



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Departamento de Astronomia
Observatório do Valongo

Estudo fotométrico do Cometa Chiron

Aluno: Sandro dos Santos Pinto

Orientadora: Daniela Lazzaro (Observatório Nacional)

Projeto de Final de Curso para a obtenção do
Título de Astrônomo

Dezembro/2003

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, por até aqui ter me dado forças e ter me proporcionado momentos memoráveis e pessoas maravilhosas. Com Ele foi difícil, sem Ele..., só Ele sabe! Obrigado! Apesar de às vezes pisar na bola, te amo!

A minha mãe e ao meu pai, pois me deram suporte e me compreenderam apesar de uma escolha tão pouco usual. Sou eternamente grato!

Aos meus irmãos (Sandra, Sergio e Patricia), sobrinhas (Ellen e Elisama) e cunhado (Elber), simplesmente por vocês serem quem são. Amo vocês.

À Rosane (minha nega). Nunca pensei em achar alguém tão especial tão perto de mim. São só três minutos que nos separam, e isso por enquanto...

A minha orientadora Daniela Lazzaro, pela paciência e compreensão.

Ao René, Thaís, Jorge e Cláudia Angeli, do grupo de Planetologia do ON. Pela colaboração durante todo o tempo em que estive realizando este trabalho.

A todos meus amigos do Observatório do Valongo (OV), em especial Ricardo Ogando, Rosicler, Leandro e Gil (verme maldito), vocês são demais! Nunca vou esquecer vocês (não sei se isso é bom ou ruim...).

Ao pessoal da extensão do OV: Encarnación (não posso resistir: te amo espanhola, te amo espanhola...), Rundsthen, Adolfo, Bruna, Ana Beatriz e Érika. Vocês são formidáveis! Muito obrigado por me aceitarem nesta "turma"!

A todos os professores OV, pelas aulas ministradas. Em especial a professora Sueli (valeu pelos papos e dicas durante todo o curso, não tenho palavras para te agradecer).

Aos funcionários do OV, especialmente à Rosinha, por ser tão prestativa e atenciosa; ao Elias, pelos lanches tantas vezes pendurados; às "tias" da biblioteca; e ao Djalma.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo do cometa Chiron. Posterior a um esboço geral da natureza, origem e história dos cometas, da apresentação do objeto a ser estudado, culminamos na descrição das atividades realizadas. Estas atividades se iniciam na obtenção de dados fotométricos que, após serem tratados, são incorporados à curva de luz secular de Chiron. Queremos, através da análise desta, entender melhor os processos responsáveis pela atividade de Chiron.

A atividade de Chiron não está relacionada com a distância heliocêntrica, como acontece aos demais cometas. São levantadas algumas hipóteses visando justificar tal comportamento. Testes são realizados a fim de validá-las.

A plena compreensão de Chiron aponta para uma melhor compreensão dos Centauros, dos objetos do Cinturão de Kuiper, de onde ele provavelmente se originou, e do Sistema Solar como um todo, visto que os cometas, como os asteróides, são corpos primordiais.

ABSTRACT

The aim of the present work is the study of comet Chiron. After giving a general sketch of the nature, origin and history of comets, followed by a description of the main characteristic of Chiron, we describe the performed activities. These began with the acquisition of photometric data that, after reduction, was incorporated to the secular light-curve of Chiron. Through the analysis of this light-curve we intend to better understand the processes responsible for Chiron's activity.

We confirm that Chiron's activity is not related to its heliocentric distance, like in most of the known comets. Some hypothesis about this activity are discussed and tested.

We would like to stress that a better understanding of Chiron will led to a better comprehension of the Centarus and the Kuiper Belt objects, from where it probably originated, and also of the Solar System as a whole since the comets, as well as the asteroids, are among the most pristine objects.

“Existem muitas razões que me permitem pensar que o cometa do ano de 1531, observado por Apianus, é o mesmo do ano de 1607, descrito por Kepler e Logomontanus, e o mesmo observado por mim no seu retorno de 1682. Todos os elementos estão de acordo, com exceção do período de revolução desigual, mas tal fato pode ser atribuído a causas de ordem física. Por exemplo, o movimento de Saturno é modificado pelos outros planetas, especialmente por Júpiter; este período de tempo inexato tem uma extensão de alguns dias. O cometa, que se afasta a uma distância de quatro vezes a de Saturno, sofre certamente outras influências, de modo que um aumento sensível na sua velocidade poderá transformar a sua órbita elíptica numa parábola. A identidade desses cometas está confirmada pelo fato que, no verão de 1456, um cometa foi visto com movimento retrógrado entre o Sol e a Terra, e do mesmo modo foi observado durante algum tempo. Parece que este cometa foi o mesmo de 1531, 1607 e 1682. Posso, agora, com confiança, prever o seu retorno para 1758. Se tal previsão se realizar, não haverá razões para que os outros não voltem.”

Edmond Halley (1656-1742)

ÍNDICE

Introdução	1
Capítulo 1 – Abordagem panorâmica dos cometas	3
1.1 – Evolução do estudo dos cometas	3
1.1.1 – Cometas: de corpos místicos à computação de órbitas	3
1.1.2 – Da Física cometária a medições “in situ”	6
1.2 – Estruturas dos cometas	7
1.2.1 – Núcleo	8
1.2.2 – Coma	10
1.2.3 – Cauda	10
1.3 – Origem dos cometas	11
Capítulo 2 – Chiron, o Centauro	13
Capítulo 3 – Nosso trabalho	19
3.1 – Observações	19
3.2 – Redução	19
3.2.1 – Correção dos efeitos sistemáticos	20
3.2.2 – Magnitude instrumental	21
3.2.3 – Magnitude observada	22
3.3 – Cálculo das magnitudes reduzida e absoluta	23
3.4 – Análise	26
3.5 – Atividade de Chiron	27
3.5.1 – Força de maré	27
3.5.2 – Atividade Solar	29
3.5.3 – Micro-meteoros	31
Capítulo 4 – Conclusões e Perspectivas futuras	32
Referências	33
Apêndice – Artigo: “New Activity of Chiron: Results from 5 Years of Photometric Monitoring” .	36

Introdução

O modelo de formação do Sistema Solar mais aceito atualmente é o de Safronov (1969), conhecido como “modelo padrão”. Neste modelo os planetas e demais corpos foram formados a partir de outros objetos menores (chamados *planetésimos*) que orbitavam num disco ao redor do que viria a ser o Sol. Estes planetésimos teriam sido condensados e posteriormente acretados a partir de choques inelásticos numa nuvem primordial, que seria composta de gases e poeira. A partir deste modelo chegamos à conclusão de que os objetos menores do Sistema Solar, ou seja, asteróides e cometas, são “fósseis” da nuvem primordial, pois não sofreram significativas alterações químicas e físicas quando comparados aos planetas. Isto torna relevante e motivador o estudo destes objetos primitivos.

Os cometas são objetos fascinantes. Seu movimento errante no céu e sua cauda exuberante sempre inquietaram o homem. Durante muito tempo o aparecimento de um cometa foi considerado como um mau presságio, um sinal de que o castigo divino era iminente. Na Roma Antiga era bem aceita a idéia de que a morte de Nero e a queda de César haviam sido pressagiadas por um cometa. Esta visão catastrófica e fatalista dos cometas foi sendo atenuada com o passar do tempo. Podemos considerar como um marco do início desta ruptura a descoberta do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe, em 1577, quando foi verificado que o cometa de 1577 situava-se além do mundo sublunar, e não na esfera sublunar como defendia a elite intelectual da época, que via nesta hipótese a imutabilidade e a perfeição divinas. A partir das Leis de Kepler, e mais posteriormente da Lei da Gravitação Universal de Newton, que mostraram que os cometas não são exalações da atmosfera, mas sim objetos periódicos e com órbitas previsíveis, os cometas foram desmistificados, pelo menos no meio científico.

O cometa alvo deste estudo possui algumas peculiaridades, e estas fazem dele um objeto especial. Para apreciarmos o quão distinto Chiron é, trataremos de alguns aspectos dos cometas de forma genérica e depois compararemos tais aspectos com os respectivos de Chiron.

Sucintamente, dividiremos este trabalho em quatro capítulos:

- **Capítulo 1** – Trataremos os cometas de forma geral: sua história, principais características, estruturas, origem e características importantes;
- **Capítulo 2** – Abordaremos a evolução do nosso conhecimento acerca de Chiron: sua descoberta, marcos, características relevantes e peculiaridades;
- **Capítulo 3** – Focaremos nossa atenção no trabalho realizado nos anos de 2000, 2001 e 2002: hipóteses sobre a atividade cometária de Chiron, redução fotométrica e

análise dos dados, incorporação dos nossos resultados à curva de luz secular de Chiron e a análise desta;

- **Capítulo 4** – Nossas conclusões e perspectivas futuras.

Capítulo 1

Abordagem panorâmica dos cometas

1.1) *Evolução do estudo dos cometas.*

Relatos de cometas datam de 687 a.C., em inscrições babilônicas. Desde então muito se discutiu acerca da natureza destes corpos e muitos esforços foram realizados para que chegássemos ao presente entendimento. A seguir apresentamos de forma resumida como as idéias acerca dos cometas se modificaram através dos séculos até alcançarem o atual nível de complexidade.

1.1.1) *Cometas: de corpos místicos à computação de órbitas*

Entre os vários textos babilônicos que tratam de Astronomia apenas um trata especificamente de cometas. Este texto consiste em três tábuas cuneiformes, onde a mais antiga data de 687 a.C. No entanto, existe um escrito babilônico de 1140 a.C. que possui em seu conteúdo uma possível menção a cometas. O nosso conhecimento acerca do pensamento dos astrônomos caldeus deve-se em grande parte a um filósofo latino chamado Sêneca (4 a.C. – 65 d.C.). Este relatou as idéias de dois astrônomos, Epigênio e Apolônio de Mindes, que estudaram na Babilônia.

Epigênio, que viveu no século III a.C., afirmava que os caldeus consideravam os cometas como efeitos atmosféricos, enquanto Apolônio de Mindes (260 – 200 a.C.) defendia que os caldeus consideravam os cometas como objetos cósmicos, semelhantes aos planetas. Sêneca tornou-se um forte defensor do conceito de cometas apregoado por Apolônio de Mindes.

Os gregos partilhavam da idéia de que os cometas eram corpos sublunares, atribuindo-lhes desta forma origem atmosférica, conforme o filósofo grego Aristóteles (384 – 322 a.C.) nos relata em sua obra *Meteorologica*. As concepções de Aristóteles de que os cometas eram exalações atmosféricas levaram-no a associar os cometas a catástrofes naturais. Este ponto de vista foi difundido por Possiônico (135-51 a.C.), primeiramente, e por Plínio (23-79 d.C.) em sua obra *História Natural*, posteriormente. Depois de tais iniciativas não demorou muito para que esta visão aristotélica se tornasse popular.

No entanto o filósofo Sêneca se recusou a aceitar as concepções de Aristóteles acerca da natureza dos cometas. Ele defendia que os cometas pertenciam ao grupo dos planetas, com trajetórias regulares e previsíveis. O mais notável é que ele viveu 17 séculos antes da confirmação da periodicidade dos cometas! Infelizmente as idéias de Aristóteles permaneceram absolutas por cerca de dois mil anos.

Neste período ocorreu o florescimento da Astrologia. Isto não implica que os cometas não fossem mais observados (ainda bem, pois os registros desta época serviram para identificar as passagens anteriores de vários cometas), mas que o que prevalecia era a sua interpretação religiosa. Um dos grandes incentivadores da Astrologia foi o astrônomo e geógrafo Carlos Ptolomeu. Ele viveu em Alexandria, no século II d.C., e ficou conhecido pelo seu livro *Almagesto*, um resumo dos conhecimentos astronômicos da época. Neste trabalho não havia sequer uma menção a cometas, talvez por não considerá-los corpos celestes. Foi com sua obra *Tetrabiblos* que Ptolomeu contribuiu para que os cometas fossem vistos como objetos místicos ao descrevê-los em termos astrológicos.

Por volta do século XV as concepções aristotélicas começaram a ceder espaço a idéias menos religiosas. Isto pode ser evidenciado considerando o modelo heliocêntrico proposto por Nicolau Copérnico (1473-1543), em 1510. A sua obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI*, publicada em 1543, põe o Sol no centro do sistema planetário, em forte oposição ao sistema geocêntrico, que colocava a Terra como o corpo central. No entanto, os cometas continuavam sendo considerados meros efeitos da atmosfera terrestre.

A partir de observações do cometa de 1577, o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe chegou à conclusão de que este se localizava além da órbita da Lua. Esta afirmação se baseia nas medições de paralaxe do cometa de 1577, cujo valor era de 15'. Se o cometa estivesse entre a atmosfera e a Lua, deveria apresentar uma paralaxe de, no mínimo, 1°. A medida obtida significava que o cometa deveria estar pelo menos a 230 raios terrestres de distância. Considerando que a distância Terra-Lua é de 60 raios terrestres, então o cometa estaria a aproximadamente quatro vezes a distância Terra-Lua. Não é preciso dizer que esta afirmação causou grande impacto e forte resistência por parte dos que compartilhavam da visão aristotélica, entre os quais, Galileu Galilei (1564-1642). A resistência por parte de Galileu fica clara quando este refuta o astrônomo e sacerdote jesuíta Orazio Grassi (1582-1652) na discussão acerca do porquê os cometas não eram ampliados pelos telescópios. Enquanto Orazio justificava este fato afirmando que os cometas eram objetos distantes, Galileu dizia que a impossibilidade de ampliação dos cometas não o surpreendia, pois os cometas não passavam de efeitos ópticos causados por vapores da atmosfera.

Um aspecto a ser relevado é a órbita dos cometas. Tycho Brahe, baseado nas irregularidades do movimento cometário, admitiu que sua órbita não era exatamente circular, mas sim alongada como uma oval. Esta foi a primeira vez que um astrônomo sugeriu que a órbita de um corpo celeste teria a forma diferente de um círculo, e isto sem propor que a curva resultante fosse devido a inúmeros movimentos circulares.

É curioso o fato de que o próprio Kepler (1571-1630), que enunciou as três leis do movimento planetário, não aplicou as suas próprias leis aos cometas, antes considerava suas órbitas

retilíneas. Isto pode ser esclarecido se levarmos em conta que os cometas para Kepler não passavam de efeitos atmosféricos, em outras palavras: seria uma perda de tempo calcular a órbita de um cometa que não deveria retornar (apesar das fortes evidências de que os cometas pertenciam à região das esferas dos planetas).

Em sua análise dos movimentos dos cometas de 1661, 1664 e 1665, o astrônomo alemão Johannes Havelius (1611-1687) sugeriu que estes seguiram uma órbita retilínea. No entanto ele não conseguiu ajustar aos cometas de 1577 e 1652 uma órbita de mesma geometria. Este fato levou-o à conclusão de que estes dois cometas haviam sofrido uma pequena inclinação nas suas órbitas ao se aproximarem do Sol, e por isso propôs que eles haviam descrito órbitas curvas, semelhantes à trajetória de balas de canhão, ou seja, parábolas.

O problema das órbitas e da natureza dos cometas como corpos celestes só seria solucionado definitivamente com Isaac Newton (1642-1727), quando ele determinou a órbita do cometa de 1680. Posteriormente, em 1695, o astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1792) obteve a órbita de alguns cometas, dentre os quais o cometa que recebeu o seu nome.

Newton, influenciado pelas idéias de Kepler, tentou calcular uma órbita retilínea para o cometa de 1680. Ao fazê-lo observou que esta idéia o levaria à existência de dois cometas: um antes e outro depois da passagem por detrás do Sol. O astrônomo inglês John Flamsteed (1646-1719), que havia fornecido os dados observacionais a Newton, sustentava a idéia de que se tratava de um cometa somente, pois para ele os cometas eram objetos permanentes. Este impasse permaneceu até que Newton chegou à Lei da Gravitação Universal, que previu completamente os enunciados de Kepler e ainda determinou que os cometas moviam-se em órbitas elípticas bem alongadas, facilmente associadas a parábolas. Assim, Newton demonstrou que as duas partes da trajetória observada do cometa de 1680 eram os dois ramos de uma parábola cujo foco era ocupado pelo Sol.

Estas idéias serviram de base para que o astrônomo Sir Edmond Halley (1656-1742) computasse os elementos orbitais de doze cometas e propusesse que o cometa de 1682 era o mesmo cometa que foi observado em 1607 e em 1531, e ainda previu que este mesmo cometa retornaria em fins de 1758 ou no início de 1759, visto que ele teria um período de revolução de 75-76 anos.

Infelizmente Halley faleceu em 1742, dezessete anos antes do retorno do cometa de 1682, que foi observado por John Palitzsch em 1758, confirmando a hipótese de Halley e validando a Lei da Gravitação Universal de Newton. Devido à dedicação de Halley no estudo do cometa de 1682 e à previsão acerca do seu retorno, convencionou-se chamar este cometa de Halley.

De forma resumida podemos dizer que a astronomia cometária do século XVIII foi caracterizada pela aplicação sistemática das Leis de Newton para a determinação de órbitas cometárias bem como refinamentos que levavam em conta as perturbações provocadas pelos demais corpos do Sistema Solar.

1.1.2) *Da Física cometária a medições “in situ”*

A partir de então a abordagem dos cometas deixou de ser simplesmente focada na questão orbital e passou a ser direcionada a questões do tipo: a composição da cauda dos cometas, o porquê da sua forma, etc, ou seja, questões sobre suas propriedades intrínsecas.

A orientação da cauda dos cometas começou a ser esclarecida de forma científica a partir de 1873, quando o físico James Clerk Maxwell (1831-1879) previu que a radiação solar levava consigo determinada quantidade de momento que poderia ser transferida quando aquela incidisse em um corpo. A pressão de radiação poderia ser responsável pela força repulsiva já sugerida por Kepler. Segundo Kepler os cometas eram constituídos por uma substância nebulosa que, devido à ação da força repulsiva, seria empurrada na direção anti-solar dando origem à cauda. Bessel (1784-1846) desenvolveu uma teoria na qual as caudas cometárias tinham origem nas partículas que deixavam a “cabeça” dos cometas quando sujeitas a diferentes forças repulsivas e à gravidade do Sol. Esta visão analítica foi seguida e mais desenvolvida pelo astrônomo russo F.A. Bredichin, cujo tratamento mecânico ficou conhecido como Teoria de Bessel-Bredichin ou Teoria Mecânica. A idéia de que esta força repulsiva fosse devida a partículas recebeu maior apoio depois de trabalhos que correlacionavam as emissões de partículas do Sol com fenômenos geofísicos, como as auroras. Esta discussão só seria finalizada em 1957, como veremos mais adiante.

Por volta de 1860 foram realizadas as primeiras medidas espectroscópicas de cometas, onde foram identificadas as bandas de Swan, correspondendo a emissões de associações moleculares do carbono. Daí em diante a espectroscopia passou a ser uma das grandes ferramentas no estudo dos cometas.

Nos anos de 1950-51 foram elaboradas teorias para explicar o núcleo cometário bem como de onde os cometas se originaram. Estas propostas formam a base da nossa atual concepção do núcleo e da origem dos cometas, ou seja:

- i) O modelo do conglomerado de gelo e poeira, ou a “bola de neve suja”, proposto por Fred Whipple para o núcleo cometário;
- ii) A identificação de um reservatório de cometas situado a cerca de 50 000 UA do Sol através da análise estatística dos elementos orbitais de diversos cometas, por Jan Oort. Os cometas viriam de uma nuvem esférica povoada por cerca de 10^{11} corpos congelados que adentrariam ao sistema planetário devido a perturbações estelares;

iii) A sugestão da existência de um disco de planetésimos situado além da órbita de Netuno por parte de K.E. Edgeworth, em 1949, e por G. Kuiper, em 1951. Este disco ficou conhecido posteriormente como cinturão de Edgeworth-Kuiper.

Dois outros trabalhos publicados na década de 50 merecem destaque pois contribuíram muito para nossa atual compreensão das caudas cometárias. Num artigo publicado em 1951, o astrônomo alemão L. Biermann atribuiu o desvio das caudas ionizadas em relação à cauda de poeira à ação do vento solar (que é composto de elétrons e prótons liberados de regiões ativas do Sol). A morfologia da cauda iônica seria devida essencialmente ao encontro entre os elétrons constituintes do vento solar e os íons dos cometas, visto que o elétron possui uma seção de choque maior do que a do próton. Nestes cálculos Biermann não levou em conta a existência de um campo magnético levado pelo vento solar, embora admitisse a sua existência. Já o astrônomo sueco H. Alfvén, em seu artigo “On the Theory of Comet Tails” (1957), associou ao vento solar um campo magnético muito fraco. Ao considerar este campo magnético, Alfvén obteve resultados quantitativos realistas e notáveis, o que proporcionou grande aceitação da sua teoria. Este campo magnético foi verificado através das sondas *Explorer X*, *Lunik I e II*, *Mariner II*, etc. Assim, tanto a formação da cauda de poeira, que desde o início do século passado já era explicada pela pressão da radiação solar (Schwarzschild, 1901), como a da cauda iônica, são fenômenos bem esclarecidos.

Em 1985 iniciou-se um período de grandes descobertas e comprovações, enfim o homem havia conseguido fazer medições *in situ* em cometas através de sondas espaciais que se encontraram com os cometas Halley e Giacobini-Zinner. Muitos astrônomos após o encontro de seis sondas espaciais com o cometa Halley, começaram a fazer uso dos termos “pré-Halley” e “pós-Halley”, referindo-se aos estudos cometários. Isto é bem justificado se consideramos o volume de dados colhidos tanto *in situ* quanto por observadores terrestres.

Também foi nesta época que se passou a utilizar instrumentos mais sofisticados, tais como CCD, sistemas de óptica adaptativa, espectroscopia de alta resolução, etc. Com a utilização destes equipamentos foi possível obter medidas bem precisas de estruturas nas comas e identificação de grupos químicos nos dois cometas mais brilhantes das últimas duas décadas: Hale-Bopp e Hyakutake.

1.2) Estruturas dos cometas

Os cometas são compostos de três estruturas principais, a saber: núcleo, coma e cauda. No que segue vamos dar uma breve descrição de cada uma delas.

1.2.1) Núcleo

O núcleo é a parte responsável pela formação da coma e da cauda dos cometas. Hoje sabemos que se trata de um objeto sólido, composto principalmente de água e poeira. Ele fornece o material, basicamente na forma de gelos, a ser volatilizado pela radiação solar e que produz tais estruturas.

A observação direta do núcleo cometário utilizando telescópios na superfície terrestre não é nada fácil, isto devido à presença de gelos volatilizados pela radiação solar. Esta volatilização ocorre em várias distâncias heliocêntricas e depende do material constituinte do núcleo. A água, por exemplo, é volatilizada a distâncias de aproximadamente 3 UA.

Podemos estimar o tamanho do núcleo através de medições de radar, como ocorreu com o cometa P/Encke, que teve o seu raio estimado entre 0,4 e 4 km. A grande desvantagem da utilização de radiotelescópios é que o sinal que recebemos (o eco) diminui com a quarta potência da distância geocêntrica, ou seja, o sinal é muito diluído.

Outra forma de estimarmos o diâmetro do núcleo cometário é através de ocultação estelar, ou seja, quando um cometa bloqueia a radiação eletromagnética de uma estrela. Foi através desta técnica que os anéis dos planetas Urano e Netuno foram descobertos.

Para estimarmos fotometricamente o raio nuclear podemos fazer uso da seguinte expressão:

$$R^2 = r^2 A^{-1} \phi^{-1}(\alpha) \cdot 10 \cdot \exp\{0,4 \cdot [M_{\odot} - (m - 5 \cdot \log \Delta)]\}$$

onde r é a distância heliocêntrica, A é o albedo geométrico, $\phi(\alpha)$ é a função de fase, M_{\odot} e m são as magnitudes absoluta do Sol e observada do cometa, respectivamente, e Δ é a distância geocêntrica. Para utilizarmos esta expressão precisamos assumir que a magnitude m medida corresponde exclusivamente ao núcleo. Geralmente o que se espera é que o brilho do cometa a grandes distâncias heliocêntricas seja devido exclusivamente ao brilho do núcleo, já que nesta situação a atividade cometária deveria diminuir apreciavelmente, ou na melhor das hipóteses ser nula. Além desta restrição existe a indefinição do valor do albedo geométrico A para o qual são assumidos os albedos de outros corpos do Sistema Solar, geralmente entre 0,02 e 0,5.

Sem dúvida alguma o meio mais eficaz de obtermos o raio do núcleo de um cometa é com medições *in situ*. Foi o que ocorreu com os cometas Halley e Giacobini-Zinner. Infelizmente este método somente pode ser aplicado a poucos cometas devido ao seu alto custo financeiro.

Os dois modelos mais disseminados para a estrutura do núcleo cometário são o “banco de areia” e o conglomerado de gelo e poeira, ou a “bola de neve suja”.

O modelo “banco de areia” possui duas vertentes principais. A primeira propõe um núcleo formado por um aglomerado de pequenas partículas de diversos tamanhos mantidas entre si por atração gravitacional. A outra sugere que as partículas são independentes umas das outras, mas gravitando individualmente ao redor do Sol (Lyttleton, 1952). Em ambos os casos as partículas seriam cobertas por gelos.

Três questões principais fizeram com que o modelo “banco de areia” fosse abandonado:

- i) Se o modelo estivesse correto os cometas deveriam ser completamente destruídos ao se aproximarem muito do Sol. Isto devido à alta temperatura da coroa solar (da ordem de 10^6 K) ou ao efeito de maré solar ou a ambos os efeitos. No entanto isto não ocorreu a vários cometas que foram submetidos a estas condições, como, por exemplo, o cometa Ikeia (1963 I);
- ii) Se o núcleo fosse constituído somente de partículas, os cometas perderiam uma considerável quantidade de seus gases a cada passagem pelo periélio. Isto ocasionaria uma redução muito rápida do seu brilho entre duas revoluções consecutivas em torno do Sol, o que não é observado;
- iii) A cada revolução, os cometas apresentam um avanço ou um retrocesso em relação às previsões. Isto ocorre devido à ação de forças não-gravitacionais. Com o modelo “banco de areia” é impossível explicar estas forças.

A terceira consideração foi a mais relevante para que o modelo “bola de neve suja” fosse aceito, pois somente um objeto sólido poderia responder da forma já observada às forças não-gravitacionais que o núcleo sofria. Isto descartaria de vez o modelo “banco de areia”.

Foi Fred Whipple, em 1950, que propôs um modelo no qual o núcleo cometário seria um objeto sólido formado basicamente de gelos e de poeira. Este modelo fornecia uma explicação bem simples às forças não-gravitacionais: o gelo, devido à ação da radiação solar, deveria ser sublimado; o material ejetado, numa direção dependente da direção do movimento do cometa ao redor do Sol e do sentido da rotação do núcleo, daria origem a tais forças. Desta forma, se o movimento do cometa se desse no mesmo sentido da sua rotação, então os gases seriam ejetados numa direção oposta ao do movimento do cometa ao redor do Sol, acelerando o núcleo. Se o movimento do cometa se desse no sentido contrário ao da sua rotação, então os gases seriam ejetados numa direção solidária àquela do movimento do cometa ao redor do Sol, desacelerando o núcleo. O modelo de Whipple superou todos pontos os fracos já relatados do modelo “banco de areia” e hoje é o mais aceito. Obviamente foram feitos alguns refinamentos e correções, mas sem dúvida alguma o núcleo sólido já é algo bem estabelecido.

1.2.2) *Coma*

Conforme o cometa se aproxima do Sol a taxa de evaporação do gelo nuclear aumenta, então se desenvolve uma atmosfera de gás e poeira ao redor do núcleo. Esta atmosfera chama-se coma e representa para o núcleo uma perda gradativa de massa. A coma é composta de poeira, moléculas, espécies atômicas e íons moleculares.

As moléculas que compõem a coma se rompem em moléculas menores sob a influência da radiação ultravioleta do Sol. Estas moléculas menores se dissociam em átomos, os quais, por sua vez, se dissociam em íons, sob a ação da radiação solar. Define-se como moléculas-mãe as moléculas que são desprendidas originalmente do núcleo, e moléculas-filha as resultantes da dissociação destas.

Foi observado estatisticamente que a coma usualmente se desenvolve numa distância da ordem de 3 UA do Sol. Isto é considerado como uma forte evidência de que a água é um dos mais importantes constituintes do núcleo cometário, visto que a temperatura da radiação nesta distância heliocêntrica é aproximadamente igual à temperatura requerida para volatilizar o gelo de água. Observou-se também que a quantidade do radical OH é semelhante à quantidade do radical H em diversos cometas (e.g. P/Encke e Kohoutek). De fato a molécula de H₂O foi confirmada como sendo a mais abundante nos cometas Halley e Giacobini-Zinner (~ 85%).

1.2.3) *Cauda*

Não seria exagero afirmar que todo fascínio que os cometas produzem está associado à cauda, apesar de nem todo cometa exibir uma cauda ou uma cauda muito proeminente. A cauda é o resultado da interação do vento solar com o material que é expelido pelo núcleo cometário. A maior já registrada é a do cometa 1843 I, cuja extensão máxima foi de aproximadamente 2 UA.

O astrônomo russo Bredichin (1903) classificou as caudas cometárias em três tipos:

- i) Tipo I – Reta e composta de hidrogênio;
- ii) Tipo II – Curva e composta de hidrocarbonetos;
- iii) Tipo III – Muito curva e composta de vapores metálicos.

Após a análise espectroscópica das caudas cometárias as composições sugeridas por Bredichin foram desconsideradas por serem inconsistentes.

Atualmente classificamos as caudas cometárias em dois tipos principais: a do tipo I (a de plasma ou iônica), que corresponderia ao Tipo I de Bredichin, e a do tipo II (a de poeira), que

corresponderia aos Tipos II e III de Bredichin. A cauda do tipo I é mais alinhada com o raio vetor, ou seja, a reta que liga o Sol ao cometa, e é composta por íons (e.g. CO^+ e N_2^+), a do tipo II é curva, geralmente apontando para uma posição entre a extrapolação do raio vetor e a posição anterior do cometa em sua órbita.

1.3) *Origem dos cometas*

Em seu histórico trabalho Oort (1950) sugeriu a existência de uma nuvem esférica composta por cerca de 10^{11} objetos congelados situados a distâncias heliocêntricas da ordem de 50×10^3 UA, a qual passou a ser conhecida como nuvem de Oort. Este trabalho foi baseado na análise estatística da quantidade $1/a_{\text{orig}}$, onde a_{orig} é o semi-eixo maior original do cometa antes dele entrar na região planetária do Sistema Solar. Esta nuvem seria esférica, o que a torna compatível com os dados observacionais sobre a inclinação aleatória das órbitas dos cometas da amostra.

Na mesma época Kenneth Edgeworth (1949) e Gerald Kuiper (1951), independentemente, propuseram a existência de um disco formado de pequenos corpos congelados situados além da órbita de Netuno. Edgeworth e Kuiper consideravam irreal que Plutão determinasse a fronteira do nosso sistema planetário, por isso sugeriram a existência de tal disco. Neste “cinturão” os planetésimos se apresentariam bastante dispersos e estariam em órbitas circulares, ou seja, o disco teria uma baixa densidade e os seus componentes teriam órbitas essencialmente primordiais.

A idéia de um disco transnetuniano recebeu pouca atenção por muitos anos. Os objetos neste “cinturão” hipotético refletiriam pouquíssima luz devido ao pequeno tamanho e à grande distância em que se encontravam. Isto, associado às limitações instrumentais da época, tornava impossível determinar se o disco proposto por Edgeworth e Kuiper existia ou não.

Entretanto, esta idéia ressurgiu quando Fernández (1980) propôs que um disco de núcleos cometários situado além da órbita de Netuno poderia ser o reservatório dos cometas de curto período, ou seja, aqueles cujos períodos de revolução são menores que 200 anos. Esta proposta deve-se ao fato de que os cometas de curto período possuem um tempo de vida dinâmico muito menor do que a idade do Sistema Solar, e por isso é necessário que eles venham de algum reservatório estável. Uma das hipóteses levantadas foi a de que os cometas de curto período seriam cometas de longo período (com período superior a 200 anos) capturados por Júpiter e pelos outros planetas gigantes (Havnes 1970; Vaghi 1973). Outro ponto importante é que os cometas de curto período possuem baixas inclinações, enquanto os de longo período possuem inclinações aleatórias. Assim, se os cometas de longo período fossem a “fonte” dos de curto deveria se justificar como esta mudança de inclinação ocorreria ou assumir que os cometas antes de interagir com os planetas gigantes já possuíam baixas inclinações, o que diminuiria consideravelmente o espaço amostral.

Everhart (1972) mostrou através de um estudo numérico que as características orbitais dos cometas de curto período podem ser explicadas, pelo menos qualitativamente, se assumirmos que estes se originam de cometas de longo período com pequenas inclinações e com periélio entre 4 UA e 6 UA. No entanto foi demonstrado que este processo de captura realizado pelos planetas gigantes não poderia justificar o atual número de cometas de curto período, isto devia-se principalmente à baixa probabilidade de ocorrência deste evento (Joss 1973; Kresák & Pittich 1978). Baseado nestas considerações Fernández (1980) propôs que o disco de planetésimos sugerido por Edgeworth e Kuiper seria um reservatório satisfatório dos cometas de curto período, que adentrariam ao sistema planetário interior devido a perturbações dos planetas gigantes.

O disco proposto por Edgeworth e Kuiper (atualmente denominado cinturão de Edgeworth – Kuiper, ou apenas cinturão de Kuiper) permaneceu como hipotético até 1992, quando foi observado um objeto de magnitude 22 além da órbita de Netuno. Este corpo foi denominado 1992QB1. A partir deste muitos outros objetos semelhantes foram identificados. Hoje em dia o número total de KBO's (*Kuiper Belt Objects*) é superior a 660. Como estas descobertas foram realizadas analisando uma pequena região do céu, estima-se que existam 160 000 objetos como 1992QB1 de diâmetros da ordem de 100 km. O disco deve ainda possuir bilhões de outros núcleos cometários com dimensões inferiores a 100 km.

Desta forma podemos considerar que a nuvem de Oort serve como um reservatório estável dos cometas de longo período, e o cinturão de Kuiper serve como um reservatório estável dos cometas de curto período.

Capítulo 2

Chiron, o Centauro

Chiron foi descoberto em 1977 por Kowal (1979), quando este estava a 17 UA numa órbita entre aquelas de Saturno e Urano. Somente quinze anos após a sua descoberta é que outros corpos semelhantes foram identificados. A este grupo de objetos deu-se o nome de Centauros devido à ligação mitológica destes com Júpiter e Saturno. Analisando estatisticamente a amostra ficou claro que estes objetos pertencem a uma população de algumas centenas (ou milhares) de objetos de diâmetro de cerca de 100 km. Na tabela 1 listamos os elementos orbitais de Chiron.

$\omega = 339$	$e = 0,38$
$\Omega = 209$	$a = 13,69$
$i = 6,92$	$M = 229,1$

Tabela 1 – Elementos orbitais de Chiron.

Através de experimentos numéricos mostrou-se que Chiron possui uma órbita instável (Oikawa and Everhart 1979; Scholl 1979), isto devido a possíveis encontros próximos com Saturno. Por ter uma órbita instável Chiron possui um tempo de vida dinâmico pequeno, da ordem de 10^6 anos, logo não pode ter estado nesta órbita desde a formação do Sistema Solar. Portanto acredita-se que Chiron deve ter se originado no Cinturão de Kuiper e esteja em transição para o Sistema Solar interior.

Quando descoberto Chiron foi classificado como o asteróide 1977UB. Posteriormente, quando sua órbita foi calculada com mais precisão, ele passou a ter a denominação de 2060 Chiron. Até então os astrônomos estavam surpresos somente pela descoberta de um novo objeto 47 anos após a descoberta de Plutão.

Por volta de 1987 Chiron apresentou um aumento e variações de brilho incompatíveis com um corpo asteroidal (Tholen *et al.*, 1988; Bus *et al.*, 1988; Hartmann *et al.*, 1990). Isto era um forte indício de que não estávamos lidando com um asteróide, mas sim com um cometa. É interessante notar que, como já dito, para a maioria dos cometas a atividade está ligada à volatilização da água, e esta ocorre a distâncias heliocêntricas de cerca de 3 UA. Na época em que os indícios de atividade cometária foram identificados Chiron estava a 13 UA. Portanto, esta atividade deveria estar ligada à sublimação de elementos mais voláteis, tais como CN, CO ou CO₂ (Stern *et al.*, 1989; Meech & Belton, 1990). De fato, as moléculas de CN e CO foram espectroscopicamente identificadas por Bus e colaboradores (1991) e Womack & Stern (1995), respectivamente.

Outro fato interessante foi a descoberta de estruturas em forma de jatos próximas ao núcleo cometário numa ocultação estelar em 1994 (Elliot *et al.*, 1994). Mais recentemente também foi detectada em espectros a presença de água congelada (Luu *et al.*, 2000).

Uma característica que diferencia Chiron dos demais cometas é o diâmetro, que foi estimado através de diversas técnicas. Lebofsky *et al.* (1984) estimaram para Chiron, utilizando o STM (*Standard Thermal Model*), o diâmetro de 180 km. O STM é um modelo amplamente utilizado para asteróides no qual são assumidas as seguintes simplificações: o asteróide é esférico, não possui rotação, está em equilíbrio com a radiação solar e o seu ângulo de fase é nulo.

Sykes & Walker (1991) estimaram o diâmetro de Chiron em 372 km utilizando o ILM (*Isothermal Latitude Model*). Este modelo é utilizado preferivelmente para objetos do Sistema Solar exterior (e.g. Plutão), tendo em vista a alta inércia térmica, resultante da composição de gelos e rocha, e a grande distância heliocêntrica.

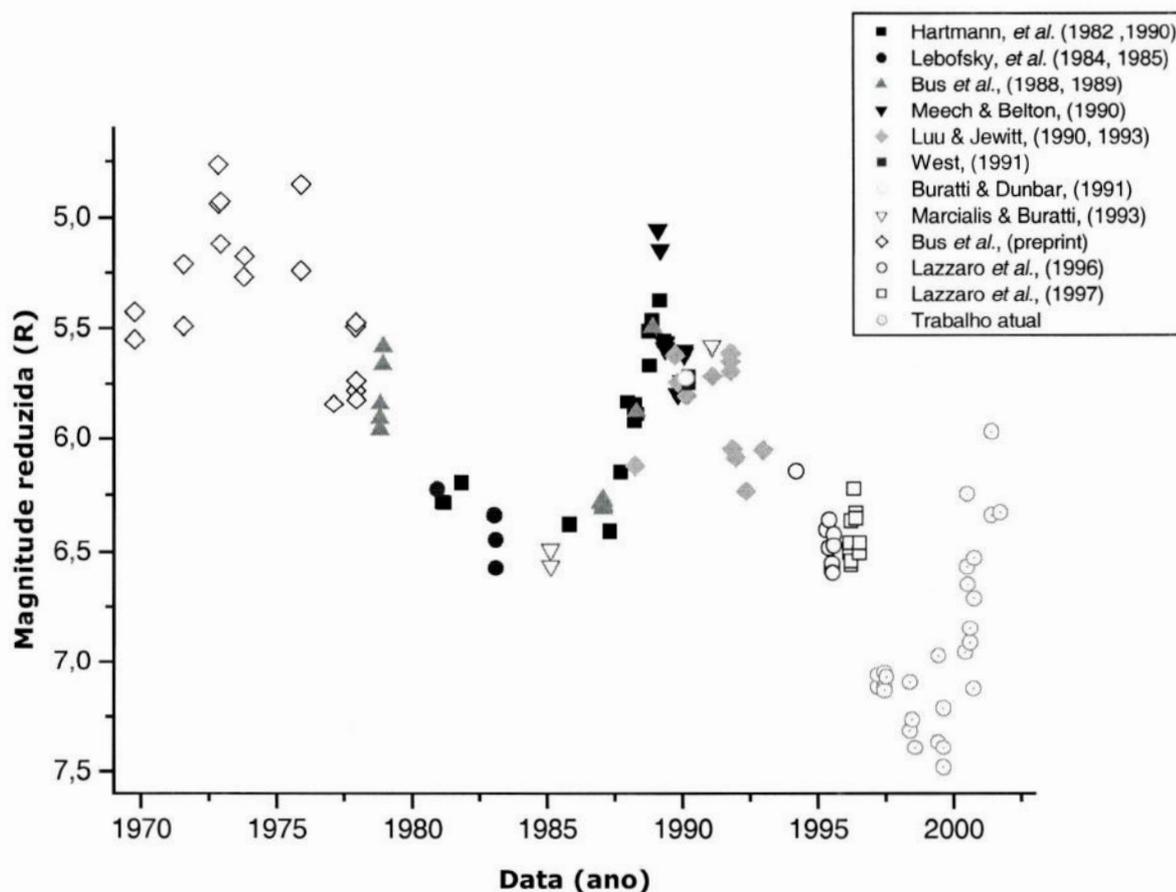


Figura 1 – Variação da magnitude reduzida de Chiron no decorrer dos anos

Campins *et al.* (1994) e Marcialis *et al.* (1994) obtiveram 182 km e 189 km, respectivamente, como estimativas para o diâmetro de Chiron utilizando, como Lebofsky (1984), o

STM. Apesar da diferença nas medidas, é fato que o núcleo de Chiron é bem grande, provavelmente o maior dentre os cometas conhecidos.

Na figura 1 é mostrada a variação da magnitude reduzida de Chiron ao longo dos anos. Os pontos anteriores a 1977 são pontos pré-descobrimto, ou seja, obtidos através de placas fotográficas anteriores ao descobrimento de Chiron. É importante ressaltar que associado a estes pontos há um grande erro devido às limitações intrínsecas das placas fotográficas, como por exemplo a sua não-linearidade. A curva de luz de Chiron possui três componentes: uma secular, uma periódica e uma esporádica. A primeira componente está associada à atividade cometária de longo prazo e possui uma grande diferença de magnitude; a segunda está relacionada ao movimento de rotação do núcleo; e a terceira está relacionada à atividade cometária aleatória. Na figura 1 temos a componente secular. Nas figuras 2 e 3 ilustramos as componentes periódica e esporádica de Chiron, respectivamente.

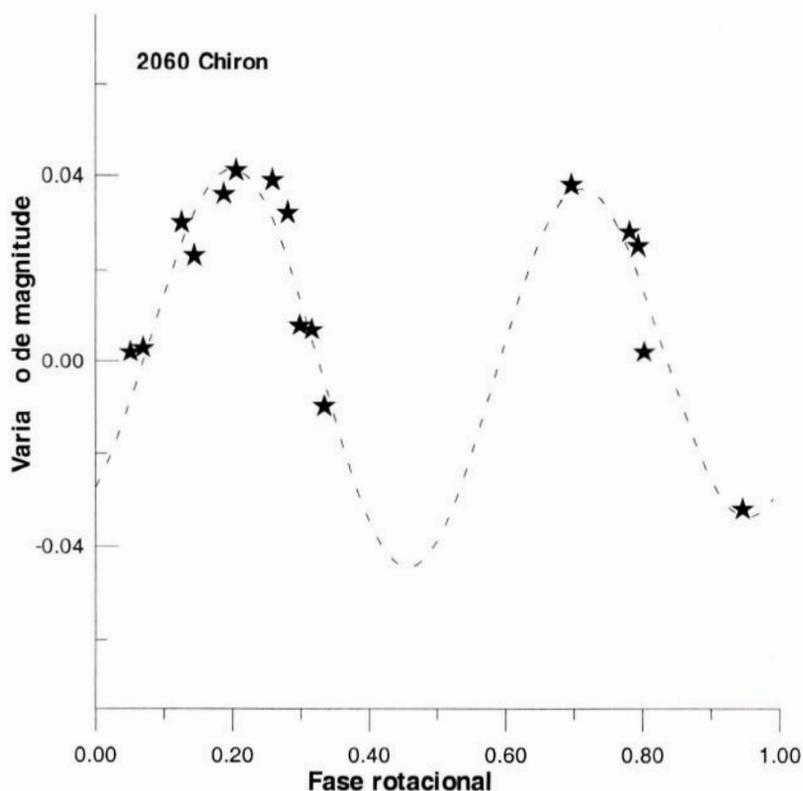


Figura 2 – Componente periódica da curva de luz de Chiron obtida através dos dados das noites 12 e 13/02/97. O período encontrado é de 5,9 h.

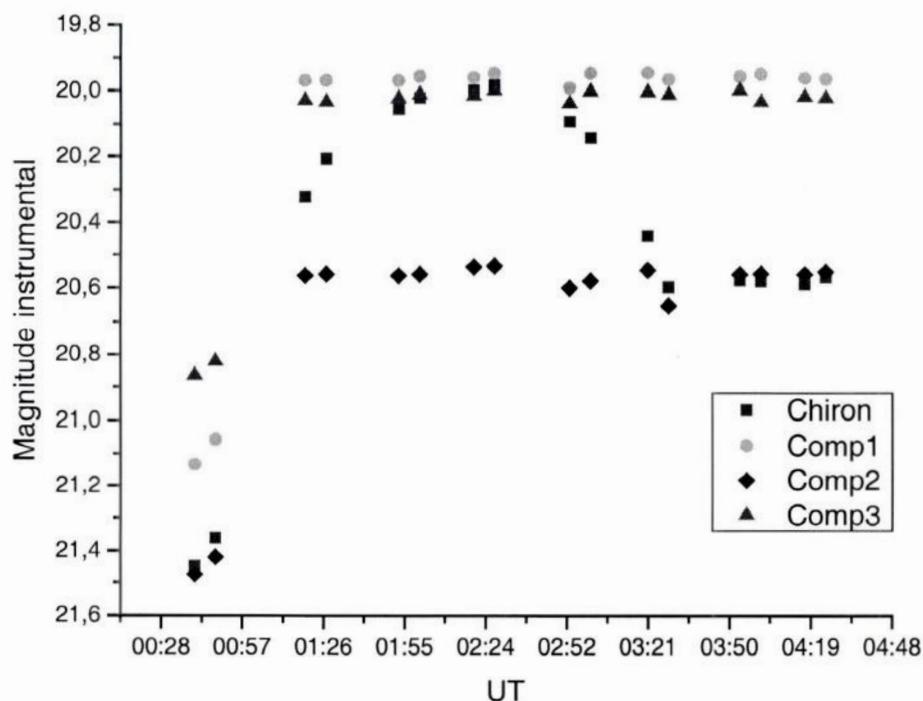


Figura 3 - Atividade esporádica de Chiron na noite de 12/03/1997. Note como as magnitudes das estrelas de comparação seguem aproximadamente um padrão enquanto as de Chiron variam aleatoriamente.

A característica mais interessante de Chiron é mostrada na Figura 4, onde a magnitude de Chiron é mostrada em função da distância periélica. Já vimos que os cometas exibem uma atividade crescente conforme se aproximam do Sol, entretanto Chiron é uma exceção à regra. Note que quando a sua distância periélica era nula, em 1996, Chiron estava num mínimo de atividade! Fica claro nesta figura que a atividade de Chiron não está relacionada à distância heliocêntrica. Um dos modelos que visam explicar a atividade de Chiron propõe que este padrão de atividade é devido a um pulso térmico atrasado numa matriz porosa composta de água congelada amorfa (não-cristalina) e poeira, que contém uma quantidade de CO em pequena proporção, acompanhado por emissão de gás ocluso (Priyalnik *et al.*, 1995). O resultado deste modelo prevê que a atividade de Chiron é esporádica, o que é compatível com os nossos resultados.

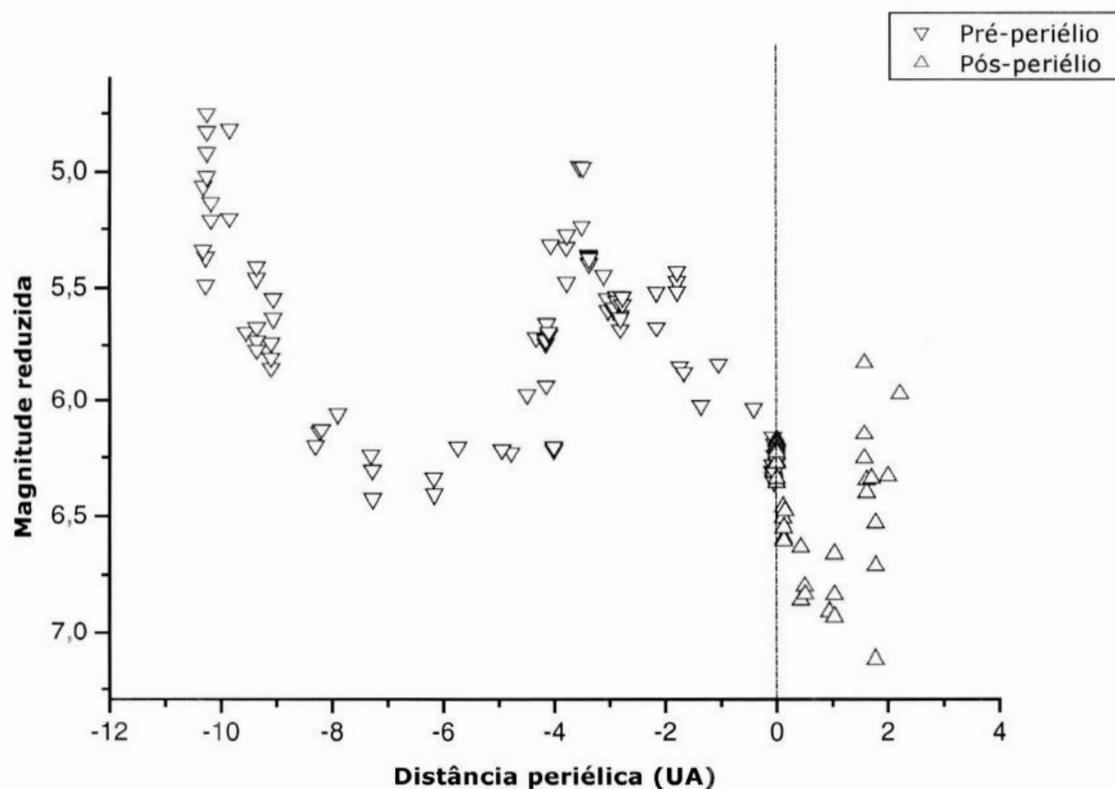


Figura 4 - Variação do brilho de Chiron conforme a distância periélica. Note que quando Chiron estava no periélio ele encontrava-se num período de mínima atividade.

Para finalizar este capítulo confrontemos algumas características de Chiron com as respectivas dos cometas de maneira genérica:

Característica	Cometas	CHIRON
Distância heliocêntrica onde a atividade cometária torna-se observável	R ~3 UA	R ~ 13 UA
Principal elemento volatilizado	Principalmente água	Não pode ser água, provavelmente elementos mais voláteis tais como: CO, CO ₂ e CN
Diâmetro	~ 20 km	~ 200 km
Atividade cometária	crece conforme a distância heliocêntrica diminui	independe da distância heliocêntrica

No próximo capítulo vamos descrever o trabalho por nós realizado (Duffard *et al.*, 2002) visando um melhor entendimento deste cometa.

Capítulo 3

Nosso Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é o de melhor entender os processos responsáveis pela atividade de Chiron a partir do monitoramento de seu brilho.

Dividiremos este capítulo em cinco seções. Na primeira seção descreveremos a obtenção dos dados e o equipamento utilizado; na segunda trataremos da metodologia adotada na redução das imagens; na terceira definiremos as magnitudes reduzida e absoluta obtidas; na quarta apresentaremos os nossos resultados e análises; e na quinta abordaremos as hipóteses que foram levantadas acerca da atividade de Chiron e os testes realizados para avaliá-las.

3.1) Observações

Os nossos dados foram tomados em três diferentes sítios: no Observatório do Pico dos Dias (OPD, Brasil), com o telescópio de 0,6 m; na Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA, Argentina), com o telescópio de 1,54 m; e no Complejo Astronômico El Leoncito (CASLEO, Argentina), com o telescópio de 2,15 m. Todas as observações foram realizadas utilizando câmeras CCD, no filtro R do sistema tipo Johnson. No OPD utilizamos um CCD EEV 385 x 586 com redutor focal, que nos proporcionou um campo de $7'.5 \times 5'.5$. Nas observações na EABA foi utilizado um CCD Tektronix 1024 x 1024 com um campo de $5'.7 \times 5'.7$. Um CCD similar ao anterior foi usado nas observações no CASLEO, com um campo circular de $9'$.

Os dados foram tomados entre os anos de 1997 e 2001. As condições climáticas durante as missões foram, de forma geral, boas. Na Tabela 2 listamos a geometria de cada missão, ou seja, as distâncias heliocêntrica e geocêntrica e o ângulo de fase, bem como a data e os sítios onde foram realizadas as observações.

Em cada imagem de Chiron foram selecionadas algumas estrelas de comparação, geralmente três, de brilho semelhante ao de Chiron. Estas estrelas nos auxiliaram no cálculo do coeficiente de extinção da noite. Além disto foram tomadas imagens de estrelas padrão Landolt (1992), geralmente três por noite. Estas estrelas são necessárias para calibrarmos as magnitudes de Chiron.

3.2) Redução

Dividiremos o processo de redução fotométrica em três passos, a saber: correção dos efeitos sistemáticos, obtenção da magnitude instrumental e cálculo da magnitude observada. Para os dois primeiros passos foram utilizadas as rotinas do IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*),

enquanto rotinas próprias foram desenvolvidas para o cálculo das magnitudes observadas. A seguir descreveremos sucintamente cada um destes passos.

UT	r(AU)	Δ (AU)	α ($^{\circ}$)	Telescópio
12/02/97	8.555	8.148	6.16	0.6m OPD
13/02/97	8.556	8.133	6.11	0.6m OPD
12/05/97	8.611	7.679	2.75	0.6m OPD
13/05/97	8.612	7.687	2.85	0.6m OPD
14/05/97	8.613	7.694	2.96	0.6m OPD
11/06/97	8.633	8.001	5.48	0.6m OPD
20/04/98	8.928	7.963	1.90	0.6m OPD
21/04/98	8.929	7.960	1.80	0.6m OPD
21/05/98	8.963	7.984	1.70	0.6m OPD
01/07/98	9.012	8.411	5.40	0.6m OPD
07/05/99	9.435	8.463	1.70	0.6m OPD
14/05/99	9.446	8.447	1.00	1.54m EABA
16/07/99	9.542	8.928	5.08	0.6m OPD
17/07/99	9.544	8.944	5.10	0.6m OPD
18/07/99	9.445	8.959	5.10	0.6m OPD
04/05/00	10.025	9.162	3.10	2.15m CASLEO
03/06/00	10.075	9.066	0.56	1.54m EABA
06/06/00	10.079	9.068	0.60	0.6m OPD
07/06/00	10.084	9.074	0.66	0.6m OPD
08/07/00	10.138	9.285	3.26	0.6m OPD
09/07/00	10.140	9.296	3.34	0.6m OPD
27/08/00	10.227	10.052	5.60	2.15m CASLEO
01/09/00	10.236	10.143	5.70	1.54m EABA
02/09/00	10.238	10.161	5.70	1.54m EABA
23/04/01	10.663	10.068	4.50	2.15m CASLEO
24/04/01	10.665	10.057	4.50	2.15m CASLEO
23/08/01	10.891	10.460	4.90	1.54m EABA

Tabela 2 - A geometria de Chiron nas observações e o telescópio utilizado em cada noite.

3.2.1) Correção dos efeitos sistemáticos

Para identificarmos o fluxo do objeto, ou seja, a energia por frequência por área e por tempo, devemos remover alguns efeitos que corrompem o brilho intrínseco do objeto. Os principais efeitos a serem corrigidos são *bias* e *flat-field*, sendo que em alguns CCDs existe uma corrente de fundo (corrente de escuro) que se torna relevante em grandes exposições e precisa ser removida. Para os CCDs utilizados tal corrente é desprezível, de forma que não fizemos essa correção nas nossas imagens.

Bias é um efeito que consiste num excesso de contagens devido ao ruído térmico do CCD. Ou seja, é um efeito que acrescenta às imagens um sinal não proveniente do objeto a ser estudado. Podemos definir contagens como números binários que correspondem à quantidade de elétrons liberados por dispositivos eletrônicos constituintes do CCD devido à ação dos fótons, de forma que cada pixel de uma imagem possui determinada contagem. Para remover o *bias* fazemos algumas exposições de 1 segundo utilizando o filtro *dark*. Posteriormente fazemos uma média destas imagens, a qual é subtraída de todas as imagens dos objetos. Para realizar esta correção utilizamos as tarefas ZEROCOMBINE e CCDPROC, que são rotinas do pacote CCDRED.

Flat-field é um efeito multiplicativo. Cada pixel do CCD responde com uma determinada eficiência ao estímulo eletrônico. Este fato fica evidenciado quando tomamos imagens de uma região uniformemente iluminada, como uma cúpula (*dome flat*) ou o céu no alvorecer e/ou no crepúsculo (*sky flat*). Se todos os pixels respondessem da mesma forma teríamos a mesma contagem para todos os pixels do CCD, mas isto não ocorre. Para corrigirmos este efeito fazemos, a partir de várias imagens *flats*, uma imagem média normalizada. Em seguida, realizamos a divisão das imagens dos objetos pela de *flat* média. As rotinas utilizadas são FLATCOMBINE e CCDPROC, ambas do pacote CCDRED.

3.2.2) *Magnitude instrumental*

Após a remoção dos efeitos sistemáticos temos nas imagens o brilho dos objetos e uma contribuição devido ao céu. A magnitude instrumental consiste numa soma de contagens de uma determinada região, que no nosso caso é circular, subtraída do valor do céu e ponderada pelo tempo de exposição. Para calcularmos as magnitudes instrumentais utilizamos a tarefa PHOT, do pacote APPHOT, do IRAF. Este processo pode ser resumido basicamente na determinação do raio do círculo que vai compreender o objeto e dois raios (maiores que o raio do objeto) que serão o raio interno e externo de um anel. Este anel servirá para definir o nível de contagens do céu a ser subtraído do objeto. Vide a Figura 5, onde o círculo cheio representa o objeto a ser medido, “ r_1 ”, “ r_2 ” e “ r_3 ” representam o raio da abertura que contém todo o objeto, o raio interno do anel (*annulus*) e o raio externo do anel (*dannulus*). O programa realiza a medida do total de contagens no interior da abertura do objeto e subtrai deste total a contribuição devida ao céu, obtendo-se desta forma a magnitude instrumental do objeto.

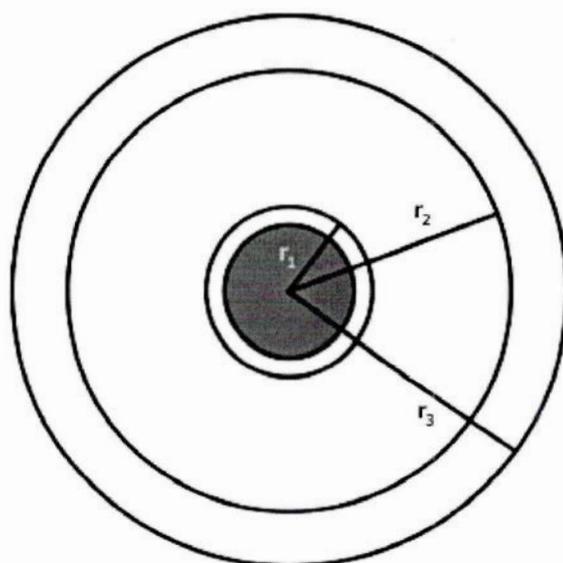


Figura 5 - Esquema ilustrando como foi realizada a fotometria de Chiron. O círculo cheio representaria Chiron. As contagens de Chiron seriam realizadas no círculo de raio r_1 , enquanto as contagens referentes ao céu seriam realizadas no anel compreendido internamente por r_2 e externamente por r_3 .

3.2.3) Magnitude observada

Magnitude observada pode ser definida como a magnitude que um observador obteria se estivesse fora da atmosfera terrestre, livre da extinção atmosférica, padronizada a um sistema de magnitudes. A extinção atmosférica consiste na redução do fluxo radiativo devido à interação da radiação com o ar, ou seja, absorção e espalhamento. Este efeito de atenuação pode ser descrito, em primeira aproximação, pela relação a seguir (Hardie, 1962):

$$mag_{inst} = mag_{atm} + k \cdot m_{ar}$$

onde, mag_{inst} é a magnitude instrumental, mag_{atm} é a magnitude que obteríamos se estivéssemos livres da atmosfera terrestre, k é o coeficiente de extinção em determinado filtro (no nosso caso utilizamos o filtro R) e m_{ar} é a massa de ar. A massa de ar é a quantidade de ar ao longo da linha de visada definida como unitária no zênite.

A massa de ar pode ser calculada através da secante da distância zenital (Hardie, 1962):

$$secz = (\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cosh)^{-1}$$

onde z é a distância zenital, ϕ é a latitude do observador, δ é a declinação do objeto e h é o ângulo horário. Geralmente a massa de ar já vem nos cabeçalhos das imagens pois é calculada diretamente pelo sistema de aquisição do telescópio. O coeficiente de extinção pode ser obtido através de um

ajuste linear dos pontos do gráfico das magnitudes instrumentais *versus* massa de ar, já que a extinção possui um comportamento linear em primeira aproximação. O coeficiente angular desta reta é o coeficiente de extinção. Veja a Figura 6, onde utilizamos o Microsoft Excel 2000 para realizar o ajuste linear das magnitudes instrumentais de 27/08/00.

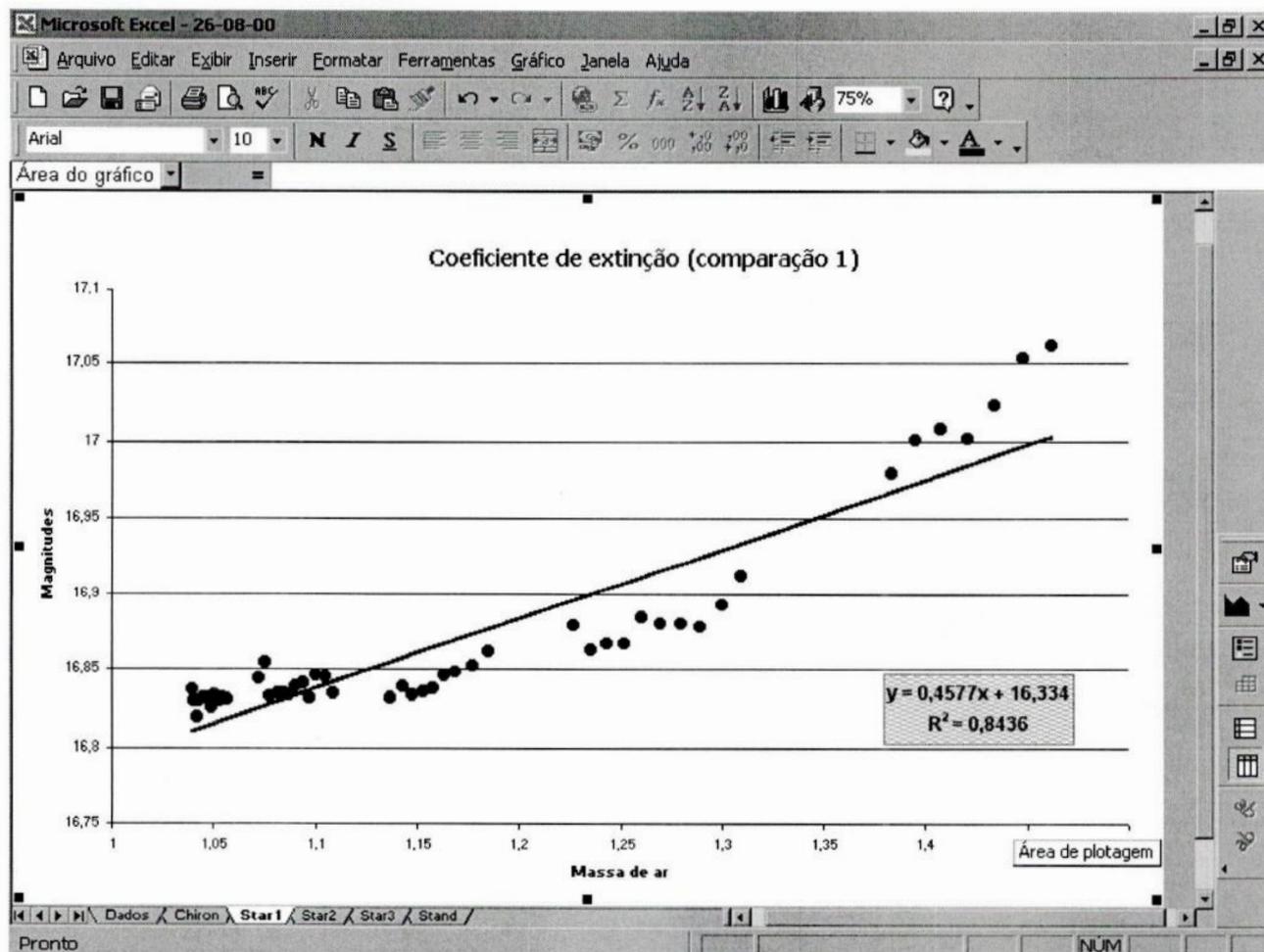


Figura 6 - Ajuste linear das magnitudes instrumentais de 27/08/00.

Por último, efetuamos a padronização das nossas magnitudes. Isto é feito calculando-se o valor da diferença entre magnitudes das estrelas-padrão obtidas através da nossa análise e as suas magnitudes tabeladas, o que é denominado ponto zero da noite (*PZ*):

$$PZ = mag_{atm} - mag_{tabelada}$$

Subtraindo *PZ* das magnitudes, mag_{atm} , dos nossos objetos chegamos à magnitude observada:

$$mag_{obs} = mag_{atm} - PZ$$

3.3) Cálculo das magnitudes reduzida e absoluta

Magnitude reduzida é definida como a magnitude que o objeto teria se ele estivesse a uma distância de 1 UA do Sol e da Terra.

$$mag_{red} = mag_{obs} - 5\log(r\Delta)$$

onde r é a distância do objeto (Chiron) ao Sol e Δ é a distância do objeto à Terra. Na Figura 7 ilustramos estas quantidades. Para podermos comparar os nossos resultados com os presentes na literatura, transformamos as magnitudes calculadas no filtro R em magnitudes no filtro V. Para isso utilizamos o índice de cor de Chiron obtido em Hartmann *et al.* (1990):

$$m_V - m_R = 0,38 \pm 0,04$$

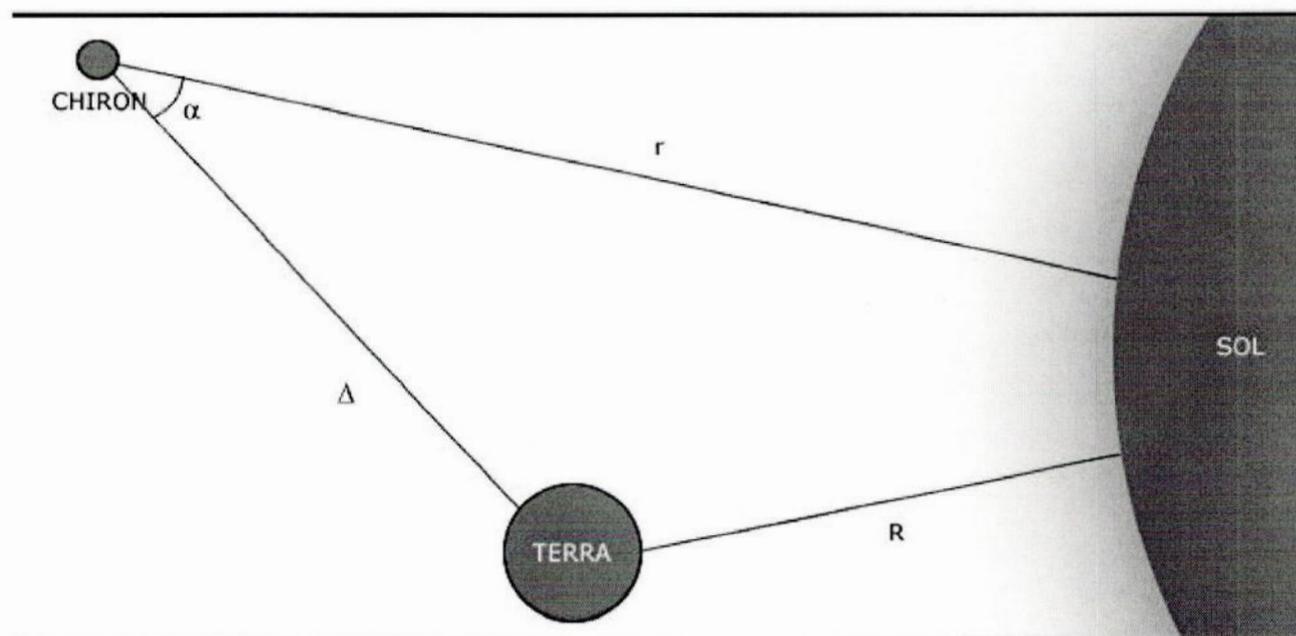


Figura 7 – Elementos geométricos de Chiron

A magnitude absoluta é a magnitude reduzida quando o ângulo de fase (α), ou seja, ângulo entre a Terra, o asteroide e o Sol (vide Figura 7), é nulo. A magnitude absoluta é definida pelo sistema de magnitudes H-G, adotado pela comissão da IAU (*International Astronomical Union*) em 1985, sendo válida somente para objetos sem atmosfera. Para determinada fase α diferente de zero, a magnitude absoluta é expressa (Bowell *et al.*, 1989) da seguinte forma:

$$H(\alpha) = H - 2,5\log[(1-G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)]$$

onde H é a magnitude absoluta num ângulo de fase nulo e G é o *slope parameter*, que representa as propriedades de reflexão da superfície do corpo.

Os parâmetros H e G são obtidos através das relações abaixo:

$$10^{-0,4}mag_{red}(\alpha) = a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha)$$

$$H = -2,5\log(a_1 + a_2)$$

$$G = \frac{a_1}{a_1 + a_2}$$

onde $mag_{red}(\alpha)$ é a magnitude reduzida para diferentes ângulos de fase, a_1 e a_2 são constantes auxiliares para um dado asteroide. Adotamos para Chiron o valor de $0,70 \pm 0,15$ para G . Este valor é o mais utilizado na literatura e foi determinado por Bus *et al.* (1989). As funções Φ são calculadas a partir das seguintes relações:

$$\Phi_i = W\Phi_{is} + (1-W)\Phi_{il}$$

$$W = \exp(-90,56 \tan^2 \frac{1}{2}\alpha)$$

$$\Phi_{is} = -\frac{C_i \sin \alpha}{0,119 + 1,341 \sin \alpha - 0,754 \sin^2 \alpha}$$

$$\Phi_{il} = \exp[-A_i (\tan \frac{1}{2}\alpha) B_i]$$

$$A_1 = 3,33$$

$$A_2 = 1,862$$

$$B_1 = 0,631$$

$$B_2 = 1,218$$

onde $i = 1, 2$. Vale ressaltar que o sistema de magnitudes H-G foi desenvolvido para corpos sem atmosfera e, por isso, não é apropriado para Chiron visto que este apresenta um comportamento

cometário. Este ponto já foi discutido em Lazzaro *et al.* (1997), e neste trabalho continuaremos a utilizar estas magnitudes apenas com o intuito de comparar nossos resultados com os de outros autores.

3.4) Análise

Na Tabela 3 apresentamos para cada noite a magnitude observada média, a magnitude reduzida e a magnitude absoluta. Com base nesta tabela construímos a Figura 8, que mostra a nossa contribuição na extensão da curva de luz secular de Chiron. É importante notar que não se tem o monitoramento do brilho de Chiron ao longo de uma órbita completa.

UT	$\langle \text{mag}_{\text{obs}} \rangle$	Erro	$\text{mag}_{\text{red}}(\text{V})$	H_V	Erro
1997,202381	15,950	0,037	7,114	6,889	0,08
1997,205357	15,894	0,017	7,061	6,838	0,08
1997,448925	15,836	0,019	7,114	6,974	0,08
1997,451613	15,854	0,027	7,130	6,986	0,08
1997,454301	15,776	0,019	7,049	6,903	0,08
1997,530556	15,886	0,014	7,069	6,858	0,08
1998,388889	15,972	0,014	7,093	6,986	0,08
1998,391667	16,194	0,020	7,315	7,213	0,08
1998,473118	16,156	0,018	7,263	7,164	0,08
1998,586022	16,409	0,016	7,391	7,181	0,08
1999,435484	16,497	0,015	7,366	7,268	0,08
1999,454301	16,099	0,015	6,969	6,906	0,08
1999,626344	16,750	0,020	7,478	7,275	0,08
1999,629032	16,486	0,019	7,210	7,006	0,08
1999,631720	16,671	0,020	7,391	7,187	0,08
2000,427419	16,388	0,016	6,954	6,802	0,08
2000,505556	15,668	0,014	6,246	6,208	0,08
2000,511111	15,992	0,015	6,566	6,522	0,08
2000,519444	16,068	0,025	6,645	6,605	0,08
2000,604839	16,397	0,015	6,910	6,754	0,08
2000,607527	16,340	0,015	6,848	6,689	0,08
2000,741667	16,800	0,013	7,122	6,908	0,08
2000,752688	16,410	0,014	6,710	6,495	0,08
2000,755376	16,230	0,015	6,526	6,310	0,08
2001,397222	16,113	0,014	6,341	6,151	0,08
2001,400000	15,742	0,015	5,972	5,782	0,08
2001,730556	16,230	0,016	6,328	6,129	0,08

Tabela 3 – Magnitudes calculadas para cada noite.

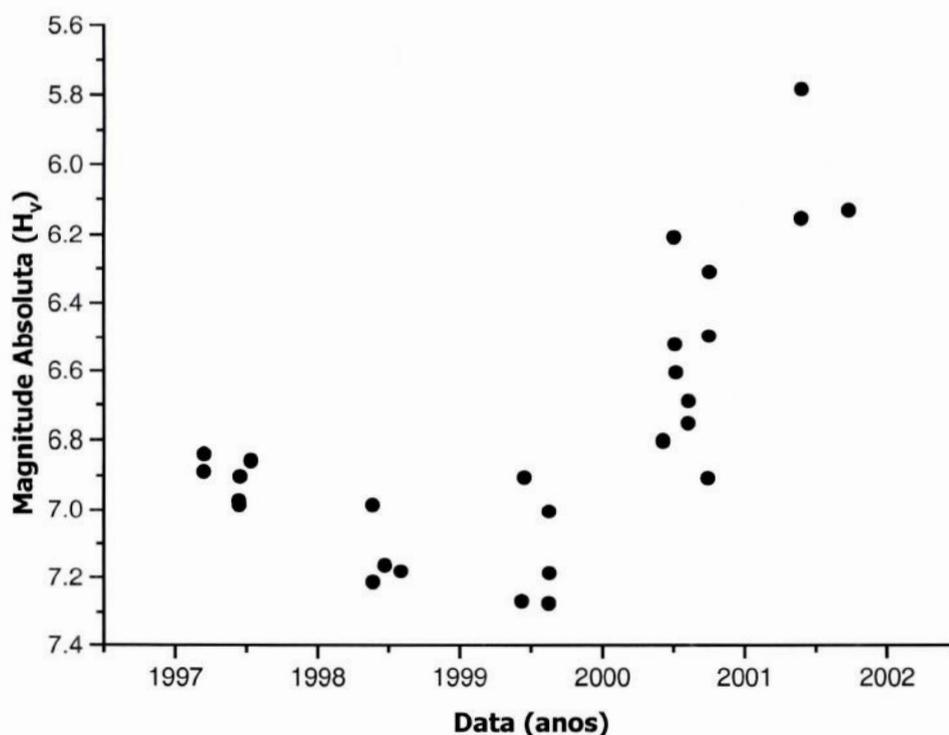


Figura 8 – Magnitudes absolutas obtidas no presente trabalho

Considerando a Figura 8, vemos que o brilho de Chiron decresceu continuamente de 1997 até 1999 atingindo um valor mínimo de $H_V = 7,275$ ($mag_{red}(V) = 7,478$), em Junho de 1999. Desde então o brilho voltou a crescer e atingiu o valor máximo de $H_V = 5,782$ ($mag_{red}(V) = 5,972$) dois anos mais tarde. Levando em conta o aumento de brilho de Chiron e o máximo de atividade ocorrido em 1987 podemos afirmar que Chiron está entrando num período de máxima atividade e que este período poderia estender-se até 2003, supondo que a atividade de Chiron é periódica.

3.5) Atividade de Chiron

Em vista dos resultados obtidos foram analisadas algumas hipóteses sobre os possíveis mecanismos responsáveis pela atividade esporádica de Chiron, as quais são descritas a seguir.

3.5.1) Forças de maré

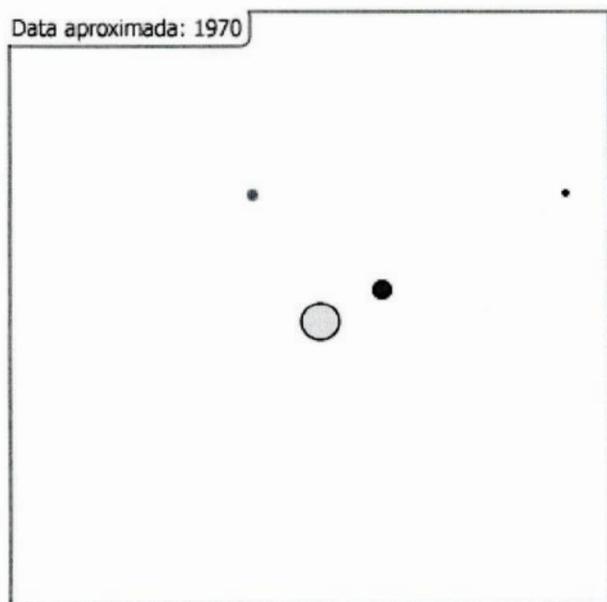
A idéia central desta hipótese é que a crosta que cobriria a superfície de Chiron seria fragmentada em alguns pontos devido à atração gravitacional de Júpiter. Esta quebra ocorreria portanto quando ocorresse o alinhamento Sol – Júpiter – Chiron. Os gases e gelos confinados abaixo desta crosta seriam então liberados juntamente com a poeira. Esta ejeção de gases e poeira

tornaria a coma mais proeminente o que representaria uma maior área para reflexão de luz solar, ou seja, um aumento de brilho. Analisemos a Figura 9(A) onde mostramos a disposição geométrica do Sol, de Júpiter, de Saturno e de Chiron. Os objetos não estão em escala e desconsideramos as inclinações das suas órbitas por serem pequenas. Nesta figura vemos que Júpiter e Chiron estão alinhados com o Sol, estando estes do mesmo lado do Sol. Esta configuração ocorreu por volta de 1970. Observando a Figura 1 (curva de luz secular de Chiron) vemos que nesta época Chiron estava num período de atividade cometária.

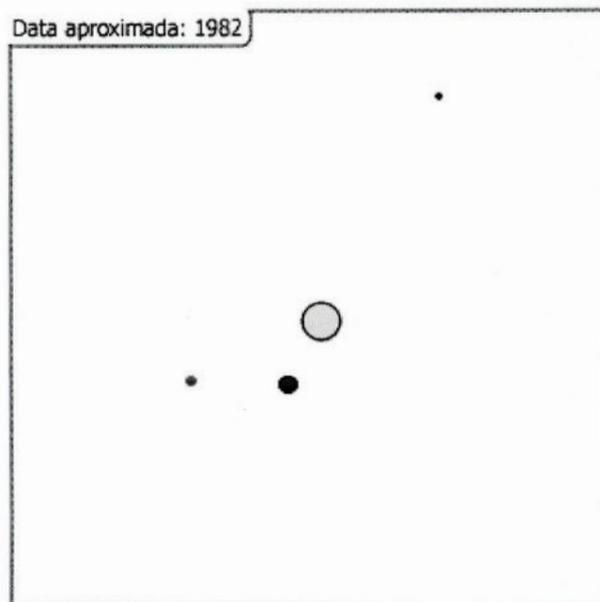
Observe agora a Figura 9(B). Nesta, Júpiter e Chiron estão alinhados com o Sol, mas desta vez cada um está em um lado: Chiron está em conjunção em relação a Júpiter. A data desta configuração é 1982-1983, quando Chiron estava num período de mínima atividade.

Em 1989 sabemos que ocorreu o histórico aumento de brilho de Chiron, que foi o clímax do período de atividade cometária iniciada em 1986. Segundo o raciocínio proposto, nesta última data Chiron e Júpiter deveriam estar alinhados com o Sol obedecendo à seqüência Sol – Júpiter – Chiron. Esta hipótese se confirma ao observarmos a Figura 9(C).

Entretanto, como visto na seção anterior, Chiron está agora iniciando mais um período de máxima atividade, e isto deveria coincidir, conforme nossa hipótese, com a configuração das Figuras 9(A) e 9(C). Analisando a Figura 9(D) fica nítido que isto não ocorreu. Este fato nos faz, portanto, descartar a hipótese da atividade cometária estar relacionada com forças de maré provocadas por Júpiter.



(A)



(B)

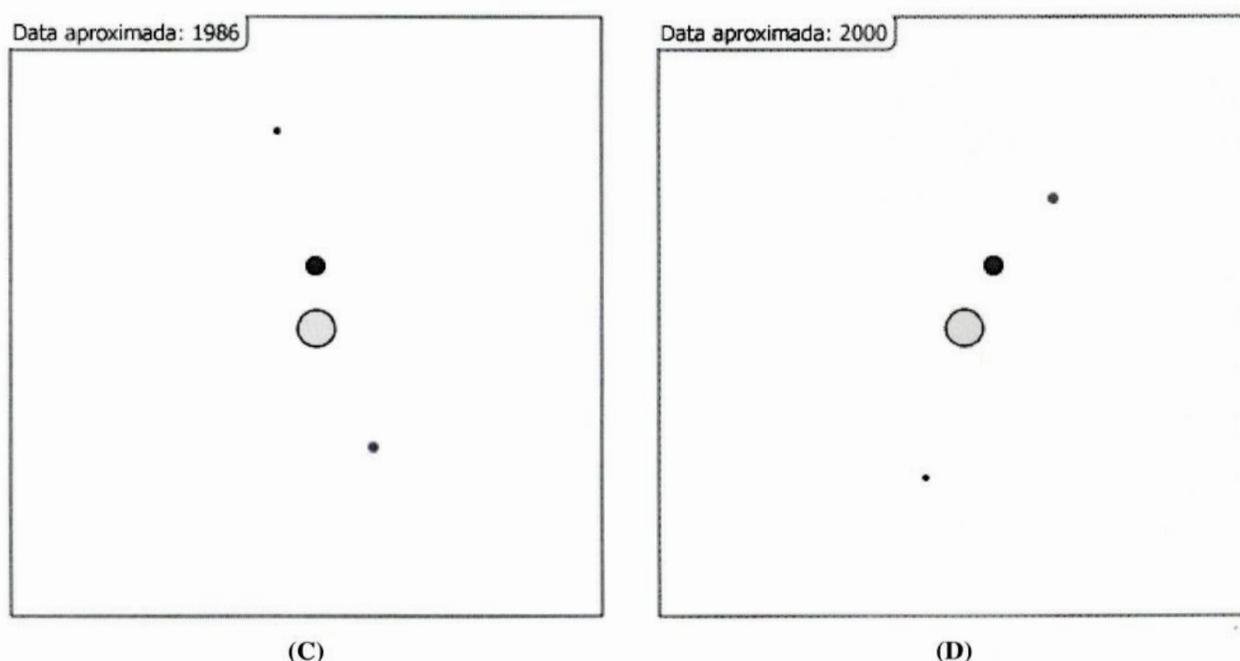


Figura 9 – Disposição geométrica de Chiron, Saturno e Júpiter para várias datas. Os círculos, em ordem decrescente de tamanho, representam o Sol, Júpiter, Saturno e Chiron.

3.5.2) Atividade Solar

Se observarmos a curva de luz secular de Chiron (Figura 1) notaremos que o intervalo de tempo entre os máximos é aproximadamente de 12 anos. Este valor é muito próximo ao do ciclo de atividade solar, que é de 11 anos. Fundamentados nesta similaridade decidimos procurar se existe alguma correlação entre o ciclo solar, que é baseado no número de manchas solares, e a curva de luz secular de Chiron.

Na Figura 10 confrontamos a evolução temporal da magnitude reduzida de Chiron e a evolução temporal do número de manchas solares. Nossa expectativa é que um máximo de atividade solar desse origem ao início de um período de máxima atividade de Chiron, semelhante a hipótese das forças de maré. Esta idéia é razoavelmente aceitável considerando os máximos de atividade solar em 1970 e em 1982 e o início de máxima atividade de Chiron ocorrido em 1967 (esta é uma data aproximada quando considerada a existência de periodicidade na sua curva de luz secular) e em 1984. No entanto esta hipótese mostrou-se falha observando que os picos de atividade de Chiron e do Sol coincidiram em 1990 e que o período de máxima atividade de Chiron iniciado em 2000 não coincide com um máximo de atividade solar, que só ocorreu em 2002 (?).

Vimos que as hipóteses das forças de maré e da atividade solar, que por serem eventos periódicos provocariam uma atividade cometária periódica, são insustentáveis. Existiria de fato alguma periodicidade na curva de luz secular de Chiron? Com este questionamento em mente decidimos realizar uma análise espectral da curva de luz secular de Chiron para verificarmos se nela

havia alguma periodicidade. Através deste tratamento descobrimos que não é possível ajustar qualquer período à curva de luz secular de Chiron, ou seja, a curva de luz secular de Chiron *não é periódica*.

A análise espectral mencionada consiste basicamente na procura de periodicidade num conjunto de dados através de séries de Fourier. No nosso caso, os dados são as magnitudes da curva de luz secular de Chiron e as suas respectivas datas. Foi utilizado um código escrito na linguagem Fortran, o qual exigia como input, além das magnitudes e datas, a faixa de períodos a serem testados

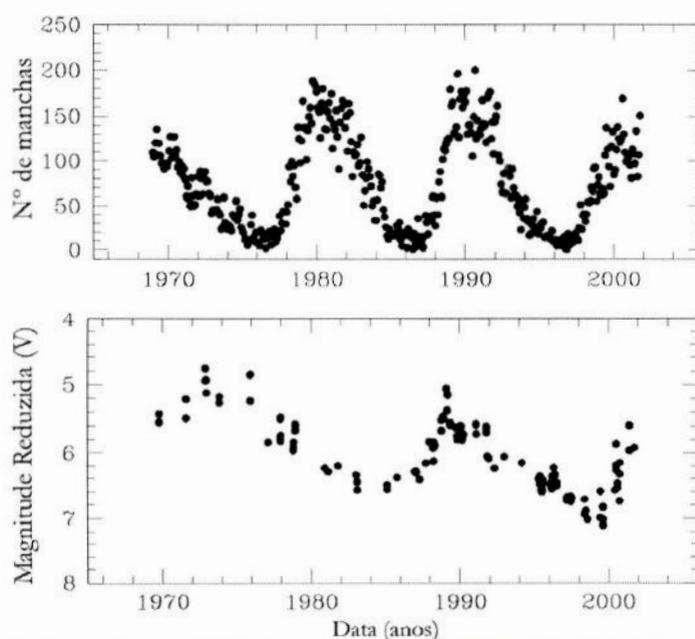


Figura 10 – Comparação entre o ciclo de atividade solar e a curva de luz secular de Chiron

e o passo, um valor constante cujos múltiplos inteiros e positivos servem como acréscimo ao menor período da faixa proposta até chegar ao período máximo, que está no final da faixa. Como exemplo, utilizemos a faixa de períodos entre 05 e 30 anos com o passo de 0,1 anos. Após rodarmos o programa obtivemos um arquivo texto cujo conteúdo serviu para a construção da figura 11. Neste gráfico o eixo das abscissas contém os períodos e o eixo das ordenadas contém valores que representam o quão compatível determinado período é com a curva de luz secular de Chiron, que é medido pelo coeficiente de correlação espectral. Quando a ordenada é nula a incompatibilidade é plena, quando a ordenada é unitária a compatibilidade é total. Observe que temos um máximo entre 13 e 16 anos.

O que se espera após uma análise como esta é que se existe alguma periodicidade no conjunto de dados o gráfico deve possuir um pico bem destacado com os valores em ambos os lados do pico tendendo a zero (compare os valores à esquerda do pico com os da direita). Isto não é observado para Chiron. Com base neste fato concluímos que a curva de luz secular de Chiron, ou em outras palavras a atividade cometária secular de Chiron, não é periódica.

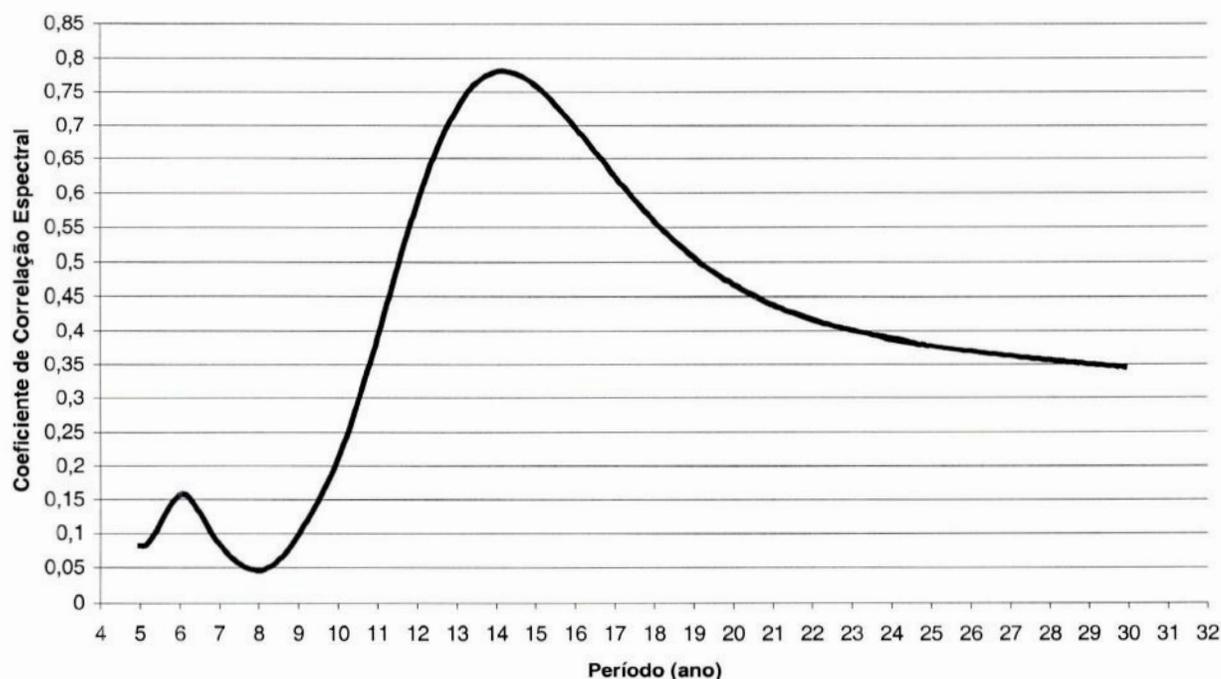


Figura 11 – Análise espectral da curva de luz de Chiron. Os períodos selecionados estão entre 05 e 30 anos, e o passo é de 0,1 anos.

3.5.3) *Micro-meteoros*

No caminho percorrido por Chiron devem existir micro-meteoros que se chocariam com sua superfície. A crosta superficial seria fragmentada permitindo que os gases confinados abaixo desta e o gelo, que seria volatilizado devido à exposição à radiação solar, juntamente com a poeira, tornassem a coma de Chiron mais acentuada. Infelizmente a única forma de verificar a existência destes micro-meteoros seria com medições *in situ*.

É válido ressaltar que os choques entre Chiron e os micro-meteoros provocaria aumentos de brilhos aleatórios, compatíveis com a análise espectral da curva de luz secular de Chiron.

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas futuras

Após um esboço histórico do estudo dos cometas, da apresentação das descobertas e características mais relevantes do cometa Chiron, das descrições técnicas e teóricas do tratamento de imagens e obtenção de magnitudes, e culminando na análise dos dados fotométricos de Chiron e hipóteses sobre sua atividade, gostaríamos de resumir aqui as conclusões do presente trabalho:

- Chiron em 2001 encontrava-se num período de máxima atividade, após um período de baixa atividade entre 1997 e 1999 e um aumento considerável do seu brilho a partir de 2000;
- A magnitude reduzida de Chiron, no filtro V, no período de 1997 à 2001, variou de um máximo de 7,48 em junho de 1999 a um mínimo de 5,97 em 2001;
- A aparente correlação entre o período de 11 anos da variação do número de manchas solares e a atividade de longo período de Chiron foi descartada. A análise espectral da curva de luz secular confirmou a inexistência de uma periodicidade;
- O fato da curva de luz secular de Chiron não ser periódica torna a sua atividade compatível com eventos aleatórios, tais como colisões de micro-meteoros.

Apesar de todo o esforço já realizado para entendermos a natureza de Chiron os dados disponíveis representam apenas uma parte da sua órbita. Ou seja, não temos dados que correspondam a um período completo de revolução de Chiron. Por isso o monitoramento contínuo deste objeto é vital para que possamos melhor compreendê-lo, e não somente este, mas também os outros Centauros e possivelmente os objetos do Cinturão de Kuiper, de onde provavelmente Chiron se originou.

Referências

- Alfvén, H. 1957, On the Theory of Comet Tails, *Tellus* 9, 192.
- Biermann, L. 1951, *Z. Astrophys.* **29**, p.274.
- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J. And Harris, A.W. 1989, Applications of photometric models to asteroids, in *Asteroid II* (R.P. Binzel, T. Gehrels and M.S. Matthews ed.), pp. 524-556. University of Arizona Press, Tucson.
- Bredichin, T. 1903, *Mechanische Untersuchungen über Cometenformen*, St. Petersburg.
- Buratti, B.J., and R.S. Dunbar 1991. Observation of a rapid decrease in the brightness of coma of 2060 Chiron in 1990 January. *Astrophys. J.* **366**, L47-49.
- Bus, S.J., Bowell, E., French, L.M. 1988, (2060) Chiron, *IAU Circular* **4684**.
- Bus, S.J., Bowell, E. Harris, A.W. and Hewitt, A.V. 1989, 2060 Chiron: CCD and electronographic photometry, *Icarus* **77**, 223-238.
- Bus, S.J., A'Hearn, M.F., Scheleicher, D.G. and Bowell, E. 1991, Detection of CN emission from (2060) Chiron, *Science* **251**, 774-777.
- Bus, S.J., M.F. A'Hearn, E. Bowell, and S. Stern 2001, (2060) Chiron: Evidence for activity near aphelion. *Icarus* **150**, 94-103
- Campins, H., Tedesco, C., Osip, D., Rieke, G., Rieke, M. and Schulz, B. 1994, The color temperature of 2060 Chiron: a warm and small nucleus. *BAAS* **26**, 1152.
- Duffard, R., Lazzaro, D., Pinto, S., Carvano, J., Angeli, C., Alvarez-Candal, A., Fernández, S. 2002, New Activity of Chiron: Results from 5 Years of Photometric Monitoring, *Icarus* **160**, Issue 1, 44-51.
- Edgeworth, K.E. 1949, *MNRAS* **109**, 600.
- Elliot, J.L. *et al* 1994, Occultation by (2060) Chiron, *IAU Circular* **5965**.
- Everhart, E. 1972, The Effect of the Ellipticity of Jupiter's Orbit on the Capture of Comets to Short-Period Orbits, *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*; Proceedings from IAU Symposium no. 45, held in Leningrad, U.S.S.R., August 4-11, 1970. Edited by Gleb Aleksandrovich Chebotarev, E. I. Kazimirchak-Polonskaia, and B. G. Marsden. International Astronomical Union. Symposium no. 45, Dordrecht, Reidel, p.360
- Fernández, J.A. 1980, *MNRAS* **192**, 481.
- Hardie, R.H., Photoelectric Reductions 1962. In *Astronomical Techniques, VolIII: Stars and Stellar Systems*, Ed. W.A. Hiltner, 178-208.

- Hartmann, W.K., D.P. Cruikshank, and J. Degewij 1982. Remote comets and related bodies: VJHK colorimetry and surface behavior. *Icarus* **52**, 377-408.
- Hartmann, W.K., Tholen, D.J., Meech, K.J. and Cruikshank, D.P. 1990, 2060 Chiron, colorimetry and cometary behavior. *Icarus* **83**, 1-15.
- Havnes, O. 1970, The Effect of Repeated Close Approaches to Jupiter on Short-Period Comets, *Icarus*, **12**, p.331.
- Joss, P.C. 1973, On the Origin of Short-period Comets, *Astronomy and Astrophysics*, **25**, p. 271.
- Kowal, C.T. 1979, in *Asteroids* (T.Gehrels ed.), Univ. of Arizona Press, Tucson, p. 436.
- Kresák, L. and Pittich, E. M. 1978, The intrinsic number density of active long-period comets in the inner solar system, *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin*, **29**, no. 5, p. 299-309.
- Kuiper, G.P. 1951, in *Astrophysics: A Topical Symposium* (J.A. Hynek ed.), McGraw-Hill, N.Y., 357.
- Landolt, A.U. 1992, UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator. *Astron. J.* **104**, 340-371, 436-491.
- Lazzaro, D., M.A. Florczak, A. Betzler, O.C. Winter, S. Giuliatti-Winter, C.A. Angeli, and D.W. Foryta 1996. 2060 Chiron back to a minimum of brightness. *Planet. Space Sci.* **44**, 1547-1550.
- Lazzaro, D., Florczak, M.A., Angeli, C.A., Carvano, J.M., Betzler, A.S., Barucci, M.A., Doressoundiram, A. and Lazzarin, M. 1997, Photometric monitoring of 2060 Chiron's brightness at perihelion. *Planet. Space Sci.* **45** 1607-1614.
- Lebofsky, L.A., Tholen, D.J., Rieke, G.H. and Lebofsky, M. 1984, 2060 Chiron: visual and thermal infrared observations. *Icarus* **60**, 532-537.
- Luu, J.X. and Jewitt, D.C. 1990. Cometary activity in 2060 Chiron. *Astron. J.* **100**, 913-931.
- Luu, J.X. and Jewitt, D.C. 1993. Continued activity in Chiron. In *Workshop on the Activity of Distant Comets* (W.F. Huebner, H.U. Keller, D. Jewitt, J. Klinger, and R. West, Eds.), pp. 44-53. Southwest Research Inst., San Antonio.
- Luu, J.X., Jewitt, D.C., Trujillo, C. 2000, Water ice in 2060 Chiron and its implications for Centarus and Kuiper Belt Objects. *Astrophys. J.* **531**, L151-L154.
- Lyttleton, R. A. 1952, The origin of comets, *The Observatory*, Vol. **72**, p. 33-35.
- Marcialis, R.L., Hubbard, W.B., Hill, R., Bus, S.J., Elliot, J.L., Olkin, C., McDonald, S., Foust, J., Sopata, L., Bandyopadhyay, R., Maserole, R., Buie, M.W., Spencer, Young, J., Ford, C. And Herter, T. 1994, *BAAS* **26**, 1153.
- Meech, K.J. and Belton, M.J.S. 1990, The atmosphere of 2060 Chiron. *Astron. J.* **100**, 1323-1338.

- Oikawa, S. and Everhart, E. 1979, Past and future orbit of 1977 UB, object Chiron, *Astron. J.* **84**, 134-139.
- Oort, J.H. 1950, *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, **11**, 91.
- Prialnik, D., Brosch, N., and Ianovici, D. 1995, *MNRAS* **276**, 1148.
- Safronov, V. 1969, *Evolution of protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets*, (Moscow: Nauka Press).
- Scholl, H. 1979, History and evolution of Chiron's orbit. *Icarus* **40**, 345-349.
- Schwarzschild, K. 1901, *Sitz. Ber. Akad. München* **31**, 293.
- Stern, A. 1989, Implications of volatile release from object 2060 Chiron. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **101**, 126-132.
- Sykes, M. and Walker, R. 1991, Constraints on the diameter and albedo of 2060 Chiron. *Science* **251**, 777-780.
- Tholen, D., Hartmann, W.K. and Cruikshank, D.P. 1988, (2060) Chiron, *IAU Circular* **4554**.
- Vaghi, S. 1973, *Astronomy and Astrophysics*, **24**, p. 41.
- West, R. 1991. A photometric study of (2060) Chiron and its coma. *Astron. Astrophys.* **241**, 635-645.
- Whipple, F.L. 1950, *Astrophysical Journal*, **111**, 375.
- Womack, M. and Stern, S.A. 1995, Detection of carbon monoxide in (2060) Chiron, *BAAS* **27**, 1143.

Apêndice

Artigo: "New Activity of Chiron: Results from 5 Years of Photometric Monitoring"

New Activity of Chiron: Results from 5 Years of Photometric Monitoring¹

René Duffard, Daniela Lazzaro, Sandro Pinto, Jorge Carvano, and Claudia Angeli

Observatório Nacional, Coordenação de Astronomia e Astrofísica, 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil
E-mail: duffard@on.br

Alvaro Alvarez Candal

Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina

and

Silvia Fernández

Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de Córdoba, Laprida 854, 5000 Córdoba, Argentina

Received December 12, 2001; revised May 8, 2002

The results of photometric observations of Centaur object Chiron carried out at the Observatório do Pico dos Dias (OPD, Brazil), the Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA, Argentina), and Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, Argentina) from 1997 to 2001 are presented here. The analysis of the photometric data shows that the brightness of Chiron reached a minimum value in 1999 and began increasing again in 2000. The absolute magnitude, H_V , varied from 7.26 in June 1999 to 5.78 in April 2001. The data tend to indicate that Chiron is starting a new outburst of activity which is compatible with a sporadic cometary behavior not related to heliocentric distance. © 2002 Elsevier Science (USA)

Key Words: photometry; Centaurs; Kuiper Belt objects; comets.

1. INTRODUCTION

Chiron, discovered in 1979 (Kowal 1979), was initially considered the most distant asteroid, with an orbit between Saturn and Uranus. The analysis of JHK photometric data (Hartmann *et al.* 1982) indicated that Chiron was a low-albedo object composed of dark carbonaceous chondritic material and/or dirty ices matching the C-class asteroids. However, some changes in the intrinsic brightness were detected by Hewitt and Bowell in 1978 (related in Bus *et al.* 1989), and the sudden brightening of Chiron between 1988 and 1989 (Tholen *et al.* 1988, Bus *et al.* 1988, Hartmann *et al.* 1990) confirmed the cometary nature of this object.

¹ Observations carried out at the Observatório do Pico dos Dias, operated by the Laboratório Nacional de Astrofísica (Brazil), the Estación Astrofísica de Bosque Alegre (Argentina), and the Complejo Astronómico El Leoncito (Argentina) which is operated under agreement between the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina and the National Universities of La Plata, Córdoba, and San Juan, Argentina.

The presence of a coma around Chiron was first detected by Meech and Belton (1989) when it was at a heliocentric distance of 11.8 AU. Two kinds of brightness variations, long-term (months to years) and short-term (hours), were identified (Luu and Jewitt 1990, Buratti and Dunbar 1991). It was suggested (Marcialis and Buratti 1993) that the long-term variation could be caused by dissipation and resupply of material in the coma, while the short-term variation should be due to the release of volatiles such as CO₂ and CN. In any case, it was clear (Stern 1989; Meech and Belton, 1990, hereafter MB90) that outbursts at large heliocentric distances should be due to the sublimation of volatile ices, such as CO and CO₂, the former being more probable than the latter (Fanale and Salvail 1997). The presence of CN and CO was indeed detected by Bus *et al.* (1991) and Womack and Stern (1997), respectively.

Calculations (Scholl 1979, Oikawa and Everhart 1979) demonstrate that Chiron is not in a stable path due to its proximity to Saturn and Uranus. Due to its orbital characteristics—a semimajor axis of 13.612 AU, an eccentricity of 0.3806, and an orbital inclination of 6.937°—Chiron is known as a member of the Centaur group. These objects are believed to have originated in the Kuiper Belt evolving, due to planetary perturbations, to their present orbit (Hahn and Bailey 1990).

Chiron is also one of the largest known Centaurs. Using various techniques the diameter of Chiron has been estimated to be 173 km (Lebofsky *et al.* 1984), 372 km (Sykes and Walker 1991), and 182–189 km (Campins *et al.* 1994, Marcialis *et al.* 1994). This last value is currently the most accepted one.

The approach of Chiron to perihelion, which occurred in February 1996, increased interest in this Centaur object. Since its discovery, this was the first time that this object could be observed at its closest approach to the Sun. Therefore, it was the best chance to test whether its outgassing mechanism is

related to heliocentric distance. The observations, however, readily demonstrated that Chiron is indeed a very peculiar Centaur: as it approached perihelion, the brightness of Chiron was continuously diminishing (Bergeron and Vanouplines 1995, Lazzaro *et al.* 1996). Photometric and spectroscopic observations of Chiron, performed all along its passage through perihelion (Lazzaro *et al.* 1997), indicated that it was still in a minimum of activity, very close to that of 1983–1985 and 1994–1995. Therefore, the large increase in brightness occurred in the period 1988–1991 and was preceded and followed by periods of minimum activity, which tend to indicate quasi-periodic behavior (Lazzaro *et al.* 1996). The analysis of prediscovery photometric plates of Chiron indicated (Bus *et al.* 2001, hereafter B01) that another outburst of activity probably occurred around aphelion, in 1972–1973, which reinforces the idea of some kind of sporadic activity.

In order to obtain more information on the long-term evolution of Chiron's brightness, the photometric monitoring of this object was continued from 1997 to 2001. In this paper we present the data obtained from this monitoring. In Section 2 we present the photometric observations and the reduction techniques used, while the results and a discussion about them are given in Section 3.

2. OBSERVATIONS AND REDUCTION

The photometric observations reported here were carried out at the Observatório do Pico dos Dias (OPD, Brazil) on a 0.6-m telescope, at the Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA, Argentina) on a 1.54-m telescope, and at the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, Argentina) on a 2.15-m telescope. All observations were broadband R (Cousins) and were carried out using CCD cameras. In the OPD observations an EEV 385 × 586 CCD was used, with focal plane reducing optics giving a 7'.5 × 5'.5 field. A Tektronix 1024 × 1024 CCD camera with a 5'.7 × 5'.7 field was used in the EABA observations, and a similar camera with a 9' circular field was used in the CASLEO observations.

The data discussed in the present paper were obtained in several observing runs from 1997 up to 2001. The observational circumstances of Chiron for each night it was observed are listed in Table I, which shows the date, the heliocentric (r) and geocentric (Δ) distances, the solar phase angle (α), the observing site (OPD, EABA, CASLEO), and a quality factor of the night (Q).

The images were calibrated using standard methods with bias and dome flat-field images: a 2D bias template, obtained by averaging many 0-s exposures, was subtracted from each frame; then the sensitivity variations across the field of view were removed by dividing the frames by an averaged dome flat-field. The instrumental magnitudes were measured using aperture photometry with a PHOT task in an IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) Digiphot package. Only the images where Chiron was isolated from background stars were considered. Flux calibration was performed using standard stars from Landolt (1992).

TABLE I
Mean Observing Geometry of Chiron for Each Night

UT date	r (AU)	Δ (AU)	α (°)	Telescope	Q
1997/02/12	8.555	8.148	6.16	0.6 m OPD	3
1997/02/13	8.556	8.133	6.11	0.6 m OPD	3
1997/05/12	8.611	7.679	2.75	0.6 m OPD	2
1997/05/13	8.612	7.687	2.85	0.6 m OPD	3
1997/05/14	8.613	7.694	2.96	0.6 m OPD	3
1997/06/11	8.633	8.001	5.48	0.6 m OPD	3
1998/04/20	8.928	7.963	1.90	0.6 m OPD	3
1998/04/21	8.929	7.960	1.80	0.6 m OPD	3
1998/05/21	8.963	7.984	1.70	0.6 m OPD	3
1998/07/01	9.012	8.411	5.40	0.6 m OPD	3
1999/05/07	9.435	8.463	1.70	0.6 m OPD	3
1999/05/14	9.446	8.447	1.00	1.5 m EABA	2
1999/07/16	9.542	8.928	5.08	0.6 m OPD	3
1999/07/17	9.544	8.944	5.10	0.6 m OPD	3
1999/07/18	9.445	8.959	5.10	0.6 m OPD	2
2000/05/04	10.025	9.162	3.10	2.15 m CASLEO	3
2000/06/03	10.075	9.066	0.56	1.5 m EABA	3
2000/06/06	10.079	9.068	0.60	0.6 m OPD	3
2000/06/07	10.084	9.074	0.66	0.6 m OPD	3
2000/07/08	10.138	9.285	3.26	0.6 m OPD	3
2000/07/09	10.140	9.296	3.34	0.6 m OPD	3
2000/08/27	10.227	10.052	5.60	2.15 m CASLEO	3
2000/09/01	10.236	10.143	5.70	1.54 m EABA	3
2000/09/02	10.238	10.161	5.70	1.54 m EABA	3
2001/04/23	10.663	10.068	4.50	2.15 m CASLEO	3
2001/04/24	10.665	10.057	4.50	2.15 m CASLEO	2
2001/08/23	10.891	10.460	4.90	1.54 m EABA	3

Note. r and Δ are the heliocentric and geocentric distances, respectively, and α is the solar phase angle. The quality factor, Q , indicates if night was 3—photometric, or 2—with thin cirrus.

The images were corrected for extinction using photometry of field stars in the Chiron images and of Landolt stars, taken at different air masses. The photometric data from these observations are given in Table II where $Mag_{\text{obs}}(\alpha)$ is the observed magnitude. The errors shown in the magnitude values take into account the aperture error given by DAOPHOT and the quality of the night (through the extinction coefficient).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of our photometric monitoring are presented in Table III where for each night of observation we list the mean observed magnitude Mag_{obs} , the reduced magnitude $Mag_{\text{red}}(V)$, and the absolute magnitude H_V . Since during each night Chiron's heliocentric and geocentric distances did not vary, the reduced magnitudes were obtained from the mean of the observed magnitudes for each night through the relation $Mag_{\text{red}} = \langle Mag_{\text{obs}} \rangle - 5 \log(r\Delta)$, r and Δ being the heliocentric and geocentric distances, respectively, using a color index $(m_V - m_R) = 0.38 \pm 0.04$ (Hartmann *et al.* 1990).

The monitoring of Chiron's brightness during the period 1997–2001 showed that the overall brightness decreased steadily

TABLE II
Photometric Observations of Chiron

UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error	UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error	UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error
1997 02 12.187836	15.988	0.020	1998 07 02.077189	16.413	0.017	2000 06 07.236287	16.057	0.014
1997 02 12.211678	15.975	0.019	1998 07 02.083718	16.367	0.017	2000 06 07.240858	16.073	0.015
1997 02 12.258079	15.946	0.019	1998 07 02.086979	16.446	0.017	2000 07 07.962047	16.377	0.016
1997 02 12.261852	15.888	0.089	1999 05 07.134873	16.439	0.015	2000 07 08.010781	16.399	0.015
1997 02 13.191933	15.907	0.018	1999 05 07.143536	16.533	0.015	2000 07 08.059911	16.414	0.015
1997 02 13.197199	15.881	0.017	1999 05 07.271443	16.517	0.015	2000 07 08.166190	16.376	0.015
1997 02 13.232581	15.847	0.017	1999 05 14.272917	16.040	0.052	2000 07 08.173098	16.417	0.016
1997 02 13.258241	15.881	0.017	1999 05 14.274305	16.032	0.052	2000 07 08.933063	16.288	0.016
1997 02 13.262720	15.882	0.017	1999 05 14.276389	16.089	0.052	2000 07 09.027065	16.386	0.016
1997 02 13.276759	15.909	0.017	1999 05 14.287500	16.081	0.052	2000 07 09.033962	16.314	0.016
1997 02 13.281238	15.902	0.017	1999 05 14.289583	16.083	0.052	2000 07 09.095571	16.317	0.016
1997 02 13.291887	15.915	0.017	1999 05 14.290972	16.109	0.052	2000 08 28.000845	16.077	0.014
1997 02 13.296354	15.920	0.017	1999 05 14.301389	16.106	0.052	2000 08 28.023379	17.120	0.014
1997 02 13.309375	15.918	0.017	1999 05 14.302778	16.092	0.052	2000 08 28.025208	17.018	0.014
1997 02 13.314815	15.911	0.017	1999 05 14.304861	16.138	0.052	2000 08 28.027037	16.960	0.014
1997 02 13.319178	15.887	0.018	1999 05 14.318750	16.177	0.052	2000 09 01.994444	16.568	0.017
1997 02 13.323542	15.886	0.017	1999 05 14.320139	16.072	0.052	2000 09 01.997916	16.572	0.017
1997 02 13.327905	15.869	0.018	1999 05 14.322222	16.171	0.052	2000 09 02.002083	16.527	0.017
1997 05 12.003935	15.793	0.019	1999 07 16.976628	16.742	0.020	2000 09 02.012500	16.514	0.017
1997 05 12.078935	15.883	0.019	1999 07 16.979200	16.717	0.019	2000 09 02.018055	16.538	0.017
1997 05 12.124375	15.843	0.019	1999 07 16.990808	16.914	0.021	2000 09 02.022916	16.391	0.017
1997 05 12.128519	15.822	0.019	1999 07 16.993381	16.789	0.020	2000 09 02.027083	16.497	0.017
1997 05 12.959676	15.917	0.029	1999 07 17.936113	16.505	0.019	2000 09 02.033333	16.479	0.017
1997 05 13.024896	15.830	0.026	1999 07 17.948630	16.553	0.019	2000 09 02.038888	16.431	0.017
1997 05 13.028704	15.830	0.026	1999 07 17.951784	16.579	0.020	2000 09 02.044444	16.242	0.017
1997 05 13.032373	15.837	0.026	1999 07 17.965815	16.536	0.019	2000 09 02.049305	16.424	0.017
1997 05 13.921424	15.767	0.020	1999 07 17.968964	16.512	0.019	2000 09 02.054166	16.293	0.017
1997 05 13.926157	15.759	0.020	1999 07 17.984800	16.460	0.019	2000 09 02.059722	16.186	0.017
1997 05 13.974005	15.758	0.019	1999 07 17.998841	16.415	0.019	2000 09 02.065277	16.400	0.017
1997 05 13.977674	15.750	0.019	1999 07 18.001992	16.443	0.019	2000 09 02.070833	16.205	0.017
1997 05 13.992442	15.742	0.019	1999 07 18.013872	16.420	0.019	2000 09 02.955555	16.127	0.016
1997 05 13.996204	15.720	0.018	1999 07 18.033991	16.510	0.019	2000 09 02.959027	16.029	0.016
1997 05 14.040405	15.806	0.019	1999 07 18.037152	16.508	0.019	2000 09 02.970833	16.086	0.016
1997 05 14.044086	15.845	0.019	1999 07 18.048940	16.541	0.019	2000 09 02.975000	16.199	0.016
1997 05 14.062523	15.829	0.019	1999 07 18.052093	16.529	0.019	2000 09 02.979861	16.467	0.016
1997 06 10.967361	15.855	0.016	1999 07 18.105204	16.422	0.019	2000 09 02.984027	16.780	0.016
1997 06 10.976424	15.850	0.015	1999 07 18.118127	16.410	0.019	2000 09 02.988888	16.602	0.016
1997 06 10.982512	15.836	0.014	1999 07 18.131561	16.422	0.019	2000 09 02.999305	16.881	0.016
1997 06 10.989398	15.872	0.014	1999 07 19.951321	16.698	0.021	2000 09 03.005555	16.077	0.016
1997 06 11.021979	15.892	0.014	1999 07 19.972664	16.724	0.021	2000 09 03.010416	16.116	0.016
1997 06 11.031481	15.938	0.014	1999 07 19.975825	16.652	0.020	2000 09 03.014583	16.281	0.016
1997 06 11.059178	15.928	0.014	1999 07 20.000134	16.632	0.020	2000 09 03.025000	16.367	0.016
1997 06 11.067512	15.911	0.014	1999 07 20.003295	16.647	0.020	2000 09 03.029861	16.118	0.016
1998 04 20.043516	15.997	0.015				2000 09 03.034027	16.080	0.016
1998 04 20.082562	15.969	0.014	2000 05 04.020000	16.335	0.013	2000 09 03.038888	16.053	0.016
1998 04 20.127902	15.982	0.013	2000 05 04.024000	16.399	0.013	2000 09 03.043750	16.098	0.016
1998 04 20.137233	15.937	0.013	2000 05 04.028100	16.415	0.013	2000 09 03.047916	16.105	0.016
1998 04 21.065282	16.101	0.021	2000 05 04.032146	16.377	0.013	2000 09 03.052777	16.045	0.016
1998 04 21.171322	16.286	0.019	2000 05 04.036423	16.418	0.013	2000 09 03.059722	16.004	0.016
1998 05 21.951458	16.134	0.019	2000 06 03.054167	15.608	0.011	2001 04 23.364580	16.120	0.015
1998 05 21.955822	16.111	0.018	2000 06 03.059028	15.608	0.011	2001 04 23.365830	16.156	0.015
1998 05 21.990613	16.117	0.017	2000 06 03.064583	15.584	0.011	2001 04 23.370000	16.125	0.015
1998 05 22.005694	16.092	0.017	2000 06 03.094444	15.742	0.011	2001 04 23.370830	16.117	0.015
1998 05 22.056389	16.269	0.017	2000 06 03.110417	15.690	0.011	2001 04 23.374170	16.132	0.015
1998 07 01.973363	16.424	0.016	2000 06 03.183333	15.777	0.011	2001 04 23.375830	16.124	0.015
1998 07 01.977520	16.424	0.016	2000 06 07.020209	15.979	0.015	2001 04 23.379170	16.113	0.015
1998 07 01.980426	16.382	0.015	2000 06 06.024780	16.003	0.015	2001 04 23.380420	16.112	0.015
1998 07 01.986255	16.371	0.016	2000 06 06.087096	16.059	0.014	2001 04 23.384580	16.130	0.015
1998 07 02.073926	16.439	0.017	2000 06 07.091666	16.067	0.014	2001 04 23.385420	16.139	0.015
			2000 06 07.179538	16.100	0.014			

TABLE II—Continued

UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error	UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error	UT date	$Mag_{\text{obs}}(\alpha)$	Error
2001 04 23.388750	16.093	0.015	2001 04 24.364580	15.772	0.017	2001 08 23.987500	16.188	0.013
2001 04 23.390420	16.097	0.015	2001 04 24.365420	15.768	0.017	2001 08 23.989580	16.223	0.013
2001 04 23.400830	16.072	0.015	2001 04 24.368750	15.723	0.017	2001 08 23.990830	16.209	0.013
2001 04 23.402080	16.078	0.015	2001 04 24.370000	15.712	0.017	2001 08 24.072920	16.208	0.013
2001 04 23.404170	16.076	0.015	2001 04 24.373750	15.709	0.017	2001 08 24.075000	16.202	0.013
2001 04 24.341670	15.775	0.017	2001 04 24.375000	15.755	0.017	2001 08 24.077080	16.196	0.013
2001 04 24.342920	15.769	0.017	2001 04 24.382500	15.812	0.017	2001 08 24.080000	16.178	0.013
2001 04 24.346670	15.704	0.017	2001 04 24.384170	15.817	0.017	2001 08 24.082080	16.195	0.013
2001 04 24.347080	15.677	0.017	2001 08 23.975830	16.281	0.013	2001 08 24.084170	16.168	0.013
2001 04 24.351250	15.699	0.017	2001 08 23.977920	16.211	0.013	2001 08 24.086250	16.180	0.013
2001 04 24.352080	15.688	0.017	2001 08 23.980000	16.192	0.013	2001 08 24.088750	16.169	0.013
2001 04 24.355420	15.713	0.017	2001 08 23.981250	16.207	0.013	2001 08 24.090830	16.140	0.013
2001 04 24.357080	15.793	0.017	2001 08 23.983330	16.228	0.013			
2001 04 24.360420	15.735	0.017	2001 08 23.984580	16.243	0.013			
2001 04 24.361250	15.719	0.017	2001 08 23.986250	16.228	0.013			

Note. All in the R filter.

from 1997 up to 1999 attaining a minimum value, with $Mag_{\text{red}}(V) = 7.478$, in June of that year. After this point the brightness began to increase, reaching its maximum 2 years later, with $Mag_{\text{red}} = 5.972$. In Fig. 1 we plot the magnitude evolution during that period of time.

TABLE III

For Each Night of Observation, the Mean Observed Magnitude Mag_{obs} , the Reduced Magnitude Mag_{red} , and the Absolute Magnitude H_V Obtained with a Slope Parameter $G = 0.70$

UT date	$\langle Mag_{\text{obs}} \rangle$	$Mag_{\text{red}}(V)$	H_V	Error
1997.202381	15.950 ± 0.037	7.114	6.889	0.080
1997.205357	15.894 ± 0.017	7.061	6.838	0.080
1997.448925	15.836 ± 0.019	7.114	6.974	0.080
1997.451613	15.854 ± 0.027	7.130	6.986	0.080
1997.454301	15.776 ± 0.019	7.049	6.903	0.080
1997.530556	15.886 ± 0.014	7.069	6.858	0.080
1998.388889	15.972 ± 0.014	7.093	6.986	0.080
1998.391667	16.194 ± 0.020	7.315	7.213	0.080
1998.473118	16.156 ± 0.018	7.263	7.164	0.080
1998.586022	16.409 ± 0.016	7.391	7.181	0.080
1999.435484	16.497 ± 0.015	7.366	7.268	0.080
1999.454301	16.099 ± 0.015	6.969	6.906	0.080
1999.626344	16.750 ± 0.020	7.478	7.275	0.080
1999.629032	16.486 ± 0.019	7.210	7.006	0.080
1999.631720	16.671 ± 0.020	7.391	7.187	0.080
2000.427419	16.388 ± 0.016	6.954	6.802	0.080
2000.505556	15.668 ± 0.014	6.246	6.208	0.080
2000.511111	15.992 ± 0.015	6.566	6.522	0.080
2000.519444	16.068 ± 0.025	6.645	6.605	0.080
2000.604839	16.397 ± 0.015	6.910	6.754	0.080
2000.607527	16.340 ± 0.015	6.848	6.689	0.080
2000.741667	16.800 ± 0.013	7.122	6.908	0.080
2000.752688	16.410 ± 0.014	6.710	6.495	0.080
2000.755376	16.230 ± 0.015	6.526	6.310	0.080
2001.397222	16.113 ± 0.014	6.341	6.151	0.080
2001.400000	15.742 ± 0.015	5.972	5.782	0.080
2001.730556	16.230 ± 0.016	6.328	6.129	0.080

In order to compare our results with those published in the literature we transformed the reduced magnitude into absolute magnitude H_V . As already pointed out in Lazzaro *et al.* (1997), the use of the H-G system (Bowell *et al.* 1989) is not appropriate for Chiron because it is not an atmosphereless object. To obtain the absolute magnitude, we need to compute the slope parameter G which is characteristic of the surface of the body. However, the absolute magnitude is still used here in order to compare our results with those published by other authors (Bus *et al.* 1989, Lebofsky *et al.* 1984, Hartmann *et al.* 1981, Hartmann

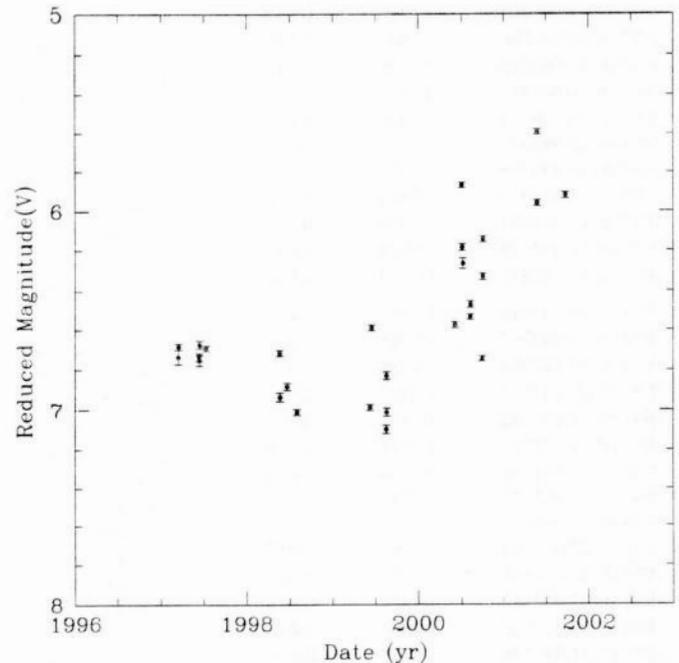


FIG. 1. Reduced V magnitudes of Chiron versus time obtained in the present work.

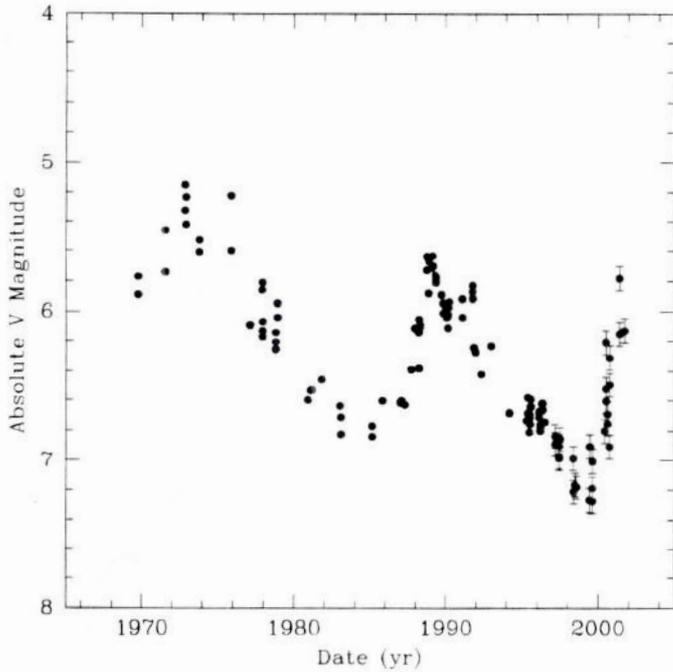


FIG. 2. Absolute V magnitudes of Chiron versus time obtained in the present work and from the literature.

et al. 1982, Marcialis and Buratti 1993, Hartmann *et al.* 1990, Luu and Jewitt 1990, Bus *et al.* 1988, Meech and Belton 1990, Buratti and Dunbar 1991, West 1991, Luu and Jewitt 1993, Lazzaro *et al.* 1996, Lazzaro *et al.* 1997, Davies *et al.* 1998) and is compiled in B01. The usual value of $G = 0.70 \pm 0.15$ for the slope parameter (Bus *et al.* 1989) was used.

The photometric behavior of Chiron since its discovery up to now is shown in Fig. 2. In Fig. 2 we plot the absolute V magnitudes of Chiron *versus* time and we readily see the start of a new outburst of Chiron in 2000–2001. In Fig. 3 the same photometric evolution is shown as a function of the perihelic distance of Chiron. In the case of most comets, this plot shows clearly an increase of activity as it approaches and recedes from perihelion. Figure 3 shows a completely different evolution for Chiron, even if an increase of brightness is apparent after perihelion. This plot also shows another important characteristic of Chiron's observations: we do not have them on a complete orbit yet. Therefore, more observations are needed in order to follow the behavior of this object as it approaches aphelion.

In view of these results the question that arises is: what drives the activity of Chiron? Is it completely sporadic due to some internal mechanism, or is there an external cause of the activity?

Two external mechanisms for the outburst can be envisioned: (a) solar activity and (b) microcollisions. Regarding the first point, a possible correlation of Chiron activity with solar activity as gauged by sunspot numbers was searched for and not found, as can be seen in Fig. 4.

It is important to note that Chiron is not the only object presenting activity at large heliocentric distances (Sekanina 1985,

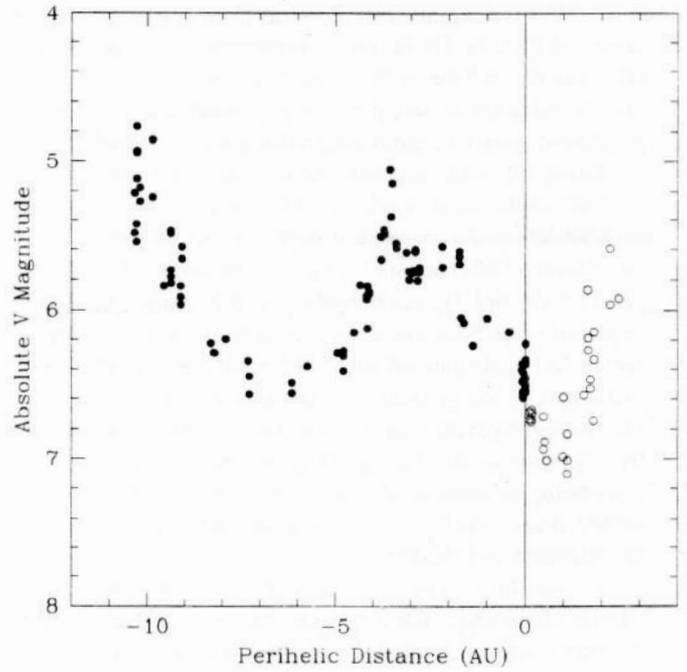


FIG. 3. Absolute V magnitudes of Chiron versus its perihelic distance. The empty and filled circles are from this work and from the literature, respectively.

Meech 1991). Sekanina (1985) speculated on possible mechanisms for these sporadic brightness variations and concluded that they may be associated with electrostatic levitation and blow-off of fine, charged dust, a mechanism earlier proposed by Mendis

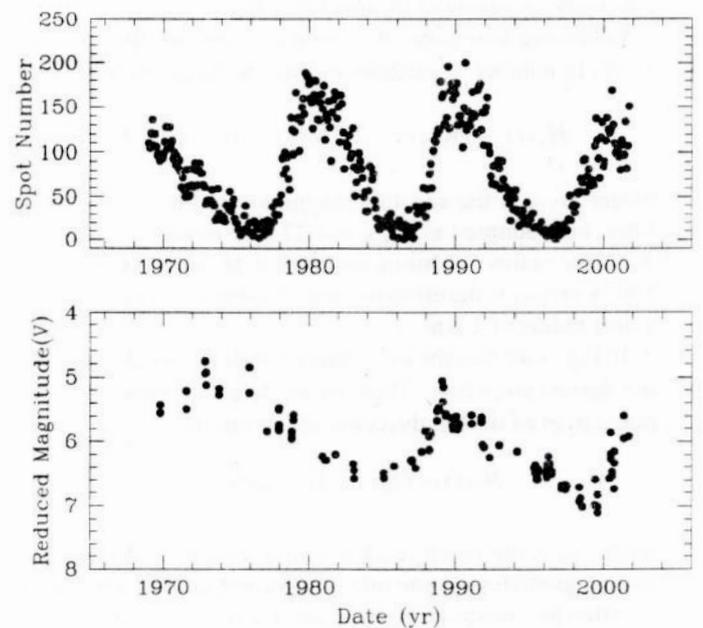


FIG. 4. The upper panel presents the spot numbers of the Sun while the reduced V magnitudes of Chiron are given in the bottom panel for the same period of time.

et al. (1981) to explain dust blow-off from comets at large heliocentric distances. The basis of this mechanism is the electrostatic charging of the bare cometary nucleus by the solar wind and solar UV radiation at large heliocentric distances, when there is no protective cometary atmosphere (Flammer *et al.* 1985).

During the solar maxima, there is an increment in the mean velocity of the solar wind, in the UV activity, and in the proton bombardment. As mentioned in the model proposed by Fanale and Salvail (1997), most of the ices more volatile than H_2O , such as CO , CO_2 , or CH_4 , are buried in a nearly isothermal condition, explaining the poor correlation of activity with perihelion distance. As Fanale and Salvail (1997) said, the outbursts cannot be explained by the gradual accumulation of the volatile material. One proposed explanation is that these events must be triggered by exposure to the Sun of areas where CO has accumulated after being in shadow for many years. A spin-axis close to the orbital plane could account for alternate long periods of solar illumination and shadow.

The second external mechanism could be microcollisions. Chiron could cross some regions where its surface is impacted by micrometeorites allowing the blow-off of the dust layer and the expulsion of volatiles from the interior. However, Durda and Stern (2000) concluded that the collisional histories of Centaurs are dominated by the time spent in the Edgeworth-Kuiper Belt rather than the time spent on planet-crossing orbits, so they found that the predominant activity on Chiron is not caused by impacts.

Another, and the most plausible option is an internal mechanism. The increase in brightness is due to a coma around Chiron produced by the flow of CO , CO_2 , or another element of similar volatility from an active region. We compared our results with those of the model proposed by MB90 using the equations of that work to model all the available data.

Following that paper we can transform absolute magnitude $H_V(t)$ in number of particles of dust in the coma $N_d(t)$ by

$$H_V(t) - H_{V,N} = -2.5 \log[1 + (a_d/R_N)^2 N_d(t)],$$

where $H_{V,N}$ is the absolute magnitude of the nucleus in the V filter, here adopted as $H_{V,N} = 7.27$ (the faintest measurement), R_N is the radius of Chiron, assumed to be 90 km (Campins *et al.* 1994), and a_d is the effective size of the dust particles, assuming a dust radius of $1 \mu m$.

In Fig. 5 we plot the total number of dust particles in the coma of Chiron versus time. Then, we modeled the growth of the total population of dust in the coma of Chiron by

$$N_d(t) = Q_d \cdot \tau_d \cdot [1 - \exp(-t/\tau_d)],$$

where τ_d is the mean residence time of a particle in the coma and Q_d particles/s is the rate of injection of dust into the coma.

After the injection of dust, the decay of the coma is modeled by

$$N_d(t) = N_{\max} \exp(-t/\tau_d),$$

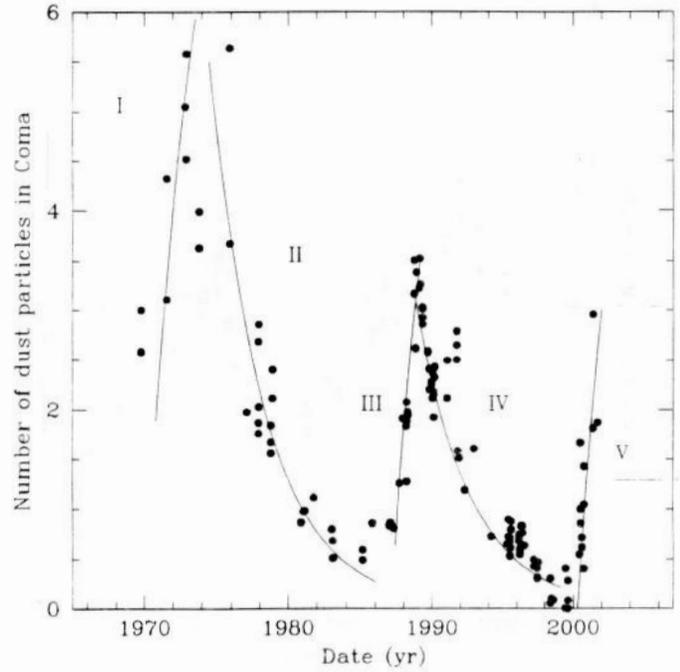


FIG. 5. Number of dust particles in the coma of Chiron versus time. The ordinate is in units of $(R_{\text{Chiron}}/a_d)^2 = 8.1 \times 10^{21}$ particles. Superimposed are plotted the fits to the model for each region as described in the text. The values of the fits are given in Table IV.

where N_{\max} is the maximum number of particles reached in the outbursts.

We divided Fig. 5 into five numbered regions and superimposed the best fit for each growth and decay for all the data. The free parameters are τ_d for regions II and IV and Q_d for regions I, III, and V, which are listed in Table IV for each region. In Table IV we give the values of Q_d for two grain sizes, $a_{d1} = 1 \mu m$ and $a_{d10} = 10 \mu m$. Special attention must be paid to region IV, which is plotted in Fig. 6, where a possible small outburst could have occurred in 1991 during the decay. (In Table IV we also give the parameters for this possible outburst.)

Our results indicate a longer lifetime of the particles in the coma than that found in the MB90 paper. This could be due

TABLE IV
Parameters in the Fit for Each Region

Region-Date	τ (days)	Q_d^* (part/day)	Q_{d1} (part/s)	Q_{d10} (part/s)
I(1971.0–1974.0)	1400	0.007	6.56×10^{14}	6.56×10^{12}
II(1974.5–1986.0)	1400	—	—	—
III(1987.3–1990.0)	1400	0.006	5.62×10^{14}	5.62×10^{12}
IV-1(1990.0–1992.0)	1400	—	—	—
IV-2(1992.0–1999.7)	1400	—	—	—
V(2000.0–2001.7)	1400	0.006	5.62×10^{14}	5.62×10^{12}

Note. Q_d given in $(R_{\text{Chiron}}/a_d)^2$ units. Q_{d1} for grain size = $1 \mu m$. Q_{d10} for grain size = $10 \mu m$.

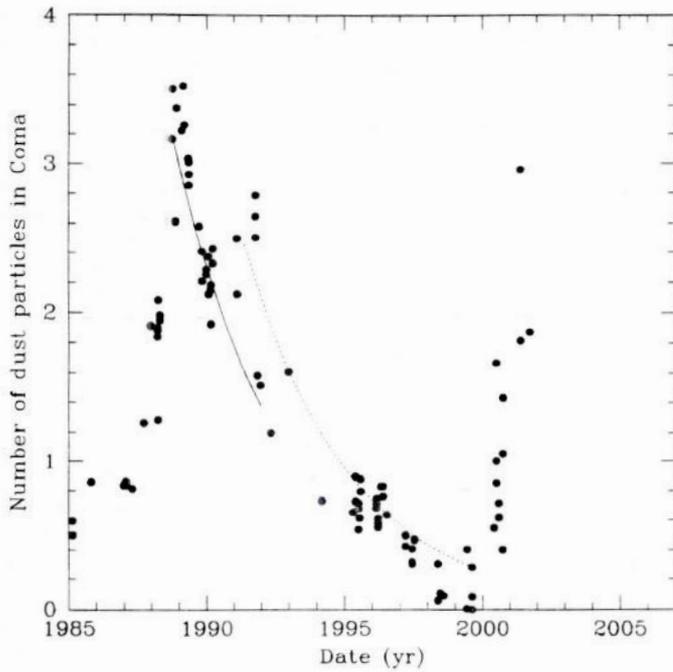


FIG. 6. Detail of Region IV. The ordinate is in units of $(R_{\text{Chiron}}/a_d)^2 = 8.1 \times 10^{21}$ particles. Both models have the same τ . Solid line starts in 1990 and ends in 1992. Dotted line starts in 1992 after the possible outburst and ends in 1999.

to the fact that the authors fitted their curves from 1978 up to 1990. The minimum of this outburst was later on, in 1999. They also identified an outburst in 1977. On the other hand, the Q_d particles/s found for all three, and possibly four, of the outbursts are compatible with that work.

Assuming a dust particle with a radius of $1 \mu\text{m}$ and a density of 1 g/cm^3 and using the same estimated mass-loss rate of 0.8 kg/s/km^2 for CO and a typical cometary dust-to-gas mass ratio of 0.7 as in MB90, we calculated for regions I, III, and V the size of the active area as 3 km^2 , 3 km^2 , and 3.4 km^2 , respectively. These are similar to the size of the most important active areas found in the surface of Comet P/Halley (Huebner *et al.* 1986). These surface areas are also compatible with those found in MB90. This corresponds only to 3×10^{-5} of the total surface area of Chiron being active, which is consistent with the value $<5 \times 10^{-4}$ found by Womack and Stern (1997). This is a small value compared to around 10% of active area in Comet Halley (Keller *et al.* 1986).

The important points we would like to stress in this paper can be summarized as follows:

1. Photometric observations of Chiron from 1997 up to 2001 show that its brightness decreased in the period from 1997 to 1999 and began to increase in 2000.
2. The reduced V magnitude of Chiron varied from a maximum value of 7.478 in June 1999 to a minimum of 5.972 two years later.

3. Using the model of MB90 for the activity of Chiron we fitted all the photometric data along 30 years. We obtained parameters such as the mean residence time of a particle in the coma and the rate of injection of dust, in particular for the outburst of 1987. The sizes of the active areas found in this work are compatible with those found in the works by MB90 and B01.

The present outburst seems to have the same characteristics as the last one in 1987, but it is too early to say if its intensity will be similar as well. During its last outburst, Chiron was active for two years which implies that the present outburst might last until 2003. Therefore, this will be an excellent opportunity to observe this very peculiar Centaur in forthcoming years.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the technical staff of the OPD, EABA, and CASLEO for their prompt help whenever needed. Thanks are also due to R. Almeida, T. Mothé Diniz, A. Sanchez, M. Pivato, M. Lares, M. Leiva, and J. Ahumada for their help in some of the observations. Diverse fellowships and grants by CNPq and CAPES from Brazil and by FOMEC and SeCyT from Argentina supported the authors. The authors acknowledge the use of the CCD Tek in CASLEO and the data acquisition system supported under U.S. National Science Foundation Grant AST-90-15827 to R. M. Rich. Image processing in this paper has been performed using the IRAF program. IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA) under cooperative agreement with the National Science Foundation.

REFERENCES

- Bergeron, D., and P. Vanouplines 1995. 2060 Chiron. *Minor Planet Circ.* 25,405–25,406.
- Bowell, E., B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris 1989. Applications of photometric models to asteroids. In *Asteroids II* (R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 524–556. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Buratti, B. J., and R. S. Dunbar 1991. Observation of a rapid decrease in the brightness of the coma of 2060 Chiron in 1990 January. *Astrophys. J.* **366**, L47–49.
- Bus, S. J., E. Bowell, and L. M. French 1988. (2060) Chiron. *IAU Circ.* 4684.
- Bus, S. J., E. Bowell, A. W. Harris, and A. V. Hewitt 1989. 2060 Chiron: CCD and electronographic photometry. *Icarus* **77**, 223–238.
- Bus, S. J., M. F. A'Hearn, D. G. Schleicher, and E. Bowell 1991. Detection of CN emission from (2060) Chiron. *Science* **251**, 774–777.
- Bus, S. J., M. F. A'Hearn, E. Bowell, and A. S. Stern 2001. (2060) Chiron: Evidence for activity near aphelion. *Icarus* **150**, 94–103.
- Campins, H., C. Tedesco, D. Osip, M. Rieke, and B. Schulz 1994. The color temperature of 2060 Chiron: A warm and small nucleus. *Bull. Am. Astron. Soc.* **26**, 1152.
- Davies, J. K., N. McBride, S. L. Ellison, S. F. Green, and D. R. Ballantyne 1998. Visible and infrared photometry of six Centaurs. *Icarus* **134**, 213–227.
- Durda, D., and A. Stern 2000. Collision rates in the present-day Kuiper Belt and Centaur region: Applications to surface activation and modification on comets, Kuiper Belt objects, Centaurs, and Pluto–Charon. *Icarus* **145**, 220–229.
- Fanale, F., and J. R. Salvail 1997. The cometary activity of Chiron: A stratigraphic model. *Icarus* **125**, 397–405.

- Flammer, K. R., B. Jackson, and D. A. Mendis 1985. On the brightness of Comet Halley at large heliocentric distances. *Earth, Moon, Planets* **35**, 203–212.
- Hahn, G., and M. E. Bailey 1990. Rapid dynamical evolution of giant Comet Chiron. *Nature* **348**, 132–136.
- Hartmann, W. K., D. P. Cruikshank, J. Degewij, and R. W. Capps 1981. Surface materials on unusual planetary object Chiron. *Icarus* **47**, 333–341.
- Hartmann, W. K., D. P. Cruikshank, and J. Degewij 1982. Remote comets and related bodies: VJHK colorimetry and surface behavior. *Icarus* **52**, 377–408.
- Hartmann, W. K., D. J. Tholen, K. J. Meech, and D. P. Cruikshank 1990. 2060 Chiron, colorimetry, and cometary behavior. *Icarus* **83**, 1–15.
- Huebner, W. F., H. U. Keller, K. Wilhelm, F. L. Whipple, W. A. Delamere, H. J. Reitsema, and H. U. Schmidt 1986. In *Proceedings 20th of the ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's comet*. Vol. II, ESA SP-250 (B. Battrick, E. S. Rolfe, and R. Reinhard, Eds.), pp. 363–364.
- Keller, H. U., C. Arpigny, C. Barbieri, R. M. Bonnet, S. Cazes, M. Coradini, C. B. Cosmovici, W. A. Delamere, W. F. Huebner, D. W. Hughes, C. Jamar, D. Malaise, H. J. Reitsema, H. U. Schmidt, W. K. H. Schmidt, P. Serge, F. L. Whipple, and K. Wilhelm 1986. First Halley multicolor camera imaging results from Giotto. *Nature* **321**, 320–326.
- Kowal, C. T. 1979. Chiron. In *Asteroids* (T. Gehrels, Ed.), pp. 436–439. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Landolt, A. U. 1992. UBVR photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator. *Astron. J.* **104**, 340–371, 436–491.
- Lazzaro, D., M. A. Florczak, A. Betzler, O. C. Winter, S. Giuliatti-Winter, C. A. Angeli, and D. W. Foryta 1996. 2060 Chiron back to a minimum of brightness. *Planet. Space Sci.* **44**, 1547–1550.
- Lazzaro, D., M. A. Florczak, C. A. Angeli, J. M. Carvano, A. S. Betzler, M. A. Barucci, A. Doressoundiram, and M. Lazzarin 1997. Photometric monitoring of 2060 Chiron's brightness at perihelion. *Planet. Space Sci.* **45**, 1607–1614.
- Lebofsky, L. A., D. J. Tholen, G. H. Rieke, and M. A. Lebofsky 1984. 2060 Chiron: Visual and thermal infrared observations. *Icarus* **60**, 535.
- Luu, J. X., and D. C. Jewitt 1990. Cometary activity in 2060 Chiron. *Astron. J.* **100**, 913–931.
- Luu, J. X., and D. C. Jewitt 1993. Continued activity in Chiron. In *Workshop on the Activity of Distant Comets* (W. F. Huebner, H. U. Keller, D. Jewitt, J. Klinger, and R. West, Eds.), pp. 44–53. Southwest Research Inst., San Antonio.
- Marcialis, R. L., and B. J. Buratti 1993. CCD photometry of 2060 Chiron in 1985 and 1991. *Icarus* **104**, 234–243.
- Marcialis, R. L., W. B. Hubbard, R. Hill, S. J. Bus, J. L. Elliot, C. B. Olkin, S. W. McDonald, J. Foust, L. Sopata, R. M. Bandyopadhyay, R. Meserole, M. W. Buie, J. R. Spencer, L. H. Wasserman, R. L. Millis, E. W. Dunham, C. A. Beichmann, T. H. Jarrett, J. Young, C. H. Ford, and T. Herter 1994. The 1993 Nov. 07 occultation of Ch02 by 2060 Chiron. *Bull. Am. Astron. Soc.* **26**, 1153.
- Meech, K. J., and M. J. S. Belton 1989. *IAU Circ.* 4770.
- Meech, K. J., and M. J. S. Belton 1990. The atmosphere of 2060 Chiron. *Astron. J.* **100**, 1323–1338.
- Meech, K. J. 1991. Outburst of Comet Halley at 14.3 AU. In *Reports of Planetary Astronomy*, p. 173. Natl. Aeronautics & Space Admin., Washington, DC.
- Mendis, D. A., J. R. Hill, H. L. Houpins, and E. C. Whipple 1981. On the electrostatic charging of cometary nucleus. *Astrophys. J.* **249**, 787–797.
- Oikawa, S., and E. Everhart 1979. Past and future orbit of 1977 UB, object Chiron. *Astron. J.* **84**, 134–139.
- Scholl, H. 1979. History and evolution of Chiron's orbit. *Icarus* **40**, 345–349.
- Sekanina, Z. 1985. Light variation of periodic Comet Halley beyond 7 AU. *Astron. Astrophys.* **148**, 299.
- Stern, A. 1989. Implications of volatile release from object 2060 Chiron. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **101**, 126–132.
- Sykes, M., and R. Walker 1991. Constraints on the diameter and albedo of 2060 Chiron. *Science* **251**, 777–780.
- Tholen, D., W. K. Hartmann, and D. P. Cruikshank 1988. (2060) Chiron. *IAU Circ.* 4554.
- West, R. M. 1991. A photometric study of (2060) Chiron and its coma. *Astron. Astrophys.* **241**, 635–645.
- Womack, M., and S. A. Stern 1997. Detection of carbon monoxide in (2060) Chiron. *Bull. Am. Astron. Soc.* **27**, 1143.