



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **REGIÕES DE COLAPSO SECUNDÁRIO DOS AGLOMERADOS DE GALÁXIAS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Pedro Henrique Ribeiro da Silva Moraes (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [pedroh\\_demoraes@hotmail.com](mailto:pedroh_demoraes@hotmail.com)

Dr. Hugo Vicente Capelato (DAS/INPE, Orientador)  
E-mail: [hugo@das.inpe.br](mailto:hugo@das.inpe.br)

Julho de 2007

## **RESUMO**

Este relatório demonstra o que foi feito ao longo de aproximadamente um ano no trabalho que visa mapear o campo de velocidades peculiares médias das regiões de colapso secundário de uma amostra de aglomerados ricos do catálogo de Abell.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
INTRODUÇÃO	5
O PROJETO	5
A OBTENÇÃO DAS COORDENADAS $r$ , $\theta$ E $\phi$ PELO MÉTODO MONTE-CARLO	7
CONCLUSÕES E PRÓXIMAS ETAPAS	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

## LISTA DE FIGURAS

	<b><u>Pág.</u></b>
<b>Figura 1</b> O aglomerado de galáxias Abell 1942	6
<b>Figura 2</b> Distribuição de pontos aleatoriamente, realizada pelo Método Monte-Carlo	10
<b>Figura 3</b> Histograma das contagens em anéis concêntricos da projeção da figura 2	11

## Introdução

Os aglomerados de galáxias são as estruturas de maior massa no Universo. Reúnem, na região central, cerca de milhares de galáxias brilhantes e talvez muito mais galáxias “anãs”, muito fracas para serem detectadas.

Existem várias evidências de que os aglomerados de galáxias não estejam completamente formados. É provável que as suas partes mais centrais já estejam relaxadas e em equilíbrio, como demonstra a distribuição relativamente isotrópica das galáxias na região central, sua distribuição de velocidades, bem aproximada por uma distribuição gaussiana, assim como a emissão de raios-X, em geral sem sinais de subestruturas, evidenciando que o gás ali, já se encontra relaxado no poço do potencial global do aglomerado.

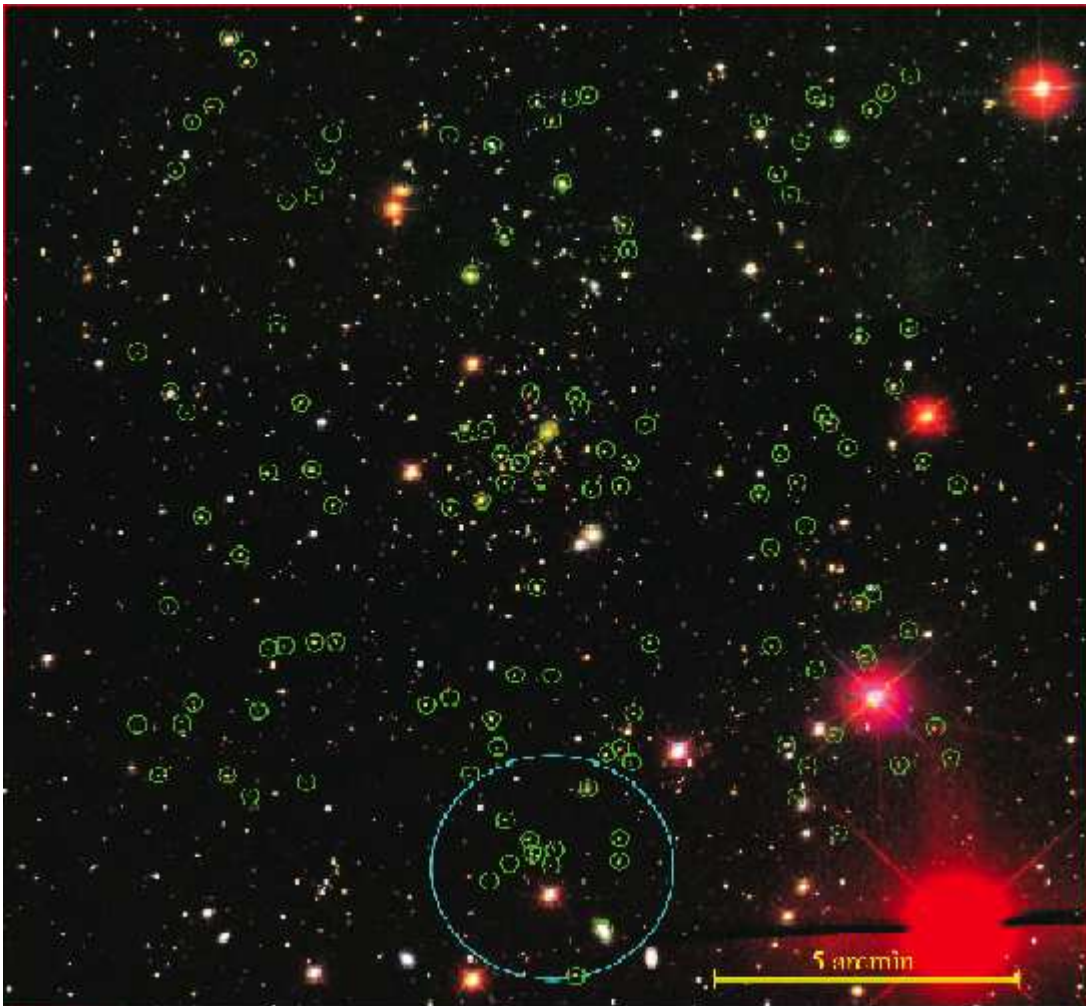
No entanto, acumulam-se evidências de que as partes mais exteriores dos aglomerados ainda estejam sofrendo processos de acreção de matéria, na forma de galáxias, predominantemente espirais, ou mesmo de grupos de galáxias, que seriam responsáveis pelas subestruturas observadas em projeção na periferia dos aglomerados, a distâncias radiais de até 10Mpc/h. Estes materiais em acreção constituiriam as partes remanescentes, recentemente descoladas do fluxo cosmológico, que agora estão caindo sobre a região central, já relaxada. Por esta razão, este processo é chamado de colapso secundário.

## O Projeto

O objetivo principal do projeto consiste no mapeamento do campo de velocidades peculiares médias das regiões de colapso secundário de uma amostra de aglomerados ricos do catálogo de Abell. A velocidade peculiar de uma galáxia é aquela obtida após se eliminar a velocidade de recessão sistemática, devido à expansão universal. A estimativa das dimensões destas regiões e dos gradientes de velocidades observados nos permite, em última análise, estimar a época em que as partes centrais do aglomerado começaram a se formar, desligando-se do fluxo cosmológico.

Nosso alvo foi uma região quadrada de  $0.5^\circ$  de lado, centrada numa galáxia brilhante do aglomerado Abell 1942. Seu redshift médio é 0.224 e sua posição é dada pelas coordenadas  $\alpha=219.6541667^\circ$  e  $\delta=3.668056^\circ$ .

A figura abaixo mostra o aglomerado em questão. As galáxias circuladas possuem velocidades radiais conhecidas.



**Figura 1 – O aglomerado de galáxias Abell 1942**

Para as galáxias dessa região, temos dados importantes como: além das suas coordenadas (ascensão reta e declinação), suas magnitudes de banda (u,g,r,i,z) e também os seus redshifts fotométricos e espectroscópicos, estes últimos, no entanto, apenas para uma pequena subamostra da totalidade de galáxias na região. As coordenadas, ascensão reta e declinação do aglomerado, foram coletadas no NED (NASA Extragalactic Database - <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>). Os dados das galáxias foram conseguidos no site do telescópio SDSS (Sloan Digital Sky Survey - <http://www.sdss.org/>) aplicando-se a seguinte query na seção CasJobs:

```

SELECT
P.ra,P.dec,P.dered_u,P.dered_g,P.dered_r,P.dered_i,P.dered_
z,
S.z,S.zErr,S.zConf,
H.photoz,H.photozerr,H.flag
into mydb.table_bad_001
FROM
Galaxy as P left outer join SpecObj as S on P.objID =
s.BestObjID
left outer join Photoz2 as H on P.objID = H.objID
WHERE

```

```

( (P.ra >= 219.09 and P.ra <= 220.10 AND P.dec >= 3.04
and P.dec <= 4.05) )
AND P.dered_r <= 23.0
AND ((P.flags_r & 0x10000000) != 0)
AND ((P.flags_r & 0x80) = 0)
AND ((P.flags_r & 0x20) = 0)
AND ((P.flags_r & 0x80000) = 0)
AND (((P.flags_r & 0x400000000000) = 0) or (P.psfmagerr_r
<= 0.2))
AND ((P.flags_r & 0x40000) = 0)
AND ((P.flags_r & 0x10000000000) = 0)
AND ((H.flag = 0) or (H.flag = 2))
ORDER BY P.dered_r

```

A partir dos redshifts das galáxias, podemos calcular suas velocidades peculiares, projetadas segundo suas linhas de visada. Chamaremos estas velocidades de  $v_{los}$  (los = line of sight).

Para entendermos como, de maneira geral, os dados  $v_{los}$  devem se distribuir na região em torno do aglomerado, realizamos simulações Monte-Carlo (método estatístico utilizado como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas, utilizando números aleatórios), para construir amostras estatísticas de um modelo simples de colapso secundário, com simetria esférica, sobre a região central relaxada e em equilíbrio, representando o aglomerado de galáxias propriamente dito. Fizemos a hipótese de que a região central seja descrita por uma função de densidades no espaço de fases separável,  $f(r,v) = f(r)g(v)$ , onde  $f(r)$  representa a densidade espacial, radialmente simétrica, e  $g(v)$  a distribuição de velocidades, suposta isotrópica. Embora simplificado, os resultados destas simulações servirão de guia para entendermos os efeitos de projeção que podem afetar o nosso estudo: os efeitos de projeção das galáxias dispostas na frente e atrás do sistema, isto é, do aglomerado, e os efeitos de projeção devido ao fato de só dispormos da componente segundo a linha de visada das velocidades peculiares.

### A obtenção das coordenadas $r$ , $\theta$ e $\Phi$ pelo Método Monte-Carlo

No método Monte-Carlo, sorteia-se valores da função de probabilidade acumulada (fpa) associada ao modelo, a partir da geração de números aleatórios, obtendo valores da variável aleatória a partir da inversão da fpa, quando esta for computacionalmente factível.

No nosso caso, a obtenção das coordenadas  $\theta$  e  $\Phi$  em função dos números aleatórios foi feita sem maiores problemas. Mas para a coordenada  $r$ , tivemos que utilizar o Método da Rejeição. Esses cálculos partiram da seguinte função densidade de probabilidade:

$$\rho(\mathbf{r}) = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{r^2}{r_a^2}\right)^{3/2}}$$

Assim,  $\rho(x,y,z)dxdydz$  pode ser escrito como

$$\frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{3/2}} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

em coordenadas esféricas.

A correspondente fpa é dada por:

$$F(r, \theta, \phi) = \int_0^\phi \int_0^\theta \int_0^r \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{3/2}} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

Para encontrarmos o valor de  $\rho_0$ , a normalizamos, tornando-a uma verdadeira fpa:

$$1 = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^R \frac{\rho_0}{\left(1 + r^2 / r_c^2\right)^{3/2}} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

Assim, encontramos

$$\rho_0 = \left\{ r_c^2 \left[ r_c \ln \left( \frac{R}{r_c} + \sqrt{1 + \frac{R^2}{r_c^2}} \right) - \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{r_c^2}}} \right] 4\pi \right\}^{-1}$$

Então, a fpa se torna:

$$F(r, \theta, \phi) = \left[ r_c \ln \left( \frac{r}{r_c} + \sqrt{1 + \frac{r^2}{r_c^2}} \right) - \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{r_c^2}}} \right] (1 - \cos\theta) \frac{\phi}{4\pi} H(R)^{-1}$$

onde

$$H(R) = r_c \ln \left( \frac{R}{r_c} + \sqrt{1 + \frac{R^2}{r_c^2}} \right) - \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{r_c^2}}}$$

Então, os números aleatórios  $q_r$ ,  $q_\theta$  e  $q_\phi$  serão dados por:

$$q_\theta = (1 - \cos\theta)$$

$$q_\phi = \frac{\phi}{4\pi}$$

$$q_r = \left[ r_c \ln \left( \frac{r}{r_c} + \sqrt{1 + \frac{r^2}{r_c^2}} \right) - \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{r_c^2}}} \right] H(R)^{-1}$$

Assim

$$\theta = \arccos(1 - q_\theta)$$

$$\phi = 4\pi q_\phi$$



e  $r$  torna-se difícil, ou mesmo impossível de se encontrar da mesma maneira que as outras coordenadas (simplesmente por isolamento). Assim, como foi dito, utilizamos o Método da Rejeição. Neste método, requer-se uma função majorante da função densidade de probabilidade, em todos os pontos e cuja fpa seja de fácil inversão. Uma nova função densidade de probabilidade foi usada, criada pois

$$\int_0^{\infty} \frac{\rho_0 r^2}{\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{3/2}} dr \rightarrow \infty$$

A nova função será calculada a partir da função King (função comumente usada para este caso):

$$\rho_{king} = \rho_0 \left[ \left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{-3/2} - \left(1 + \frac{R^2}{r_c^2}\right)^{-3/2} \right]$$

Da qual calculamos  $H(R, r_c)$ :

$$H(R, r_c) = \int_0^{\infty} \rho_{king} r^2 dr = r_c^3 \rho_0 \left[ -4R^3 - 3Rr_c^2 + 3(R^2 + r_c^2)^{3/2} \operatorname{arcsinh}\left(\frac{R}{r_c}\right) \right] / 3(R^2 + r_c^2)^{3/2}$$

Fazendo com que nossa nova função densidade de probabilidade seja:

$$f(r) = \frac{\rho_{king} r^2}{H} = \left[ \left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{-3/2} - \left(1 + \frac{R^2}{r_c^2}\right)^{-3/2} \right] r^2 \frac{1}{H(R, r_c)}$$

A função majorante usada foi

$$m(r) = ar(R - r)$$

O método, agora, consiste em gerar um número aleatório  $q$  que pertença ao intervalo entre zero e  $B$ , onde  $B$  é a integral da função majorante, no ponto  $R$ .

$$M(r) = \int_0^r m(r') dr' = a \left( \frac{Rr^2}{2} - \frac{r^3}{3} \right) \Rightarrow B = \frac{aR^3}{6}$$

Esse número será igual á função  $M$  num certo ponto  $r_q$ :

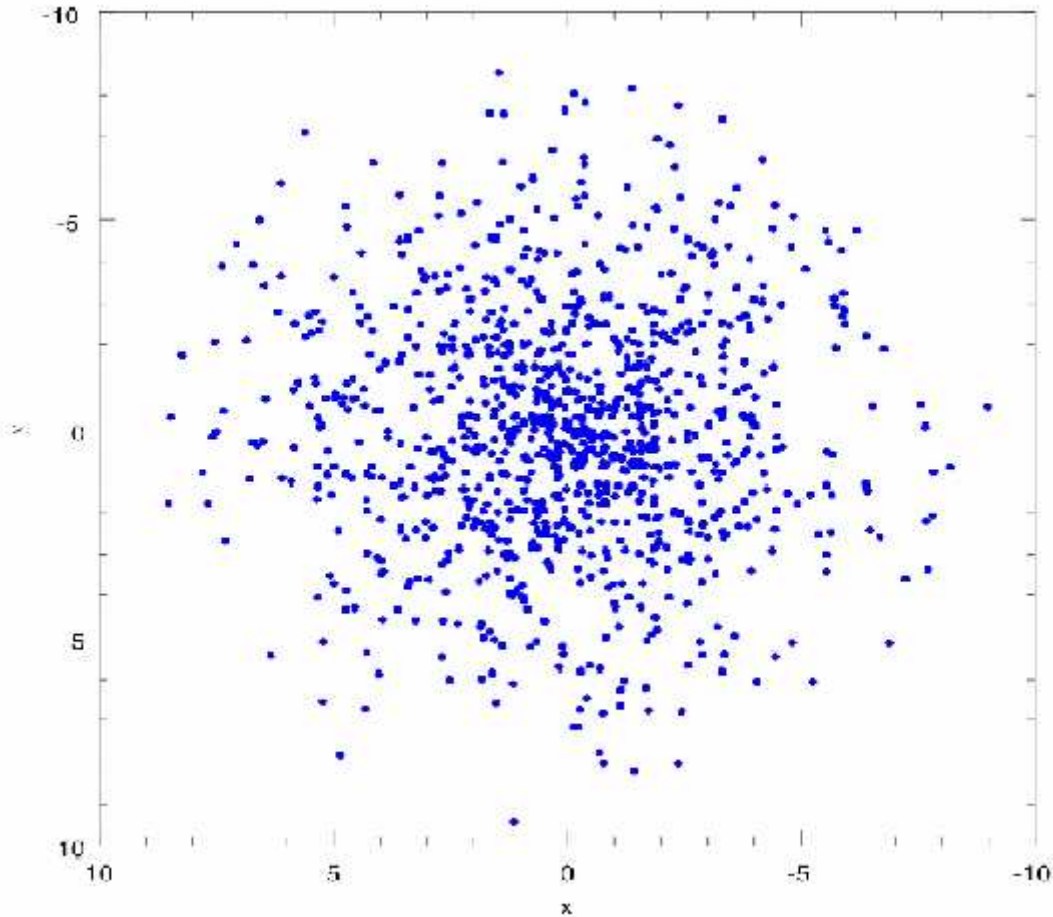
$$M(r_q) = a \left( \frac{-r_q^3}{3} + \frac{Rr_q^2}{2} \right) = q$$

Assim

$$r_q^3 - \frac{3}{2} Rr_q^2 + \frac{3q}{a} = 0$$

Sabendo o valor de  $r_q$ , criamos um novo número aleatório  $p$ , que pertence ao intervalo entre zero e  $m(r_q)$ . Se esse número  $p$  for menor que  $f(r_q)$ , podemos usar o número  $r_q$ . Se for maior, abandonamos o número  $r_q$  e recomeçamos o processo, escolhendo um novo número aleatório  $q$ .

A figura abaixo mostra uma projeção dos pontos  $(x,y,z)$  obtidos em uma realização Monte-Carlo do perfil de densidades espaciais da função de King descrita acima.



**Figura 2 – Distribuição de pontos aleatoriamente, realizada pelo Método Monte-Carlo**

Na figura abaixo, mostramos o histograma das contagens em anéis concêntricos desta mesma projeção, onde foi superposto à curva de densidades projetadas,  $\Sigma(R)$ , predita pela projeção da função de King:

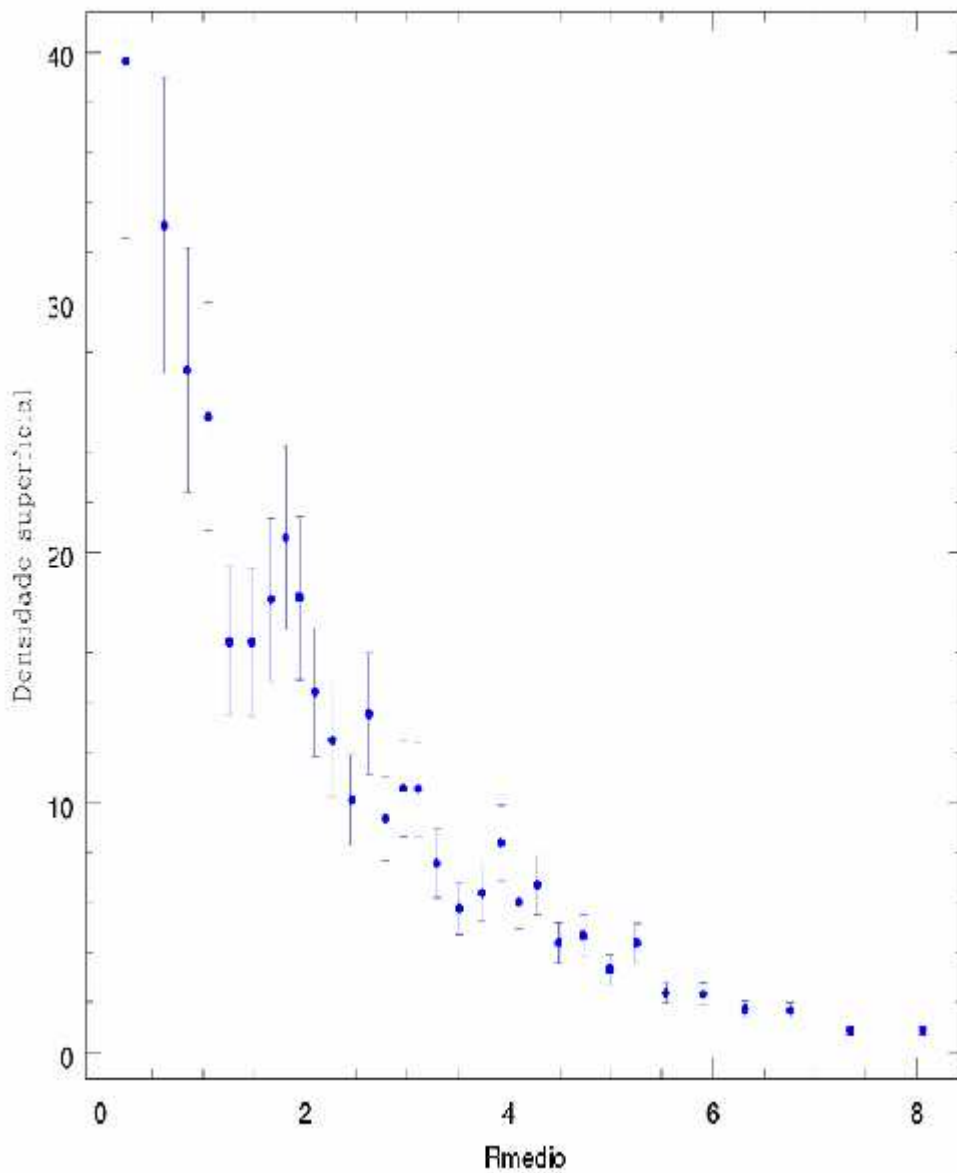


Figura 3 - Histograma das contagens em anéis concêntricos da projeção da figura 2

$$\Sigma_k(R) = 2 r_c \frac{\left( \frac{R_0^2}{r_c^2} - \frac{R^2}{r_c^2} \right)^{\frac{3}{2}}}{\left( 1 + \frac{R^2}{r_c^2} \right) \left( 1 + \frac{R_0^2}{r_c^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

### Conclusões e próximas etapas

No espaço de fases, composto por 6 dimensões, 3 espaciais e 3 relacionadas a velocidade, rege a função de densidades  $f(r,v)=f(r)g(v)$ . Com o estudo feito até então, já sabemos a maneira com que  $f(r)$  se comporta. A próxima etapa do trabalho consiste em

estudar  $g(v)$ . Com conhecimento dessa função, poderemos finalmente obter uma boa aproximação do campo de velocidades peculiares do aglomerado em questão.

### Referências Bibliográficas

- Harrison, E. *Cosmology – The Science of the Universe*. Segunda edição. Cambridge University Press, 2000.
- Berry, M., 1989. *Principles of Cosmology and Gravitation*.
- Sandage, A.R., Kron, L.G., Longair, M.S., *The Deep Universe*, Springer, 1993.
- Gunn, J.E., Gott, R., 1972, *On the Infall of Matter into Clusters of Galaxies*, *Astrophys. J.*, **176**, 1.
- Meyer, S.L., 1975, *Data Analysis for Scientists and Engineers*.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., *Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press 1986.
- Wall, J.V. e Jenkins, C.R., *Practical Statistics for Astronomers*. Cambridge University Press 2003.