{2} \sqrt{\frac{2\kappa M}{a}} = \left(\frac{a^2 E}{2} - \frac{ae \sin E}{2} \right) \frac{b}{a} = \frac{ab}{2} E - \frac{be}{2} \sin E,$$

kde E je vyjádřeno v radiánech. Po vynásobení tohoto vztahu $2/ab$ dostaneme Keplerovu rovnici:

$$\sqrt{\frac{\kappa M}{a^3}} t = E - \frac{e}{a} \sin E,$$

kteou vyjádříme ve vhodnějším tvaru pro další výpočet jako:

$$E - \varepsilon \sin E = Kt, \quad (3.8)$$

kde ε je numerická výstřednost:

$$\varepsilon = \frac{e}{a} \quad (3.9)$$

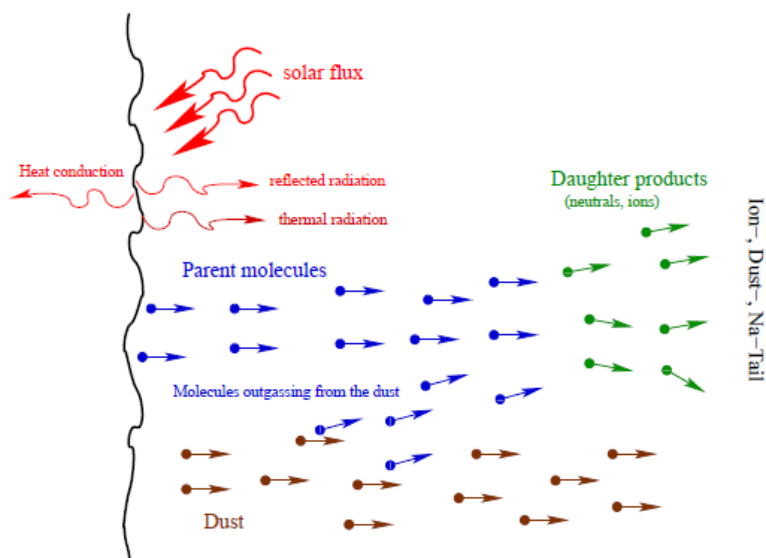
a konstanta K je rovna:

$$K = \sqrt{\frac{\kappa M}{a^3}}. \quad (3.10)$$

4. Fyzikální procesy probíhající na kometě

4.1 Procesy probíhající na povrchu komety

Struktura jádra představuje pórovitou strukturu ledu a prachu, ze které sublimací unikají těkavé složky ledu, které vytlačují z pórů přítomné prachové částice obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schematické zobrazení procesů vedoucích ke vzniku komy a ohonu (částice plynu - modrá a zelená, částice prachu - hnědá) (Helbert, 2002).

Dominantní složkou ledu jsou molekuly vody a další těkavé látky jako jsou CO , CO_2 , HCN , N_2 (Privalnik, 2002). Sublimaci z povrchu komety ve vzdálenosti r od Slunce popisuje vztah (Lewis, 1997) :

$$\frac{(1-A)F_{\odot}}{r^2} = 4\varepsilon\sigma T_s^4 + 4\varepsilon\sigma T_E^4, \quad (4.1)$$

kde výraz na levé straně rovnice představuje absorbovanou sluneční energii a vztah na pravé straně je tepelná emise. T_s je povrchová teplota, T_E je efektivní kinetická teplota, F_{\odot} je sluneční konstanta, ε je teplotní emisivita, A je albedo (odrazivost) a σ je Stefan - Boltzmannova konstanta. Když se kometa přiblíží ke Slunci, převládne vypařování a vztah (4.1) je možno upravit na tvar (Lewis, 1997):

$$\frac{(1-A)F_{\odot}}{r^2} = 4\varepsilon\sigma T_s^4 + q_e \frac{dm}{dt}, \quad (4.2)$$

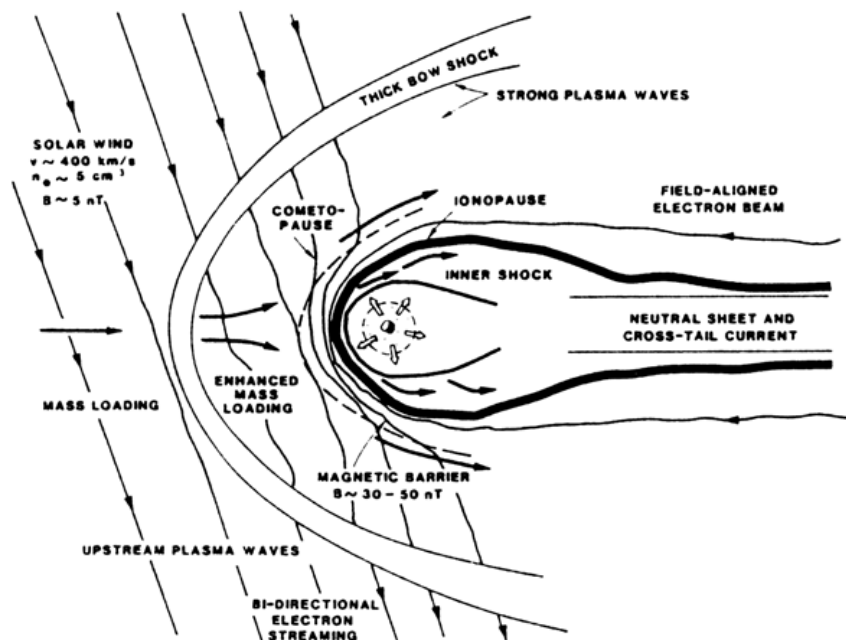
kde q_e je výparné latentní teplo ledu a dm/dt představuje hmotnostní úbytek jádra komety. Výpočet povrchové teploty podle tohoto vztahu je poměrně složitý. Při zanedbání hmotnostního úbytku můžeme však vztah (4.2) upravit na tvar, který použil (Sekanina, Chodas, 2012) ve své práci:

$$T = \frac{280}{\sqrt{R}}, \quad (4.3)$$

kde vzdálenost od Slunce je vyjádřena v AU.

4.2 Procesy probíhající ve vnitřní komě komety

Po sublimaci prachových částic a molekul na povrchu jádra komety dochází k jejich expanzi do okolního prostoru a vytvoří se koma. Ve vesmírném prostoru se částice komy setkávají se slunečním větrem obsahujícím H^+ , vzniká složitá struktura znázorněná na obr. 4.2.



Obr. 4.2. Interakce komety se slunečním větrem (Mendis, 1988).

Pro matematický popis je však takto složitá struktura zjednodušena tím, že uvažována pouze část komy, v níž dochází k poměrně častým interakcím a lze komu popsat jako kapalinu tvořenou neutrálními částicemi, ionty a elektrony. Za předpokladu

stacionárního, sféricky symetrického pohybu částic v komě dostaneme ze zákonů zachování počtu částic, hmoty, hybnosti a energie soustavu diferenciálních rovnic, které mají pro jednotlivé složky komy následující tvar (Rodgers et al, 2005) :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n v) = N, \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \rho v) = M, \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \rho v^2) + \frac{dP}{dr} = F, \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 v \left(\frac{\rho v^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} P \right) \right] = G + Fv + \frac{1}{2} Mv^2, \quad (4.7)$$

kde r je vzdálenost komety od Slunce, $n(r)$ je číselná hustota částic, $\rho(r)$ je hmotová hustota částic, v je rychlost částic, P je tlak, γ je poměr specifických tepel, N je rychlost generace počtu částic, M je hmotová rychlost generace, F je rychlost generace částic s hybností, G je rychlost generace tepla.

Za předpokladu, že se částice chovají jako ideální plyn, může být vztah (4.4) upraven derivací na tvar:

$$\frac{dn_s}{dr} = \frac{N_s}{v} - \frac{n_s}{v} \frac{dv}{dr} - \frac{2n_s}{r}, \quad (4.8)$$

kde index s označuje uvažovanou složku. Podobně lze upravit (5.5) pro hmotnostní hustotu $\rho(r)$:

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{M}{v} - \frac{\rho}{v} \frac{dv}{dr} - \frac{2\rho}{r}. \quad (4.9)$$

Po úpravě odvodíme rovnice pro rychlost a teplotu neutrálního plynu:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{1}{\rho v^2 - \gamma P} \left(Fv - (\gamma - 1)G - Mv^2 + \frac{2\gamma P v}{r} \right), \quad (4.10)$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{2T}{r} + \frac{1}{nk v} \left(Fv - Mv^2 - NkT + \frac{dv}{dr} (nkT - \rho v^2) \right). \quad (4.11)$$

Každá ze tří kapalin v komě (neutrální částice, ionty a elektrony) má svou teplotu a podobné rovnice mohou být odvozeny pro dT_i/dr a dT_e/dr .

Řešení výše uvedených rovnic představuje poměrně složitý numerický výpočet, proto byla v této práci vnitřní koma rozdělena na část blízkou jádru komety a na část vzdálenou. V blízké části komy lze použít představu toho, že plynné a prachové složky komy unikající z jádra vytváří kolem jádra zhruba kulový oblak, který se adiabaticky

rozpíná, čímž dochází k jeho ochlazení. Předpoklad adiabatického děje je oprávněný díky tomu, že se odehrává ve vakuu a navíc velmi rychle.

Při odvozování vztahu pro teplotu v této části komy vyjdeme z představy kulové vrstvy o tloušťce Δr , která rovnoměrně expanduje. Pokud je tato tloušťka uvažovaná kulové podstatně menší, nežli poloměr kulové slupky můžeme psát:

$$V(r) = 4 \pi r^2 \Delta r. \quad (4.12)$$

Pro adiabatický děj platí vztahy (Kvasnica, 1965) :

$$p \cdot V^\gamma = p_s \cdot V_s^\gamma \quad (4.13)$$

a

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_s V_s}{T_s}, \quad (4.14)$$

kde index s označuje příslušnost označené veličiny k povrchu a γ je Poissonova konstanta. Ze vztahů (4.12) až (4.14) pak dostaneme

$$T = \frac{p}{p_s} \frac{V}{V_s} T_s = \left(\frac{V_s}{V} \right)^\gamma \frac{V}{V_s} T_s = \left(\frac{V_s}{V} \right)^{\gamma-1} T_s = \left(\frac{r_s}{r} \right)^{2\gamma-2} T_s. \quad (4.15)$$

Pro oblast vzdálenější od jádra komy již tuto silně zjednodušující představu nelze použít. Proto budou v praktické části práce použity výsledky numerického řešení soustavy diferenciálních rovnic (4.4) až (4.11), které publikoval (Combi, 2002).

5. Chemické reakce probíhající na kometě

Studium chemie komet umožňuje hlubší pochopení procesů probíhajících na kometě.

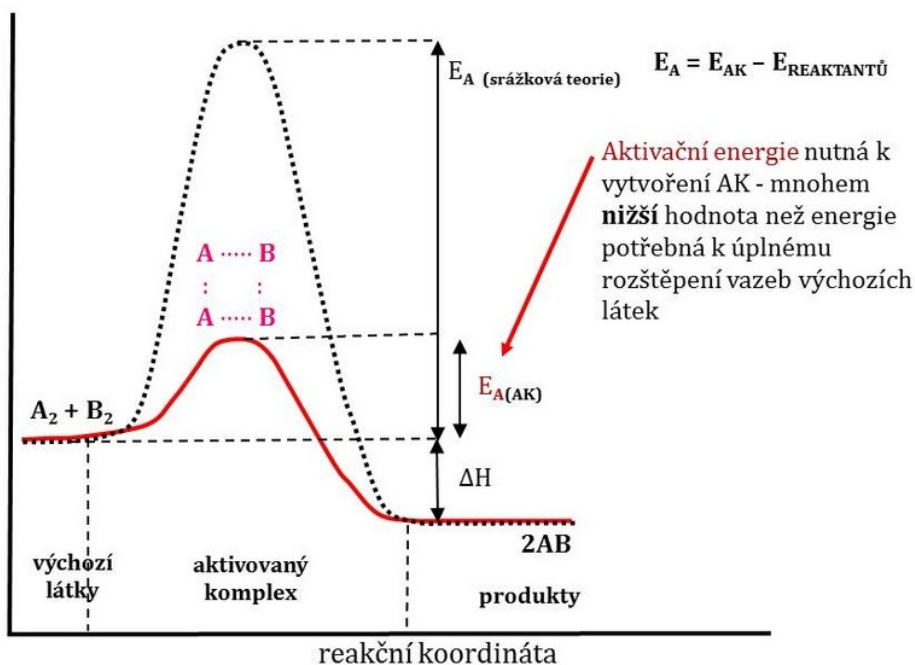
Komety nám nabízejí náhled na chemii jejího mateřského mračna, ze kterého vznikla naše sluneční soustava

Existují domněnky (Chyba and Sagan, 1997), že při dopadu komet byly přeneseny prebiotické molekuly na Zemi.

5.1 Reakční mechanismy organických reakcí

Na atomární úrovni lze na reakci nahlížet jako na sérii srážek doprovázenou zánikem původních a vznikem nových vazeb. Použijeme k tomu model chemické reakce vycházející z chemické kinetiky.

Chemická kinetika vychází z představy srážkové teorie a teorie aktivačních komplexů. Oba mechanismy jsou poněkud odlišné, jak je patrné z obr. 5.1.



Obr. 5.1. Změna energie v průběhu chemické reakce podle teorie srážek a teorie aktivovaného komplexu (eluc.kr-olomoucky.cz).

Když už víme, jaké typy reakcí existují, můžeme se nyní podívat na průběh těchto reakcí. Celkový popis průběhu určité chemické reakce nazýváme *reakční mechanismus*. Mechanismus popisuje přesně a podrobně, vše, co se děje v každém kroku chemické přeměny. Popisuje, které vazby a v kterém pořadí se štěpí, které vazby a v jakém pořadí se tvoří a jaké jsou relativní rychlosti jednotlivých kroků. Při všech reakcích dochází ke tvorbě a štěpení kovalentních chemických vazeb. Když se dvě molekuly k sobě přiblíží, reagují spolu a vytvoří produkty, štěpí se přitom konkrétní vazby v reagujících molekulách a vytvářejí se vazby nové v produktech.

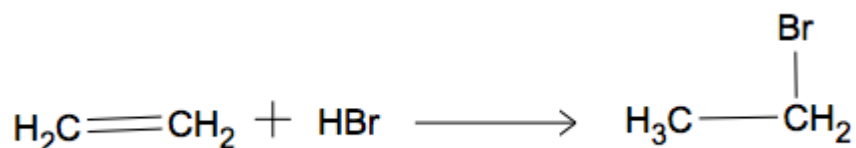
Existují dva základní způsoby, kterými se kovalentní vazba štěpí. Může dojít ke štěpení elektronově symetrickému, což znamená, že každému ze vzniklých fragmentů zůstává jeden elektron. Nebo se molekula může rozštěpit elektronově nesymetricky, a oba vazebné elektrony zůstávají součástí jednoho z fragmentů, zatímco druhému zbyde prázdný orbital. Symetrické štěpení vazeb označujeme jako *homolytické štěpení*, nesymetrické štěpení se označuje jako *heterolytické štěpení*.

Procesy, ve kterých se vazby štěpí nebo tvoří symetricky, nazýváme *radikálovými reakcemi*. Radikál je neutrální chemická částice, která obsahuje lichý počet valenčních elektronů a má proto v některém ze svých orbitalů jeden nepárový elektron. Procesy s nesymetrickým štěpením nebo nesymetrickou tvorbou vazby označujeme jako *iontové reakce*. Iontových reakcí se účastní částice, které mají sudý počet valenčních elektronů, a mají tudíž ve svých orbitalech elektronové páry. (McMurry, 2007)

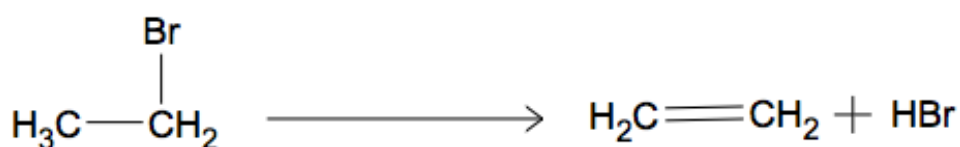
5.2 Rozdělení organických reakcí

Ze širšího hlediska lze na chemické reakce organických sloučenin nahlížet dvěma způsoby: k *jakým* reakcím dochází a *jak* tyto reakce probíhají. Nejprve se podíváme na to, jaké typy reakcí jsou známy: existují čtyři obecné typy reakcí organických sloučenin: **adice, eliminace, substituce a přesmyky** (McMurry, 2007).

Adiční reakce Jako adiční reakce se označují takové, při nichž se dva reaktanty spojí dohromady, za vzniku jediného nového produktu. Jako příklad může sloužit reakce alkenů, třeba etenu s HBr za vzniku brometanu. Při adičních reakcích dochází ke snížení řádu vazby (McMurry, 2007).



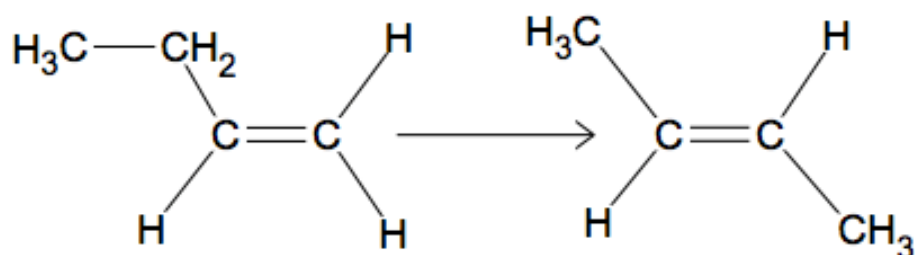
Eliminační reakce jsou v jistém smyslu opakem reakcí adičních. Jsou to reakce, při kterých se štěpí jeden reaktant na dva produkty, a dochází tak k navýšení řádu vazby. Příkladem je reakce halogenalkanů s bázi na kyselinu a alken (McMurry, 2007).



Substituční reakce probíhá tehdy, když si dva reaktanty vymění své části, za vzniku dvou nových produktů. Třeba reakce alkanu s plynným chlorem při ozařování ultrafialovým zářením poskytuje chloralkan. Atom chloru z Cl_2 substituuje atom vodíku v alkanu za vzniku dvou nových produktů a vznikají dva nové produkty (McMurry, 2007).



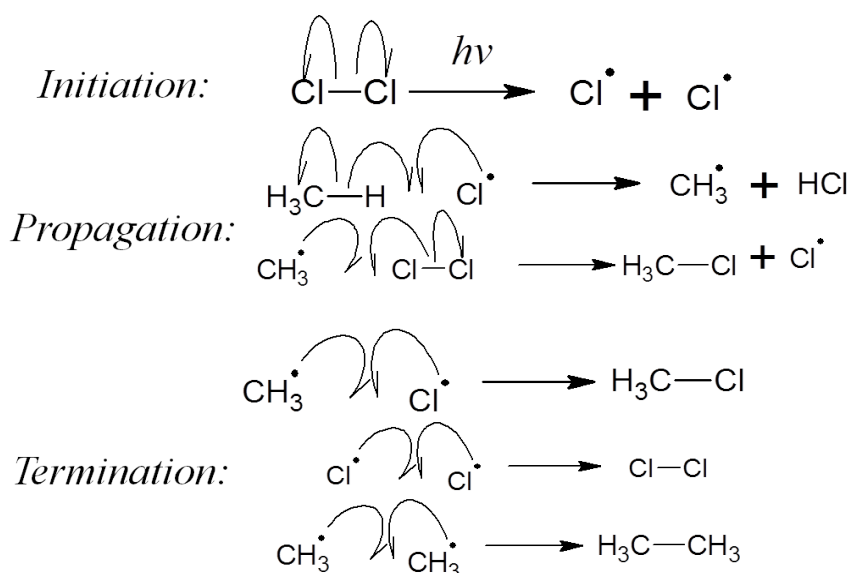
Přesmyky jsou reakce, při kterých v molekule reaktantu dochází k přeskupení vazeb a atomů a vzniká isomerní produkt. Jako příklad přesmyku lze uvést převedení 1-butenu na jeho konstituční isomer, 2-buten, působením kyselého katalyzátoru (McMurry, 2007).



5.2.1 Radikálové reakce

Radikálové reakce nejsou tak běžné jako reakce iontové, nicméně mají v organické chemii důležitou roli. Radikály jsou velmi reaktivní částice, neboť obsahují atom, v jehož valenční slupce je místo stabilního oktetu vzácného plynu lichý počet elektronů. Potřebný oktet může radikál získat několika způsoby, například odtrhne atom s jedním vazebným elektronem jiné molekule a vytvoří tím nový radikál. Výsledkem je *radikálová substituční reakce* (McMurry, 2007).

Radikálové substituční reakce běžně zahrnují tři kroky: *iniciaci*, *propagaci* a *terminaci*.



Obr. 5.2. Mechanismus radikálové substituce (chem-is-you. blogspot. com).

5.2.2 Iontové reakce

Iontové reakce jsou vyvolány existencí přitažlivých sil mezi kladně a záporně nabitými náboji v různých funkčních skupinách molekul.

Při popisu základních iontových procesů a částic, které se jich účastní se používají pojmy *nukleofil* a *elektrofil*. *Nukleofil* má elektronově bohatý atom a může poskytnutím volného elektronového páru elektronově chudému atomu vytvořit vazbu. Nukleofily mohou být neutrální nebo záporně nabitě. *Elektrofil* má elektronově chudý atom a může vytvořit vazbu přijetím elektronového páru od nukleofilu. *Elektrofil*y mohou být neutrální nebo kladně nabitě.

6. Praktická část

6.1 Úvod

Jako modelový případ pro návrh chemických reakcí probíhající na kometách byla použita kometa C/1995 O1 Hale-Bopp vzhledem k dostupnosti údajů o poloze a složení této komety, které jsou uvedeny v podkapitole 2.5.2

Domněnka plynoucí ze studia interakce Slunce s kometami vychází z existence presolárního mračka, které vzniklo, při výbuchu supernovy. Při vzniku supernovy došlo k tak zvané nukleosyntéze, při které se vytvořily chemické prvky. Z mračka se zformovalo Slunce a kolem něho obíhající planety a komety. Domníváme se, že z prvků které komety na sebe “nabalily“, při jejich opakovaném průletu středem sluneční soustavy a jejich výsledným ohřevem působením Slunce, mohlo na těchto kometách vzniknout mnoho biologicky zajímavých sloučenin.

V této části se pokoušíme organickými reakcemi popsat podmínky vzniku těchto sloučenin. Vycházíme z tabulek vyjadřujících zastoupení a poměr sloučenin na kometách a porovnáme se sloučeninami nalezenými v mezihvězdných mračcích v naší a v cizích galaxiích a v tak zvaných protosolárních zrnech. Protosolární zrna jsou mezihvězdná hmota v pevném stavu v podobě malých zrn, která vznikla před zformováním Slunce a ukazují nám přibližné složení původní pralátky.

Níže vypsané tabulky dokumentují výskyt a druhy molekul v protosolárních discích, v mezihvězdných mračcích a molekuly nalezené na meteoritech.

Ze složení protosolárních zrn a z mezihvězdných mračců můžeme částečně popsat, jaké druhy molekul se objevily po výbuchu supernovy a porovnat tyto látky s látkami nalezenými na kometách.

V tabulkách 6.2 a 6.4 si můžeme všimnout, že se v mračcích a na protosolárních zrnech vyskytují jednodušší molekuly než na kometách a tudíž se domníváme, že na kometách dochází k syntéze některých sloučenin, zejména těch biologicky aktivních.

Níže uvedenými reakcemi se snažíme popsat vznik organických látek na kometách. Porovnáme tak složení látek na kometách se složením látek v mračcích a v protosolárních zrnech v souladu s podmínkami panujícími na kometách. Naše domněnka je, že kometa “nasbírá“ při svém vzniku látky, které při průletu komety směrem k Slunci a od Slunce vzájemně reagují což vede k syntéze nových sloučenin. Vybrali jsme i

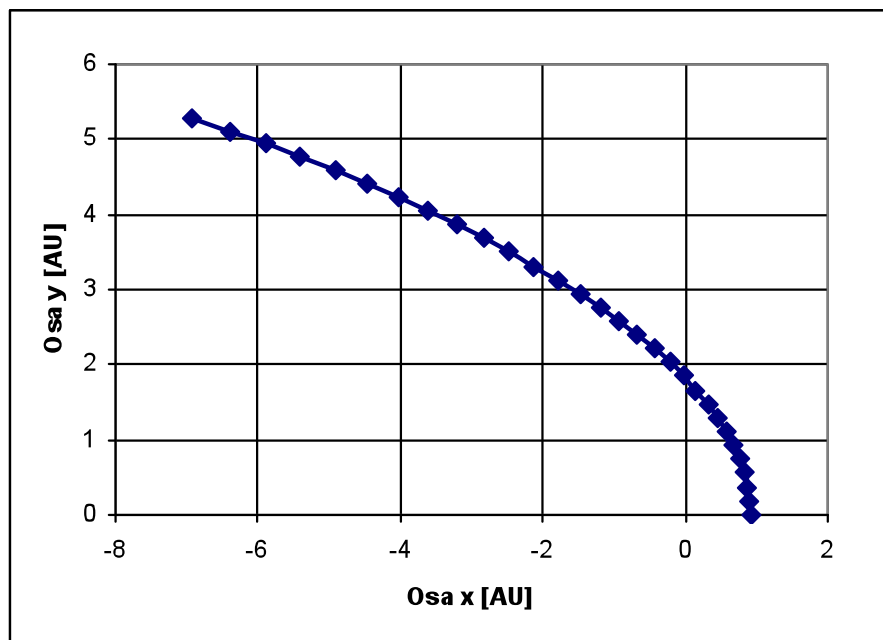
sloučeniny, které se zdály nejzajímavější a to podle jejich role v biologických systémech nebo jako biologické prekurzory.

6.2 Výpočet dráhy a povrchové teploty komety

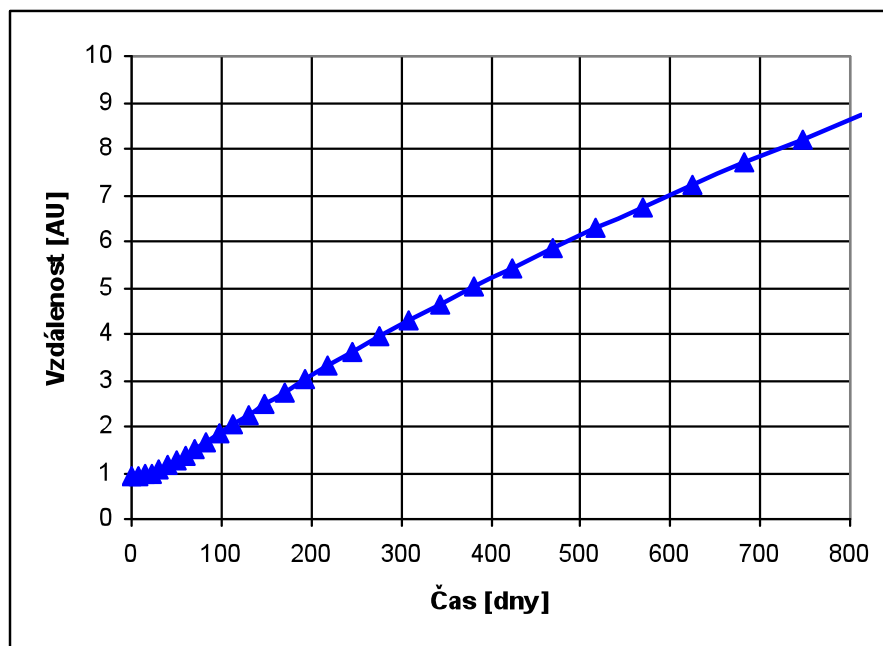
K výpočtu trajektorie a vzdálenosti komety od Slunce byla použita Keplerova rovnice (3.8) odvozená v teoretické části práce spolu se vztahy (3.9) a (3.10) určujícími hodnoty konstant v této rovnici. Excentrická anomálie E ve vztahu (3.9) byla považována za nezávisle proměnnou, s jejíž pomocí pak byl určen čas t :

$$t = \frac{1}{K}(E - \varepsilon \sin E) \quad (7.1)$$

odpovídajícímu místu o souřadnicích (x, y) , v němž se kometa pro tuto excentrickou anomálii nacházela. Poloha komety a její vzdálenost od Slunce byla určena pomocí vztahů (3.5) až (3.7). Vlastní výpočet byl proveden v Excelu, v němž byly pro vhodně zvolené krokování excentricity postupně vypočteny souřadnice a vzdálenost komety od Slunce. Vypočtené hodnoty jsou znázorněny na obr. 6.1 a 6.2. Čas $t = 0$ odpovídá poloze komety v perihéliu.

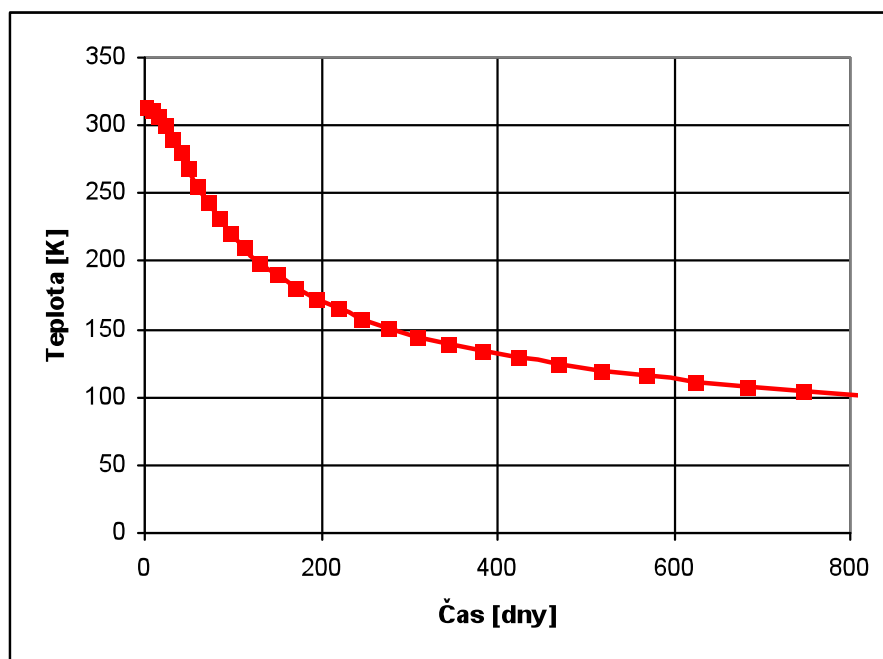


Obr. 6.1. Vypočtená trajektorie pro kometu C/1995 O1 Hale-Bopp.



Obr. 6.2. Vzdálenost komety C/1995 O1 Hale-Bopp od Slunce v závislosti na čase.

Vzdálenost komety od Slunce je potom určující pro výpočet povrchové teploty komety pomocí vztahu (4.3) v teoretické části práce. Takto vypočtený průběh teploty je znázorněn na obr. 6.3.



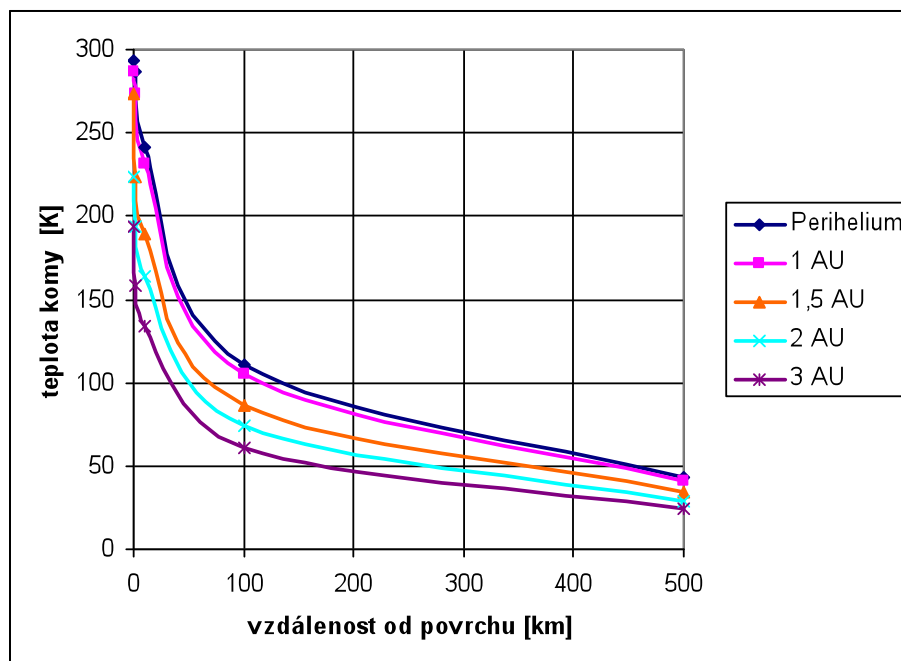
Obr. 6.3 Průběh závislosti teploty na povrchu komety C/1995 O1 Hale-Bopp na čase.

6.3 Výpočet teploty ve vnitřní komě komety

Po sublimaci prachových částic a molekul na povrchu jádra komety, dochází k jejich expanzi do okolního prostoru. Tato expanze je popsána soustavou diferenciálních rovnic. Pro blízké okolí jádra je však možno použít zjednodušenou představu popsanou v teoretické části práce a pro teplotu v této části komy lze použít vztah (5.20). S jeho pomocí pak byla vypočtena teplota v blízkosti jádra komety. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.1. Graficky je průběh vypočtených hodnot teploty znázorněn na obr. 6.4.

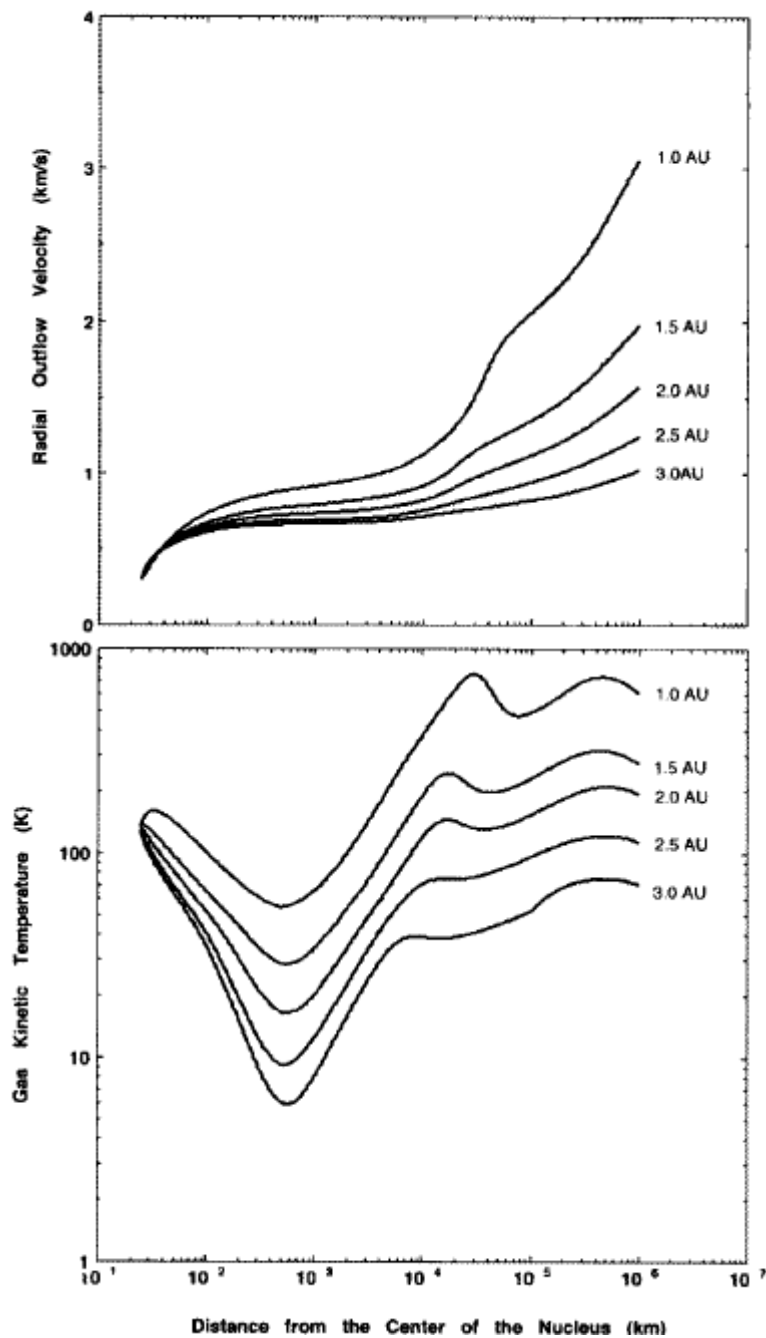
Tabulka 6.1. Teplota ve spodní části komy pro různé vzdálenosti komety od Slunce a pro různé vzdálenosti od povrchu jádra komety

Vzdálenost komety od Slunce	Vzdálenost od povrchu jádra komety (km)				
	0	1	10	100	500
Perihélium	292,86	286,53	241,80	110,29	43,26
1 AU	280,00	273,95	231,18	105,45	41,36
1,5 AU	228,62	223,68	188,76	86,10	33,77
2 AU	197,99	193,71	163,47	74,56	29,24
3 AU	161,66	158,17	133,47	60,88	23,88



Obr. 6.4. Závislost teploty vnitřní části komy na vzdálenosti od povrchu pro různé vzdálenosti komety od Slunce

Pro větší vzdálenosti vyjdeme proto z průběhu teploty, který publikoval (Combi, 2002), který použil jednorozměrný sféricky symetrický stacionární model. Ohřev vyvolaný fotochemickými procesy iteračně modifikován podle výsledků výpočtů Monte Carlo simulujících srážky s přehřátými (superthermal) atomy vodíku (Combi and Smyth, 1989). Publikovaný průběh teplot pro kometu C/1995 O1 Hale-Bopp je znázorněn na



Obr. 6.5. Vypočtené hodnoty rychlosti proudění plynů v komě a kinetické teploty pro kometu C/1995 O1 Hale-Bopp pro různé vzdálenosti komety od Slunce (Combi et al, 2000)

obr. 6.5. Z obrázku je patrné, že se v závislosti na vzdálenosti komety od Slunce teplota pohybuje od 10 K až do 800 K pro vzdálenost 1 AU od Slunce až do 2,5 AU. Jak vyplývá z kapitoly o chemických reakcích, podmínky pro tvorbu nových sloučenin jsou tedy v tomto rozmezí. Zatímco v případě, kdy se kometa nachází ve větší vzdálenosti nežli 3 AU od Slunce, jsou podmínky pro tvorbu nových sloučenin špatné.

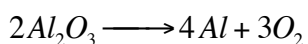
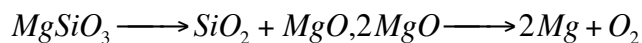
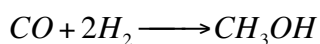
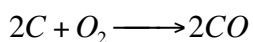
6.4 Sloučeniny nalezené na vesmírných objektech

Z hlediska organické chemie je nejvýznamnější přítomnost grafitu, diamantu a karbidu křemičitého, ze kterých mohly nadále vznikat organické sloučeniny.

Tabulka 6.2 Zastoupení sloučenin v prosolárních zrnech, (Huss and Draine, 2006)

Materiál	Vydatnost (ppm)
Diamant	≈ 1400
Karbid křemičitý-SiC	13-14
Grafit	7-10
Korund (Al ₂ O ₃)	0,01
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	1,2
Hibonit (CaAl ₁₂ O ₁₉)	0,02
Forsterit (Mg ₂ SiO ₄)	10-1800
Enstatit (MgSiO ₃)	10-1800
Amorfní silikáty	20-3600

Níže popsaná reakce ukazují, jak se ze základních prvků vytvoří metanol a kyslík, ze kterých dále vycházíme při svých syntézách.



Z tabulek 6.2 a 6.3 je patrné, že sloučeniny na protosolárních zrnech jsou podstatně jednodušší než sloučeniny nalezené na kometách. Jedná se převážně o karbidy, anorganické soli a jednoduché organické sloučeniny. Popis vzniku kyslíku je potřebné pro popis vzniku formaldehydu oxidací metanolu. Podle (Hanner, 1998) nacházejí se tyto silikáty na kometách.

Tabulka 6.3. Sloučeniny nalezené v protoplanetárních discích (Ciesla et Charnley, 2006)

Objekt	Molekuly
DM Tau	^{12}CO , ^{13}CO , H_2D^+ , C^{18}O , H^{13}CO^+ , N_2H^+ , SiO , SiS , H_2S , C_3H_2 , HCO
	HCN , HNC , CN , CS , HC_3N , CH_3OH , CO^+ , C^{34}S , HCOH , HCO^+ , C_2H_2 , SO , SO_2 , SiC_2 , HNCS , HCOOCH_3
GG Tau	^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , HCN , CN , CS , HCOH , HCO^+ , HNC , C^{34}S , H^{13}CO^+ , C_2H , N_2H^+
L1157	CH_3OH
LkCa15	CO , ^{13}CO , HCOH , HCN , CN , HCO^+ , N_2H^+ , CS , DCO^+ , H_2D^+ , H^{13}CO^+ , OCS , HNC , CH_3OH , HDO , DCN
TW Hya	CO , CN , HCN , DCO^+ , H_2D^+ , HCO^+ , H^{13}CO^+ , HNC , DCN , H^{13}CN , CH_3OH SO , N_2H^+

Tabulka 6.4. Výskyt molekul v mezihvězdných plynech, v ledech a kometárních těkavých látkách. (Ehrenfreund and Charnley, 2000)

Molekuly	W33A	NGC7538	Elias29	Elias16	Teplé jádro Orionu	Halley	Hyakutake	Hale-Bopp
H_2O	100	100	100	100	> 100	100	100	100
CO	9	16	5.6	25	1000	15	6-30	20
CO_2	14	20	22	15	2-10	3	2-4	6-20
CH_4	2	2	< 1,6	-	-	0,2-1,2	0,7	0,6
CH_3OH	22	5	< 4	< 3,4	2	1-1,7	2	2
HCOH	1,7-7	5	-	-	0,1-1	0-5	0,2-1	1
OCS	0,3	0,05	< 0,08	-	0,5	-	0,1	0,5
NH_3	15	13	< 9,2	< 6	8	0,1-2	0,5	0,7-1,8
C_2H_6	-	< 0,4	-	-	-	-	-	0,06
HCOOH	0,4-2	3	-	-	0,008	-	-	0,006
OCN-	3	1	< 0,24	< 0,4	-	-	-	-
HCN	< 3	-	-	-	4	0,1	0,1	0,25
HNC	-	-	-	-	0,02	-	0,01	0,04
HNCO	-	-	-	-	0,06	-	0,07	0,06-0,1
C_2H_2	-	-	-	-	3-10	-	0,05	0,1
CH_3CN	-	-	-	-	0,2	-	0,01	0,02
HCOOCH_3	-	-	-	-	0,1	-	-	0,06
HC_3N	-	-	-	-	0,04	-	-	0,02
NH_2CHO	-	-	-	-	0,002	-	-	0,01
H_2S	-	-	-	-	1	0,04	0,8	1,5
H_2CS	-	-	-	-	0,01	-	-	0,02
SO	-	-	-	-	0,5	-	-	0,2-0,8
SO_2	-	-	-	-	0,6	-	-	0,1

Poznámka:

Kometa C/1995 O1 Hale-Bopp-perihelium: 0,914 AU- místo původu: Oortův oblak

Kometa C/1996 B2 Hyakutake-perihelium: 0,230 AU-místo původu: Oortův oblak

Kometa 1P/Halley-perihelium: 0,586 AU-místo původu Kuiperův pás

Z tabulky 6.4 je patrné, že výskyt sloučenin na C/1995 O1 Hale-Bopp a C/1996 B2 Hyakutake se liší, přestože vznikly ze stejného materiálu a na stejném místě ve slu-

6.5 Tabulka sloučeniny nalezené na kometě C/1995 O1 Hale-Bopp (Crovisier et al, 2005)

Druh	Molekula	Název	Výskyt
H	H ₂ O	Voda	100
	H ₂ O ₂	Peroxid vodíku	< 0,03
C,O	CO	Oxid uhelnatý	23
	CO ₂	Oxid uhličitý	6
C,H	CH ₄	Metan	1,5
	C ₂ H ₆	Etan	0,6
	C ₂ H ₂	Etyl	0,2
	C ₄ H ₂	Diacetylen	0,05
	CH ₃ C ₂ H	Propyn	< 0,045
C,O,H	CH ₃ OH	Metanol	2,4
	HCOH	Formaldehyd	1,1
	CH ₂ OHCH ₂ OH	Etylenglykol	0,25
	HCOOH	Kyselina mravenčí	0,09
	HCOOCH ₃	Metylester kys. mravenčí	0,08
	CH ₃ COH	Acetaldehyd	0,025
	H ₂ CCO	Keten	< 0,032
	C-C ₂ H ₄ O	Oxiran	< 0,20
	C ₂ H ₅ OH	Etanol	< 0,1
	CH ₂ OHCHO	Glykolaldehyd	< 0,04
	CH ₃ OCH ₃	dimetylexer	< 0,45
	CH ₃ COOH	Octová kyselina	< 0,06
N	NH ₃	Amoniak	0,7
	HCN	Kyanovodík	0,25
	HNCO	Kyselina isokyanatá	0,1
	HNC	Isokyanovodík	0,04
	CH ₃ CN	Acetonitril	0,02
	HC ₃ N	Kyanoacetylen	0,02
	NH ₂ CHO	Formamid	0,015
	NH ₂ OH	Hydroxylamin	< 0,25
	HNCO	Kyselina kyanatá	< 0,0016
	CH ₂ NH	Metanimin	< 0,032
	NH ₂ CN	Kyanamid	< 0,004
	N ₂ O	Oxid dusný	< 0,23
	NH ₂ -CH ₂ -COOH	Glycin	< 0,15
	C ₂ H ₅ CN	Etylkyanid	< 0,01
	HC ₄ CN	Kyanodiacetylen	< 0,003
	H ₂ S	Sulfan	1,5
	COS	Karbonyl sulfid	0,4
	SO	Oxid sirnatý	0,3
	SO ₂	Oxid siřičitý	0,2
	CS ₂	Sirouhlík	0,17
	H ₂ CS	Thioformaldehyd	0,02
	S ₂	Disíra	0,005

neční soustavě, je možné usoudit, že na kometách probíhají chemické procesy, ve kterých dochází ke vzniku sloučenin, jak vyplývá z návrhu chemických reakcí popsaného

v praktické části. Pravděpodobnou příčinou je odlišná vzdálenost perihelia od Slunce, která určuje maximální teploty vyskytující se na kometách.

Z tabulky 6.5 je patrné, že na kometě je přítomno 43 sloučenin, z nichž jsou z hlediska živé přírody významné všechny sloučeniny, ale vybral jsem kyanovodík, metanol, dimetylexer, metylester kyseliny mravenčí, formamid, formaldehyd, glycin, glykoladehyd jako biologické prekurzory.

Kyanovodík je významný jako zdroj vodíku, uhlíku a dusíku.

Z metanolu vychází syntéza dimetyl etheru i methylesteru kyseliny mravenčí.

Formamid je možný prekurzor pro vznik purinových bází.

Glycin (kyselina aminooctová) je nejjednodušší aminokyselina. Ve větším množství je obsažena v kolagenu a elastinu. Je výchozím metabolitem pro biosyntézu purinových bází.

Glykoladehyd je nejjednodušším monosacharidem.

6.5 Vznik komplexních sloučenin na kometách

Důsledkem interakcí komety se Sluncem-respektive se Slunečním větrem a následným ohřevem komety vznikají komplexnější organické molekuly, než existující původní molekuly na protosolárních zrnech, které jsou pouze jednoduchými anorganickými látkami (karbidy, křemičitany atd.....). Existuje mnoho otázek ohledně průběhu chemických reakcí probíhajících na kometách. Reakce neprobíhají v termodynamické rovnováze a na kometách se nachází nulový tlak. Prozatím neexistuje mnoho zdrojů zabývajících se těmito reakcemi.

V tomto odstavci navrhuji možné syntézy, které mohly vést ke vzniku komplexních organických molekul na kometách.

Na základě výběru provedeném v předchozí kapitole, jsme se zaměřili na reakční mechanismy následujících reakcí, které odpovídají podmínkám v komě.

1) HCN vzniká přímou reakcí metanu a amoniaku (1270-1470) K



Podle autorů Chyba and Mckay mohou reakce probíhat na prašných zrnech a aktivační energie je 2,65 eV. (Chyba and Mckay, 2005)

2) Metanol vzniká reakcí metanu s oxidem uhličitým.



Podle (Thorkild , Brockmeier, 1970) probíhá tento děj za 0,13 Pa.

Další možným procesem vzniku metanolu je reakce metanu s oxidem uhličitým.



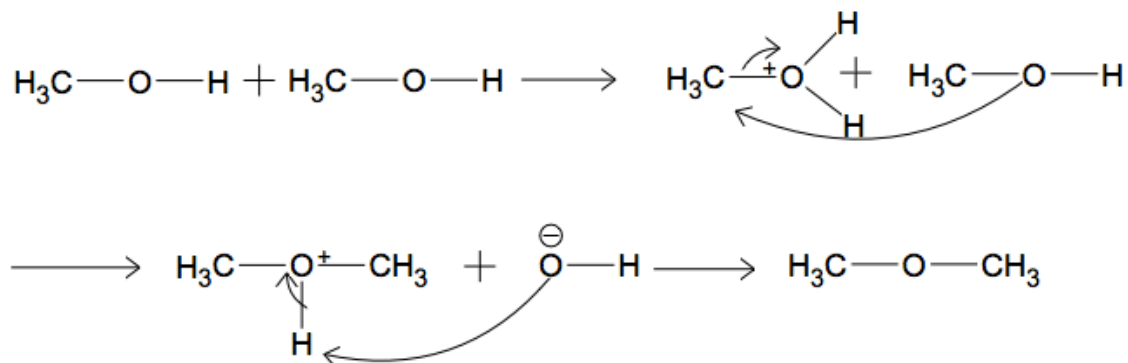
Syntéza metanolu přímou reakcí oxidu uhličitého s molekulárním vodíkem.



3) Dimetylexer (400) K

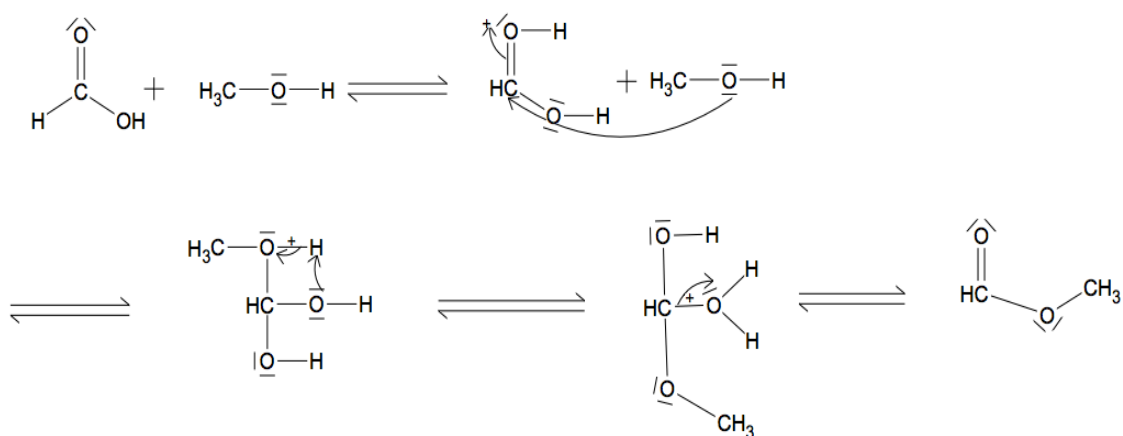
Dimetylexer vzniká v přítomnosti kyseliny v podobě H^+ , který se nachází ve slunečním větru, viz tab. 1.2. V prvním kroku reakce proběhne připojením H^+ k OH skupině alkoholu. H^+ se připojí k jednomu z alkoholů a dochází ke vzniku metyloxoniového kationtu. V následujícím kroku, elektronový pár z kyslíku od druhé alkoholové molekuly si vytvoří vazbu s CH_3 skupinou od první molekuly.

Reakce končí, když anion, který zůstane po kyselině, si připojí vodíkový atom z metyloxoniového kationtu, tím vznikne ether a odštěpí se voda.



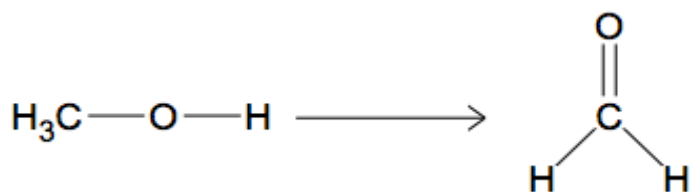
4) Metylester kyseliny mravenčí (323,15-333,15)K

Vzniká reakcí kyseliny mravenčí se metanolem. H^+ pochází ze slunečního větru. V první fázi H^+ napadne karbonylovou skupinu, tzn. $C=O$ a vznikne kation. Na vzniklý kation se díky svým dvěma volným párům elektronů připojí kyslík z OH skupiny druhého alkoholu. Dojde potom k tak zvanému proton-transferu, kde kyslík od OH skupiny převezme vodík ve struktuře CH_3-O^+-H . Báze která zbyla po odtržení kyslíku od kyseliny si vezme od OH skupiny vodík a vazba se přesune na uhlík, tím vznikne $C=O$ skupina a proces esterifikace je dokončen.



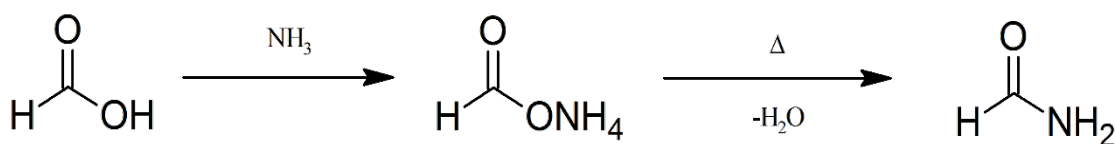
5) Formaldehyd (523-673) K

Vzniká oxidací metanolu. Molekulární kyslík se nachází v hojném množství na kometách (Bieler. A et al., 2015).



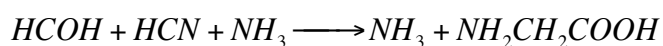
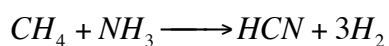
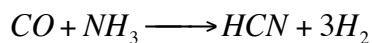
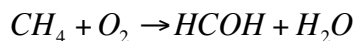
6) Formamid (353,15-373,15) K

Velmi důležitá molekula z biochemického hlediska, vychází z ní syntézy purinu, adeninu, guaninu, které jsou pospány níže.



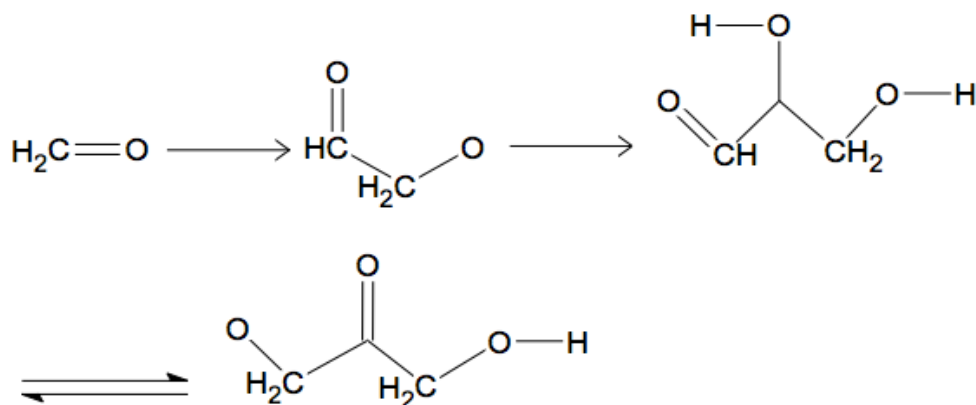
7) Glycin

Reakce probíhá za teploty 600 K a tlaku 10^{-10} Pa (Stark et al, 2013)

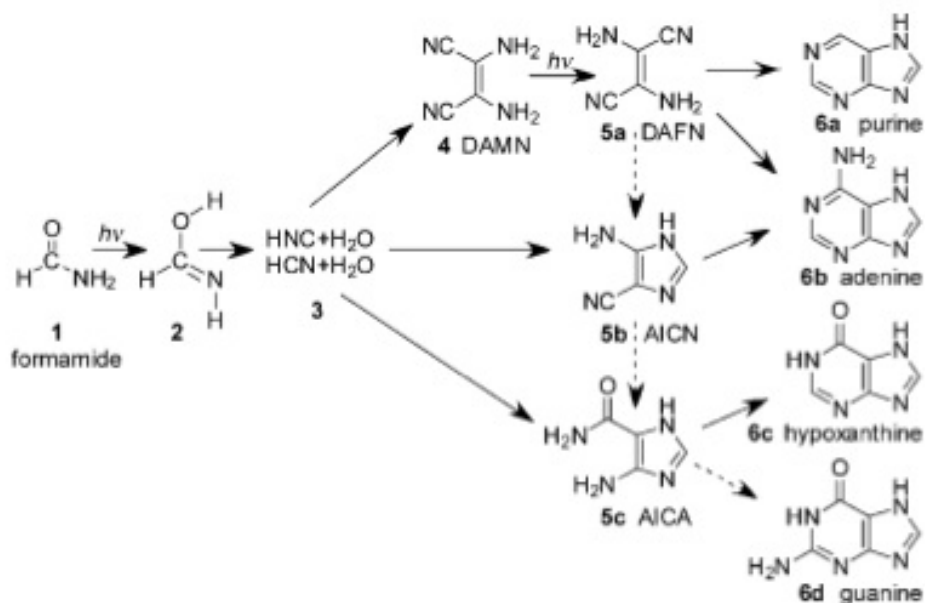


8) Glykolaldehyd

Nejjednodušší látka podobná sacharidům



9) Prebiotická syntéza: syntéza purinů z formamidu probíhá za pomoci UV záření



Obr. 6.6 Syntéza purinovýchází z ozářeného formamidu UV zářením (Barks et al, 2010).

Názvy látek vytvořených touto syntetickou cestou:

1) *Purin*

Purin je heterocyklická sloučenina tvořena kondenzovaným pyrimidinovým a imidazolovým kruhem. V čistém stavu je to krystalická, zásaditá látka. Její deriváty, nukleové báze, jsou biologicky významné látky, součástí nukleových kyselin (Wikipedia, 2016).

Kromě toho, že puriny jsou stavebními jednotkami DNA a RNA, nacházejí se puriny též ve významných biomolekulách jako ATP, GTP, cyklická AMP, NADP SAM nebo v koenzymu A. Molekula ATP je zvláště důležitá, protože je zdrojem energie pro živé buňky a je kofaktorem pro mnoho enzymů (Wikipedia, 2016).

2) *Adenin*

Je základní stavební jednotka živých organismů. Najdeme tuto molekulu všude v lidském těle samotnou nebo sdruženou s různými molekulami. Nachází se ve formě nukleotidů v DNA.

3) *Hypoxantin*

Nachází se v antikodonu tRNA ve formě nukleosidu inosinu.

4) *Guanin*

Je purinová báze. Nachází se ve formě nukleotidů, v DNA, v podobě desoxyguanosinu monofosfátu.

Výše uvedené reakce vychází ze znalosti výkyvů teploty na kometě a z látek na nich nalezených.

Vzhledem k tomu, že komety C/1996 B2 Hyakutake a C/1995 O1 Hale-Bopp vznikly ze stejného materiálu a na stejném místě ve sluneční soustavě a přesto mají rozdílné složení, je možné usoudit, že na kometách probíhají chemické procesy, ve kterých dochází ke vzniku sloučenin, jak vyplývá z návrhu chemických reakcí popsaného v praktické části.

7. Závěr

V teoretické části bakalářské práce, jsou shrnuty základní údaje o kometách. Podrobněji jsou přitom popsány zejména fyzikální procesy týkající se stanovení teploty na povrchu jádra a v komě. Matematický popis těchto procesů ve vnitřní komě však vede i při použití sférické symetrie komy na soustavu diferenciálních rovnic, jejichž řešení překračuje rámec této bakalářské práce. V další části teoretického úvodu je věnována pozornost chemickým reakcím, jejichž znalost je následně použita v praktické části bakalářské práce k návrhu chemických reakcí.

Praktická část bakalářské práce je pak zaměřena na kometu C/1995 O1 Hale-Bopp, která je použita jako modelový případ pro objasnění chemických procesů vedoucích k návrhu vzniku vybraných molekul, které mají vztah k živé přírodě. Rozhodujícím parametrem určujícím rychlost těchto reakcí je teplota. Nejprve byla stanovena pomocí Keplerovy rovnice vzdálenost komety od Slunce. V dalším kroku pak byla vypočtena pomocí semiempirického vztahu teplota na povrchu komety. Model adiabatického rozpínání byl pak použit pro stanovení teploty v bližší části vnitřní komy. Pro vzdálenější část vnitřní komy jsou pak použity publikované výsledky o průběhu teploty ve vnitřní části komy.

V nejdůležitější části práce je pak věnována pozornost chemickým reakcím. Na základě porovnání chemického složení mlhovin, molekul na protosolárních zrnech a vnitřní části komy byly vybrány sloučeniny, které vznikají na kometě. Z provedeného srovnání vyplynulo, že molekuly nalezené v mlhovinách a na protosolárních zrnech jsou podstatně jednodušší nežli na kometách. Pro vybraných osm sloučenin, které mají vztah k živé přírodě, byly navrženy chemické reakce vedoucí k jejich vzniku. Jako hlavní argument pro zdůvodnění přítomnosti navržených chemických reakcí byla použita teplota.

8. Seznam obrázků

Obr. 1.1. Řady menhirů v Carnacu-Morbihan, Francie (mapio.net).

Obr. 1.2. Sluneční vrstvy (<http://nevsedni-svet.cz/encyklopedie-vesmiru-slunecni-nitro/>).

Obr. 1.3. Vznik slunečního větru (spacephysics.ucr.edu).

Obr. 2.1. Obrázek komety C/1975 V1 West s bílým prachovým a modrým plynovým ohonem (<http://www.zmescience.com/space/ison-comet-brightest-comet-ever-in-2013>).

Obr. 2.2. Schéma struktury komety (abyss.uoregon.edu).

Obr. 2.3. Struktura jádra komety (obspm.fr).

Obr. 2.4. Obrázek komety s bílým prachovým a modrým plynovým ohonem (cse.ssl.berkeley.edu).

Obr. 2.5. Elementy dráhy pro popis pohybu komety kolem slunce (<http://nebmech.astronomy.cz/POJMY/pojmy.htm>).

Obr. 2.6. Průlet komety C/2011 W3 Lovejoy sluneční korunou (nasa.gov).

Obr. 3.1. Znázornění polohy tělesa a excentrické anomálie E pro odvození vztahů pro výpočet dráhy.

Obr. 4.1. Schematické zobrazení procesů vedoucích ke vzniku komy a ohonu (částice plynu - modrá a zelená částice prachu- (hnědá) (Helbert, 2002).

Obr. 4.2 Interakce komety se slunečním větrem (Mendis, 1988).

Obr. 5.1. Změna energie v průběhu chemické reakce podle teorie srážek a teorie aktivovaného komplexu (eluc.kr-olomoucky.cz).

Obr. 6.1. Vypočtená trajektorie komety C/1995 O1 Hale-Bopp.

Obr. 6.2. Vzdálenost komety C/1995 O1 Hale-Bopp v závislosti na čase.

Obr. 6.3 Průběh závislosti teploty na povrchu komety C/1995 O1 Hale-Bopp na čase.

Obr. 6.4. Závislost teploty vnitřní části komy na vzdálenosti od povrchu pro různé vzdálenosti komety od Slunce.

Obr. 6.5. Vypočtené hodnoty rychlosti proudění plynů v komě a kinetické teploty pro kometu C/1995 O1 Hale-Bopp pro různé vzdálenosti komety od Slunce (Combi et al., 2000).

Obr. 6.6. Syntéza purinových bází z ozářeného formamidu UV zářením (Barks et al.2010).

9. Seznam tabulek

Tabulka 1.1. Chemické složení fotosféry (Dougerty, 2001).

Tabulka 1.2. Parametry slunečního větru ve vzdálenosti 1 AU od Slunce.

Tabulka 2.1. Hodnoty dráhových elementů komety C/2011 W3 Lovejoy.

Tabulka 2.2. Hodnoty dráhových elementů komety C/1995 O1 Hale-Bopp.

Tabulka 6.1. Teplota ve spodní části komy pro různé vzdálenosti komety od Slunce a pro různé vzdálenosti od povrchu jádra komety.

Tabulka 6.2. Zastoupení sloučenin v protosolárních zrnech. (Huss et al., 2006).

Tabulka 6.3. Sloučeniny nalezené v protoplanetárních discích (Ciesla and Charnly, 2006).

Tabulka 6.4. Výskyt molekul v mezihvězdných plynech, v ledech a kometárních těkavých látkách. (Ehrenfreund and Charnley, 2000).

Tabulka 6.5. Sloučeniny nalezené na kometě C/1995 O1 Hale-Bopp (Crovisier et al, 2005).

10. Seznam literatury

Bieler. A et al., 2015: Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Nature* 526, 678-681.

Ciesla, F.J. Charnley S., 2006: *The Physics and Chemistry of Nebular Evolution, Meteorites and the Early Solar System II*, Eds. D. Lauretta and H. McSween, University of Arizona Press, 209.

Combi M. R, Smyth, W. H., 1998: Monte Carlo particle - trajectory models for neutral cometary gases. I. Models and equations. *Astrophysical Journal*. 327, 1026-1043.

Combi. M. R., 2000: Hale-Bopp: What makes a big comet different: Coma dynamics : Observation and theory (Earth, Moon, and Planets), pp 73-90.

Combi M. R., Harris. W. M., Smyth, William H, 2005: *Gas Dynamics and Kinetics in the cometary Coma: Theory and Observation, Comet II*, University of Arizona Press.

Despois.D, Biver.N, Bockelée-Morvan D., Crovisier.J, 2005: Observation of molecules in comets, *Astrochemistry-Recent Successes and Current Challenges Proceedings IAU Symposium No. 231*.

Dougerty M., 2001: *Lectures, Space and atmospheric physics*, Imperial College London.

Ehrenfreund P., Charnley S. B., 2000: Organic molecules in the interstellar medium, comets and meteorites, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2000. 38, 427–83.

Helbert J., 2002: Studying the longterm evolution of gas activity in the coma of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp), with a special focus on the chemistry of carbon bearing molecules. Berlin, *Disertační práce*.

Huebner W., F., 1990: *Physics and Chemistry of Comets*, Springer-Verlag, Berlin.

Huebner W. F, Benkhoff J., Capria M. T., Coradini A., De Sanctis C., Orosei R., Prialnik D., 2006: *Heat and Gas Diffusion in Comet Nuclei*-International Space Institute.

Hanner M. S, 1998: The silicate material in comets, *Composition and Origin of Cometary Materials*, Volume 8 of series *Space Science Series of ISSI*, pp 99-108.

Huss G. R., Draine B. T., 2006: What can pre-solar grains tell us about the solar nebula? *Proceeding of the International Astronomical Union 08/2006*.

Koskinen H., Vainio R., 2009: *Lectures on Solar Physics: From the core to the heliopause*, University Helsinki.

Chyba, C. F., Sagan, C., 1997: Comets as a Source of Prebiotic Organic Molecules for the Early Earth, *Comets and the Origin and Evolution of Life*, pp.147-173.

Kvasnica, J. 1965: *Termodynamika*. Praha, SNTL.

Lisse C. M., Denner K., Enghauser J., Trumper J., Marshall. F. E, Petre R, Valinia. A, Kellett B. J, Bingham R, 1998: *Earth, Moon, and Planets Volume 77, Issue 3*, pp 283-291.

Lewis J. S., 1997: *The Physics and Chemistry of the Solar System (Revised Edition)*, Academic Press.

McCauley. I. P., Saar. H. S., Raymond. C. J, Yuan-Kuen Ko, Saint-Hilaire. P., 2013: EUV and X-Ray Observation of Comet Lovejoy (C/2011 W3) in the Lower Corona, *The Astrophysical Journal*, Volume 768, Issue 2, p 12.

McMurry.J, 2007: *Organická chemie*, 6. vydání.

Mendis, D. A., 1988: A Postencounter View of Comets, *Ann. Rev. Astr. Ap.* 26, 11-49.

Oort, J. H., 1950: The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin, *Bull. Astron. Inst. Neth.* 11, p 91.

Parker E. N., 1958: Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields, 128, 664, *Astrophys. J.*

Prialnik D., 2000: Modeling the comet nucleus interior. Application to Comet C/1995 O1 Hale-Bopp, *Earth, Moon and Planets*, Volume 89, Issue 1-4, pp 27-52.

Rodgers S. D., Charnley S. B., Huebner W. F, Boice D., 2005: Physical Processes and Chemical Reactions in Cometary Comae. *Comets II*.

Samarasinha N. H., Mueller B. E. A, Belton M.J.S, Jorda L., 2005: Rotation of Cometary Nuclei in *Comets II*.

Sekanina Z., Chodas P., W., 2012: Comet C/2011 W3 (Lovejoy): Orbit Determination, Outbursts, Disintegration of Nucleus, Dust-Tail Morphology and Relationship to New Cluster of Bright Sungrazers, *The Astrophysical Journal.*, 757:127, pp 1-33.

Senay M. C., Jewitt D., 1994: Coma formation driven by carbon monoxide release from comet Schwassman-Wachmann 1; *Nature*, **371**, p. 229-231.

Stark C. R., Helling,D., Diver A., Rimmer P. B. et al., 2014: Electrostatic activation of prebiotic chemistry in substellar atmospheres, *International Journal of Astrobiology*.

Thomas. P. J., Chyba C. F., Mckay. C. P, 1997: Comets and the Origin and Evolution of Life, Springer-Verlag, New York.

Thorkild J. D., Brockmeier F. M, 1970: Kinetics of Formation of Hydrogen Cyanide from Methane and Ammonia in a Microwave Plasma *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*,9 (3), pp 388–397.

Wang Y. F., Tsai Ch, H., Shih M., Hsieh L. T, Wen.Ch. Ch., 2005: Direct Conversion of Methane into Methanol and Formaldehyde in an RF Plasma Environment I: A Preliminary Study *Aerosol and Air Quality Research*, Vol 5, No. 2, pp 204-210.

Wikipedie https://fr.wikipedia.org/wiki/Comète_rasante (citováno říjen 2014)

Wikipedia <https://fr.wikipedia.org/wiki/Purine> (citováno duben 2016)