

輻射輸送の復活

II

第18回 天体スペクトル研究会

@ 京都大学 (2013/03/09)

福江 純 @ 大阪教育大学





話の流れ

- ❁ 輻射輸送と輻射流体力学の重要性
- ❁ 輻射輸送の系譜－日本における輻射輸送研究教育の現状
- ❁ Rutten Lecture、Q&A
- ❁ 輻射輸送研究教育の復活－今後の計画

- ❁ サマースクール2011夏@北海道

- ❁ 新しい研究：

- 降着円盤における散乱や照射
- 球対称流や層雲の見え方：散乱
- 非等方散乱の近似的取り扱い

- ❁ 教科書『輻射輸送と輻射流体力学』



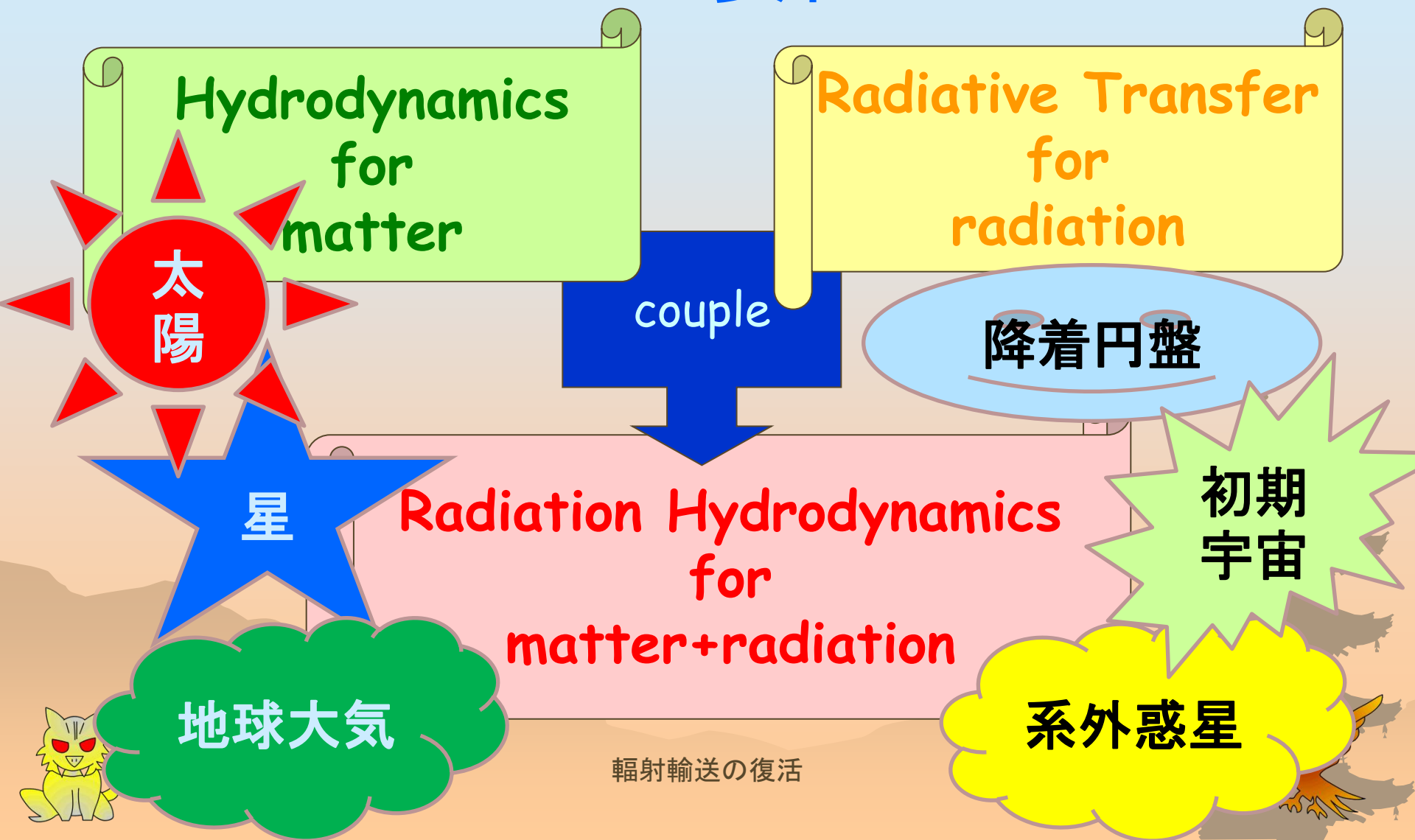
2013/3/9

輻射輸送の復活





輻射輸送と輻射流体力学 の重要性





輻射輸送の系譜

旧世代

新世代

(初期宇宙)

海野和三郎

→ 加藤正二、
正木 功、近藤正明

上野季夫

→ 上杉 明 → 定金晃三

→ 平田龍幸

宮本正太郎 → 小暮智一

竹田洋一？

梅村雅之 → 中本泰史、
(ブラックホール活動)

福江 純

- 相対論的輻射輸送 Δ
- 数値解 (Λ) $\times$
- 振動数依存性 (κ_ν) Δ
- 線輪郭 (Sobolev) $\times$

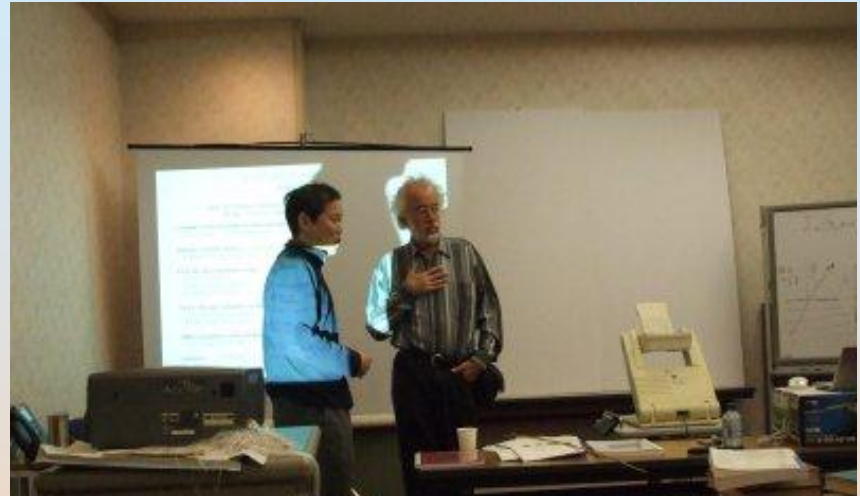
輻射輸送の復活





R.J. Rutten Lecture @NAO (2010 11/15-19)

- Monday: basic stellar spectrum formation
 - morning: lecture
 - **afternoon: numerical exercises SSA1, SSA2**
- Tuesday: LTE stellar spectrum formation
 - morning: lecture
 - **afternoon: numerical exercises SSA3, SSB1**
- Wednesday: resonance scattering in stellar spectrum formation
 - morning: lecture
 - **afternoon: numerical exercises SSB2, SSB3**
- Thursday: numerical solution schemes
 - morning: lecture
 - **afternoon: numerical exercises SSC1, SSC2**
- Friday: chromospheric line formation
 - morning: lecture
 - **afternoon: numerical exercises SSC3**

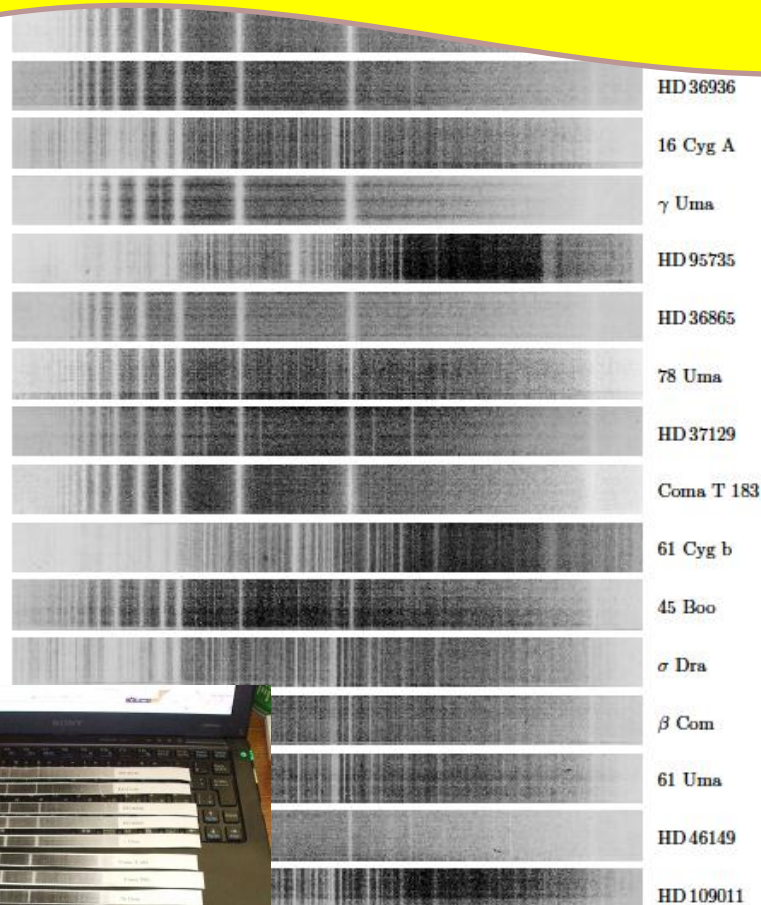


目ウロコで実践的だった

SSA18

目ウロコで実践的だった

View graph
Lecture note (240p)
Program (IDL)



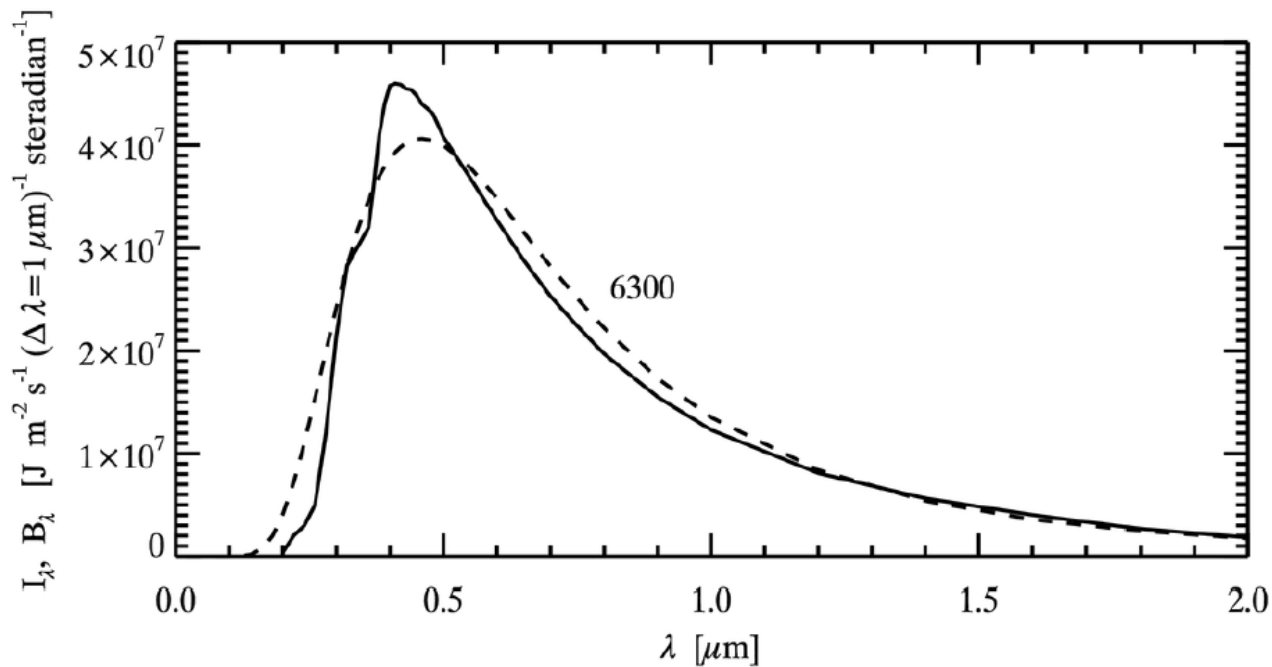
aken with a low-dispersion grating spectron
l. (1968).

- <http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/TOPIC/2010/101115.htm>
- 福江 純、2011、『天文教育』、1月号、34



Q1 太陽スペクトルで 一番温度が高い波長とその理由

SOLAR SPECTRUM AND BEST-FIT PLANCK CURVE



Solid: solar disk-center continuum (high points between lines).

Dashed: Planck function $B_\lambda(T)$ for $T = 6300 \text{ K}$.

At which wavelength is solar radiation hottest?

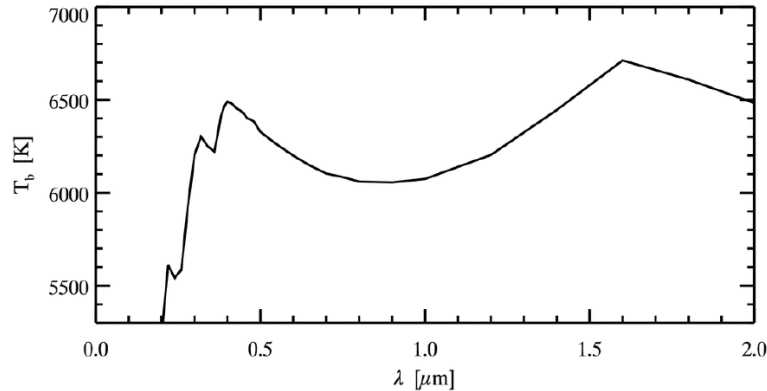




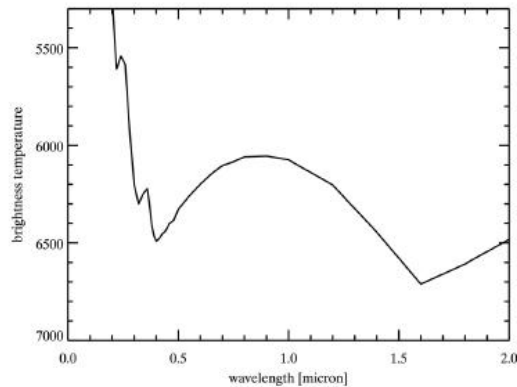
A1 太陽スペクトルで

波長とその理由

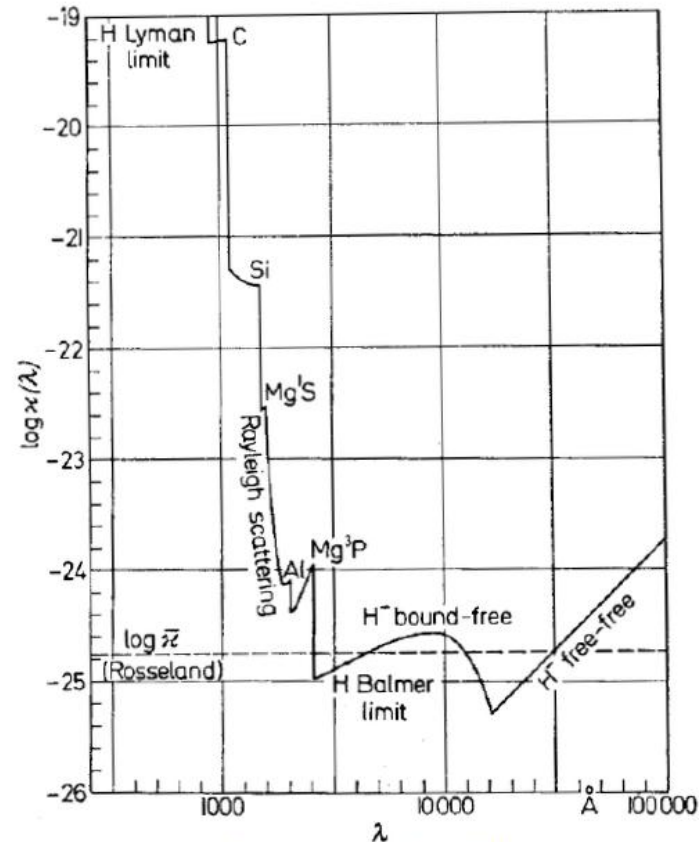
PLANCK INVERSE OF THE SOLAR SPECTRUM



Solar radiation brightness temperature T_b with $B_\lambda(T_b) \equiv I_{\text{sun}}$, or $T_b = [B_\lambda]^{-1}(I_{\text{sun}})$. This is a formal temperature. It equals the gas temperature where the radiation escapes when that radiation is given by the Planck function for that temperature. This is the case for $\lambda > 0.5 \mu\text{m}$. Solar radiation is hottest at wavelength $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ in the near infrared.



PHOTOSPHERIC GAS OPACITY



Right: photospheric gas opacity against wavelength (logarithmic), labeled with the processes causing it. Ultraviolet: ionization of C, Si, Mg, Al. Visible ($\lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m} = 4000 - 8000 \text{ \AA}$) and near infrared: H^- bound-free (H^- “ionization”). Far infrared: H^- free-free (acceleration of free electrons in the Coulomb field of neutral hydrogen atoms). From E. Böhm-Vitense.

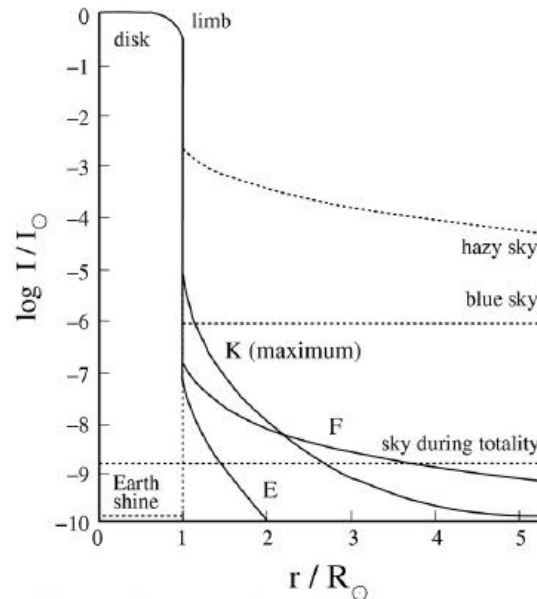




Q2 太陽コロナの 本来の色と乳白色の理由

WHITE LIGHT CORONA

Stix section 9.1.3

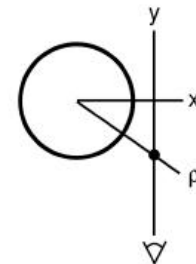


Grotian (1931): Thomson scattering 8000 km s^{-1} electrons (S 9.2–9.3)

$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad I(x) = 2 \int_0^\infty j(\rho) dy = 2 \int_x^\infty \frac{\rho j(\rho)}{\sqrt{\rho^2 - x^2}} d\rho$$

N_e from inverse Abel transform = isotropically scattered irradiation (S 9.4–9.5)

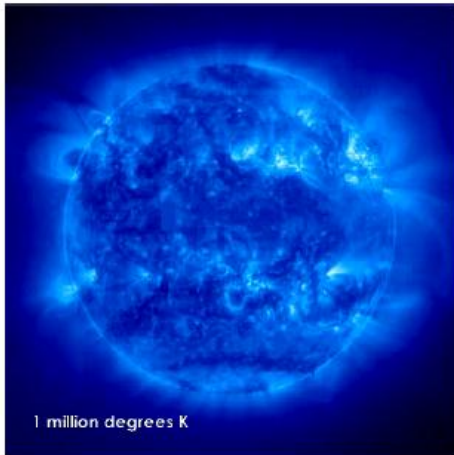
$$j(\rho) = -\frac{1}{\pi} \int_\rho^\infty \frac{dI/dx}{\sqrt{x^2 - \rho^2}} dx = \sigma_T N_e \frac{1}{4\pi} \int I_\odot(\theta) d\Omega$$



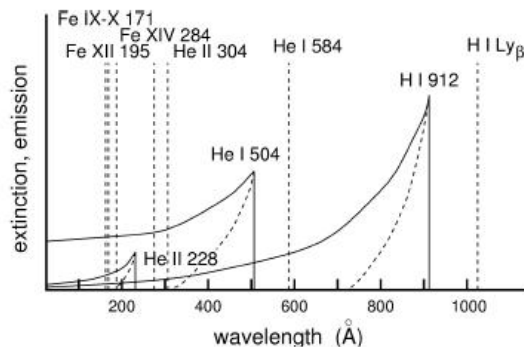


A2 太陽コロナの 本来の色と乳白色の理由

BRIGHT AND DARK IN EUV IMAGES



- *iron lines*
 - Fe IX/X 171 Å: about 1.0 MK
 - Fe XII 195 Å: about 1.5 MK
 - Fe XIV 284 Å: about 2 MK
- *bright*
 - collision up, radiation down
 - thermal photon creation, NLTE equilibrium
 - 171 Å: selected loops = special trees in forest
- *dark*
 - radiation up, re-radiation at bound-free edge
 - matter containing He^+ , He, H: $10^4 - 10^5$ K
 - large opacity



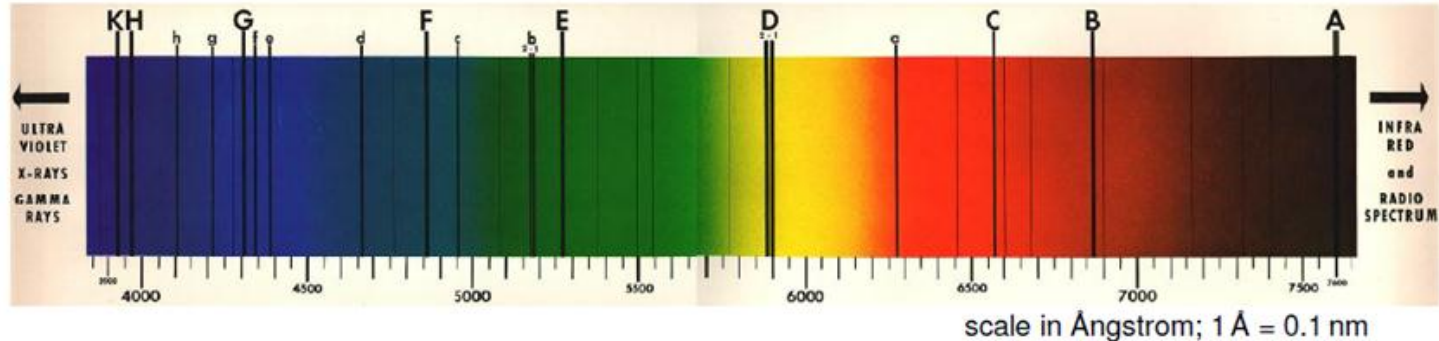


Q3 太陽スペクトルで Ca H, K線が強い理由

FRAUNHOFER'S DISCOVERY

http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer

In 1814, Fraunhofer invented the spectroscope, and discovered 574 dark lines appearing in the solar spectrum. They are still called Fraunhofer lines. Kirchhoff and Bunsen showed in 1859 that they are atomic absorption features providing diagnostics-at-a-distance of the local conditions in the atmospheres of the Sun and other stars.



K & H: resonance lines of calcium ions

G: rotation-vibration band of CH molecules

F: Balmer- β line of hydrogen atoms

b: three lines of magnesium atoms

E: a group of lines of iron atoms

D: two resonance lines of sodium atoms (the same as in street lights)

C: Balmer- α line of hydrogen atoms

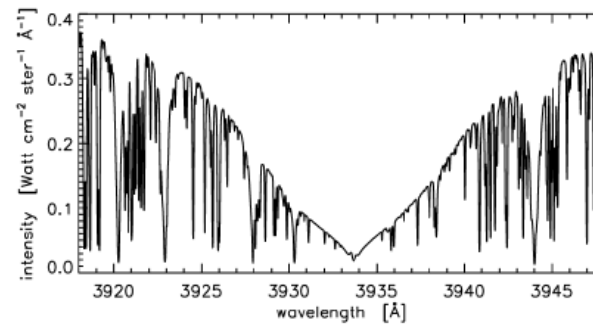
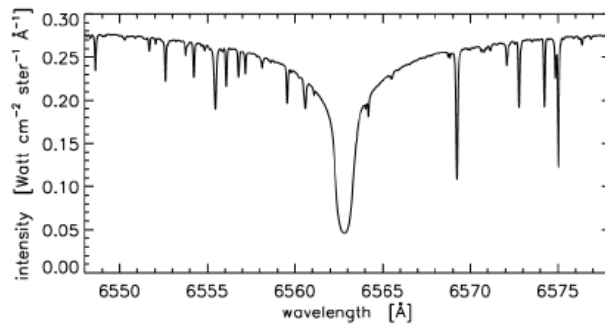
B & A: rotation-vibration band of oxygen molecules in the Earth atmosphere



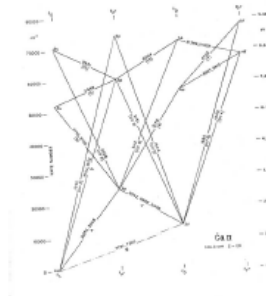
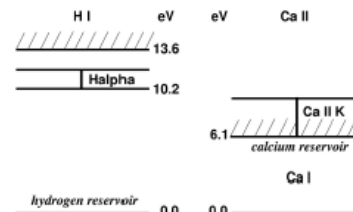
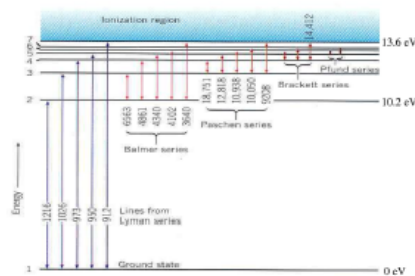


A3 太陽スペクトルで Ca H, K線が強い理由

H- α AND Ca II K IN THE SOLAR SPECTRUM



solar abundance ratio: $\text{Ca}/\text{H} = 2 \times 10^{-6}$



Assuming LTE at $T = 5000 \text{ K}$, $P_e = 10^2 \text{ dyne cm}^{-2}$:

Boltzmann H I: $\frac{n_2}{n_1} = 4.2 \times 10^{-10}$

Saha Ca II: $\frac{N_{\text{Ca II}}}{N_{\text{Ca}}} \approx 1$

$\frac{\text{Ca II } (n=1)}{\text{H I } (n=2)} = 8 \times 10^3$





Q4~

- ❁ 地球大気で輻射輸送が可能・必要な理由
- ❁ H-イオンの不透明度の近似式
- ❁ 散乱等温大気での $B_v/S_v/J_v$ の振る舞い
- ❁ Λ -iteration の計算

2013/3/9

輻射輸送の復活





今日(2011年)の講演で言えば...

- ❁ 新星風の光球面の v 依存やスペクトル計算
 - ❁ 矮新星の増光中における吸収線→輝線変化
 - ❁ 超新星スペクトル(P Cyg輪郭など)の再現
 - ❁ 超新星の光球面の形状と進化(含む v 依存)
 - ❁ 活動銀河BLRの輝線プロファイル
 - ❁ 食連星の共通大気(風)からの輝線
 - ❁ Be星のV/R変動と降着円盤の一本腕振動
- ❑ 基本レベルの輻射輸送で計算できることだし
(ぼくはまだできないが)、観測家といえども、
やらなければダメ!!!





輻射輸送研究教育の復活

❁ 太陽・星

- 末松芳法@国立天文台
- 柴田一成@京大

❁ 初期宇宙

- 梅村雅之@筑波大
- 中本泰史@東工大

❁ 降着円盤

- 福江 純@大阪教育大

❁ 系外惑星

❁ Rutten Lecture の消化

- Lecture note & Exercise
- Programの移植
IDL→Fortran, C, Basic

❁ カリキュラムの策定

❁ 系統的で実践的な講義

❁ サマースクール2011

2011 夏 @ 筑波？

❑ 若手の積極的な参加

❑ シニアからノウハウ提供

2013/3/9

輻射輸送の復活





サマースクール2011夏 @ 北海道大学



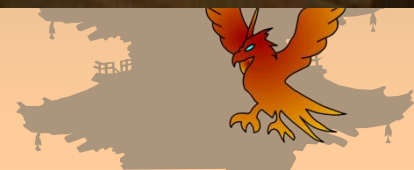
- ❁ 2011年8月18日-20日
- ❁ 北海道大学大講堂
- ❁ 世話人
 - 梅村雅之@筑波大学
 - 福江 純@大阪教育大
 - 野村英子@京都大学
- ❁ 内容
 - 午前: メイン講義
 - 午後: 研究発表

参加者: 約60名



2013/3/9

輻射輸送の復活



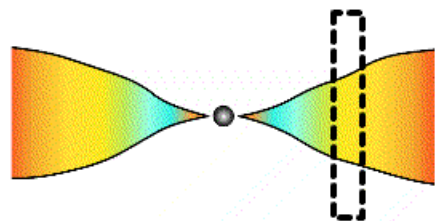


降着円盤における輻射輸送

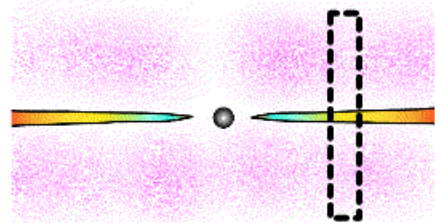


散乱の影響

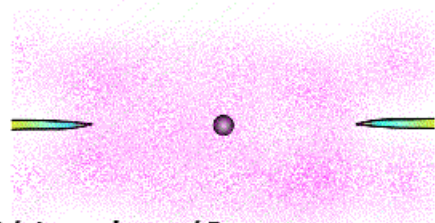
□ PASJ 64, 52 (2012)



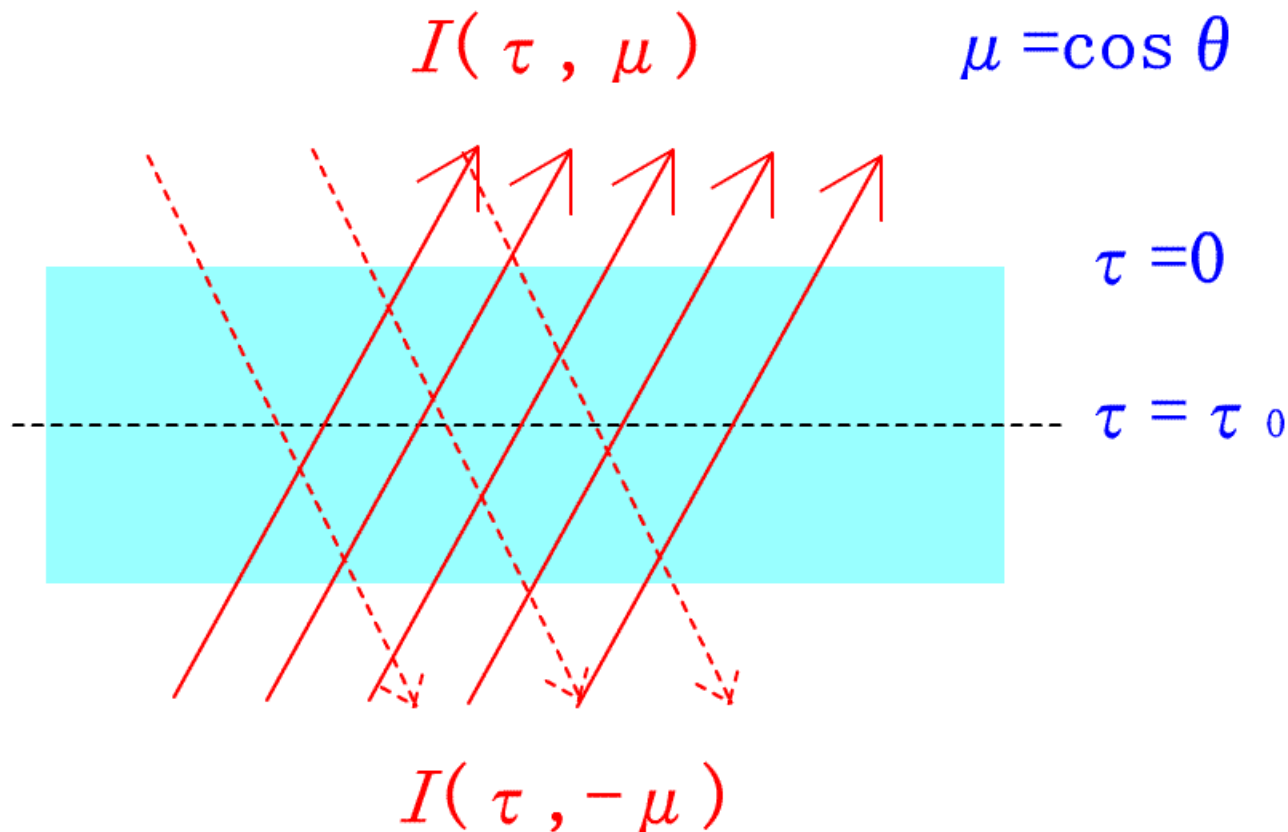
超臨界円盤



標準円盤



輻射不良円盤





降着円盤の場合

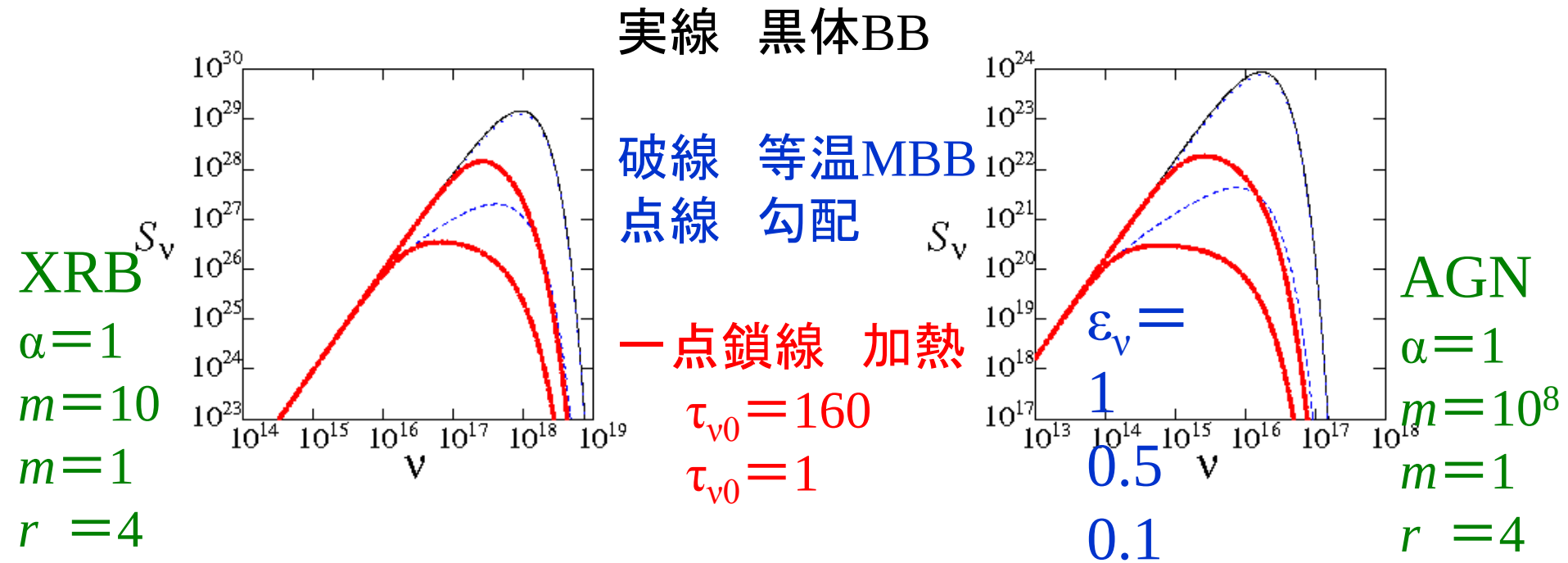


Fig. 8. Surface source function $S_\nu(0)$ with typical parameters of inner accretion disks of X-ray binaries for several cases. Thin solid curve is the simple blackbody spectrum. Thin dashed and dotted ones are those for no heating cases with isothermal ($b_\nu = 0$) and temperature gradient ($b_\nu = 3/2$), respectively. Thick chain-dotted ones represent those for internal heating cases of $\tau_{\nu 0} = 160$ (upper) and 1 (lower), respectively. The parameters of standard accretion disks are $\alpha = 1$, $M/M_\odot = 10$, $\dot{M}/\dot{M}_{\text{crit}} = 1$, and $r/r_g = 4$, $\dot{M}_{\text{crit}}$ being the critical accretion rate and r_g the Schwarzschild radius. In this case the total optical depth is about 160, while the effective optical depth is 0.41.

Fig. 9. Surface source function $S_\nu(0)$ with typical parameters of inner accretion disks of active galactic nuclei for several cases. Thin solid curve is the simple blackbody spectrum. Thin dashed and dotted ones are those for no heating cases with isothermal ($b_\nu = 0$) and temperature gradient ($b_\nu = 3/2$), respectively. Thick chain-dotted ones represent those for internal heating cases of $\tau_{\nu 0} = 160$ (upper) and 1 (lower), respectively. The parameters of standard accretion disks are $\alpha = 1$, $M/M_\odot = 10^8$, $\dot{M}/\dot{M}_{\text{crit}} = 1$, and $r/r_g = 4$, $\dot{M}_{\text{crit}}$ being the critical accretion rate and r_g the Schwarzschild radius. In this case the total optical depth is about 160, while the effective optical depth is 0.15.



降着円盤における輻射輸送 照射の影響

❁ 目的:

- 中心星の照射を受けた降着円盤の輻射輸送問題で、散乱を入れて解析解を求める
- 従来研究では不完全だった境界条件などを完全に考慮して解く

❁ やったこと:

- 等温大気を仮定し、エディントン近似のもとで、振動数依存形の方程式を解き、モーメント量と放射強度の解析解を得た

❁ わかったこと:

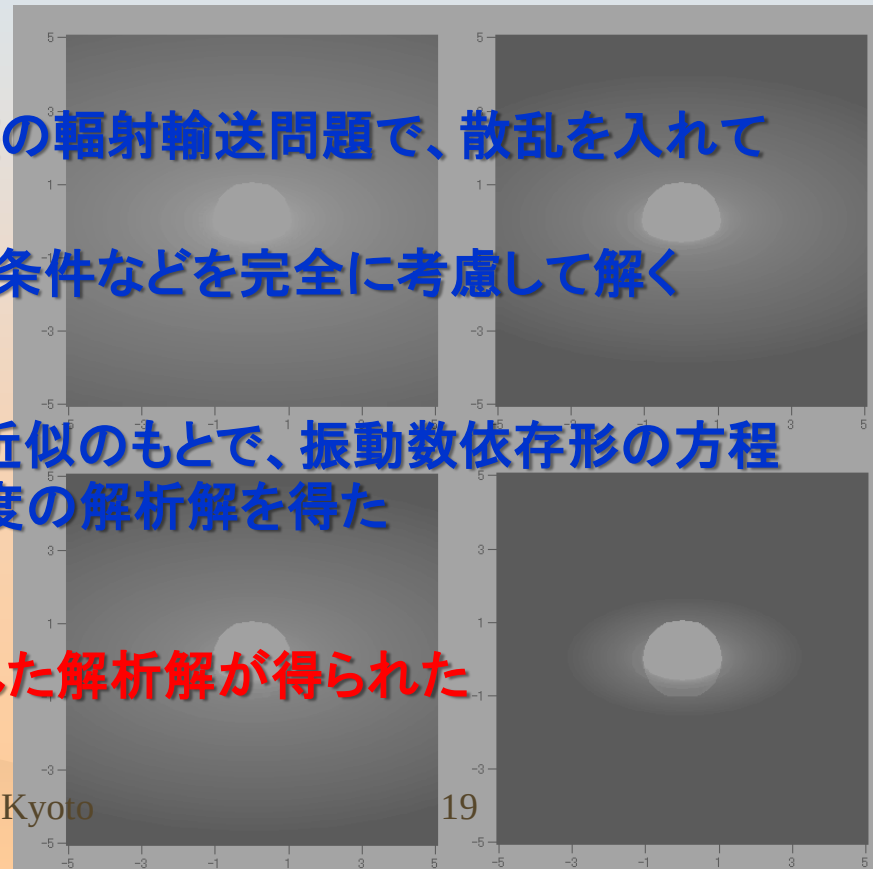
- 有限の光学的厚みや照射を入れた解析解が得られた

PASJ 64, 106 (2012)

2013/3/9

2012 ASJ at Kyoto

19



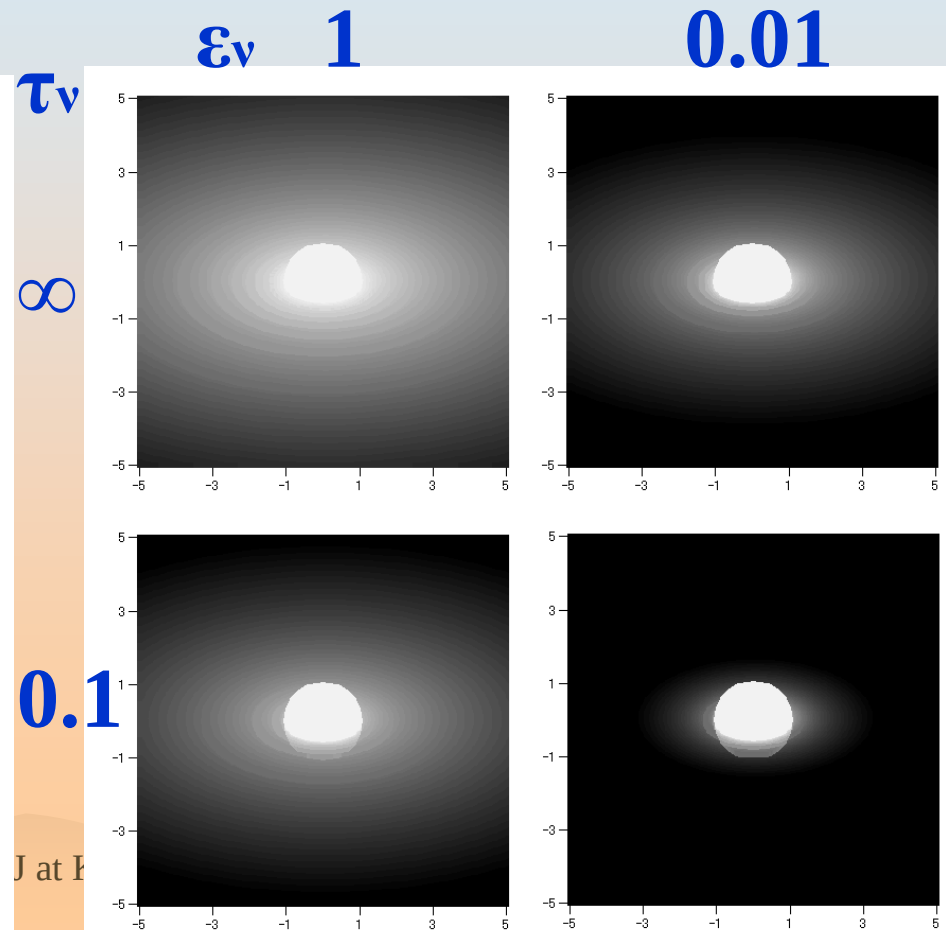
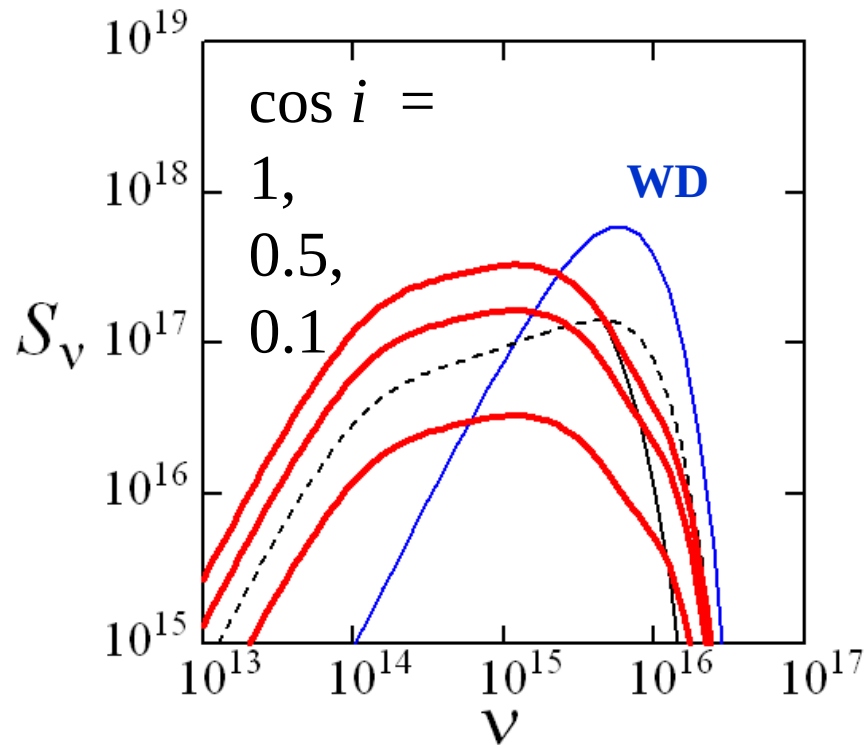


中心星の照射

応用例白色矮星 ($T^*=10^5\text{K}$)

❁ スペクトル

❁ 見かけ ($\nu=10^{15}\text{ Hz}$)





非等方散乱の近似的取り扱い

❁ 目的:

- Mie散乱など散乱が非等方な場合に対して、簡単な形の位相関数を仮定し、方程式を定式化するとともに、解析解を求める

❁ やったこと:

- エディントン近似のもとで、輻射輸送方程式、0次モーメント式、1次モーメント式などを定式化し、モーメント量と放射強度の解析解を得た

❁ わかったこと:

- 解析解が得られ、また非等方散乱がかなり効くこともわかった

❑ PASJ 64, 132 (2012)





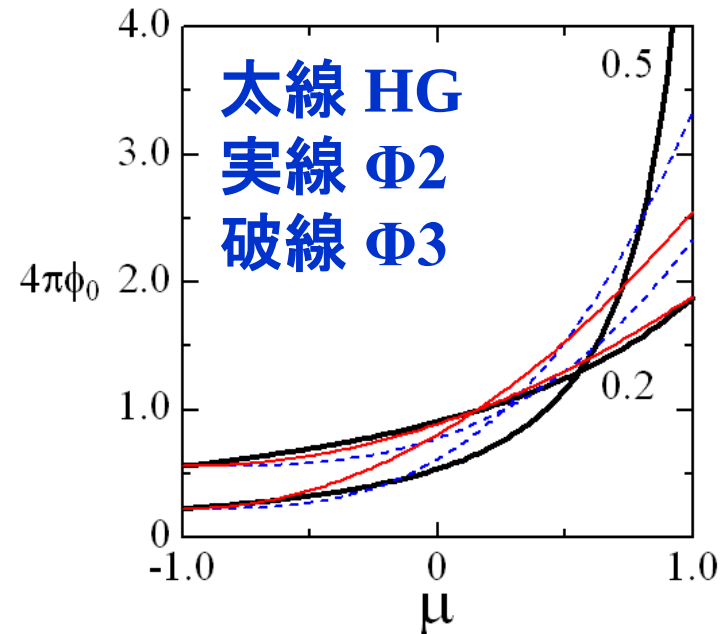
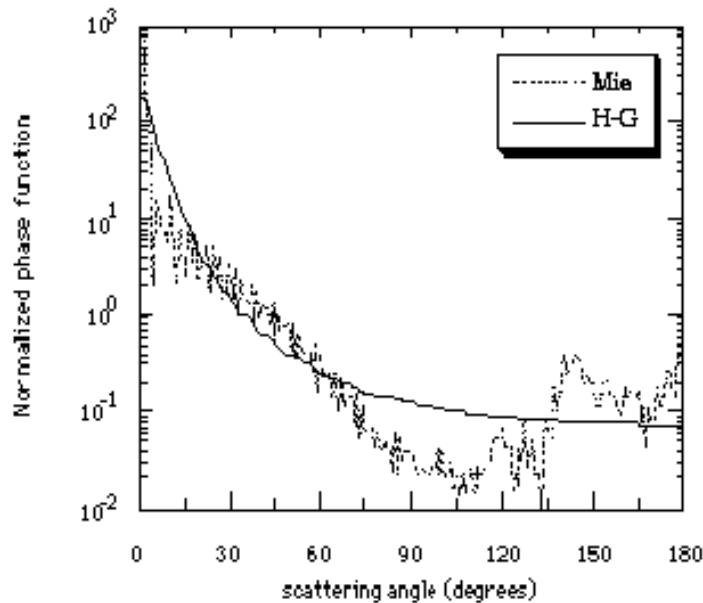
非等方散乱 位相関数

等方－非等方

❁ Henyey-Greenstein(1941) ❁ 本研究 $0 < a < \infty$

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

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





F
I



E



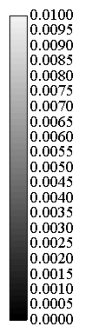
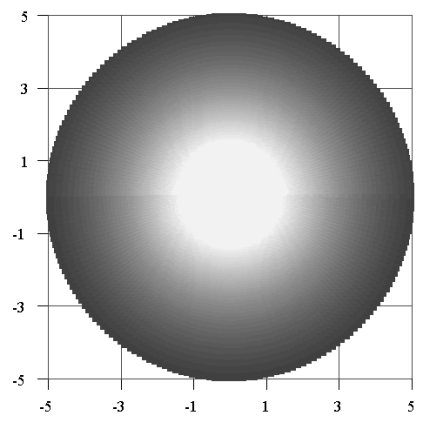
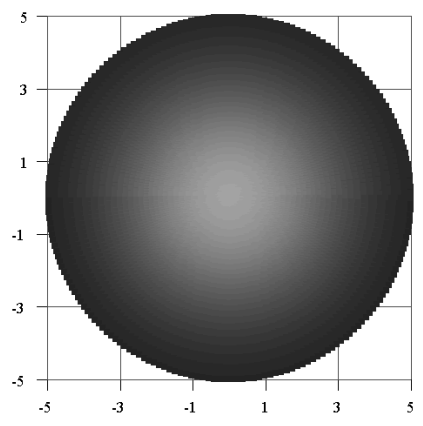
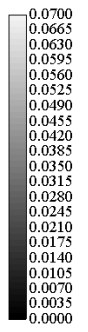
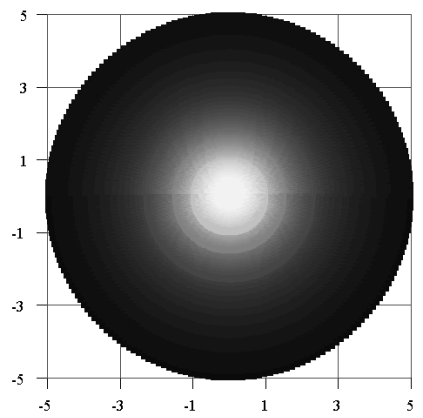
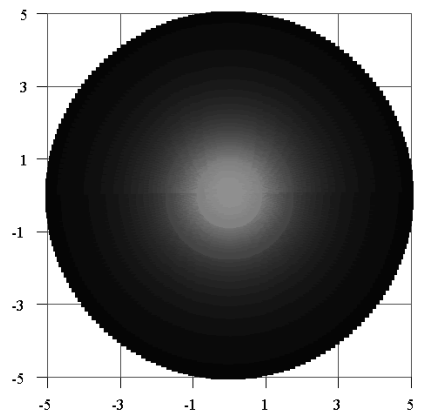
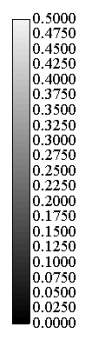
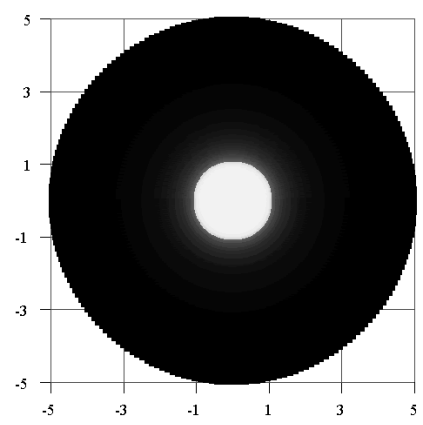
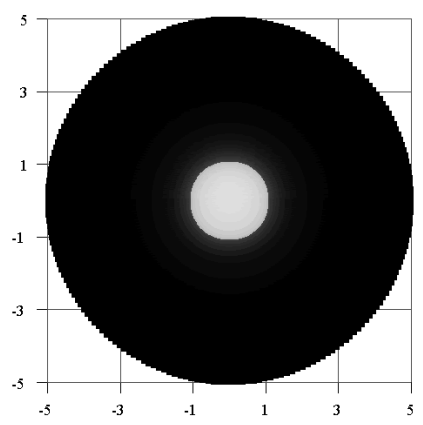
ヤ



ホ



in



Static Halo us Source

問題で、散乱を入れて

完全に考慮して解く

振動数依存形の方程
得た



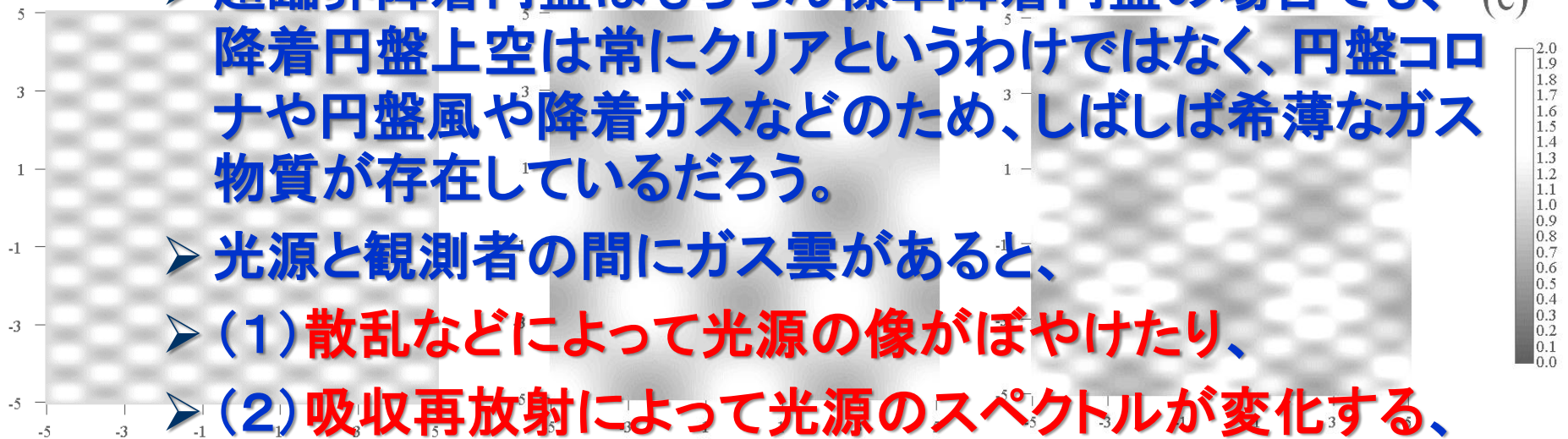


浮遊層雲における輻射輸送

照射の影響

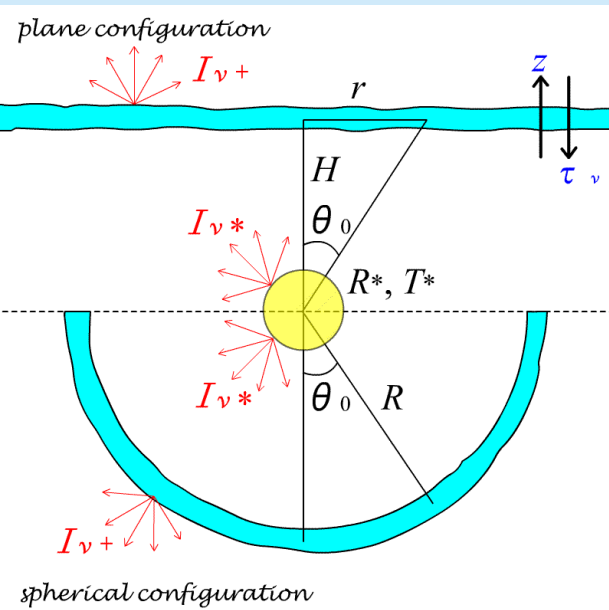
❁ 目的:

- 超臨界降着円盤はもちろん標準降着円盤の場合でも、
降着円盤上空は常にクリアというわけではなく、円盤コロナや円盤風や降着ガスなどのため、しばしば希薄なガス物質が存在しているだろう。
- 光源と観測者の間にガス雲があると、
- (1) 散乱などによって光源の像がぼやけたり、
- (2) 吸収再放射によって光源のスペクトルが変化する、
- など、観測面でいろいろな影響が出てくると予想される。





球状光源＋平板状層雲 拡散イメージ

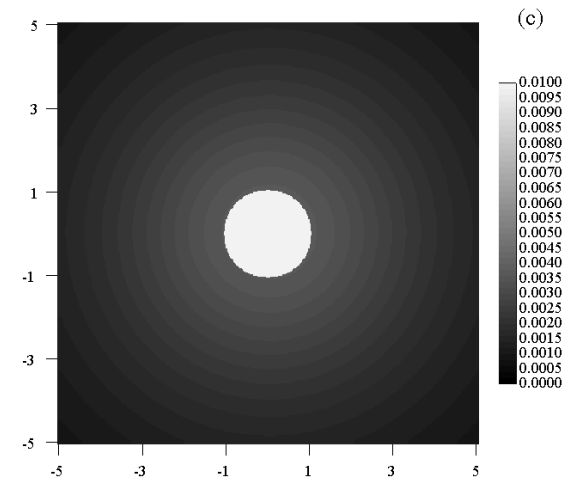
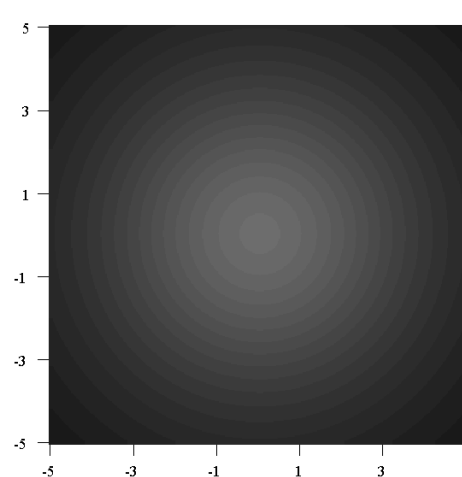
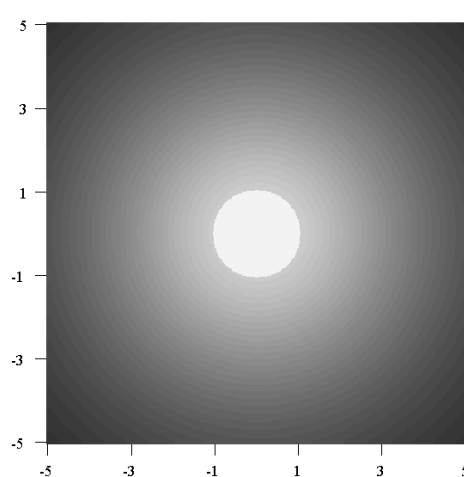


$$I_v^+ / [(1 - A_v) I_v^*]$$

$$H = 5R_*$$

$$\mu = 1$$

$$\tau_{vb} = 1, 10, 0.3$$





球状光源＋平板状層雲

放射スペクトル



青細線:光源

青破線:光源(減光)

赤破線:再放射

一点鎖線:散乱光

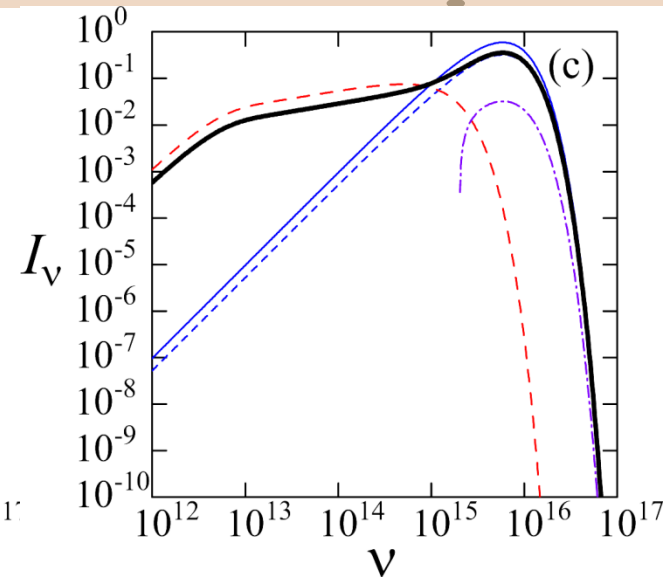
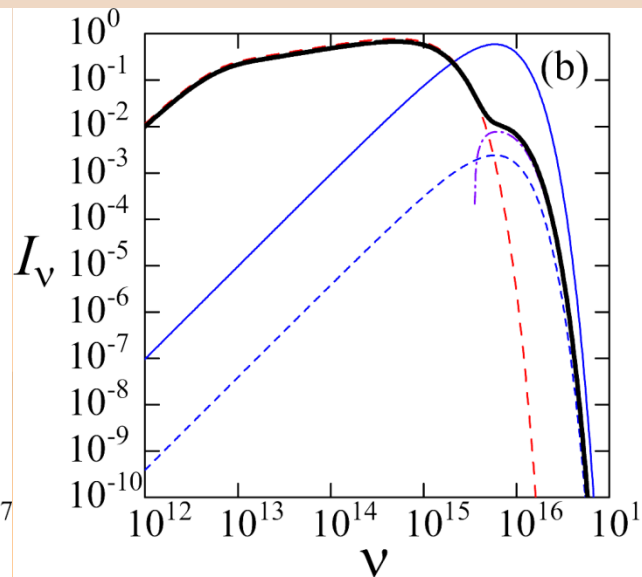
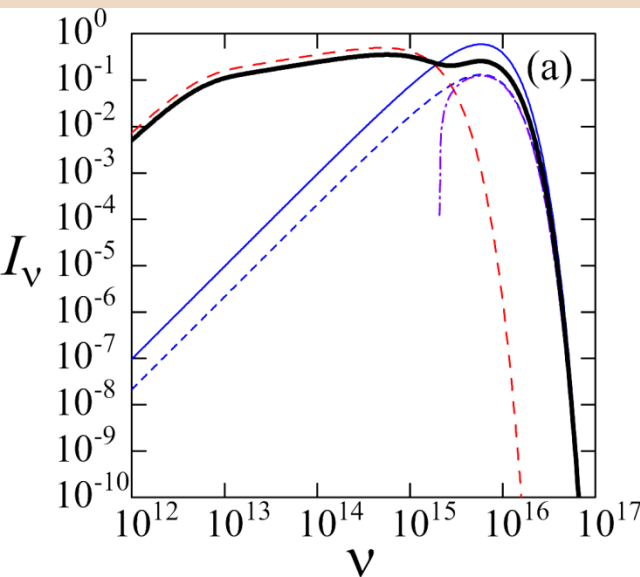
黒太線:全成分

$$I_{\nu}^{+}(0, 1)$$

$$T_{*} = 10^5 \text{ K}, A = A_{\nu} = 1/2$$

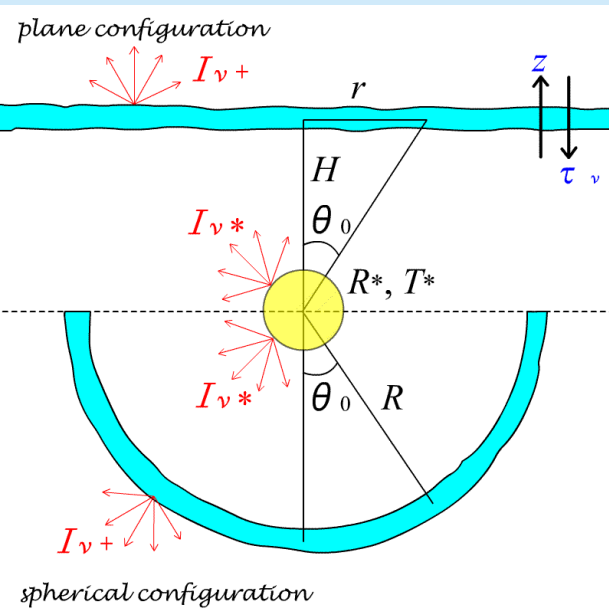
$$H = 5R_{*}, 10^4 R_{*}$$

$$(\tau_{\nu b}, \epsilon_{\nu}) = (1, 0.5), \\ (5, 0.5), (0.1, 0.5)$$





球状光源＋球殻状層雲 拡散イメージ

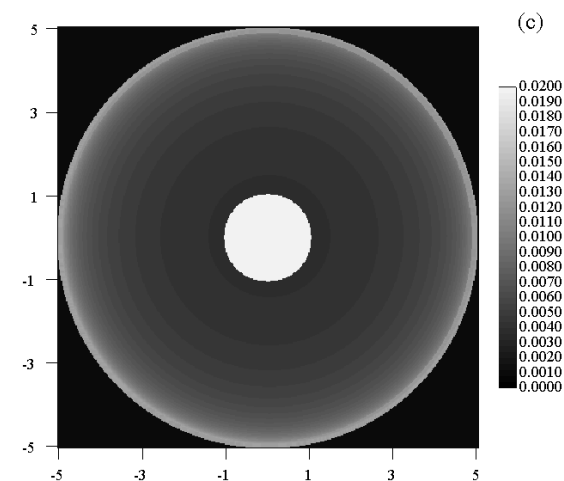
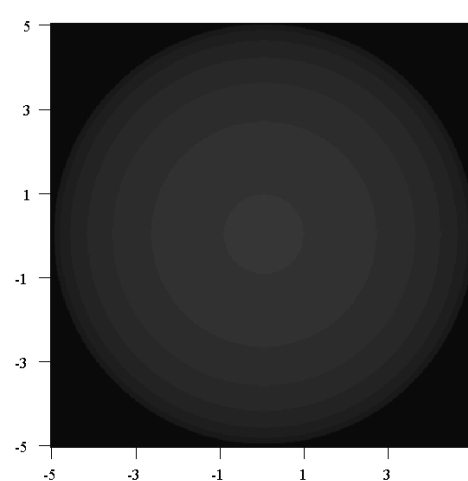
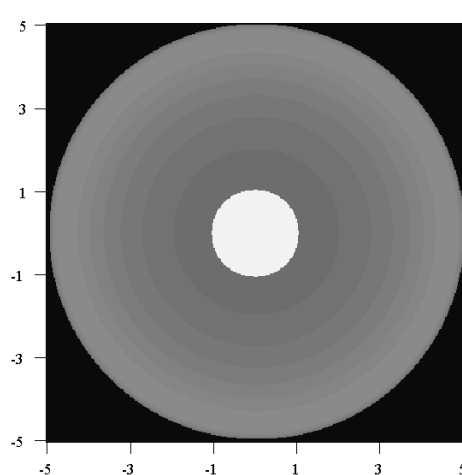


$$I_v^+ / [(1 - A_v) I_v^*]$$

$$R = 5R_*$$

$$\mu = 1$$

$$\tau_{vb} = 1, 10, 0.3$$





球状光源＋球殻状層雲

放射スペクトル



青細線：光源

青破線：光源（減光）

赤破線：再放射

一点鎖線：散乱光

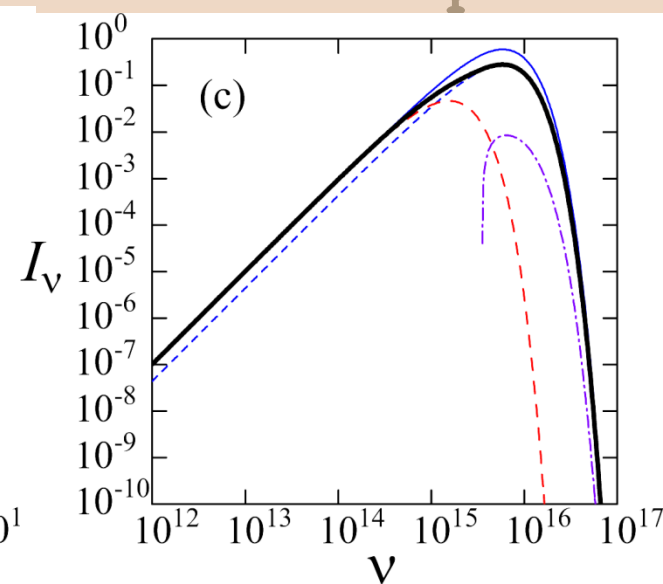
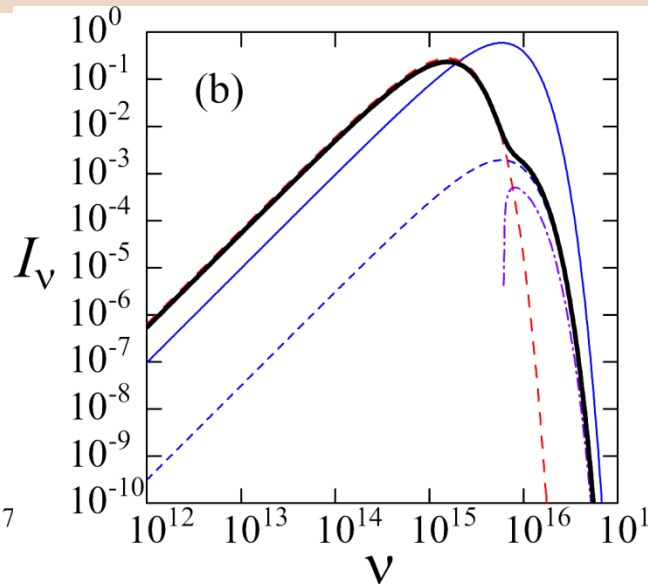
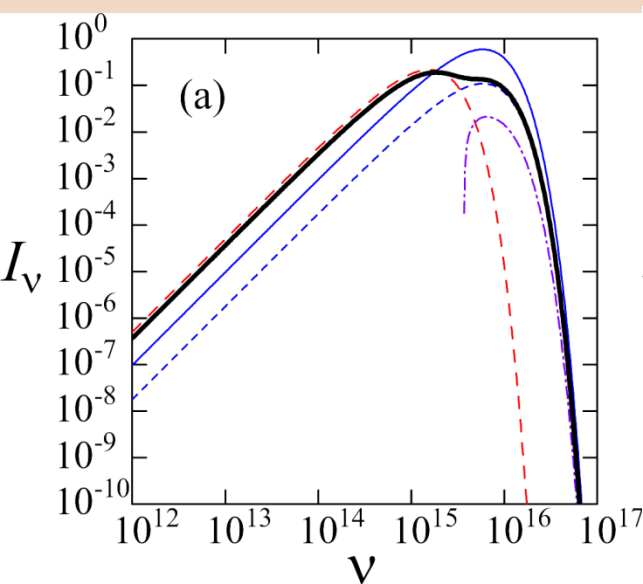
黒太線：全成分

$$I_{\nu}^{+}(0, 1)$$

$$T_{*} = 10^5 \text{ K}, A = A_{\nu} = 1/2$$

$$R = 5R_{*},$$

$$(\tau_{\nu b}, \epsilon_{\nu}) = (1, 0.5),$$
$$(5, 0.5), (0.1, 0.5)$$

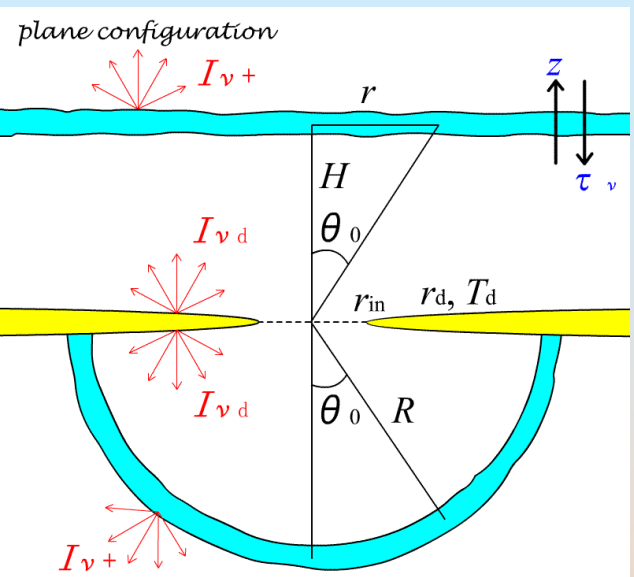




標準降着円盤＋平板状層雲



拡散イメージ

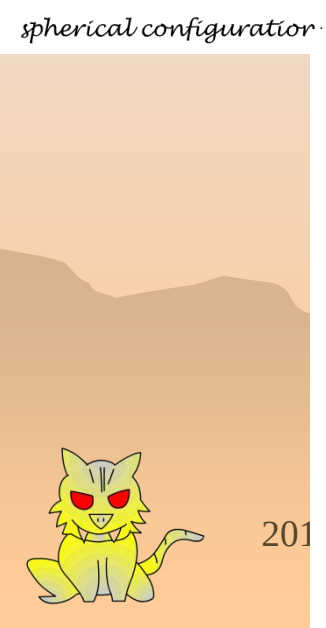


$$I_v^+ / [(1 - A_v) I_v^*]$$

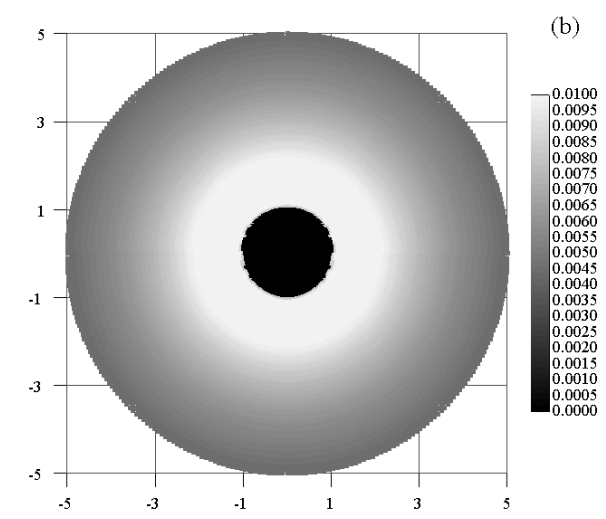
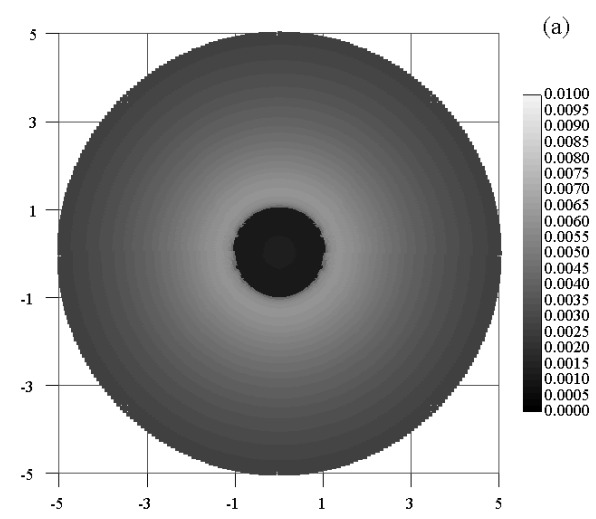
$$H = 5 r_{in}$$

$$T_{in} = 10^5 \text{ K}$$

$$\tau_{vb} = 1, 0.1$$
$$10^{15} \text{ Hz}$$



201

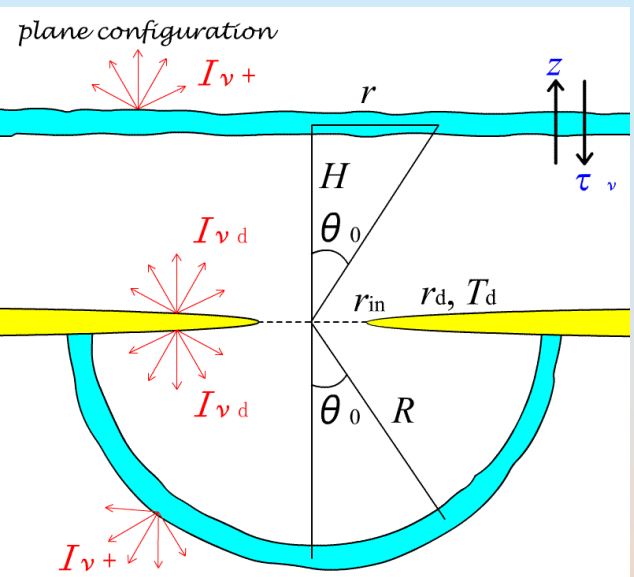




標準降着円盤＋平板状層雲



拡散イメージ



$$I_v^+ / [(1 - A_v) I_v^*]$$

$$H = 5r_{in}$$

$$T_{in} = 10^5 \text{ K}$$

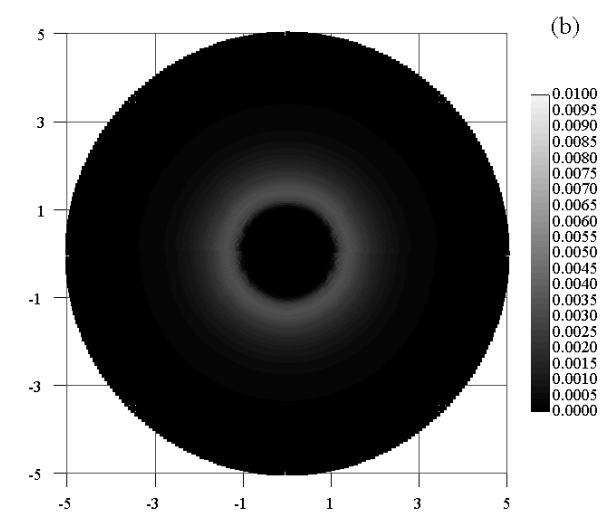
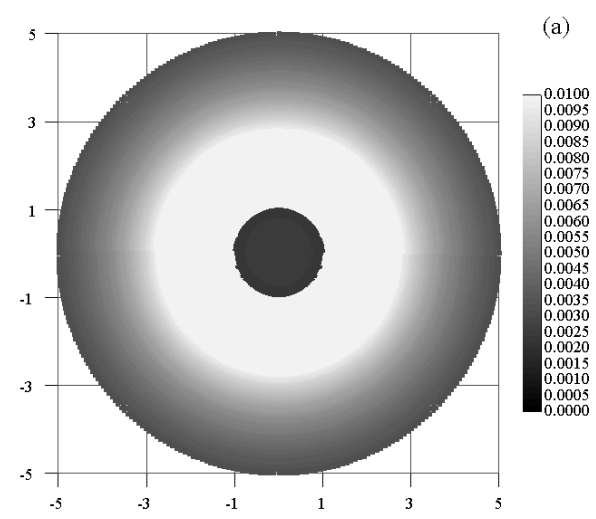
$$\tau_{vb} = 1$$

$$10^{15.5} \text{ Hz}, 10^{16} \text{ Hz}$$

spherical configuration



201





標準降着円盤＋平板状層雲



放射スペクトル

青破線: 光源(減光)

$$I_{\nu}^{+}(0, 1)$$

赤破線: 再放射

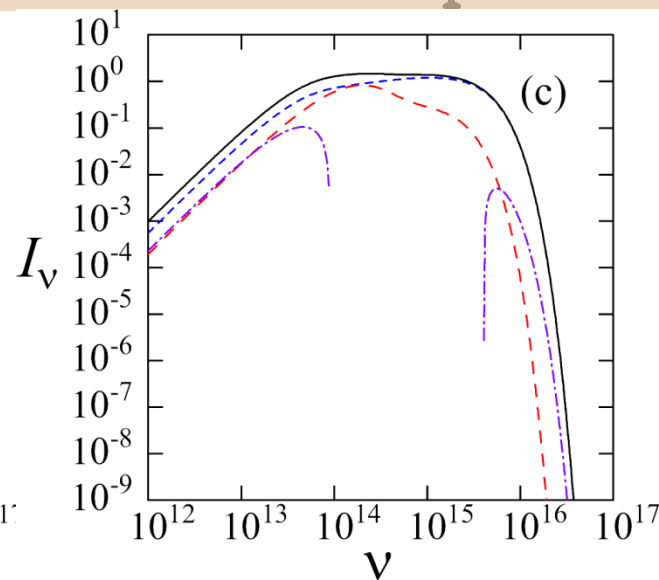
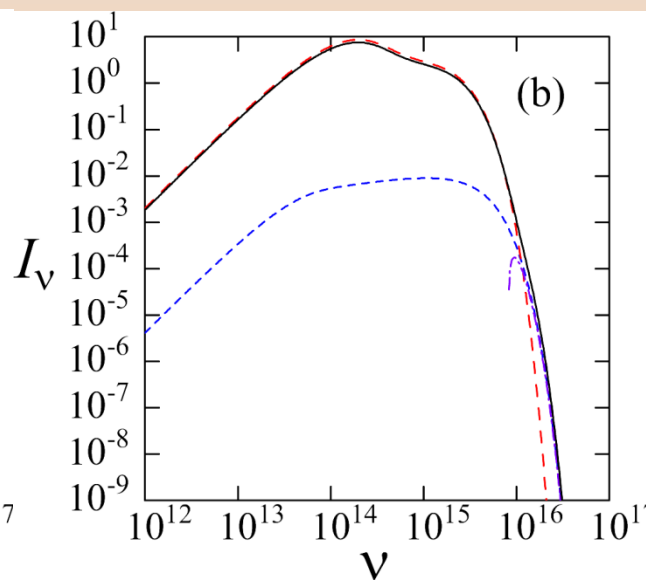
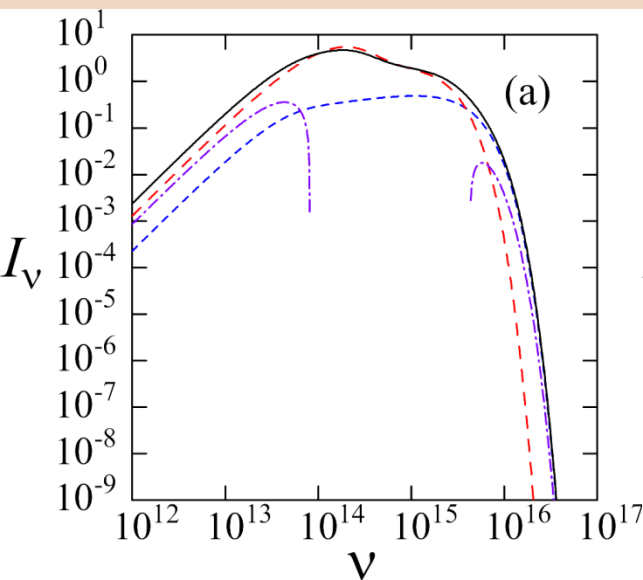
$$T_{\text{in}} = 10^5 \text{ K}, A = A_{\nu} = 1/2$$

一点鎖線: 散乱光

$$H = 5r_{\text{in}}, 10^3 r_{\text{in}}$$

黒太線: 全成分

$$(\tau_{\nu b}, \epsilon_{\nu}) = (1, 0.5), (5, 0.5), (0.1, 0.5)$$





『輻射輸送と輻射流体力学』

学部～修士向けの
アドバンステキスト

by

梅村雅之

福江 純

野村英子

輻射輸送の復活

2013/3/9





『輻射輸送と輻射流体力学』



目次

- ❁ 1 天体現象における輻射の役割
 - ❁ 2 ガスと輻射の熱平衡
 - ❁ 3 輻射輸送方程式
 - ❁ 4 輻射場の物理
 - ❁ 5 モーメント定式化とエディントン近似
 - ❁ 6 輻射輸送方程式の解析的な解き方
 - ❁ 7 輻射輸送方程式の数値的な解き方
 - ❁ 8 スペクトル線のモデル
 - ❁ 9 輻射流体力学の基礎方程式
 - ❁ 10 天体大気の構造と輻射
 - ❁ 11 輻射駆動流
 - ❁ 12 輻射流体波動と安定性
 - ❁ 13 相対論的な輻射輸送方程式と輻射流体方程式
- 付録

2013/3/9

輻射輸送の復活





『輻射輸送と輻射流体力学』

ちょい見：5章

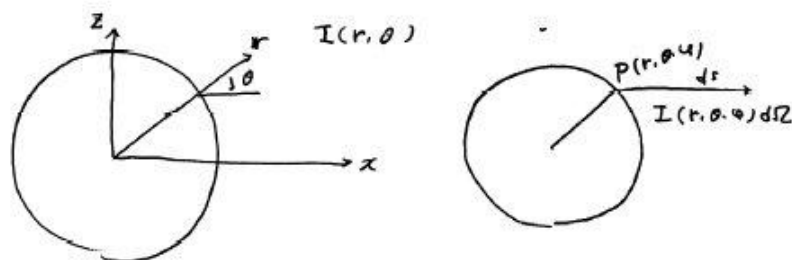


図 5.3 球対称大気と座標系.

$$\mu \frac{\partial I_\nu}{\partial r} + \frac{1 - \mu^2}{r} \frac{\partial I_\nu}{\partial \mu} = -(\kappa_\nu \rho + \sigma_\nu \rho)(I_\nu - S_\nu) \quad (5.47)$$

のモーメントを取っていこう.

まず輻射輸送方程式の両辺を全立体角で積分するが、平行平板大気のとときと同様、極角 θ は方向余弦 μ に変換し、方向余弦の積分については部分積分などを行うことにより、

$$\frac{\partial H_\nu}{\partial r} + \frac{2}{r} H_\nu = -(\kappa_\nu \rho + \sigma_\nu \rho)(J_\nu - S_\nu) \quad (5.48)$$

のような0次のモーメント式が得られる*14. ただしここで、 J_ν は平均強度、 H_ν はエディントン流束である. 平行平板の場合と比較すると、左辺に曲率の項 (第





『輻射輸送と輻射流体力学』

ちょい見：6章

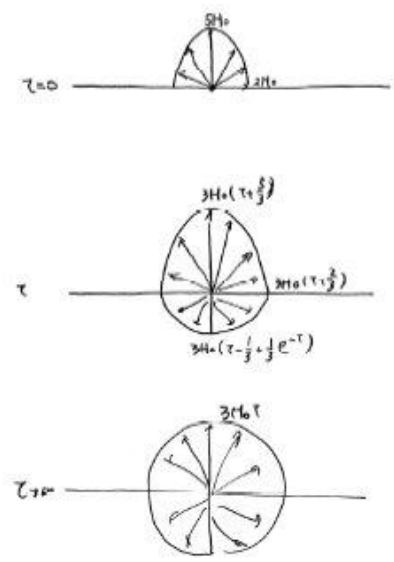
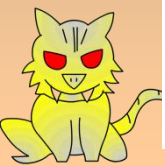


図 6.10 ME の解

表 6.1 ミルン-エディントン大気の周縁減光.

$\mu = \cos \theta$	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1
$\sin \theta$						0.980	0.995
$\frac{I(0, \mu)}{I(0, 1)} \Big _{\frac{2}{5} + \frac{3}{5}\mu}$	1.00	0.898	0.787	0.669	0.607	0.525	0.448
$\frac{2}{5} + \frac{3}{5}\mu$	1.00	0.88	0.76	0.64	0.58	0.52	0.46





『輻射輸送と輻射流体力学』

ちょい見：10章

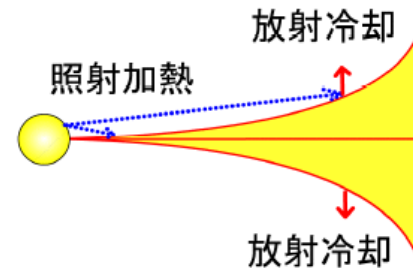


図 10.5 照射円盤のエネルギー収支. 各半径ごと (局所的) に, 照射加熱と放射冷却が釣り合っている.

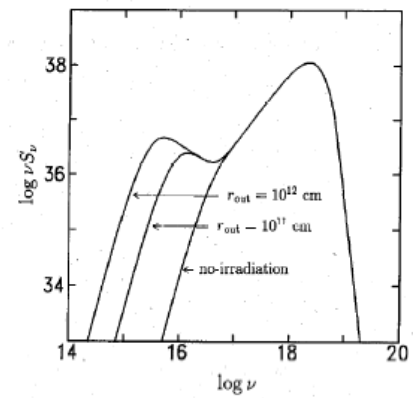


図 10.6 照射円盤のスペクトルの例 (Fukue, J. and Sanbuichi, K. 1993, PASJ, 45, 831). 太陽質量の中性子星に $\dot{M} = 10^{18} \text{ g s}^{-1}$ の質量が降ってきている場合. 円盤の外縁半径 r_{out} が大きいほど, 低振動数側のスペクトルが変化する.





『輻射輸送と輻射流体力学』



ちょい見：11章

$$(v^2 - c_s^2) \frac{dv}{dr} = v \left(c_s^2 \frac{2}{r} - \frac{GM}{r^2} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \frac{L}{4\pi r^2} \right) + (\gamma - 1) 4\pi \kappa (B - J), \quad (11.46)$$

$$(v^2 - c_s^2) \frac{dc_s^2}{dr} = -(\gamma - 1) \left[c_s^2 \left(v^2 \frac{2}{r} - \frac{GM}{r^2} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \frac{L}{4\pi r^2} \right) + \frac{\gamma v^2 - c_s^2}{v} 4\pi \kappa (B - J) \right], \quad (11.47)$$

$$\frac{dL}{dr} = \frac{\dot{M}}{v} 4\pi \kappa (B - J), \quad (11.48)$$

$$\frac{d}{dr} \left(f \frac{4\pi}{c} J \right) = -\frac{3f-1}{r} \frac{4\pi}{c} J - \frac{\dot{M}}{4\pi r^2 v} \frac{\kappa + \sigma}{c} \frac{L}{4\pi r^2}, \quad (11.49)$$

$$\dot{M} \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{\gamma-1} c_s^2 - \frac{GM}{r} \right) + L = \dot{E}. \quad (11.50)$$

拡散近似と比べると、変数と方程式が2つずつ増えている。

ここでふたたび変数の無次元化を行う。無次元化した変数として、

$$x \equiv \frac{r}{r_g}, \quad \beta \equiv \frac{v}{c}, \quad \alpha_s \equiv \frac{c_s}{c}, \quad \ell \equiv \frac{L}{L_E}, \quad \mathcal{J} \equiv \frac{16\pi^2 r_g^2}{L_E} J \quad (11.51)$$

と定義すると、(11.46), (11.47), (11.48), (11.49) (11.50) は、それぞれ、以下のように整理できる：

$$(\beta^2 - \alpha_s^2) \frac{d\beta}{dx} = \beta \left(\frac{2\alpha_s^2}{x} - \frac{1}{2x^2} + \frac{\kappa + \sigma}{\sigma} \frac{\ell}{2x^2} \right) + (\gamma - 1) \frac{\kappa}{2\sigma} (B - \mathcal{J}), \quad (11.52)$$

$$(\beta^2 - \alpha_s^2) \frac{d\alpha_s^2}{dx} = -(\gamma - 1) \left[\alpha_s^2 \left(\frac{2\beta^2}{x} - \frac{1}{2x^2} + \frac{\kappa + \sigma}{\sigma} \frac{\ell}{2x^2} \right) + \frac{\gamma\beta^2 - \alpha_s^2}{\beta} \frac{\kappa}{2\sigma} (B - \mathcal{J}) \right], \quad (11.53)$$

$$\frac{d\ell}{dx} = \frac{\dot{m}}{\beta} \frac{\kappa}{2\sigma} (B - \mathcal{J}), \quad (11.54)$$

$$\frac{d\mathcal{J}}{dx} = -\frac{3f-1}{f} \frac{1}{x} \mathcal{J} - \frac{\dot{m}}{2f} \frac{\kappa + \sigma}{\sigma} \frac{\ell}{x^4 \beta}, \quad (11.55)$$





『輻射輸送と輻射流体力学』



出版までの予定

- ❁ 3月 粗原稿
- ❁ 前期 大学院ゼミで使用(バグ取り)
- ❁ 夏頃 だいたいの完成(希望)
- ❁ 秋か冬 に出ればいいなあ
- ❁ でもたぶん遅れる





『輻射輸送と輻射流体力学』

出版までの予定

シリーズ＜宇宙物理学の基礎＞全6巻予定

日本評論社

- ❁ 第1巻『宇宙流体力学の基礎』→初校終了
- ❁ 第2巻『宇宙電磁流体力学の基礎』
- ❁ 第3巻『輻射輸送と輻射流体力学』
- ❁ 第4巻『放射素過程の基礎』
- ❁ 第5巻『輻射電磁流体シミュレーションの基礎』
- ❁ 第6巻『ブラックホール宇宙物理の基礎』

2013/3/9

輻射輸送の復活





Fin

輻射輸送の復活