

第45回 火星勉強会

Ubiquity of Kelvin-Helmholtz waves at Earth's magnetopause

Shiva Kavosi and Joachim Raeder

NATURE COMMUNICATIONS, 6:7019

DOI: 10.1038/ncomms8019,

Sae Aizawa @Tohoku Univ.

Abstract

◇NASAのTHEMISミッションによって得たその場(in situ)観測データの7年分を解析した。これにより統計的解析を実現し、磁気圏界面で～19%ほどKH波が起きていることを確認した。

◇この発生頻度は、
太陽風速度が上がる
アルフヴェンマッハ数が上がる
数密度が上がる
と上昇する傾向にあった。
しかしIMFの強度にはよらなかった。

◇これまでに考えられていた以上に、KH波は磁気圏へのプラズマ輸送に重要であることがわかった。
また、このKH波はULF波動を励起する。

Introduction : 侵入プロセス

・磁気圏への太陽風プラズマの侵入過程の初期モデルは

「**昼間側磁気圏界面における磁気リコネクションと、尾部への対流**」

・しかし北向きIMF時に

- 1) 昼間側マグネトポーズでリコネクションが起きない
- 2) 低温高密度プラズマシートの形成とそのプラズマ特性

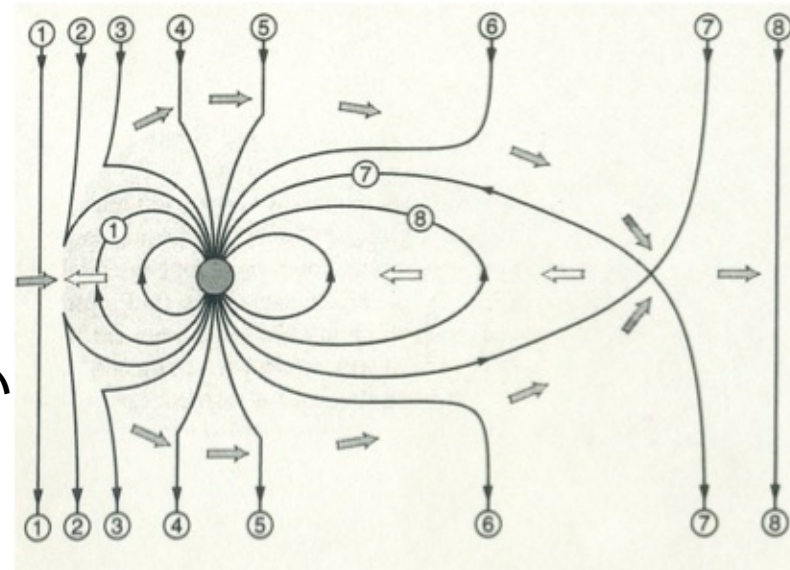
により、他の侵入プロセスを検討する必要がある



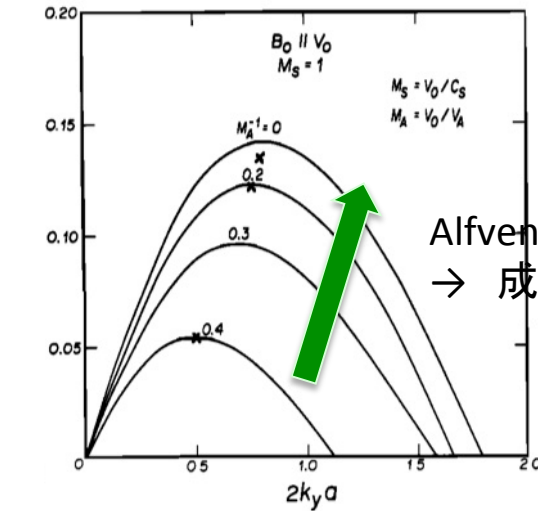
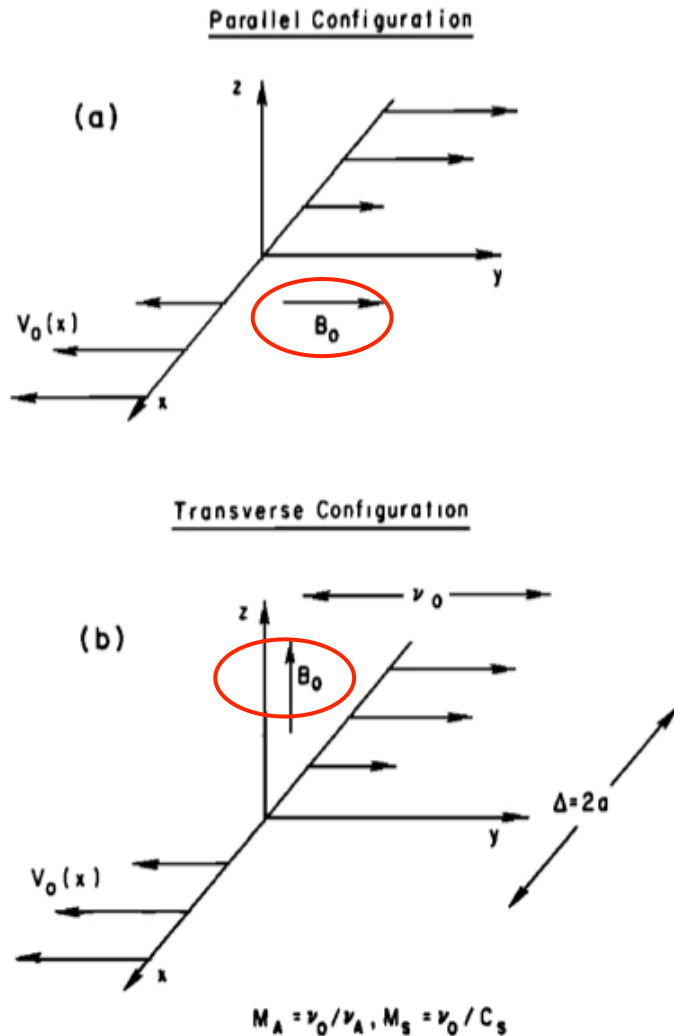
北向きIMF時に起こり得る侵入メカニズム

- 1) **カスプ近くの高緯度磁気リコネクション**
- 2) Impulsive penetration
- 3) 勾配ドリフト
- 4) 粒子拡散
- 5) **KH不安定**

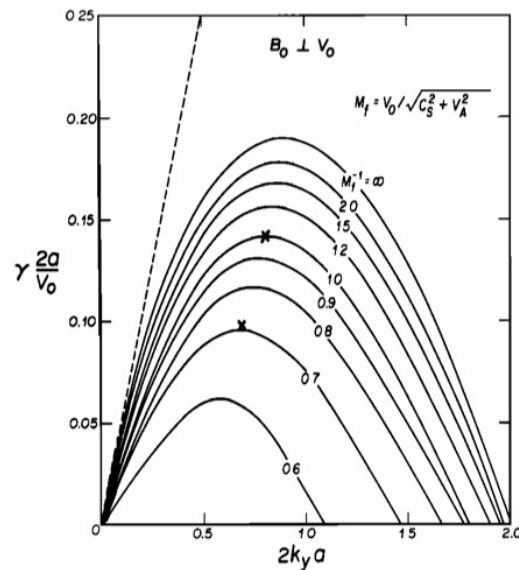
- a) 太陽風プラズマの磁気圏への侵入に、重要な役割
- b) 放射線帯に影響を与えるULF波動を励起



Introduction : KH不安定の線形理論



Alfvén Mach numberの増加
→ 成長率増加



$k \perp B$ で、より成長

Introduction : KH不安定の線形理論

KH不安定の成長率は、

$$\gamma = \sqrt{\underbrace{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} [\vec{k} \cdot (\vec{U}_1 - \vec{U}_2)^2]}_{\text{速度シアーによる成長}} - \underbrace{\frac{(\vec{k} \cdot \vec{B}_1)^2 + (\vec{k} \cdot \vec{B}_2)^2}{4\pi(\rho_1 + \rho_2)}}_{\text{磁気張力による安定化}} - \underbrace{|k| \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 + \rho_2}}_{\text{重力による安定化}}}$$

速度シアーによる成長

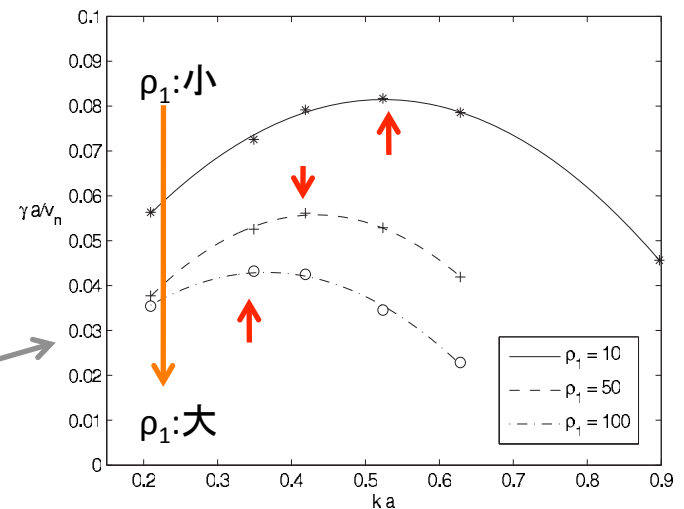
磁気張力による安定化

重力による安定化



- 1) 磁気張力による安定化は $k \perp B$ で0となり、安定化効果が消える。
- 2) 速度シアーが小さければ、KH不安定は成長しにくい
- 3) 密度比が上がると、成長は阻害される

[Amersorfer et al.(2010)]



Instrument & Data

【Instruments】

衛星: THEMIS

(Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms)

ミッション期間: 2007.02.07～

観測機器: EFI, FGM, SCM, ESA, SST

プローブ: 5つ (THEMIS-A, B, C, D, E)

半径方向距離: $< 10\text{--}30R_E$

【Data】

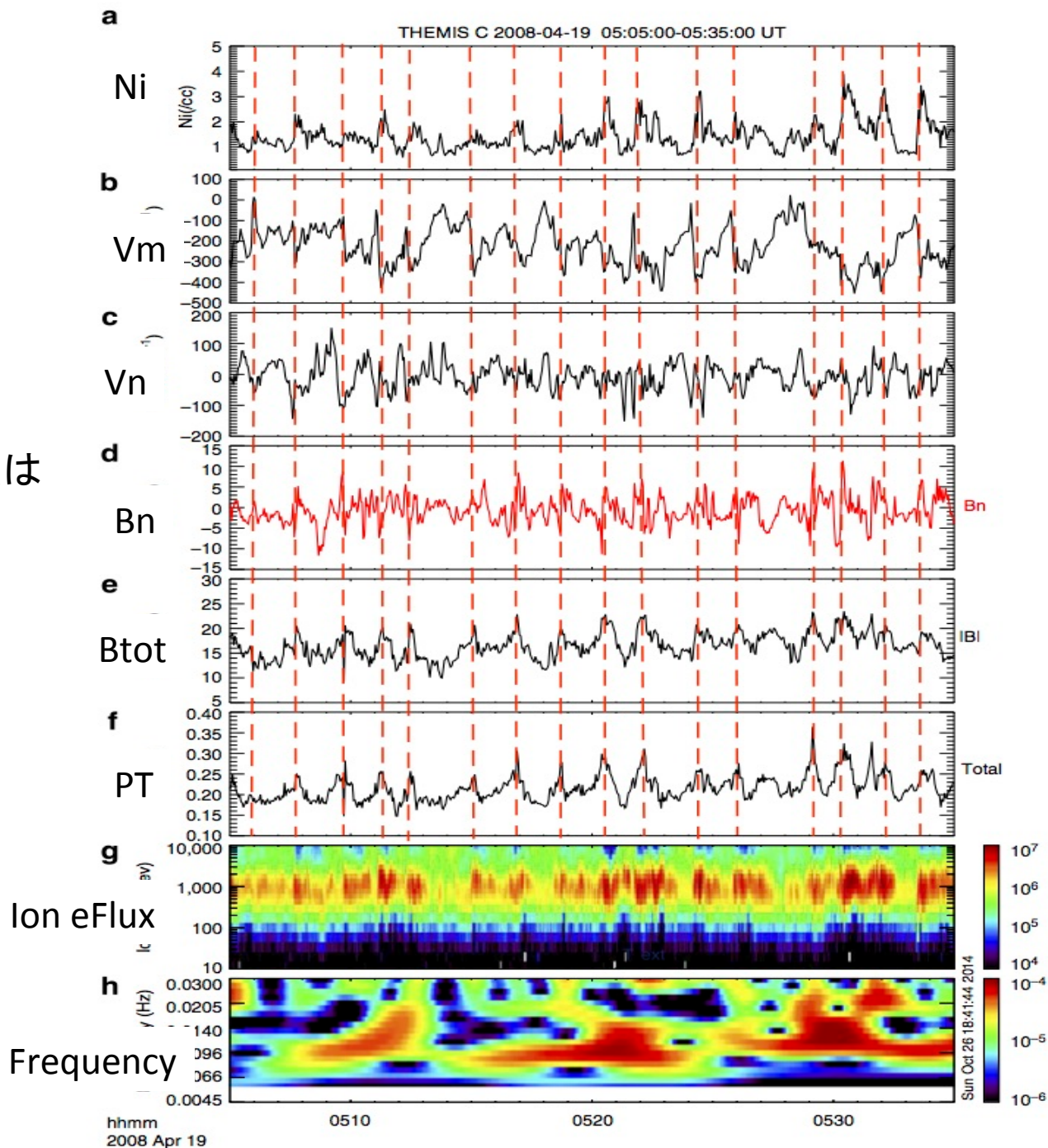
2007～2013年の間で、THEMISがthe dawn and dusk orbital phasesにあり、磁気圏界面を頻繁に横切った時をセレクト

磁気界面を横切るイベントを5分間隔で区切り、KH波かどうかを判別

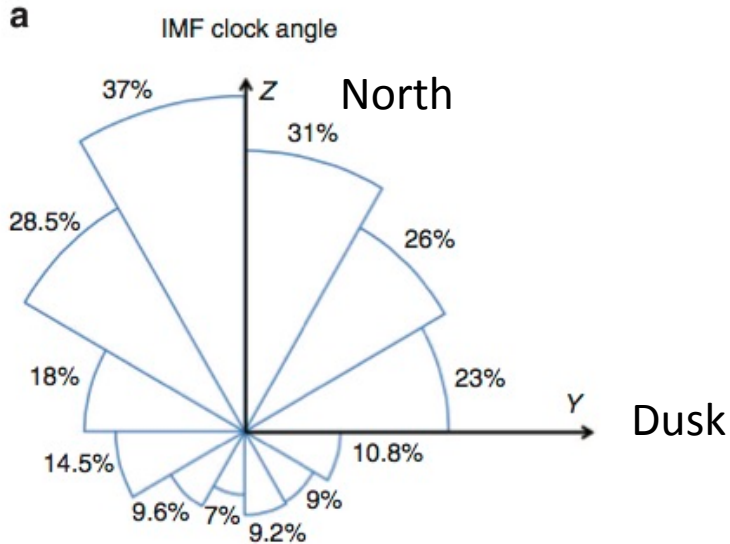
11,500の5分間隔データを得ることができ、総時間は960時間

イベント例 THEMIS-C 2008年4月19日

振動を観測
探査機の軌道方向の速度は
 V_n と比較してゆっくり
→この振動はMPの
前後の動きによるもの



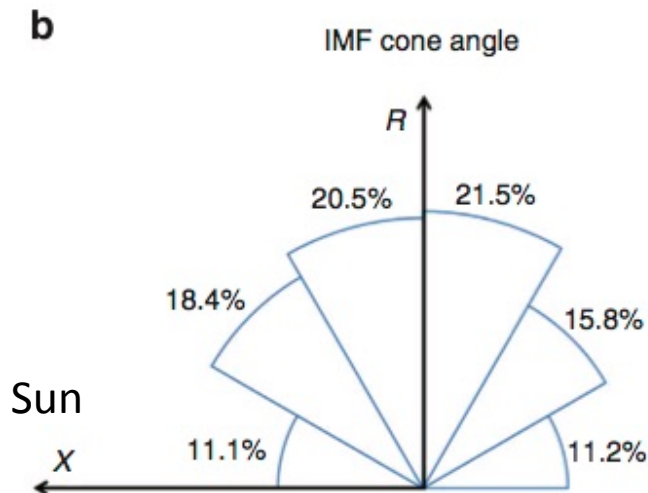
Result: IMF Clock angle and Cone angle



$$\text{Clock angle} = \arctan(B_y/B_z)$$

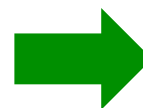
ほぼ北向きの時 ~35%
弱い北向きの時 ~20%
南向きの時 ~10%

KHの発生は、北向きIMF時に最大
南向きの場合でも多少発生。



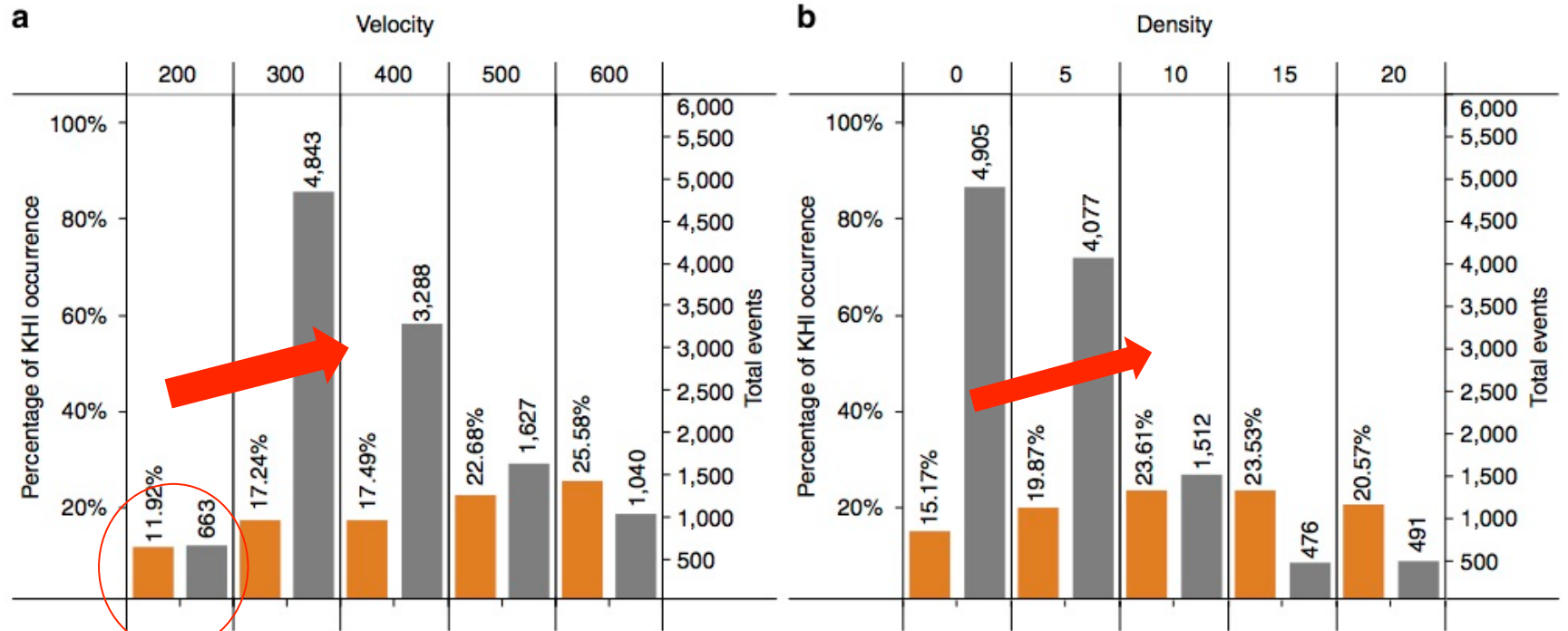
$$\text{Cone angle} : \arccos(B_x/|B|)$$

IMFと太陽—地球方向とのなす角が垂直
に向かうと、KHの発生率が上昇
線形理論の分散関係により期待される
依存性と一致



KH波の発生は全体で約19%
線形理論から期待されるより高い確率

Result : Parameter Dependence

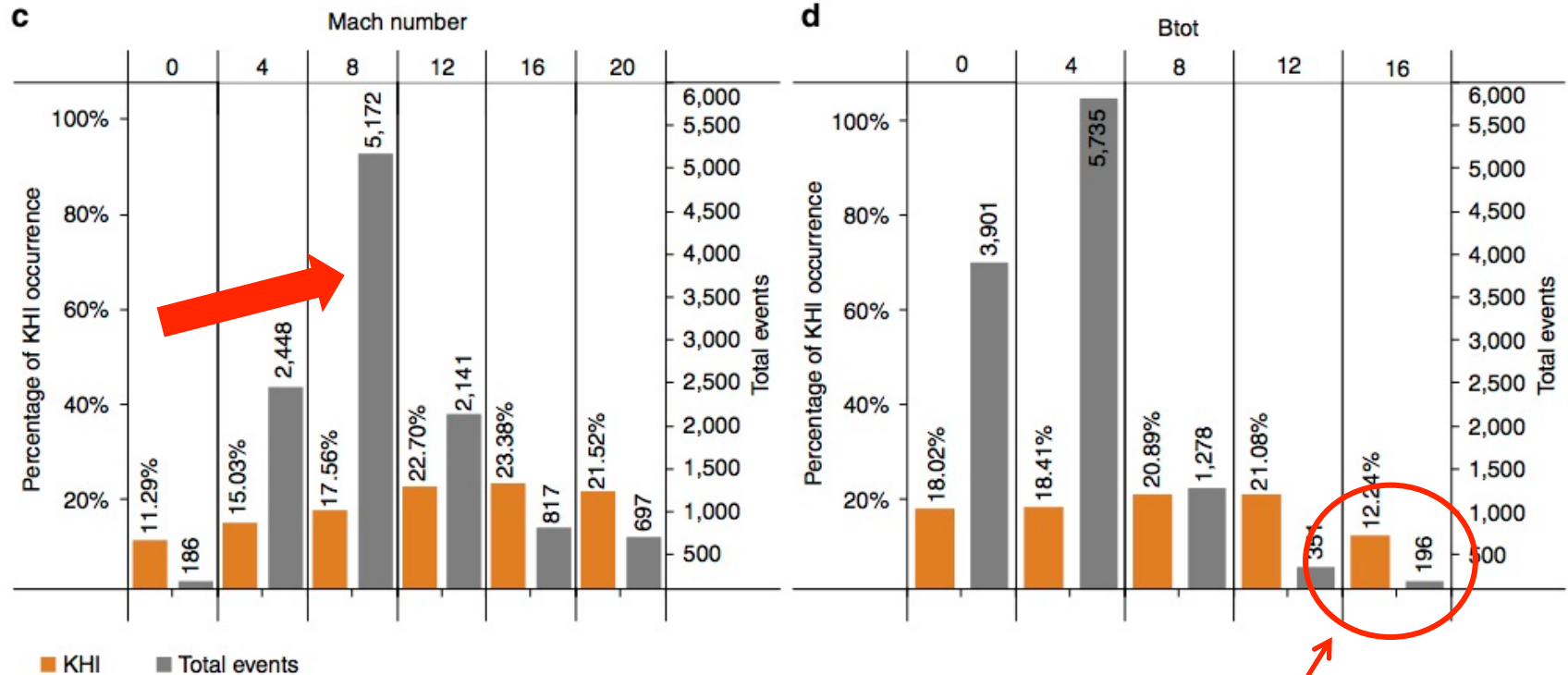


常に正の相関

10[cm^{-3}]より低密度では正の相関

理論的には低速($< 300 \text{ km/s}$)な場合、KH波は発生しない
→ 低速(270 km/s)でもKH波が確認されている

Result : Parameter Dependence



おおよそ正の相関

相関関係は見えず。
異常に大きな値の場合に効果を持つ様子

観測結果は線形理論で予測されていた通り
太陽風速度の上昇によってKH波の発生率が上昇することを示した。
また、IMFの強さには依らない。

Discussions

線形理論では

- 1) $k \perp B$ で最も不安定
- 2) 速度シアーが大きくなると、線形成長率も増加する。
- 3) 分散関係はIMFの南北を区別しない

観測結果から

- 1) 低速でもKH波が確認された
- 2) 南向きでもKH波が確認されたが、一般的には磁気リコネクションが卓越



- ◇観測例の少ない南向きIMFでのイベントは稀なイベントである
- ◇理論的にはcutoff velocityが存在するが、観測的には低速でもKH波を確認
- ◇理論との不一致は、実際の磁気圏界面が複雑であることに起因すると考えられる。

Summary

- ◇ THEMIS衛星によって、初めて統計的にKH波の発生率を求めることができた。(～19%)
- ◇ KH波はこれまで考えられていたよりもより遍在的で、太陽風とIMFの条件によって発生することがわかった。また、南向きIMF時にもKH波が存在することが確認された。
- ◇ 理論モデルとの比較では一致しない点もあり、これは理論モデルが様々な過程のもとに成り立っているためであると考えられる。
- ◇ KH波によってULF波動が励起されることが考えられるが、放射線帯へのKH波の影響については改めて評価する必要がある