

スピキュールとコロナ加熱の 数値シミュレーション

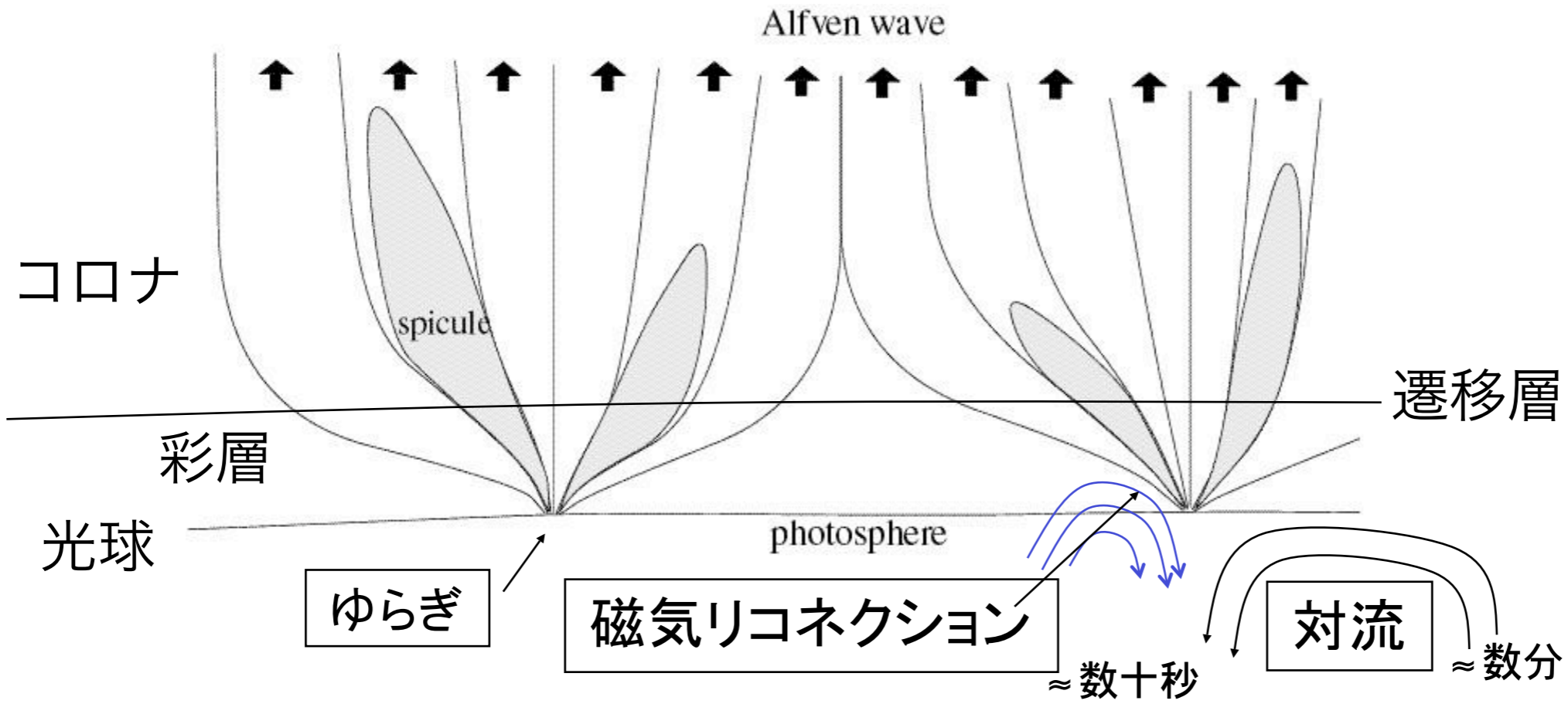
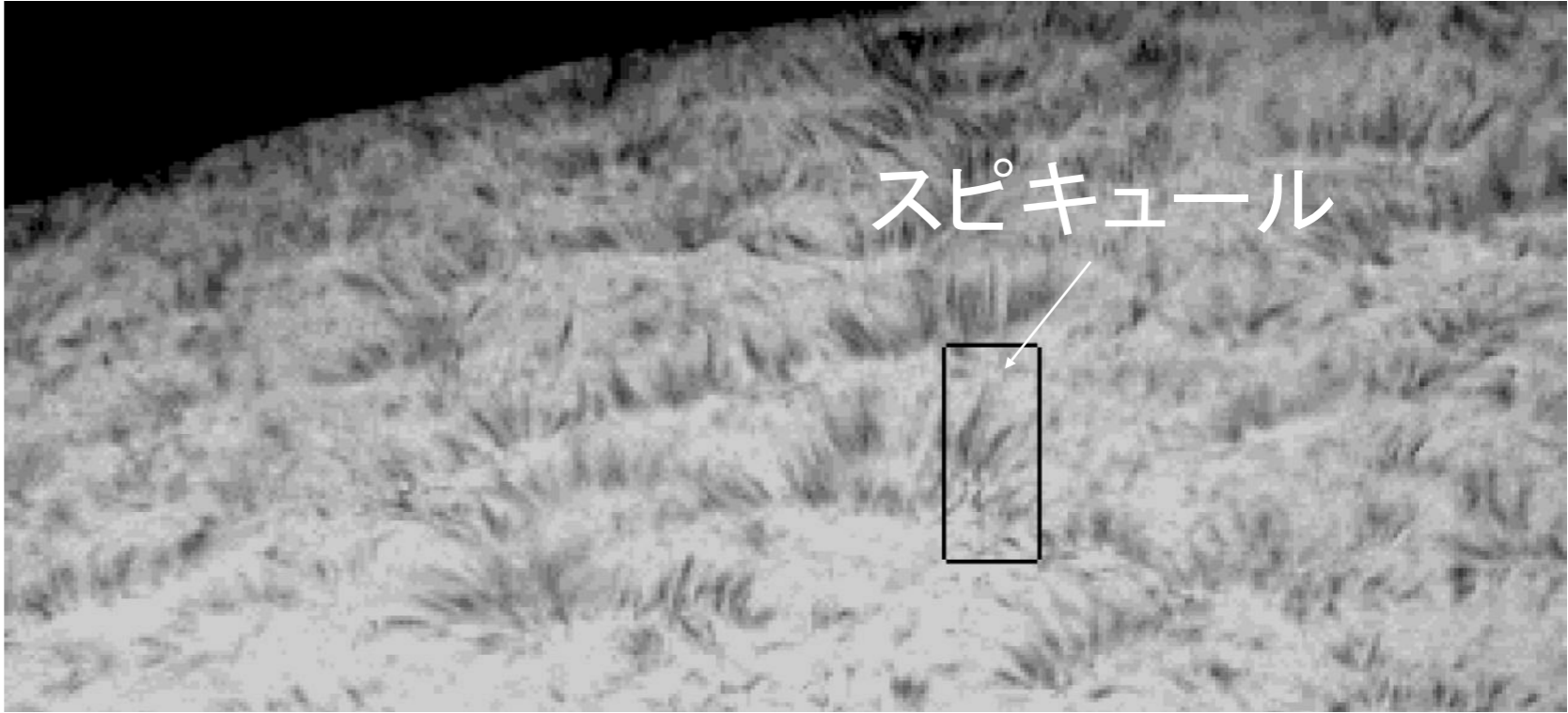
工藤哲洋 (国立天文台)

Outline

- スピキュールとコロナ加熱
- 成層大気中での音波、アルフベン波の性質
- スピキュールとコロナ加熱のMHD数値シミュレーション

スピキュール、コロナ加熱

スピキュールとは
彩層からコロナに
突き出ている細長
い突起構造
(太陽彩層ジェット)

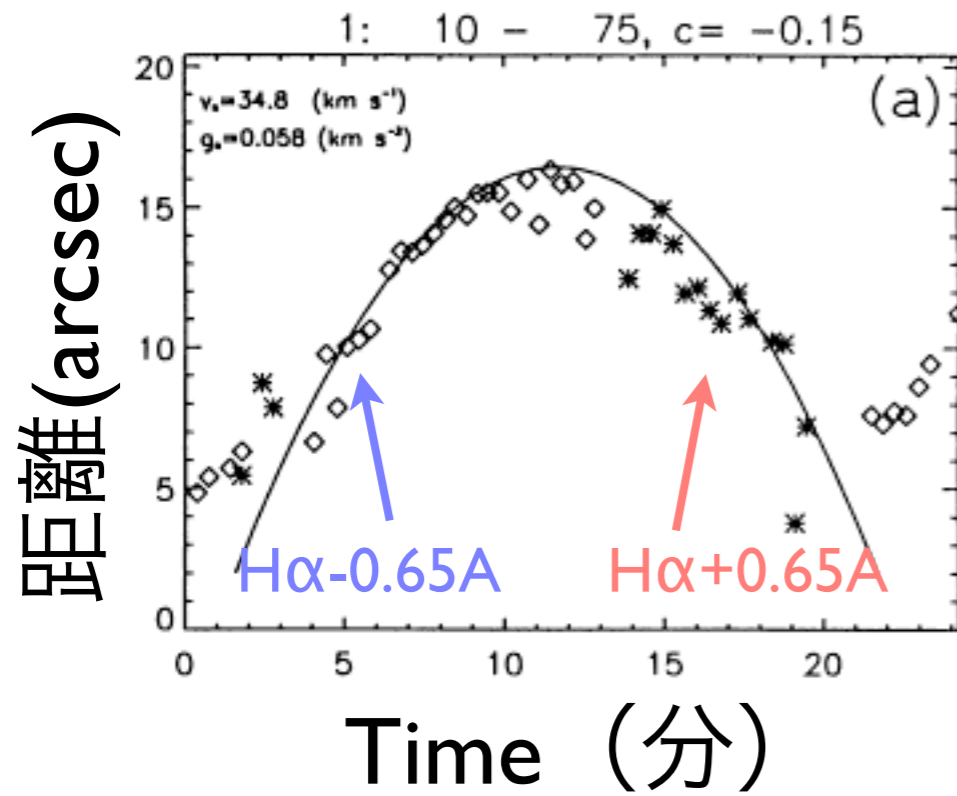


Suematsu, Wang, & Zirin (1995)

No. 1, 1995

OBSERVATIONS OF DISK SPICULES. I.

417



放物運動

初速度 = 34.8 km/s

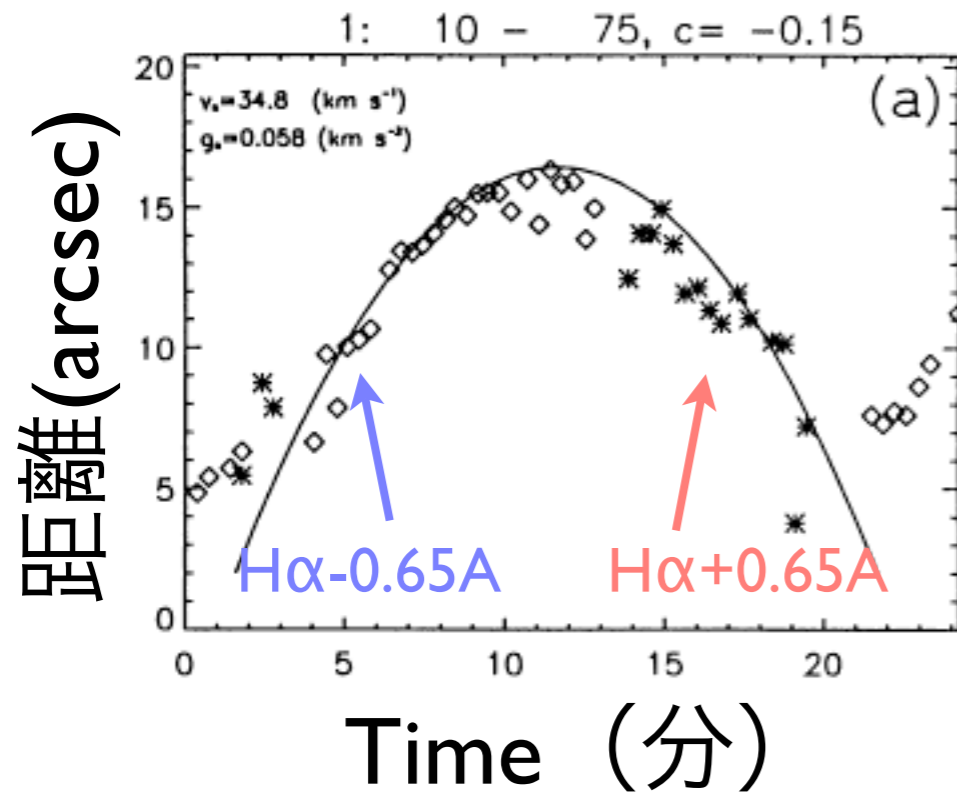
重力加速度 = 0.058 km/s^2

Suematsu, Wang, & Zirin (1995)

No. 1, 1995

OBSERVATIONS OF DISK SPICULES. I.

417

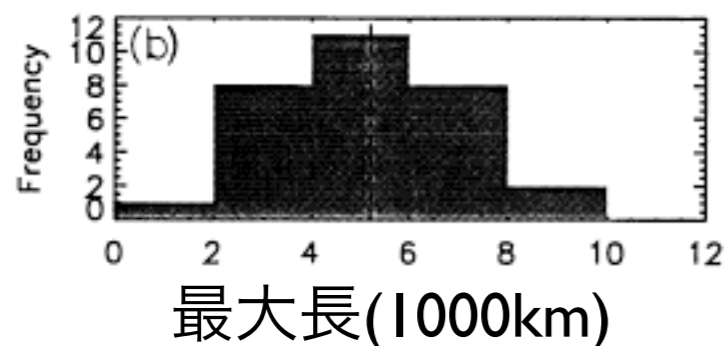
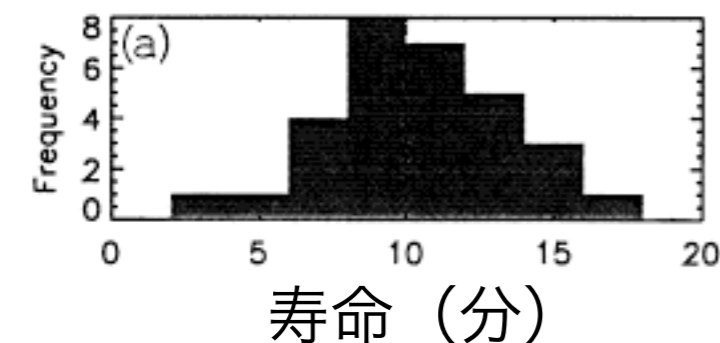


放物運動

初速度 = 34.8 km/s

重力加速度 = 0.058 km/s^2

頻度分布



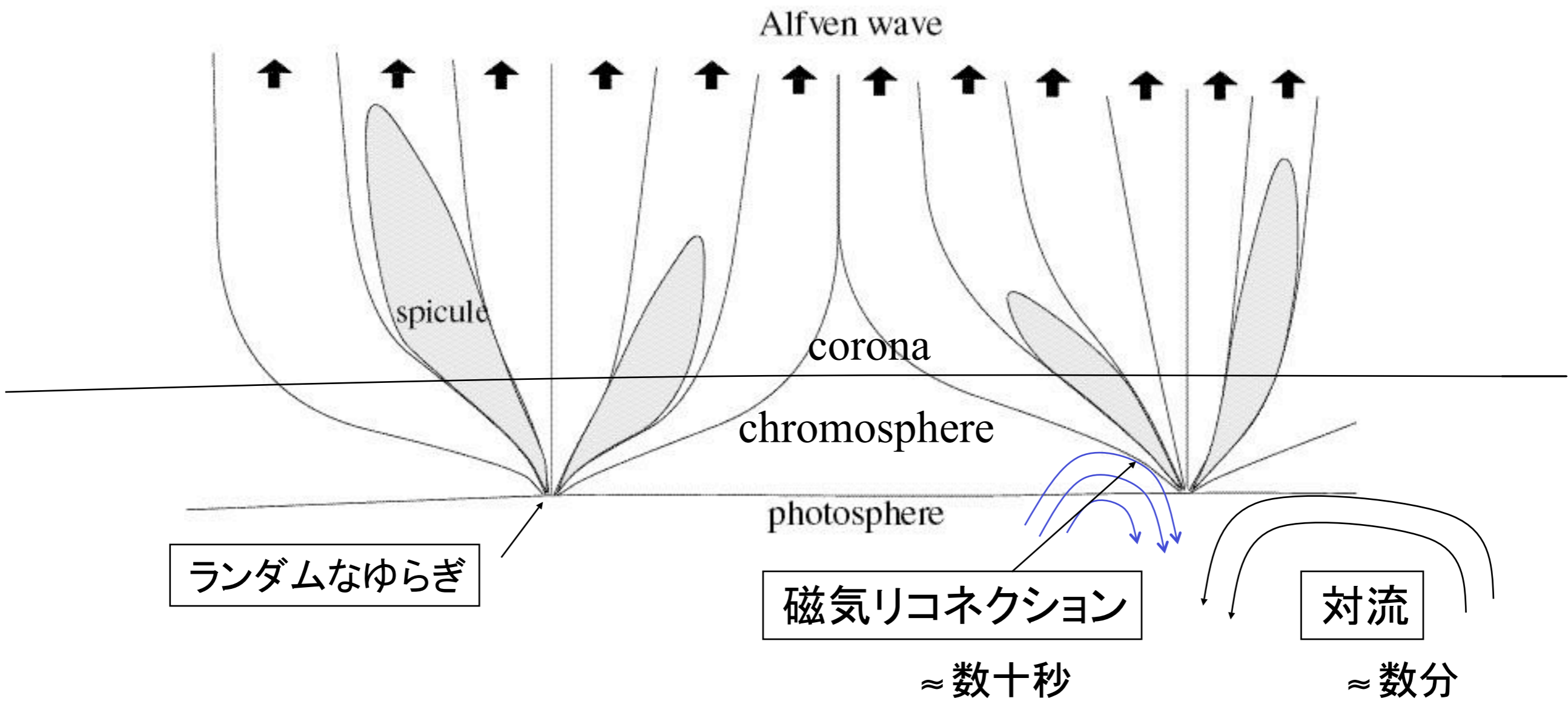
タイムスケール～10分

典型的大きさ～5000km

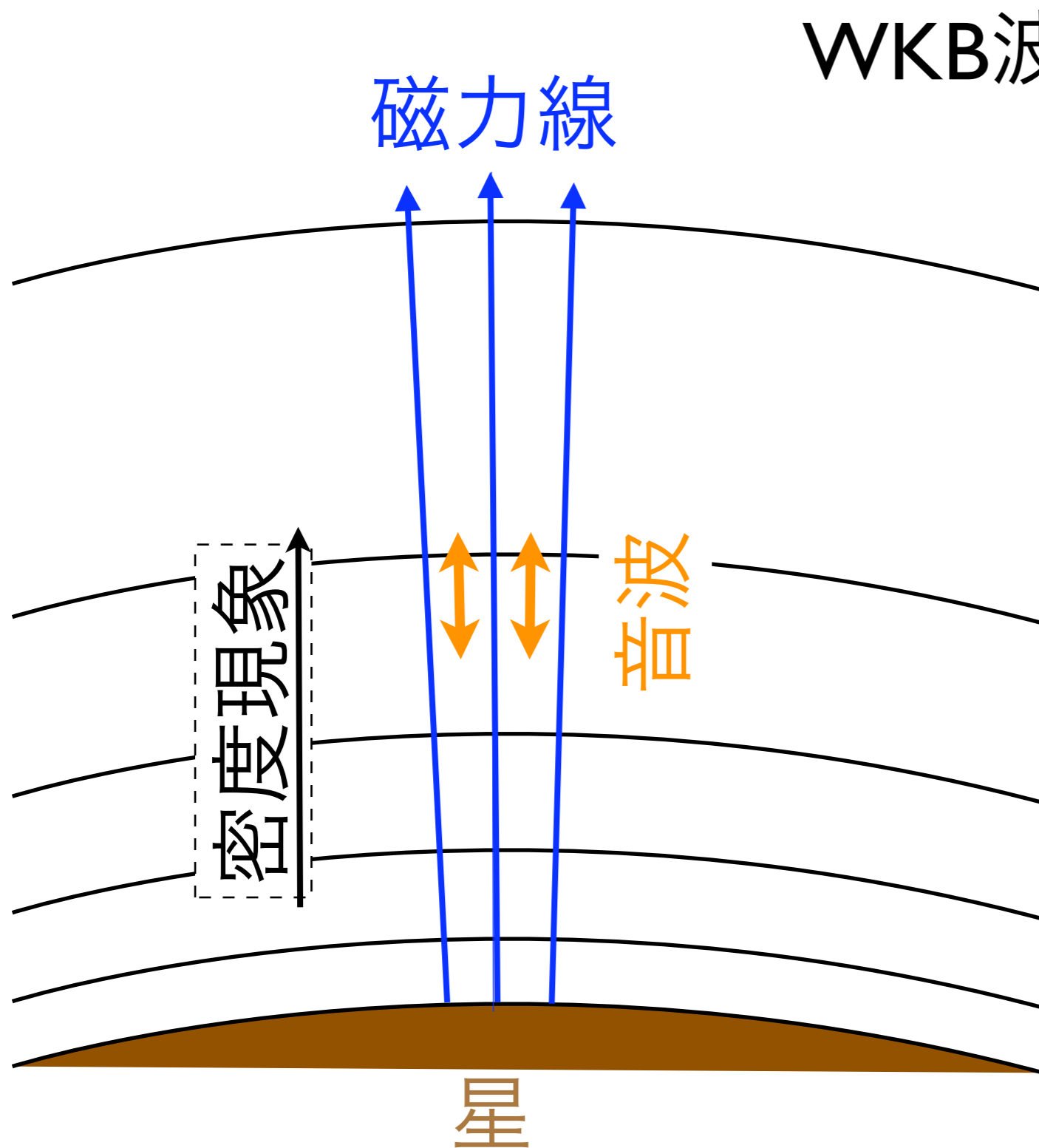
スピキュールを生成したエネルギーの一部が波としてコロナへ。



コロナ加熱



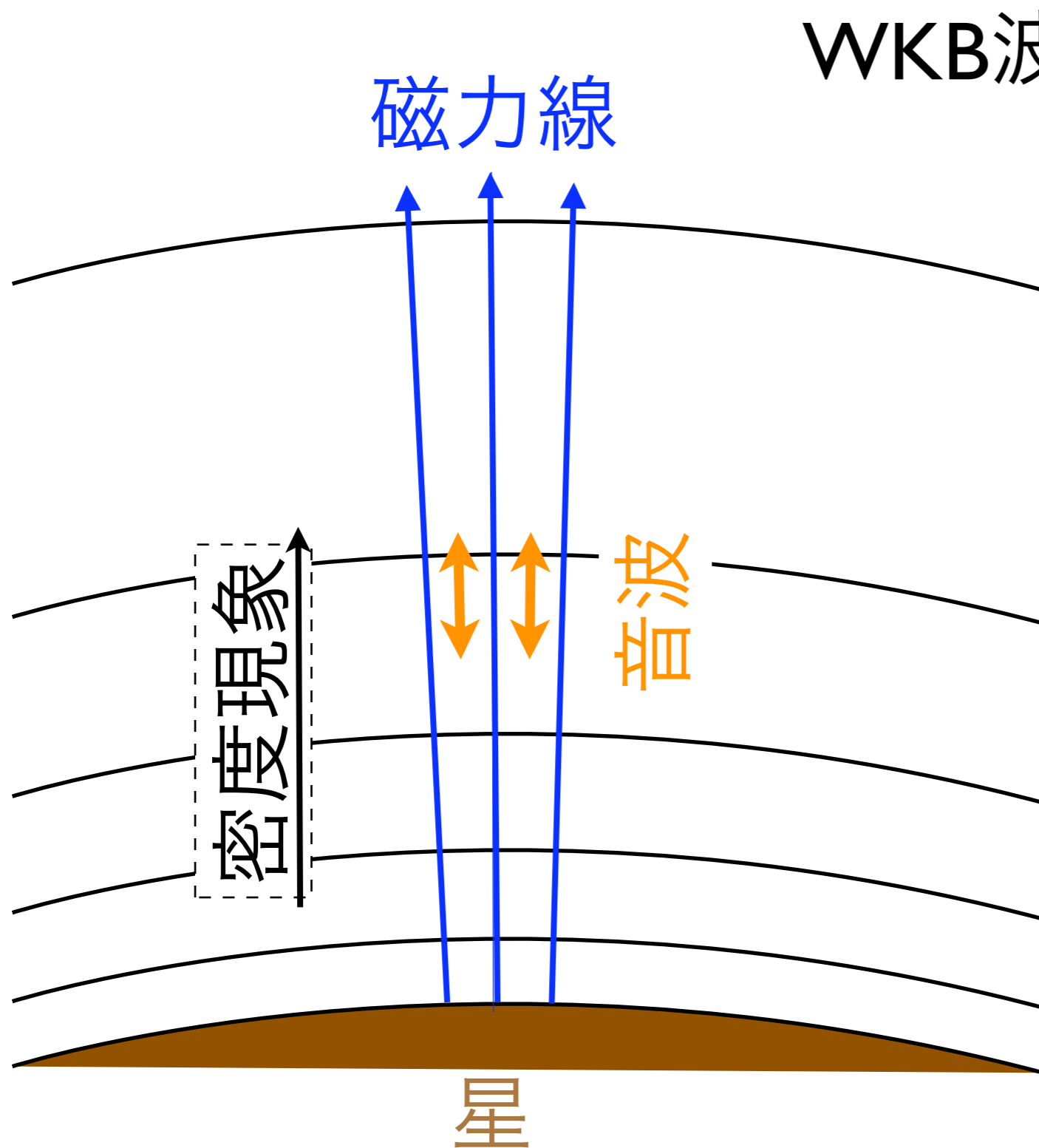
成層大気中での音波



WKB波 $\rho V_{\parallel}^2 C_s = \text{const.}$

C_s : 音速 = 一定

成層大気中での音波

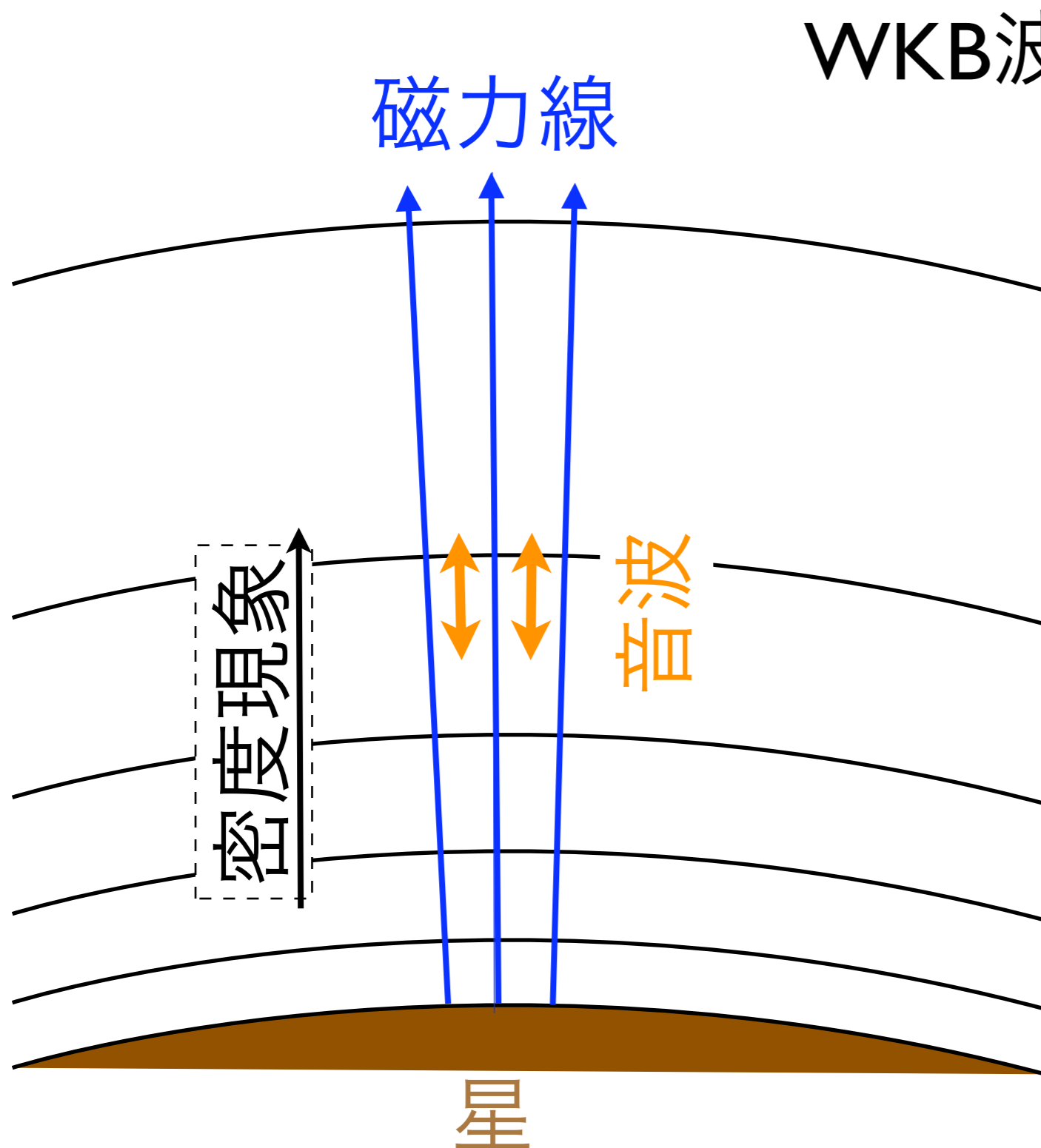


WKB波 $\rho V_{\parallel}^2 C_s = \text{const.}$

C_s : 音速 = 一定

よって $V_{\parallel} \propto \rho^{-1/2}$

成層大気中での音波



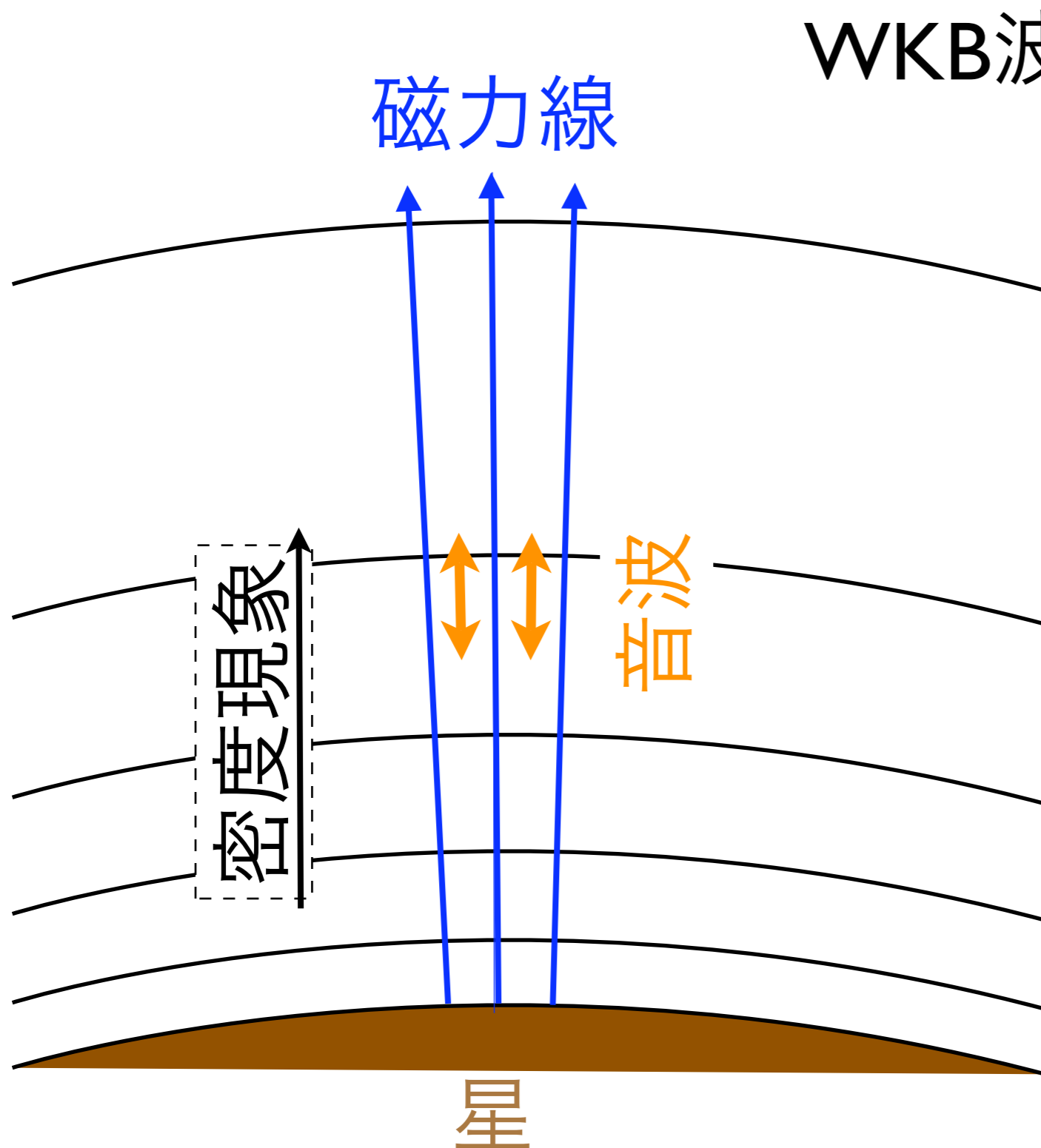
WKB波 $\rho V_{\parallel}^2 C_s = \text{const.}$

C_s : 音速 = 一定

よって $V_{\parallel} \propto \rho^{-1/2}$

ρ 減少 \rightarrow V_{\parallel} 増大

成層大気中での音波



WKB波 $\rho V_{\parallel}^2 C_s = \text{const.}$

C_s : 音速 = 一定

よって $V_{\parallel} \propto \rho^{-1/2}$

ρ 減少 \rightarrow V_{\parallel} 増大



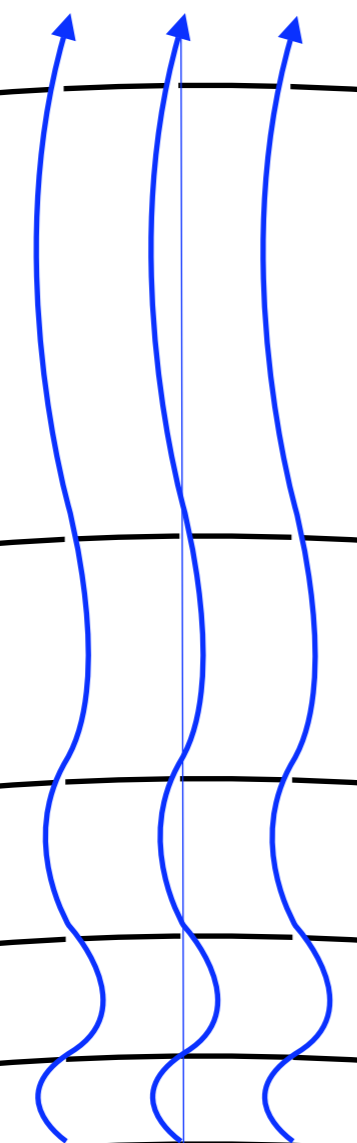
磁力線方向の運動

成層大気中でのアルフベン波

WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \quad \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

磁力線

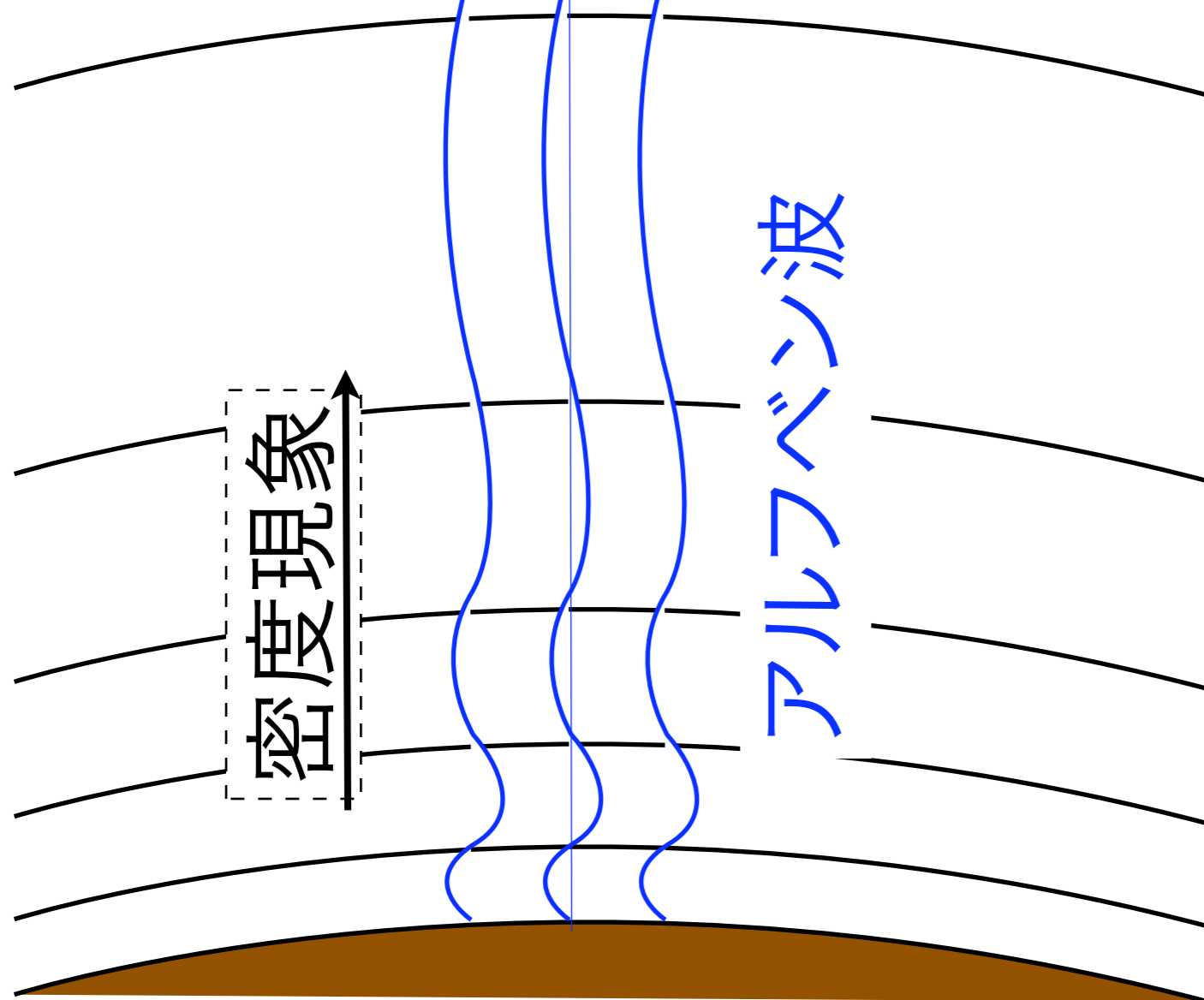


アルフベン波

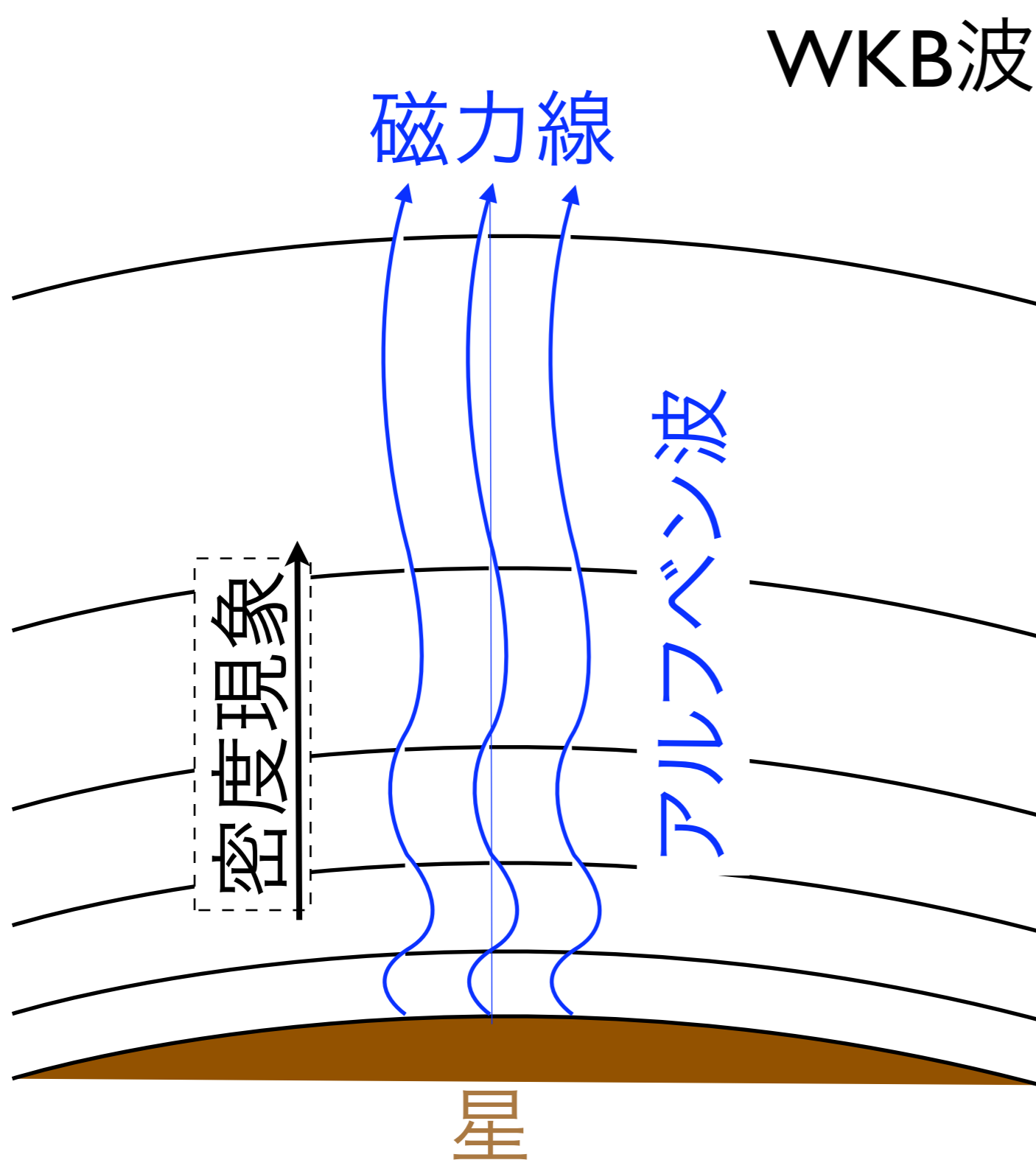
密度現象



星



成層大気中でのアルフベン波

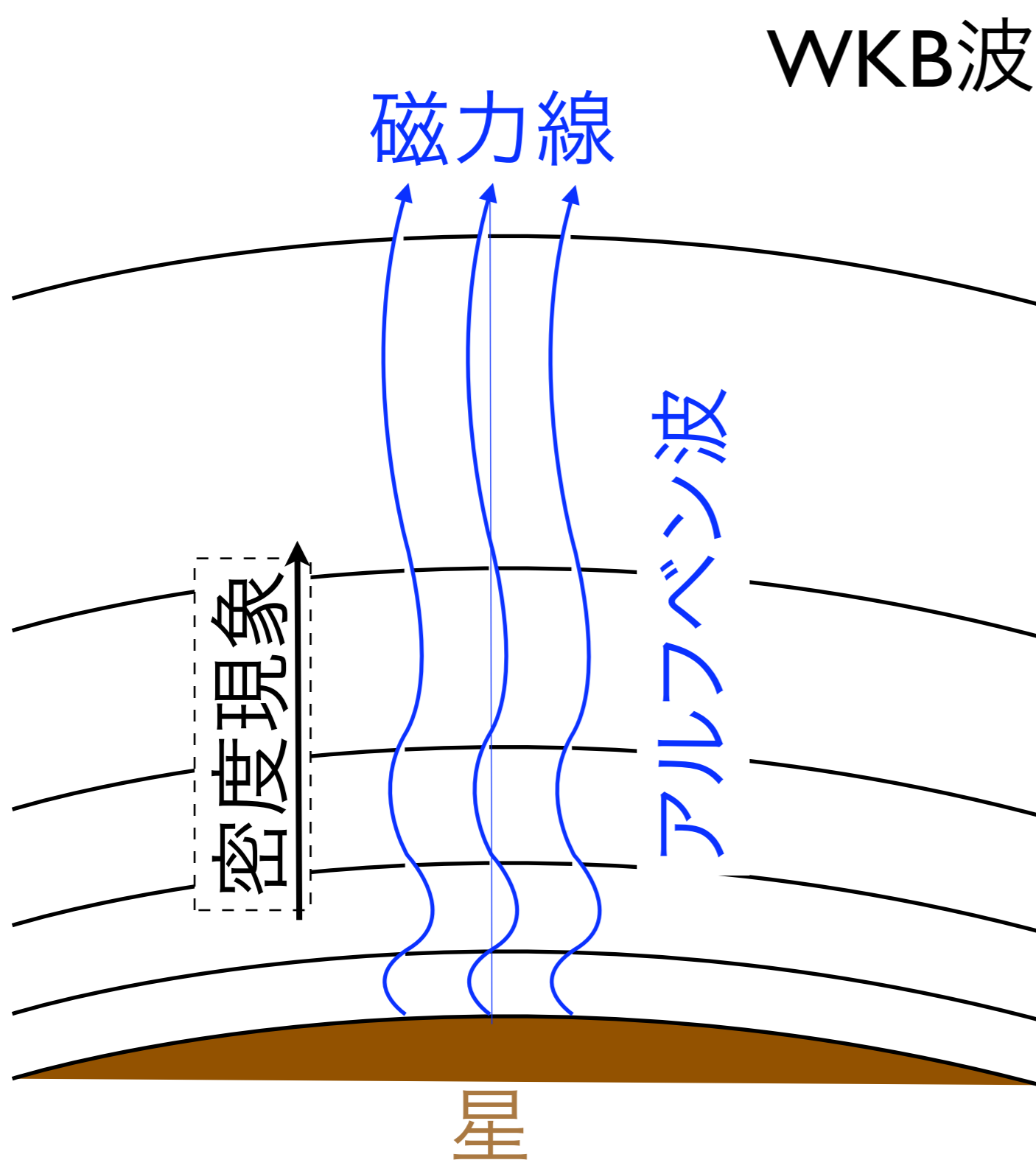


WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

成層大気中でのアルフベン波



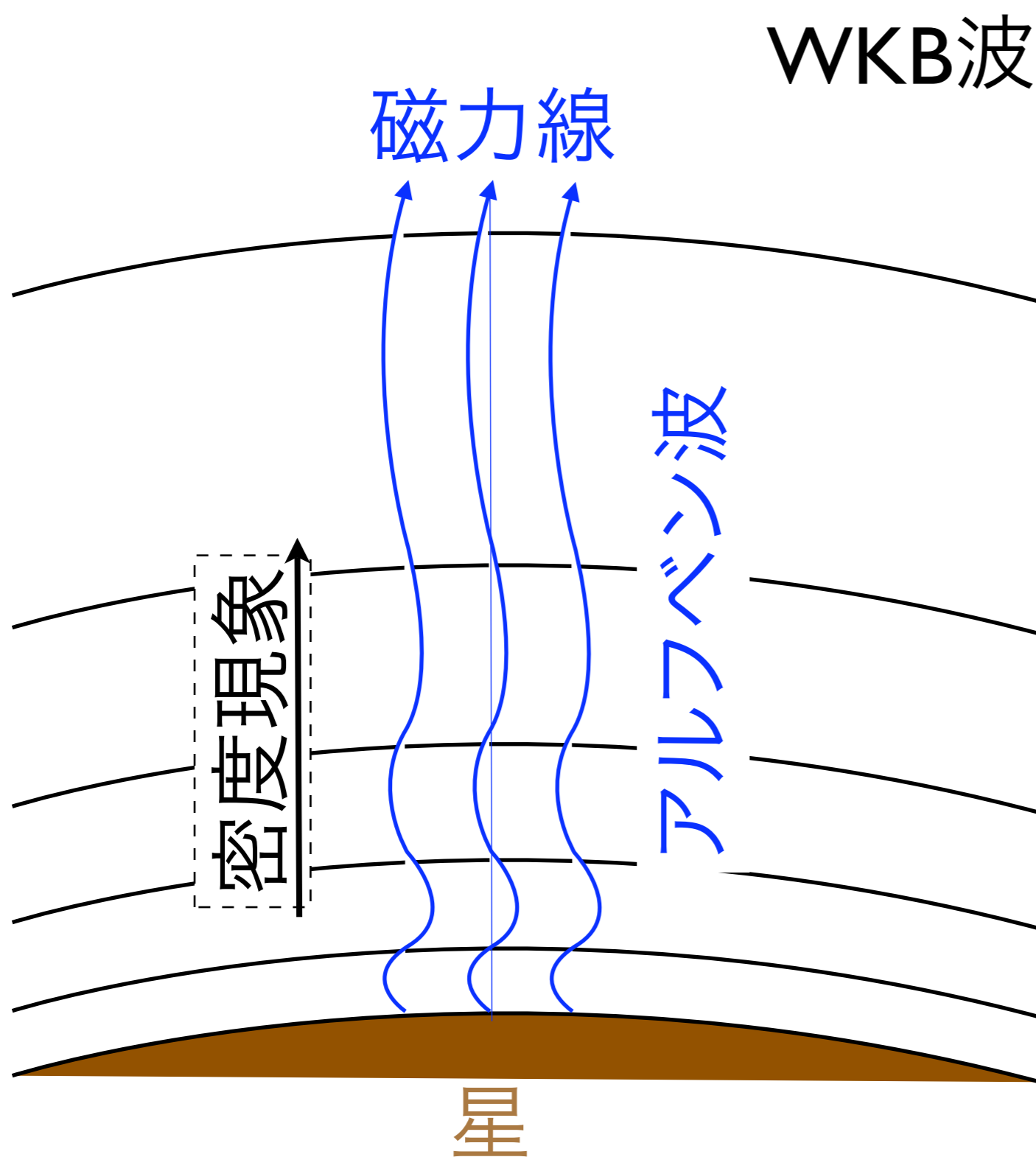
WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

ρ 減少 $\rightarrow V_{\perp}$ 増大

成層大気中でのアルフベン波



WKB波

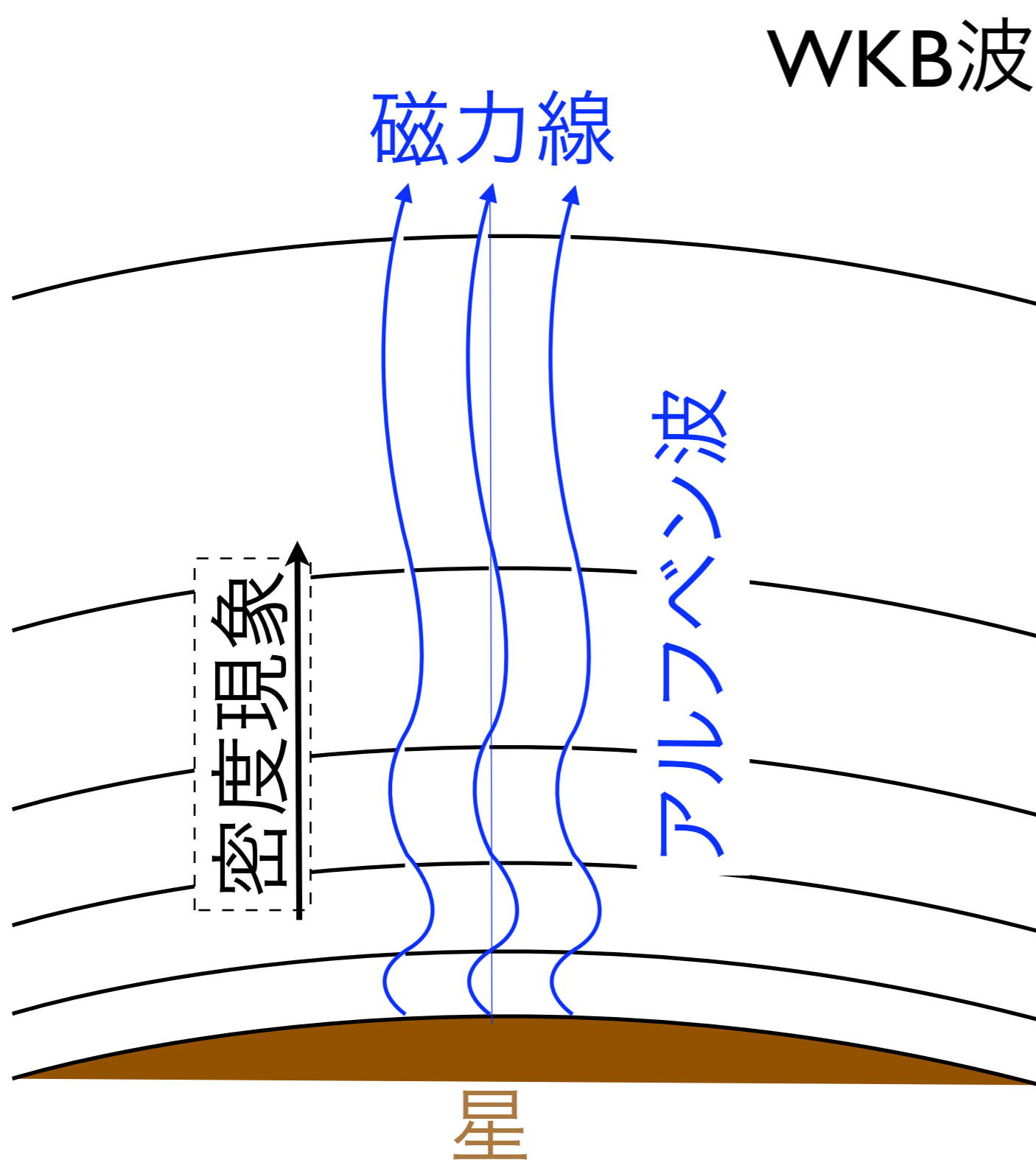
$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

ρ 減少 $\rightarrow V_{\perp}$ 増大

\rightarrow **非熱的速度**

成層大気中でのアルフベン波



WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

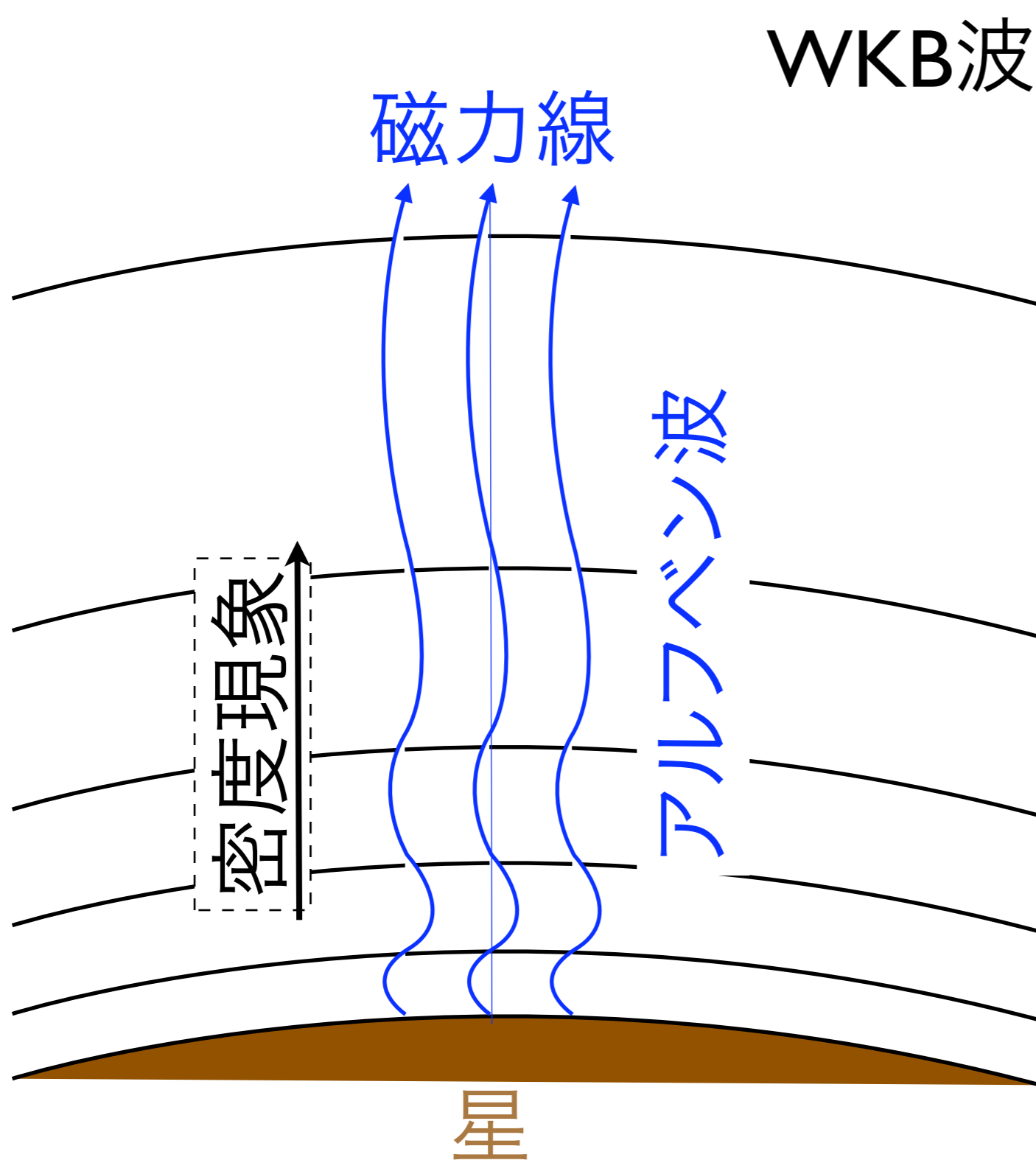
ρ 減少 $\rightarrow V_{\perp}$ 増大

\rightarrow **非熱的速度**

一方

$$\frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{V_{\perp}}{V_A}$$

成層大気中でのアルフベン波



WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

ρ 減少 $\rightarrow V_{\perp}$ 増大

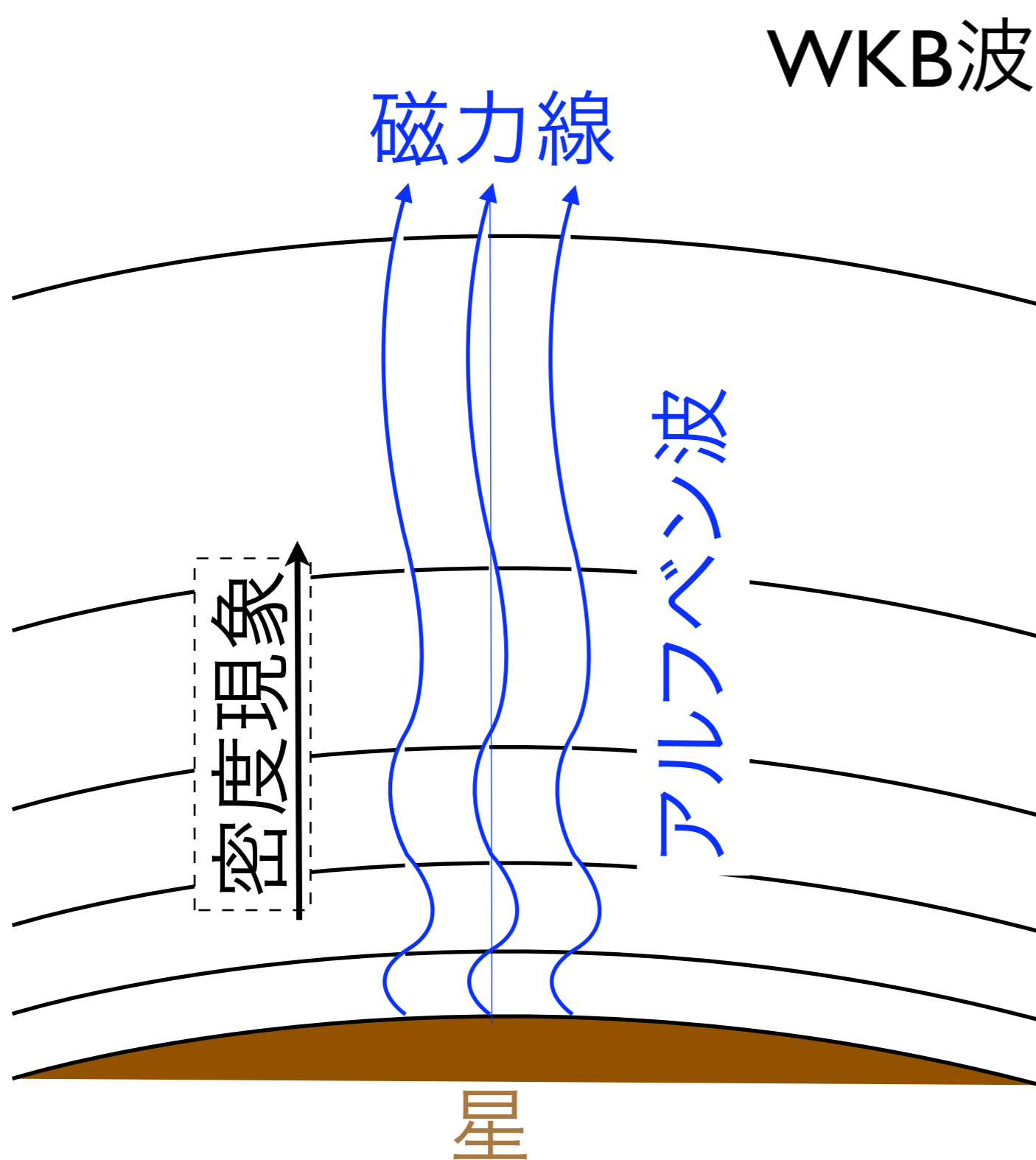
\rightarrow **非熱的速度**

一方

$$\frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{V_{\perp}}{V_A}$$

よって $B_{\perp} \propto \rho^{1/4}$

成層大気中でのアルフベン波



WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

ρ 減少 \rightarrow V_{\perp} 増大

\rightarrow **非熱的速度**

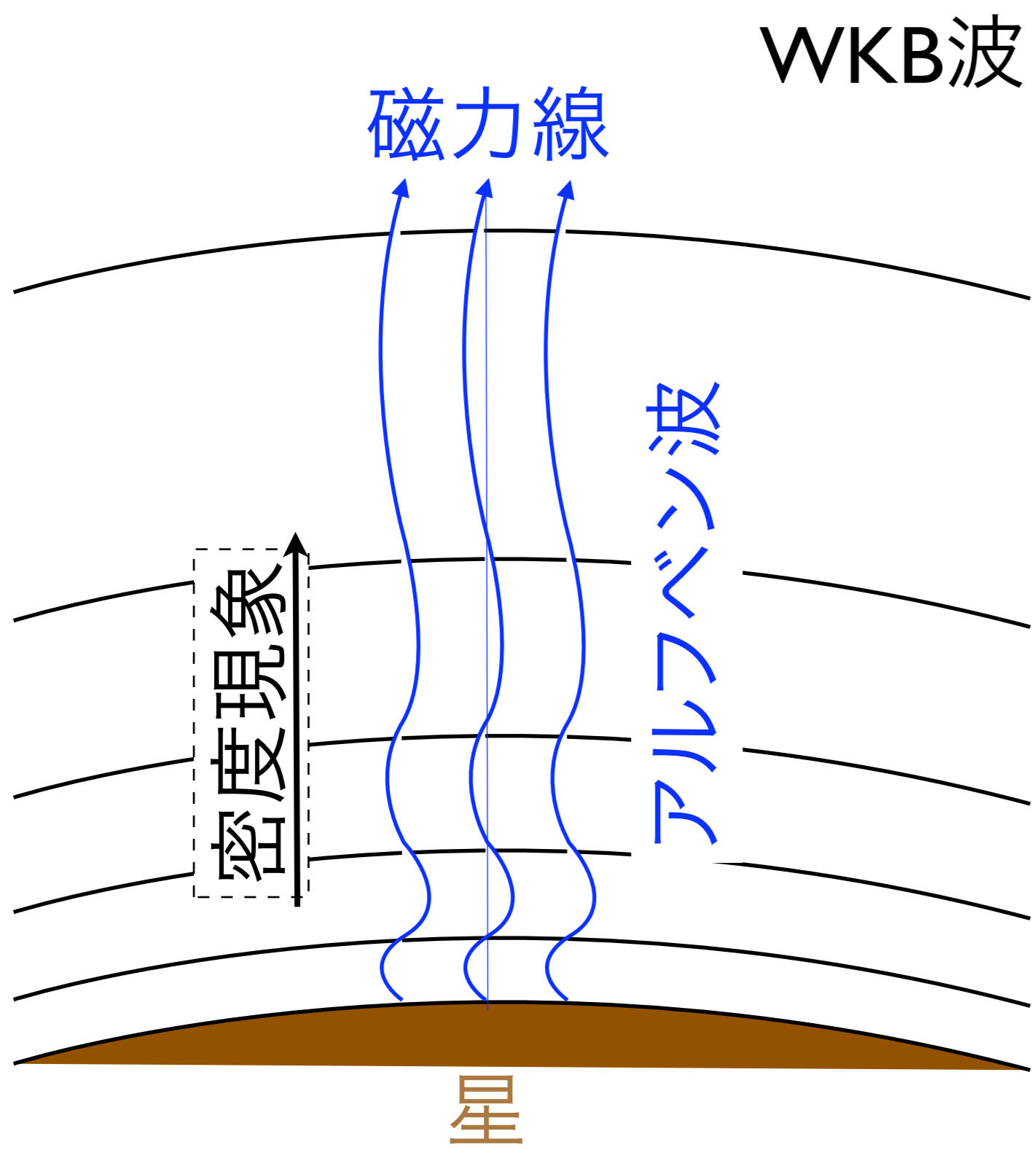
一方

$$\frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{V_{\perp}}{V_A}$$

よって $B_{\perp} \propto \rho^{1/4}$

ρ 減少 \rightarrow B_{\perp} 減少

成層大気中でのアルフベン波



WKB波

$$\rho V_{\perp}^2 V_A = \text{const.} \left(V_A = \frac{B_{\parallel}}{\sqrt{4\pi\rho}} \right)$$

よって $V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$

ρ 減少 \rightarrow V_{\perp} 増大

\rightarrow **非熱的速度**

一方

$$\frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{V_{\perp}}{V_A}$$

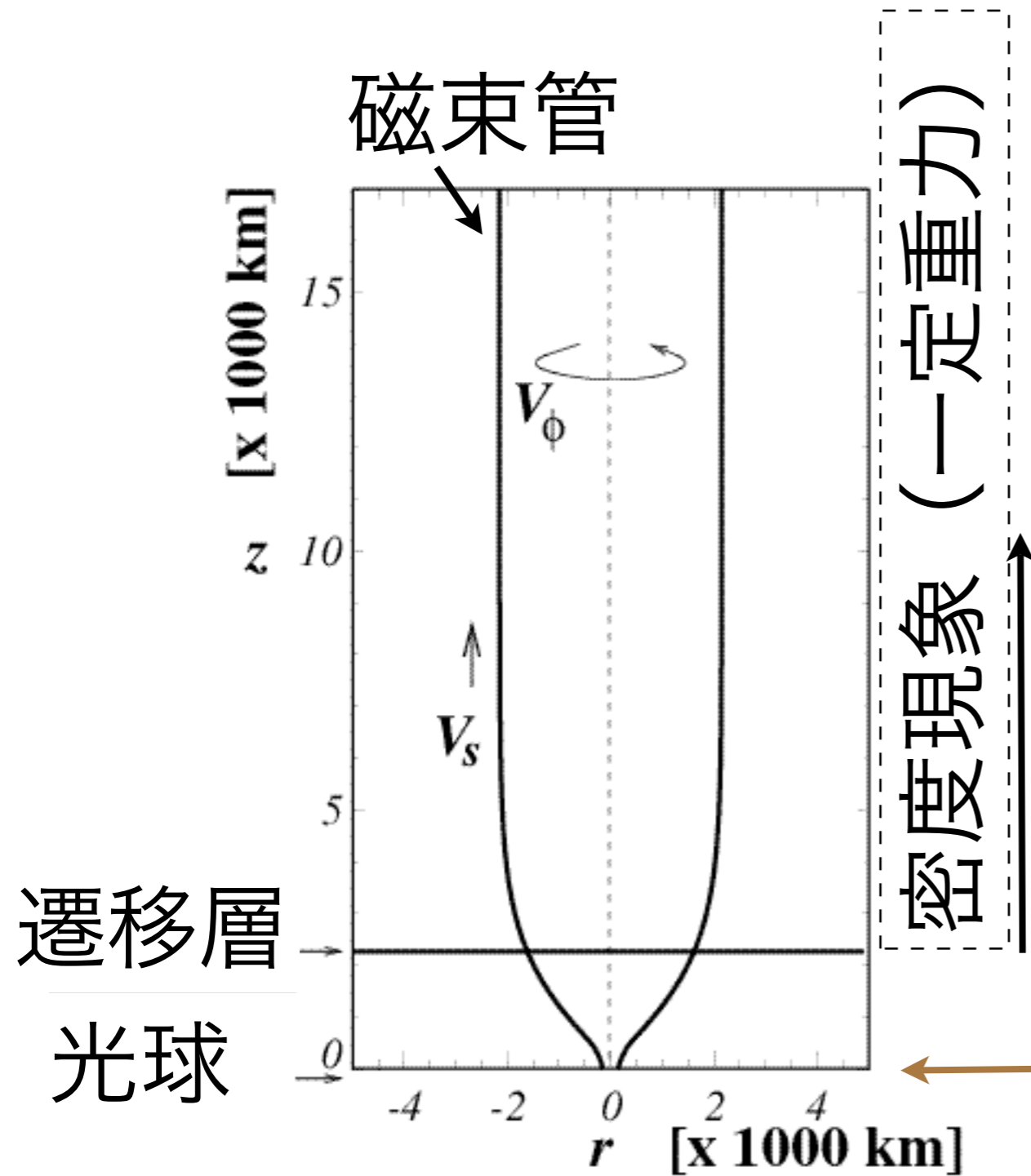
よって $B_{\perp} \propto \rho^{1/4}$

ρ 減少 \rightarrow B_{\perp} 減少

(非線形なら) \downarrow

上向きに磁気圧が発生

太陽スピキュールの一次元数値シミュレーション⁸



- 磁束管を固定
- 磁束間に沿った方向の流れを解く

「ゆらぎ」を与え、音波やアルフベン波を発生

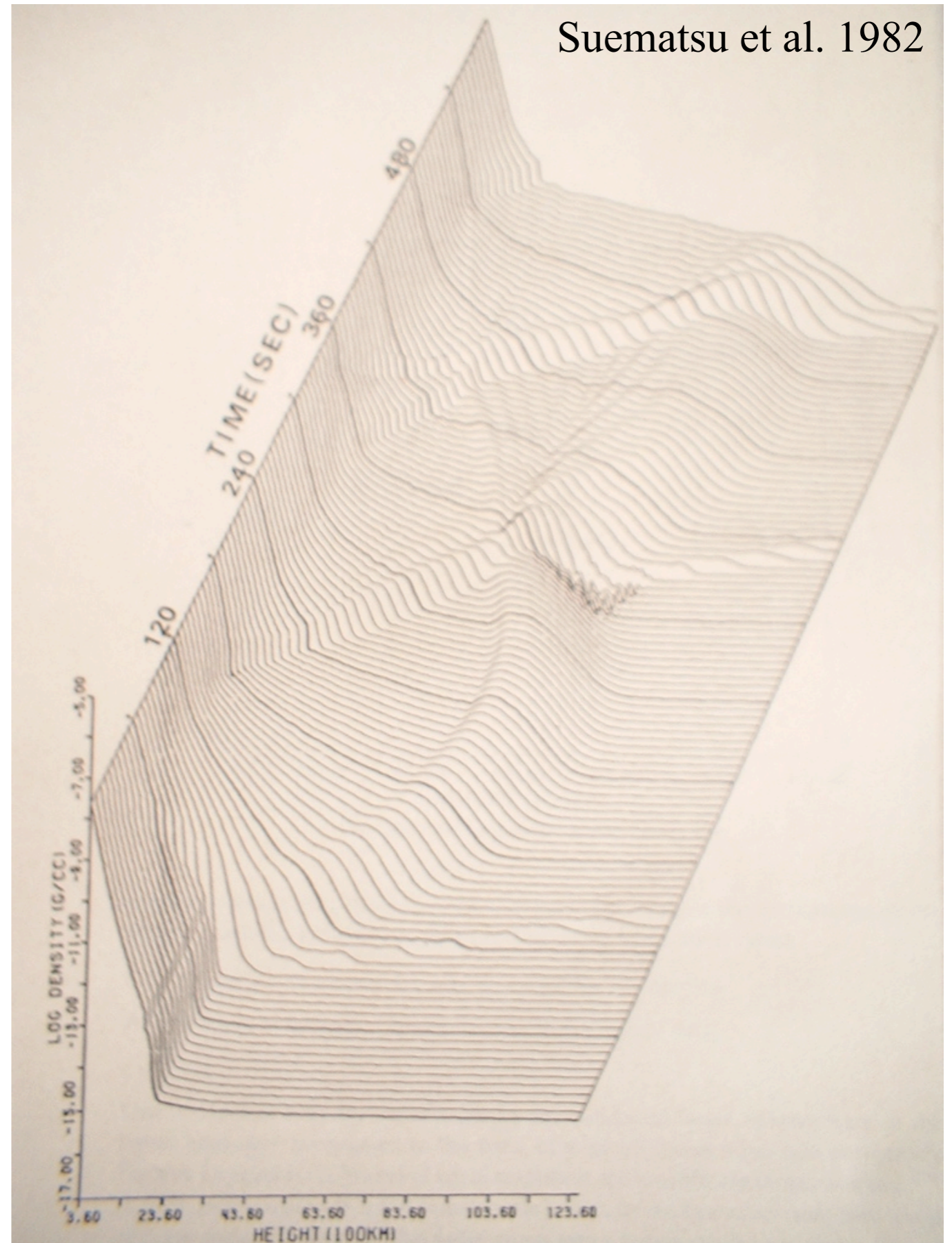
音波モデル

磁束管の根元に
縦波のゆらぎ

Suematsu et al. 1982

Shibata & Suematsu 1982

Sterling & Hollweg 1988

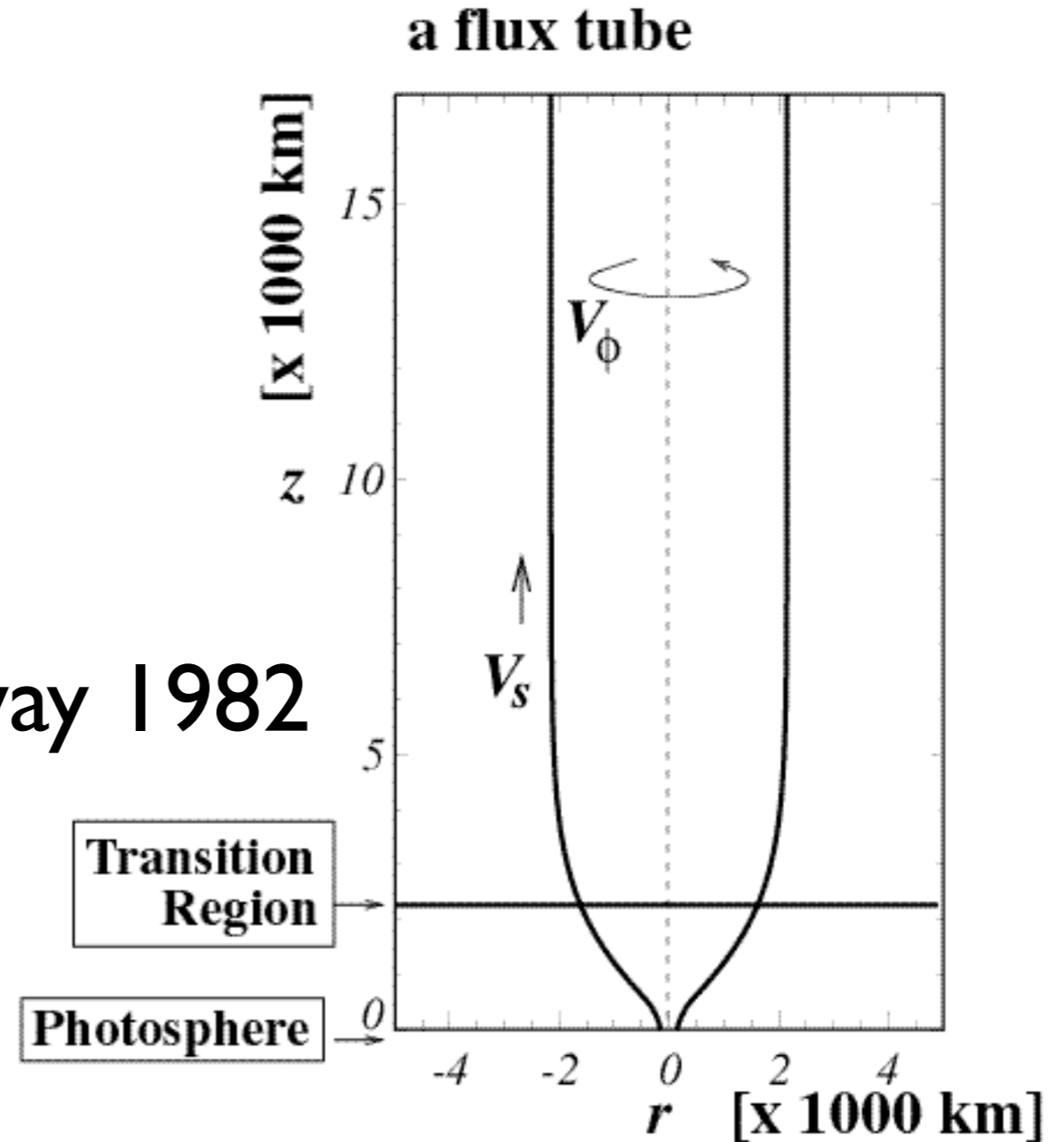


アルフベン波モデル

磁束管の根元に
横波のゆらぎ
(回転)

Hollweg, Jackson, & Galloway 1982

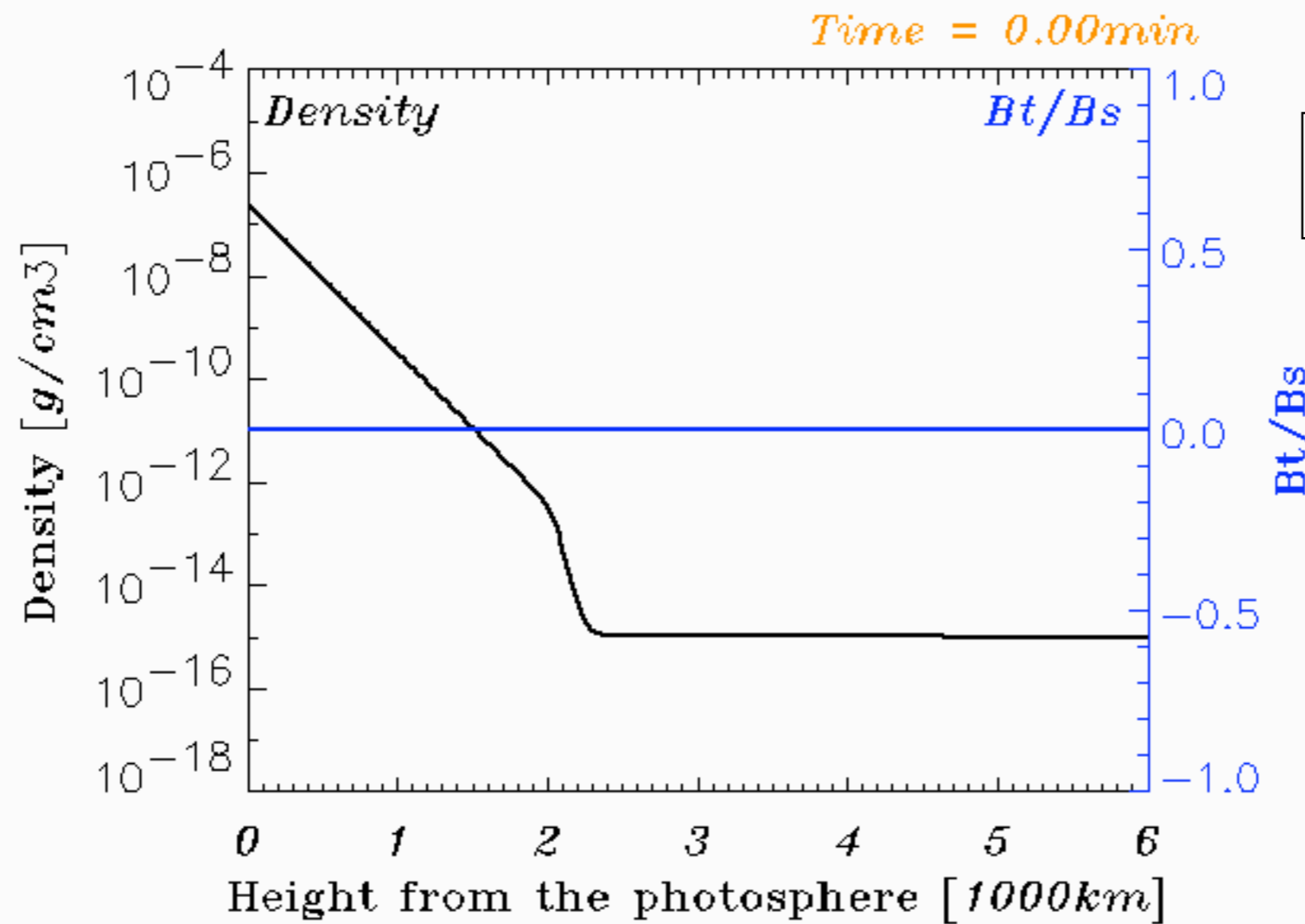
Kudoh & Shibata (1999)



回転のゆらぎ

アルフベン波モデル

Kudoh & Shibata (1999)



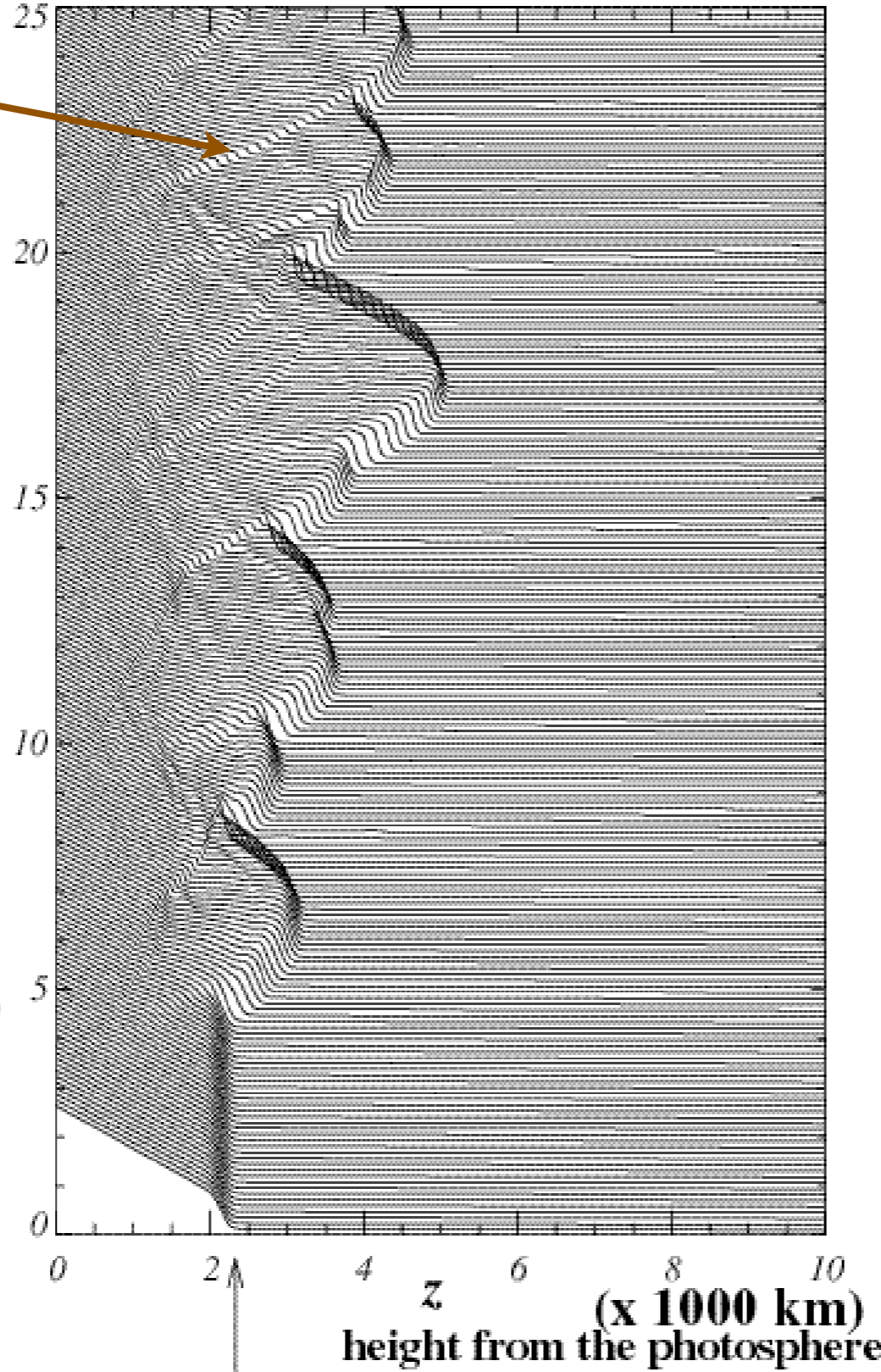
密度と磁場

衝撃波

時間

time (minutes)

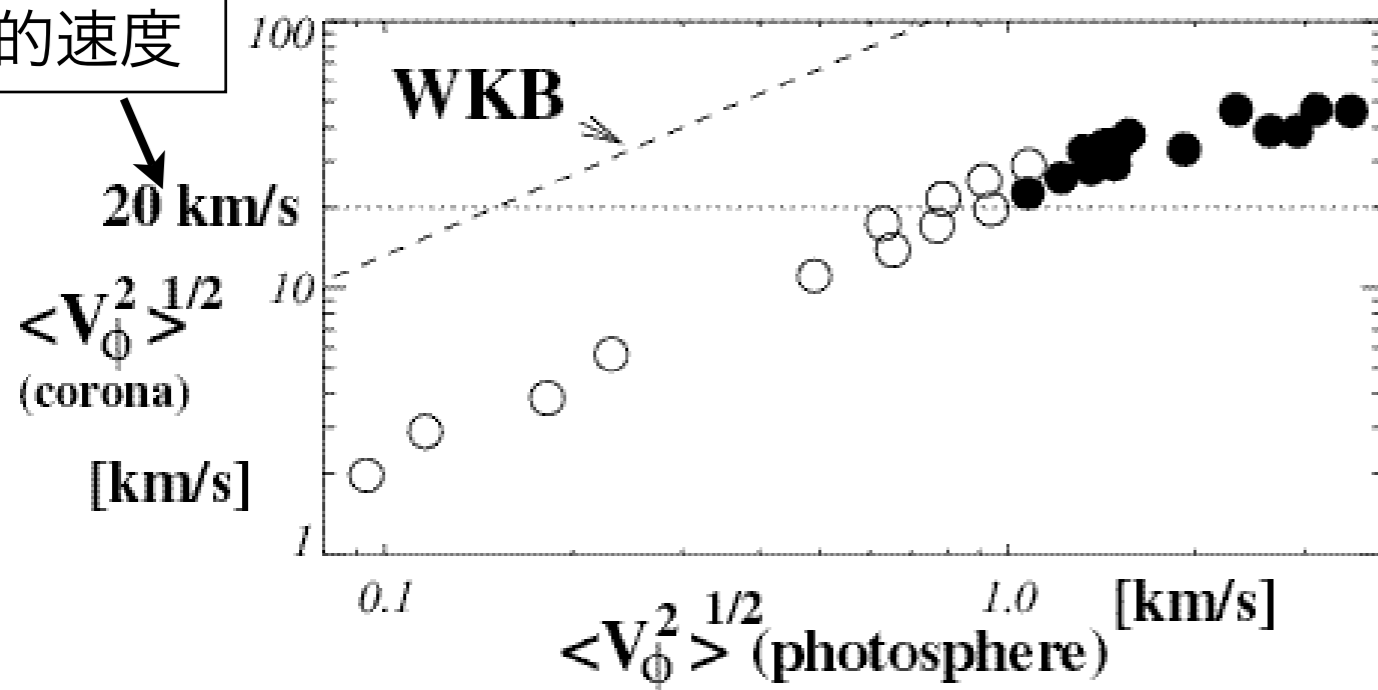
$\log \rho$
10



Transition Region

光球からの高さ

コロナでの
非熱的速度

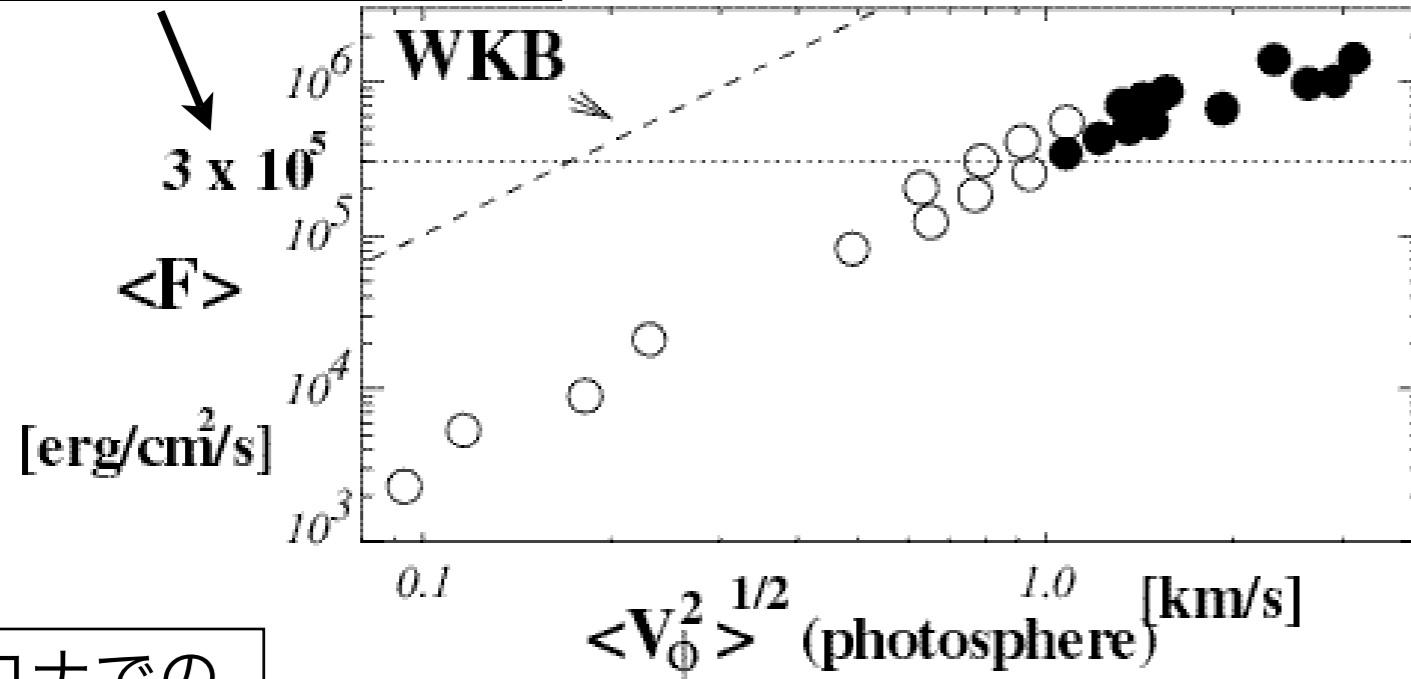


光球での速度と
コロナでの速度

$$V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$$

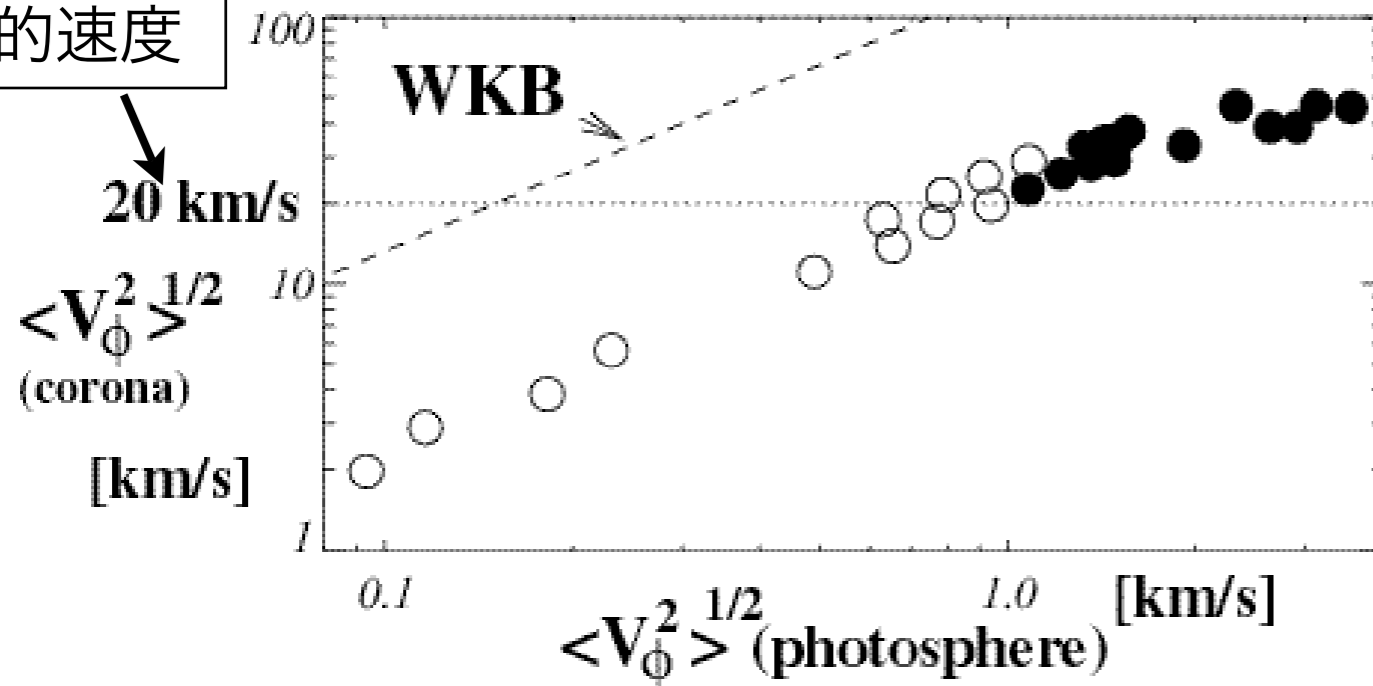
コロナ加熱に必要な
エネルギーフラックス

- height of spicule < 5000 km
● height of spicule > 5000 km



光球での速度と
コロナに抜ける
エネルギーフラッ
クス

コロナでの
非熱的速度

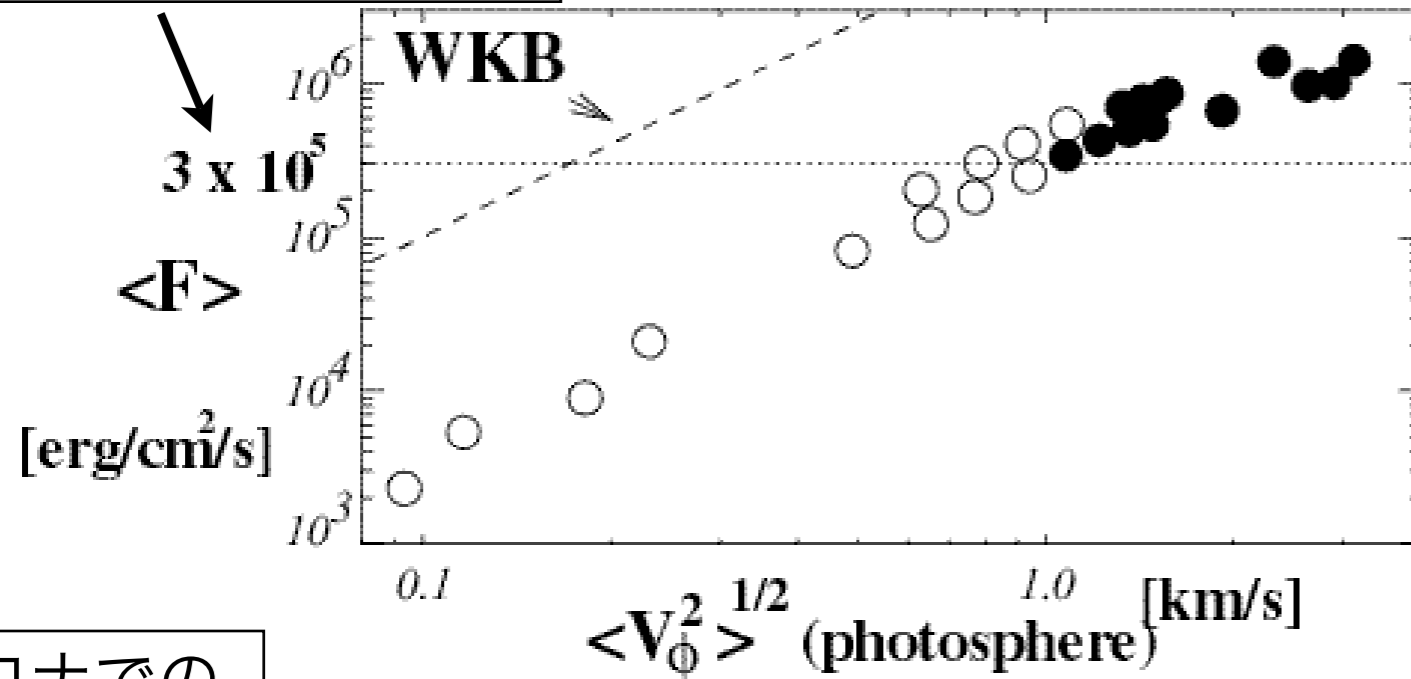


光球での速度と
コロナでの速度

$$V_\perp \propto \rho^{-1/4}$$

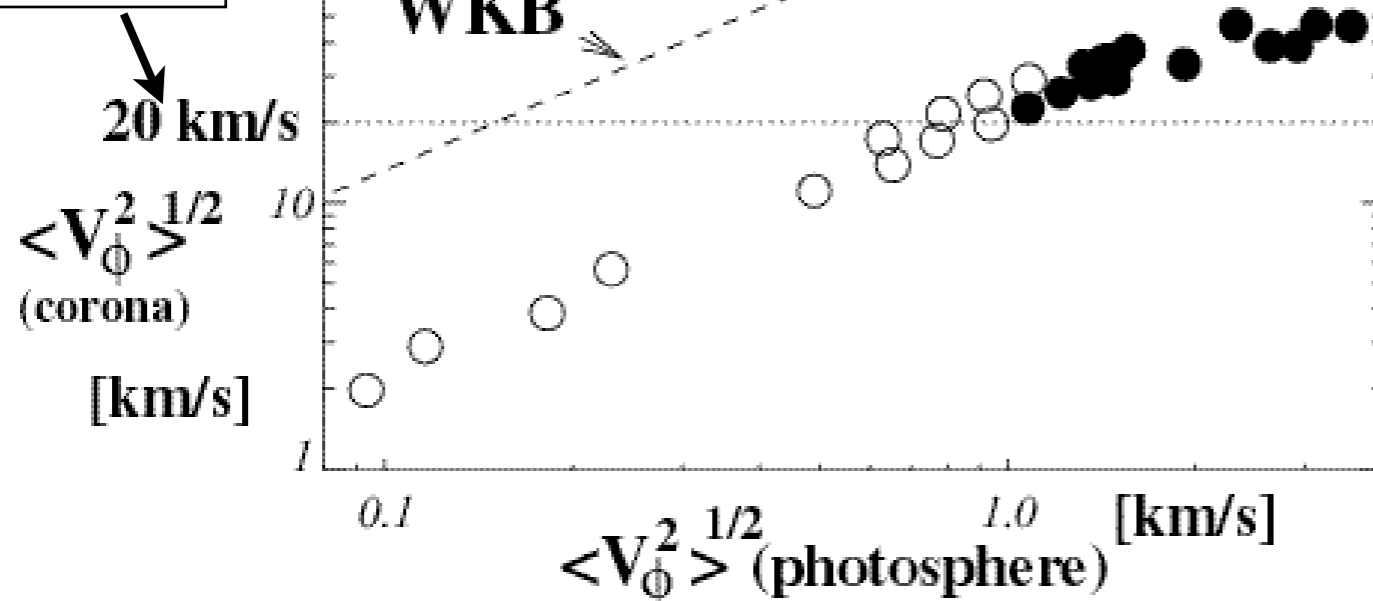
コロナ加熱に必要な
エネルギーフラックス

- height of spicule < 5000 km
- height of spicule > 5000 km



光球での速度と
コロナに抜ける
エネルギーフラッ
クス

コロナでの
非熱的速度



光球での速度と
コロナでの速度

$$V_{\perp} \propto \rho^{-1/4}$$

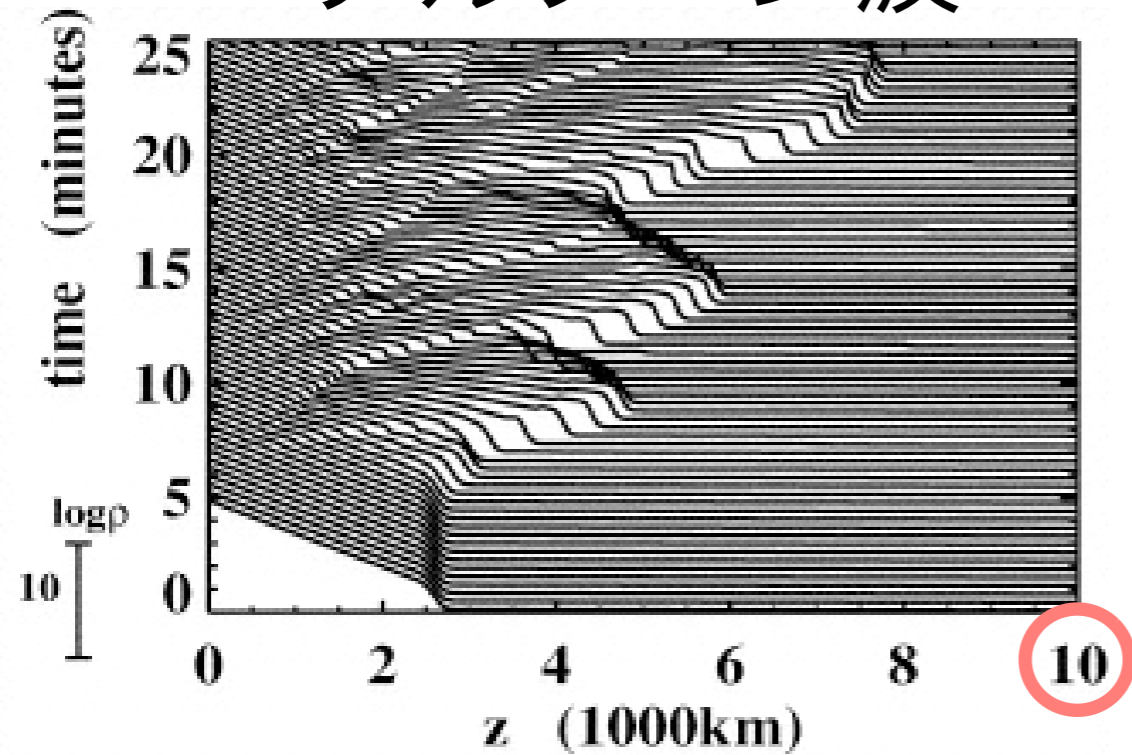
ちょうどスピキールができるくらいのゆらぎ
でコロナ加熱、非熱的速度を説明できる。

音波とアルフベン波モデルの比較 (スピキュール)¹⁴

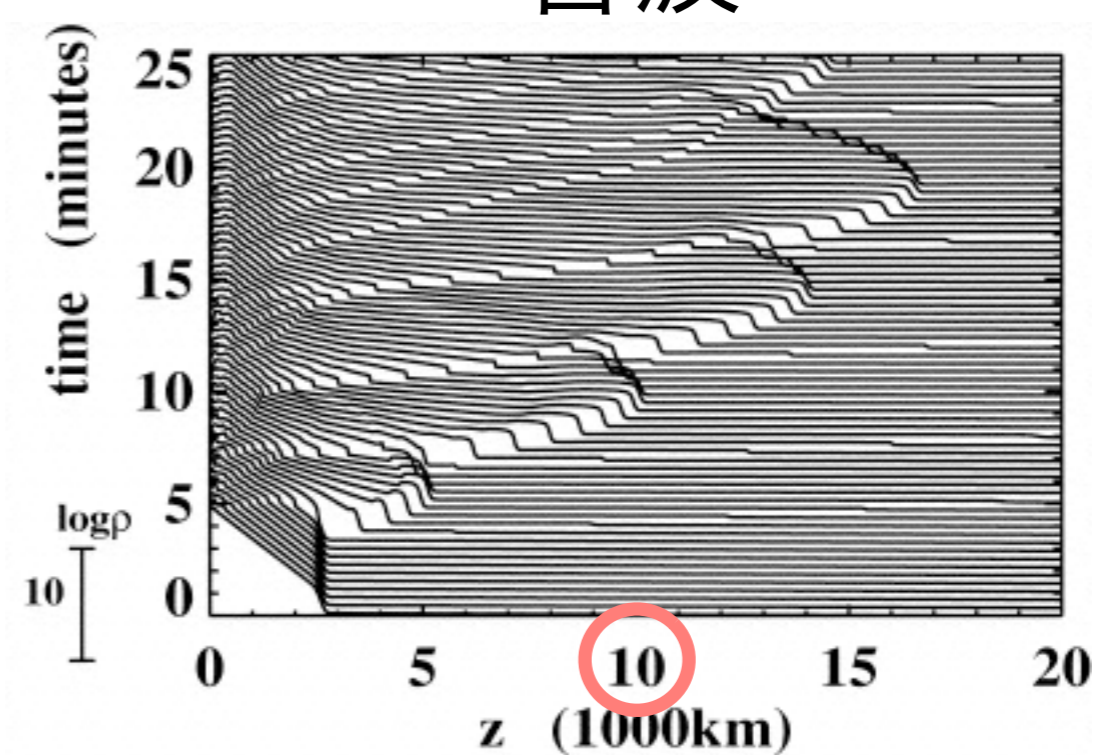
Saito, Kudoh & Shibata (2001)

根元でのゆらぎのエネルギー
フラックスは同じ

アルフベン波



音波

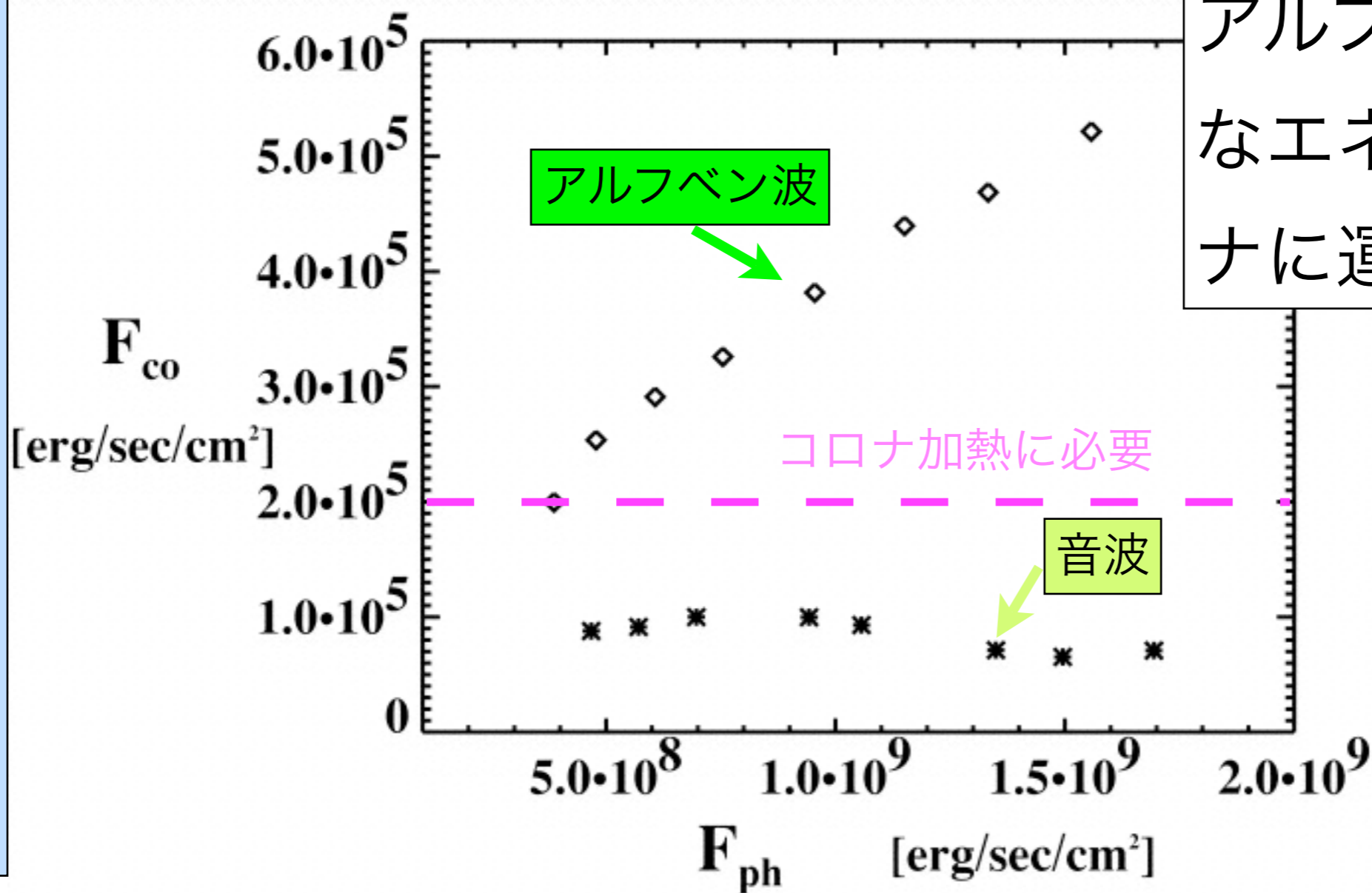


音波的なゆらぎを与えたほうが
スピキュールは高くあがる

音波とアルフベン波モデルの比較（コロナ加熱）

Saito, Kudoh & Shibata (2001)

コロナでのエネルギーフラックス



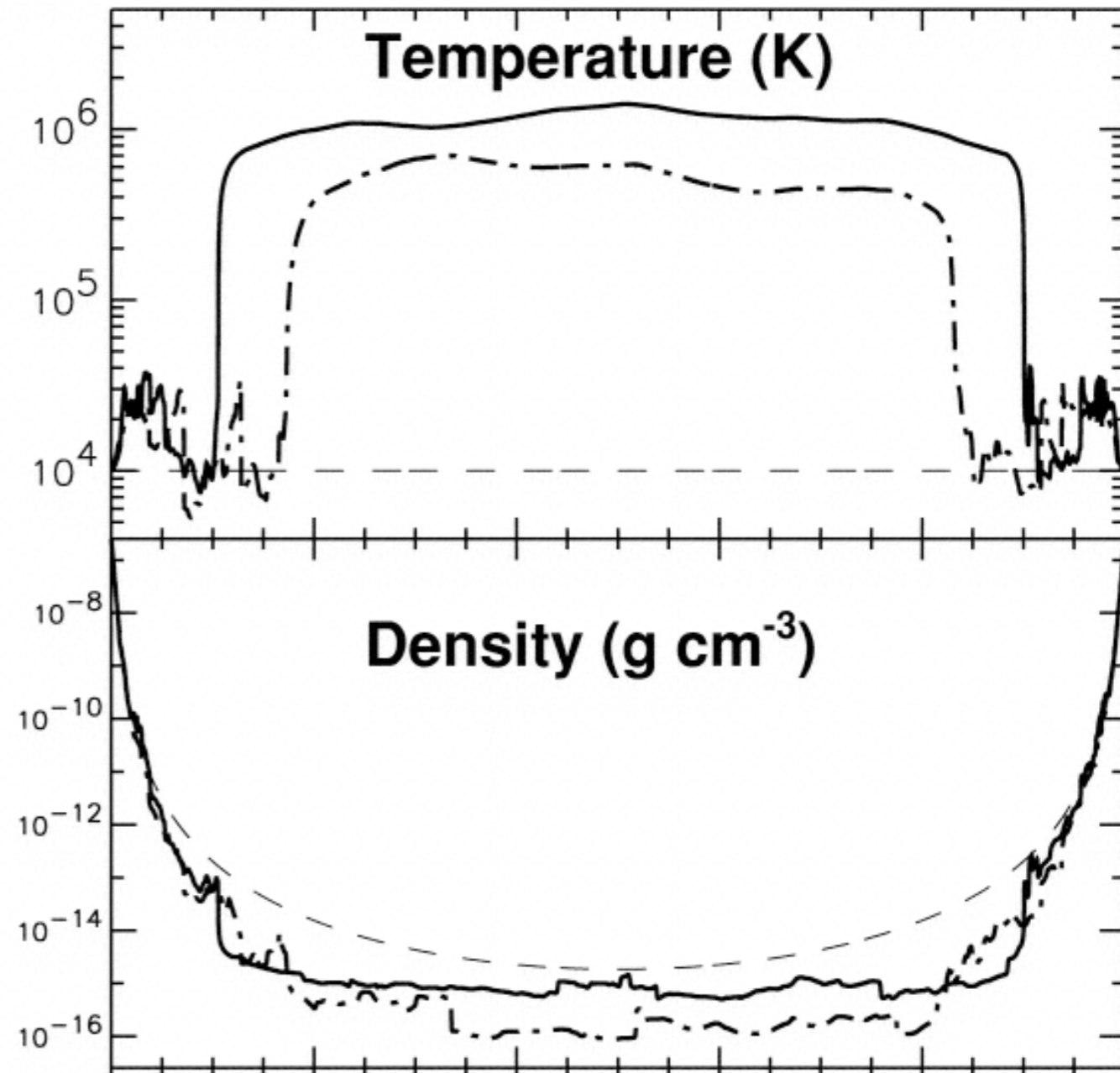
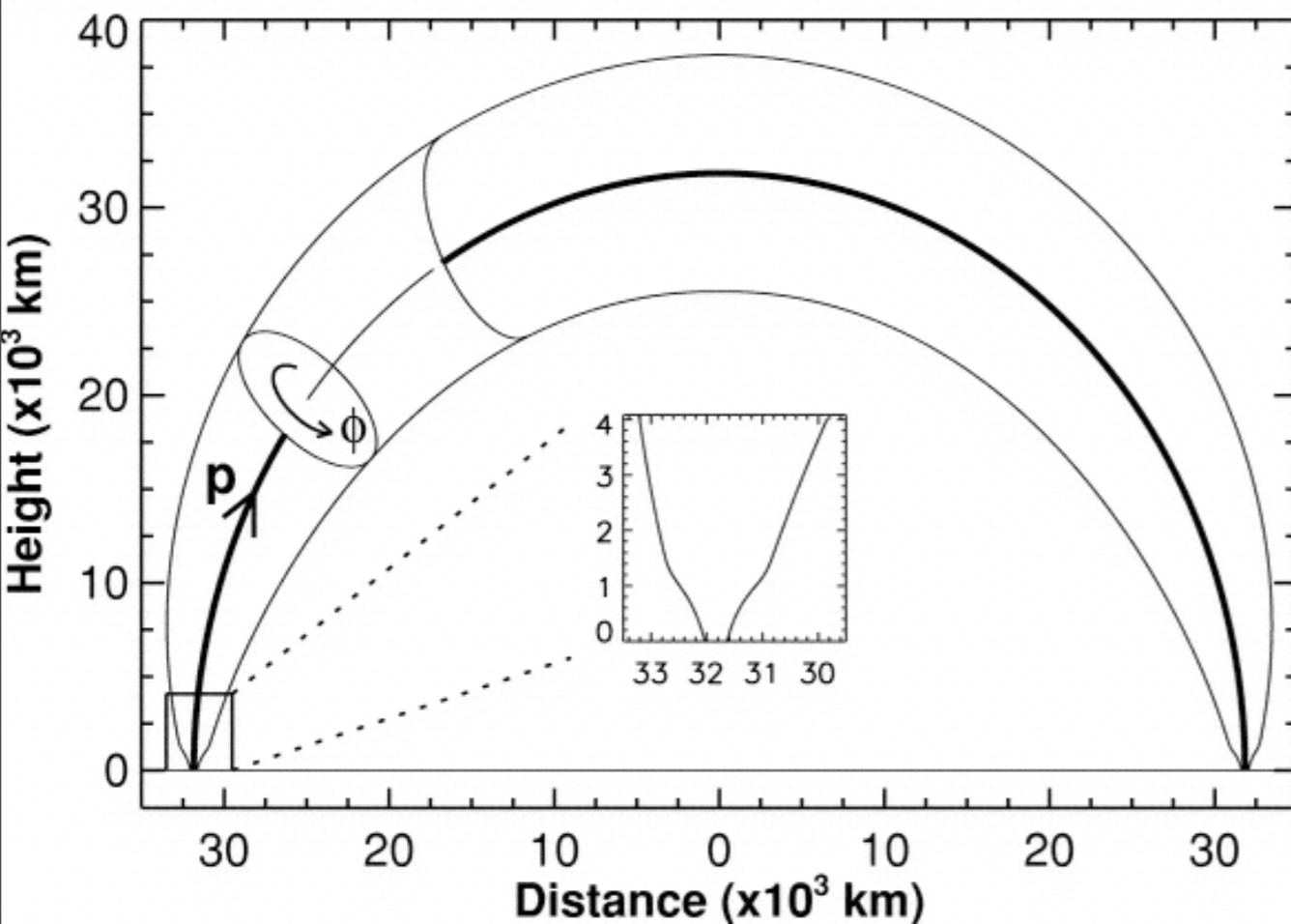
アルフベン波は十分なエネルギーをコロナに運ぶ。

光球でのエネルギーフラックス

コロナ加熱

コロナに運ばれたエネルギーは高温のコロナを作る

Moriyasu et al. (2004)



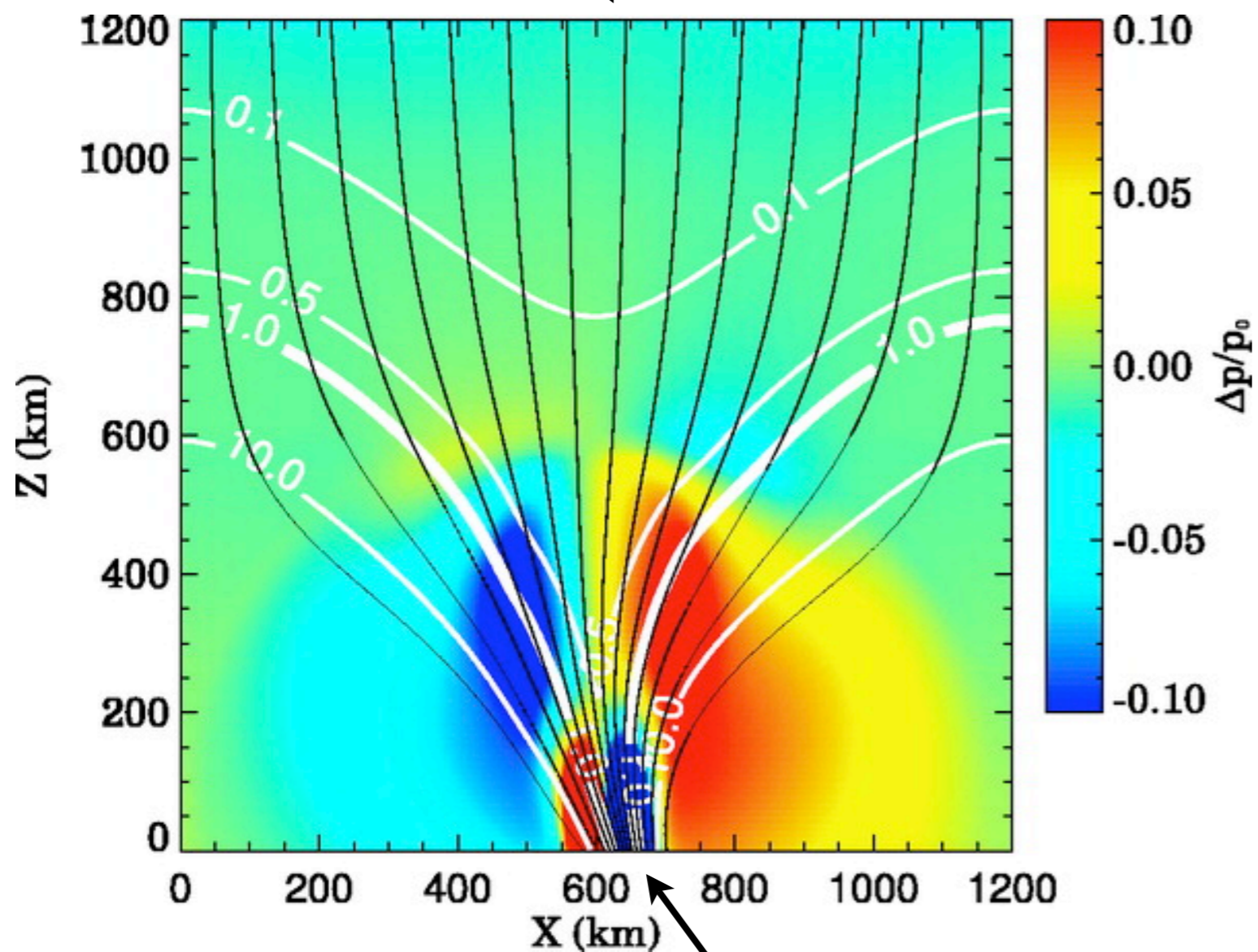
100 x 10³km

2次元シミュレーション

Hasan et al. 2005

$$\rho \sim 10^{-11} \text{ g/cm}^3$$

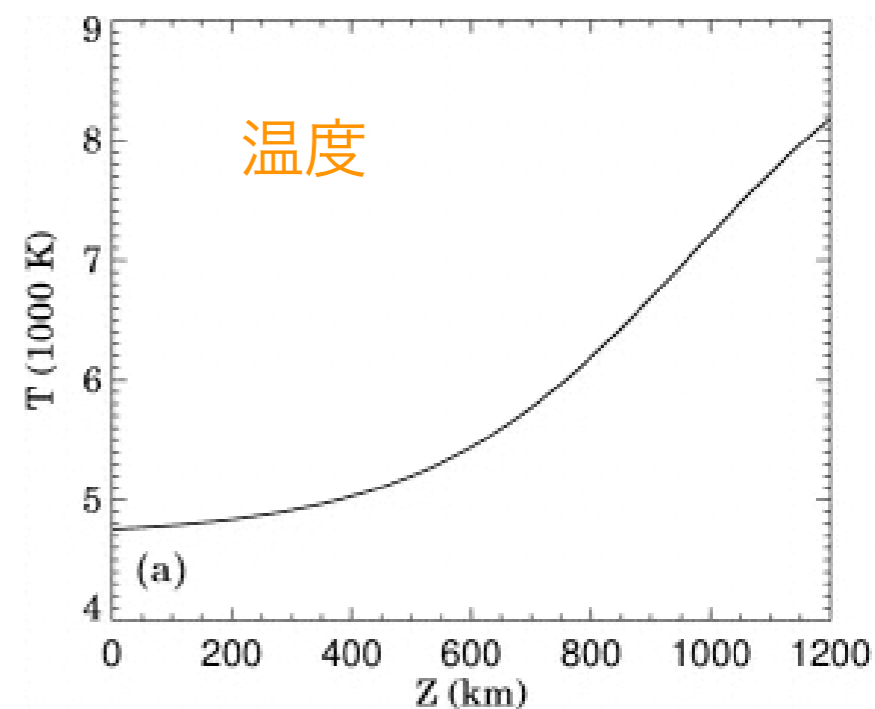
磁束管中を伝わる波の数値シミュレーション



$$\rho \sim 10^{-7} \text{ g/cm}^3$$

スピキュールの計算にはなっていない。

計算領域が彩層中



多次元計算の難しい点

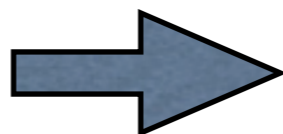
- 密度のギャップ (スピキュール生成に重要)。

光球： $\sim 10^{-7} \text{g/cm}^3$ 、 コロナ： $\sim 10^{-15} \text{g/cm}^3$

- 磁力線の形状。

縦方向。コロナでのアルフベン速度大。

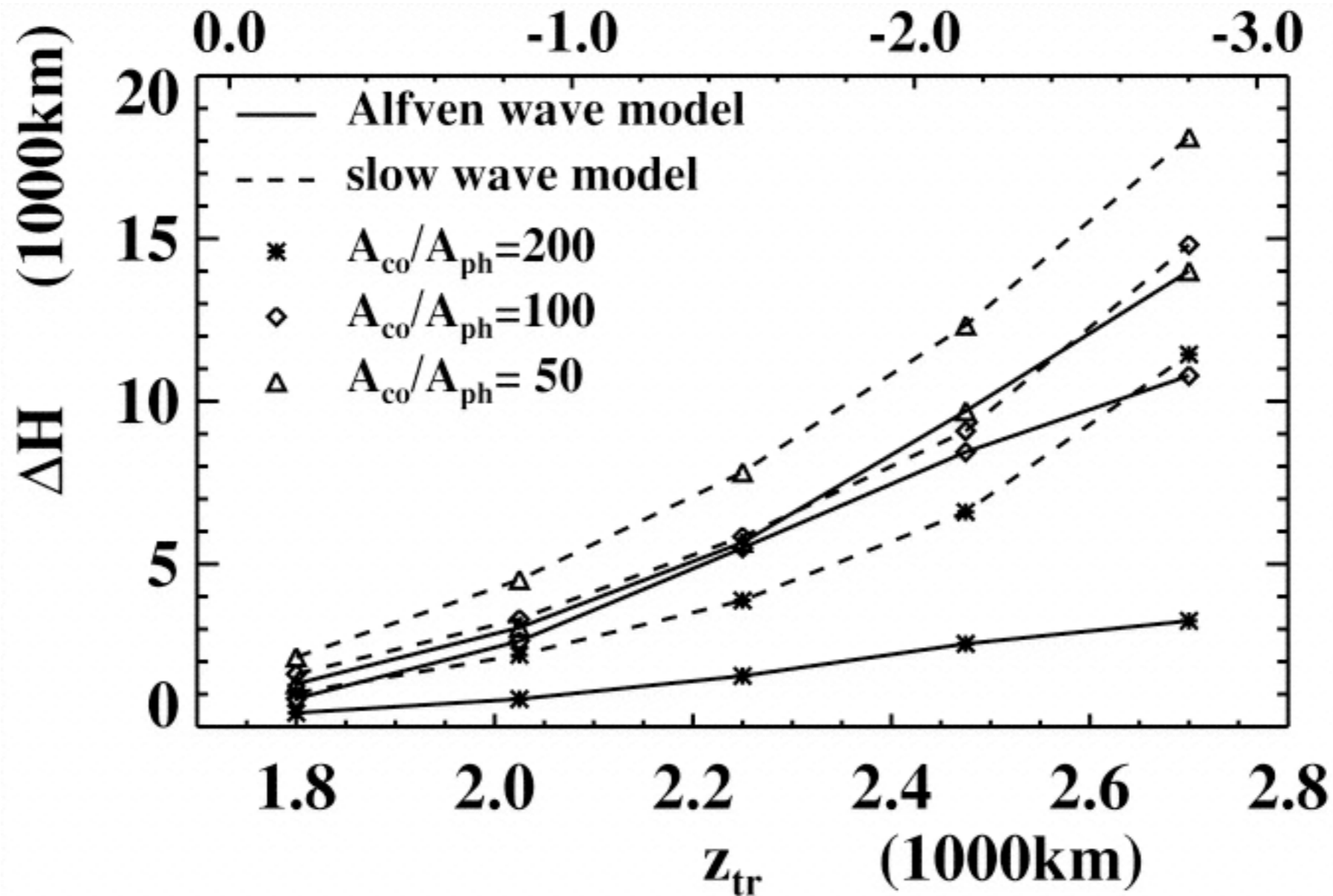
- 初期条件（平衡解）。境界条件（上）。



遷移層の高さの違いとスピキュールの大きさ

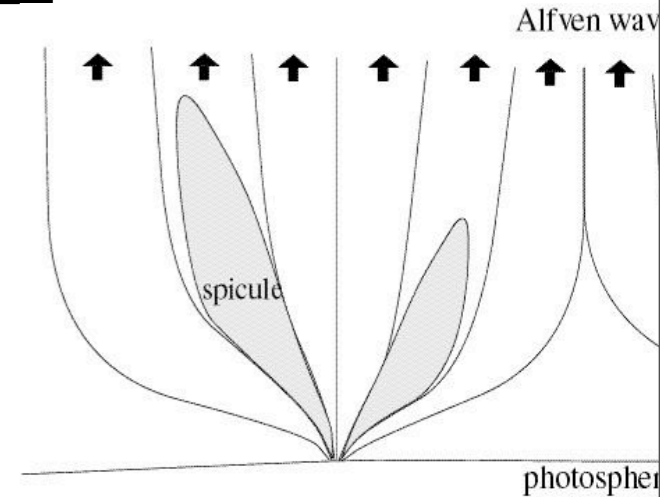
Shibata & Suematsu (1982)

Saito et al. (2001)



多次元計算の重要性

- スピキュールは3次元現象。
- 速い磁気音波は磁力線を横切る方向にも伝わる。
- ゆらぎ（対流、リコネクション）も3次元。



まとめ

- スピキュールは光球における音波またはアルフベン波が磁力管を伝播することで生成している。
- スピキュールの生成とコロナ加熱の問題に関係がある可能性。
- スピキュールの多次元計算はこれからの課題。