

Determinação dos Parâmetros Fotométricos de Cometas Recentes

Tasso A. Napoleão, Claudio B. Leitão Jr.

ABSTRACT

ESTIMATING THE PHOTOMETRIC PARAMETERS OF RECENT COMETS, by Tasso A. Napoleão and Claudio B. Leitão Jr.: Based on visual magnitude estimates of Comets Bradfield (1987s), Tempel 2 (1987g), Okazaki-Levy-Rudenko (1990c) made by several REA observers, the authors have derived the photometric parameters H_0 and n and have made an analysis of the chemistry of those recent comets. A joint work by REA's LPV Coordinator and Inner Planets Coordinator.

1. FOTOMETRIA COMETÁRIA UMA INTRODUÇÃO

O estudo da variação de brilho dos cometas ao longo de suas passagens perielicas não é recente. Desde o século XVII, astrônomos como Kepler, Hevelius, Flansteed, Messier, Herschel, Olbers e outros ocuparam-se do assunto, tendo registrado suas estimativas de brilho e dimensões de caudas e comas de diversos cometas brilhantes. A primeira relação fotométrica, entretanto, foi determinada por Isaac Newton, em seu famoso "Principia", e posteriormente desenvolvida e utilizada por Olbers. Newton postulou que, uma vez que os cometas brilhavam pela reflexão da luz solar, a intensidade de seu brilho deveria obedecer a uma lei de proporcionalidade inversa em relação aos quadrados das distâncias heliocêntrica e geocêntrica.

Dessa forma, em inícios do século XIX era comum, para o cálculo de efemérides, o uso da equação:

$$I = I_0 \cdot \Delta^{-2} \cdot r^{-2}$$

onde Δ e r representavam respectivamente as distâncias geocêntrica e heliocêntrica. Durante a maior parte do século passado, esta equação foi usada sob a forma de magnitudes:

$$m = H_0 + 5 \log r + 5 \log \Delta$$

onde a constante H_0 era denominada "magnitude absoluta" ou reduzida, para $r = \Delta = 1 \text{ UA}$. Entretanto, com o refinamento da instrumentação e das técnicas observacionais, ficou evidente que estas fórmulas não se adaptavam muito bem aos resultados observacionais, e que a variação do brilho com a distância heliocêntrica era mais rápida que r^{-2} , na quase totalidade

dos casos. Assim, em fins do século (1893), Holetschek propôs a expressão:

$$I = I_0 \cdot r^{-n} \cdot \Delta^{-2}$$

onde n era um número maior que 2, e que para muitos cometas se aproximava de 4. Este valor passou a ser denominado "índice fotométrico" e, já no século atual, diversas coletâneas de observações cometárias, como as realizadas pelo próprio Holetschek, por Orlov, Wirtz e outros, procuravam determiná-lo para diferentes comets encontrando geralmente valores entre 3 e 5. Usava-se então a equação já vista, sob sua forma de magnitudes:

$$m = H_0 + 2.5 \log r + 5 \log \Delta$$

Até cerca de 1950, praticamente todo o trabalho fotométrico sobre cometas se baseava apenas em observações visuais. Tratava-se então de determinar pares de valores (H_0 , n) - os assim denominados parâmetros fotométricos - através de estimativas da magnitude visual da coma e núcleo, fazendo-se posteriormente correlações através do método dos mínimos quadrados. Aliás, este é precisamente o trabalho que desenvolveremos no presente artigo, conforme detalhado mais à frente.

Em alguns casos, entretanto, o número de observações era insuficiente para uma correlação estatística significativa. Isso ocorria também quando se pesquisavam registros históricos de cometas observados em séculos anteriores. Assumia-se então, com frequência, o valor 4 para o índice fotométrico, calculando-se então o H_0 correspondente (que passava a ser rebatizado como H_{10} , em razão do produto do coeficiente 2.5 pelo índice fotométrico médio adotado). As compilações mais extensas de H_{10} foram realizadas por Vsekhsvyatskii (ref. 6), em 1964, cobrindo nada menos que 803 cometas até o ano de 1957; e, mais recentemente, por Meisel e Morris (ref. 4), estes dados têm sido úteis não só para derivar as distribuições do brilho intrínseco dos cometas, como também para estimar as taxas de produção de gases nas comas. Nos últimos anos, a fotometria fotoelétrica tem gradualmente assumido o papel principal nesta área, principalmente quando usados filtros de banda estreita; além disso, as técnicas de espectrofotometria, polarimetria e fotopolarimetria, bem como o uso de detectores tipo CCD (isto para não falar de sondas espaciais mais recentes)

parecem ter deixado à fotometria visual um papel de quase obsolescência. No entanto (e principalmente quando há grande número de estimativas, ou para confrontar os resultados com dados históricos, obtidos pela mesma técnica), ela ainda fornece resultados úteis e - se realizada criteriosamente - bastante confiáveis.

2. TRABALHOS OBSERVACIONAIS

Baseados em estimativas de magnitude visual efetuadas por observadores da REA, procuramos estabelecer, através de regressões lineares, os parâmetros fotométricos (H_0 , n) para cinco cometas recentes: Bradfield (1987s), Tempel 2 (1987g), Okazaki-Levy-Rudenko (1989r), Austin (1989c₁) e Levy (1990c). Isto foi feito separadamente, para as fases ante-periélica e pós-periélica de cada cometa.

A tabela que se segue descreve, por observador, o número de estimativas visuais de cada um dos cometas citados, e nas quais nos baseamos para as regressões lineares:

OBS.	Bradfield	Tempel 2	Okazaki	Austin	Levy
J.G.Aguiar	23	06	07	42	67
A.A.Alves	--	--	--	--	04
N.Falsarella	--	--	--	04	12
A.A.Gonzalez	--	11	--	--	--
B.Landro	--	--	--	03	--
M.F.Lara	--	--	--	03	13
R.Levai	--	--	04	06	11
S.Lomonaco	--	--	--	--	04
R.Lourençon	--	02	05	15	18
T.A.Napoleão	01	01	03	03	07
A.Padilla F ^o	--	--	--	13	08
W.Prini Jr.	--	--	--	09	04
R.Salvo	--	--	--	--	05
H.C.Vital	--	--	05	03	09
Totais	24	20	24	101	162

Nota-se dos totais não apenas a rápida evolução da REA nos seus primeiros anos de existência, como também o interesse despertado pelos cometas Austin e Levy em 1990. Os observadores utilizaram em suas estimativas os métodos de Bobrovnikoff, Beyer e Sidgwick, além das práticas descritas nos correspondentes projetos observacionais da REA (ref. 5). A maior parte das estimativas foi realizada com pequenos instrumentos (binóculos de abertura 50 mm, lunetas 60 mm). Com menor frequência, e quando necessário, foram usados instrumentos de maior abertura, entre 200mm e 400mm. Essa relativa padronização, somada ao fato de que a incerteza observacional da fotometria visual cometária atinge, para observadores experientes, 0.2 magnitudes na melhor das hipóteses, nos parecem suficiente para justificar o não-emprego de fórmulas para correção de abertura: certamente o próprio erro observacional da subjetividade da estimativa de magnitudes superaria o fator de correção.

Não é intenção deste trabalho o detalhamento dos aspectos observacionais, bem como dos resultados obtidos para dimensão de comas e caudas de cada cometa; aos que desejarem, recomendamos a leitura dos artigos publicados nos Reportes da REA (ref. 5). Apenas as estimativas de magnitude visual foram aproveitados para a redução que se segue.

3. REDUÇÃO DOS DADOS

Partindo-se da equação de Holetschek-Orlov já mencionada, podemos fazer:

$$m - 5\log\Delta = H_0 + 2.5\log r$$

Esta equação pode ser convertida graficamente de tal forma que o termo ($m - 5\log\Delta$), nas ordenadas, seja função do termo ($2.5\log r$), nas abscissas. Nessas condições, poderemos interpolar, pelo método dos mínimos quadrados, retas do tipo:

$$y = ax + b$$

onde o coeficiente b (intersecção da reta traçada pela regressão com o eixo das ordenadas) representará o valor de H_0 e o termo a (inclinação ou coeficiente angular das retas) nos fornecerá diretamente o valor de n . Este processo foi usado separadamente nas fases anterior e posterior ao periélio de cada cometa.

O trabalho de redução foi integralmente realizado pelo software "Comet Calc" desenvolvido por C.B. Leitão Jr. para microcomputadores Apple II. Exemplo de listagem desse programa é visto a seguir, para o cometa Okasaki-Levy-Rudenko (1989r), em sua fase ante-periélica:

Data	Dia Juliano	R	Delta	M. Vis.	M.V.R.	Log(R)
25/11/89	2447855.5	.7	.551	5.7	6.99	-.155
26/11/89	2447856.5	.709	.541	5.7	7.03	-.149
26/11/89	2447856.5	.709	.541	6	7.33	-.149
27/11/89	2447857.5	.718	.532	5.8	7.17	-.144
27/11/89	2447857.5	.718	.532	6	7.37	-.144
27/11/89	2447857.5	.718	.532	5.6	6.97	-.144
02/12/89	2447862.5	.769	.516	6.2	7.64	-.114
03/12/89	2447863.5	.781	.519	6.2	7.62	-.107
03/12/89	2447863.5	.781	.519	6.2	7.62	-.107
03/12/89	2447863.5	.781	.519	6.3	7.72	-.107
03/12/89	2447863.5	.781	.519	6.3	7.72	-.107
03/12/89	2447863.5	.781	.519	5.6	7.02	-.107
03/12/89	2447863.5	.781	.519	5.7	7.12	-.107
04/12/89	2447864.5	.793	.523	6.4	7.81	-.101
05/12/89	2447865.5	.805	.529	6.5	7.88	-.094
07/12/89	2447867.5	.83	.546	6.8	8.11	-.080999
07/12/89	2447867.5	.83	.546	6.7	8.01	-.080999
08/12/89	2447868.5	.842	.557	6.8	8.07	-.075
09/12/89	2447869.5	.855	.569	7.1	8.32	-.068
09/12/89	2447869.5	.855	.569	6.7	7.92	-.068
09/12/89	2447869.5	.855	.569	7	8.22	-.068
16/12/89	2447876.5	.952	.685	7.3	8.12	-.021
17/12/89	2447877.5	.966	.705	7.8	8.56	-.015
24/12/89	2447884.5	1.068	.854	9	9.34	-.029

ANÁLISE POR REGRESSÃO LINEAR

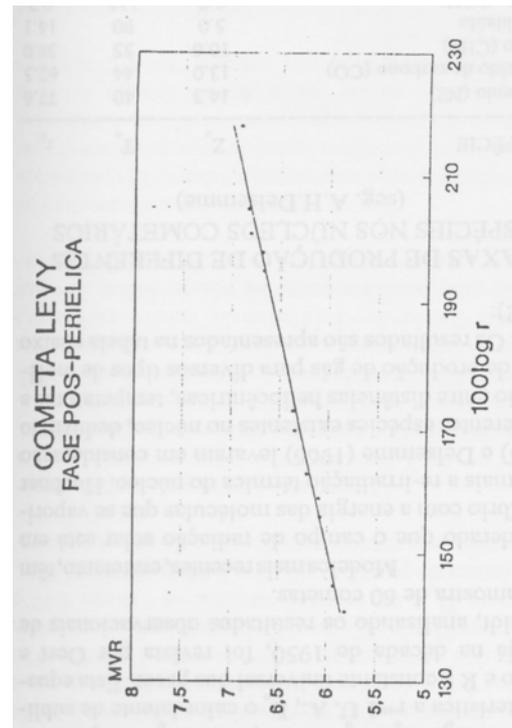
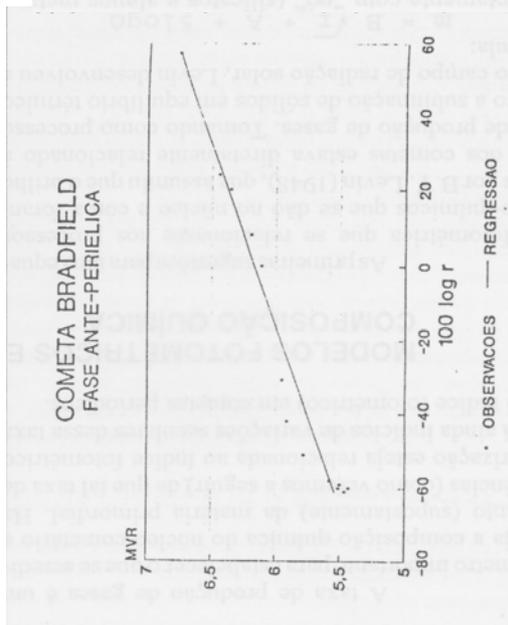
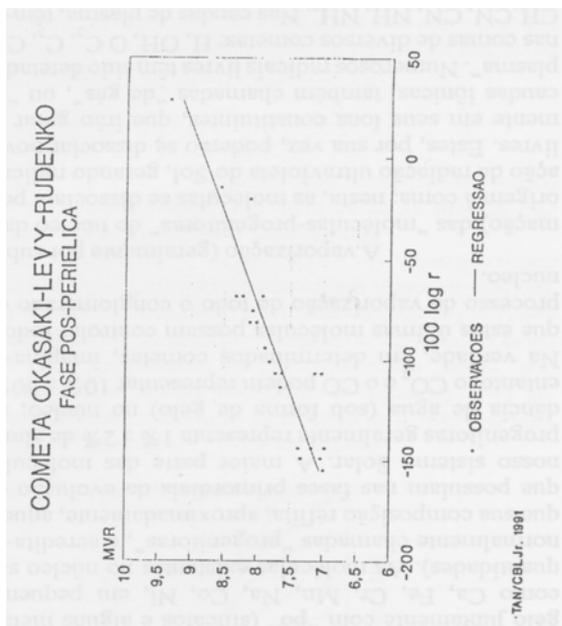
A equação que descreve o comportamento fotométrico do cometa é:

$$m = 8.83 + 5 \log(\Delta) + 4.59 * 2.5 \log R$$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO: 0.915472054

$$M_0 = 8.83 \quad n = 4.59$$

A seguir, apresentam-se os gráficos obtidos a partir desses dados, para três exemplos: os cometas Okasaki-Levy-Rudenko (fase pós-periélica), Bradfield (fase ante-periélica) e Levy (fase pós-periélica). Em cada caso, incluímos também a reta obtida pela regressão linear. Observe-se que, no eixo das ordenadas, o termo MVR representa a magnitude visual reduzida ($m - 5 \log \Delta$), enquanto que, nas abscissas, representamos por questão de escala o termo $\log R$ multiplicado por 100. A dispersão observada nos três casos é bastante boa. Já o Austin e o Levy na fase ante-periélica apresentaram dispersão maior.



4. SUMÁRIO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Procedendo-se à regressão linear da forma indicada no item anterior, obtivemos para os cinco cometas estudados os parâmetros fotométricos (H_0 e n) indicados abaixo, para as fases ante e pós-periélica. Estão ainda descritos os coeficientes de correlação correspondentes a cada caso:

Cometa	Ante-periélio			Pós-periélio		
	H_0	N	r	H_0	N	R
Bradfield	6.17	4.12	0.98	5.55	2.56	0.98
Tempel 2	-3.68	34.17	0.96	7.58	1.82	0.13
Okasaki	N/A	N/A	N/A	8.83	4.59	0.92
Austin	5.55	2.4	0.69	8.18	1.94	0.49
Levy	5.32	2.13	0.66	3.76	5.95	0.99

5. UMA BREVE REVISÃO SOBRE A QUÍMICA DOS COMETAS

Atualmente, existe praticamente consenso em torno do modelo cometário proposto por Fred Whipple em 1950 e que se popularizou como “dirty snowball” (bola de neve suja): o núcleo é basicamente formado por uma mistura de “gelos” de diferentes espécies, mas onde o “gelo” de água é o predominante.

Com massas geralmente entre 10^{13} a 10^{19} g, raios de alguns km, rotação média em torno de 15 h e resistência à tração por volta de 10^5 dine.cm⁻², os núcleos cometários são conglomerados muito frágeis. Em sua constituição - além da água - há diversas

moléculas, como CO₂, CO, HCN, “entranhadas” no gelo juntamente com “pó” (silicatos e alguns metais como Ca, Fe, Cr, Mn, Na, Co, Ni, em pequenas quantidades). As moléculas existentes no núcleo são normalmente chamadas “progenitoras”, e acredita-se que sua composição reflita, aproximadamente, aquela que possuíam nas fases primordiais da evolução de nosso sistema solar. A maior parte das moléculas progenitoras geralmente representa 1% a 2% da abundância de água (sob forma de gelo) no núcleo; no entanto, o CO₂ e o CO podem representar 10% a 30%. Na verdade, em determinados cometas, imagina-se que estas últimas moléculas possam controlar todo o processo de vaporização de todo o conglomerado do núcleo.

A vaporização (geralmente por sublimação) das “moléculas-progenitoras” do núcleo dará origem à coma; nesta, as moléculas se dissociam pela ação da radiação ultravioleta do Sol, gerando radicais livres. Estes, por sua vez, poderão se dissociar novamente em seus íons constituintes, que irão gerar as caudas iônicas, também chamadas de “de gás”, ou “de plasma”. Numerosos radicais livres têm sido detectados nas comas de diversos cometas: H, OH, OC₂, C₃, CH, CH₃, CN, NH, NH₂. Nas caudas de plasma, têm-se identificado íons como CH⁺, OH⁺, N₂⁺, CO⁺, CO₂⁺ e H₂O⁺.

A taxa de produção de gases é um parâmetro importante para estabelecer o que se acredita seja a composição química do núcleo cometário e portanto (supostamente) da matéria primordial. Há evidências (como veremos a seguir) de que tal taxa de vaporização esteja relacionada ao índice fotométrico **n**. Há ainda indícios de variações seculares dessa taxa (e do índice fotométrico) em comets periódicos.

6. MODELOS FOTOMÉTRICOS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As primeiras sugestões para uma equação fotométrica que se relacionasse aos processos físico-químicos que se dão no núcleo e coma foram feitas por B.Y. Levin (1948), que assumiu que o brilho total dos cometas estava diretamente relacionado à taxa de produção de gases. Tomando como processo básico a sublimação de sólidos em equilíbrio térmico com o campo de radiação solar, Levin desenvolveu a fórmula:

$$m = B \sqrt{r} + A + 5 \log \Delta$$

onde **B** = L_0/RT_0 e **H**₀ = **A** + **B**, sendo T₀ a temperatura característica a **r** = 1UA, L₀ o calor latente de sublimação e **R** a constante universal dos gases. Esta equação, já na década de 1950, foi revista por Oort e Schmidt, analisando os resultados observacionais de uma amostra de 60 cometas.

Modelos mais recentes, entretanto, têm considerado que o campo de radiação solar está em equilíbrio com a energia das moléculas que se vaporizam, mais a re-irradiação térmica do núcleo. Huebner (1965) e Delsemme (1966) levaram em consideração as diferentes espécies existentes no núcleo, deduzindo relação entre distâncias heliocêntricas, temperaturas e taxas de produção de gás para diversos tipos de moléculas. Os resultados são apresentados na tabela abaixo (ref.2).

TAXAS DE PRODUÇÃO DE DIFERENTES ESPÉCIES NOS NÚCLEOS COMETÁRIOS (seg. A.H.Delsemme)

ESPÉCIE	Z ₀	T ₀	r ₀
Nitrogenio (N ₂)	14,3	40	77,6
Monóxido de Carbono (CO)	13,0	44	62,5
Metano (CH ₄)	10,6	55	38,0
Formaldeído	5,0	90	14,1
Amonia (NH ₃)	3,7	112	9,7
Dióxido de carbono (C) ₂)	3,5	121	8,3
Gás cianídrico (HCN)	2,3	160	4,8
Água	1,7	215	2,5

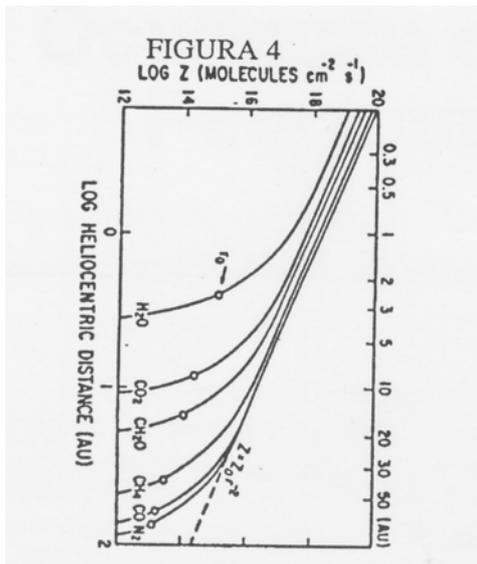
Z₀ = taxa de vaporização de um núcleo perfeitamente absorvente a 1 UA (em 10¹⁸ mol.cm⁻².s⁻¹)

T₀ = temperatura de equilíbrio de Z₀ (em °K)

r₀ = distância heliocêntrica além da qual a vaporização é desprezível (menos que 25% do fluxo solar recebido é usado para vaporização). r₀ é dado em UA.

Como seria de se esperar, os números de Delsemme confirmam que a sublimação das espécies mais voláteis se dá a maiores distâncias heliocêntricas. Assim, comets que se constituam quase exclusivamente de água (o que possivelmente seja o caso de comets de curto período, que já sofreram numerosas passagens periélicas) deverão produzir gás - e, conseqüentemente, aumentar o brilho e o valor do índice fotométrico - apenas em torno de duas unidades astronômicas. O fato de que a maior parte dos comets é descoberta a distâncias dessa ordem de grandeza parece ser compatível com o fato de a água ser o componente principal do “gelo” cometário e também o dominante na vaporização (ao menos nos cometas que já tiveram ao menos uma passagem periélica).

Delsemme deriva ainda a produção de gases em função de diferentes distâncias heliocêntricas, para sublimações controladas por diversas espécies de gelo cometário. Os resultados são demonstrados na figura abaixo.



Na figura, ($\log Z$) representa a taxa de vaporização, e as distâncias heliocêntricas são dadas em UA. Observe-se diferentes curvas para cada um dos “gelos” dominantes, desde água até o nitrogênio. Estas curvas (ou, ao menos, algumas delas, como as da água) já foram demonstradas observacionalmente por diversos autores, utilizando cometas de curto período como o Encke.

Finalmente, os modelos de vaporização podem se relacionar ao índice fotométrico, de forma simplificada, pela equação:

$$n = d(\log Z) / d(\log r) + 2$$

Às vezes (e como não é possível obter-se um valor instantâneo de n com uma observação apenas) torna-se a derivada média $p = \langle d\log Z / d\log r \rangle$ e faz-se então: $n = p + 2$.

Huebner (1965) demonstrou que, caso não houvesse aquecimento térmico do núcleo, p tenderia a 2 e consequentemente n tenderia a 4, o que é o valor “típico” médio encontrado em muitos cometas.

7. CONCLUSÕES E INTERPRETAÇÃO

O que se depreende dos modelos de vaporização de Delsemme e outros? Aparentemente, a sublimação do “gelo de água” controla a taxa de vaporização da maioria dos cometas (e provavelmente todos os de curto período). Assim, quanto maior for o número de passagens periélicas que um cometa tenha atravessado, menos componentes voláteis restarão em seus núcleos para serem vaporizados. Em 1966, Delsemme mostrou que basta uma única passagem periélica para que todo o metano se vaporize.

No caso inverso, imaginemos cometas “novos” (em sua primeira passagem pelo periélio). O famoso caso do cometa Kohoutek, em 1973, que se mostrou muito mais débil do que se esperava, à medida

que caminhava para o sistema solar interior, é o exemplo clássico. Demonstrou-se que, no Kohoutek, havia uma quantidade de dióxido de carbono suficiente para controlar a temperatura superficial e a taxa de vaporização do núcleo. Por esse motivo, o Kohoutek havia desenvolvido coma a distâncias muito maiores que a média dos cometas, que o fazem entre 2 e 3 UA. Em correspondência, Kleine e Kohoutek (ref. 3) encontraram par H_0 e m , respectivamente os valores 5.42 e 2.68 (antes do periélio) e 6.85 e 3.64 (após o periélio), utilizando uma técnica semelhante à do presente trabalho.

O caso do Austin parece-nos semelhante ao do Kohoutek em muitos aspectos: ambos foram descobertos a amplas distâncias heliocêntricas, fazendo supor uma passagem periélica excepcional. No entanto à medida que se aproximavam do Sol, ambos mostraram-se mais débeis que o inicialmente previsto. O valor de n foi abaixo do “médio” - ou 4 - tanto na fase ante-periélica como na pós-periélica. O valor de H_0 aumentou, em ambos os cometas, após a passagem periélica.

Todos estes indícios são característicos de cometas cuja vaporização é dominada por outros constituintes, que não a água; ou seja, um cometa que atravessa sua primeira passagem periélica. Arriscaríamos, portanto supor que o Austin (assim como o Kohoutek) tenha sido um cometa “novo”, tico em componentes voláteis.

Já o Levy e o Bradfield apresentaram comportamento fotométrico mais compatível com o esperado de cometas cuja vaporização seja dominada pela água como constituinte principal. O Tempel 2 certamente apresenta essas características, enquanto que o Okasaki-Levy-Rudenko careceu de observações na fase ante-periélica, sendo difícil estabelecer qualquer conclusão nessas condições.

8. REFERÊNCIAS

- 1) Bertaux, J.L. - Les Comètes (1987).
- 2) Delsemme, A.H. - Chemical Composition of cometary Nuclei (1968).
- 3) Kleine, T. and Kohoutek, L. - Photometric Parameters of Comet Kohoutek.
- 4) Meisel, D. and Morris, C.S. - Comet Head Photometry: Past, Present and Future.
- 5) REA - Projetos observacionais / REPORTES nº 01/02/03.
- 6) Vsekhsvyatskii, S.K. - Physical Characteristics of Comets (1964).
- 7) Wyckoff, S. - Overview of Comet Observations.
- 8) Montenbruck, O. - Practical Ephemeris Calculations, Springer-Verlag, 1987.
- 9) Meeus, J. - Astronomical Formulae for Calculator, 3rd Ed., Willmann-Bell, 1985.
- 10) Ferrin, I. - Manual para la Observacion de Los Cometas, Parte I, 1985.

AGRADECIMENTOS: A Frederico Funari, Hélio Vital e Carlos Colesanti, que nos auxiliaram na coleta de material bibliográfico.