



エディントン限界：再考

*Eddington Limit
for a Gaseous Stratus
with Finite Optical Depth*

福江 純 @ 大阪教育大学





目次

復習

- 0 エディントン限界という“常識”
- 1 新しい臨界条件のまとめ
- 2 物理的説明

Fukue, J. 2015, PASJ, 67, 57

今回: いろいろな散乱過程、吸収・放射の場合

- 3 基礎方程式
- 4 いろいろな散乱過程
- 5 吸収・放射の場合
- 6 今後の課題





0 エディントン限界という“常識”

- ❁ エディントン光度以上だとガスは吹き飛ばされる
- ❁ エディントン光度以下だとガスは降着できる
 - ヘリウムガス、 ee 対プラズマ、ダスト
 - 超臨界降着
 - porous medium, photon bubbles

エディントン光度は降着問題のCentral Dogma

- ❁ ? 岩石、中性子星 = 無限大の光学的厚み
- ❁ では、有限の光学的厚みをもったガス層雲では





1 新しい臨界条件のまとめ 状況



❁ 球対称光源

$$L, M, R^*; L=4\pi R^* \pi I^*$$

❁ 層雲

$$\tau_c, S, m; \tau_c = \kappa_{es} m/S$$

❁ 位置

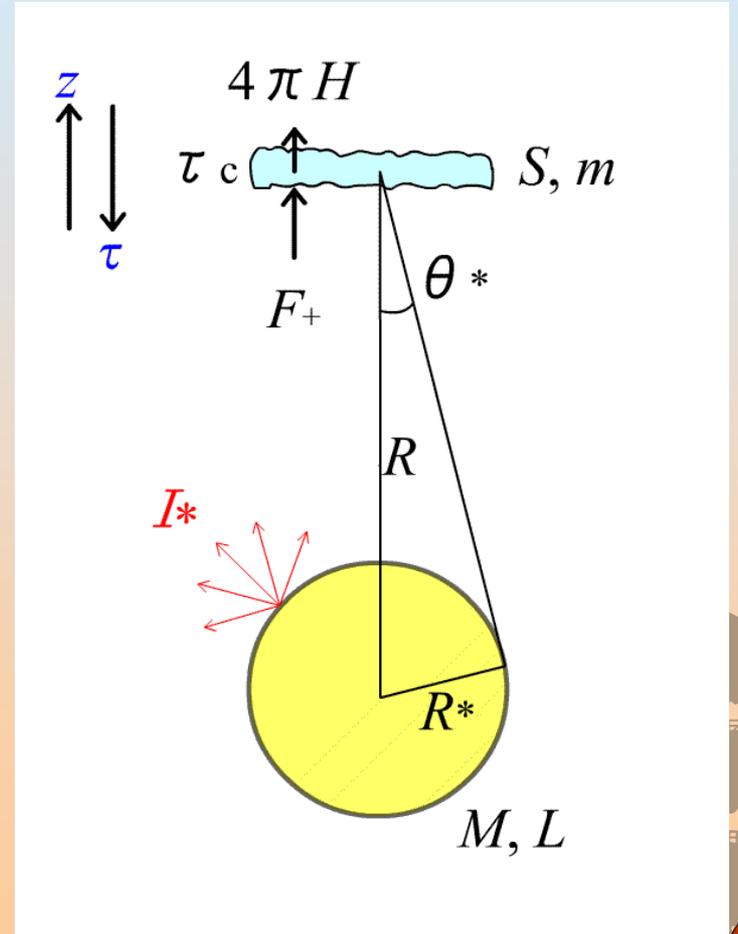
$$R; \cos\theta^* = \mu^* = \sqrt{1 - R^{*2}/R^2}$$

エディントン光度

$$L_E = 4\pi c GM / \kappa_{es}$$

エディントンパラメータ

$$\Gamma = L/L_E$$





1 新しい臨界条件のまとめ

新条件



$$\Gamma \approx 1$$

$$\tau_c \approx 1$$

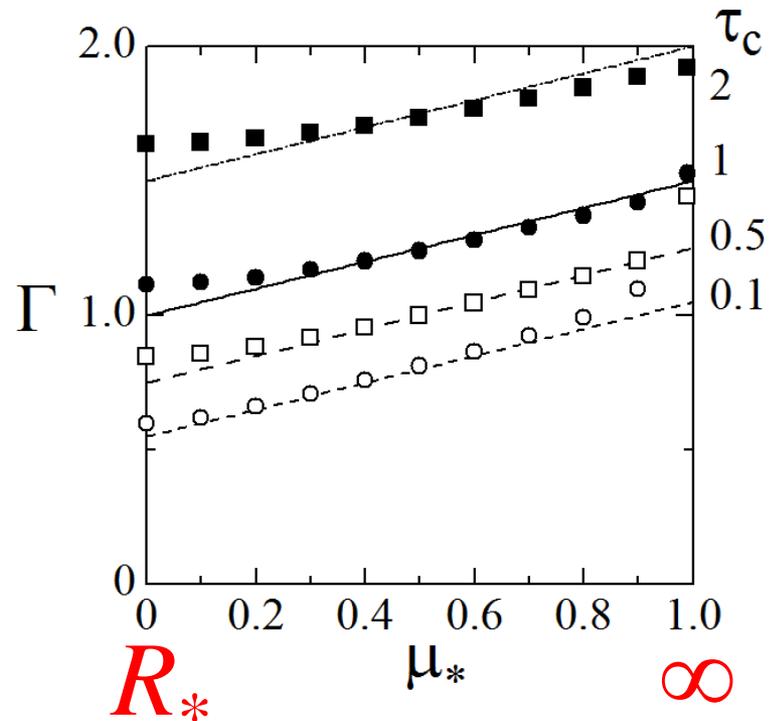
$$\Gamma \approx \frac{\tau_c}{2}$$

optically thick

$$\Gamma = \frac{1 + \mu_*}{2}$$

optically thin

$$\Gamma = \frac{1 + \mu_* + \tau_c}{2}$$



層雲の光学的厚みが1程度なら古典的エディントン光度とほぼ一致する

光学的に厚い層雲では臨界条件は上がる

(超エディントン光度でも降着可能)

→超大質量ブラックホール形成問題の解決)

光学的に薄い層雲だと臨界条件は下がる

(亜エディントン光度でも楽々吹き飛ばせる)

→BALクェーサーやUFO問題の解決)



2 物理的説明

- ❁ optical depth effect

$$S/m = \kappa_c : \tau_c = 1 \dots \kappa_c = \kappa_{es} \quad \tau_c \text{大} : \Gamma \sim \tau_c / 2$$

- ❁ translucent effect

$$F_{\text{net}} / (L/4\pi R^2) \sim 2\tau_c / (1 + \mu^* + \tau_c)$$

τ_c 小 or R 大 (μ^* 大) : 輻射場非等方

- ❁ scattering view point (因子2の由来)

電子散乱...散乱後の光子は上下対称に逃げる

層雲.....散乱後の光子は上下非対称に逃げる

& 上方散乱より下方散乱が大きい





3 基礎方程式

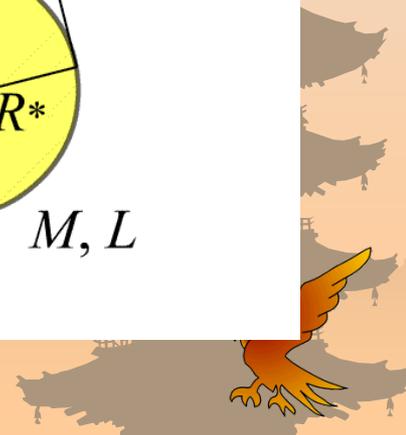
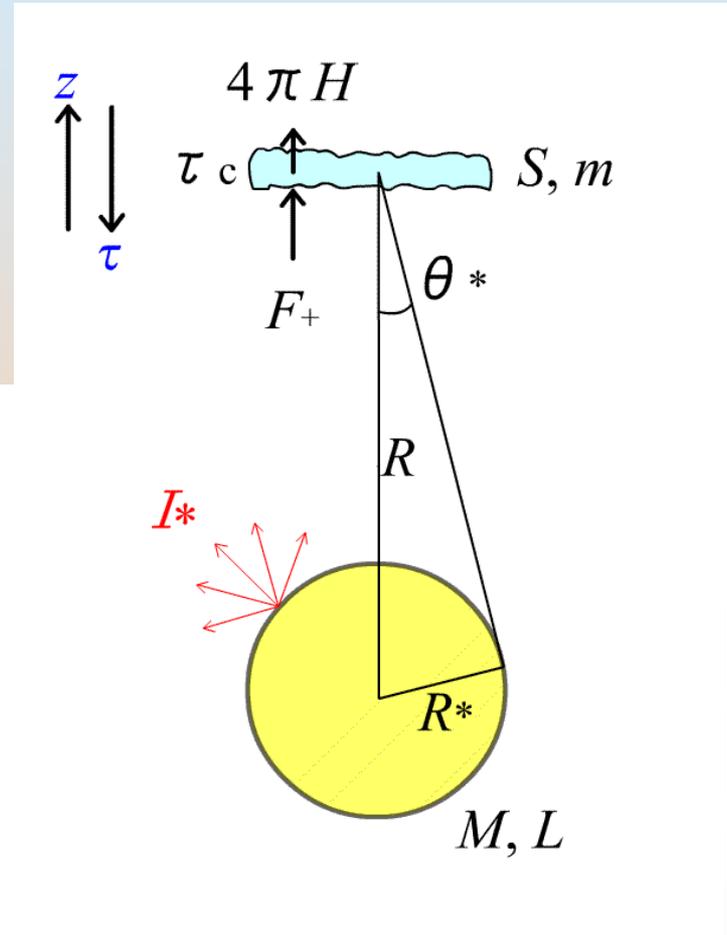
- ❁ 輻射輸送方程式
- ❁ 境界条件
- ❁ 散乱のみ

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - S = I - J,$$

$$I^-(0, \mu \leq 0) = 0,$$

$$I^+(\tau_c, \mu \geq 0) = I_* \quad (\mu_* \leq \mu \leq 1),$$

$$\mu_* = \cos \theta_* = \sqrt{1 - \frac{R_*^2}{R^2}}.$$





3 基礎方程式

- ❁ モーメント方程式
- ❁ 境界条件

❁ 散乱のみ

❁ f : エディントン因子

$$1/3 < f < 1$$

❁ c_0 : 境界係数

$$2 > c_0 > 1$$



$$\frac{dH}{d\tau} = J - S = 0,$$

$$\frac{dK}{d\tau} = H,$$

$$K = fJ$$

$$J(0) \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I d\mu = \frac{1}{2} \int_0^1 I^+ d\mu = c_1 \bar{I}^+,$$

$$H(0) \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I \mu d\mu = \frac{1}{2} \int_0^1 I^+ d\mu = c_2 \bar{I}^+,$$

$$J(0) = c_0 H(0),$$

$$J(\tau_c) = c_1 \bar{I}^- + \frac{1}{2} \int_{\mu_*}^1 I_* d\mu = c_1 \bar{I}^- + \frac{1}{2} I_* (1 - \mu_*),$$

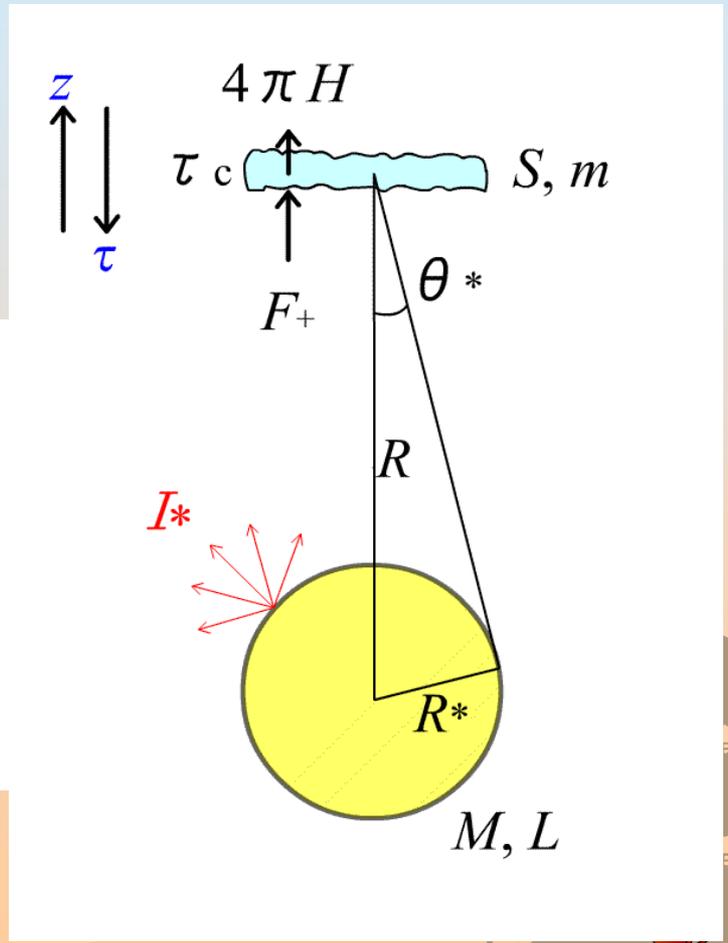
$$H(\tau_c) = -c_2 \bar{I}^- + \frac{1}{2} \int_{\mu_*}^1 I_* \mu d\mu = -c_2 \bar{I}^- + \frac{1}{4} I_* (1 - \mu_*^2),$$

$$J(\tau_c) = -c_0 H(\tau_c) + I_* \frac{2 - \mu_* - \mu_*^2}{2}.$$



3 基礎方程式

- 運動方程式
- ネットフラックス



$$\frac{dv}{dt} = -\frac{GM}{R^2} + \frac{S}{mc} F_{\text{net}},$$

$$F_{\text{net}} = F^+ + 4\pi H^-(\tau_c) - 4\pi H^+(0).$$

$$F^+ = \frac{L}{4\pi R^2} = \pi I_* \frac{R_*^2}{R^2} = \pi I_* (1 - \mu_*^2).$$





輻射輸送方程式の数値解

❁ 輻射輸送方程式を数値的に解く

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - S = I - J,$$

$$I^-(0, \mu \leq 0) = 0,$$

$$I^+(\tau_c, \mu \geq 0) = I_* \quad (\mu_* \leq \mu \leq 1),$$

$$\mu_* = \cos \theta_* = \sqrt{1 - \frac{R_*^2}{R^2}}.$$

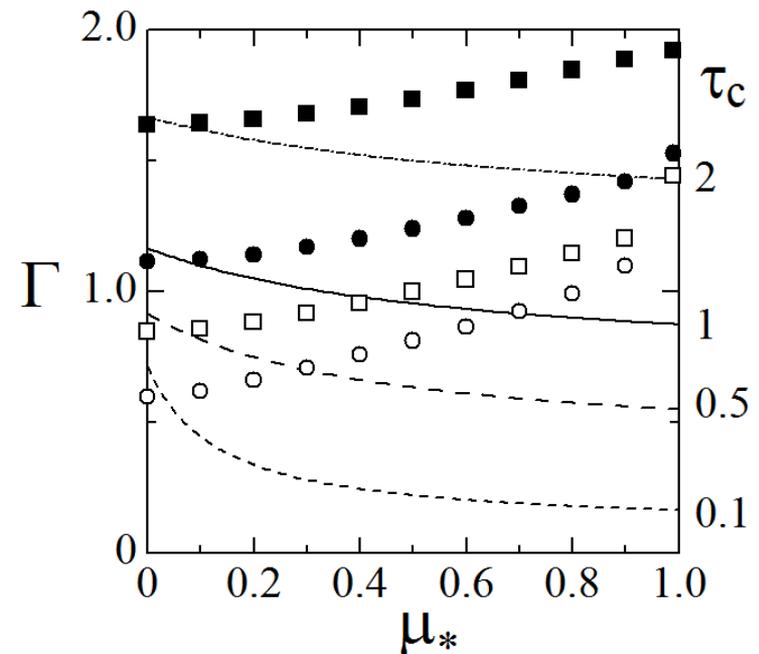
❁ 数値解: ■、●、□、○

❁ initial guess 解析解の J

❁ 定義より J, H を計算

❁ 収束するまで繰り返す

❁ 定義より $H(0), H(\tau_c)$

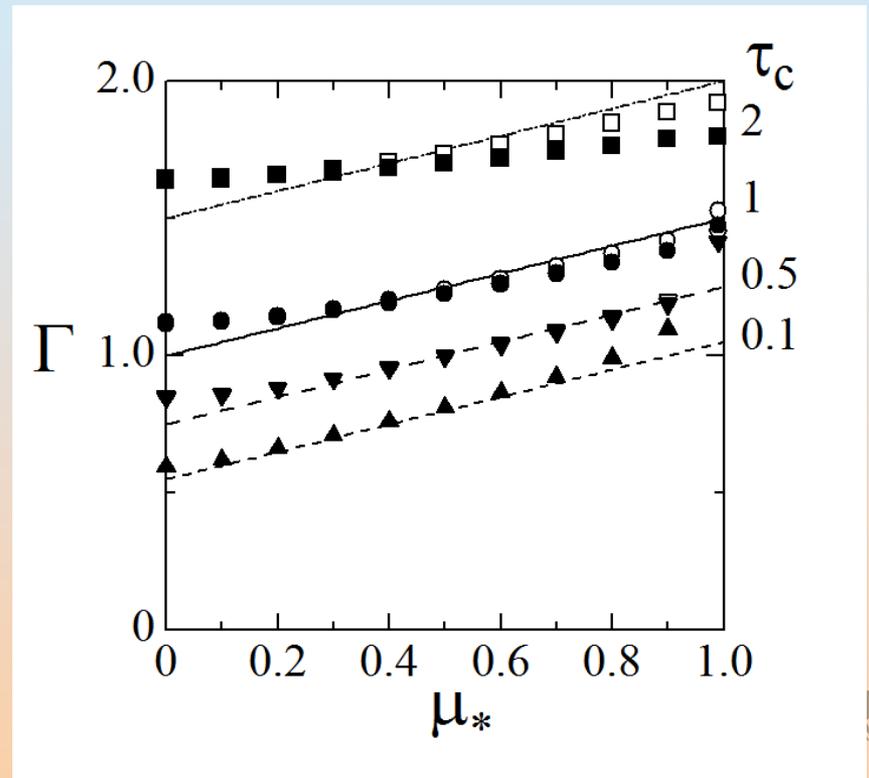




4 トムソン散乱の場合

- ❁ 等方散乱 □
- ❁ トムソン散乱 ■

- ❁ 臨界条件はやや下がる
- ❁ ↑
- ❁ $\tau > 1, \mu^* \rightarrow 1$ のとき
- ❁ 後方散乱が重要になる





非等方散乱 Fukue 2012



位相関数

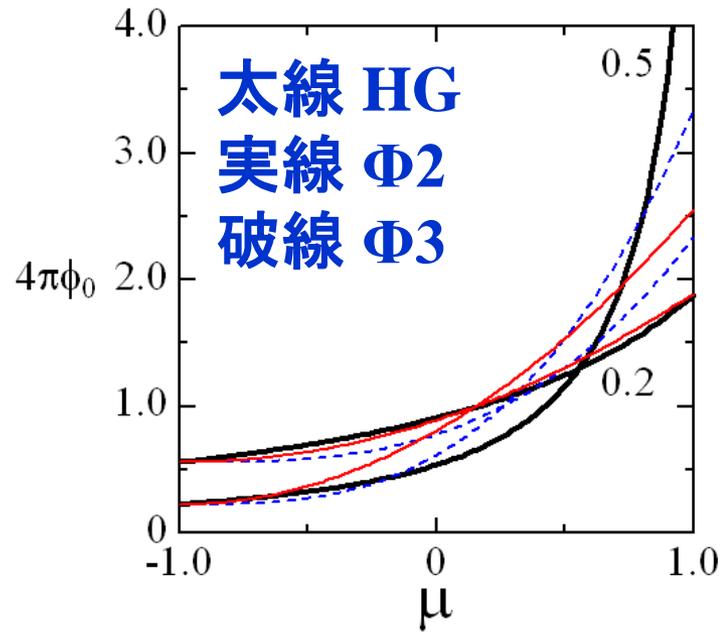
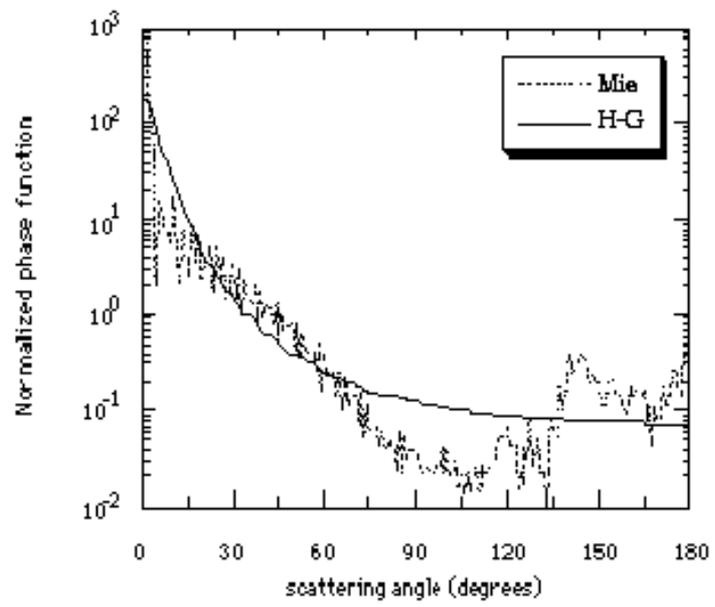
等方 - 非等方

❁ Henyey-Greenstein(1941) ❁ 本研究

$$0 < a < \infty$$

$$\phi_{HG} = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}},$$

$$\phi_2 = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{1 + \frac{4}{3}a} [1 + a(1 + \mu)^2],$$

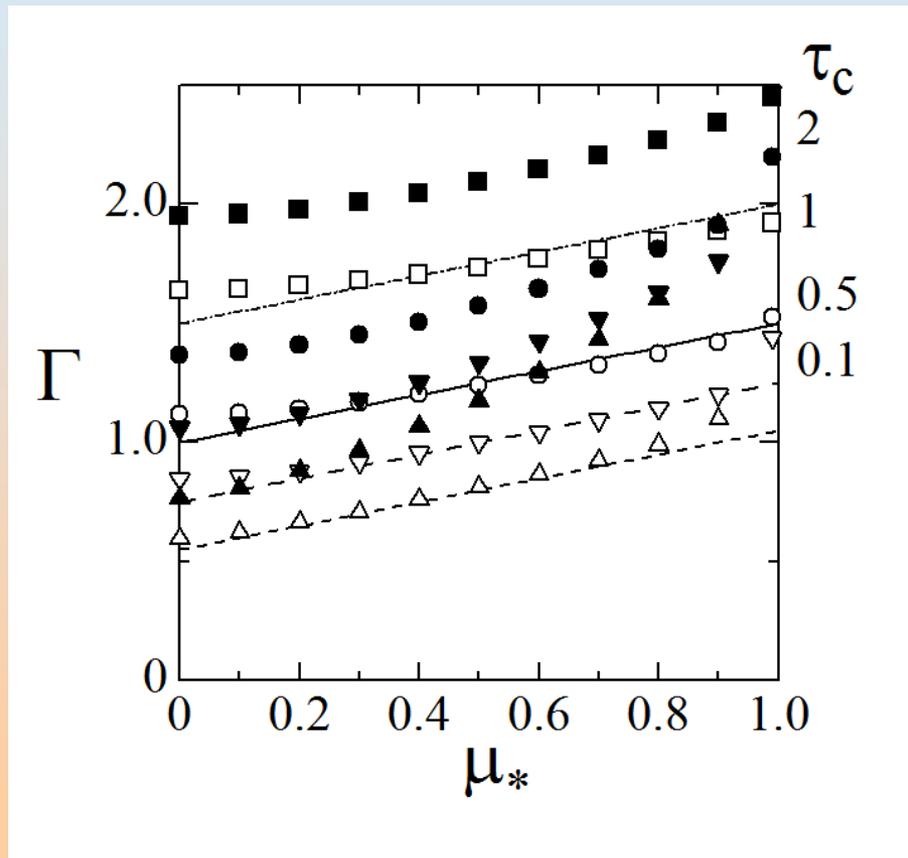




4 異方散乱の場合

- 等方散乱 □
- 異方散乱 ■

- 臨界条件は上がる
- ↑
- 前方散乱が大きいので
- 下面アルベドが小さくなる





6 吸収・放射のみの場合

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - S :$$

$$I^-(0, \mu \leq 0) = 0,$$

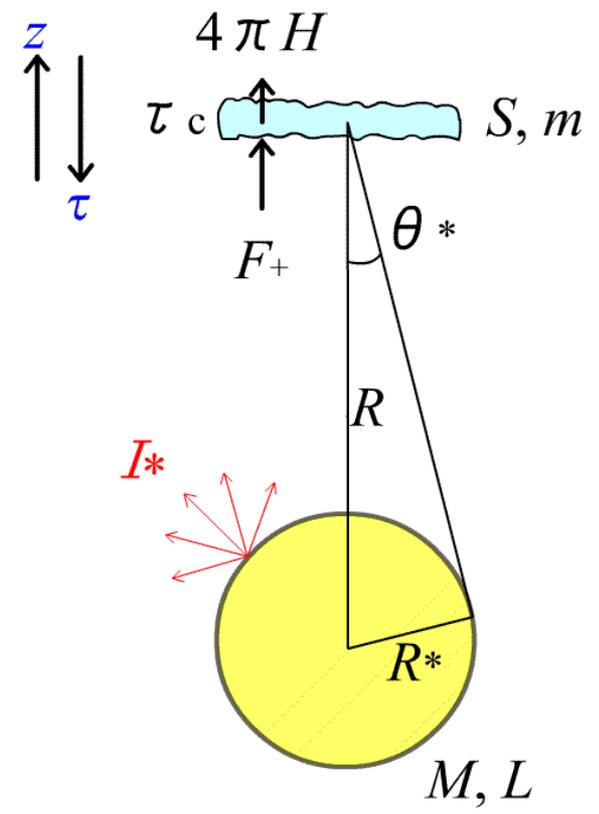
$$I^+(\tau_c, \mu \geq 0) = I_* \quad (\mu_* \leq \mu \leq 1),$$

$$\mu_* = \cos \theta_* = \sqrt{1 - \frac{R_*^2}{R^2}}.$$

- $S=B=\sigma T^4/\pi=(1-A)W_H I_*$

- $A=0$

- $W_H=(1-\mu_*^2)/4$





5 吸収・放射のみの場合

☼ 等方散乱 □

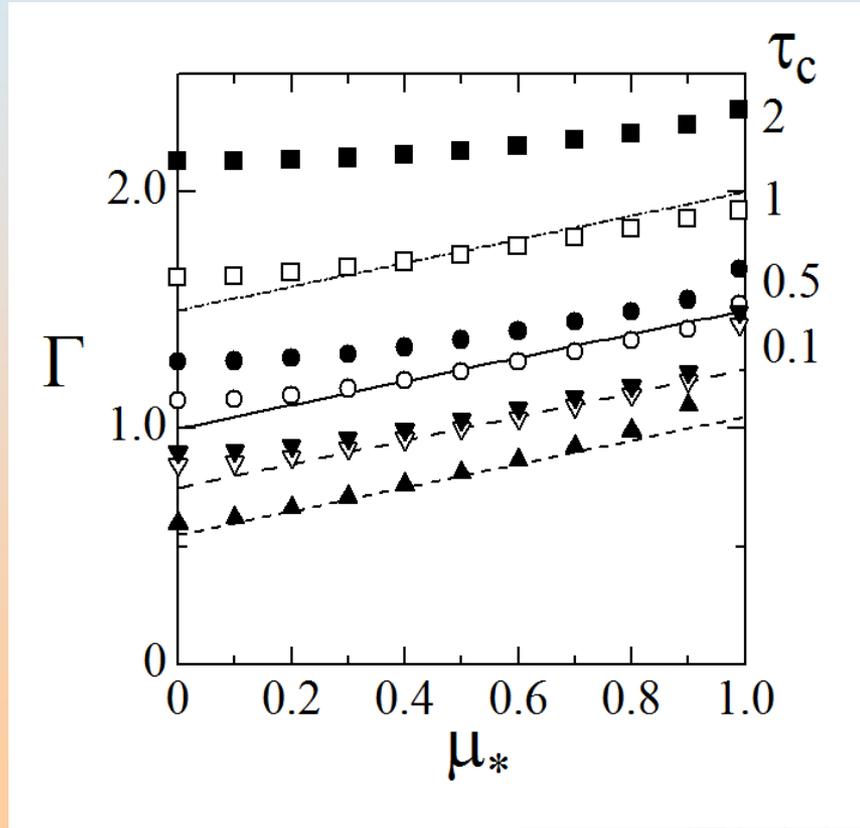
☼ 吸収・放射のみ ■

☼ 臨界条件は上がる

☼ ↑

☼ 雲からの放射なので

☼ 上下の対称性がよくなる



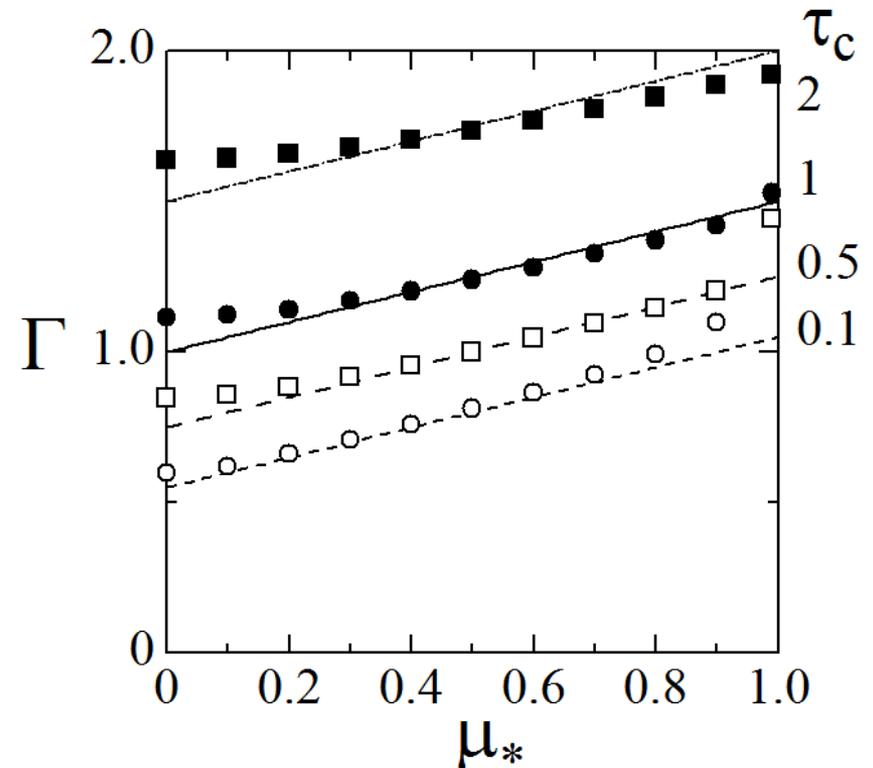


6 層雲臨界条件の近似公式

$$\Gamma = \frac{1 + \mu_* + \tau_c}{2}$$

$$\frac{1 + \tau_c}{2} \leq \Gamma \leq \frac{2 + \tau_c}{2}$$

- ❁ 数值解: ■、●、□、○
- ❁ 近似公式: 直線





6 層雲のエディントン振動

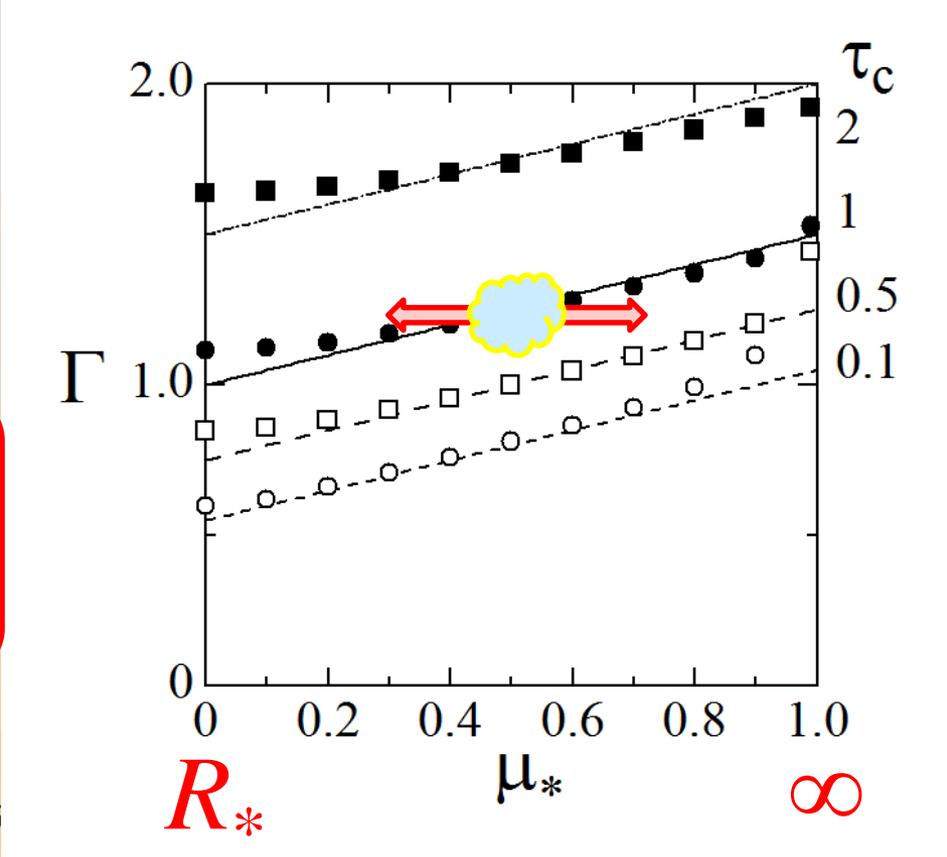
$$\Gamma = \frac{1 + \mu_* + \tau_c}{2}$$

$$\frac{1 + \tau_c}{2} \leq \Gamma \leq \frac{2 + \tau_c}{2}$$

- 数値解: ■、●、□、○
- 近似公式: 直線

- 安定な平衡点 $R=R_0$
- 平衡点振動

$$\omega^2 = \frac{GM}{R_0^3} \frac{1}{2\Gamma} \frac{R_*^2 / R_0^2}{\sqrt{1 - R_*^2 / R_0^2}}$$





8 今後の問題、応用

~~❁ scattering only~~

- thermal case

❁ isolated stratus

- covering/overlapping
- back scattering

❁ Newtonian

- relativistic effect
- terminal velocity

❁ Accretion

- Supercritical accretion
- SMBH formation

❁ Wind

- BAL quasar
- UFO

❁ Observational Properties

- AGN
- Sgr A*

