Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Guilherme Gastaldello Pinheiro Serrano

**Correlação entre a produção gasosa de água,
hidroxila, monóxido de carbono e a
magnitude heliocêntrica do
Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)**

São Paulo

2011

Guilherme Gastaldello Pinheiro Serrano

**Correlação entre a produção gasosa de água,
hidroxila, monóxido de carbono e a
magnitude heliocêntrica do
Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)**

Dissertação apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astrofísica

Orientador: Prof. Dr. Amaury Augusto de
Almeida

Versão corrigida.

São Paulo

2011

Nota: A versão original desta dissertação encontra-se disponível no Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG/USP.

Dedico esta Dissertação ao meu avô, Celestino Pinheiro Serrano.

Agradecimentos

À minha esposa Lérica e meu filho Arthur por sempre estarem ao meu lado me apoiando e pela compreensão que tiveram durante minhas ausências enquanto desenvolvia este trabalho.

Aos meus pais Elaine e Wagner e meu irmão Bruno, por sempre terem acreditado em mim e me apoiado nas decisões que tomei para chegar até aqui, por sempre estarem presentes quando precisei e por terem sido os maiores responsáveis pela formação da pessoa que sou hoje.

Aos amigos e familiares que me incentivaram e estiveram ao meu lado durante esta caminhada.

Aos professores, que tive ao longo da minha formação acadêmica desde meu início no ensino fundamental até a minha conclusão nesta pós-graduação, por terem sido importantes para meu desenvolvimento não só como aluno mas como pessoa.

Ao Prof. Dr. Amaury Augusto de Almeida, meu orientador, por ter me confiado este projeto, me auxiliado no desenvolvimento deste e me ajudado a abrir os olhos para esse excepcional campo da ciência.

Ao Prof. Dr. Roberto Boczko pela ajuda primorosa no desenvolvimento de algoritmos envolvendo Astronomia de Posição, para o processamento e análise dos dados observacionais.

Ao Dr. Nicolas Biver do Observatoire de Paris, Section de Meudon, pela gentileza em ceder os dados observacionais do *CO* relativos ao cometa Hale-Bopp.

“All religions, arts and sciences are branches of the same tree.”

Albert Einstein

“Even if I knew that tomorrow the world would go to pieces, I would still plant my apple tree.”

Martin Luther King

Resumo

O objetivo do presente trabalho é estudar a correlação entre as taxas de produção gasosa e as magnitudes heliocêntricas do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp), tanto na fase pré-periódica como na fase pós-periódica. As evoluções da magnitude e das taxas de produção gasosa de H_2O (água), OH (radical hidroxila) e CO (monóxido de carbono), ao longo da aproximação e do afastamento do cometa em relação ao Sol, são analisadas. Para essa análise, foram utilizadas 11.734 estimativas de magnitudes visuais, extraídas do *ICQ* (International Comet Quarterly) e 88 observações do monóxido de carbono (Biver, comunicação particular (2007); DiSanti et al. (2001); Jewitt et al. (1996)), cobrindo o intervalo de distâncias heliocêntricas de $r_h = 7,464$ UA (na fase pré-periódica) até $r_h = 14,070$ UA (na fase pós-periódica).

É mostrado que a atividade do Hale-Bopp (temperatura média superficial ~ 110 K), além de 6,3 UA do Sol é controlada pela emissão do CO (temperatura de sublimação ~ 24 K), antes que pela emissão da H_2O (temperatura de sublimação ~ 152 K).

Esse resultado é consistente com as observações em ondas milimétricas de Biver et al. (1996) e Jewitt et al. (1996), realizadas em 6,5 UA.

Abstract

The purpose of the present work is to study the correlation between the gas production rates and heliocentric magnitudes of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp), in the pre-perihelion phase as well as in the post-perihelion phase. The evolutions of magnitudes and gas production rates of H_2O (water), OH (hydroxyl radical) and CO (carbon monoxide), along the approach to and leave of the comet from the Sun, are analysed. For this analysis, we used 11,734 visual magnitude estimates, extracted from *ICQ* (International Comet Quarterly) and 88 observations of carbon monoxide (Biver, private communication (2007); [DiSanti et al. \(2001\)](#); [Jewitt et al. \(1996\)](#)), covering the range of heliocentric distances from $r_h = 7.464$ AU (in the pre-perihelion phase) to $r_h = 14.070$ AU (in the post-perihelion phase).

It is shown that the activity of Hale-Bopp (average surface temperature ~ 110 K) beyond 6.3 AU from the Sun is controlled by CO emission (sublimation temperature ~ 24 K) rather than by H_2O (sublimation temperature ~ 152 K).

This result is consistent with millimeter-wave observations of [Biver et al. \(1996\)](#) and [Jewitt et al. \(1996\)](#), made at 6.5 AU.

Lista de Figuras

2.1	Modelos para a estrutura do núcleo cometário	29
2.2	Taxas de vaporização para gelos de H_2O , CO_2 , CO e outros	32
2.3	Grãos de poeira de acordo com Greenberg (1990)	34
2.4	Ilustração conceitual de um núcleo cometário	35
2.5	Esboço descritivo de um cometa	42
2.6	Espectro do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)	44
3.1	Base de dados extraída do ICQ para a fase pré-periódica.	46
3.2	Base de dados extraída do ICQ para a fase pós-periódica.	47
3.3	Ajuste linear para a curva de luz na fase pré-periódica	49
3.4	Ajuste linear para a curva de luz na fase pós-periódica.	50
3.5	Ajuste linear na fase pré para m_h	52
3.6	Ajuste linear na fase pré para m_h com $r_h > 3$ UA	53
3.7	Ajuste linear na fase pré para m_h com $r_h < 3$ UA	54
3.8	Ajuste linear na fase pós para m_h	55
3.9	Ajuste linear na fase pós para m_h com $r_h < 3$ UA	56
3.10	Ajuste linear na fase pós para m_h com $r_h > 3$ UA	57
3.11	Evolução das taxas de produção molecular na fase pré-periódica	62
3.12	Evolução das taxas de produção de diferentes espécies gasosas	63
3.13	Dependências heliocêntricas de CO e H_2O no cometa Hale-Bopp	64
3.14	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pré	65
3.15	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	66
3.16	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	67

3.17	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pós	68
3.18	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	69
3.19	Produção gasosa de H_2O em função r_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	70
3.20	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pré com	71
3.21	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	72
3.22	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	73
3.23	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pós	74
3.24	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	75
3.25	Produção gasosa de OH em função r_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	76
3.26	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pré	77
3.27	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	78
3.28	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	79
3.29	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pós	80
3.30	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	81
3.31	Produção gasosa de CO em função r_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	82
3.32	Evolução das diferentes Q_n com a m_h na fase pré	88
3.33	Evolução das diferentes Q_n com $r_h > 3$ UA na fase pré-periélica.	89
3.34	Evolução das diferentes Q_n com $r_h < 3$ UA na fase pré-periélica.	90
3.35	Evolução das diferentes Q_n com a m_h na fase pós	91
3.36	Evolução das diferentes Q_n com $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.	92
3.37	Evolução das diferentes Q_n com $r_h > 3$ UA na fase pós-periélica.	93
3.38	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pré	100
3.39	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	101
3.40	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	102
3.41	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pós	103
3.42	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	104
3.43	Taxa de produção da H_2O e a m_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	105
3.44	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pré	106
3.45	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pré com $r_h > 3$ UA	107
3.46	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pré com $r_h < 3$ UA	108
3.47	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pós	109

3.48	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pós com $r_h < 3$ UA	110
3.49	Taxa de produção da H_2O e a H_0 na fase pós com $r_h > 3$ UA	111
3.50	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pré	113
3.51	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	114
3.52	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	115
3.53	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pós	116
3.54	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	117
3.55	Taxa de produção da OH e a m_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	118
3.56	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pré	119
3.57	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pré com $r_h > 3$ UA	120
3.58	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pré com $r_h < 3$ UA	121
3.59	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pós	122
3.60	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pós com $r_h < 3$ UA	123
3.61	Taxa de produção da OH e a H_0 na fase pós com $r_h > 3$ UA	124
3.62	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pré	126
3.63	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pré com $r_h > 3$ UA	127
3.64	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pré com $r_h < 3$ UA	128
3.65	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pós	129
3.66	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pós com $r_h < 3$ UA	130
3.67	Taxa de produção do CO e a m_h na fase pós com $r_h > 3$ UA	131
3.68	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pré	132
3.69	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pré com $r_h > 3$ UA	133
3.70	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pré com $r_h < 3$ UA	134
3.71	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pós	135
3.72	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pós com $r_h < 3$ UA	136
3.73	Taxa de produção do CO e a H_0 na fase pós com $r_h > 3$ UA	137
3.74	Comparação entre os diferentes modelos na fase pré	148
3.75	Comparação entre os diferentes modelos na fase pós	149
4.1	Ajustes lineares das taxas de produção do H_2O na fase pré-periódica.	153
4.2	Ajustes lineares das taxas de produção do H_2O na fase pós-periódica.	154
4.3	Ajustes lineares das taxas de produção do OH na fase pré-periódica.	155

4.4	Ajustes lineares das taxas de produção do OH na fase pós-periélica.	156
4.5	Ajustes lineares das taxas de produção do CO na fase pré-periélica.	157
4.6	Ajustes lineares das taxas de produção do CO na fase pós-periélica.	158
C.1	Vista espacial de uma órbita cometária indicando seus elementos orbitais. .	176

Lista de Tabelas

3.1	Ajuste das magnitudes em função da distância heliocêntrica	58
3.2	Ajuste das taxas de produção de H_2O , OH e CO	83
3.3	Ajustes das Q_g	94
3.4	Ajustes das Q_g	95
3.5	Ajuste da taxa de produção da água	112
3.6	Ajuste da taxa de produção da hidroxila	125
3.7	Ajuste da taxa de produção do monóxido de carbono	138
3.8	Comparação das leis de correlação publicadas.	140
3.9	Comparação entre os diferentes modelos	150
A.1	Abundâncias relativas de gelos	169
A.2	Abundâncias relativas em relação à H_2O	170
A.3	Temperaturas de equilíbrio de sublimação	171
C.1	Parâmetros orbitais do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp).	175

Sumário

1. Introdução	21
2. Generalidades sobre o estudo dos cometas	25
2.1 Natureza e origem dos cometas	25
2.1.1 A nuvem de Oort e as diferentes famílias de cometas	25
2.1.2 Estrutura e composição química	27
2.1.2.1 O núcleo	27
2.1.2.2 A coma	35
2.1.2.3 Caudas de gás e de poeira	38
2.2 Observações e modelos	39
2.2.1 Observações e espectroscopia no visível	40
2.2.1.1 As magnitudes	40
2.2.1.2 A espectroscopia	41
2.2.1.3 Fotometria e quantidade de poeira	42
3. Correlação entre a produção gasosa do cometa Hale-Bopp e a sua magnitude . .	45
3.1 Evolução do brilho do C/1995 O1	45
3.1.1 Base de dados observacionais	45
3.1.2 Método de análise	51
3.1.3 Resultados	58
3.1.3.1 Curva de luz	58
3.1.3.2 Regressões lineares	60
3.2 Evolução da taxa de produção de gás e correlação com a magnitude	61

3.2.1	Taxas de produção de H_2O , OH e CO	61
3.2.2	Produção “global” de gás	84
3.2.2.1	Diferentes definições utilizadas	84
3.2.2.2	Evolução da produção gasosa com a distância heliocêntrica	87
3.2.3	Correlação entre as diferentes taxas de produção e a magnitude	96
3.2.3.1	Técnica de aproximação do problema	96
3.2.3.2	Método	97
3.2.3.3	Resultados	99
3.3	Discussão final e perspectiva	139
3.3.1	Evolução à pequena distância heliocêntrica	139
3.3.2	Evolução à grande distância heliocêntrica	142
3.3.3	Transição durante a atividade	144
3.3.4	Comparação entre os diferentes modelos de produção gasosa	146
4.	Conclusões	151
	Referências	161
	Apêndice	167
A.	Tabelas diversas	169
B.	Método de Mínimos Quadrados	
	Minimização de um χ^2	173
C.	Elementos orbitais do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)	175

Introdução

Os anos de 1996 e 1995 foram testemunhas da descoberta de dois novos cometas notáveis: C/1996 B2 (Hyakutake) e C/1995 O1 (Hale-Bopp). Esses corpos celestes se revelaram excepcionalmente brilhantes; o primeiro em razão da sua passagem nas proximidades da Terra, em março de 1996, o segundo em razão de uma atividade muito intensa, que permitiu a sua descoberta em julho de 1995, cerca de dois anos antes do seu periélio. Inúmeras campanhas observacionais puderam então ser organizadas e uma infinidade de dados foram coletados, que permitiram a obtenção de informação inédita sobre esses astros: a descoberta de novas espécies moleculares, o refinamento de modelos, etc.

A atividade de um cometa é caracterizada pela quantidade de gás e de poeira ejetados desde o núcleo. Um cometa não produz a luminosidade que ele emite. Sua atividade - e portanto seu brilho - depende, de fato, da energia solar que ele recebe. O objetivo do presente trabalho foi de determinar uma lei empírica de correlação entre a luminosidade do cometa Hale-Bopp (denominado oficialmente C/1995 O1) e a taxa de produção gasosa de H_2O , OH e CO desde a sua descoberta quando se encontrava a 7,46 UA do Sol no dia 23 de julho de 1995, ou seja, 21 meses antes do periélio, até o dia 29 de janeiro de 2006 quando se encontrava a 23,84 UA do Sol. Para o monóxido de carbono (CO) os dados observacionais disponíveis (usados na obtenção da correlação empírica) vão de 20 de agosto de 1995 ($r_h = 6,91$ UA) até 19 de agosto de 2001 ($r_h = 14,07$ UA).

O cometa Hale-Bopp era, na descoberta, três ordens de magnitude mais brilhante do que o cometa Halley tinha sido na mesma distância heliocêntrica. Tais observações, do intervalo completo de atividade de um núcleo cometário pré e pós-periélio, foram apenas possíveis anteriormente para objetos altamente evoluídos da família de Júpiter em um

intervalo muito reduzido de distâncias heliocêntricas (à parte do excepcional caso do cometa Halley) segundo [Kidger \(1996\)](#).

[Kidger et al. \(1997\)](#) utilizaram 2.917 observações visuais totais no seu estudo, que se estendeu de 24 de julho de 1995 à 30 de novembro de 1997, não aplicando nenhuma correção na abertura dos instrumentos para a análise dos dados, desde que uma fraca correlação foi encontrada entre a abertura e a magnitude visual total estimada.

Dois mecanismos geralmente considerados plausíveis para explicar episódios repentinos de atividade cometária à grandes distâncias heliocêntricas são: (i) a transição exotérmica de gelo de água da fase amorfa para a cúbica (matriz) e (ii) a sublimação de gelos, tais como monóxido de carbono, que é muito mais volátil que a água. O primeiro mecanismo foi proposto por [Patashnick \(1974\)](#) como fonte de energia para os "flare-ups" (clarões) do 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (a mudança de fase do gelo amorfo para o gelo cúbico requer uma temperatura perto de 140 K); o segundo mecanismo foi concebido por [Whitney \(1955\)](#) e o monóxido de carbono foi especificamente sugerido ser o mais provável e principal impelidor que acelera partículas de poeira microscópicas durante um importante "outburst" (erupção) do cometa Halley a 14 UA do Sol ([Sekanina \(1996\)](#)). As evidências observacionais para o cometa Hale-Bopp consideradas nesta Dissertação, nos permitem investigar apenas o segundo cenário.

Embora o cometa Hale-Bopp não seja dinamicamente novo, ele é suficientemente não evoluído, tal que a sua atividade pode lançar luz sobre a física e atividade de cometas gigantes recentemente chegados ao Sistema Solar interior.

Semelhante estudo já foi realizado em diversos cometas ou grupos de cometas, mas certamente jamais para um único objeto cobrindo um intervalo de distâncias heliocêntricas tão amplo e envolvendo tal quantidade de dados observacionais, permitindo o que é possivelmente a melhor cobertura da curva de luz de um cometa já compilada, sendo interessante comparar os resultados aos trabalhos publicados anteriormente.

São descritas as diferentes estruturas observáveis nos cometas, assim como alguns modelos utilizados para as interpretações, no Capítulo 2. No Capítulo 3 são apresentados e analisados os principais resultados obtidos.

Finalmente, será discutido na última parte (Capítulo 4) o conjunto do trabalho realizado.

O Apêndice A é composto das Tabelas A.1, A.2 e A.3. A.1: Abundâncias relativas de gelos no meio interestelar e nos cometas. A.2: Abundâncias relativas dos cometas Hyakutake e Hale-Bopp. A.3: Temperaturas de equilíbrio de sublimação de algumas moléculas e gases nobres. No Apêndice B apresentamos uma descrição sucinta do Método dos Mínimos Quadrados aqui utilizado. No Apêndice C apontamos os elementos orbitais do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) na Tabela C.1 e na Figura C.1.

Capítulo 2 ---

Generalidades sobre o estudo dos cometas

Este capítulo tem por finalidade apresentar algumas noções de física cometária. Longe de pretender e preparar uma relação exhaustiva dos conhecimentos atuais, introduzimos uma apresentação geral da natureza dos cometas, assim como dos principais modelos utilizados atualmente pelos astrofísicos para os estudar.

Então, este é mais um complemento teórico do que uma introdução ao trabalho que foi desenvolvido. A finalidade aqui é de reagrupar as informações necessárias para uma compreensão aprofundada dos resultados e das análises expostas na última parte desta Dissertação.

2.1 Natureza e origem dos cometas

2.1.1 A nuvem de Oort e as diferentes famílias de cometas

Os cometas são os mais primitivos membros do Sistema Solar. Devido suas órbitas e pequenos tamanhos, os cometas passaram por um processamento relativamente baixo, diferentemente dos corpos maiores tais como a Lua e a Terra, os quais têm sido modificados consideravelmente desde que eles se formaram. Essa natureza primitiva dos cometas está evidente em suas altas abundâncias de compostos voláteis. A composição dos cometas contém grande quantidade de informação sobre suas origens e evolução, como a origem e evolução do Sistema Solar. Por isso, eles são muitas vezes referidos como fósseis cósmicos.

Foi em 1950 que Jan Hendrik Oort propôs um modelo hoje em dia amplamente aceito, solucionando, em parte, o problema da origem dos cometas. Estudando uma amostra de 19 cometas dinamicamente novos de órbitas quasi-parabólicas, ele reconstruiu as órbitas iniciais desses astros, através do viés das leis da mecânica celeste. Essas parecem ser todas

elípticas, e a análise da distribuição de seus afélios (ponto da órbita mais afastado do Sol, em oposição ao periélio), o conduziu à seguinte conclusão: deveria existir um “reservatório de cometas” em uma região situada entre 40.000 e 100.000 Unidades Astronômicas ($1 \text{ UA} \simeq 150$ milhões de km), ou seja, nos confins do Sistema Solar, no meio interestelar local. Esse reservatório denominado “nuvem de Oort”, conteria cerca de 10^{12} objetos cuja massa total seria da ordem de 10^{25} kg (equivalente a várias massas terrestres, com uma massa cometária média de 10^{13} kg). Somente de 5% a 10% de corpos poderiam daí ser ejetados por influência das perturbações gravitacionais devidas às estrelas e nuvens moleculares gigantes próximas.

Uma vez que esses objetos foram ejetados da nuvem de Oort, suas órbitas são levadas a evoluir. De fato, se eles não são enviados para o meio interestelar, eles penetram no interior do Sistema Solar com uma órbita quasi-parabólica; esses são os cometas “novos” de grande período orbital ($P > 1.000$ anos). Dependendo de seus elementos orbitais iniciais eles terão destinos diferentes de acordo com seus movimentos Keplerianos, alimentando, assim, diferentes famílias de cometas.

Uma grande quantidade de pequenos corpos teria se formado no Sistema Solar entre as órbitas de Saturno e de Netuno. Eles teriam, em seguida, sido ejetados pelas perturbações gravitacionais dos planetas gigantes. O astrônomo Gerard Peter Kuiper supôs em 1951, a presença de pequenos corpos num cinturão situado entre as órbitas de Urano e de Plutão. Esse conteria corpos situados em órbitas ressonantes com os planetas gigantes. A recente detecção nesta região de pequenos corpos, relíquias da imensidão de objetos presentes nos primórdios do Sistema Solar ratificaria esta hipótese, atribuindo assim, aos cometas, o papel de testemunhas da formação do Sistema Solar.

A influência gravitacional dos planetas gigantes, principalmente de Júpiter, diminuirá a excentricidade de suas órbitas. Alguns evoluirão para uma família com curto período do tipo de Halley. A família de Júpiter reúne os cometas de baixa inclinação com relação à eclíptica ($i < 9^\circ$) e cujos periélios estão próximos da órbita joviana; ela será preferencialmente alimentada pelo cinturão de Kuiper.

O catálogo de [Marsden e Williams \(1996\)](#) leva em conta a distribuição de 883 cometas observados:

- de curto período ($P < 200$ anos): 185 (órbitas elípticas);

- de longo período ($P > 200$ anos): 698 (estes últimos agrupam igualmente os de órbita hiperbólicas e parabólicas);

A inclinação da órbita do Hale-Bopp, denominado C/1995 O1 na nomenclatura oficial, é próxima de 90° , seu período antes de abril de 1996 foi estimado em 4.200 anos com um afélio situado a 540 UA. Sua passagem nas vizinhanças de Júpiter praticamente dividiu por 2 seu período orbital ($P \simeq 2.392$ anos) e aproximou o seu afélio (cf. Apêndice C). Por outro lado, o estudo de suas taxas de produção de gás a uma distância heliocêntrica de $r < 3$ UA, mostra que a taxa de sublimação de CN (radical cianogênio), é da mesma ordem de grandeza que aquela do radical C_2 . Schleicher et al. (1997) notaram que essa composição é típica de cometas com períodos muito grandes provenientes da nuvem de Oort. C/1995 O1 se situa entre os quatro cometas intrinsecamente mais brilhantes já observados.

2.1.2 Estrutura e composição química

Parece quase impossível dissociar as noções de estrutura e de composição química. Nós veremos no que segue como elas se complementam uma a outra. A natureza de um cometa pode se resumir, de maneira grosseira, pela presença de um núcleo sólido em rotação, composto de uma mistura de gases e poeira, congelados. Sob os efeitos da irradiação solar ele se sublima parcialmente, liberando gases e partículas de poeira. Essas últimas, sob o efeito da gravidade solar e da pressão de radiação, são a origem da existência de uma cauda de poeira, extensa e curva. A interação de partículas carregadas com o campo magnético interplanetário criado pelo vento solar, gera uma cauda de gás ionizada, fina e retilínea. Nas vizinhanças do núcleo, gás e poeira são misturados, delineando desta maneira a “cabeleira” que deu seu nome a esses astros: é a coma. A descrição de cada uma dessas estruturas e dos principais mecanismos postos em jogo será propositalmente simplificada: ela não representa senão uma aproximação de uma situação extremamente complexa.

2.1.2.1 O núcleo

É um pequeno corpo celeste, compacto, cuja forma é irregular (deduzido das observações fotométricas) e seu diâmetro geralmente varia de 1 a 20 *km*. Ele não é observável da Terra

mesmo com os maiores telescópios, porque está quase sempre encoberto por uma coma brilhante de gás e poeira. Por outro lado, quando o cometa está a grandes distâncias heliocêntricas, o núcleo está geralmente muito fraco para ser observado em detalhe.

Somente a partir da passagem do cometa Halley em 1986, o núcleo de um cometa pode ser fotografado, através das sondas espaciais. A sonda Giotto revelou um corpo de dimensões $15 \times 8 \times 8 \text{ km}$. Essa mesma sonda mediu também seu albedo geométrico. Este pareceu ser incrivelmente baixo, com um valor de 0,04 apenas, revelando um corpo extremamente escuro, rico em carbono. Daí surge uma idéia nova: a superfície do núcleo seria - ao menos parcialmente - recoberta de uma camada orgânica refratária (rigolito), provavelmente resultado da ação da radiação UV solar e dos raios cósmicos.

Weaver et al. (1997) realizaram em 1995/96 imageamento do Hale-Bopp com a Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) do Hubble Space Telescope (HST), afim de estimar a dimensão do seu núcleo. Esse não foi resolvido, porém a intensidade devido à coma tendo sido subtraída, do centro da imagem, a intensidade residual dos “pixeis” centrais foi atribuída à luz difundida pelo núcleo. Admitindo-se um albedo de 4% (como observado no P/Halley), o diâmetro de seu núcleo foi estimado entre 27 e 42 km, o que é pelo menos três vezes maior do que o do cometa P/Halley. Esses resultados estão em bom acordo com uma estimativa da dimensão ($30 \pm 10 \text{ km}$) deduzida da medida do contínuo térmico nos comprimentos de onda milimétricos e centimétricos (Fernández (2002)).

Tendo por base as taxas de produção de água determinadas de forma semi-empírica, de Almeida et al. (2009) calcularam que o raio efetivo médio mínimo do núcleo é 26,7 km e a área ativa total é 1.865 km^2 , considerando uma atividade nuclear de 40%. Isso é comparável com uma área de desgaseificação de gelo de água de 36 km^2 , ou $\sim 10\%$ da área superficial (341 km^2) do P/Halley. De qualquer forma, está claro que o núcleo do cometa Hale-Bopp é extraordinariamente grande, o que é consistente com seu brilho.

Assim, em termos relativos, a área efetiva de desgaseificação de CO sobre o núcleo do cometa Hale-Bopp próximo de 7 UA do Sol foi quase um fator de 2 maior do que havia sido para o cometa Halley a uma distância heliocêntrica de 0,9 UA de acordo com Sekanina (1996).

Foi em 1950, ano rico para a cometologia, que Fred Whipple propôs a teoria (posteriormente confirmada pela exploração espacial) chamada de “a bola de neve suja”, para o

núcleo cometário. Trata-se de fato de um núcleo sólido constituído em sua maior parte de gelo de água encerrando partículas sólidas (poeira). Em 1952, H. Delsemme e P. Swings completaram este cenário propondo o modelo de clatratos: os gases muito voláteis são embebidos na matriz de gelo. De fato, este modelo é hoje em dia, questionado: parece que determinadas espécies como o CO existem na forma de gelo puro. Além disso, a água se condensaria na forma de gelo amorfo e não cristalino como supõe o modelo de clatratos.

Figura 2.1: A figura ilustra os diferentes modelos para a estrutura do núcleo cometário. a) Conglomerado gelado de Whipple. b) Agregado de flocos, com estrutura fractal. c) Acumulação de debris primitivos. d) Modelo composto no qual blocos refratários de diferentes tamanhos são unidos pelo gelo. Adaptado de [Weissman \(1986\)](#).

Apenas uma pequena parte da superfície total é a sede do fenômeno de sublimação: é a fração de área ativa. Essa raramente excede alguns por cento da superfície total ($\sim 20\%$ para o P/Halley). Conforme um cometa se aproxima do Sol, ele recebe mais energia. Essa é em parte utilizada para “aquecer” a mistura de gelo de água e de compostos voláteis. As

moléculas mais voláteis escaparão primeiro: é a sublimação fracionada.

Pode-se estabelecer o balanço térmico de um corpo sólido constituído por uma mistura de gelos, aquecido pelo Sol ([Fernández \(2005\)](#)):

$$F(1 - A)r_h^{-2} \cos \zeta = \sigma T_s^4 + Z(T_s)L(T_s) - K_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_S \quad (2.1)$$

onde

F é a constante solar ($= 1.367 \text{ W.m}^{-2}$ à 1 UA);

$(1 - A)$ é a fração da radiação incidente que é absorvida;

r_h é a distância heliocêntrica (em UA);

ζ é a distância do Sol ao zênite ($\cos \zeta = 1$ no ponto subsolar);

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67.10^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$);

T_s é a temperatura superficial;

L é o calor latente de sublimação do gelo (em kJ.kg^{-1});

Z é a taxa de sublimação (em $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$);

K_s é a condutividade térmica do material na superfície; e

$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_S$ é o gradiente de temperatura na superfície (z sendo a profundidade).

O termo da esquerda representa a energia solar disponível à distância r_h . À direita, o primeiro termo é a energia irradiada admitindo-se uma irradiação de corpo negro; o segundo é a energia absorvida necessária para a sublimação do gelo; o terceiro é o termo de condutividade, frequentemente desprezado. Para um corpo esférico em rotação rápida, adota-se $\langle \cos \zeta \rangle = \frac{1}{4}$. Esse modelo supõe a superfície isolada do interior do núcleo e da coma interna.

Dois regimes podem ser considerados:

- quando a sublimação do gelo é quase nula ($Z \simeq 0$) obtém-se a temperatura de equilíbrio de um corpo de albedo A à distância r_h do Sol:

$$T = 278(1 - A)^{1/4} r_h^{-1/2} \quad (2.2)$$

considerando $A \sim 0,04$ resulta em $T \sim 110 \text{ K}$ a aproximadamente 6,3 UA do Sol, como declarado no Resumo e Abstract desta Dissertação.

- na presença de sublimação do gelo, as equações da termodinâmica dão (Fernández (2005)):

$$Z(T_s) = \frac{p_{sat}(T_s)}{\sqrt{2\pi mkT_s}} \quad (2.3)$$

onde

p_{sat} é a pressão de vapor saturante;

m é a massa molecular; e

k é a constante de Boltzmann.

Nas vizinhanças do Sol ($r_h < 3$ UA), um fenômeno de termostatização mantém uma temperatura constante de quase 180 K, independentemente da distância heliocêntrica. Assim, a taxa de produção é diretamente proporcional a r_h^{-2} , a energia não sendo utilizada senão para a sublimação.

Em compensação, à grandes distâncias do Sol, a sublimação da água influi pouco sobre o equilíbrio da temperatura e torna-se fraca a uma distância superior a 4 UA, o que limita o desempenho desse modelo simplificado.

A Figura 2.2 mostra a evolução da taxa de sublimação predita por esse modelo em função de r_h . Ela indica uma dependência r_h^{-2} no início e então apresenta uma rápida queda na taxa de sublimação da água para distâncias entre 2 e 3 UA. O comportamento calculado da curva está basicamente relacionado à forte dependência da pressão de vapor sobre a temperatura. A taxa de sublimação é quase proporcional à energia imposta se a temperatura é maior que um determinado valor crítico. Este é o caso para pequenos valores de r_h e portanto Z varia como r_h^{-2} . Para distâncias maiores do que um determinado valor, a taxa de sublimação cai bruscamente com a temperatura e isto dá origem aos efeitos observados. As observações cometárias também apresentam um corte semelhante em torno dessas distâncias, depois das quais elas não são geralmente mais vistas. Esse efeito é particularmente notado no caso de cometas de curto período onde o corte ocorre em torno de $r_h \sim 3$ UA. Essas observações estão em notável concordância com a curva esperada para a sublimação da H_2O . Portanto, as observações em si parecem indicar que a H_2O deve ser o constituinte dominante do núcleo. Em adição, a teoria de vaporização dá a taxa de produção total de ordem grosseira com as taxas observadas de vários cometas

onde a água controla o processo de sublimação conforme [Krishna Swamy \(1997\)](#).

Vê-se que além de 3 UA, a sublimação da H_2O deixa de ser eficaz. No entanto, uma atividade longínqua foi notada, em observações de diversos cometas: do Halley a mais de 14 UA em fevereiro de 1991 de acordo com [Sekanina et al. \(1992\)](#) e [Priyalnik e Bar-Nun \(1992\)](#); coma de poeira em torno do Chiron a 11,82 UA segundo [Meech e Belton \(1990\)](#); de Cernis (C/1983 O1) a 23 UA do Sol observado por [Meech \(1990\)](#). Além disso, CO_2 , CO , CH_4 , NH_3 , HCN e H_2CO podem se sublimar a tais distâncias.

Figura 2.2: Taxas de vaporização Z para gelos de H_2O , CO_2 , CO e várias outras moléculas em função da distância heliocêntrica. A água efetivamente cessa de sublimar além de 3 UA, enquanto que o CO e o N_2 podem ser responsáveis por atividade cometária em distâncias heliocêntricas bem maiores. A distância depois da qual a vaporização torna-se desprezível é denotada como r_0 . Adaptado de [Delsemme \(1982\)](#).

Em 1993, a descoberta de CO na atmosfera do 29P/Schwassmann-Wachmann 1 por [Senay e Jewitt \(1994\)](#), a 6 UA do Sol, mostrou que a sublimação desta molécula é o dínamo da atividade cometária a grandes distâncias heliocêntricas. A detecção de CO a mais de 6 UA no Hale-Bopp confirmou essa hipótese, como demonstraremos neste trabalho. Essa é a molécula mais abundante depois da água (abundância relativa de 2 a 20%). Observações

em ondas de rádio permitiram estudar a desgaseificação progressiva de nove moléculas diferentes na aproximação do Sol: CO , CH_3CO , HCN , OH , H_2S , H_2CO , CS , CH_3CN , e HCN (Biver et al. (1997)).

Enfim, não se pode concluir essa apresentação do núcleo sem invocar os grãos cometários, elementos importantes para a compreensão do comportamento das taxas de produção gasosa que nós abordaremos no Capítulo 3. Supõe-se que algumas moléculas voláteis das nuvens moleculares densas ou da nebulosa solar primitiva teriam se condensado na superfície de pequenos grãos. Alguns puderam evoluir antes de se condensarem na fase de formação do Sistema Solar. Por um fenômeno de acreção eles teriam dado origem aos núcleos cometários, preservando assim, a “memória” das condições físicas reinantes na nebulosa solar primitiva naquelas épocas longínquas. Os maiores desses grãos (de diâmetro da ordem de $0,3 \mu m$) seriam constituídos de uma gema de silicatos recoberta por um manto orgânico refratário (ver a Figura 2.3).

As sondas Vega 1 e Giotto encontraram e analisaram três tipos de grãos nas imediações do P/Halley:

- um terço de grãos leves e porosos constituídos essencialmente de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, batizados de partículas “CHON”;
- um terço de grãos de composição química semelhante daquela dos condritos carbonáceos (Ca , Mg , Si , Fe , S);
- um terço de grãos, formado por uma mistura dos anteriores.

Figura 2.3: Dos grãos de poeira interestelar aos grãos cometários, de acordo com o modelo de [Greenberg \(1990\)](#).

A Figura 2.4 ilustra o cenário da rotação do núcleo posto em evidência pelos jatos de poeira.

Figura 2.4: Ilustração conceitual de um núcleo cometário e alguns dos processos de sublimação sugeridos de atuar na superfície do núcleo. Adaptado de [de Almeida \(2007\)](#).

2.1.2.2 A coma

Sublimadas a partir do núcleo, as espécies voláteis ditas moléculas-mães, coexistem com a poeira ejetada na vizinhança da sua superfície, formando a coma. Essas moléculas serão no entanto, rapidamente dissociadas e ionizadas pela radiação UV solar em moléculas-filhas: átomos, radicais e íons (C_2 , C_3 , CN , CH , NH , NH_2 , OH , H_2O^+ , CO_2^+ , CO^+ , ...). Essas últimas apresentando às vezes intensas linhas espectrais no visível, que permitiram identificá-las desde os primórdios da espectroscopia cometária ([Baldet \(1926\)](#)). Como a detecção de moléculas-mães é muito mais difícil (comprimentos de onda milimétricos

e infravermelho), frequentemente ficamos limitados a observar os produtos secundários, emitidos da fotodissociação de moléculas-mães.

Esses processos de fotodissociação liberam várias moléculas-filhas possuindo um determinado tempo de vida e velocidade. Eles governam assim a extensão do gás na coma. Atribuí-se a esse halo de gás uma velocidade de expansão dependente da distância ao núcleo (da ordem de 1 km/s , a 1 UA). Essas moléculas em expansão entram em colisão com os grãos emitidos pelo núcleo e os aceleram. Esses são pouco a pouco separados conforme seus tamanhos, pela pressão de radiação (somente os grãos de raio $R > 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ podem interagir com a luz visível).

Apesar da anisotropia de desgaseificação desde o núcleo (somente determinados locais da superfície apresentam-se recobertos por gelo, presença de jatos de gás e de poeira e desgaseificação preferencial do lado exposto ao Sol, refletindo a fração de área ativa), pode-se, em primeira aproximação, atribuir às moléculas uma distribuição espacial com simetria esférica. O modelo proposto por [Haser \(1957\)](#) descreve a densidade de moléculas-mães e moléculas-filhas em função da distância r ao núcleo (cometocêntrica).

As hipóteses são as seguintes:

- as moléculas-mães são emitidas radialmente de maneira uniforme com uma velocidade v_m ;
- elas são fotodissociadas ao fim de um tempo τ_m (tempo de vida) em moléculas-filhas;
- essas são ejetadas radialmente com uma velocidade suplementar v_D e seus tempos de vida são τ_f . Finalmente, no referencial ligado ao núcleo, suas velocidades finais são:
 $v_f = v_D + v_m$;
- despreza-se as colisões.

Define-se o “comprimento de escala” de uma molécula por $\vec{L} = \vec{v} \cdot \tau$ segundo [A’Hearn et al. \(1995\)](#).

Calcula-se facilmente a densidade volumétrica $n(r)$ de uma molécula em função da distância r ao núcleo (moléculas. km^{-3}); seja assim para uma molécula-mãe:

$$n_m(r) = \frac{Q_m}{4\pi r^2 v_f} e^{-r/L_m} \quad (2.4)$$

onde o termo exponencial provém da destruição da molécula. Q_m é a taxa de produção em moléculas. s^{-1} .

Para uma molécula-filha, também em moléculas. km^{-3} , temos:

$$n_f(r) = \frac{Q_m}{4\pi r^2 v_f} \frac{L_f}{L_f - L_m} (e^{-r/L_f} - e^{-r/L_m}) \quad (2.5)$$

Esse modelo simples foi largamente utilizado para o cálculo das taxas de produção gasosa a partir dos espectros cometários. Pode-se dar maior precisão a esse modelo considerando nos cálculos dois efeitos:

- a velocidade v_f , varia de fato com a distância ao núcleo r ;
- a ejeção das moléculas-filhas se dá na realidade de maneira isotrópica, o que leva então a modificar os comprimentos de escala do modelo de Haser, mantendo-se no entanto uma base teórica.

Esse é o modelo de “Haser equivalente” (A’Hearn et al. (1995)).

Essas fórmulas poderiam ser reutilizadas para calcular a taxa de produção de OH , o principal produto da fotodissociação da água e muito mais fácil de ser observado em rádio. Contudo, é preferível estudar moléculas-mães sempre que possível. A detecção dessas moléculas-mães tem sido difícil, em parte porque a maior parte delas não tem transições observáveis em comprimentos de onda no visível.

No presente trabalho, deduzimos as taxas de produção de OH , a partir das taxas de produção de H_2O , obtidas através do Método Semi-Empírico de Magnitudes Visuais em unidades de moléculas. s^{-1} (de Almeida et al. (1997)), a saber:

$$Q(H_2O) = \left\{ \frac{r^2 10^{-0,4(26,8+m'_v)} - p(\lambda) R_N^2 \phi_1 e^{-u\alpha}}{l_r R [1 + \delta(r, \theta)]} \right\}^{0,825} \quad (2.6)$$

utilizando-se a relação (Huebner et al. (1992)):

$$Q(H_2O) = \frac{Q(OH)}{0,85} \quad (2.7)$$

também em moléculas. s^{-1} .

Na Equação 2.6 tem-se que:

r é a distância heliocêntrica (em UA);

$-26,8$ é a magnitude visual aparente do Sol;

Δ é a distância geocêntrica (em UA);

$m'_v = m_{6,78} - 5 \log \Delta$ é a magnitude visual do cometa, reduzida para uma abertura padrão de diâmetro $6,78 \text{ cm}$ para $\Delta = 1 \text{ UA}$;

$p(\lambda)$ é o albedo geométrico do núcleo;

R_N é o raio do núcleo (em cm);

$\phi_1 e^{u\alpha}$ é a função de fase do núcleo, onde $\phi_1 = 0,9982$, $u = 1,842 \text{ rad}^{-1}$ e α o ângulo de fase do cometa em radianos;

$l_r = 6,6 \cdot 10^4 r^2$ é o comprimento de escala efetivo (em km) do radical C_2 (A'Hearn et al. (1995));

$R = 2 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ para cometas de curto período, e $R = 5 \cdot 10^{-39} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ para cometas de longo período. Valores sugeridos por de Almeida et al. (1997); e

$\delta(r, \theta)$ é a razão da luz visível espalhada pela poeira em relação aquela emitida pelo C_2 na banda-passante escotópica, em função da distância heliocêntrica r_h e do ângulo de espalhamento θ .

2.1.2.3 Caudas de gás e de poeira

No momento em que a atividade do cometa torna-se importante, pode-se delinear duas caudas: uma azulada, retilínea e estreita constituída de ions; outra esbranquiçada, encurvada e larga devido a difusão da luz solar pelas partículas de poeira.

A presença de uma cauda iônica é um indicador da abundância da molécula CO ; é de fato devido ao ion CO^+ que ela deve sua cor azulada, este possuindo várias linhas de transição eletrônica no domínio visível. Essa cauda pode se desenvolver até 15 UA e está sempre oposta à direção do Sol. Foi estudando essa estrutura que pôde-se por em evidência nos anos 50, a existência do vento solar (partículas ionizadas - 95% de prótons e 5% de núcleos de hélio - e elétrons ejetados desde a coroa solar no espaço interplanetário). Esse plasma arrasta consigo um campo magnético (tipicamente de 1 a 10 nT) que é modificado localmente na passagem de um cometa (interação com os ions cometários). As partículas carregadas da coma se deslocam em hélice em torno das linhas de força do

campo magnético. É assim que os ions cometários são capturados pelo vento solar, delineando essa cauda notável. Mesmo se a cauda de CO^+ é muito bem conhecida, não se pode ignorar a cauda de H_2O^+ , fortemente associada à produção de água, cujas bandas de emissão situadas no vermelho são dificilmente observáveis, devido particularmente a atmosfera terrestre. As formações de estruturas no interior dessas caudas variam muito rapidamente (de alguns minutos a algumas horas).

A cauda de partículas de poeira dá aos cometas o aspecto que nós conhecemos deles. Formada de partículas cometárias difusoras do fluxo solar visível, ela pode se estender por vários milhões de km . Uma vez saídas da zona de colisão da coma interna, essas partículas são submetidas, conforme suas massas, ao campo de gravitação solar e à pressão de radiação. É isso que dá a esse rastro luminoso seu aspecto encurvado. Razões geométricas de posições relativas da Terra, do Sol e do cometa, fazem com que ela possa mostrar aspectos mais ou menos espetaculares de um cometa a outro.

Estudos da coma e cauda têm revelado muito sobre os cometas, por exemplo, a morfologia da coma foi usada para ajudar a determinar o período de rotação do núcleo do Hale-Bopp.

2.2 Observações e modelos

Em 1985, o sobrevôo do cometa 21P/Giacobini-Zinner pela sonda *ICE* (International Cometary Explorer) anunciou o começo da exploração espacial de cometas. É o reencontro do cometa P/Halley em 1986 por cinco sondas (Giotto, Vega 1 e 2, Suisei e Sakigake) que permitiu superar uma etapa essencial. Essa exploração, associada a uma campanha internacional de observação *IHW* (International Halley Watch), marcou o nascimento de uma nova era para a cometologia. Paralelamente, a ampliação das observações praticamente em todos os domínios de comprimentos de onda, permite hoje em dia fazer muitos progressos no estudo de cometas.

Após um período de hibernação, a sonda Giotto foi redirecionada para um sobrevôo do cometa 26P/Grigg-Skjellerup em 1992. Em 2001 a missão *Deep Space 1* proporcionou imagens extraordinárias do cometa 19P/Borrelly, revelando um núcleo de $4 \times 4 \times 8 \text{ km}$ (Soderblom et al. (2004)). Em 2004 a sonda Stardust realizou uma aproximação bem sucedida ao cometa 81P/Wild 2, recolheu amostras de poeira e as enviou à Terra em 2006,

com a unidade de retorno, enquanto a sonda passava pela Terra. A Stardust retornou rescentemente ao cometa Tempel 1, alvo de uma missão anterior, a *Deep Impact*, atingindo o ponto máximo de aproximação de cerca de 2100 km da sua superfície em 14 de fevereiro de 2011. A missão *Deep Impact* também teve como alvo o cometa 9P/Tempel 1, lançando um módulo menor que se chocou sobre ele em 2005. Em 2007 a NASA aprovou a missão *EPOXI*, que é uma missão estendida da *Deep Impact*, que teve a finalidade de sobrevoar o cometa Hartley 2 (103P/Hartley) em 11 de outubro de 2010, utilizando os três instrumentos que ainda estão funcionando da sonda redirecionada em 1 de novembro de 2007. A missão *Rosetta* lançada em 2004 ao cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, tem sobrevôo previsto para meados de 2014.

2.2.1 Observações e espectroscopia no visível

2.2.1.1 As magnitudes

Com o propósito estimar o brilho de um astro, os astrônomos utilizam a noção de magnitude. Define-se assim, uma “escala de brilho”. Chama-se m_v a magnitude visual; essa depende da distância separando o astro do observador e de seu brilho intrínseco:

$$m_v = m_0 - 2,5 \log F. \quad (2.8)$$

Na Eq. 2.8 F é o fluxo luminoso recebido pelo observador e $F \propto 1/\Delta^2$ onde Δ é a distância geocêntrica, m_0 é a magnitude de uma estrela de referência ($m_0 = 0$ para Vega de Lira, por exemplo).

Os cometas não “produzem” a luz que eles emitem, mas eles reemitem (reflexão pelos grãos e excitação eletrônica) a energia recebida do Sol. A magnitude visual de um cometa é determinada integrando-se o fluxo luminoso sobre o conjunto da coma. Dois parâmetros interferem na evolução desse brilho:

- sua distância heliocêntrica r_h (UA);
- sua distância geocêntrica Δ (UA).

Pode-se escrever essa evolução por uma lei do tipo:

$$m_v = H_0 + 2,5 k \log \Delta + 2,5 n \log r_h. \quad (2.9)$$

De maneira a poder comparar as magnitudes de diferentes cometas e relacioná-las com as suas atividades, torna-se comodo utilizar a magnitude heliocêntrica definida por:

$$m_h = m_v - 2,5 k \log \Delta = H_0 + 2,5 n \log r_h, \quad (2.10)$$

onde H_0 é chamado de magnitude absoluta, isto é, o brilho do cometa em $r = \Delta = 1$ UA.

Em geral, $k \simeq 2$, que corresponde a uma variação de luminosidade em Δ^{-2} . Notamos que se o cometa passa com $\Delta < 0,4$ UA da Terra, a exposição da coma projetada sobre o céu torna a estimativa de m_v mais difícil porque o nosso olho tem tendência a subestimar o brilho: é o chamado “efeito delta”.

Dispõe-se há varias dezenas de anos de dados de magnitudes. Estas constituem, às vezes, a única informação disponível sobre um cometa antigo. Os astrônomos amadores desempenham hoje em dia um papel importante na elaboração de bases de dados como aquelas disponibilizadas no *ICQ* (International Comet Quarterly), completando, assim, o trabalho dos astrônomos profissionais.

2.2.1.2 A espectroscopia

Uma análise mais refinada da luz que nós recebemos dos cometas mostra que eles não se limitam a refletir a luz solar. As moléculas gasosas emitidas a partir do núcleo são excitadas pela irradiação solar e passam para os níveis de energia eletrônicos superiores. De fato, só algumas espécies possuem várias linhas de emissão intensas no visível (C_2 , C_3 , CN , NH_2 , CO^+ , H_2O^+). Esse mecanismo é chamado de fluorescência. O elétron pode voltar ao estado inicial, e a fluorescência é dita ressonante. Ele pode também se desexcitar ao passar por diversos estados de energia vibracional e/ou rotacional.

Para as moléculas-mães (com exceção de CO e S_2), somente a fluorescência de modos de vibração fundamental e a emissão espontânea dos níveis de rotação são observados. A emissão das linhas de rotação varia na coma com a distância ao núcleo. Pode-se assim, distinguir três regiões, conforme a Figura 2.5:

- a coma interna ($r < 10^4$ km), onde a distribuição de população de níveis de rotação é determinada por um equilíbrio térmico devido ao ritmo elevado de colisões;
- a coma externa ($10^4 < r < 10^6$ km), onde se estabelece um equilíbrio de fluorescência

entre a excitação das bandas de vibração pela irradiação solar, que tende a popular alguns níveis de energia mais elevados e a emissão espontânea que se opõe;

- uma região externa composta de átomos de H ($r > 10^6 \text{ km}$) visível apenas no UV.

Esses fenômenos determinam condições de excitação diferentes, que são necessárias levar em conta nos modelos de cálculos das taxas de produção das moléculas-mães (CO , por exemplo).

Figura 2.5: Esboço descritivo de um cometa. Adaptado de [Krishna Swamy \(1997\)](#)

2.2.1.3 Fotometria e quantidade de poeira

A componente refratária do material cometário também contém importante informação sobre a formação e evolução de cometas.

O cálculo da taxa de produção de poeira (Q_d) está baseado em observações realizadas com fotometria de abertura ou no estudo de perfis radiais obtidos em imagens. A fotometria de abertura utiliza um fotômetro acoplado à diferentes diafragmas, enquanto que a obtenção da imagem baseia-se no emprego de uma câmera CCD.

Q_d pode ser calculado a partir do parâmetro $Af\rho$. Esse foi introduzido por [A'Hearn et al. \(1984\)](#) como:

$$Af\rho = \frac{4r_h^2 \Delta^2 10^{-0,4(m_\odot - m_{\text{cometa}})}}{\rho} \quad (cm). \quad (2.11)$$

Aqui, A denota o albedo de Bond dos grãos, f o “fator de preenchimento” da coma, ρ o raio linear projetado da abertura do diafragma na distância (cm) do cometa usado nas observações fotométricas, $m_\odot$ é a magnitude solar aparente e m_{cometa} é a magnitude cometária medida. Δ e r_h são a distância geocêntrica em [cm] e a distância heliocêntrica [UA], respectivamente. O fator de preenchimento f é dado por:

$$f = \frac{N(\rho)\sigma}{\pi\rho^2}, \quad (2.12)$$

onde $N(\rho)$ é o número de grãos no campo de visão e σ é a seção de choque média dos grãos. Se a densidade de coluna $N(\rho) \propto \rho^{-1}$, como no caso do modelo de fluxo radial, a quantidade $Af\rho$ torna-se independente do campo de visão ou da distância geocêntrica. A vantagem da quantidade $Af\rho$ é que ela pode ser diretamente determinada a partir das quantidades mensuráveis. Essa quantidade é proporcional ao fluxo no contínuo observado e foi definida para fornecer uma medida independente da abertura, da taxa de produção de poeira. Para grãos de poeira tendo um raio médio a (μm), densidade d ($g.cm^{-3}$), albedo geométrico A_p , e fluindo para fora do núcleo com velocidade v_d ($km.s^{-1}$), a taxa de produção em massa, Q_d ($kg.s^{-1}$), é dada por:

$$Q_d = \frac{(0,67)a d v_d (Af\rho)}{A_p} \quad (2.13)$$

onde $Af\rho$ é em metros, usando $v_d = 0,13.r_h^{-0,5}$ ($km.s^{-1}$), $a = 10$ (μm), $d = 1$ ($g.cm^{-3}$) e $A_p = 0,04$ (Weaver et al. (1997)). Dadas as grandes incertezas na distribuição do tamanho dos grãos de poeira, densidade, albedo e velocidade de ejeção, Q_d deduzida dessa forma pode ser diferente da taxa real de perda de massa de poeira. Contudo, o Hale-Bopp foi claramente um cometa excepcionalmente poeirento, sendo que um valor “típico” de $\log(Af\rho/Q_{OH})$ para $r_h \sim 3$ UA é aproximadamente $25,1$ $cm.s.mol\acute{e}culas^{-1}$ (Weaver et al. (1997)).

Figura 2.6: Espectro do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) obtido em 19 de dezembro de 1997 ($r_h = 3,8$ UA, 1200 s de tempo de exposição) por [Rauer et al. \(2003\)](#).

Correlação entre a produção gasosa do cometa Hale-Bopp e a sua magnitude

3.1 *Evolução do brilho do C/1995 O1*

3.1.1 *Base de dados observacionais*

Dispomos para esse estudo de uma base de dados extraída do *ICQ*, composta de 11.734 estimativas de magnitudes visuais do cometa Hale-Bopp. Essas estimativas foram feitas usando uma série de instrumentos, desde o olho nu até o telescópio refletor tipo Cassegrain com 91,4 *cm* de abertura:

- na fase pré-periódica, 8.696 observações, assim distribuídas:
 - 927 com refletores (11%)
 - 5.598 com refratores (64%)
 - 2.171 com olho nu (25%)
- na fase pós-periódica, 3.038 observações, assim distribuídas:
 - 431 com refletores (14%)
 - 1.414 com refratores (47%)
 - 1.193 com olho nu (39%)

As Figuras 3.1 e 3.2 demonstram essas bases de dados observacionais para as fases pré e pós-periódicas, respectivamente.

Figura 3.1: Base de dados extraída do ICQ para a fase pré-periódica.

Figura 3.2: Base de dados extraída do ICQ para a fase pós-periódica.

Podemos construir a curva de luz do cometa Hale-Bopp a partir do conjunto desses dados observacionais. Entre 6 e 5,3 UA, o cometa se encontrava em conjunção com o Sol, impossibilitando toda observação, o que explica a falta de dados durante esse período.

Numerosos parâmetros são susceptíveis de falsear uma estimativa visual: diâmetro do instrumento, condições atmosféricas, presença da Lua, ausência de estrelas de referência nas vizinhanças do cometa, altura deste com relação ao horizonte (extinção atmosférica), erros sistemáticos próprios de cada observador, etc. Todos esses fatores podem dar lugar à correções, assim como a uma seleção de dados. É, no entanto, um trabalho longo e minucioso, exigindo além disso uma certa experiência no assunto. No plano desse estudo, nenhuma correção dessa ordem foi notada. Isto justifica a dispersão relativamente importante (da ordem de uma magnitude) vista sobre a curva de luz.

A Figura 3.3 mostra a evolução da magnitude visual do cometa Hale-Bopp entre 7,464 UA e sua passagem periélica ($r_h = 0,914$ UA), apresentando evidentes variações em diferentes momentos. Pelo menos cinco diferentes regimes de iluminamento, marcados por mudanças de inclinação, podem ser identificados nesta figura. Essa ampla cobertura de curva de luz permite, por exemplo, a transição da atividade baseada no CO para aquela baseada na H_2O , ser estudada neste trabalho.

A Figura 3.4 demonstra a evolução da magnitude visual do C/1995 O1 para a fase pós-periélica.

Figura 3.3: Ajuste linear para os diferentes trechos da curva de luz na fase pré-periódica.

Figura 3.4: Ajuste linear para a curva de luz na fase pós-periódica.

3.1.2 Método de análise

Afim de estudar a luminosidade verdadeira de um cometa, nós fomos levados (ver o Capítulo 2) a definir a magnitude heliocêntrica: $m_h = m_v - 5 \log \Delta$, onde Δ é a distância geocêntrica do cometa.

A primeira tarefa consiste, portanto, em converter o extenso conjunto de magnitudes visuais (m_v) em magnitudes heliocêntricas (m_h).

A evolução da magnitude heliocêntrica do Hale-Bopp em função da sua distância ao Sol (r_h) nas fases pré e pós-periélicas são apresentadas nas Figuras 3.5 a 3.10. Em geral, a curva de luz de um cometa torna-se linear nesse tipo de gráfico (Kidger et al. (1997)). A curva de luz compilada a partir da base de dados de magnitudes visuais foi ajustada através de uma série de mínimos quadrados, resumidos na Tabela 3.1.

Figura 3.5: Curva de luz e ajuste linear na fase pré-periódica considerando magnitudes heliocêntricas.

Figura 3.6: Curva de luz e ajuste linear na fase pré-periélica considerando magnitudes heliocêntricas para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.7: Curva de luz e ajuste linear na fase pré-periélica considerando magnitudes heliocêntricas para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.8: Curva de luz e ajuste linear na fase pós-periélica considerando magnitudes heliocêntricas.

Figura 3.9: Curva de luz e ajuste linear na fase pós-periódica considerando magnitudes heliocêntricas para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.10: Curva de luz e ajuste linear na fase pós-periélica considerando magnitudes heliocêntricas para $r_h > 3$ UA.

Em uma segunda etapa, testamos uma lei de evolução da magnitude m_h em função da distância heliocêntrica do cometa. Com efeito, o brilho de um cometa varia em função do fluxo de irradiação que ele recebe, portanto em função de r_h . Seu comportamento pode então ser descrito *a priori* por uma lei do tipo (ver a Eq. 2.10):

$$m_h = H_0 + 2,5 n \log(r_h) \quad (3.1)$$

onde:

n - é um índice caracterizando a variação do brilho do cometa; encontra-se para n geralmente valores típicos entre 3 e 4

H_0 - é a magnitude absoluta do cometa.

Tabela 3.1 - Ajuste das magnitudes em função da distância heliocêntrica

r_h (UA)	$H_0 \pm \sigma_H$	$n \pm \sigma_n$	R
Fase pré-periódica			
$r_h > 3$	$-1,4230 \pm 0,0522$	$3,5564 \pm 0,0337$	0,869
$r_h < 3$	$-0,5064 \pm 0,0080$	$3,1925 \pm 0,0139$	0,955
Fase pós-periódica			
$r_h < 3$	$-0,8095 \pm 0,0115$	$2,9142 \pm 0,0300$	0,903
$r_h > 3$	$-0,5101 \pm 0,0579$	$3,2404 \pm 0,0317$	0,960

Nota: σ_H e σ_n representam as incertezas em H_0 e n , respectivamente;

R é o coeficiente de correlação.

3.1.3 Resultados

3.1.3.1 Curva de luz

Detectado a mais de 7 UA, o cometa Hale-Bopp apresentou uma magnitude heliocêntrica $m_h \sim 6$ a 7, fazendo dele um cometa excepcionalmente brilhante, que apresentava uma luminosidade incomum para cometas a essa distância. A evolução pré-periódica e pós-periódica mostra grosseiramente vários domínios distintos:

1. na fase pré-periódica:

- até 3,5 UA o aumento da luminosidade foi bastante forte, permitindo supor que o Hale-Bopp se revelaria como “o cometa do século”. Durante esse período, a atividade cometária foi governada pela sublimação do CO ;
- entre 3,5 e 1,5 UA, a magnitude m_h decresceu mais lentamente, passando de 4,5 *mag* à 1,0 *mag*;
- de 1,5 UA até o periélio onde ele ultrapassou provavelmente de -1,0 *mag*, o cometa experimentou então um aumento muito importante de brilho, mas de maneira mais irregular, mesmo porque uma dispersão mais forte de magnitudes torna a interpretação mais delicada;
- em geral, a taxa média de aumento de brilho para objetos dinamicamente novos, ou medianamente novos é 2-3 vezes maior a altas distâncias heliocêntricas do que a $r_h < 1,5$ UA. Como o Hale-Bopp está somente em $r_h < 1,5$ UA por durante cerca de um mês, esse efeito não deve alterar muito a taxa média de aumento de brilho entre o periélio e $r_h = 3$ UA.

A atividade do Hale-Bopp foi dominada pela sublimação de H_2O nesses dois últimos domínios finais ($r_h < 3$ UA).

Para comparação com a Figura 3.11 é importante notar que a luminosidade do cometa se manteve praticamente constante durante mais de dois meses (de maio a julho de 1996), quando ele se encontrava entre 4 e 3 UA, isto é, no momento em que as taxas de produção de CO e H_2O eram comparáveis. É a primeira vez que se testemunha a fase de transição pré-periódica, onde a sublimação de H_2O torna-se predominante diante daquela de CO e será interessante estudar esse fenômeno e suas consequências em detalhe a seguir.

2. na fase pós-periódica:

- entre 1 e 2 UA a taxa de diminuição gradual do brilho é semelhante à taxa de aumento de brilho observada na mesma distância pré-periódica;
- devido a essa taxa relativamente lenta o cometa permaneceu um objeto brilhante por muito mais tempo do que esperado;

- a duração da sua visibilidade como um objeto de magnitude negativa por um período contínuo de 7 semanas parece ser a mais longa, jamais vista em um cometa;
- entre 2 e 3,5 UA o cometa iniciou uma taxa de diminuição de brilho mais rápida, com a sublimação do vapor de água aparentemente sendo ineficaz a uma distância heliocêntrica pós-periélica muito menor do que na fase pré-periélica, levando a um falso valor nominal alto da magnitude absoluta;
- o rápido decréscimo no brilho fez o cometa cessar a ter visibilidade a olho nu relativamente cedo, enquanto que uma curva de luz simétrica em torno do periélio teria permitido que o cometa permanecesse visível além de 1998;
- apesar disso, o período de visibilidade a olho nu de 19 meses (8 de maio de 1996 a 24 de novembro de 1997) compreendido neste trabalho, é mais do que o dobro da visibilidade à vista desarmada anterior mais longa já registrada para um cometa (9 meses para o C/1811 F1 (Flaugergues));
- as últimas observações sem o auxílio de instrumentos foram relatadas (*ICQ*) em meados de novembro de 1997, classificando o cometa em 6,5 *mag*;
- o brilho máximo está agora bem estabelecido, sendo $-0,7 \text{ mag} \pm 0,1 \text{ mag}$. As observações de magnitudes acima de $-1,0 \text{ mag}$ podem ser descartadas.

3.1.3.2 Regressões lineares

Afim de quantificar essas evoluções, efetuamos duas regressões lineares. A primeira diz respeito ao conjunto de pontos (observações) de maneira a obter uma relação equivalente à Eq. 3.1 para a fase pré-periélica. Através do método de mínimos quadrados, a melhor reta representando essa lei é:

$$m_h = 7,4822(\pm 0,0188) \log(r_h) - 0,4858(\pm 0,0082), \quad (3.2)$$

com um forte coeficiente de correlação $R = 0,974$. Isto implica em um valor de $n = 2,9929(\pm 0,0075)$.

Analogamente, para a fase pós-periélica, obtemos:

$$m_h = 8,4196(\pm 0,0266) \log(r_h) - 0,8339(\pm 0,0111), \quad (3.3)$$

também com um forte coeficiente de correlação $R = 0,985$, implicando em um valor de $n = 3,3678(\pm 0,0106)$.

Para um núcleo onde a superfície refletora é constante, encontra-se evidentemente $n = 2$ (caso de um asteroide ou de um núcleo cometário não ativo, à distâncias muito grandes). Não se pode obter o mesmo resultado com um cometa ativo por uma série de razões: variação da atividade do cometa e, portanto, da taxa de produção de poeira, efeitos sazonais, variação da superfície ativa devido, por exemplo, à rotação do núcleo, etc.

Por outro lado, uma correlação em duas regiões foi analisada por analogia com o comportamento da magnitude heliocêntrica apresentada nas Figuras 3.5 a 3.10. As retas obtidas serão muito úteis para o estudo de correlação final, permitindo particularmente, fornecer uma estimativa de magnitude no domínio onde não dispomos de nenhum dado. O conjunto de resultados é apresentado na Tabela 3.1.

3.2 Evolução da taxa de produção de gás e correlação com a magnitude

3.2.1 Taxas de produção de H_2O , OH e CO

As Figuras 3.11 e 3.12 descrevem a evolução da sublimação das diferentes espécies voláteis em função da distância heliocêntrica do cometa. Nos interessa apenas as taxas de produção de H_2O ($Q[H_2O]$), OH ($Q[OH]$) e de CO ($Q[CO]$), as espécies químicas majoritárias (OH é o traçador direto da H_2O), como mostrado na Figura 3.13. Observa-se que as taxas de produção seguem uma lei empírica da seguinte forma

$$\log Q = \log Q_0 - \gamma \log r_h, \quad (3.4)$$

como demonstrado nas Figuras 3.14 à 3.31.

Figura 3.11: Evolução das taxas de produção molecular na fase pré-periódica com a distância heliocêntrica r_h variando de 6,9 à 1,4 UA para o cometa Hale-Bopp. Extraído de [Biver et al. \(1997\)](#).

Figura 3.12: Evolução das taxas de produção de diferentes espécies gasosas nas fases pré e pós-periéricas em função da distância heliocêntrica r_h para o cometa Hale-Bopp. Extraído de [Biver et al. \(2002\)](#).

Figura 3.13: Dependências heliocêntricas de $Q[CO]$ e $Q[H_2O]$ no cometa Hale-Bopp, determinadas usando espectroscopia infravermelha de alta resolução em $\sim 4,7 \mu m$ (DiSanti et al. (2001)).

Figura 3.14: Taxa da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica.

Figura 3.15: Ajuste linear da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.16: Ajuste linear da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.17: Taxa da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica.

Figura 3.18: Ajuste linear da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periódica para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.19: Ajuste linear da produção gasosa de H_2O em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.20: Taxa da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica.

Figura 3.21: Ajuste linear da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.22: Ajuste linear da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.23: Taxa da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica.

Figura 3.24: Ajuste linear da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periódica para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.25: Ajuste linear da produção gasosa de OH em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.26: Taxa da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica.

Figura 3.27: Ajuste linear da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h > 3$ UA.

Figura 3.28: Ajuste linear da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pré-periódica para $r_h < 3$ UA.

Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e da $Q[\text{CO}]$ e a distância heliocêntrica na fase pós

Figura 3.29: Taxa da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica.

Figura 3.30: Ajuste linear da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periódica para $r_h < 3$ UA.

Figura 3.31: Ajuste linear da produção gasosa de CO em função da distância heliocêntrica para a fase pós-periélica para $r_h > 3$ UA.

A Tabela 3.2 agrupa os valores de Q_0 e γ associados aos diferentes domínios de variação de r_h para H_2O , OH e CO .

Tabela 3.2 - Ajuste da lei de evolução das taxas de produção de H_2O , OH e CO segundo a Equação 3.4

Espécie	r_h (UA)	$A \pm \sigma_A$ ($\log Q_0$)	$\gamma \pm \sigma_\gamma$	N
Fase pré-periélica				
H_2O	$r_h > 3$	$31,6726 \pm 0,0163$	$-4,0243 \pm 0,0264$	3.606
	$r_h < 3$	$31,3401 \pm 0,0027$	$-3,5249 \pm 0,0115$	5.090
OH	$r_h > 3$	$31,6016 \pm 0,0163$	$-4,0237 \pm 0,0263$	3.606
	$r_h < 3$	$31,2764 \pm 0,0027$	$-3,5257 \pm 0,0115$	5.090
CO	$r_h > 3$	$30,3666 \pm 0,1405$	$-2,3493 \pm 0,1934$	20
	$r_h < 3$	$30,1929 \pm 0,0841$	$-2,3973 \pm 0,02907$	15
Fase pós-periélica				
H_2O	$r_h < 3$	$31,4298 \pm 0,0038$	$-3,2867 \pm 0,0249$	2.139
	$r_h > 3$	$31,4939 \pm 0,0179$	$-3,9026 \pm 0,0244$	899
OH	$r_h < 3$	$31,3592 \pm 0,0038$	$-3,2852 \pm 0,0248$	2.139
	$r_h > 3$	$31,4193 \pm 0,0178$	$-3,8981 \pm 0,0243$	899
CO	$r_h < 3$	$30,2197 \pm 0,0324$	$-2,3658 \pm 0,1127$	17
	$r_h > 3$	$30,0672 \pm 0,1044$	$-2,0226 \pm 0,1174$	36

Nota: o programa utilizado fornece uma lei da forma $\log Q = A(\pm\sigma_a) - \gamma(\pm\sigma_\gamma) \log r_h$. Quando a razão σ_A/A não é muito menor do que 1, determina-se o erro dQ/Q calculando-se Q_{min} e Q_{max} a partir de $A \pm \sigma_A$. N é o número de pontos (observações) utilizadas para a correlação.

Até aqui os pontos mais importantes desse nosso estudo são os seguintes:

- CO é o principal agente estimulador da atividade cometária à grandes distâncias heliocêntricas ($r_h > 6$ UA), conforme [Rauer et al. \(1997\)](#).
- É ao redor de 6,3 UA que uma mudança na evolução da atividade intervém, quando a produção de água torna-se superior àquela do monóxido de carbono, como demonstramos nas Figuras 3.26 à 3.31.

- A mais longínqua distância na qual a desgaseificação de OH (água) já havia sido registrada em um cometa ocorreu para $r_h = 5,25$ UA, no cometa “novo” *Bowell* (1982 I) (A’Hearn et al. (1984)).
- A variação de $Q[H_2O]$ com a distância heliocêntrica, para $r_h < 3$ UA, tanto na fase pré-periélica como na fase pós-periélica, é $r_h^{-3,5}$ e $r_h^{-3,3}$, respectivamente. Portanto, longe da dependência em r_h^{-2} , necessária para o modelo de equilíbrio de vaporização (cf 2.1.2.1) do núcleo.
- Os indícios se acumulam indicando que os grãos de gelo arrastados pela sublimação das espécies voláteis seriam responsáveis pela presença de água além de 6,8 UA. Grãos de gelo de água foram detectados em infravermelho a 6,3 UA com o telescópio *UKIRT* (United Kingdom Infrared Telescope) (Davies et al. (1997)). Esse assunto será tratado novamente mais adiante.
- Uma análise gráfica das Figuras 3.14 à 3.31 demonstra uma conexão imediata com a Figura 3.13, baseada em observações usando espectroscopia infravermelha de alta resolução próximo de $4,7 \mu m$ (DiSanti et al. (2001)).
- Em contrapartida, uma análise gráfica destas mesmas figuras não demonstra uma conexão imediata com as Figuras 3.11 e 3.12, baseadas em observações em rádio nas linhas de $18 cm$ do OH e aquelas correspondentes às transições rotacionais $J = 1 - 0$ ($115,271 GHz$), $J = 2 - 1$ ($230,538 GHz$) e $J = 3 - 2$ ($345,796 GHz$) do CO , principalmente na fase pré-periélica, desprezando-se as demais espécies.

Assim, esses resultados não podem ser explicados por um modelo simples, sendo necessário invocar outros fatores para a produção gasosa.

3.2.2 Produção “global” de gás

3.2.2.1 Diferentes definições utilizadas

Foi visto, no Capítulo 2, que dois fatores contribuem para o brilho de um cometa:

- a reflexão da irradiação solar sobre os grãos de poeira (espectro contínuo);
- a emissão de radicais no visível (C_2 e CN na maioria das vezes); ver a Figura 2.6.

Fazemos então, a hipótese de que os grãos de poeira são ejetados do núcleo sob o efeito da sublimação na superfície das espécies voláteis, com CO e H_2O apresentando-se como os principais responsáveis pela produção da poeira.

Desta maneira, calculamos a produção “global” de gás (desprezando-se as espécies outras que CO e H_2O) e estudamos sua evolução. Denominamos Q_g essa taxa de produção. A idéia mais simples consiste em somar $Q[CO]$ e $Q[H_2O]$, obtendo-se assim uma estimativa da quantidade de gás sublimada. Contudo, isto não reflete as capacidades diferentes que essas duas espécies têm quanto ao arrasto dos grãos desde a superfície do núcleo.

Supondo-se uma interação dinâmica entre as moléculas sublimadas e os grãos de poeira, testamos várias definições para Q_g : ponderando-se as taxas de produção seja pela massa, seja pela raiz quadrada da massa de cada uma das espécies. Realmente, parece intuitivo que uma molécula arrasta tanto mais facilmente os grãos de poeira quanto mais massiva ela é. Por outro lado, supondo-se uma variação do vetor momento linear total ($\vec{p}$), podemos escrever para a água, por exemplo:

$$\vec{p}_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot \vec{v}_{H_2O} \quad (3.5)$$

sendo $v_{H_2O} = \sqrt{\frac{3kT_s}{m_{H_2O}}}$ a velocidade das moléculas próximas da superfície do núcleo, onde:

k é a constante de Boltzmann;

T_s é a temperatura superficial; e

m_{H_2O} é a massa da molécula de água.

Vemos que a quantidade de movimento é proporcional à raiz quadrada da massa da espécie considerada.

Para se levar em conta a desgaseificação de moléculas de água, podemos fazer uma soma ponderada da produção de CO e da produção de H_2O , $Q[CO]$ e $Q[H_2O]$, respectivamente. Suas somas grosseiras representam a taxa “global” de produção de gás em número de moléculas, mas as seguintes somas têm mais significado físico (Biver (2001)). Podemos escrever:

$$Q_1 = Q[CO] + Q[H_2O], \quad (3.6)$$

$$Q_2 = Q[CO].m_{CO} + Q[H_2O].m_{H_2O}, \quad (3.7)$$

que é a taxa de produção de massa (m_{CO} e m_{H_2O} são, respectivamente, as massas moleculares de CO e H_2O). Do mesmo modo:

$$Q_3 = Q[CO].\sqrt{m_{CO}} + Q[H_2O].\sqrt{m_{H_2O}} \quad (3.8)$$

que é proporcional ao momento total $p(CO + H_2O)$ das moléculas, se elas estão desacopladas, para as quais as partículas de poeira são mais prováveis de serem sensíveis. Também,

$$Q_4 = Q[CO].\mu_{CO} + Q[H_2O].\mu_{H_2O}, \quad (3.9)$$

onde:

$$\mu_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_{H_2O} + m_{CO}} = 0,60865$$

e

$$\mu_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{CO}} = 0,39135.$$

Assim,

$$Q_5 = Q[CO].\sqrt{\mu_{CO}} + Q[H_2O].\sqrt{\mu_{H_2O}}, \quad (3.10)$$

onde

$$\sqrt{\mu_{CO}} = \frac{\sqrt{m_{CO}}}{\sqrt{m_{H_2O}} + \sqrt{m_{CO}}} = 0,55498$$

e

$$\sqrt{\mu_{H_2O}} = \frac{\sqrt{m_{H_2O}}}{\sqrt{m_{H_2O}} + \sqrt{m_{CO}}} = 0,44502.$$

Notamos, de passagem, que se Q_1 é homogênea à um determinado número de moléculas por unidade de tempo e Q_2 possui uma deficiência em massa, então Q_3 não tem nenhum significado físico.

3.2.2.2 Evolução da produção gasosa com a distância heliocêntrica

A evolução dessas diferentes taxas de produção de gás em função da distância heliocêntrica e magnitude heliocêntrica nas fases pré e pós-periélicas, respectivamente, para $r_h > 3$ UA e $r_h < 3$, são demonstradas nas Figuras 3.32 a 3.37.

Os diferentes pontos foram calculados da seguinte maneira:

- presumimos que $Q[CO] \gg Q[H_2O]$ para $r_h > 6$ UA;
- nos baseamos nas taxas de produção de CO , às quais associamos uma taxa de produção de H_2O , por sua vez, obtidas a partir de regressões lineares calculadas.

Qualquer que fosse o modelo utilizado, as inclinações ($-0,409$ na fase pré e $-0,371$ na fase pós-periélica) mais ou menos fortes sugerem uma boa correlação com a luminosidade. Isso será investigado mais à frente.

Figura 3.32: Evolução das diferentes Q_n com a magnitude heliocêntrica na fase pré-periódica.

Figura 3.33: Evolução das diferentes Q_n com $r_h > 3$ UA na fase pré-periódica.

Figura 3.34: Evolução das diferentes Q_n com $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Figura 3.35: Evolução das diferentes Q_n com a magnitude heliocêntrica na fase pós-periódica.

Figura 3.36: Evolução das diferentes Q_n com $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.

Figura 3.37: Evolução das diferentes Q_n com $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Tabela 3.3 - Resultado dos ajustes das Q_g segundo as Equações 3.6 a 3.10

Fase	Taxa	N	$A \pm \sigma_A$	$B \pm \sigma_B$	R
Pré	Q_1	35	$31,1179 \pm 0,0132$	$-0,4178 \pm 0,0034$	0,999
	Q_2	35	$32,3867 \pm 0,0167$	$-0,4032 \pm 0,0043$	0,998
	Q_3	35	$31,7513 \pm 0,0149$	$-0,4108 \pm 0,0039$	0,998
	Q_4	35	$30,7239 \pm 0,0167$	$-0,4032 \pm 0,0043$	0,998
	Q_5	35	$30,9199 \pm 0,0149$	$-0,4108 \pm 0,0039$	0,998
Pós	Q_1	53	$31,0467 \pm 0,0257$	$-0,3801 \pm 0,0046$	0,996
	Q_2	53	$32,3162 \pm 0,0286$	$-0,3641 \pm 0,0051$	0,995
	Q_3	53	$31,6802 \pm 0,0273$	$-0,3722 \pm 0,0049$	0,995
	Q_4	53	$30,6535 \pm 0,0286$	$-0,3641 \pm 0,0051$	0,995
	Q_5	53	$30,8488 \pm 0,0273$	$-0,3722 \pm 0,0049$	0,995

Nota: N é o número de pontos utilizados para a correlação.

σ_A e σ_B representam as incertezas em A e B , respectivamente.

Tabela 3.4 - Resultado dos ajustes das Q_g segundo as Equações 3.6 a 3.10

Taxa	N	$A \pm \sigma_A$	$B \pm \sigma_B$	R
Fase pré-periódica		$r_h > 3 \text{ UA}$		
Q_1	20	$31,0438 \pm 0,0489$	$-0,4013 \pm 0,0101$	0,994
Q_2	20	$32,3058 \pm 0,0607$	$-0,3850 \pm 0,0125$	0,990
Q_3	20	$31,6729 \pm 0,0548$	$-0,3932 \pm 0,0113$	0,992
Q_4	20	$30,6431 \pm 0,0607$	$-0,3848 \pm 0,0125$	0,990
Q_5	20	$30,8415 \pm 0,0548$	$-0,3932 \pm 0,0113$	0,992
		$r_h < 3 \text{ UA}$		
Q_1	15	$31,1416 \pm 0,0083$	$-0,4418 \pm 0,0046$	0,992
Q_2	15	$32,4159 \pm 0,0120$	$-0,4335 \pm 0,0067$	0,998
Q_3	15	$31,7778 \pm 0,0100$	$-0,4379 \pm 0,0056$	0,999
Q_4	15	$30,7531 \pm 0,0120$	$-0,4335 \pm 0,0067$	0,998
Q_5	15	$30,9464 \pm 0,0100$	$-0,4379 \pm 0,0056$	0,999
Fase pós-periódica		$r_h < 3 \text{ UA}$		
Q_1	17	$31,1047 \pm 0,0035$	$-0,4268 \pm 0,0018$	0,999
Q_2	17	$32,3802 \pm 0,0049$	$-0,4182 \pm 0,0026$	0,999
Q_3	17	$31,7415 \pm 0,0041$	$-0,4228 \pm 0,0022$	0,999
Q_4	17	$30,7175 \pm 0,0049$	$-0,4182 \pm 0,0026$	0,999
Q_5	17	$30,9101 \pm 0,0042$	$-0,4228 \pm 0,0022$	0,999
		$r_h > 3 \text{ UA}$		
Q_1	36	$31,7153 \pm 0,0659$	$-0,3303 \pm 0,0099$	0,985
Q_2	36	$31,9608 \pm 0,0728$	$-0,3106 \pm 0,0109$	0,979
Q_3	36	$31,3345 \pm 0,0695$	$-0,3202 \pm 0,0104$	0,982
Q_4	36	$30,2981 \pm 0,0727$	$-0,3106 \pm 0,0109$	0,979
Q_5	36	$30,5031 \pm 0,0695$	$-0,3202 \pm 0,0104$	0,982

Nota: N é o número de pontos utilizados para a correlação.

σ_A e σ_B representam as incertezas em A e B , respectivamente.

3.2.3 Correlação entre as diferentes taxas de produção e a magnitude

3.2.3.1 Técnica de aproximação do problema

Lembramos que estimamos o radical hidroxila (OH) representando cerca de 85% dos produtos da fotodissociação da água, o que implica na relação Huebner et al. (1992)

$$Q[H_2O] = 1,176 Q[OH], \quad (3.11)$$

sendo que $Q[H_2O]$ são determinadas semi-analiticamente a partir das magnitudes visuais (de Almeida et al. (1997)) conforme Equação 2.6:

$$Q(H_2O) = \left\{ \frac{r^2 10^{-0,4(26,8+m'_v)} - p(\lambda) R_N^2 \phi_1 e^{-u\alpha}}{l_r R[1 + \delta(r, \theta)]} \right\}^{0,825}.$$

Por sua vez, as taxas de produção de CO foram obtidas utilizando o modelo de Ha-ser (ver 2.1.2.2) em observações realizadas através dos radiotelescópios de 30 m do *IRAN* (Institut de Radioastronomie Millimetrique, Espanha) e de 15 m do *JCMT* (James Clerk Maxwell Telescope, Hawaii), gentilmente cedidas para este estudo por Nicolas Biver (comunicação particular, 2007). Além disso, utilizamos os trabalhos de DiSanti et al. (2001) e Jewitt et al. (1996), totalizando um conjunto significativo com 88 observações.

Afim de formar os pares (Q, m_h) , uma solução consiste em achar as médias das magnitudes no mesmo intervalo de tempo necessário ao cálculo da taxa de produção. Todavia, é preferível utilizar as regressões lineares calculadas na seção 3.1.3 com essa finalidade. Esse método permite, além disso, extrapolar os dados no caso em que nenhuma estimativa seja disponível. É relativamente fácil determinar uma discrepância muito grande na magnitude a partir das Figuras 3.3 e 3.4.

Notamos que os erros nas taxas de produção são relativamente inexpressivos. De fato, somente foram levados em conta os erros estatísticos às observações. Seria necessário associar a eles o erro sistemático inerente ao modelo utilizado para deduzir as taxas de produção a partir das observações.

3.2.3.2 Método

Lembramos inicialmente que para as duas quantidades a serem correlacionadas, já foram estabelecidas as leis empíricas seguintes:

$$Q = \frac{Q_0}{r_h^\gamma} \quad (3.12)$$

$$m_h = H_0 + 2,5n \log r_h.$$

Em 3.12, Q_0 é a taxa de produção a 1 UA e H_0 é a magnitude absoluta do cometa sobre os intervalos de distância semelhantes (ver os itens 3.1.3 e 3.2.1).

Duas leis foram testadas:

- A primeira, que relaciona diretamente a taxa de produção Q com a magnitude heliocêntrica m_h :

$$\log Q = A_1 - B_1 m_h \quad (3.13)$$

o que implica, utilizando-se as relações (3.12), em

$$\log Q_0 = A_1 - B_1 H_0 \quad (3.14)$$

$$B_1 = 0,4 \frac{\gamma}{n}.$$

B_1 representa assim, a sensibilidade das variações de magnitude com relação às variações das taxas de produção. Os parâmetros γ e n seriam, então, diretamente proporcionais.

- A segunda lei corrige as magnitudes da irradiação solar recebida pelo cometa:

$$\log Q = A_2 - B_2 (m_h - 5 \log r_h) \quad (3.15)$$

o que implica, utilizando-se as relações (3.12), em

$$\begin{aligned} \log Q_0 &= A_2 - B_2 h \\ e \\ B_2 &= 0,4 \frac{\gamma}{n - 2}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

O coeficiente B_2 está definido se as variações de $n - 2$ são proporcionais às variações de γ . O que significa que as variações das taxas de produção seriam proporcionais às variações da magnitude corrigida das variações da irradiação solar.

Assim, supondo-se que a taxa de produção de poeira Q_d é proporcional àquela de gás Q_g , o brilho corrigido da irradiância solar será proporcional a Q_d . Assim,

$$\begin{aligned} Q_d &= \alpha Q_g \\ m_h - 5 \log r_h &= -2,5 \log (\beta Q_d) \\ &= -2,5 \log (\alpha \beta Q_g) \end{aligned} \quad (3.17)$$

temos portanto:

$$\log Q_g = A_2 - 0,4 (m_h - 5 \log r_h).$$

Devemos assim, encontrar uma inclinação próxima de 0,4.

A partir dessas duas leis, procuramos correlacionar as quantidades seguintes:

- $\log Q[H_2O]$ - função da magnitude heliocêntrica
- $\log Q[OH]$ - função da magnitude heliocêntrica
- $\log Q[CO]$ - função da magnitude heliocêntrica

- $\log Q_g$ - as cinco Equações de 3.6 a 3.10 apresentadas na seção 3.2.2.1 em função da magnitude.

Novamente, utilizando o procedimento de regressão linear apresentado no Apêndice B, definimos um erro em $\log Q$ a partir do erro disponível em Q .

3.2.3.3 Resultados

1. Correlação entre $Q[H_2O]$, $Q[OH]$, $Q[CO]$ e a magnitude

Sendo o monóxido de carbono e a água os principais agentes de atividade cometária a grande e pequena distância heliocêntrica, respectivamente, fixamos um limite arbitrário a 3 UA. Desta maneira realizamos para cada espécie dois ajustes das Equações 3.13 e 3.15, segundo seus domínios de distâncias. Isso nos permitiu, além disso, comparar nossos resultados com aqueles obtidos por outros autores (para outros cometas) que não dispunham de dados além de 3 UA.

Os resultados destes ajustes estão agrupados na Tabela 3.5 e ilustrado no conjunto de Figuras 3.38 a 3.49 para $Q[H_2O]$; Tabela 3.6 e conjunto de Figuras 3.50 a 3.61 para $Q[OH]$; e Tabela 3.7 e conjunto de Figuras 3.62 a 3.73 para $Q[CO]$.

Correlação entre a $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pré

Figura 3.38: Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pré-periêlica.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.39: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.40: Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pós

Figura 3.41: Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pós-periódica.

Correlação entre a $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pós

Figura 3.42: Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.

Correlação entre a $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.43: Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Figura 3.44: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para a fase pré-periética.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.45: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.46: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pré-periélica.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta para a fase pós

Figura 3.47: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para a fase pós-periódica.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta para $r_h < 3$ na fase pós

Figura 3.48: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.

Correlação entre a $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.49: Correlação entre $Q[H_2O]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Tabela 3.5 - Resultado do ajuste da $Q[H_2O]$ segundo as Equações 3.13 e 3.15.

Domínio de r_h (UA)	N	Quantidade correlacionada à $Q[H_2O]$	$A \pm \sigma_A$	$B \pm \sigma_B$	R
Pré:					
$r_h > 3$	3.606	m_h	$30,8573 \pm 0,0069$	$-0,4100 \pm 0,0017$	0,971
$r_h < 3$	5.090	m_h	$31,1148 \pm 0,0013$	$-0,4292 \pm 0,0008$	0,991
Pós:					
$r_h < 3$	2.139	m_h	$31,0751 \pm 0,0021$	$-0,4244 \pm 0,0017$	0,983
$r_h > 3$	899	m_h	$31,1627 \pm 0,0124$	$-0,4655 \pm 0,0023$	0,989
Pré:					
$r_h > 3$	3.606	$m_h - 5 \log r_h$	$29,7458 \pm 0,0072$	$-0,5592 \pm 0,0063$	0,827
$r_h < 3$	5.090	$m_h - 5 \log r_h$	$30,7695 \pm 0,0043$	$-0,8208 \pm 0,0062$	0,879
Pós:					
$r_h < 3$	2.139	$m_h - 5 \log r_h$	$30,8012 \pm 0,0103$	$-0,6484 \pm 0,0115$	0,774
$r_h > 3$	899	$m_h - 5 \log r_h$	$30,2357 \pm 0,0293$	$-0,8959 \pm 0,0161$	0,881

Nota: N é o número de observações utilizadas para a correlação; σ_A e σ_B representam as incertezas em A e B , respectivamente.

Figura 3.50: Correlação entre $Q[\text{OH}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pré-periódica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.51: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pré-periélica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.52: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Figura 3.53: Correlação entre $Q[\text{OH}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pós-periélica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pós

Figura 3.54: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.55: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pós-periélica.

Figura 3.56: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para a fase pré-periódica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.57: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pré-periérica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.58: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Figura 3.59: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para a fase pós-periódica.

Figura 3.60: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pós-periódica.

Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.61: Correlação entre $Q[OH]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Tabela 3.6 - Resultado do ajuste da $Q[OH]$ segundo as Equações 3.13 e 3.15.

Domínio de r_h (UA)	N	Quantidade correlacionada à $Q[OH]$	$A \pm \sigma_A$	$B \pm \sigma_B$	R
Pré:					
$r_h > 3$	3.606	m_h	$30,7866 \pm 0,0069$	$-0,4100 \pm 0,0017$	0,971
$r_h < 3$	5.090	m_h	$31,0440 \pm 0,0013$	$-0,4291 \pm 0,0008$	0,991
Pós:					
$r_h < 3$	2.139	m_h	$31,0045 \pm 0,0021$	$-0,4243 \pm 0,0017$	0,983
$r_h > 3$	899	m_h	$31,0923 \pm 0,0124$	$-0,4655 \pm 0,0023$	0,989
Pré:					
$r_h > 3$	3.606	$m_h - 5 \log r_h$	$29,6752 \pm 0,0072$	$-0,5592 \pm 0,0063$	0,827
$r_h < 3$	5.090	$m_h - 5 \log r_h$	$30,6988 \pm 0,0043$	$-0,8208 \pm 0,0062$	0,879
Pós:					
$r_h < 3$	2.139	$m_h - 5 \log r_h$	$30,7306 \pm 0,0103$	$-0,6484 \pm 0,0115$	0,774
$r_h > 3$	899	$m_h - 5 \log r_h$	$30,1653 \pm 0,0293$	$-0,8960 \pm 0,0161$	0,880

Nota: N é o número de observações utilizadas para a correlação; σ_A e σ_B representam as incertezas em A e B , respectivamente.

Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e da $Q[\text{CO}]$ e a magnitude heliocêntrica na fase pré

Figura 3.62: Correlação entre $Q[\text{CO}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.63: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.64: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre $Q[\text{H}_2\text{O}]$ e da $Q[\text{CO}]$ e a magnitude heliocêntrica na fase pós

Figura 3.65: Correlação entre $Q[\text{CO}]$ e a magnitude heliocêntrica para a fase pós-periherica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ na fase pós

Figura 3.66: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h < 3$ UA na fase pós-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.67: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude heliocêntrica para $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude absoluta para a fase pré-periódica

Figura 3.68: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude absoluta (H_0) na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pré

Figura 3.69: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude absoluta para $r_h < 3$ na fase pré

Figura 3.70: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pré-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude absoluta para a fase pós-periódica

Figura 3.71: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude absoluta (H_0) na fase pós-periódica.

Correlação entre a $Q[CO]$ e a magnitude absoluta para $r_h < 3$ na fase pós

Figura 3.72: Correlação entre $Q[CO]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h < 3$ UA na fase pós-periélica.

Correlação entre a $Q[\text{CO}]$ e a magnitude absoluta para $r_h > 3$ na fase pós

Figura 3.73: Correlação entre $Q[\text{CO}]$ e a magnitude absoluta (H_0) para $r_h > 3$ UA na fase pós-periódica.

Tabela 3.7 - Resultado do ajuste da $Q[CO]$ segundo as Equações 3.13 e 3.15.

Domínio de r_h (UA)	N	Quantidade correlacionada à $Q[CO]$	$A \pm \sigma_A$	$B \pm \sigma_B$	R
Pré:					
$r_h > 3$	20	m_h	$30,1607 \pm 0,1116$	$-0,3035 \pm 0,0230$	0,949
$r_h < 3$	15	m_h	$30,0372 \pm 0,0699$	$-0,3204 \pm 0,0389$	0,909
Pós:					
$r_h < 3$	17	m_h	$29,9854 \pm 0,0255$	$-0,2810 \pm 0,0134$	0,982
$r_h > 3$	36	m_h	$29,8669 \pm 0,0930$	$-0,2402 \pm 0,0139$	0,946
Pré:					
$r_h > 3$	20	$m_h - 5 \log r_h$	$29,8636 \pm 0,0895$	$-0,9148 \pm 0,0695$	0,949
$r_h < 3$	15	$m_h - 5 \log r_h$	$29,7235 \pm 0,0513$	$-0,9656 \pm 0,1171$	0,909
Pós:					
$r_h < 3$	17	$m_h - 5 \log r_h$	$29,6428 \pm 0,0225$	$-0,6918 \pm 0,0330$	0,982
$r_h > 3$	36	$m_h - 5 \log r_h$	$29,5740 \pm 0,0765$	$-0,5915 \pm 0,0343$	0,946

Nota: N é o número de observações utilizadas para a correlação; σ_A e σ_B representam as incertezas em A e B , respectivamente.

2. Correlação entre as diferentes Q_g e a magnitude

Adotamos para Q_g as cinco definições apresentadas no item 3.2.2.1. Os ajustes foram realizados nos domínios 1 (pré-periélio; pós-periélio), 2 ($r_h > 3$) e 3 ($r_h < 3$) de distâncias heliocentricas para cada uma das fases pré e pós-periélio. Todos os resultados numéricos estão nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Notamos que os resultados são muito próximos uns dos outros qualquer que seja a definição utilizada para Q_g , mesmo se os pontos calculados simplesmente somando-se as taxas de produção dão em geral, um coeficiente de correlação menor. Isto pode ser explicado facilmente pelo fato de que $Q[CO]$ predomina sobre $Q[H_2O]$ além de 6 UA, aproximadamente. Inversamente, é $Q[H_2O]$ que predomina desde 6,3 UA. O fato de ponderarmos as duas taxas não pode influenciar a correlação senão no estado transitório entre aproximadamente 5 e 8 UA. Tendo fixado um limite arbitrário à 3 UA, podemos constatar na Tabela 3.4 que a inclinação B não varia praticamente para $r_h < 3$ UA, tanto para a fase pré como para a fase pós-periódica, qualquer que seja o modelo adotado. A diferença é mais acentuada à grandes distâncias ($r_h > 3$). Enfim, testamos uma correlação entre a taxa de produção gasosa “global” e a magnitude, mas ainda não foi possível encontrar nenhuma lei simples entre essas duas quantidades. Mesmo levando-se em conta uma subestimação da taxa de produção do CO e da desgaseificação de H_2O desde grãos cometários até 4 - 3 UA, parece difícil encontrar uma única reta de evolução. Isso poderia, talvez, traduzir as capacidades diferentes que tem essas duas moléculas-mães quanto ao arrasto da poeira desde a sua sublimação, fenômeno complexo para moléculas.

3.3 Discussão final e perspectiva

3.3.1 Evolução à pequena distância heliocêntrica

Vimos no Capítulo anterior que fixou-se arbitrariamente um limite em 3 UA no processo do tratamento dos dados. Realmente, vários estudos similares de correlação foram conduzidos por autores que não dispunham de estimativas de magnitude ou de observação de espectros a uma distância superior a 3 UA (fraco brilho dos cometas, detecção muito tardia, fraca atividade não permitindo calcular as taxas de produção etc). Convinha então,

estabelecer neste estudo resultados comparáveis àqueles já publicados. Notamos que todos os autores utilizaram unicamente as taxas de produção de água afim de estabelecer sua correlação, muito poucas observações de CO sendo disponíveis.

Festou (1986) utilizou 28 pares de dados para 16 cometas diferentes, onde as taxas de produção de OH tinham sido deduzidas das observações no ultravioleta do satélite *IUE* (International Ultraviolet Explorer).

Schloerb et al. (1987) obtiveram taxas de produção de OH para o P/Halley a partir de observações realizadas em rádio no *NRAO* (National Radio Astronomy Observatory).

Sekanina (1989) utilizou em seu estudo dados do cometa P/Halley publicados antes de 1989.

Bockelée-Morvan e Rickman (1997) construíram curvas de produção de gás do Hale-Bopp e as interpretaram, a partir de uma amostra contendo apenas 17 pares de dados, para $3 > r_h(UA) > 1$.

L. Jorda, em sua tese de doutorado (1997), conduziu esse estudo sobre uma amostra de 15 cometas, dos quais 4 de curto período ($P < 200$ anos) e 11 novos, totalizando 96 pares ($Q[H_2O]$, m_h). O ajuste da Equação 3.13 foi realizado sobre o conjunto de cometas, mas também por grupos de cometas.

Enfim, recentemente Jorda et al. (2008) apresentaram uma revisão para uma relação anterior (Jorda et al. (1992)), incluindo dessa vez um total de 37 cometas, totalizando 241 conjunto de dados.

Os diversos resultados estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Comparação das leis de correlação publicadas.

Amostra	N	A	B	Referência
16 cometas	28	32,4	0,4	Festou (1986)
P/Halley	9	30,03	0,18	Schloerb et al. (1987)
P/Halley	*	30,6	0,25	Sekanina (1989)

Continua na próxima página...

Tabela 3.8 - Continuação

Amostra	N	A	B	Referência
Hale-Bopp	17	30,49	0,24	Bockelée-Morvan e Rickmann (1997)
13 cometas	87	30,74	0,240	Jorda et al. (1992)
15 cometas	96	30,78	0,265	Jorda (1997)
4 cometas de curto período	43	30,75	0,264	Jorda (1997)
11 cometas de longo período	53	30,69	0,249	Jorda (1997)
37 cometas	241	30,675	0,2453	Jorda et al. (2008)

Nota: N é o número de pares de pontos utilizados para a correlação.

A e B representam, respectivamente, os coeficientes A_1 e B_1 da Equação 3.13.

* Compilação das taxas do P/Halley antes de 1989.

Este estudo mostrou que o Hale-Bopp satisfaz, aproximadamente, a mesma lei empírica determinada para outros cometas. L. Jorda encontrou uma inclinação de 0,265 para o conjunto de seus cometas, mas acima de tudo, uma inclinação muito fraca para os cometas novos (0,249). Assim, parece que o Hale-Bopp confirma essa tendência. É necessário notar, além do mais, que L. Jorda fez, por algumas vezes, o uso de dados pós-periélicos somente em seus ajustes (para P/Halley, Wilson (1987 VII), Austin (1990 V)), enquanto que nós fizemos uso de ambas as fases, assim como a maioria dos outros autores.

É necessário, igualmente, notar a boa correlação que nós obtivemos com a produção “global” de gás. Esta é a primeira vez que se tenta esse estudo, pois a taxa de produção de CO foi calculada em poucos cometas ou insuficientemente para determinar uma lei empírica equivalente. O cometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1 é o único cometa para o qual se dispõe suficientemente de taxas $Q[CO]$, calculadas para conduzir um estudo comparável.

Contudo, o 29P/S-W 1 é um caso a parte, pois, apesar de sua distância mínima do Sol (periélio) ser mais ou menos constante e grande ($e = 0,135$, $q = 5,5$ UA), ele experimentou alguns surtos de atividade, quando à grande distância do Sol. Seria portanto interessante examinar se existe uma correlação entre essas erupções de atividade observadas no visível e a taxa de produção do CO , sendo o Hale-Bopp intrinsecamente mais brilhante que o 29P/S-W 1 na fase pós-periódica por, no mínimo, um fator 15.

3.3.2 Evolução à grande distância heliocêntrica

É a primeira vez que uma correlação da produção de gás com a magnitude é realizada à grande distância heliocêntrica. Apenas alguns raros cometas foram observados a grandes distâncias do Sol, principalmente P/Halley e 29P/S-W 1. Os dois pontos importantes são os seguintes:

- A evolução de $Q[CO]$ a grande distância ($r_h > 3$ UA) é relativamente próxima daquela de $Q[H_2O]$ a curta distância ($r_h < 3$ UA), ([Bockelée-Morvan e Rickman \(1997\)](#)). Neste trabalho encontramos:

fase pré $r_h > 3$:

- $\log Q[H_2O] = 30,8573(\pm 0,0069) - 0,4100(\pm 0,0017) m_h$
- $\log Q[OH] = 30,7866(\pm 0,0069) - 0,4100(\pm 0,0017) m_h$
- $\log Q[CO] = 30,1607(\pm 0,1116) - 0,3035(\pm 0,0230) m_h$

fase pré $r_h < 3$:

- $\log Q[H_2O] = 31,1148(\pm 0,0013) - 0,4292(\pm 0,0008) m_h$
- $\log Q[OH] = 31,0440(\pm 0,0013) - 0,4291(\pm 0,0008) m_h$
- $\log Q[CO] = 30,0372(\pm 0,0699) - 0,3204(\pm 0,0389) m_h$

fase pós $r_h < 3$:

- $\log Q[H_2O] = 31,0751(\pm 0,0021) - 0,4244(\pm 0,0017) m_h$
- $\log Q[OH] = 31,0045(\pm 0,0021) - 0,4243(\pm 0,0017) m_h$
- $\log Q[CO] = 29,9854(\pm 0,0255) - 0,2810(\pm 0,0134) m_h$

fase pós $r_h > 3$:

- $\log Q[H_2O] = 31,1627(\pm 0,0124) - 0,4655(\pm 0,0023) m_h$
- $\log Q[OH] = 31,0923(\pm 0,0124) - 0,4655(\pm 0,0023) m_h$
- $\log Q[CO] = 29,8669(\pm 0,0930) - 0,2402(\pm 0,0139) m_h$

Notamos, todavia, que existe uma diferença de $\sim 1,03$ sobre o coeficiente A da $Q[H_2O]$ em relação a $Q[CO]$, o que corresponde a um fator $\sim 10,7$.

- A evolução de Q_g mostra dois regimes, de um lado e de outro da fase transitória, bastante próximos um do outro, no entanto com uma inclinação muito forte à grande distância heliocêntrica. Resultados recentes indicariam que o Hale-Bopp seria mais “poeirento” à grandes distâncias heliocêntricas e a razão poeira/gás $\left(\frac{Q_d}{Q_g}\right)$ diminuiria sistematicamente com r_h (Weaver et al. (1997)). A taxa de produção do Hale-Bopp sendo mais do que duas ordens de magnitude maior do que o Halley em uma distância comparável.

Por qualquer critério de medida o Hale-Bopp revela-se assim, um cometa extraordinariamente poeirento, sua razão poeira/gás sendo aproximadamente cinco vezes superior àquela do P/Halley no periélio.

Rauer et al. (1997) mediram a diminuição de $\left(\frac{Q_d}{Q_g}\right)$ de um fator 3 entre abril e outubro de 1996.

Esse comportamento surpreendente poderia ser explicado pela presença de um halo de grãos de gelo à grande distância, de albedo mais alto. O parâmetro $Af\rho$ (ver 2.2.1.3) teria sido por conseguinte muito alto a grande distância do Sol, onde o gelo de água praticamente não se sublima. Por volta de 6 UA, a água começa a se sublimar, o halo de grãos recobertos de gelo desaparece progressivamente, diminuindo, consequentemente, a refletividade da coma. O parâmetro $Af\rho$ (a partir do qual calculamos Q_d) diminuiria, então, rapidamente, o que pode explicar o resultado publicado por Rauer et al. (1997). A detecção de grãos de gelo em IV ($\lambda \sim 1,5$ e $2,05 \mu m$) até perto de 7 UA confirmaria essa hipótese, conforme Davies et al. (1997).

- A Q_g global do Hale-Bopp é aproximadamente 20 vezes maior e a Q_d cerca de 100 vezes maior do que para o Halley. Em geral, Q_g depende de r_h mais do que Q_d , mas

as diferenças entre as várias espécies gasosas e a poeira com relação a isso são menos extremas em $r_h \leq 2,5$ UA (Schleicher et al. (1997)). Esse é, sem dúvida, o cometa mais produtivo e poeirento já observado.

3.3.3 Transição durante a atividade

Vimos que é por volta de 6,3 UA que houve a transição na direção da atividade cometária, quando a $[H_2O]$ substituiu o $[CO]$. Grosseiramente, as taxas de produção de $[CO]$ e de $[H_2O]$ de um cometa deveriam apresentar o comportamento apresentado na Figura 2.2. A dependência em r_h^{-2} à curta distância sendo devida à variação de energia recebida. As evoluções observadas são distintas (ver Figuras 3.11 a 3.13), principalmente quando determinadas através de informações obtidas em diferentes regiões espectrais e modelos.

Os fenômenos são de fato muito complexos, com numerosos fatores podendo intervir. Retomando a hipótese do halo de grãos de gelo citada acima, propomos que o aumento aparente da taxa de produção de poeira poderia ser compensado pela queda do albedo a medida que r_h diminui. Efetivamente, os grãos de gelo se sublimam ($T_{sub} \sim 152$ K), os grãos refratários de menor poder de reflexão começam a dominar a emissão de poeira. Isso poderia justificar, em parte, a estagnação observada entre maio e junho de 1996.

Vários indicadores apoiam essa hipótese de grãos de gelo. A observação dos deslocamentos Doppler indicam que além de 3,5 UA as linhas de OH (3064 Å) estão mais deslocadas para o azul que aquelas de CO (2061 Å), indicando que o OH proveria de grãos ejetados com uma velocidade mais baixa que CO . Esperamos, de fato, baixas velocidades para os grãos maiores ou para os grãos menores provenientes da fragmentação de partículas maiores. A sublimação desses grãos tem lugar em regiões mais próximas do núcleo a medida que o cometa se aproxima do Sol. Além do mais, a presença de água observada perto de 6 UA do Sol não pode ser explicada senão pela sublimação de grãos; simulações mostraram que esses se reaquecem na coma, permitindo-lhes assim atingir sua temperatura de sublimação. Por outro lado, a superfície ativa deduzida da emissão de OH parece bem maior ao se observar a atividade e o tamanho do cometa. A existência de grãos de gelo, aumentando a superfície a partir da qual se sublima a água, permitiria explicar as taxas calculadas.

É fundamental para o nosso estudo levar em conta essa hipótese. Realmente, por con-

sequência da correlação de Q_g com m_h , podemos notar que a inclinação da reta calculada para $r_h > 3$ UA é mais forte em comparação com aquela de CO (predominante a essas distâncias). É de fato a importância de $Q[H_2O]$ que influencia o ajuste desde 6 UA. Entretanto, o peso dessa taxa é bem maior. De fato, o modelo permite seu cálculo não levando em conta a presença de grãos de gelo. A quantidade de água sublimada desde os grãos não é de forma nenhuma responsável pela poeira ejetada. Isso pode explicar a forte inclinação para a evolução de Q_g a grandes distâncias.

Por outro lado, foi mostrado que algumas moléculas de CO estão “intricadas” (parcialmente sobrepostas umas as outras) na matriz amorfa de gelo de água. Assim, a sublimação dos grãos de gelo teria provocado um ligeiro aumento da produção de CO , paralelamente à sublimação desde a superfície do núcleo; essa quantidade de CO suplementar não estando diretamente ligada à variação de luminosidade. Parece todavia (de acordo com os perfis da linha), que a maioria do CO medido provém diretamente do núcleo.

Das observações em $1,3\text{ mm}$, a taxa de produção de CO é deduzida ser cerca de 1300 kg.s^{-1} , para $r_h \simeq 6,5$ UA. Esta taxa de produção é extraordinariamente grande comparada aquela do cometa Halley, que produziu aproximadamente esta quantidade apenas quando se encontrava em $r_h \simeq 0,9$ UA (Jewitt et al. (1996)).

Enfim, é necessário notar que desprezamos a contribuição de CO_2 no cálculo de $Q[CO]$ ($Q[CO_2] = 0,3Q[CO]$) medida a grande distância heliocêntrica pelo *ISO* (Infrared Space Observatory). O CO_2 é a quarta espécie mais abundante em cometas (2 - 6%), logo depois do CH_3OH (metanol) com 1 - 7% (ver o Apêndice A.1) e temperatura de sublimação $T_{sub} = 99\text{ K}$. A temperatura de sublimação do CO é $T_{sub} = 72\text{ K}$ (ver o Apêndice A.3).

A diversidade de processos físico-químicos que intervêm nos mecanismos de sublimação do gás e ejeção de partículas de poeira reflete bem a complexidade da física cometária.

A formação de gelo amorfo é fornecida quando a condensação ocorre em temperaturas abaixo de aproximadamente 150 K . À temperaturas acima de 150 K , o gelo amorfo se cristaliza. A detecção de gelo amorfo no cometa Hale-Bopp contribui para o cenário no qual gelos cometários não foram alterados significativamente desde as suas formações.

Recentemente, Bockelée-Morvan et al. (2010) concluíram que tanto as observações interferométricas em linhas milimétricas quanto espectroscopia infravermelha de fenda longa, não fornecem provas convincentes para a existência de uma fonte distribuída de CO , cuja

natureza (gás ou poeira) permanece desconhecida, na atmosfera do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp), perto do periélio.

3.3.4 Comparação entre os diferentes modelos de produção gasosa

Atualmente, existem vários modelos para obtenção das taxas de produção gasosa, a partir dos dados observacionais, a saber:

1. Modelo de Haser: [Haser \(1957\)](#) implicitamente assumiu que as moléculas-mães são diretamente emitidas a partir do núcleo, as moléculas-filhas (produtos) são o resultado de um processo de fotodissociação simples, as moléculas se movem radialmente a partir do núcleo a uma velocidade constante e que a coma seja ausente de colisões.
2. Modelo Vetorial: [Festou \(1981\)](#) generalizou o modelo de Haser, introduzindo os efeitos das colisões. O seu modelo revisado - chamado de “modelo vetorial” - considera o fato de que os produtos de fotodissociação da molécula-mãe, são ejetados isotropicamente no referencial da molécula-mãe. A dedução das equações do modelo vetorial exige uma integração sobre a distribuição de velocidade das moléculas-filhas (produtos).
3. Modelo de Monte Carlo: [Combi e Delsemme \(1980\)](#) generalizaram o modelo de Haser, usando um modelo de movimento aleatório médio e o método (simulações) de Monte Carlo para movimento de moléculas em um gás. Eles chamaram o modelo de *MCPTM* (Monte Carlo Particle Trajectory Model).
4. Modelo Fotométrico Semi-Empírico das Magnitudes Visuais: [de Almeida et al. \(1997\)](#) desenvolveram um modelo fotométrico semi-empírico ([Morris \(1973\)](#); [Newburn \(1981\)](#)) para estimar taxas de produção de água (em moléculas. s^{-1}) e portanto taxas de produção de gás ($g.s^{-1}$), a partir de medidas de magnitudes visuais absolutas de cometas observados do solo, publicados principalmente, no periódico *ICQ* (International Comet Quarterly). Depois da Astrometria, as estimativas de magnitudes visuais totais, constituem o maior conjunto de dados disponíveis sobre cometas. O modelo fotométrico semi-empírico das magnitudes visuais aparentes ou integradas aqui empregado, apresenta-se como uma alternativa adequada, principalmente quando medidas de emissão diretamente relacionadas à água (não existe transições de H_2O na

banda-passante visível), tais como OH (3064 Å) e $[OI]$ em 6300 Å, não são disponíveis. O método produz resultados cujas discrepâncias são um fator de 1,5 a 3, para a maioria das taxas de produção de água, quando comparado com aquelas obtidas através das medidas de emissões diretamente relacionadas à água apresentadas na literatura, admitindo-se um nível de confiança da ordem de 70% para ambos os métodos (de Almeida (2007)). A utilização desse método torna-se particularmente interessante quando há a disponibilidade de uma enorme quantidade de observações (estimativas de magnitudes visuais totais) a serem analisadas e a cobertura de um intervalo espaço-temporal tão amplo quanto foi o caso do cometa Hale-Bopp.

As estimativas de magnitudes visuais totais geralmente realizadas por observadores experientes, usando uma variedade de tipos de instrumentos, tamanhos de aberturas e técnicas observacionais, podem ser muito heterogêneas e até mesmo subjetivas, comparadas, por exemplo, com aquelas obtidas através de um único instrumento como o SOHO/SWAN, instalado no satélite *SOHO* (Solar Heliospheric Observatory). Portanto, uma comparação entre esses diferentes métodos de obtenção de produção gasosa de H_2O , torna-se necessária e inevitável. As Figuras 3.74 e 3.75 ilustram essas comparações, mostrando claramente que os nossos resultados estão coerentes com aqueles obtidos através do método de Monte Carlo, por exemplo, utilizado por Combi et al. (2000).

Figura 3.74: Comparação entre os diferentes modelos de produção de gás na fase pré-periódica.

Figura 3.75: Comparação entre os diferentes modelos de produção de gás na fase pós-periódica.

Tabela 3.9 - Comparação entre os diferentes modelos

Modelo	$A \pm \sigma_A$ ($\log Q_0$)	$\gamma \pm \sigma_\gamma$	R
Fase pré-periódica			
Fotométrico Semi-Empírico	$31,3526 \pm 0,0233$	$-3,5348 \pm 0,1725$	0,966
Monte Carlo	$30,9291 \pm 0,0152$	$-2,7347 \pm 0,1157$	0,974
Fase pós-periódica			
Fotométrico Semi-Empírico	$31,3927 \pm 0,0140$	$-3,2680 \pm 0,2919$	0,938
Monte Carlo	$30,9750 \pm 0,0184$	$-2,4995 \pm 0,4101$	0,825

Nota: Tabela referente às Figuras 3.74 e 3.75 que compara o modelo utilizado por Michael Combi e o desenvolvido neste trabalho.

Conclusões

Este trabalho consiste em estabelecer uma correlação entre a produção gasosa do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) e a magnitude heliocêntrica.

Sua intensa atividade permitiu inúmeras observações e viu-se a desgaseificação progressiva de numerosas moléculas à medida que ele se aproximava do Sol. As taxas de produção do H_2O , OH e CO sobre as quais está estabelecido este trabalho foram calculadas a partir da conversão de magnitudes visuais em $Q[H_2O]$ (de Almeida et al. (1997)), que por sua vez, foram convertidas em $Q[OH]$ e de espectros de CO , utilizando-se o modelo de “Haser equivalente” (Biver, comunicação particular, 2007).

Após ter estudado separadamente as evoluções da magnitude heliocêntrica e das taxas de produção gasosa em função da distância heliocêntrica do cometa Hale-Bopp, nas fases pré e pós-periélica, se torna necessário distinguir dois domínios em nosso estudo. Um corresponde à grandes distâncias heliocêntricas, onde a sublimação do CO predomina sobre aquela das outras espécies; o segundo é o domínio onde a emissão de H_2O é a predominante (de aproximadamente 6,3 UA até o periélio bem ilustrado na Figura 3.27). A sublimação do gelo de água começou a uma distância extraordinariamente grande no cometa Hale-Bopp ($r_h > 6$ UA). Nesse ponto o CO torna-se sublimado com uma eficiência consideravelmente reduzida em relação à H_2O . Apenas quando o cometa alcança a distância de $r_h \sim 3$ UA do Sol pode a sublimação da água começar com uma maior eficiência, no ponto onde o regime radiativo passa a ser um regime de vaporização para um gelo de água (processo não térmico).

No que concerne a evolução à pequena distância heliocêntrica, foi mostrado que o Hale-Bopp verifica aproximadamente a mesma lei empírica (taxa média de aumento no

brilho) determinada para outros cometas ou grupos de cometas da sua classe dinâmica. Isso indica que a sua composição está dentro do normal para objetos da sua classe. Todos os cometas que provavelmente tenham se originado na nuvem de Oort exibem abundâncias típicas; Hyakutake e Hale-Bopp estão entre eles de acordo com [Schleicher et al. \(1997\)](#). Cometas que provavelmente tenham se formado no cinturão de Kuiper podem mostrar ou abundâncias típicas ou esgotamento de C_2 e C_3 com relação a OH e CN ([A'Hearn et al. \(1995\)](#)). É interessante reconhecer que os resultados obtidos para o Hale-Bopp são mais próximos daqueles que dizem respeito aos cometas de longo período. Parece assim, que dispõe-se de uma lei empírica geral, sem que se tenha encontrado ainda uma justificativa física plausível para tal. Com efeito, se espera que numerosos parâmetros influenciem a evolução da atividade cometária. O Hale-Bopp revelou ser um cometa extremamente poeirento, outros são diferentes em C_2 , outros tem sua luminosidade dominada pela emissão desse radical. Os cometas são geralmente muito diferentes uns dos outros.

Desta maneira fomos levados a estabelecer doze leis empíricas. As retas de regressão para $Q[H_2O]$, $Q[OH]$ e $Q[CO]$ correspondentes a essas leis, estão ilustradas nas Figuras [4.1](#) a [4.6](#), respectivamente.

Figura 4.1: Ajustes lineares das taxas de produção do H_2O na fase pré-periódica.

Figura 4.2: Ajustes lineares das taxas de produção do H_2O na fase pós-periérica.

Figura 4.3: Ajustes lineares das taxas de produção do OH na fase pré-periódica.

Figura 4.4: Ajustes lineares das taxas de produção do OH na fase pós-periélica.

Figura 4.5: Ajustes lineares das taxas de produção do CO na fase pré-periódica.

Figura 4.6: Ajustes lineares das taxas de produção do CO na fase pós-periódica.

Notamos que esta é a primeira vez que semelhante correlação é realizada para grandes distâncias heliocêntricas. Realmente, não se dispunha até a passagem do Hale-Bopp de um número suficiente de taxas de produção de CO a essas distâncias, poucos cometas estando bastante ativos para se obter uma razão sinal/ruído satisfatória.

Nós obtivemos as seguintes leis de correlação finais entre as taxas de produção da H_2O , OH e CO e a magnitude heliocêntrica (m_h)

fase pré $r_h > 6,3$:

$$- \log Q[H_2O] = 30,3443(\pm 0,0525) - 0,3365(\pm 0,0083) m_h$$

$$- \log Q[OH] = 30,2723(\pm 0,0523) - 0,3363(\pm 0,0083) m_h$$

$$- \log Q[CO] = 29,5833(\pm 3,1995) - 0,205(\pm 0,5657) m_h$$

fase pré $r_h < 6,3$:

$$- \log Q[H_2O] = 31,1070(\pm 0,0017) - 0,4623(\pm 0,0006) m_h$$

$$- \log Q[OH] = 31,0364(\pm 0,0017) - 0,4623(\pm 0,0006) m_h$$

$$- \log Q[CO] = 29,9980(\pm 0,0512) - 0,2675(\pm 0,0158) m_h$$

fase pós $r_h < 6,3$:

$$- \log Q[H_2O] = 31,0661(\pm 0,0018) - 0,4368(\pm 0,0007) m_h$$

$$- \log Q[OH] = 30,9955(\pm 0,0018) - 0,4368(\pm 0,0007) m_h$$

$$- \log Q[CO] = 29,9838(\pm 0,0264) - 0,2672(\pm 0,0076) m_h$$

fase pós $r_h > 6,3$:

$$- \log Q[H_2O] = 30,8624(\pm 0,0463) - 0,4282(\pm 0,0066) m_h$$

$$- \log Q[OH] = 30,7901(\pm 0,0461) - 0,4280(\pm 0,0066) m_h$$

$$- \log Q[CO] = 29,7010(\pm 0,2389) - 0,2178(\pm 0,0323) m_h$$

O interesse em tais correlações é poder propor uma taxa de produção da molécula-mãe predominante a partir da magnitude de um cometa. A vantagem é dupla: podemos por um lado ter uma idéia da atividade de um cometa antigo para o qual se dispõe apenas de dados relativos à sua magnitude, podemos por outro lado tentar prever a evolução da atividade de um cometa desde a sua descoberta. Essas informações são muito úteis na preparação de campanhas observacionais e para o pedido de tempo de observação em grandes instrumentos.

Referências Bibliográficas

- A'Hearn M. F., Millis R. L., Schleicher D. G., Osip D. J., Birch P. V., The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992., *Icarus*, 1995, vol. 118, p. 223
- A'Hearn M. F., Schleicher D. G., Millis R. L., Feldman P. D., Thompson D. T., Comet Bowell 1980b, *AJ*, 1984, vol. 89, p. 579
- Baldet F., Recherches sur la constitution des comètes et sur les spectres du carbone, Faculté des Sciences, Paris, 1926, Tese de Doutorado
- Bevington P. R., Robinson D. K., Data reduction and error analysis for the physical sciences, 2003
- Biver N., Correlation between visual magnitudes and the outgassing rate of CO in comets beyond 3 AU, *International Comet Quarterly*, 2001, vol. 23, p. 85
- Biver N., Bockelee-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Davies J. K., Dent W. R. F., Despois D., Gerard E., Lellouch E., Rauer H., Moreno R., Paubert G., Evolution of the outgassing of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) from radio observations, *Science*, 1997, vol. 275, p. 1915
- Biver N., Bockelee-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Henry F., Lellouch E., Winnberg A., Johansson L. E. B., Gunnarsson M., Rickman H., Rantakyro F., Davies J. K., Dent W. R. F., Paubert G., Moreno R., Wink J., Despois D., Rauer H., The 1995 2002 Long-Term Monitoring of Comet C/1995 O1 (HALE BOPP) at Radio Wavelength, *Earth Moon and Planets*, 2002, vol. 90, p. 5

- Biver N., Rauer H., Despois D., Moreno R., Paubert G., Bockelée-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Gérard E., Jorda L., Substantial outgassing of CO from comet Hale-Bopp at large heliocentric distance, *Nature*, 1996, vol. 380, p. 137
- Bockelée-Morvan D., Boissier J., Biver N., Crovisier J., No compelling evidence of distributed production of CO in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) from millimeter interferometric data and a re-analysis of near-IR lines, *Icarus*, 2010, vol. 210, p. 898
- Bockelée-Morvan D., Rickman H., C/1995 O1 (Hale-Bopp): Gas Production Curves And Their Interpretation, *Earth Moon and Planets*, 1997, vol. 79, p. 55
- Combi M. R., Delsemme A. H., Neutral cometary atmospheres. I - an average random walk model for photodissociation in comets, *ApJ*, 1980, vol. 237, p. 633
- Combi M. R., Reinard A. A., Bertaux J., Quemerais E., Mäkinen T., SOHO/SWAN Observations of the Structure and Evolution of the Hydrogen Lyman- α Coma of Comet Hale-Bopp (1995 O1), *Icarus*, 2000, vol. 144, p. 191
- Crovisier J., Encrenaz T., *Comet Science* english edn. Cambridge University Press, 2000
- Davies J. K., Geballe T. R., Hanner M. S., Weaver H. A., Crovisier J., Bockelée-Morvan D., Thermal Infrared Spectra of Comet Hale-Bopp at Heliocentric Distances of 4 and 2.9 AU, *Earth Moon and Planets*, 1997, vol. 78, p. 293
- de Almeida A. A., Correlação entre magnitudes visuais e produção de gás e poeira em cometas alvos de missões espaciais, Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2007, Tese de Livre-Docência
- de Almeida A. A., Boczek R., Sanzovo G. C., Trevisan Sanzovo D., Analysis of total visual and CCD V-broadband observations of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp): 1995-2001, *Advances in Space Research*, 2009, vol. 44, p. 335
- de Almeida A. A., Singh P. D., Huebner W. F., Water release rates, active areas, and minimum nuclear radius derived from visual magnitudes of comets-an application to comet 46P/Wirtanen, *Planet. Space Sci.*, 1997, vol. 45, p. 681

- Delsemme A. H., Chemical composition of cometary nuclei. In IAU Colloq. 61: Comet Discoveries, Statistics, and Observational Selection , 1982, p. 85
- DiSanti M. A., Mumma M. J., Dello Russo N., Magee-Sauer K., Carbon Monoxide Production and Excitation in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp): Isolation of Native and Distributed CO Sources, *Icarus*, 2001, vol. 153, p. 361
- Fernández J. A., ed., 2005 Comets - Nature, Dynamics, Origin and their Cosmological Relevance vol. 328 of *Astrophysics and Space Science Library*
- Fernández Y. R., The Nucleus of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1): Size and Activity, *Earth Moon and Planets*, 2002, vol. 89, p. 3
- Festou M., Aeronomical processes in cometary comae. In *Solar System and its Exploration* , vol. 164 of *ESA Special Publication*, 1981, p. 213
- Festou M. C., The Derivation of OH Gas production rates from Visual Magnitudes of Comets. In *Asteroids, Comets, Meteors II* , 1986, p. 299
- Greenberg J. M., The evidence that comets are made of interstellar dust. In *Comet Halley: Investigations, Results, Interpretations. Vol. 2: Dust, Nucleus, Evolution* , 1990, p. 99
- Haser L., Distribution d'intensite dans la tete d'une comete, *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 1957, vol. 43, p. 740
- Huebner W. F., Keady J. J., Lyon S. P., Solar photo rates for planetary atmospheres and atmospheric pollutants, *Ap&SS*, 1992, vol. 195, p. 1
- Jewitt D., Senay M., Matthews H., Observations of Carbon Monoxide in Comet Hale-Bopp, *Science*, 1996, vol. 271, p. 1110
- Jorda L., Crovisier J., Green D. W. E., The correlation between water production rates and visual magnitudes in comets. In *Asteroids, Comets, Meteors 1991* , 1992, p. 285
- Jorda L., Crovisier J., Green D. W. E., The Correlation Between Visual Magnitudes and Water Production Rates, *LPI Contributions*, 2008, vol. 1405, p. 8046

- Kidger M. R., Light curve behaviour in C/1995 O1 (Hale-Bopp) - II; Changes in the activity between 13AU and 2.5AU pre-perihelion, *Earth Moon and Planets*, 1996, vol. 75, p. 87
- Kidger M. R., Hurst G., James N., The Visual Light Curve Of C/1995 O1 (Hale-Bopp) From Discovery To Late 1997, *Earth Moon and Planets*, 1997, vol. 78, p. 169
- Krishna Swamy K. S., *Physics of comets* 2nd edn. World Scientific Series in Astronomy and Astrophysics, Singapore: World Scientific, 1997
- Marsden B. G., Williams G. V., *Catalogue of Cometary Orbits* 1996. 11th edition., 1996
- Meech K. J., Activity on Comet Cernis (1983 XII) at Large Distances. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 22 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1990, p. 1103
- Meech K. J., Belton M. J. S., The atmosphere of 2060 Chiron, *AJ*, 1990, vol. 100, p. 1323
- Morris C. S., On Aperture Corrections for Comet Magnitude Estimates, *PASP*, 1973, vol. 85, p. 470
- Newburn R. L., A semi-empirical photometric theory of cometary gas and dust production: Application to P/Halley's gas production rates. In *The Comet Halley. Dust and Gas Environment* , vol. 174 of *ESA Special Publication*, 1981, p. 3
- Patashnick H., Energy source for comet outbursts, *Nature*, 1974, vol. 250, p. 313
- Prialnik D., Bar-Nun A., Crystallization of amorphous ice as the cause of Comet P/Halley's outburst at 14 AU, *A&A*, 1992, vol. 258, p. L9
- Rauer H., Arpigny C., Boehnhardt H., Colas F., Crovisier J., Jorda L., Küppers M., Manfroid J., Rembor K., Thomas N., Optical observations of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) at large heliocentric distances before perihelion., *Science*, 1997, vol. 275, p. 1909
- Rauer H., Helbert J., Arpigny C., Benkhoff J., Bockelée-Morvan D., Boehnhardt H., Colas F., Crovisier J., Hainaut O., Jorda L., Kueppers M., Manfroid J., Thomas N., Long-term optical spectrophotometric monitoring of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp), *A&A*, 2003, vol. 397, p. 1109

- Schleicher D. G., Lederer S. M., Millis R. L., Farnham T. L., Photometric behavior of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) before perihelion, *Science*, 1997, vol. 275, p. 1913
- Schloerb F. P., Kinzel W. M., Swade D. A., Irvine W. M., Observations of HCN in comet P/Halley, *A&A*, 1987, vol. 187, p. 475
- Sekanina Z., Nuclei of two earth-grazing comets of fan-shaped appearance, *AJ*, 1989, vol. 98, p. 2322
- Sekanina Z., Activity of comet Hale-Bopp (1995 O1) beyond 6AU from the Sun., *A&A*, 1996, vol. 314, p. 957
- Sekanina Z., Larson S. M., Hainaut O., Smette A., West R. M., Major outburst of periodic Comet Halley at a heliocentric distance of 14 AU, *A&A*, 1992, vol. 263, p. 367
- Senay M. C., Jewitt D., Coma formation driven by carbon monoxide release from comet Schwassmann-Wachmann 1, *Nature*, 1994, vol. 371, p. 229
- Soderblom L. A., Boice D. C., Britt D. T., Brown R. H., Buratti B. J., Kirk R. L., Lee M., Nelson R. M., Oberst J., Sandel B. R., Stern S. A., Thomas N., Yelle R. V., Imaging Borrelly, *Icarus*, 2004, vol. 167, p. 4
- Weaver H. A., Feldman P. D., A'Hearn M. F., Arpigny C., The activity and size of the nucleus of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1), *Science*, 1997, vol. 275, p. 1900
- Weissman P. R., How pristine are cometary nuclei?. In *Comet Nucleus Sample Return Mission* , vol. 249 of ESA Special Publication, 1986, p. 15
- Whitney C., Comet outbursts, *ApJ*, 1955, vol. 122, p. 190

Apêndice

Tabelas diversas

Tabela A.1 - Abundâncias relativas de gelos no meio interestelar e em cometas.

Espécies	Gelos interestelares	Voláteis cometários
H_2O	= 100	= 100
CO	10 – 40	2 – 20
CH_3OH	5	1 – 7
CO_2	10	2 – 6
H_2CO	2 – 6 ?	~ 1
$HCOOH$	3 ?	~ 0,1
CH_4	1 – 2	~ 1
Outros hidrocarbonetos	?	~ 1 C_2H_2 , C_2H_6
NH_3	< 10	0,5
O_3	≤ 2	?
$X - CN$	≤ 0,5 – 10	0,37 Nitrilos + $HNCO$
OCS , XCS	0,2	0,4 $OCS + CS$
SO_2	?	~ 0,1
H_2	> ~ 1	?
N_2	?	?
O_2	?	?

Nota: adaptado de [Crovisier e Encrenaz \(2000\)](#).

Tabela A.2 - Abundâncias relativas (%) em relação à H_2O obtidas através de observações em rádio dos cometas Hyakutake (C/1996 B2) e Hale-Bopp (C/1995 O1) na distância heliocêntrica de 1 UA.

Molécula	Hyakutake (C/1996 B2)	Hale-Bopp (C/1995 O1)
CO	6 – 30	20
NH_3	0,5	0,7
HDO	0,058	0,066
HNC	0,01	0,04
CH_3CN	0,01	0,02
CS_2	0,1	0,2
CH_3OH	2	2
H_2CO	0,2 – 1	1
HCN	0,1	0,25
H_2S	0,8	1,5
OCS	0,1 ?	0,4
$HNCO$	0,07 ?	0,1
$HCOOH$	—	0,09
$HCOOCH_3$	—	0,08
HC_3N	—	0,02
NH_2CHO	—	0,01 – 0,02
SO	—	0,3
SO_2	—	0,2
H_2CS	—	0,02

Nota: adaptado de [Crovisier e Encrenaz \(2000\)](#).

Tabela A.3 - Temperaturas de equilíbrio de sublimação para algumas moléculas e gases nobres.

Moléculas	Temperatura de sublimação (K)
H_2O	152
CH_3OH	99
HCN	95
SO_2	83
NH_3	78
CO_2	72
H_2CO	64
H_2S	57
CH_4	31
CO	24
N_2	22
H_2	5
Gases nobres	
Ar	87
Ne	27
He	4

Nota: adaptado de [Crovisier e Encrenaz \(2000\)](#).

Apêndice B

Método de Mínimos Quadrados

Minimização de um χ^2

Esse método é descrito em *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, de [Bevington e Robinson \(2003\)](#). Seu propósito é determinar uma reta média a partir de um conjunto de dados, isto é, de encontrar os valores mais prováveis de a e b tais que: $y = a + bx$.

Para todos os valores arbitrários de a e b , calcula-se o desvio $\Delta y_i = y_i - a - bx_i$ entre os valores de y_i observados e os valores $y(x_i)$ calculados. Vê-se que Δy_i é tanto menor, quanto os coeficientes a e b são melhores escolhidos. Afim de analisar a qualidade da escolha, se considera $\sum(\Delta y_i)^2$.

Calcula-se, para cada valor de $x = x_i$ dado, a probabilidade P_i de encontrar y_i a menos de σ_i , supondo uma distribuição gaussiana, vem:

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y_i - y(x_i)}{\sigma_i}\right)^2}$$

sendo

y_i - valor observado em x_i ,

$y(x_i)$ - valor calculado graças aos coeficientes em x_i .

Dispondo-se de N observações, para cada par (a, b) , a probabilidade de encontrar o conjunto dos y_i com σ_i é:

$$P(a, b) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i}\right)^2}$$

Esse é máximo se $\sum_i \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i}\right)^2$ é mínimo.

Definindo-se $\chi^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_i}\right)^2 = \sum_i \left[\frac{1}{\sigma_i^2}(y_i - a - bx_i)^2\right]$. Para se minimizar esse χ^2 é necessário então que $\frac{\delta}{\delta a}\chi^2 = 0$ e $\frac{\delta}{\delta b}\chi^2 = 0$.

Assim se $\sigma_i \neq \sigma_j$, $i \neq j$, $\sum_i \frac{y_i}{\sigma_i^2} = a \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} + b \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}$ e $\sum_i \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} = a \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} + b \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}$.

Chega-se a um sistema de equações do qual as soluções são:

$$a = \frac{1}{\Delta} \left\{ \sum_i \frac{y_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} \right\}$$

$$b = \frac{1}{\Delta} \left\{ \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} - \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{y_i}{\sigma_i^2} \right\}$$

onde Δ é o determinante do sistema: $\Delta = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}\right)^2$.

Os resultados apresentados geram também um coeficiente R dito de correlação. Ele caracteriza a qualidade do ajuste; R é tanto mais próximo de ± 1 se a inclinação é positiva (ou negativa) quando o ajuste é de boa qualidade, isto é, que a dispersão dos pontos em torno da reta média é pequena.

Apêndice C

Elementos orbitais do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)

Tabela C.1 - Parâmetros orbitais do cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp).

Parâmetro	Símbolo	Valor
Distância periélica	q	0,914142 UA
Excentricidade da órbita	e	0,995068
Inclinação da órbita	i	89,4300°
Longitude do nodo ascendente	Ω	282,4707°
Argumento do periélio	ω	130,5887°
Época da passagem periélica	T	1,1373 Abril 1997
Período orbital	P	2392 anos
Comprimento do semi-eixo maior	a	185,35 UA
Velocidade periélica	v_p	46,42 km/s
Velocidade afélica	v_a	0,115 km/s
Distância afélica	a_a	369,786 UA

Nota: Os elementos orbitais foram extraídos da *MPC* 42547.

Máxima aproximação da Terra ($\Delta = 1,315$ UA) em 21/03/1997.

Figura C.1: Vista espacial de uma órbita cometária indicando seus elementos orbitais.