マグネター磁場の進化とホール不安定性の関係

広島大学宇宙物理学研究室
M1 田中洋輝

U.Geppert and M.Rheinhardt A&A 392. 1015-1024(2002)

1．イントロダクション

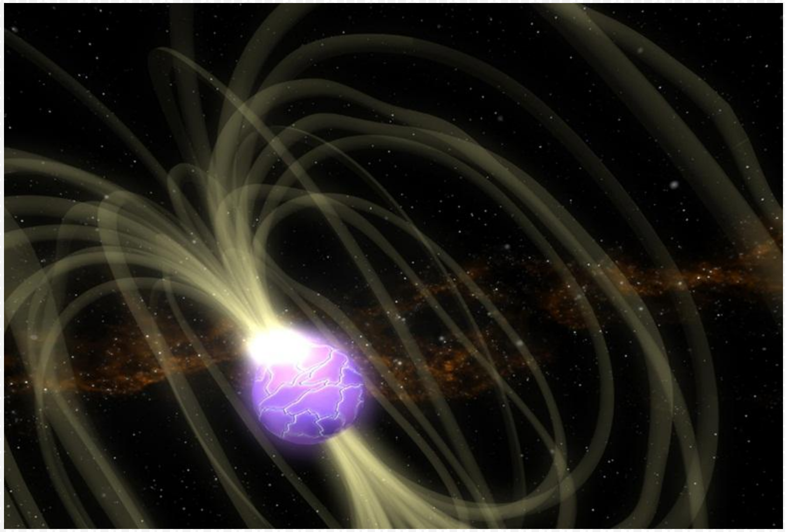
マグネターとは・・・

●中性子星の一種で、他の中性子星と比べても特に磁場が強い天体

通常の中性子星が10^{12}G程度なのに対し、マグネターは10^{14}G以上

●回転エネルギーだけでは説明できないほどの多量の放射を行う

→磁場の減衰に由来？



マグネターの想像図

１．イントロダクション

　マグネターのように強力な磁場の進化を考える場合、ホールドリフトが重要になる

ホールドリフトによって磁場が不安定となり、マグネターの磁場は磁場強度に対して非線形に強くなる

これからホールドリフトが磁場の進化にどのように関係するのかを見ていく

発表内容

- ●イントロダクション
- ●基礎方程式
- ●ホール不安定性の磁場の進化への影響
- ●背景磁場の時間変動の考慮
- ●まとめ

2．基礎方程式

Maxwell方程式

$$\begin{cases} \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \\ \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

σ ：電気伝導率

n_e ：電子数

ホール効果を考慮したオームの法則

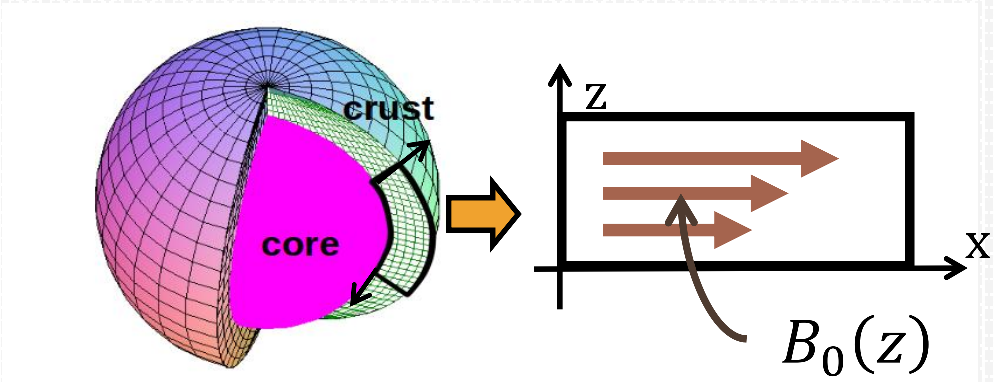
$$\vec{E} = \underbrace{\frac{1}{\sigma}\vec{j}}_{\text{ジュール損失}} + \underbrace{\frac{1}{en_e}(\vec{j} \times \vec{B})}_{\text{ホール効果}}$$

ホール項を含んだ誘導方程式

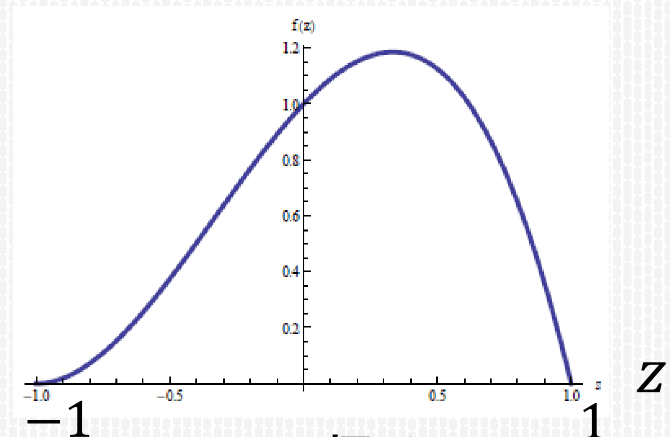
$$\begin{cases} \tau_d = \frac{4\pi\sigma L^2}{c^2} & \text{：磁場の減衰時間スケール} \\ R_m = \frac{\sigma B_0}{ecn_e} & \text{：無次元量} \propto B \end{cases}$$

$$\boxed{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \tau_d^{-1}\nabla^2\vec{B} - \frac{R_m}{\tau_d}\nabla \times \left(\nabla \times \vec{B} \times \vec{B}\right)}$$

３．マグネター磁場の線形化された時間発展



マグネター表面の磁場の模式図



f(z)の概形

磁場の線形摂動

$$\vec{B} = \underline{f \cdot \overrightarrow{e_x}} + \delta\vec{B}$$

背景磁場$B_0(z)$

背景磁場の強さ

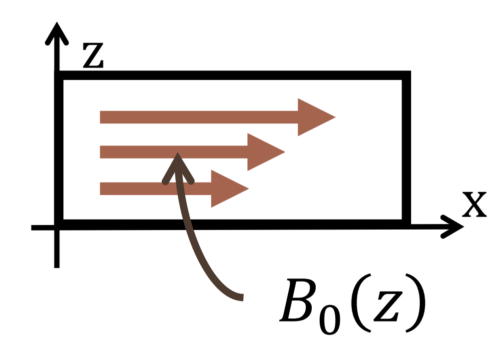
$$f(z) = (1+z)(1-z^2)$$

3．マグネター磁場の線形化された時間発展

磁場をポロイダル成分Gとトロイダル成分Sに分けて考える

$$\vec{B} = \nabla G \times \overrightarrow{e_y} + S\overrightarrow{e_y}$$

$$\left(\begin{array}{l} G = G_0 + \delta G \\ S = \underbrace{0}_{\text{背景磁場成分}} + \delta S \end{array}\right.$$



このとき磁場の揺らぎ成分が従う方程式
誘導方程式より

$$\tau_d \frac{\partial \delta G}{\delta t} = \nabla^2 \delta G + R_m \left(-f \frac{\partial \delta S}{\partial z} \right)$$

$$\tau_d \frac{\partial \delta S}{\delta t} = \nabla^2 \delta S + R_m \left\{ -f'' \frac{\partial \delta G}{\partial z} + f \frac{\partial (\nabla^2 \delta G)}{\partial z} \right\}$$

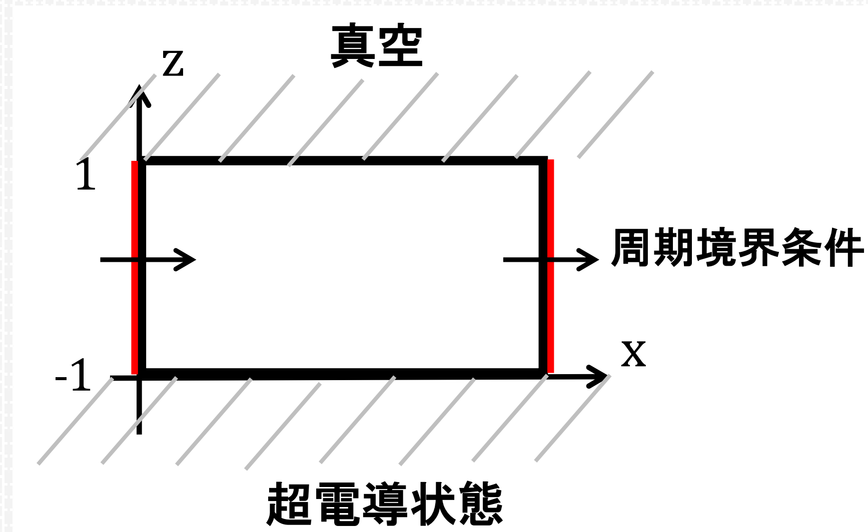
τ_d：磁場の減衰時間スケール
R_m：無次元量$\propto B$
f：背景磁場の強さ

4． 境界条件と初期条件

境界条件

$$\delta G(-1,t) = \frac{\partial \delta G}{\partial z}(1,t) = 0$$

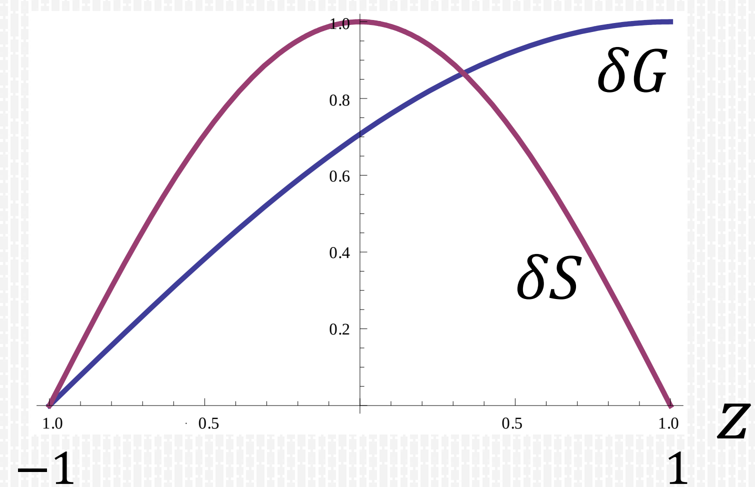
$$\delta S(-1,t) = \delta S(1,t) = 0$$



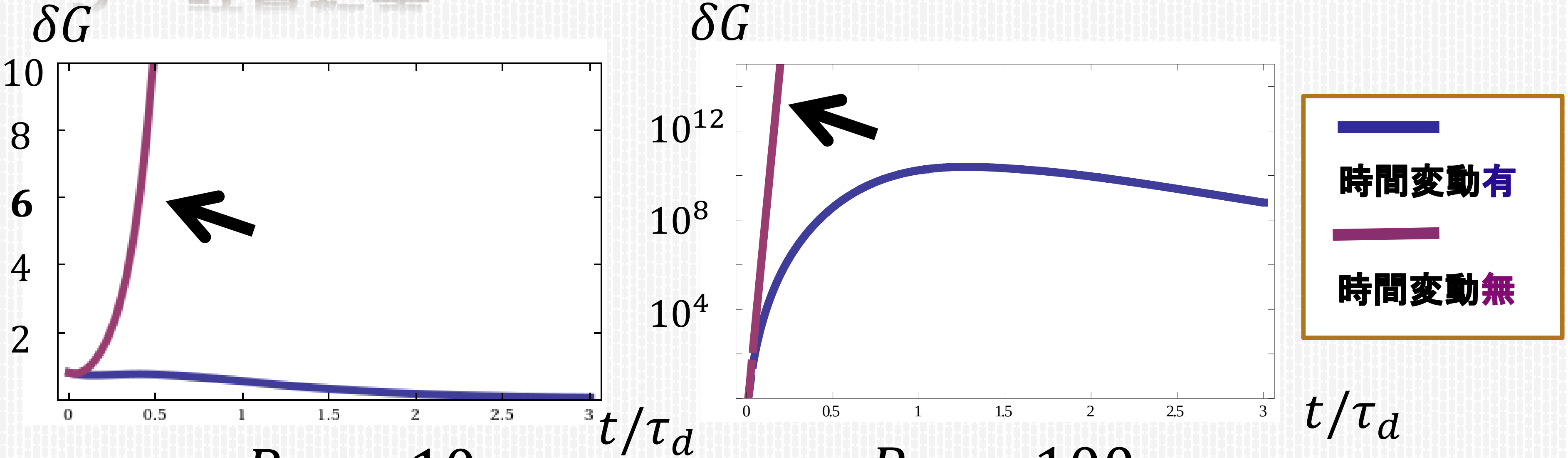
初期条件

$$\delta G(z,0) = k \sin\left(\frac{\pi}{4}(z+1)\right)$$

$$\delta S(z,0) = k \cos\left(\frac{\pi}{2} z\right)$$



5．計算結果



$R_m = 10$　　$R_m = 100$

●fが時間に依存しない場合は、時間の経過に従ってδGが指数関数的に大きくなる

●$R_m(\propto B)$が大きくなると、より速くδGが成長する

６．背景磁場の時間変動

ホール時間スケールが長い場合、背景磁場の時間変動を考慮する必要がある

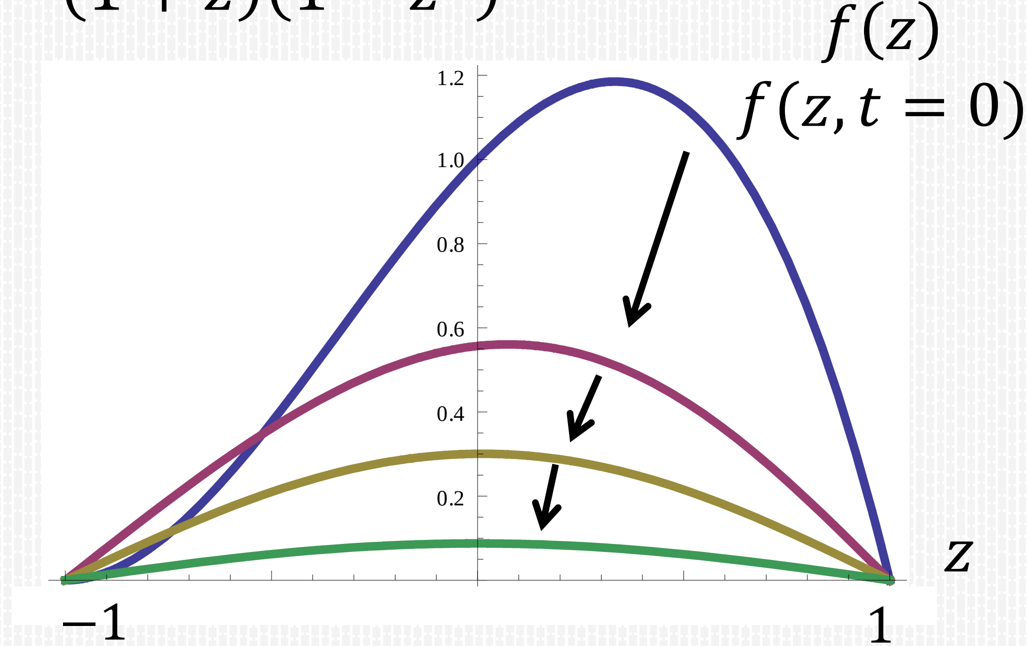
fが時間変化する場合としない場合の２通りを考える

$$f(z) = (1+z)(1-z^2)$$

$$f(z, t=0) = (1+z)(1-z^2)$$

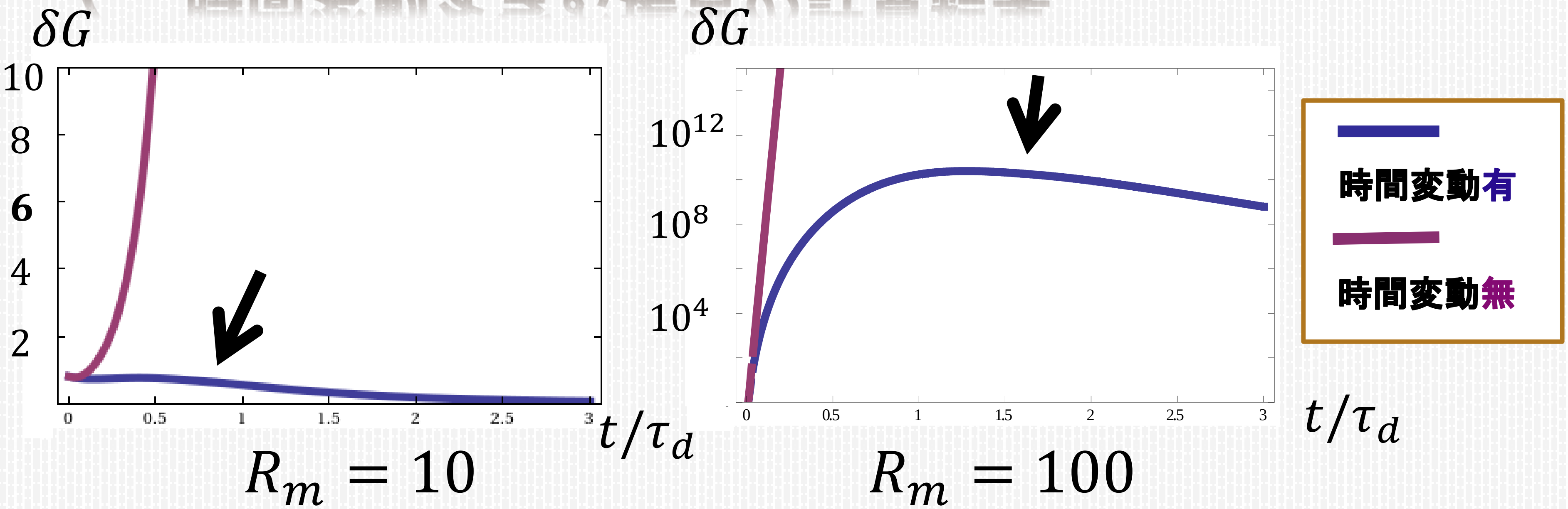
背景磁場が時間変化する場合に従う方程式

$$\tau_d \frac{\partial}{\partial t} f(z,t) = \frac{\partial^2}{\partial z^2} f(z,t)$$



$f(z)$, $f(z,t)$の概形

7．時間変動を含む場合の計算結果



●fが時間に依存する場合はδGが指数関数的に増大した後、減少に転じている

●背景磁場の時間変動が無視できるのは、初期の時間に限られる

８．時間変動を考慮する必要のある範囲

現在考えられている実際のマグネターの値

$$R_m = 10 \sim 100$$

$$\tau_d = 10^5 \sim 10^7 (\text{年})$$

マグネターの寿命 $t_c \sim 10^5 (\text{年})$

結果のグラフより背景磁場の時間変動を無視できなくなる範囲tを考えると

$$t < 10^2 \sim 10^5 (\text{年}) \leq t_c$$

８．まとめ

マグネター磁場の時間発展を考える場合、ホール効果が重要

●ホール効果によって磁場が不安定となり、磁場の揺らぎ成分が指数関数的に増加する

●背景磁場が強くなるとホール項がより強く働き、磁場の増加が早くなる

●背景磁場の時間変動を考慮すると最初は指数関数的に増加した後、徐々に減少していく