

CÓDIGO EM LINGUAGEM IDL PARA GERAÇÃO DE UM MODELO DE AGLOMERADO DE ESTRELAS

Dino Beghetto Junior^{1,2}, Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho²

¹UNIFESP – Universidade Federal de São Paulo/ICT - Instituto de Ciência e Tecnologia, Rua Talim, 330 - Vila Nair - São José dos Campos-SP, dino.beghetto@unifesp.br

²UNIVAP/IPD – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Av. Shishima Hifumi, 2911 - Urbanova - São José dos Campos-SP

Resumo- Há várias décadas modelos numéricos computacionais para simulação de sistemas físicos ajudam cientistas a compreender cada vez melhor os processos envolvidos nesses sistemas. Em particular, na astronomia a linguagem IDL (*Interactive Data Language*) é comumente utilizada para esse fim. Este trabalho apresenta um código para geração de condições iniciais para um modelo de N-corpos de um aglomerado de estrelas, escrito em IDL, baseado em um algoritmo para geração de condições iniciais descrito em um artigo de autoria de S.J. Aarseth, M. Héron e R. Wielen, que compara alguns métodos numéricos para o estudo da dinâmica de aglomerado de estrelas.

Palavras-chave: Astrofísica, simulações de N-Corpos, aglomerado de estrelas, IDL.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra

Introdução

Para muitos problemas que a astronomia procura resolver, se faz necessário o auxílio da computação, como a realização de simulações numéricas, atualmente ferramentas indispensáveis no estudo e compreensão dos diversos processos físicos envolvidos em grandes sistemas estelares.

O IDL (*Interactive Data Language*) é uma das linguagens mais atuais e relevantes em astronomia (PENTEADO, 2011), e foi utilizada aqui para escrever o código a ser apresentado nesse trabalho, que gera condições iniciais de posições e velocidades para um modelo de aglomerado de estrelas. Esse código foi escrito seguindo a receita de Aarseth et al. (1974), uma referência na área de simulações de N-corpos em astronomia e astrofísica, seguindo orientações do Dr. Irapuan Rodrigues, do Laboratório de Física e Astronomia do IPD-UNIVAP.

Os modelos gerados por este algoritmo podem ser usados para estudos da evolução temporal de aglomerados de estrelas, como o apresentado na Figura 1, chamado Omega Centauri, que é um aglomerado globular que orbita a Via Láctea, e contém vários milhões de estrelas.

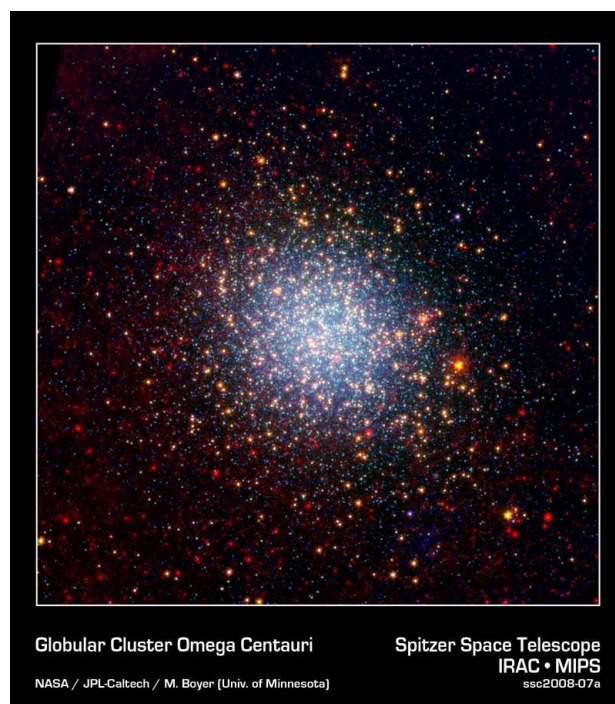


Figura 1 – Imagem de Omega Centauri obtida pelo telescópio espacial Spitzer (FONTE: http://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2008/04/omegacen_spitzer.jpg).

Metodologia

De acordo com os detalhes da receita seguida para criação da posterior rotina em IDL, a princípio devemos ter uma sub-rotina que gera números randômicos normalizados entre 0 e 1. Para tal, o IDL possui uma função chamada “*randomu*”, que

justamente retorna um ou mais valores pseudo-aleatórios uniformemente distribuídos, de ponto flutuante, entre 0,0 e 1,0. Quando passados dois parâmetros de entrada (um valor chamado de “semente” (*seed*), que serve para a inicialização da sequência randômica, e o número total de valores), a função retorna o valor de forma exatamente como especificada na receita.

Ainda de acordo com o algoritmo, consideramos o sistema de unidades em que $G = 1$, $M = 1$ e $R = 1$, onde G é a constante gravitacional universal, M é a massa total do aglomerado e R é um parâmetro que determina suas dimensões. Por conveniência, tomamos o aglomerado como um caso onde as partículas/estrelas possuem massas iguais; logo, a massa de cada uma vale $m = 1/N$, onde N é o número de partículas do sistema.

O modelo do aglomerado é o de um politropo de Plummer de índice 5 (RODRIGUES,1999). Esse perfil é dado pela equação seguinte:

$$\rho(r) = \frac{3}{4\pi} MR^{-3} \left[1 + (r/R)^2 \right]^{-5/2}. \quad (1).$$

Integrando a equação (1) sobre o espaço, temos a expressão da massa acumulada numa esfera de raio r , dada por

$$M(r) = r^3 (1 + r^2)^{-3/2}. \quad (2).$$

Gerando uma variável pseudo-aleatória X_1 e fazendo $X_1 = M(r)$ para selecionar um valor do raio para uma estrela do sistema, obtemos a equação

$$r = (X_1^{-2/3} - 1)^{-1/2}. \quad (3).$$

As coordenadas de posição (x, y, z) são selecionadas sobre uma esfera de raio r , com probabilidade uniforme (AARSETH et al.,1974). Para o cálculo dessas coordenadas, mais dois números pseudo-randômicos, X_2 e X_3 , devem ser gerados, de forma que as coordenadas são dadas pelas equações (4), (5) e (6) a seguir:

$$z = (1 - 2X_2)r, \quad (4)$$

$$x = (r^2 - z^2)^{1/2} \cos(2\pi X_3), \quad (5)$$

$$y = (r^2 - z^2)^{1/2} \sin(2\pi X_3). \quad (6)$$

Em seguida deve ser feito o cálculo do módulo da velocidade V para a mesma estrela. Sendo U

o potencial gravitacional dado em função do raio r , esse cálculo é feito limitando-se o valor máximo para V à velocidade de escape V_e em r (RODRIGUES,1999), dado por

$$V_e = (-2U)^{1/2} = \sqrt{2}(1 + r^2)^{-1/4}. \quad (7)$$

De acordo com a receita, se fizermos $V/V_e = q$, a distribuição de probabilidade da razão é calculada da seguinte forma:

$$g(q) = q^2 (1 - q^2)^{7/2}. \quad (8)$$

Os possíveis valores de q variam entre 0 e 1, e $g(q)$ é sempre menor que 0.1. A técnica usada aqui consiste em gerar dois pseudo-randômicos, X_4 e X_5 , e verificar se $0.1X_5 < g(X_4)$. Caso seja verificada a desigualdade, adotamos $q = X_4$. Do contrário, outro par de pseudo-randômicos deve ser gerado, até que a desigualdade seja satisfeita. O módulo da velocidade, $V = qV_e$, é obtido usando-se a equação (7).

A distribuição de velocidades é isotrópica, assim as três coordenadas de velocidade (u, v, w) podem ser obtidas de forma análoga à empregada na obtenção das coordenadas espaciais. Então, basta gerar dois novos números pseudo-randômicos, X_6 e X_7 , e utilizar o mesmo raciocínio empregado em (4), (5) e (6) para escrever

$$w = (1 - 2X_6)V, \quad (9)$$

$$u = (V^2 - w^2)^{1/2} \cos(2\pi X_7), \quad (10)$$

$$v = (V^2 - w^2)^{1/2} \sin(2\pi X_7). \quad (11)$$

Fazendo o procedimento para cada uma das N estrelas do aglomerado, temos por fim os valores de m, x, y, z, u, v e w prontos.

Resultados

Seguindo os passos descritos, uma rotina em IDL foi feita (Figura 2) e chamada de “starclusters.pro”, que é um procedimento que contém um cabeçalho indicando que, na chamada da rotina, deve ser informado o número de partículas/estrelas (no código indicado por “npt”) do aglomerado a ser gerado e que as variáveis x, y, z, u, v e w são as variáveis de saída (que são

as três coordenadas de posição e as três de velocidade, respectivamente).

```
PRO STARCLUSTERS,npt,x,y,z,u,v,w
;
; Gerando o raio da esfera do cluster:

x1=randomu(seed,npt)
r=(x1^(-2./3.))-1.)^(-1./2.)

; Selecionando posições das estrelas, em
; coordenadas (x,y,z):

x2=randomu(seed,npt)
x3=randomu(seed,npt)
z=(1-2*x2)*r
x=sqrt(r^2-z^2)*cos(2!*pi*x3)
y=sqrt(r^2-z^2)*sin(2!*pi*x3)

; Módulo da velocidade da estrela em
; coordenadas (u,v,w), tal que
; q=vm/ve, q=[0,1], onde
; vm=velocidade e ve=velocidade de escape

u=findgen(npt)
v=u
w=u
q=u
ve=2^(1/2)*(1+r^2)^(-1/4)

for i=0L,npt-1 do begin
    x4=randomu(seed,1)
    x5=randomu(seed,1)

; Verificando se os randômicos x4 e x5
; são válidos para o propósito:

    while (.1*x5 GE x4^2*(1-x4^2)^(7/2)) do
begin
        x4=randomu(seed,1)
        x5=randomu(seed,1)
    endwhile
    q(i)=x4
endfor

vm=q*ve

x6=randomu(seed,npt)
x7=randomu(seed,npt)

w=(1-2*x6)*vm
u=(vm^2-w^2)^(1/2)*cos(2!*pi*x7)
v=(vm^2-w^2)^(1/2)*sin(2!*pi*x7)

return
end
```

Figura 2 – código escrito em IDL seguindo os passos descritos na Metodologia (observação: as linhas com o símbolo “;” no início são linhas de comentários e servem somente para uma melhor compreensão do código, não tendo influência no programa).

No início do código são calculados os valores de r , das coordenadas espaciais x , y e z e do módulo da velocidade seguindo exatamente o que diz o algoritmo.

Observe que, logo adiante, é feita uma comparação dentro do comando `while`, logo após a geração dos pseudo-randômicos x_4 e x_5 , verificando se um décimo de x_5 é maior ou igual que (“GE”) a função $g(\)$ para o valor de x_4 , conforme apresentado na Metodologia. Enquanto persistir a desigualdade, novos valores para x_4 e x_5 são gerados.

Na seqüência, conforme a receita, o módulo da velocidade é calculado, e as três coordenadas de velocidade são determinadas no final de forma similar às coordenadas espaciais no início. Vale informar que, em IDL, “!pi” é o valor de π já pré-definido.

Discussão

Podemos visualizar o modelo gerado através do próprio IDL, que possui a função “`iplot`” para plotagem de gráficos 3D. A Figura 3 apresenta um modo de plotar a imagem do aglomerado gerado pelo código em um espaço tridimensional: Primeiramente definimos o número de partículas como mil e chamamos o procedimento “`starclusters.pro`” conforme indicado no cabeçalho da Figura 2; na seqüência, a função “`iplot`” é chamada, seguida de alguns parâmetros: “`/isotropic`” significa que os eixos x , y e z devem ser todos proporcionais, sem distorção; “`sym_index=3`” plota cada partícula como um ponto; “`linestyle=6`” informa a função que não deve haver linhas ligando os pontos no gráfico; e “`xrange`”, “`yrange`” e “`zrange`”, todos com valor “`[-10,10]`”, diz o alcance ou intervalo de cada eixo (x , y e z , respectivamente) a ser apresentado no gráfico.

```
npt=1000.

starclusters,npt,x,y,z,u,v,w

iplot,x,y,z,/isotropic,sym_index=3,
linestyle=6,xrange=[-10,10],yrange=[-
10,10],zrange=[-10,10]
```

Figura 3 – linhas de comando para definição do número de partículas, seguida da geração e da visualização do modelo do aglomerado.

A Figura 4 mostra a saída gráfica gerada pelos comandos. Foram feitos testes de verificação das distribuições de velocidade e espacial das partículas, deixando claro que o código conseguiu

gerar o modelo do aglomerado conforme o esperado.

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

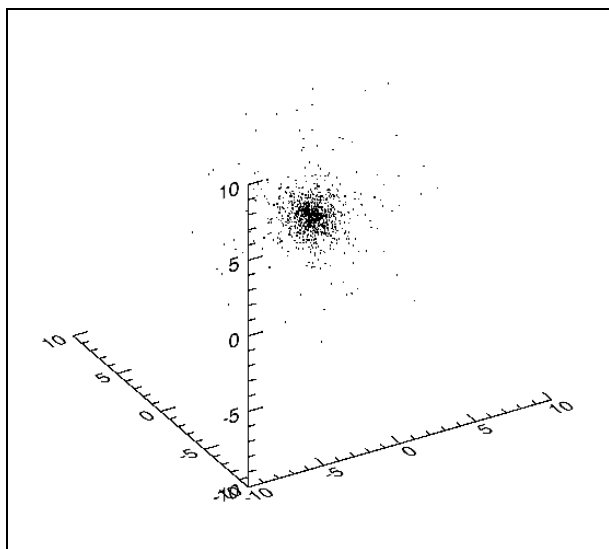


Figura 4 – Visualização do modelo gerado pelo código starclusters.pro para 1000 partículas.

Conclusão

O algoritmo seguido se mostrou um método competente para geração de aglomerados de estrelas; isso pôde ser evidenciado após sua utilização para a escrita do código, a visualização do modelo gerado e os testes feitos sobre os resultados finais.

Sendo assim, a rotina starclusters.pro escrita em IDL aqui apresentada pode ser utilizada para eventuais estudos sobre aglomerados estelares, gerando modelos eficientes.

Agradecimentos

À FAPESP, processo número 2010/12969-8, pelo apoio financeiro.

Referências

- AARSETH, S.J; HÉNON, M; WIELEN, R. A Comparison of Numerical Methods for the Study of Star Cluster Dynamics. *Astron. & Astrophys.* 37, 183-187, 1974.
- PENTEADO, P.P. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (IAG/USP). Disponível em: <http://www.ppenteado.net/pea/> Acesso em 19 ago 2011.
- RODRIGUES, I. Interações de Sistemas Estelares. 1999. Tese (Doutorado em Ciências) –