



今回は変光星大気の運動の研究である  
G.H.Bowen *Ap. J.* 329 299(1988)を紹介する。

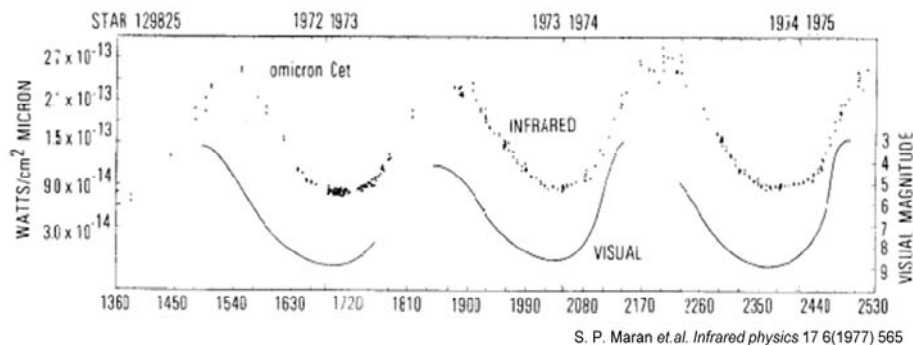
# 発表内容

- 研究背景
- 研究目的
  
- 基礎方程式
- 計算条件
  
- 結果
- まとめ



## 研究背景

- 恒星の中にはその光度が周期的に変化する変光星がある。
- 変光星の中でも変動が規則的でその周期が100～1000日程度の赤色巨星をMira型変光星という。



恒星の中にはその光度が変化する変光星がある。変光星はその光度の変化の仕方から爆発変光星、脈動変光星、回転変光星、激変変光星および食変光星などがある。今回は光度の変化が周期的な脈動変光星の一種であるMira型変光星を扱った。Mira型変光星は周期が100日から1000日程度の赤色巨星である。

## Mira型変光星の典型的な物理量

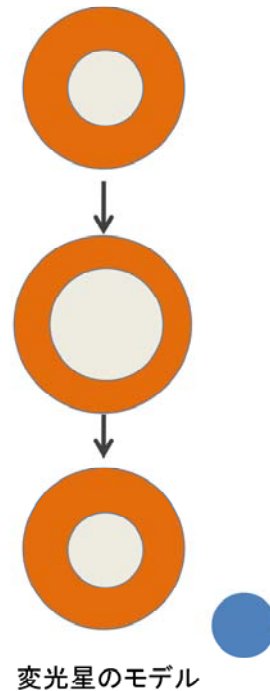
Mass	$M \approx 1 - 2 M_{\text{SUN}}$
Period	$P \approx 200 - 500 \text{ days}$
Radius	$R \approx 150 - 350 R_{\text{SUN}}$
Effective Temp.	$T_{\text{eff}} \approx 2800 - 3000 \text{ K}$
Shock Amplitude	$\Delta u \approx 25 - 30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
Wind Velocity	$u_{\infty} \approx 10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
Mass Loss Rate	$\dot{m} \approx 10^{-7} - 2 \times 10^{-6} M_{\text{SUN}}\cdot\text{yr}^{-1}$



## 研究目的

星の外側の大気に注目し、星の大きさが周期的に変化するようなモデルを考える

- Mira型変光星大気の運動を数値計算によってLagrange的に解き、質量放出の値を求める
- ダストあり、ダストなしのときに質量放出量がどのように変わるかを調べる



星外側の大気の運動に注目し星の大きさが周期的に変化する様なモデルを考える。このとき星の大きさの変化は手で与えるものとし変化の機構についてはブラックボックスとして扱う。今回は大気の運動を様々な条件のもとで数値計算によってLagrange的に解き、質量放出の値を求めることを目的としている。

## 基礎方程式1

- 球対称を仮定し、星の自転と磁場の効果は無視できるものとする
- ガスの状態方程式

$$p = \rho \frac{RT}{\mu}$$

ここでは平均分子量を $\mu=1.26$ とする

- 連続の式

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho$$

基礎方程式を考えるにあたり、星および大気の運動は球対称であり、星の自転および磁場の効果は無視できるとしている。

大気を理想気体と仮定し、状態方程式として理想気体の状態方程式を用いている。

## 基礎方程式2

### ○ガスの運動方程式

ダストがガスと共に運動すると仮定すると

$$\frac{Du}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \left( \frac{dp}{dr} \right) + \frac{k_D L}{4\pi cr^2}$$

$-g$  : 星の重力

$-\rho^{-1}(dp/dr)$  : ガスの圧力勾配

$k_D L / 4\pi cr^2$  : ダストに働く輻射圧  
( $k_D$ : ダストの断面積)

今回用いたガスの運動方程式は大気中のダストがガスとともに運動すると仮定している。

## ダストの断面積

$$k_D = k_{\max} \frac{1}{1 + \exp[(T_{\text{eq}} - T_{\text{cond}}) / \delta]}$$

ここで $T_{\text{cond}}$ 、 $\delta$ はそれぞれcondensation temperature、 $T_{\text{cond}}$ の幅に関するパラメーターで、また $k_{\max}$ は重力と輻射圧の比で与えられるものとして

$$k_{\max} = 4\pi c G \left\langle \frac{M}{L} \right\rangle \left\langle \frac{a_{\text{rad}}}{g} \right\rangle$$

計算では $T_{\text{cond}}=1500\text{K}$ 、 $\delta=60\text{K}$ 、 $a_{\text{rad}}=0.95g$ としている

ダストの断面積は断面積の最大値を重力と輻射の比で与えられるものとして、輻射平衡温度がcondensation temperatureを超えると急激にゼロに近づくようにしている。これは温度がcondensation temperatureを超えるとダストが蒸発することに対応している。



## 基礎方程式3

○エネルギー式

$$\Delta E = -p\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) + Q$$

$Q$ は輻射によるエネルギーのやり取りを表し

$$Q = -\frac{3R}{2}(T - T_{\text{eq}})\frac{\rho}{C}\Delta t$$

ここで $C$ は緩和時間に関するパラメーターで

$C \rightarrow 0$ は等温変化に、 $C \rightarrow \infty$ は断熱変化に相当する  
また $T_{\text{eq}}$ は輻射平衡温度

エネルギー式は熱のやり取りが輻射に寄るもののみとし、また、大気の温度が輻射平衡温度に達するまでの時間をパラメーターで与えることで様々な温度変化の過程について大気の運動が計算できるようになっている。

## 輻射平衡温度

gray atmosphere を仮定し、Eddington 近似を用いると

$$T_{\text{eq}}^4 = \frac{1}{2} T_{\text{eff}}^4 \left\{ 1 - \sqrt{1 - X^2} + \frac{3}{2} \int_r^{\infty} dr X^2 \kappa \rho \right\}$$

ここで $\kappa$ はガスのopacityで、また $X$ はphotosphereの半径を $R_{\text{PS}}$ としたとき

$$X \equiv \frac{R_{\text{PS}}}{r}$$

計算では $\kappa = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ としている



## 計算条件

- 内側の境界条件

$$R = R_0 + \frac{R_0}{13} \sin\left(\frac{2\pi}{P} t\right)$$

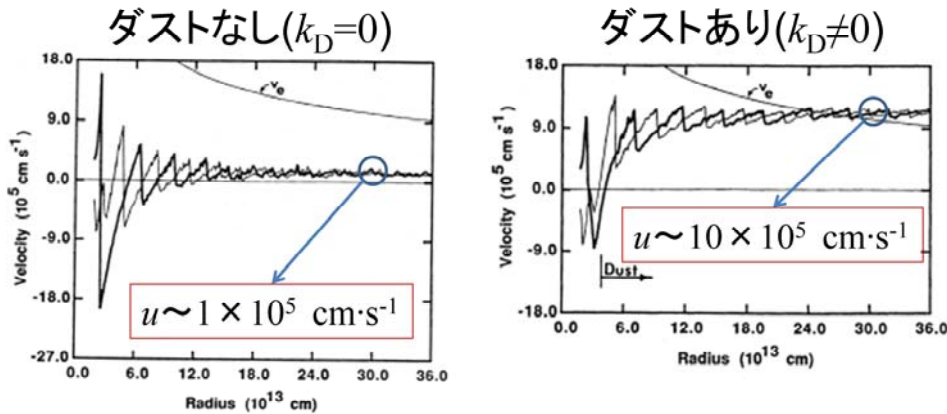
ここで $P$ は周期、 $R$ は星表面の半径

- 計算パラメーター

$M$	$1.2 M_{\text{SUN}}$
$P$	350 days
$R_0$	$270 R_{\text{SUN}}$
$T_{\text{eff}}$	3000 K
$C$	$1 \times 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

内側の境界条件は星が周期的に運動している状態を考え、内側境界の半径を周期的に変化するものを考えている。また、各種計算に必要なパラメーターは典型的なMira型変光星の値を用いている。

## 結果1(速度)

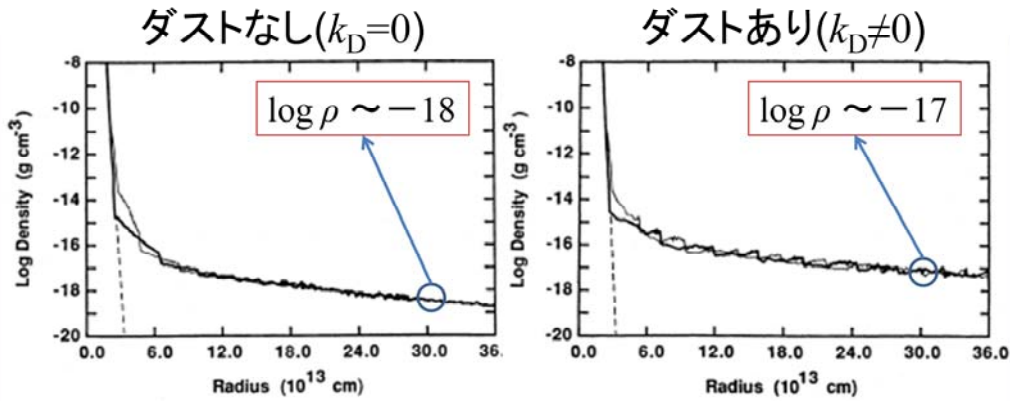


- 速度が一定の値に収束している
- ダストありのときの速度はダストなしに比べて1桁程度大きい
- ダストありのときの速度は脱出速度 $v_e$ を超える

計算はダストあり、ダストなしの二つの場合について行っている。

大気の数値についての計算結果を見ると、速度が一定の値に収束している、ダストありのときの速度はダストなしに比べて1桁程度大きい、ダストありのときの速度は脱出速度 $v_e$ を超える、この三つのことが分かる。このことから大気の運動においてダストが受ける輻射圧はガスが受ける圧力勾配などの他の力に比べて非常に大きな影響を与えることが分かる。

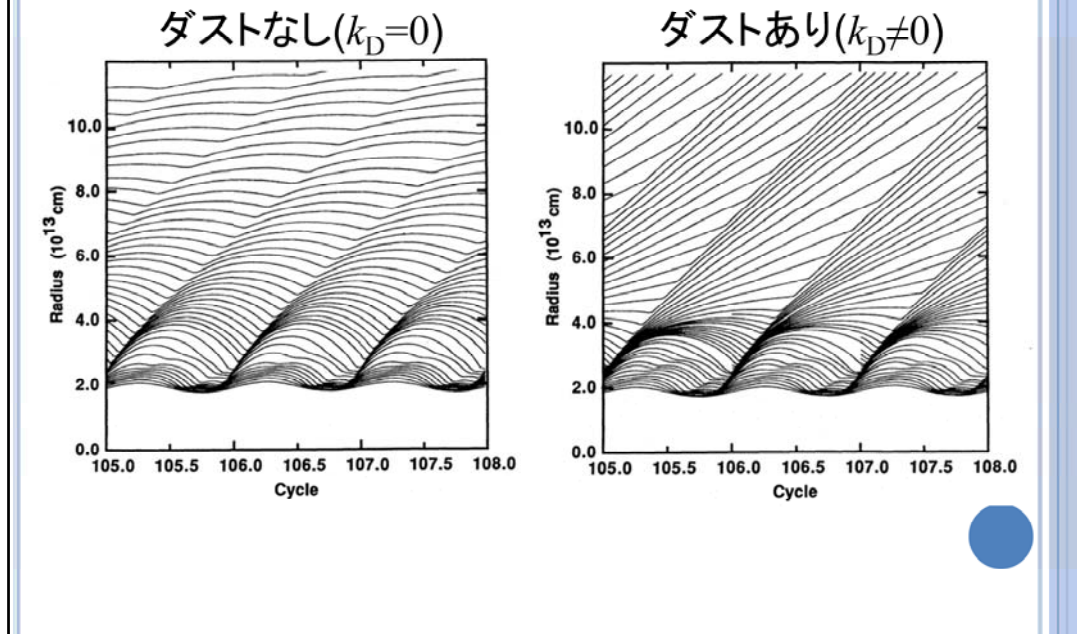
## 結果2(密度)



- 速度増加により密度の高い部分が外まで広がっている

大気の密度についての計算結果を見ると速度増加により密度の高い部分が外まで広がっていることが分かる。これはダストありのほうが大気の色が速く、内側の密度の高い領域が速く外側に動くためだと考えられる。

### 結果3



この図は計算領域の境界を示しており、ダストありのほうが内側の計算領域が速く外に逃げていることが分かる。これは結果1で見た速度についての計算結果と同じことを示している。またダストあり、ダストなし両方とも内側において計算領域が密集している領域が存在し、shock-likeな状態が存在していることが分かる。

## 結果4(質量放出)

- 質量放出

質量放出の定義より

$$\dot{m} \propto r^2 \rho u$$

この式からダストありのときの質量放出の値はダストなしのときに比べて2桁程度大きいと考えられ、実際計算結果は

$$\text{ダストなし: } \dot{m} = 1.5 \times 10^{-9} M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$$

$$\text{ダストあり: } \dot{m} = 1.6 \times 10^{-7} M_{\text{SUN}} \text{ yr}^{-1}$$

となる

質量放出の値は速度の1乗および密度の1乗に比例することから、ダストありのときとダストなしのときを比べると2桁程度異なることが予想され、結果その通りとなっている。

## まとめ

- 質量放出はダストありのほうがダストなしのときに比べて2桁程度大きい値が得られた。
- ダストありのときの質量放出の値はMira型変光星の典型的な値に近いものが得られた。

計算の結果得られた質量放出の値は速度および密度それぞれの差からダストありの方がダストなしのときに比べ2桁程度大きい値のものが得られた。また、ダストありのときの質量放出の値はMira型変光星の典型的な値に近いものが得られた。