

銀河磁場によるドリフト運動の銀河宇宙線伝播への影響:

Markov time and the age distribution of galactic cosmic-ray

三宅晶子 (常磐大学)

村石浩 (北里大学)

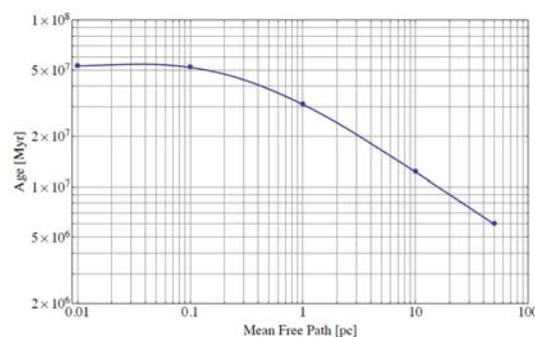
柳田昭平 (茨城大学)

はじめに

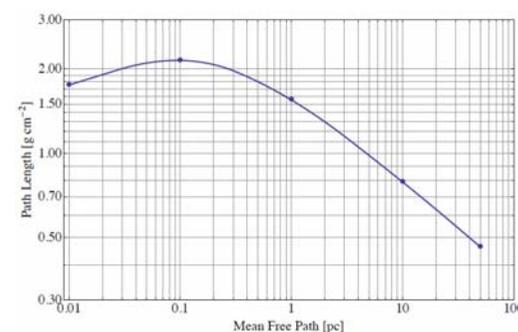
等方拡散モデルによる数値計算において
GCR Source (SNR) の discreteness を考慮することで..

path length distribution が
m.f.p. ~ 0.1 pc 付近でピークを持つ

Age distribution



PLD



⇒ ~ 1 GeV 付近でピークを持つ B/C ratio を説明可能？
P-bar/P ratio や positron fraction にも影響??

予定を変更し、今回はそちらをメインに話します。。

Motivation

GCR propagation に関する従来の理解

Path length や Age はエネルギー依存性を持つ。

↑↑ 観測されるCR secondary/primary 等に反映される。

理論研究におけるmotivation

観測に一致する path length distribution や age distribution を決めたい。

しかし、それをexplicit に導出できるのは、Leaky Box model や Nested Leaky Box model くらいである。

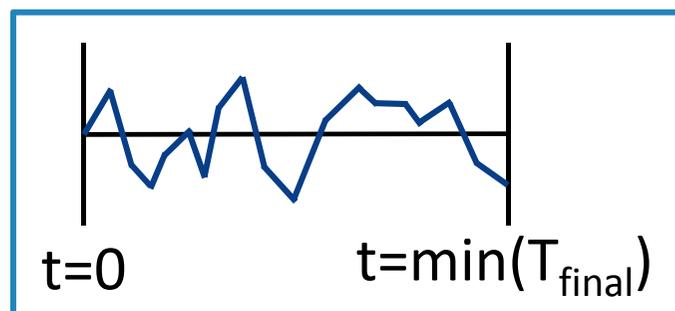
Our work

時間・空間について離散的な GCR source (SNRs) を考慮し、Path length distribution & Age distribution を数値計算した。

Simulation method

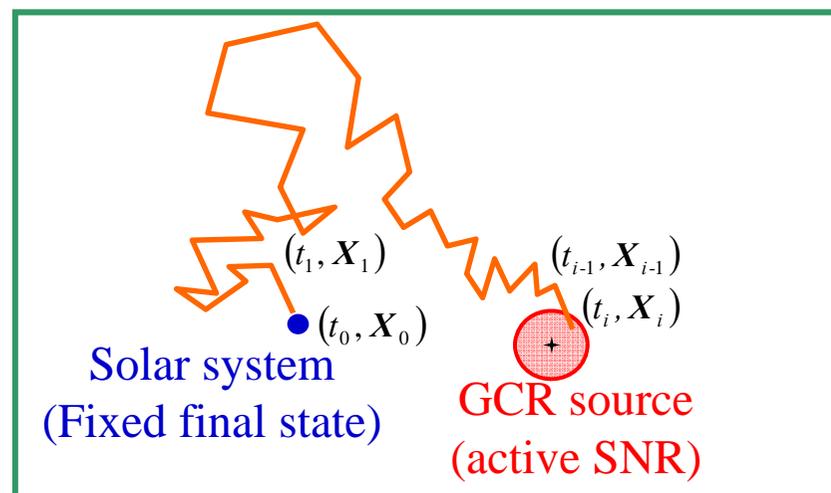
従来の手法とは異なる新しい概念・手法による宇宙線伝播計算

【Markov time (到達時刻、脱出時刻)】



確率過程を時刻 $t=0$ で出発させたとき、ステップが最初にboundaryへ到達したときの時刻

【GCR propagationにおけるMarkov time】



new idea

path length distribution や age distributionの問題は、Markov time の分布の決定に相当する。

Simulation method

移流拡散方程式 (e.g. Parker 1965, Strong, Moskalenko, Ptuskin 2007)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla \cdot (\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla f) + \boldsymbol{V} \cdot \nabla f + \boldsymbol{V}_d \cdot \nabla f + \frac{1}{3} (\nabla \cdot \boldsymbol{V}) p \frac{\partial f}{\partial p}$$

t : time f : distribution function $\boldsymbol{\kappa}$: diffusion coefficient tensor

p : momentum \boldsymbol{V} : galactic wind velocity \boldsymbol{V}_d : drift velocity

確率微分方程式 (Stochastic Differential Equation)

$$\begin{cases} d\boldsymbol{X} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\kappa} - \boldsymbol{V} - \boldsymbol{V}_d) dt + \sum_{\sigma} \boldsymbol{\alpha}_{\sigma} dW_{\sigma}(t) \\ dp = \frac{1}{3} p (\nabla \cdot \boldsymbol{V}) dt \end{cases}$$

\boldsymbol{X} : guiding center of particle

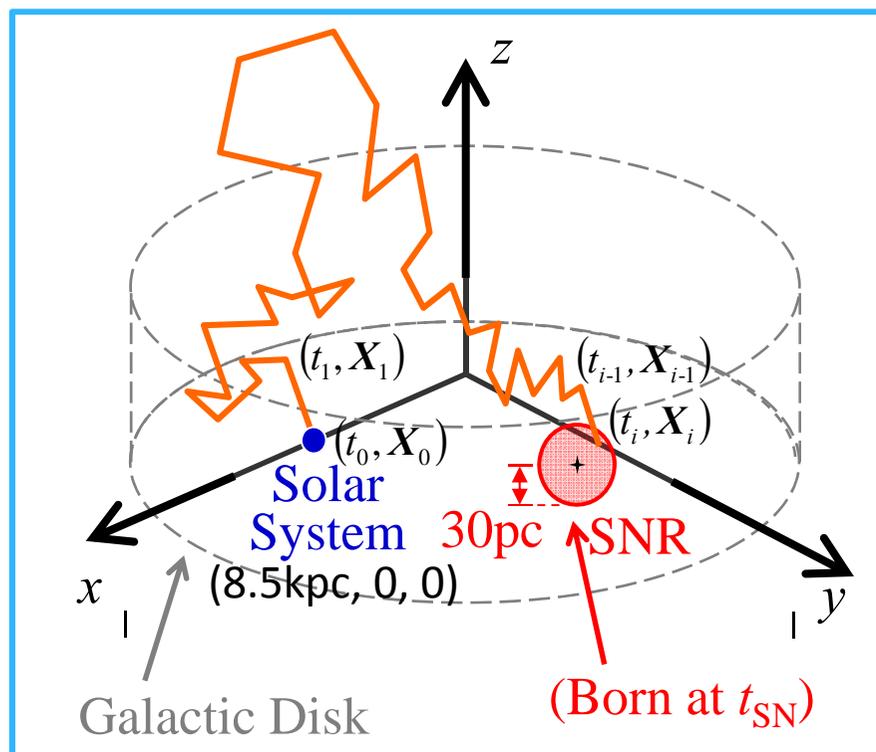
$dW_{\sigma}(t)$: Wiener process

$$\sum_{\sigma} \boldsymbol{\alpha}_{\sigma} \boldsymbol{\alpha}_{\sigma}^T = 2 \boldsymbol{\kappa}$$

※時間に対して後ろ向きに記述した場合

Isotropic diffusion model

Stochastic process



SDE :

$$\begin{cases} d\mathbf{X} = \sum_{\sigma} \alpha_{\sigma} dW_{\sigma}(t) = 2\kappa^{\mu\nu} \\ dp = 0 \end{cases}$$

GCR: proton

Energy loss: none

Isotropic diffusion :

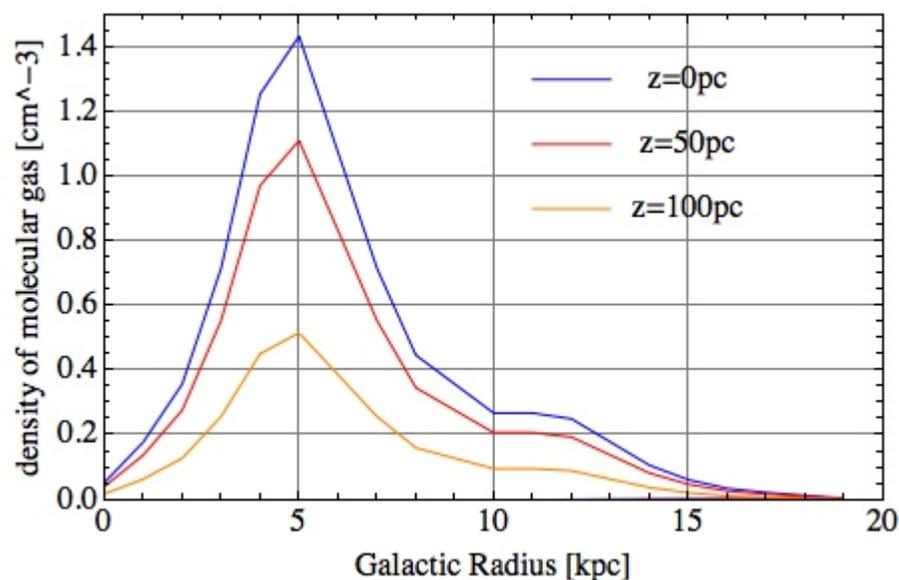
$$\kappa = \frac{1}{3} l_{m.f.p.} c$$

Simulation model

Matter density

- Molecular gas
- Cold neutral medium (CM)
- Warm neutral medium (WNM)
- Warm ionized medium (WIM)

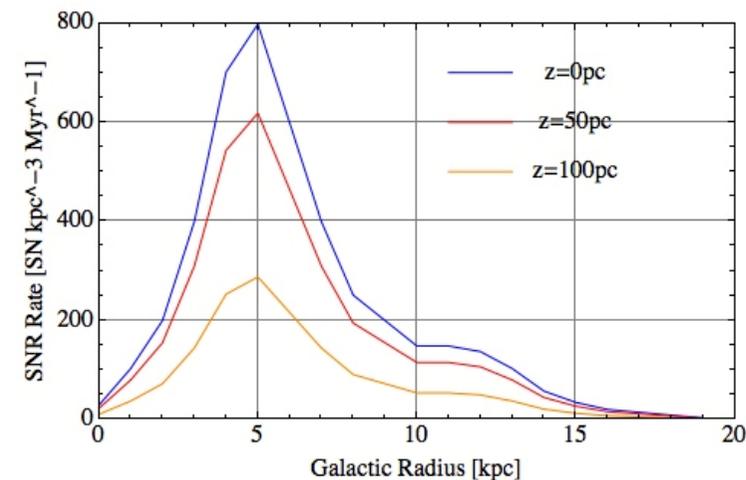
(Williams & Mckee, ApJ, 1997.; Ferriere, ApJ, 1998)



GCR source (SNRs)

SN rate : 3 SN/100yr/Galaxy

✂ molecular gasと同じ(R,Z) dependenceを持つ



(Higdon & Lingenfelter, ApJ, 2003.)

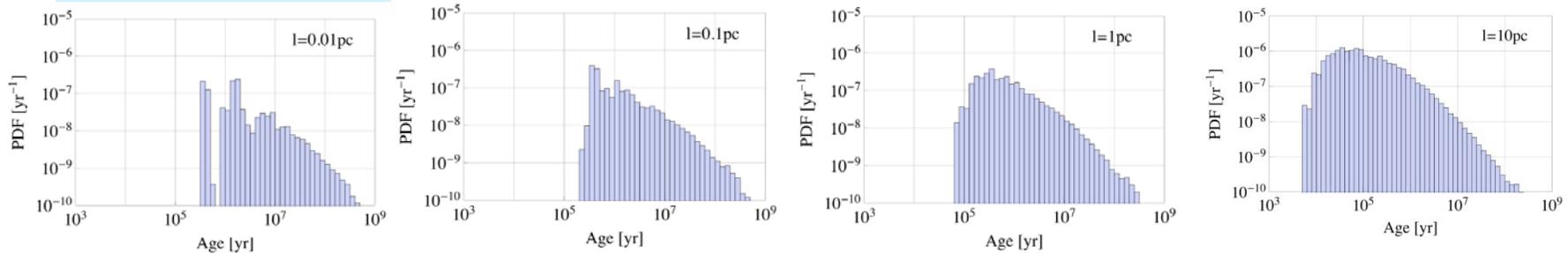
life of SNR = 10^5 yr

radius of SNR = 30pc

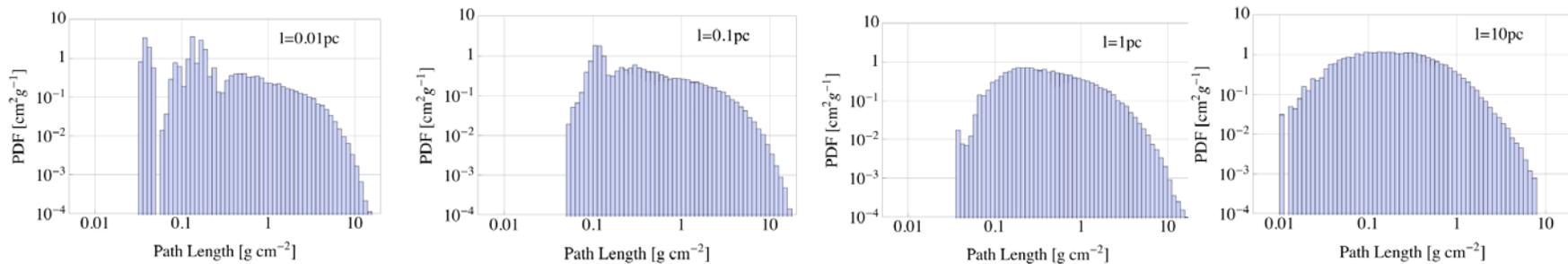
path length distribution & age distribution ～ mean free path 別での分布～

2/9/26
限宇宙

Age distribution



Path length distribution

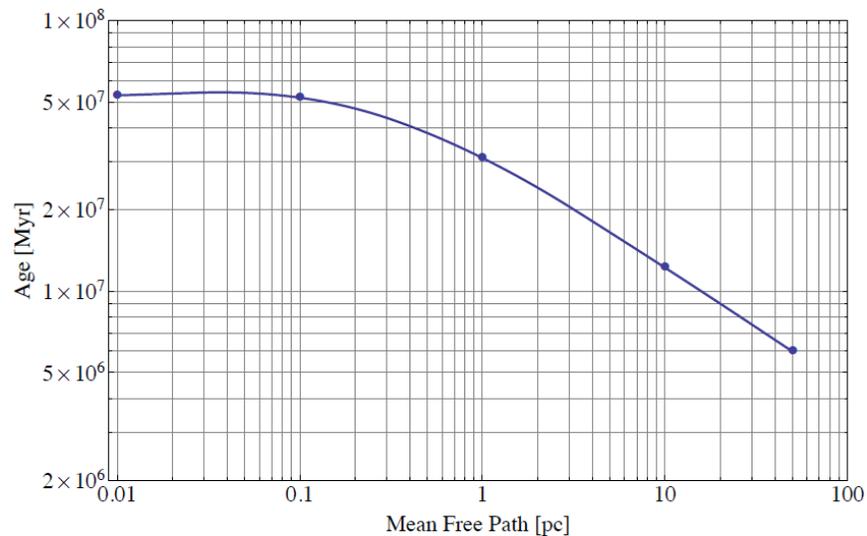


- Mean free path を固定しても、GCR の path length や age は分布を持つ。
- Discrete source ゆえに、low age / low path length の成分が欠落する。
- m.f.p. が小さくなるほどに discrete source の影響が強くなる。

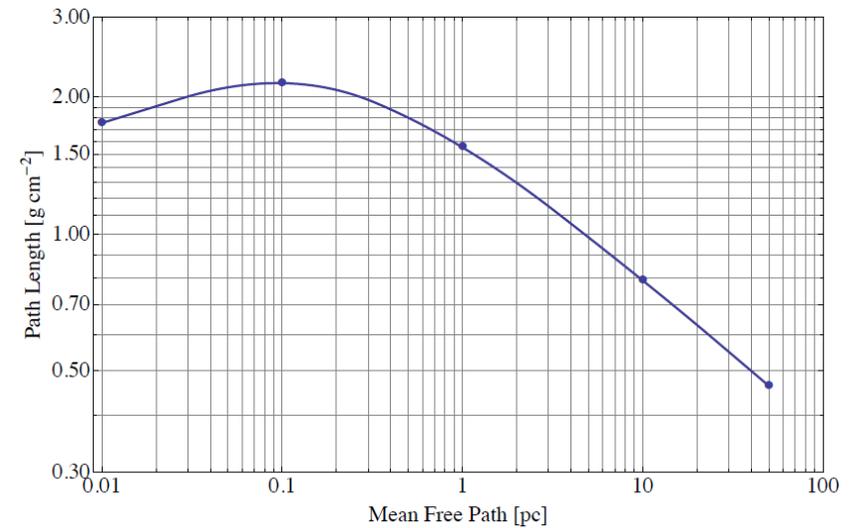
path length distribution & age distribution ～ 平均値の変化 ～

2/9/26
限宇宙

Age distribution



Path length distribution



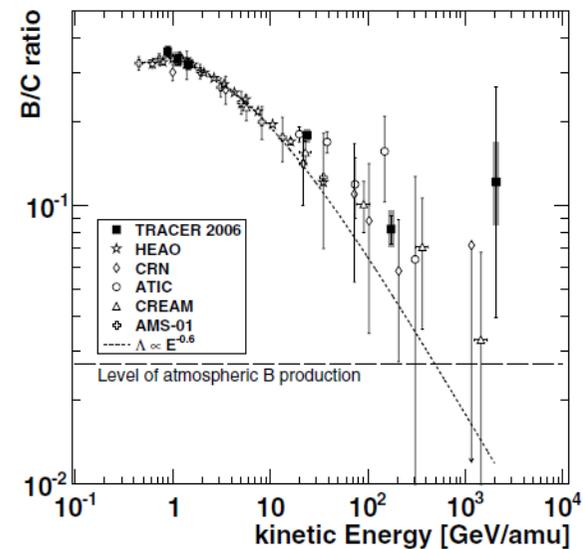
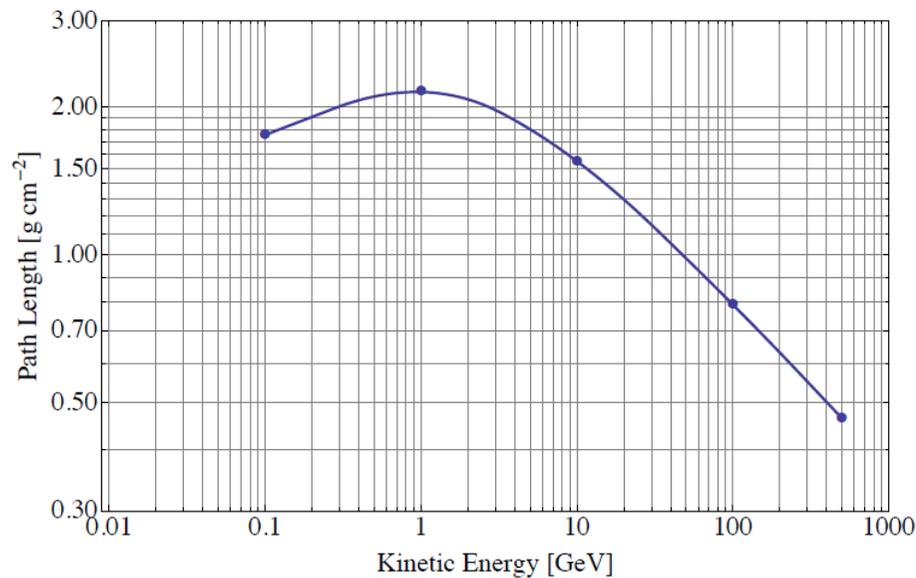
path length distribution が m.f.p. ~ 0.1 pc 付近でピークを持つ

path length distribution & age distribution ～ B/C との比較～

2/9/26
限宇宙

PLDの横軸を m.f.p から energy に変換

- PLD のピーク値におけるエネルギー
= B/C のピーク値におけるエネルギー と仮定
- m.f.p $\propto E$ と仮定 \Rightarrow 拡散係数 $\propto E$



(Obermeier et al., ApJ, 2012)

銀河磁場によるドリフト運動の 銀河宇宙線伝播への影響

Galactic magnetic field

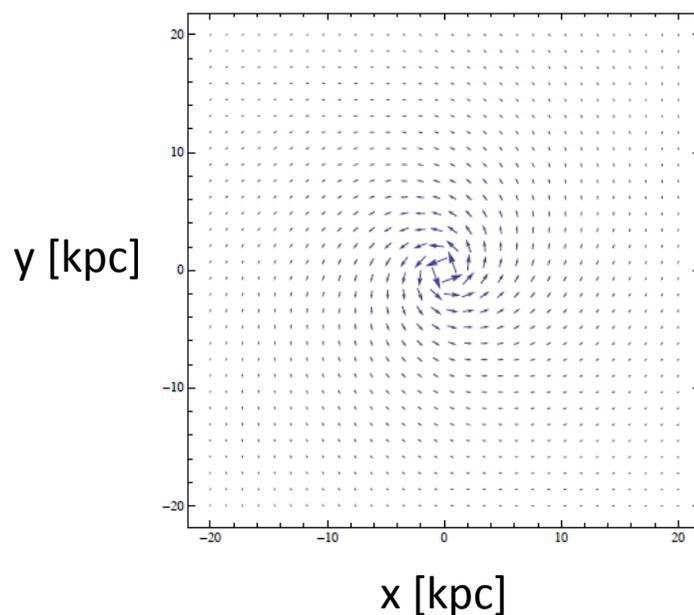
【ASS model】

$$B_r = B_0(r) \sin(p) \cos(\chi(z))$$

$$B_\phi = B_0(r) \cos(p) \cos(\chi(z))$$

$$B_z = B_0(r) \sin(\chi(z))$$

$$B_0(r) = \frac{3r_1 + 24}{r_1 + r}, \chi(z) = \chi_0 \tanh\left(\frac{z}{z_0}\right)$$



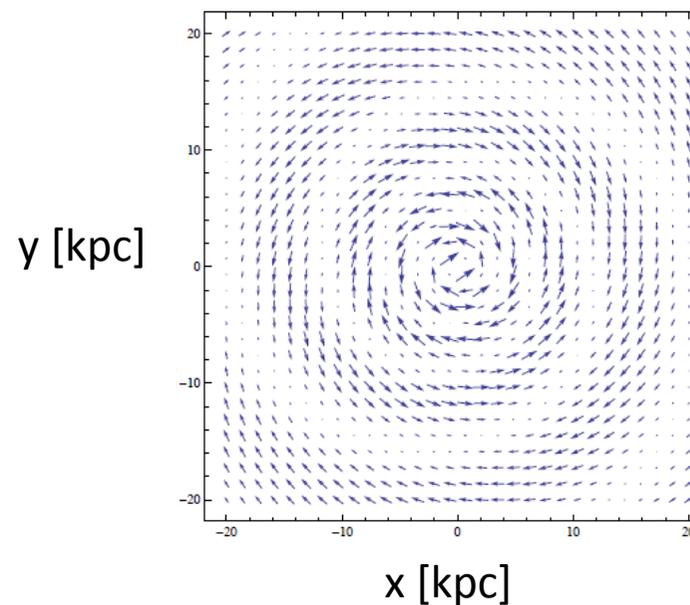
【BSS model】

$$B_r = B_0(r) \cos\left(\phi \pm \beta \ln\left(\frac{r}{R_0}\right)\right) \sin(p) \cos(\chi(z))$$

$$B_\phi = B_0(r) \cos\left(\phi \pm \beta \ln\left(\frac{r}{R_0}\right)\right) \cos(p) \cos(\chi(z))$$

$$B_z = B_0(r) \sin(\chi(z))$$

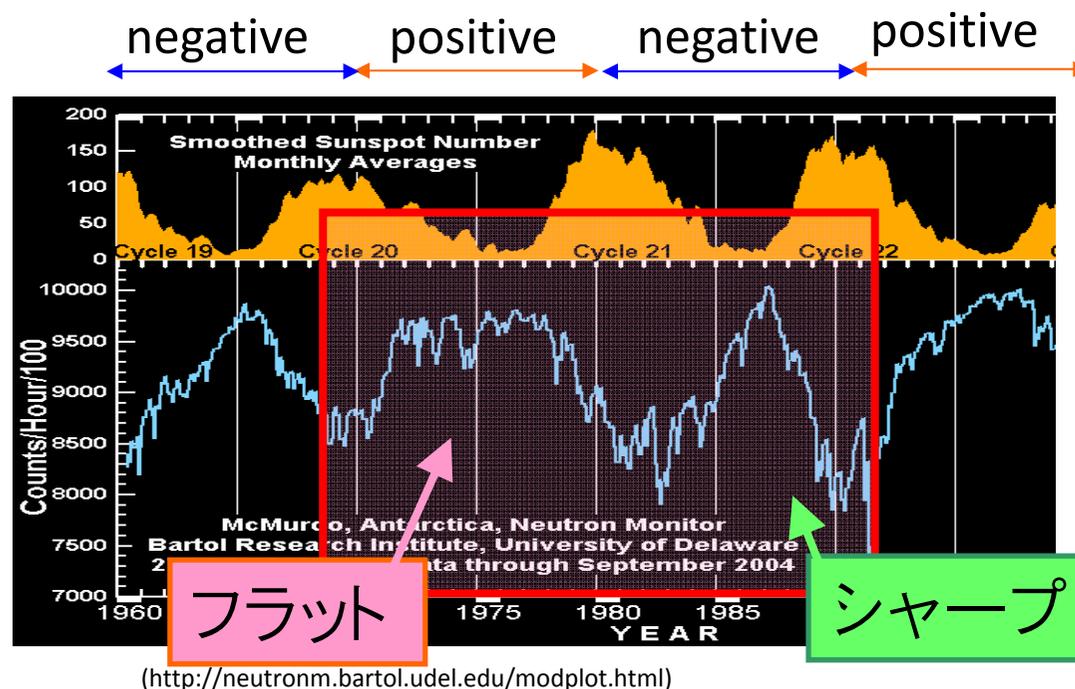
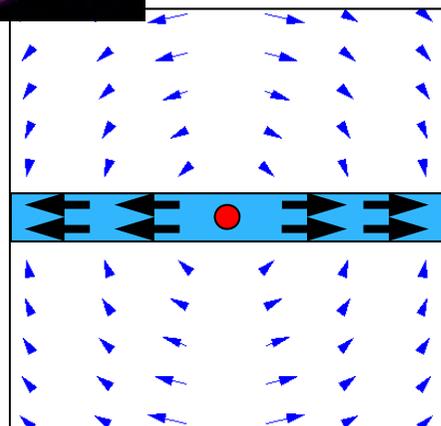
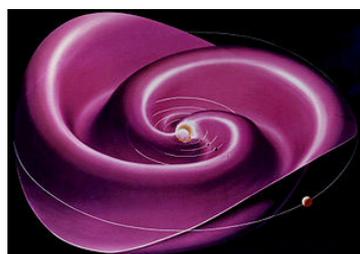
$$B_0(r) = \frac{3r_1 + 24}{r_1 + r}, \chi(z) = \chi_0 \tanh\left(\frac{z}{z_0}\right)$$



Drift effects

$$V_{drift} = \nabla \times \kappa_T \hat{e}_B = \nabla \times \frac{\beta p}{3B} \hat{e}_B$$

太陽系内において、ドリフト効果は重要な要素

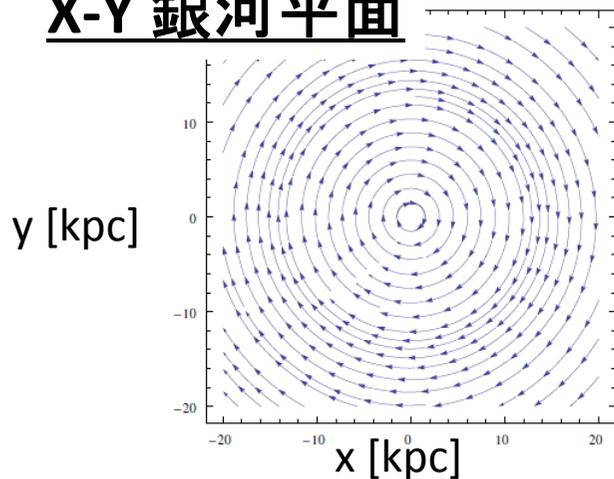


銀河系内においても、ドリフト効果が重要な役割をはたすのでは？

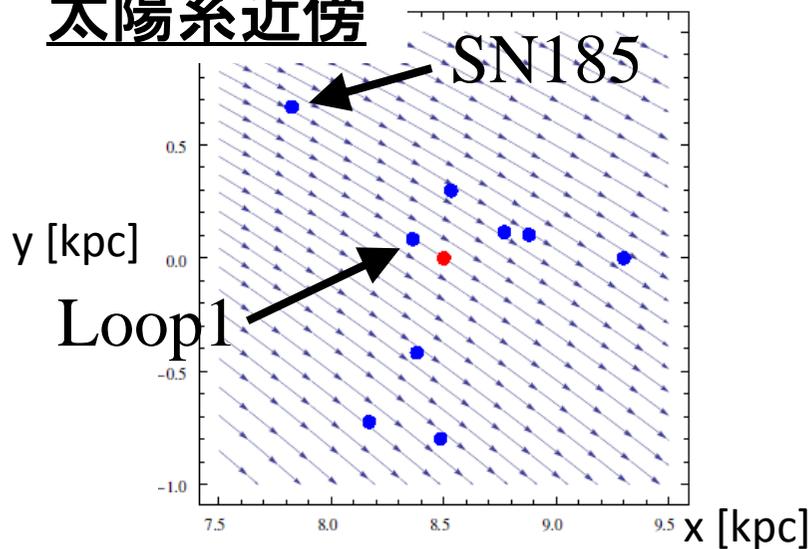
Drift effects

【ASS model】

X-Y 銀河平面

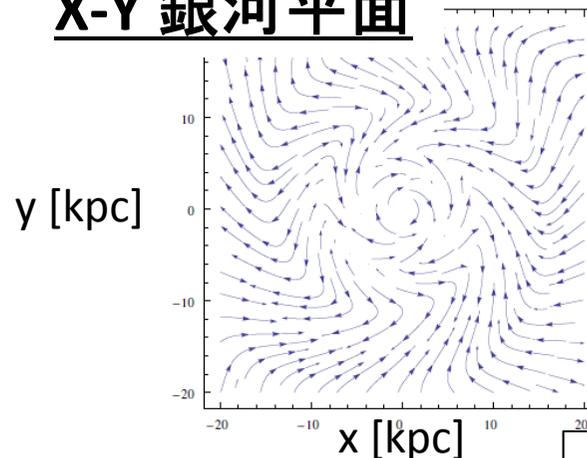


太陽系近傍

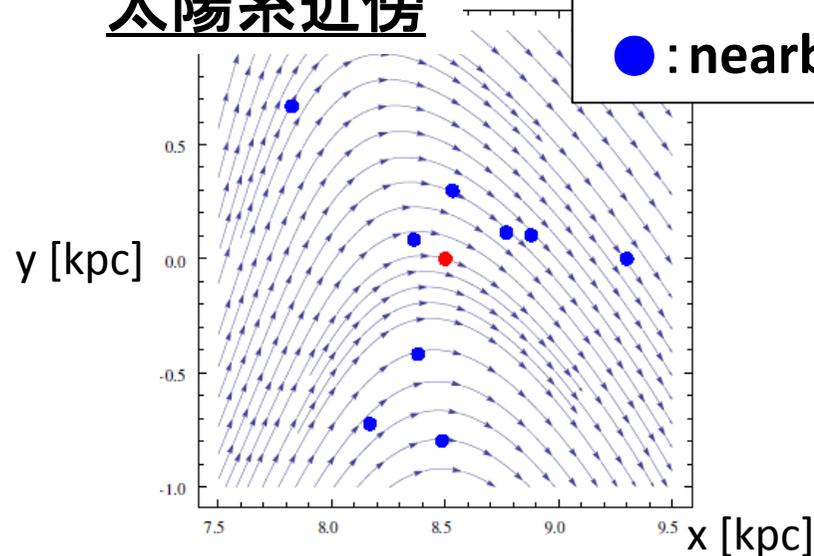


【BSS(+)-model】

X-Y 銀河平面



太陽系近傍



- : solar system
- : nearby SNRs

Conclusion

Discrete Source (SNRs) を考慮した銀河宇宙線伝播計算 (シンプルな拡散モデル)

- ◆ Mean free path が同じでも、太陽系に到来する GCR の path length や age は m.f.p. に依存したある分布を持つ
 - Discrete source の影響を受け、Low path length / low age の成分が欠落する。
 - m.f.p. が小さくなるほどに discrete source の影響が強くなる
- ◆ path length distribution は m.f.p. ~ 0.1 pc 付近でピークを持つ
 - ~ 1 GeV 付近でピークを持つ B/C ratio を説明可能？

銀河磁場によるドリフト運動の銀河宇宙線伝播への影響

- ◆ 銀河磁場モデルによって予想されるドリフト効果の影響は大きく異なる。

Future works

□ Path length distribution & age distribution

- 詳細についてチェック中

□ secondary/primary ratio (B/C ratio)

- weighted slab による計算

□ ドリフト効果を入れたシミュレーション

- Isotropic diffusion modelとの差異
- Nearby SNRs の寄与
- Proton , Electron への影響の差異

□ source (SNRs)からのGCR の漏れ出し

- GCR Source のサイズの時間依存性
- 漏れ出すタイミングのエネルギー依存性

