

降着円盤上空の運動層雲中での相対論的輻射輸送

インフィニット・ストラトスの 運動特性と放射性能

Radiative Transfer in a Moving Stratus
Irradiated by a Luminous Source
Magic Speed, Dynamics, and Flux

福江 純 @ 大阪教育大学





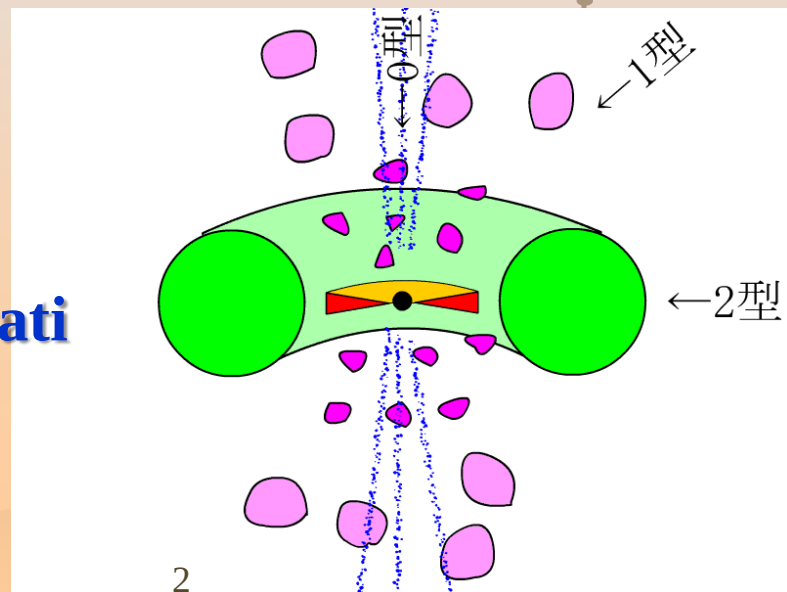
降着円盤周辺環境

雲塊cloudsや層雲stratiが飛び回っている？

❁ 超臨界降着円盤はもちろん標準降着円盤の場合でも、周辺はガスだらけ

- Inflowing gas
- Rotating debris
- Outflowing wind
- High speed jets
- Floating and Moving clouds/strati

➤ 晴天の日はない！



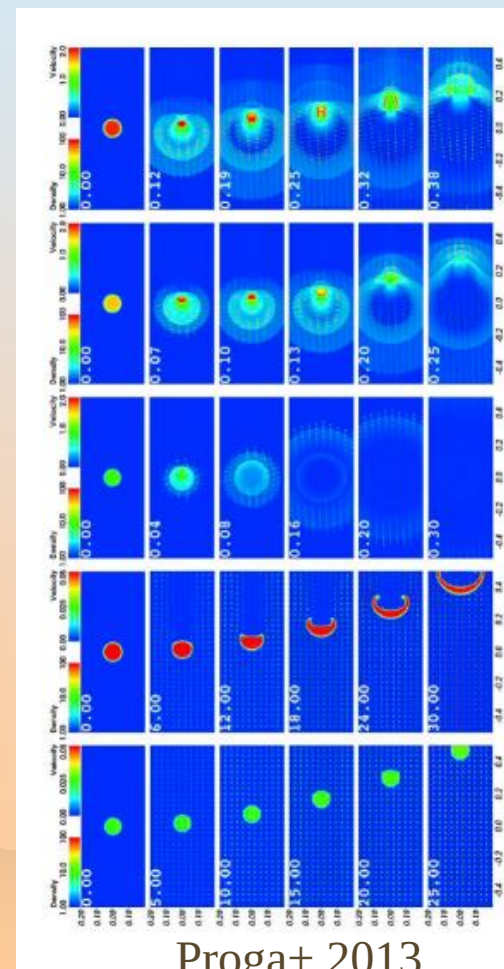


降着円盤周辺環境

雲塊cloudsや層雲stratiが飛び回っている？

❁ 雲塊cloudsや層雲stratiの影響

- エネルギーの授受 heating
 - 加熱・再放射→光源のスペクトルが変化する
- 運動量の授受 dynamics
 - 吸収・散乱→加速される
- 輻射輸送効果 translucent effect
 - 散乱などによって光源の像がぼやける
 - 吸収再放射の輻射輸送
- 相対論的效果 relativistic effect
 - 相対論的な加速 magic speed, dynamics
 - 相対論的輻射輸送 flux, relativistic RT



観測面でさまざまな影響

2014/3/23

2014/3/31 in Tokyo





マジックスピード ード magical speed (Icke 1989)



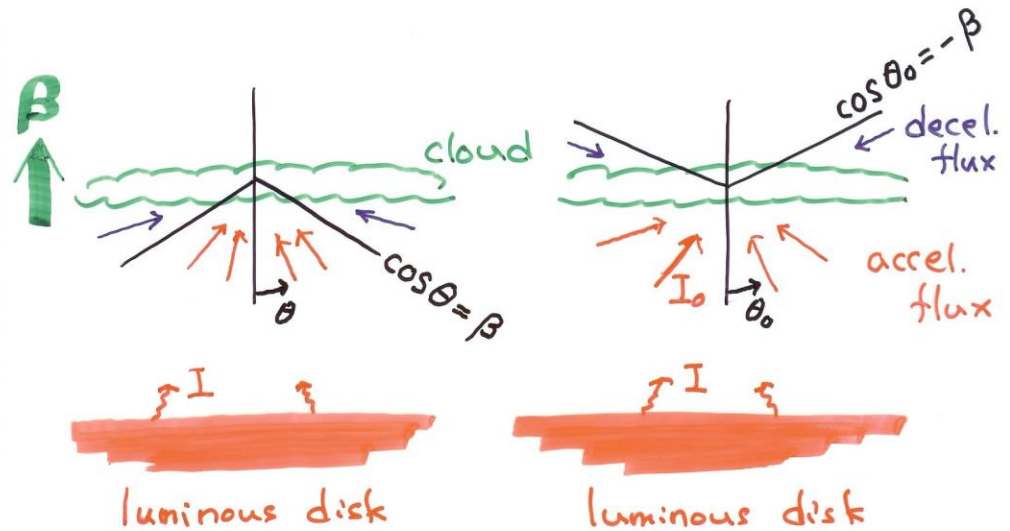
2014/3/23

201

Radiation Drag

Labo

Co moving



$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_0 + \beta}{1 + \beta \cos \theta_0}$$

$$\frac{\nu_0}{\nu} = \frac{1}{\gamma (1 + \beta \cos \theta_0)}$$

$$I_0 = \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^4 I$$

for infinite disk
with uniform brightness

$$\beta_{\text{eq}} = \frac{4 - \sqrt{7}}{3} \sim 0.45$$

magic speed (Icke 1989)

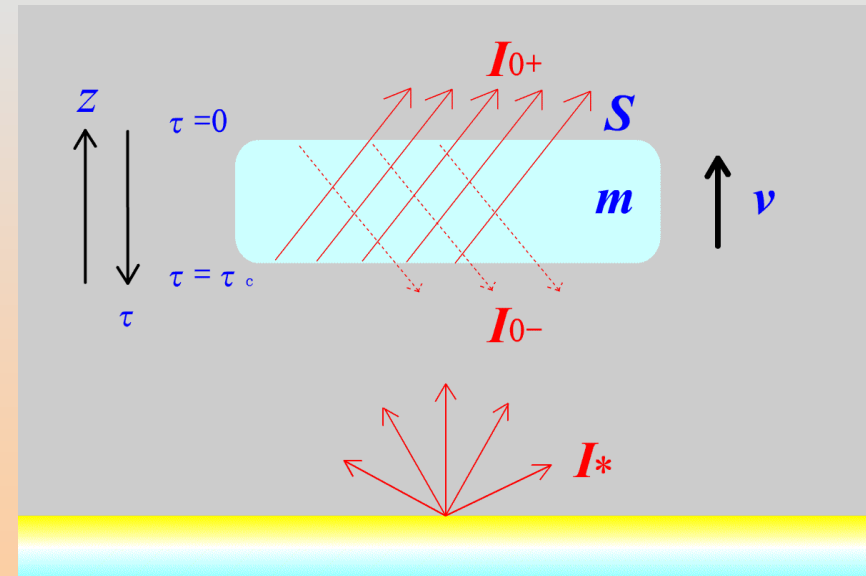


幾何学的に薄い層雲

1 Finite Stratus

❁ 目的:

- Icke (1989) のマジックスピードは点粒子(電子)に対して評価したもの
- ガス雲(stratus)の場合、ガス雲全体が受ける運動量などを評価
- 半透明なtranslucent輻射輸送効果も入る
- まず大きさが有限の層雲(finite stratus)の場合





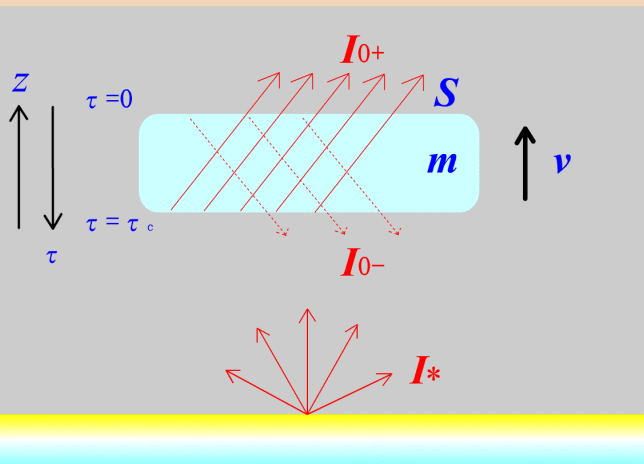
一様光源の周辺輻射場

- 無限に広い平板光源
- 一様な輝度 I^*
- ドップラー効果と光行差

$$\begin{aligned}cE &= 2\pi I^*, \\ F &= \pi I^*, \\ cP &= 2\pi I^*/3.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\nu_0}{\nu} &= \gamma(1 - \beta \cos \theta) = \frac{1}{\gamma(1 + \beta \cos \theta_0)}, \\ \cos \theta &= \frac{\cos \theta_0 + \beta}{1 + \beta \cos \theta_0},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_0^* &= \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^4 I^* = [\gamma(1 - \beta \cos \theta)]^4 I^* \\ &= \frac{1}{[\gamma(1 + \beta \cos \theta_0)]^4} I^*.\end{aligned}$$

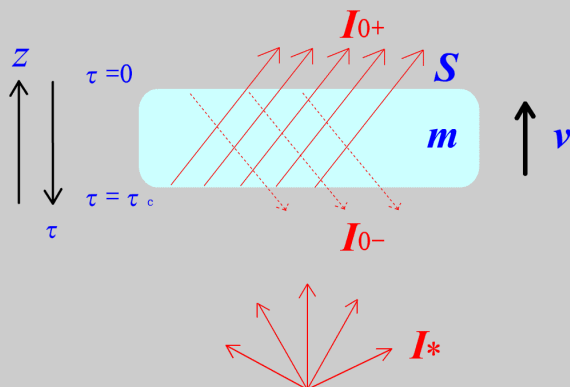




一様光源の周辺輻射場

- 下面での共動系流束
- 上面での共動系流束

- マジックスピード



$$\begin{aligned}
 F_0^+ &= \int_0^{\pi/2} I_0^* \cos \theta_0 d\Omega_0 \\
 &= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0}{(1 + \beta \cos \theta_0)^4} \\
 &= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \frac{3 + \beta}{6(1 + \beta)^3} = \pi I^* \gamma^2 \frac{(3 + \beta)(1 - \beta)^3}{3}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_0^- &= \int_{\pi/2}^{\cos^{-1}(-\beta)} I_0^* \cos \theta_0 d\Omega_0 \\
 &= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \frac{3\beta^2 - \beta^4}{6(1 - \beta^2)^3} = \pi I^* \gamma^2 \frac{3\beta^2 - \beta^4}{3}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{S}{c} \gamma F_0 &= \frac{S}{c} \gamma [(1 + A_+) F_0^+ - (1 + A_-) F_0^-] \\
 &= \frac{S}{c} \gamma^3 \pi I^* \frac{1}{3} [(1 + A_+) (3 + \beta)(1 - \beta)^3 \\
 &\quad - (1 + A_-) (-3\beta^2 - \beta^4)], \\
 &= \frac{S}{c} (1 + A) \pi I^* \gamma^3 \left(1 - \frac{8}{3} \beta + \beta^2 \right),
 \end{aligned}$$

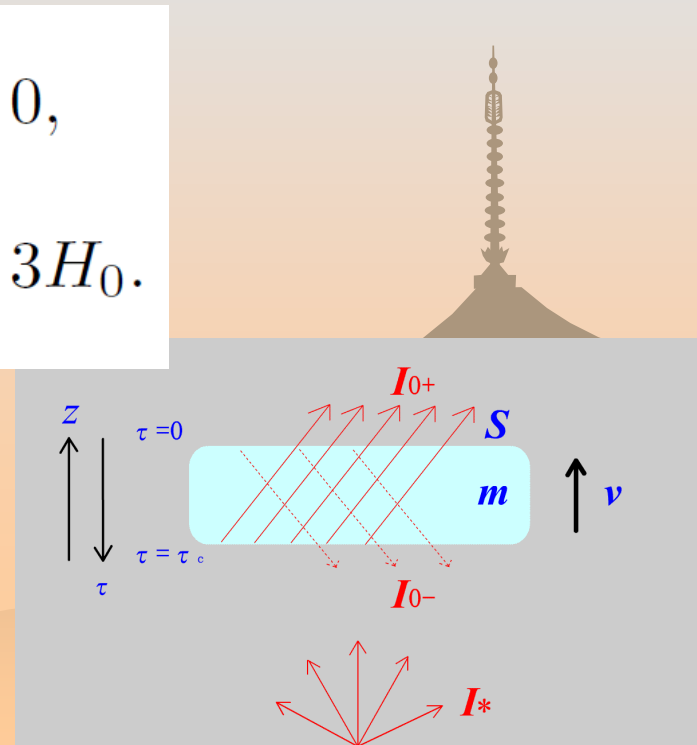


基礎方程式

- 半透明な層雲
 - 平行平板大気
 - 光学的厚みは有限 τ_c
 - エディントン近似
 - 散乱のみ(RE)
 - NRの基礎方程式
-
- 境界条件: 光源の照射

$$\frac{dH_0}{d\tau} = \varepsilon_0 J_0 - \frac{1}{\kappa_0 + \sigma_0} \frac{j_0}{4\pi},$$
$$\frac{dK_0}{d\tau} = \frac{1}{3} \frac{dJ_0}{d\tau} = H_0,$$

$$\frac{dH_0}{d\tau} = 0,$$
$$\frac{dJ_0}{d\tau} = 3H_0.$$





境界条件

❁ 上面の境界条件

❁ 下面の境界条件

$$\begin{aligned}
 J_0(0) &\equiv \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^+ d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_{-\beta}^0 I_0^* d\mu_0, \\
 &= \frac{1}{2} I_0^+ + I^* \gamma^2 \frac{\beta}{6} (3 - 3\beta^2 + \beta^4), \\
 H_0(0) &\equiv \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^+ \mu_0 d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_{-\beta}^0 I_0^* \mu_0 d\mu_0, \\
 &= \frac{1}{4} I_0^+ + I^* \gamma^2 \frac{-3\beta^2 + \beta^4}{12}.
 \end{aligned}$$

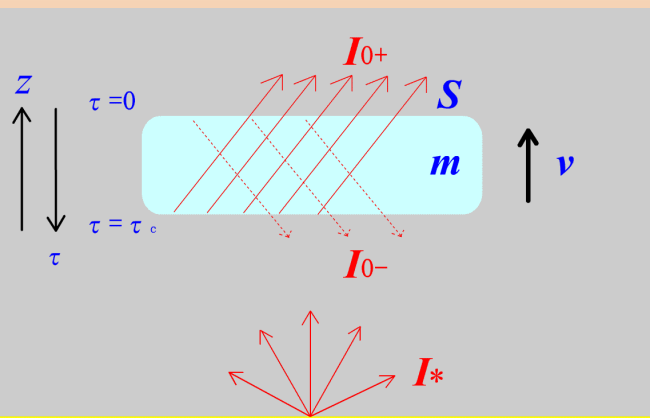
$$J_0(0) - 2H_0(0) = W(0)I^*,$$

$$W(0) \equiv \frac{\gamma^2}{6} [\beta(3 - 3\beta^2 + \beta^4) + 3\beta^2 - \beta^4].$$

$$\begin{aligned}
 J_0(\tau_c) &\equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^0 I_0^- d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^* d\mu_0, \\
 &= \frac{1}{2} I_0^- + I^* \gamma^2 \frac{(3 + 3\beta + \beta^2)(1 - \beta)^3}{6}, \\
 H_0(\tau_c) &\equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^0 I_0^- \mu_0 d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^* \mu_0 d\mu_0, \\
 &= -\frac{1}{4} I_0^- + I^* \gamma^2 \frac{(3 + \beta)(1 - \beta)^3}{4}
 \end{aligned}$$

$$J_0(\tau_c) + 2H_0(\tau_c) = W(\tau_c)I^*,$$

$$W(\tau_c) \equiv \frac{\gamma^2}{6} (1 - \beta)^3 (6 + 4\beta + \beta^2).$$

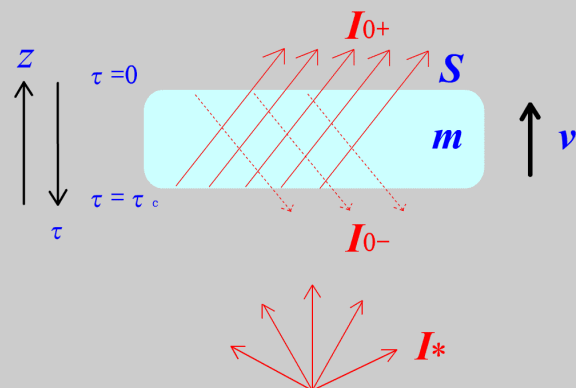




層雲内部の輻射場の解析解

❁ 非相対論的解析解

$$H_0(\tau) = H_{00},$$
$$J_0(\tau) = 3H_{00}\tau + J_{00},$$



$$J_0(\tau) = 3 \frac{W(\tau_c) - W(0)}{4 + 3\tau_c} I^* \tau$$
$$+ 2 \frac{W(\tau_c) - W(0)}{4 + 3\tau_c} I^* + W(0) I^*,$$

$$H_0(\tau) = \frac{W(\tau_c) - W(0)}{4 + 3\tau_c} I^*,$$

$$W(\tau_c) - W(0) = \gamma^2 \frac{6 - 17\beta + 4\beta^2 + 6\beta^3 - 2\beta^5}{6}.$$



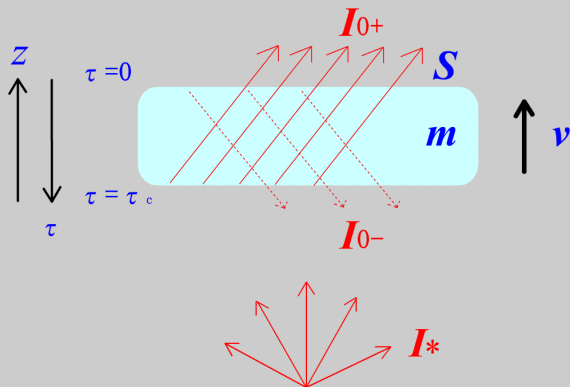


アルベドと輻射力

✿ アルベド

$$\begin{aligned}
 A^+ &\equiv \frac{F_0^+ - 4\pi H_0}{F_0^+} \\
 &= 1 - \frac{2}{4 + 3\tau_c} \frac{6 - 17\beta + 4\beta^2 + 6\beta^3 - 2\beta^5}{(3 + \beta)(1 - \beta)^3}, \\
 A^- &\equiv \frac{F_0^- + 4\pi H_0}{F_0^-} \\
 &= 1 + \frac{2}{4 + 3\tau_c} \frac{6 - 17\beta + 4\beta^2 + 6\beta^3 - 2\beta^5}{3\beta^2 - \beta^4},
 \end{aligned}$$

✿ 輻射力



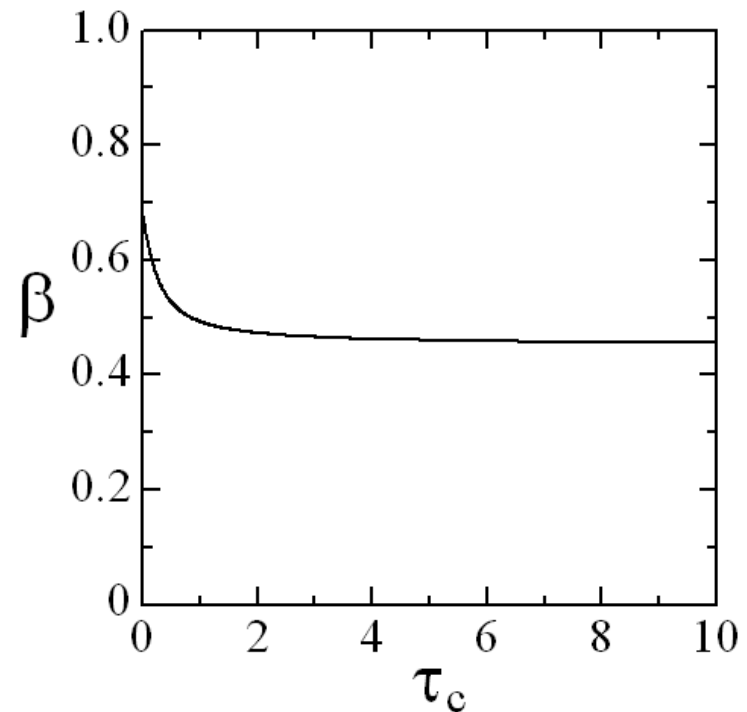
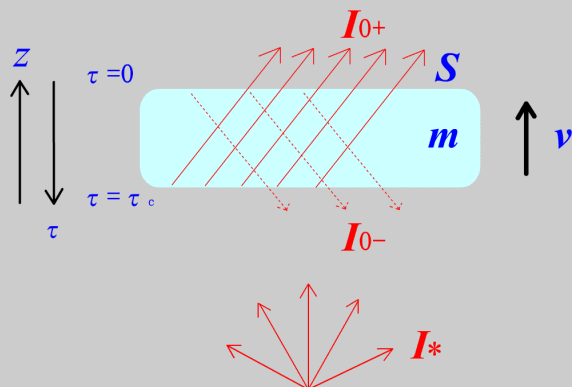
$$\begin{aligned}
 \frac{S}{c} \gamma F_0 &= \frac{S}{c} \gamma [(1 + A_+) F_0^+ - (1 + A_-) F_0^-] \\
 &= \frac{S}{c} \pi I^* \frac{\gamma^3}{3} \left[6 - 16\beta + 6\beta^2 \right. \\
 &\quad \left. - \frac{4}{4 + 3\tau_c} (6 - 17\beta + 4\beta^2 + 6\beta^3 - 2\beta^5) \right].
 \end{aligned}$$





マジックスピード

- ❁ τ が小さいと輻射が通過してしまうので、下面からの輻射も上面からの輻射も弱まるが、上面からの方が影響が大きい。



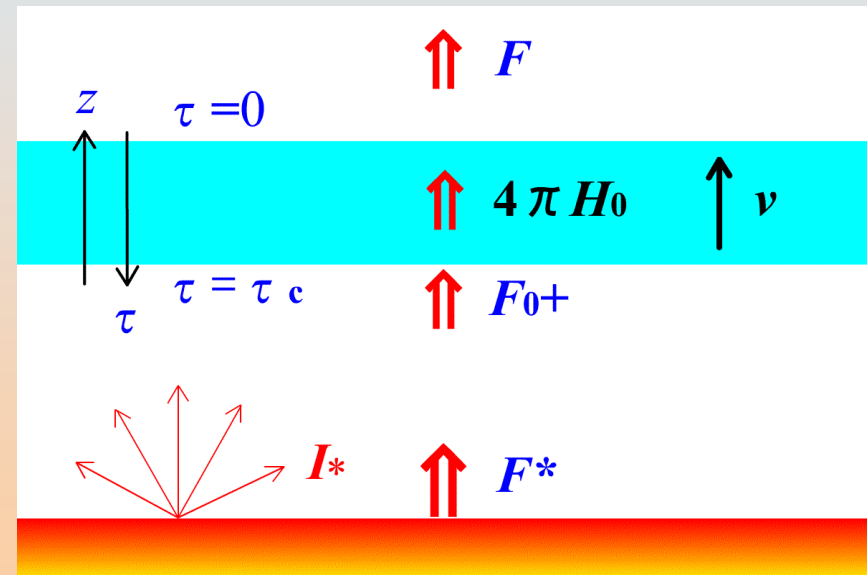


幾何学的に薄い層雲

2 Infinite Stratus

❁ 目的:

- Icke (1989) のマジックスピードは点粒子(電子)に対して評価したもの
- ガス雲(stratus)の場合、ガス雲全体が受ける運動量などを評価
- 半透明なtranslucent輻射輸送効果も入る
- 次に無限に広がった層雲(infinite stratus)





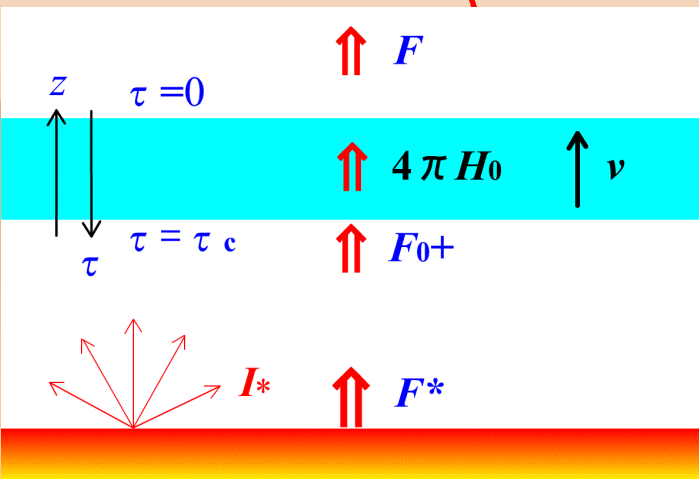
一様光源の周辺輻射場

- 無限に広い平板光源
- 一様な輝度 I^*
- ドップラー効果と光行差

$$\begin{aligned}cE &= 2\pi I^*, \\ F &= \pi I^*, \\ cP &= 2\pi I^*/3.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\nu_0}{\nu} &= \gamma(1 - \beta \cos \theta) = \frac{1}{\gamma(1 + \beta \cos \theta_0)}, \\ \cos \theta &= \frac{\cos \theta_0 + \beta}{1 + \beta \cos \theta_0},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_0^* &= \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^4 I^* = [\gamma(1 - \beta \cos \theta)]^4 I^* \\ &= \frac{1}{[\gamma(1 + \beta \cos \theta_0)]^4} I^*.\end{aligned}$$

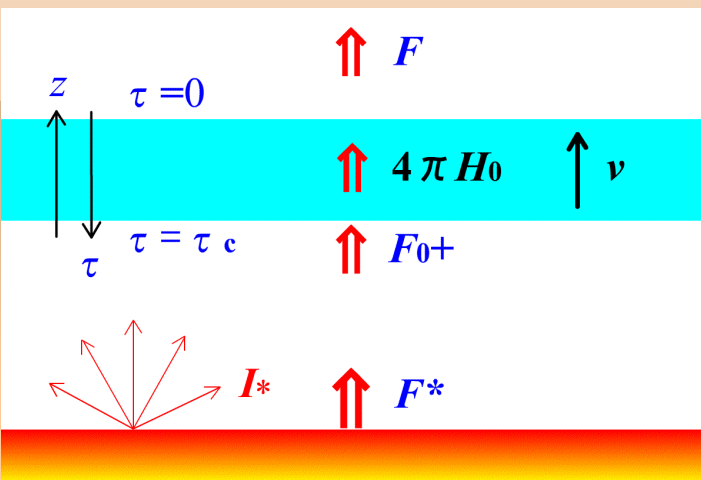




一様光源の周辺輻射場

- 下面での共動系流束
- 上面での共動系流束

マジックスピード



$$F_0^+ = \int_0^{\pi/2} I_0^* \cos \theta_0 d\Omega_0$$

$$= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0}{(1 + \beta \cos \theta_0)^4}$$

$$= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \frac{3 + \beta}{6(1 + \beta)^3} = \pi I^* \gamma^2 \frac{(3 + \beta)(1 - \beta)^3}{3}.$$

$$F_0^- = \int_{\pi/2}^{\cos^{-1}(-\beta)} I_0^* \cos \theta_0 d\Omega_0$$

$$= \frac{2\pi I^*}{\gamma^4} \frac{3\beta^2 - \beta^4}{6(1 + \beta)^3} = \pi I^* \gamma^2 \frac{3\beta^2 - \beta^4}{3}.$$

$$\frac{S}{c} \gamma F_0 = \frac{S}{c} \gamma [(1 + A_+) F_0^+ - (1 + A_-) F_0^-]$$

$$= \frac{S}{c} \gamma^3 \pi I^* \frac{1}{3} [(1 + A_+) (3 + \beta)(1 - \beta)^3 - (1 + A_-) (-3\beta^2 - \beta^4)],$$

$$= \frac{S}{c} (1 + A) \pi I^* \gamma^3 \left(1 - \frac{8}{3} \beta + \beta^2 \right),$$



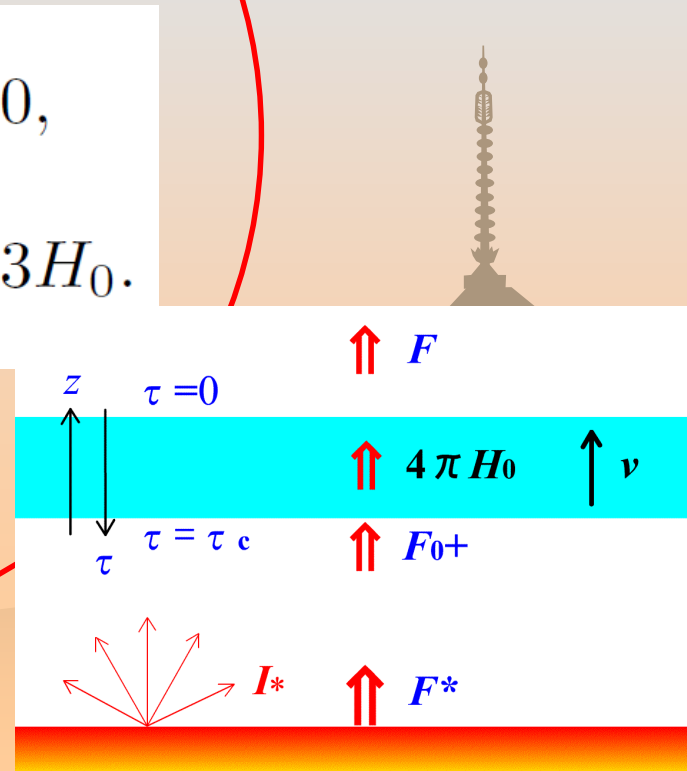
基礎方程式

- 半透明な層雲
 - 平行平板大気
 - 光学的厚みは有限 τ_c
 - エディントン近似
 - 散乱のみ(RE)
 - NRの基礎方程式
-
- 境界条件: 光源の照射

$$\frac{dH_0}{d\tau} = \varepsilon_0 J_0 - \frac{1}{\kappa_0 + \sigma_0} \frac{j_0}{4\pi},$$

$$\frac{dK_0}{d\tau} = \frac{1}{3} \frac{dJ_0}{d\tau} = H_0,$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_0}{d\tau} &= 0, \\ \frac{dJ_0}{d\tau} &= 3H_0. \end{aligned}$$





境界条件

❁ 上面の境界条件

❁ 下面の境界条件

$$J_0(0) \equiv \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^+ d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_{-\beta}^0 I_0^* d\mu_0,$$

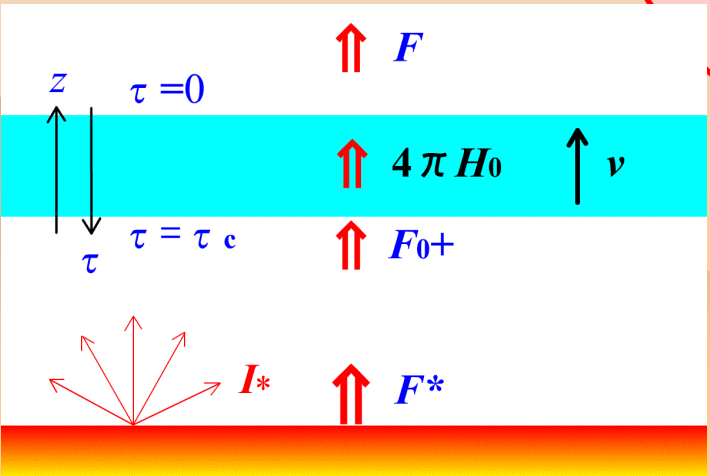
$$J_0(\tau_c) \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^0 I_0^+ d\mu_0 + \frac{1}{2} \int_0^1 I_0^* d\mu_0,$$

$$H_0(0) = W(0)I^*,$$

$$H_0(\tau_c) = -\frac{1}{4}I_0^- + I^*\gamma^2 \frac{(3+\beta)(1-\beta)^3}{6},$$

$$J_0(\tau_c) + 2H_0(\tau_c) = W(\tau_c)I^*,$$

$$W(\tau_c) \equiv \frac{\gamma^2}{6}(1-\beta)^3(6+4\beta+\beta^2).$$





層雲内部の輻射場の解析解

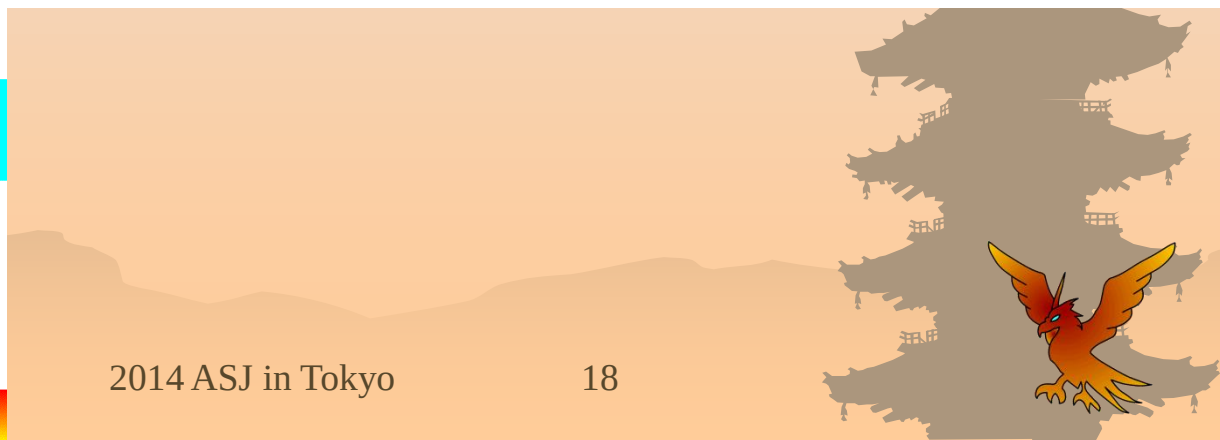
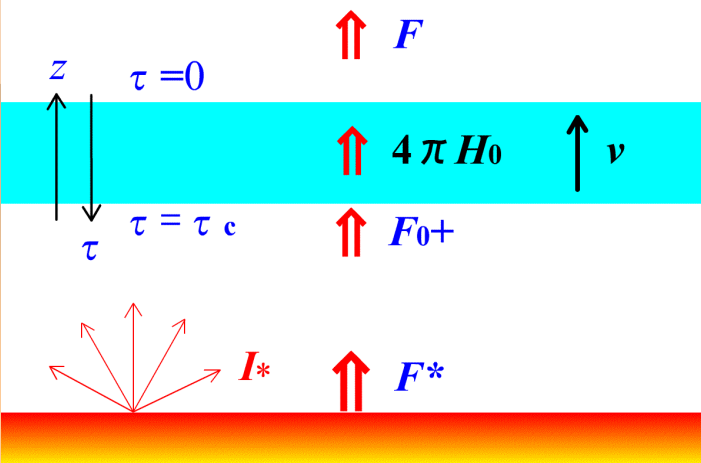
❁ 非相対論的解析解

$$H_0(\tau) = H_{00},$$

$$J_0(\tau) = 3H_{00}\tau + J_{00},$$

$$J_0(\tau) = \frac{3}{4 + 3\tau_c} W(\tau_c) I^* \tau + \frac{2}{4 + 3\tau_c} W(\tau_c) I^*,$$

$$H_0(\tau) = \frac{1}{4 + 3\tau_c} W(\tau_c) I^*.$$





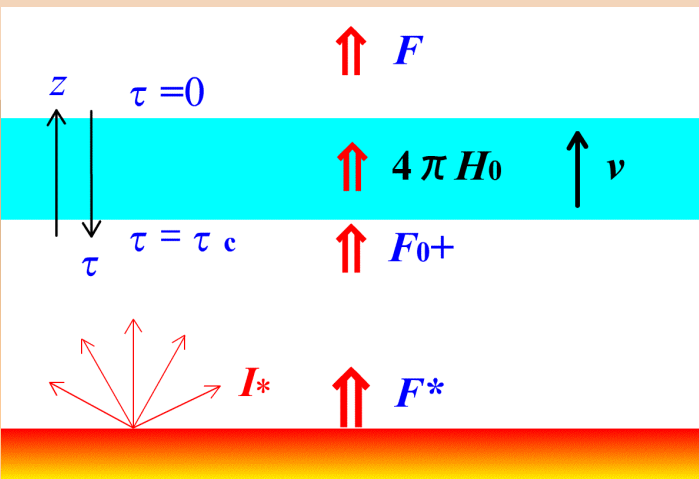
アルベドと輻射力

✿ アルベド

$$A^+ \equiv \frac{F_0^+ - 4\pi H_0}{F_0^+} = 1 - \frac{2}{4 + 3\tau_c} \frac{6 + 4\beta + \beta^2}{3 + \beta}.$$

✿ 輻射力

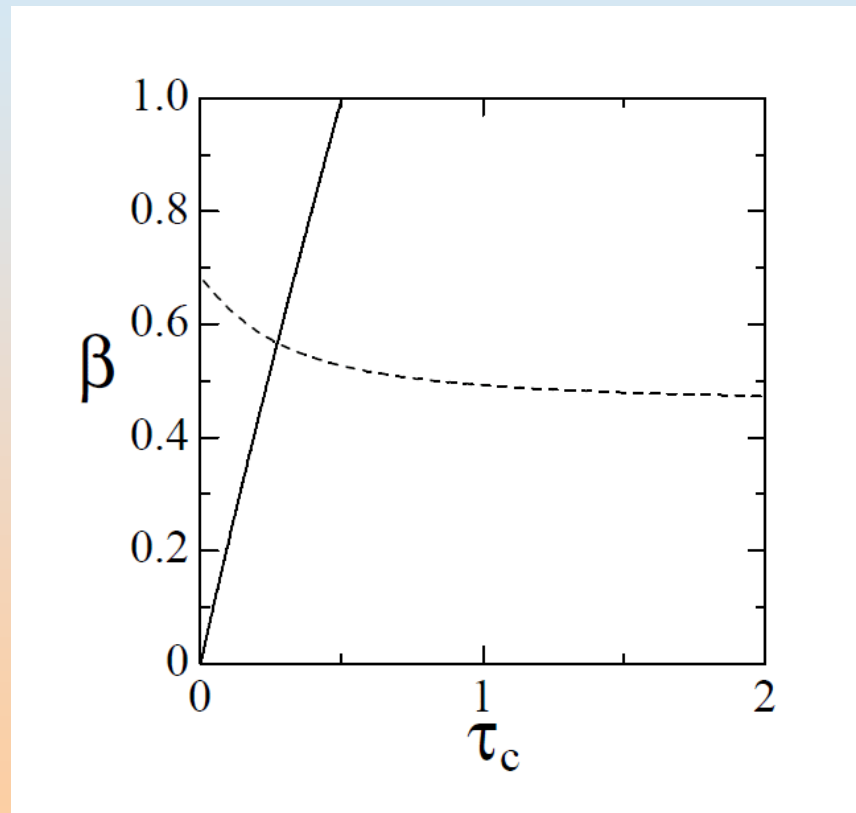
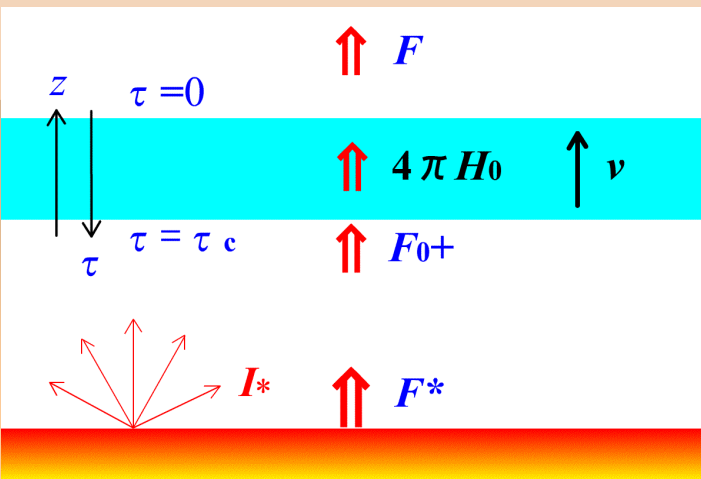
$$\begin{aligned} \frac{1}{c}\gamma F_0 &= \frac{1}{c}\gamma [(1 + A_+) F_0^+ - (1 + A_-) F_0^-] \\ &= \frac{1}{c}\gamma [(2F_0^+ - 4\pi H_0) - (2F_0^- + 4\pi H_0)] \\ &= \frac{1}{c}2\gamma(F_0^+ - 4\pi H_0) \\ &= \frac{1}{c}\pi I^* \gamma^3 \frac{2}{3}(3 + \beta)(1 - \beta)^3 \\ &\quad \left(1 - \frac{2}{4 + 3\tau_c} \frac{6 + 4\beta + \beta^2}{3 + \beta}\right). \end{aligned}$$





マジックスピード

- ❁ Infinite Stratusの場合、
上面から入射がないので、 τ の増加と共にマジックスピードも増加。





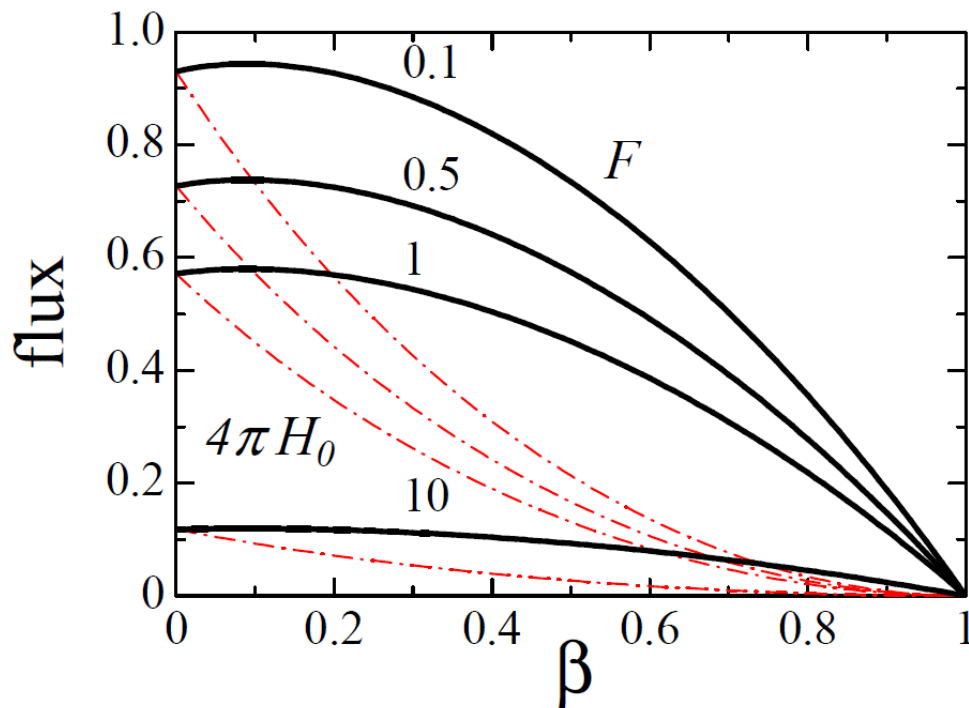
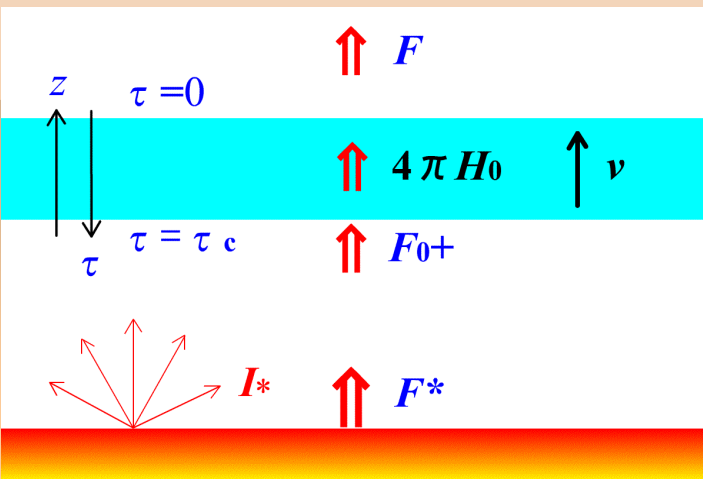
輻射流束：瞬間狀態

❁ 輻射流束

$$F = \gamma^2 [(1 + \beta^2) 4\pi H_0 + \beta(8\pi H_0 + 8\pi H_0/3)]$$

$$= \gamma^2 \left(1 + \frac{8}{3}\beta + \beta^2 \right) 4\pi H_0, \quad (26)$$

$$F = \pi I^* \frac{4}{4 + 3\tau_c} \gamma^4 \left(1 + \frac{8}{3}\beta + \beta^2 \right) \frac{(1 - \beta)^3 (6 + 4\beta + \beta^2)}{6}.$$



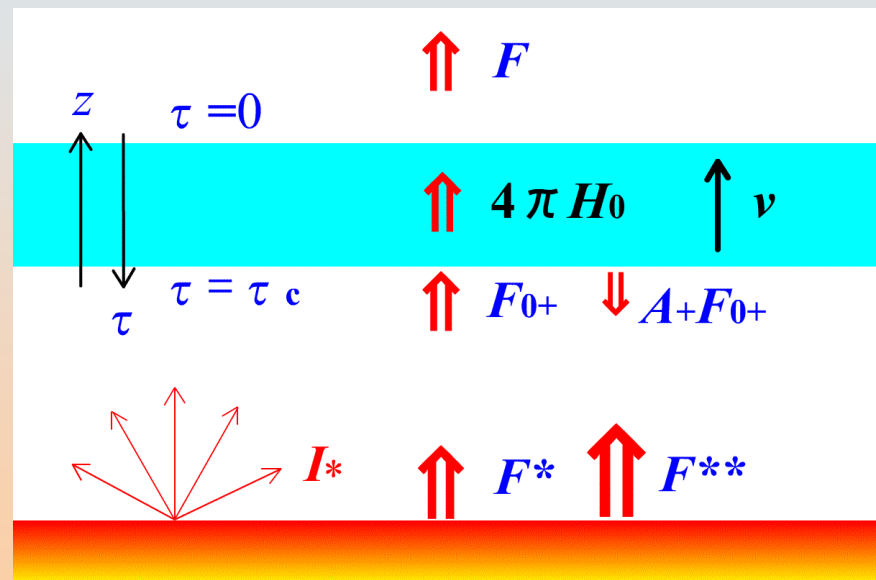


幾何学的に薄い層雲

2 Infinite Stratus: 平衡状態

❁ 目的:

- Icke (1989) のマジックスピードは点粒子(電子)に対して評価したもの
- ガス雲(stratus)の場合、ガス雲全体が受ける運動量などを評価
- 半透明なtranslucent輻射輸送効果も入る



- 次に無限に広がった層雲(infinite stratus)

2014/8/23

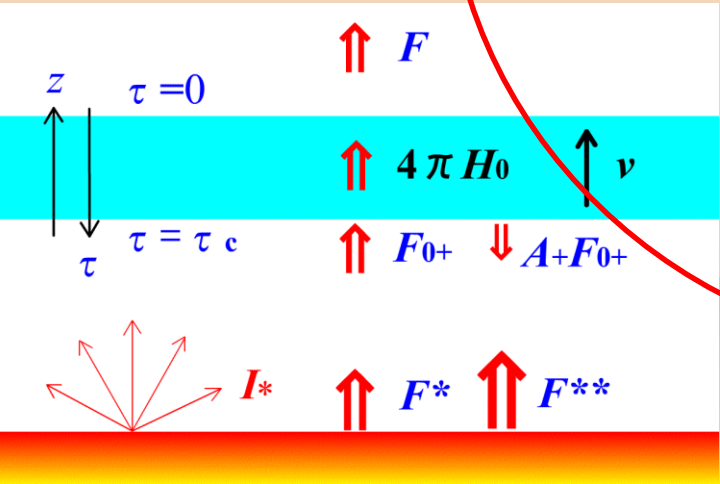
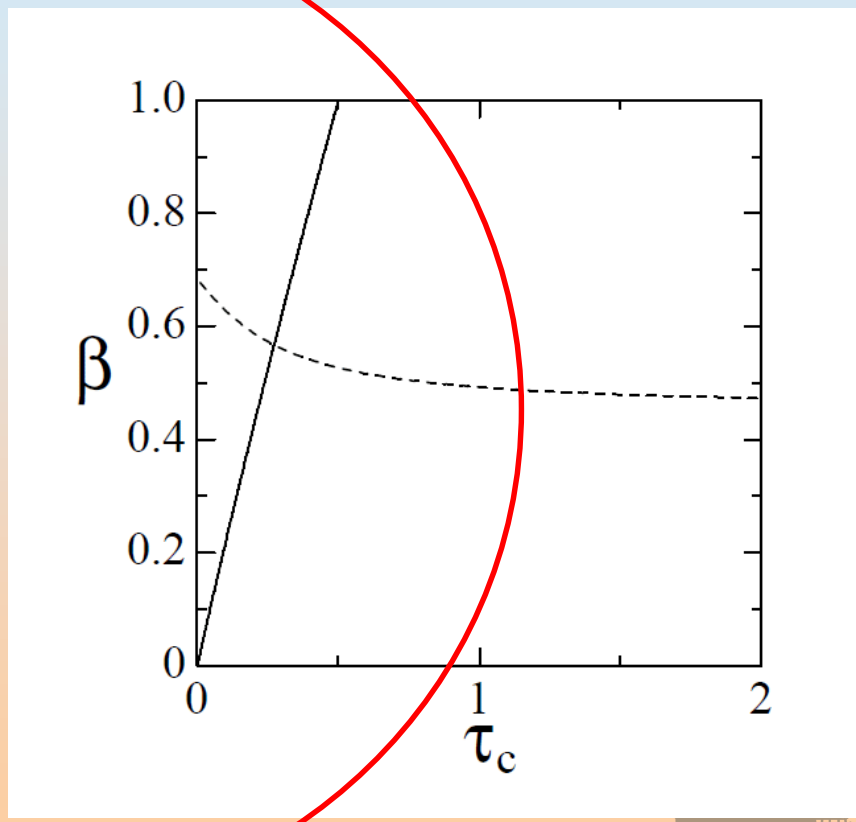
2014 ASJ in Tokyo

22





マジックスピード



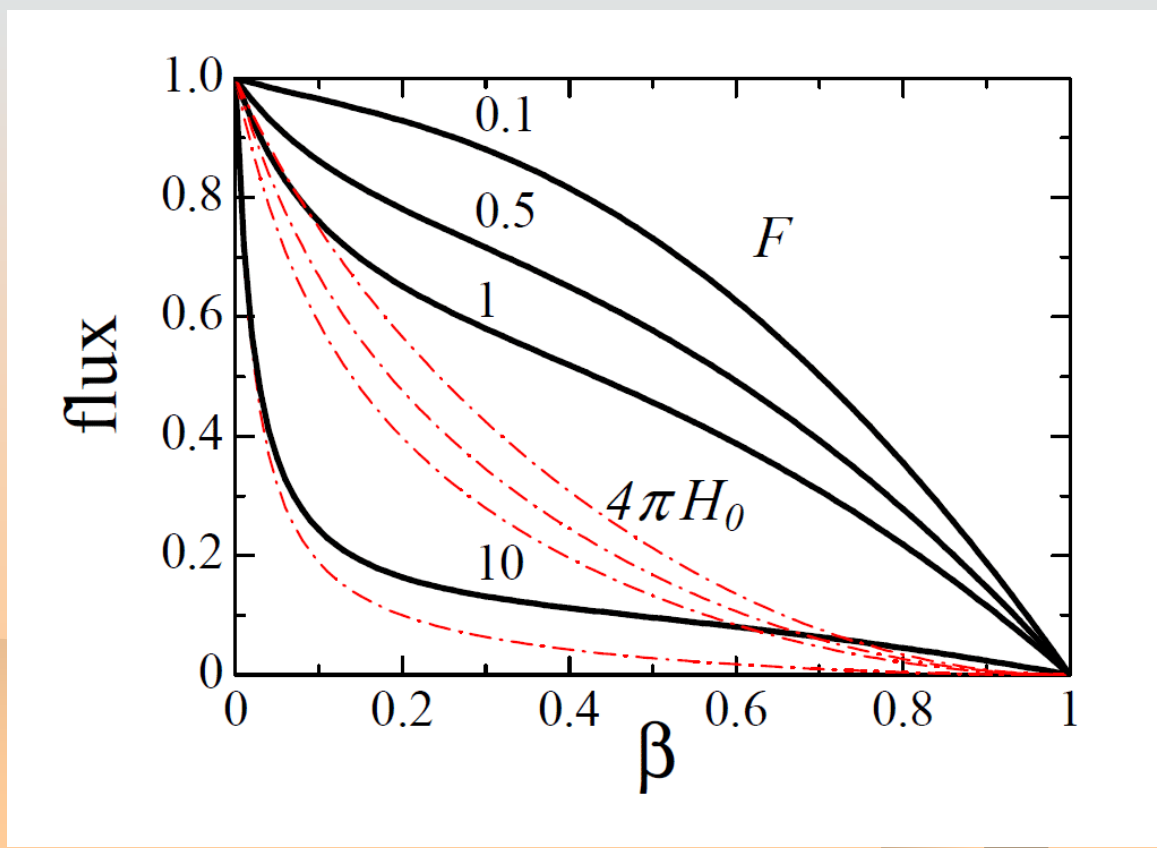
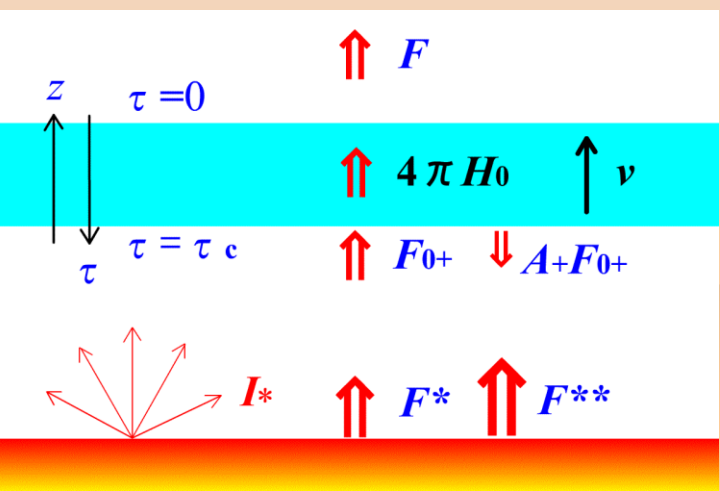


輻射流束：平衡狀態

❁ 輻射流束

❁ Enhanced flux

$$\frac{F^{**}}{F^*} = \frac{1}{1 - \gamma^4 \frac{(3 + \beta)^2 (1 - \beta)^6}{9} \left(1 - \frac{2}{4 + 3\tau_c} \frac{6 + 4\beta + \beta^2}{3 + \beta} \right)}.$$



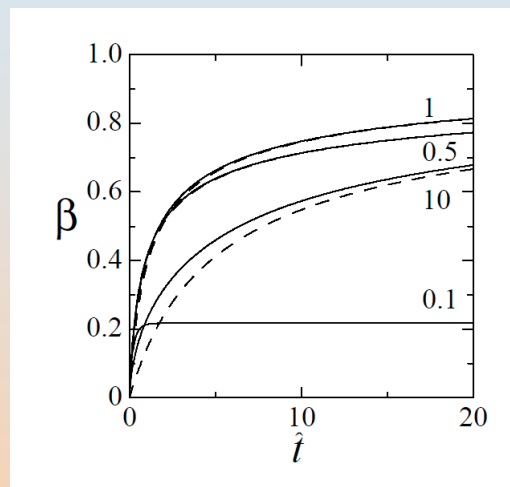


まとめ

❁マジックスピード

❁ $\tau < 1$ でやや変わる

❁加速特性



❁放射性能

— 観測される輻射流束

❁ τ の効果で暗くなる

❁相対論的に暗くなる





今後の課題

- ❁ エディントン近似
 - $\tau < 1$ で悪い
- ❁ 非相対論的解析解
 - 共動系での相対論的解
- ❁ $\tau < 1$ の結果??
- ❁ 相対論的領域??
- ❁ 運動する層雲における相対論的輻射輸送
- ❁ 振動数依存性
- ❁ 放射スペクトル
- ❁ 層雲の形状、非一様性







2014/3/23

2014 ASJ in Tokyo

28

