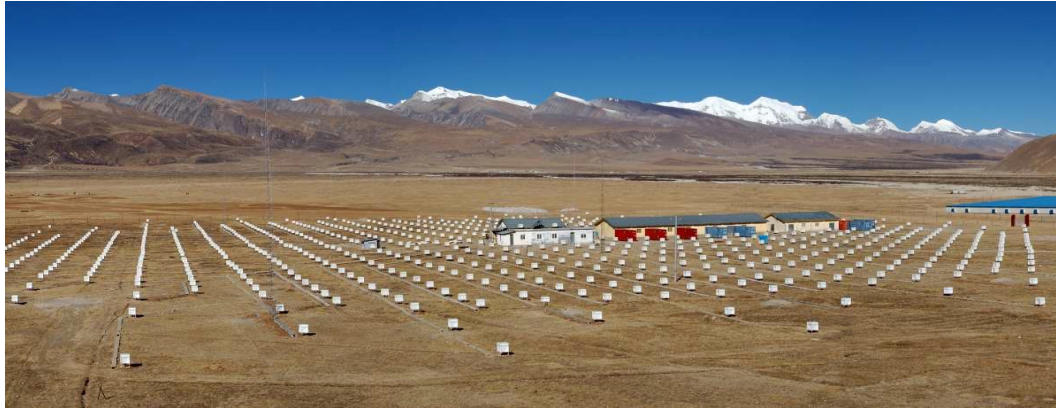


月による宇宙線遮蔽効果を用いた地磁気変動測定の研究

神奈川大学 佐々木 翼

2024年3月26日

Tibet AS γ 実験の目的・概要



<目的>

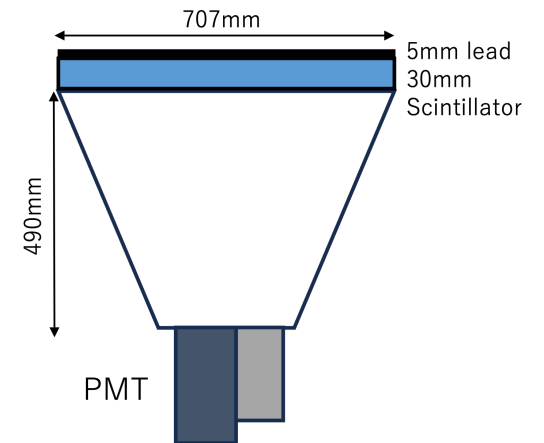
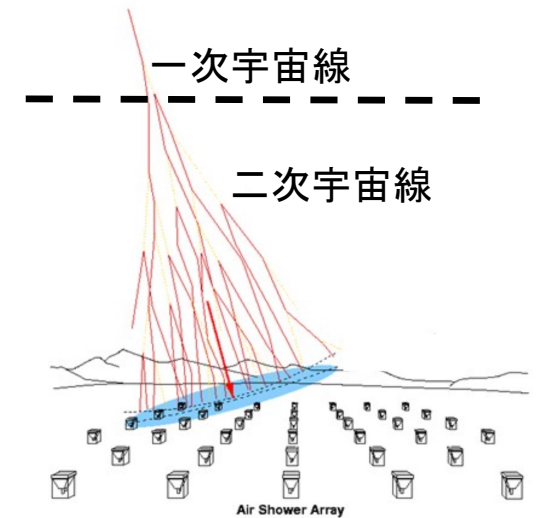
超高エネルギーガンマ線天体の研究、および超高エネルギー宇宙線組成の研究

<概要>

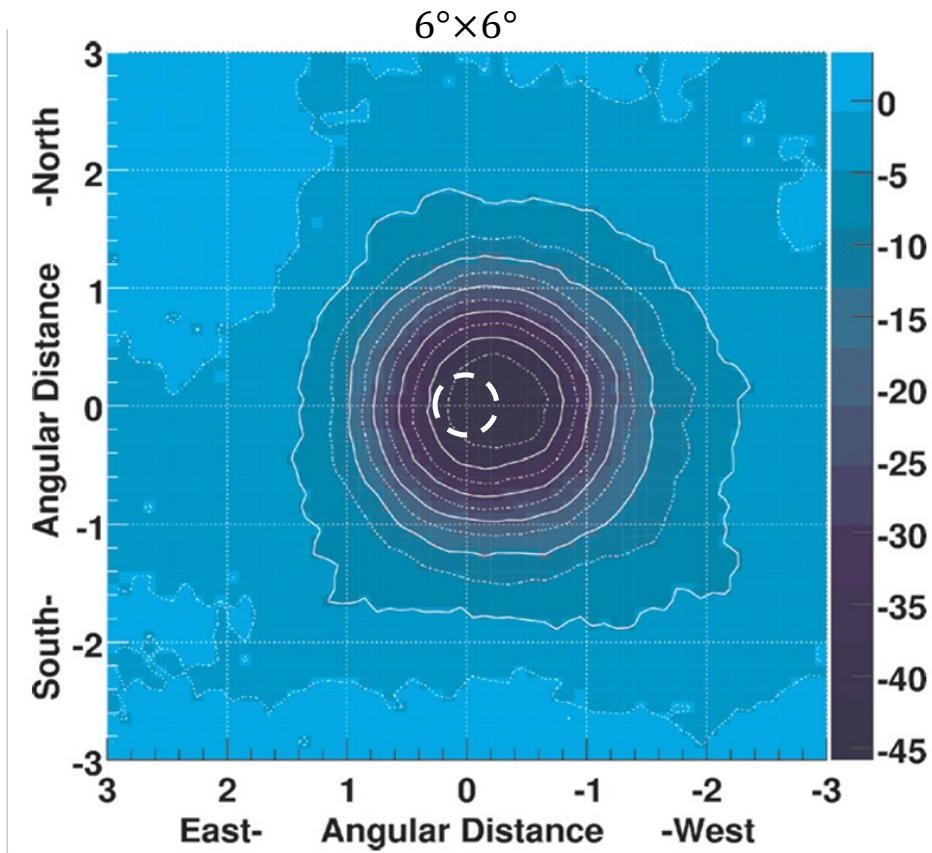
中国チベット自治区羊八井 標高4300m (90.5°E,30.1°N)

Tibet-III空気シャワーアレイ

- ・789台で構成されるシンチレーションカウンター
- ・角度分解能 1° (>2 TeV), 0.2° (>100 TeV) CRs
- ・到来方向天頂角 $\leq 40^\circ$

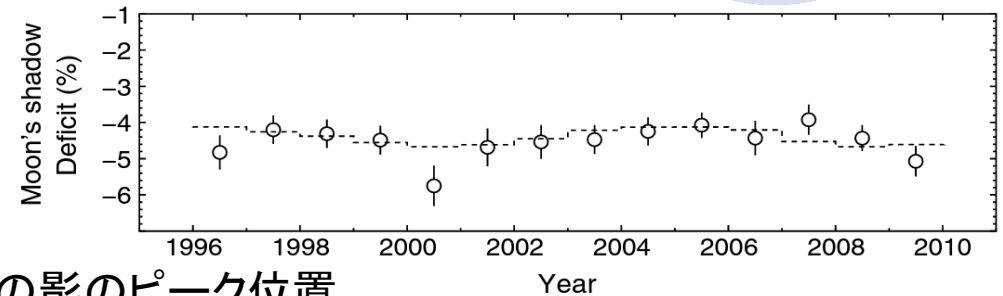
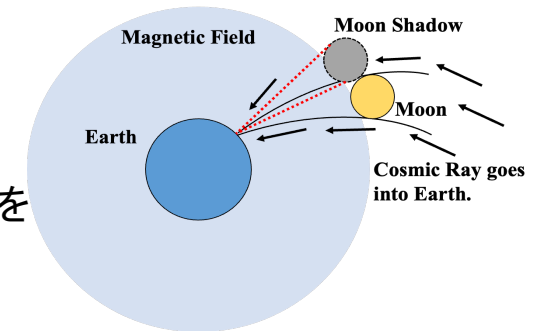


Tibet-III空気シャワーアレイで観測された月の影



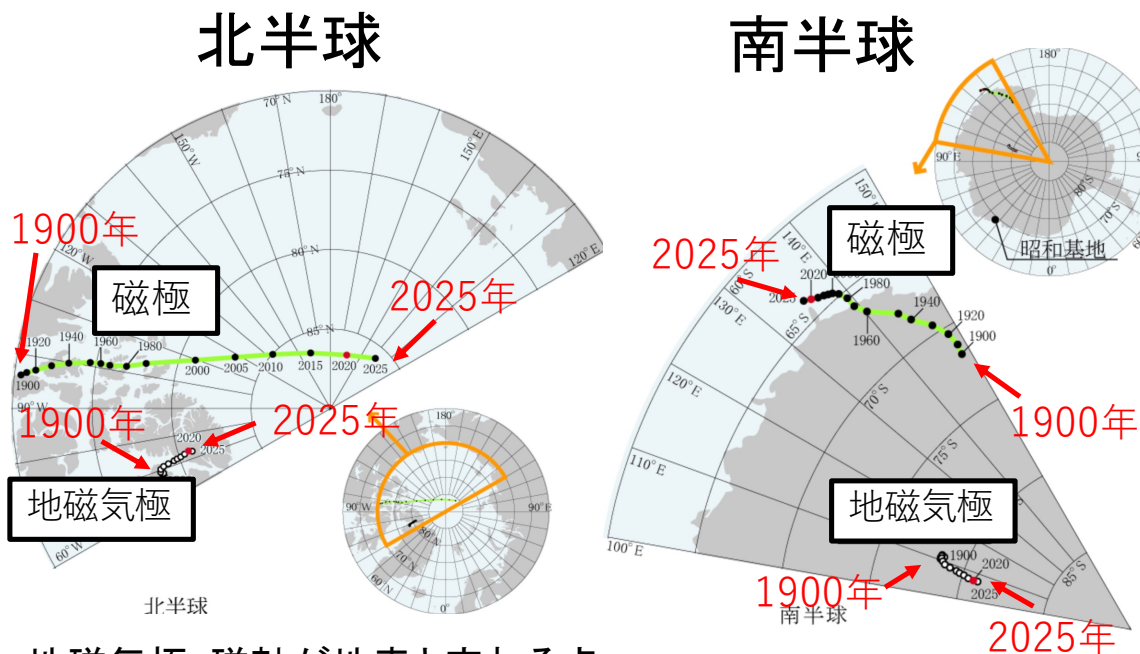
$E > 2 \text{ TeV}$ 1318.9 live days

- ・月によって宇宙線が遮蔽され、その方向からの到来頻度が減少
- ・宇宙線は地磁気によってローレンツ力を受ける
→月の影は実際の月方向からズれる



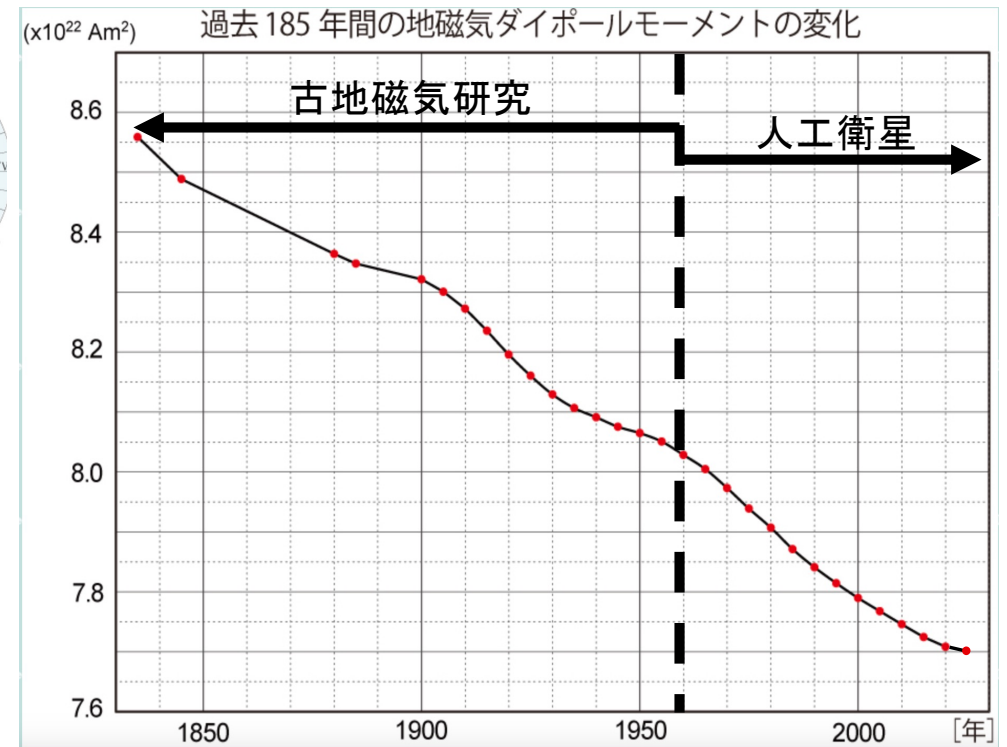
- ・月の影のピーク位置
 - 東西方向: 西側に約0.2°
 - 南北方向: 北側に $0.008^\circ \pm 0.011^\circ$
- ・観測された月の影は欠損の変化が小さい
→安定した月の影が観測される
- ・月影の東西方向のずれは一次宇宙線のエネルギー、磁場強度に依存
→直接的に一次宇宙線のエネルギースケールを推定

地磁気変動(地磁気極と磁極の変動)



地磁気極: 磁軸が地表と交わる点

磁極 : 主磁場が地表に対して垂直なる点



- ・数年～数千年の時間スケールでの経年変化
- ・ダイポールモーメント強度の減衰傾向

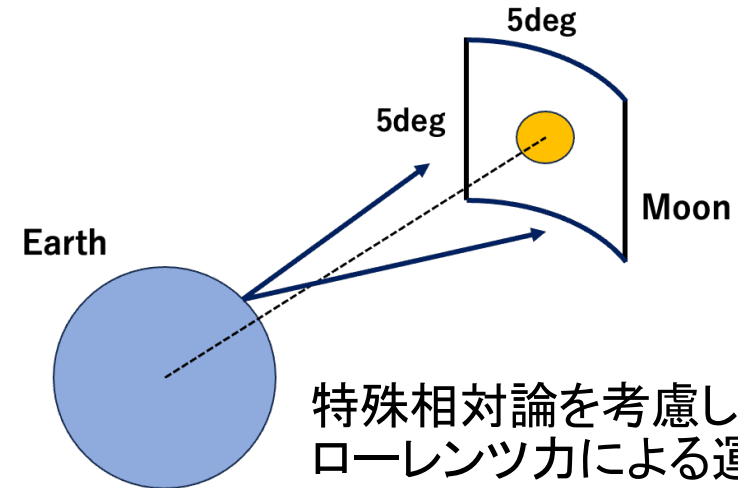
シミュレーション手法

月方向から到来する宇宙線をシミュレートすると、膨大な計算コストを要する

→逆に観測地から月に向けて反粒子を打ち出して月の影を再現

月の周囲 $5^\circ \times 5^\circ$ 以内に、エネルギースペクトルと角度分解能に応じて、粒子の射出方向をランダムに決定

核種	反陽子
生成エネルギー	3TeV~100TeV
モードエネルギー	5TeV
スペクトル	$E^{-2.6}$
角度分解能	$1^\circ (>2\text{TeV}), 0.2^\circ (>100\text{TeV})$

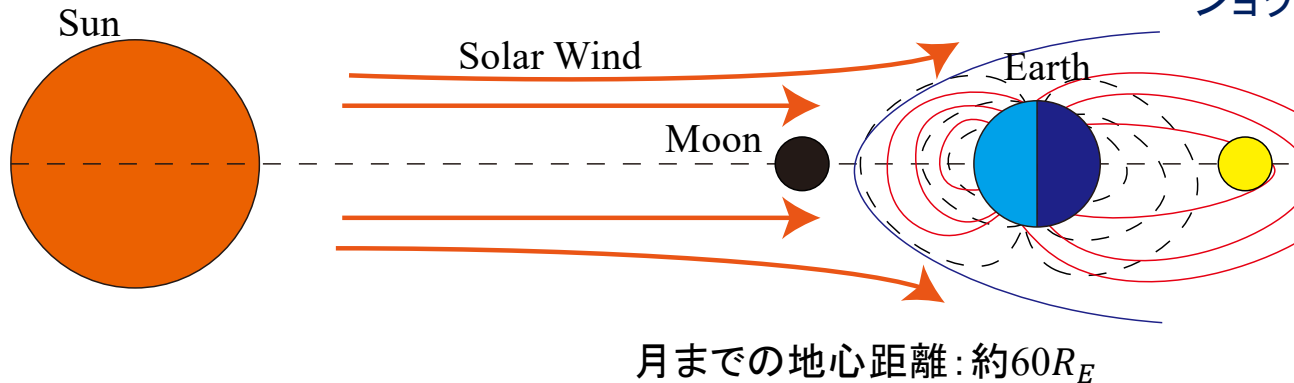


特殊相対論を考慮したローレンツ力による運動方程式

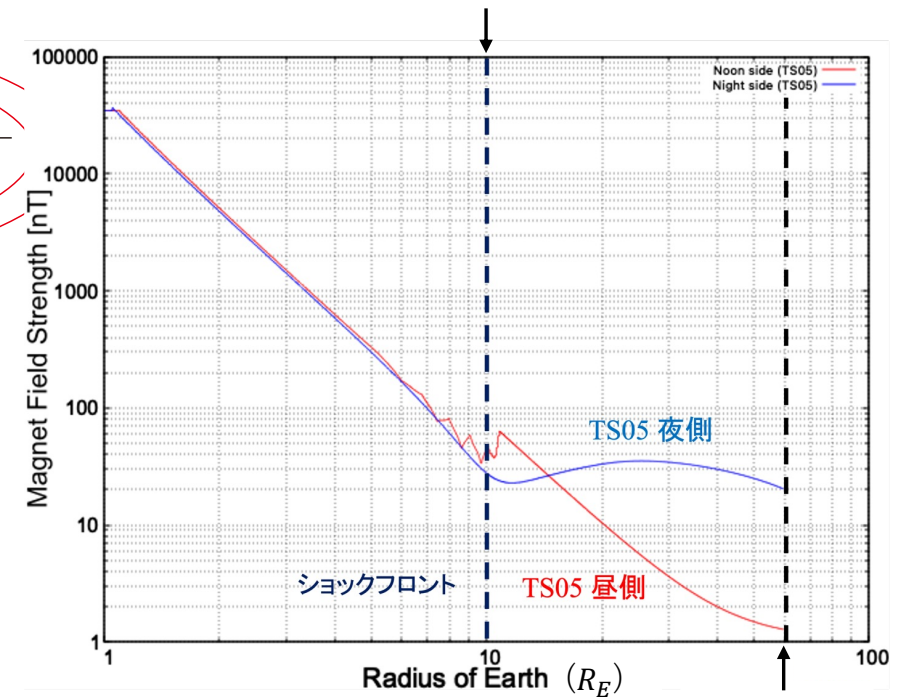
$$\gamma Am \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{Ze}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

4次のルンゲ・クッタ法によって数値的に運動方程式を解く

地磁気モデル(TS05)



ショックフロント: 太陽風と磁気圏の境界(昼側 $10R_E$)



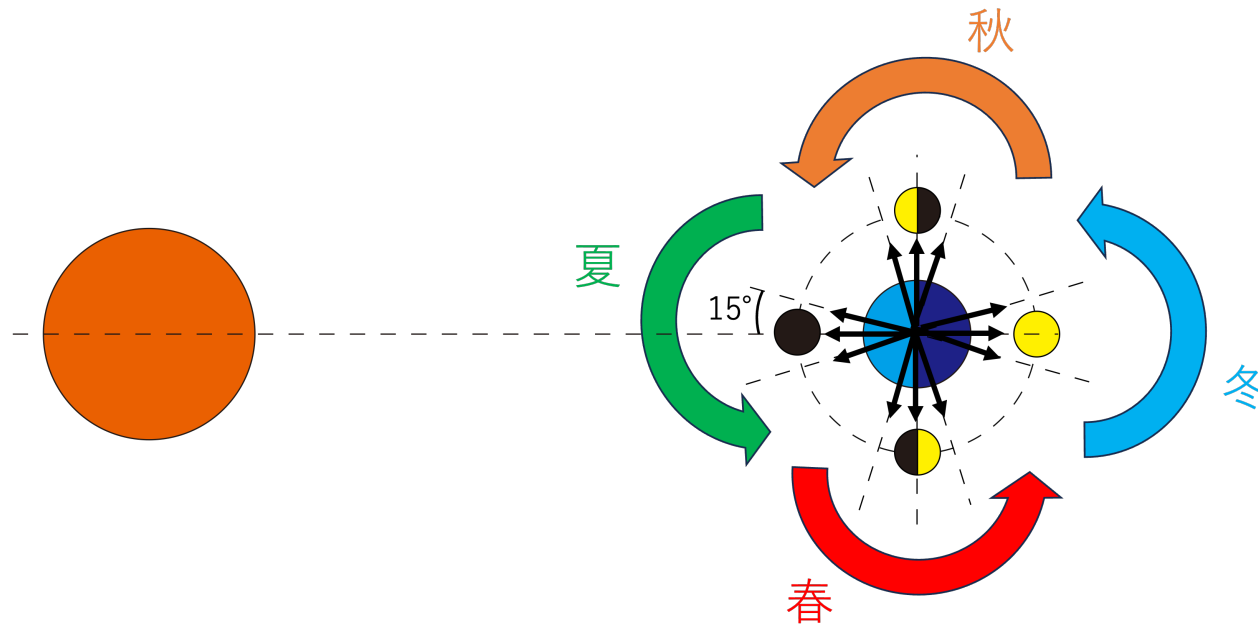
シミュレーション終了地点($60R_E$)

R_E : 地球半径(6,378 km)

<TS05モデル(2005年)>

- ・太陽風、惑星間磁場、外部電流を考慮
- ・歪んだ磁力線を記述したモデル
- ・磁気圏の外側は双極子磁場で近似

シミュレーション条件

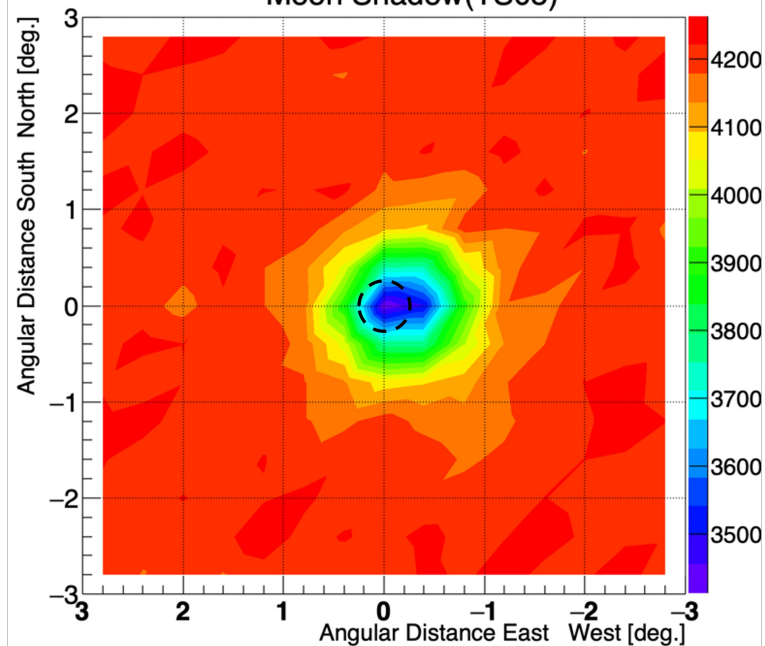


- ・月の影が観測される月方向は季節ごとに概ね決まっている
春→夕方(上弦の月) 夏→昼(新月) 秋→早朝(下弦の月) 冬→深夜(満月)
- ・南中高度が高い日時と、その1時間前後の3方向に粒子を打ち出す
→季節ごとに合計12方向

シミュレーションによる月の影の平均位置

月の影(2009年)

Moon Shadow(TS05)



西側に $0.181^\circ \pm 0.001^\circ$

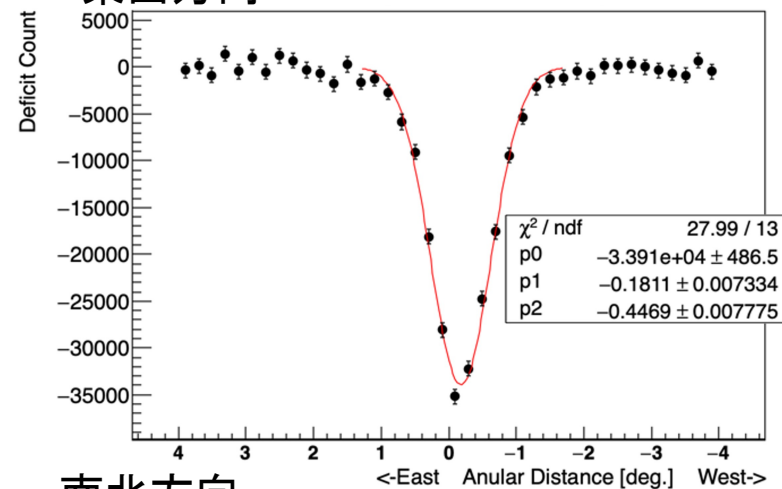
北側に $0.003^\circ \pm 0.001^\circ$

チベット実験

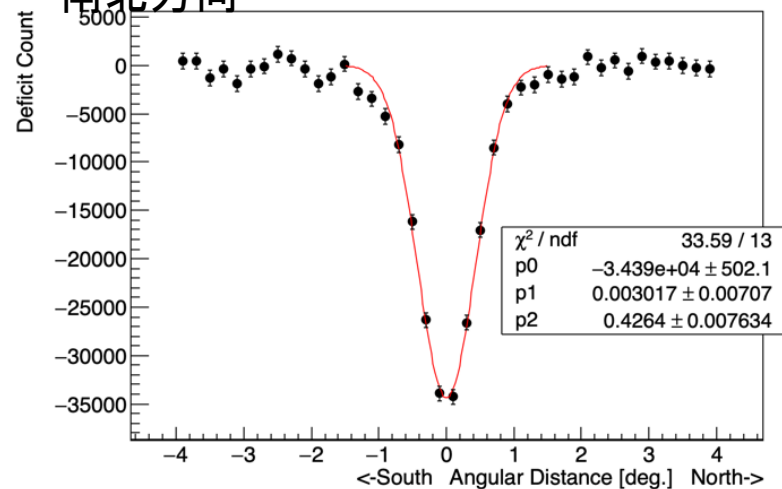
西側に 0.2°

北側に $0.008^\circ \pm 0.011^\circ$

東西方向

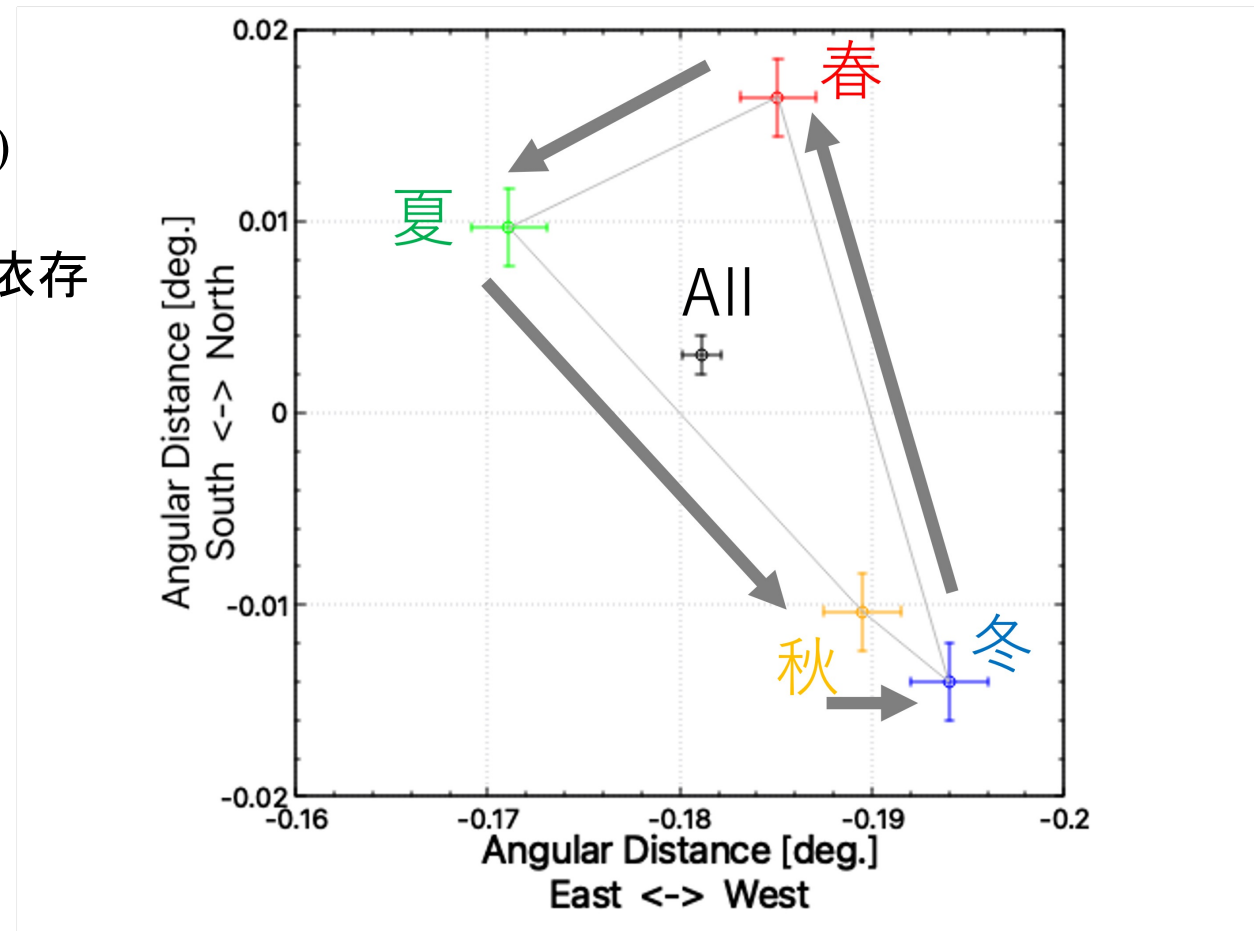


南北方向



季節ごとの月の影のずれ

- ・東西方向は夏(昼側)より冬(夜側)の方が月の影のずれが大きい
→東西方向のずれは磁場強度に依存
- ・南北方向にも月の影はずれた
春と夏→北方向
秋と冬→南方向
- ・季節ごとに回転するようになる



地磁気変動の適用

- ・長い時間スケールでの月の影の確認
- ・1935年～2020年の観測値と2025年までの予測値を用いて25年間隔の月の影を計算

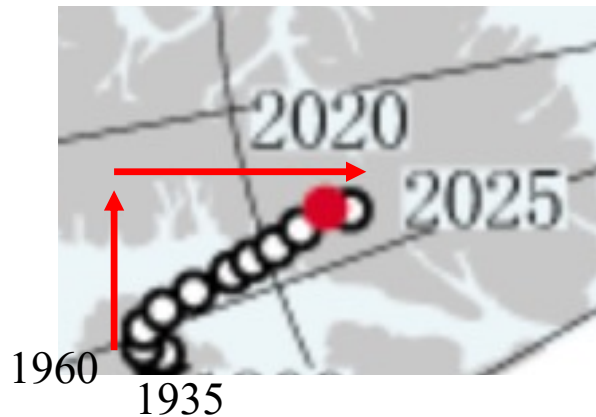
<地磁気極座標の変動>

1935年→1960年

西経方向に1°、北緯方向に0.1°移動

1960年→2025年

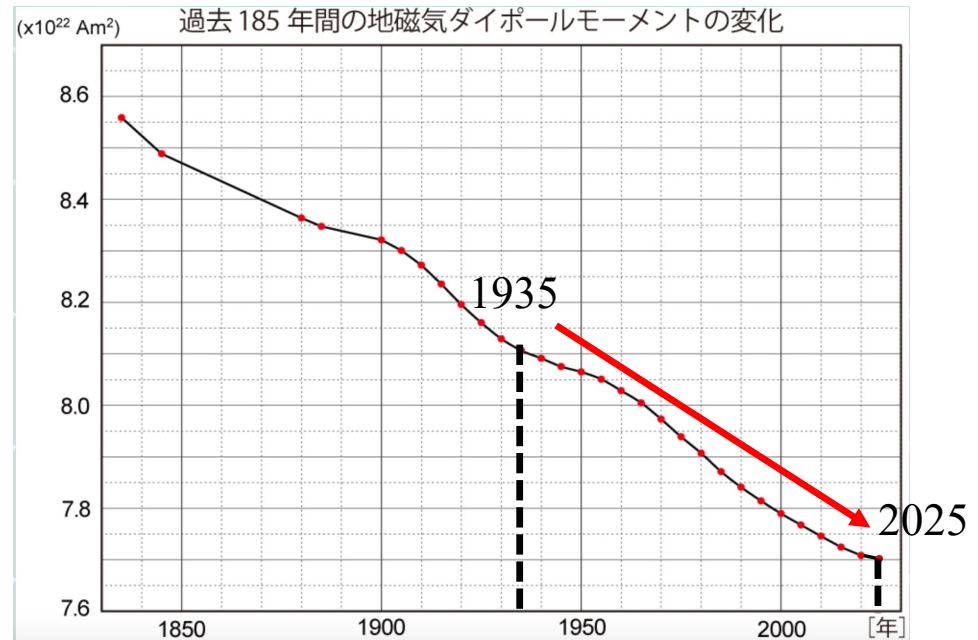
東経方向に5°、北緯方向に5°移動



<双極子モーメント強度の変動>

1935年→2025年

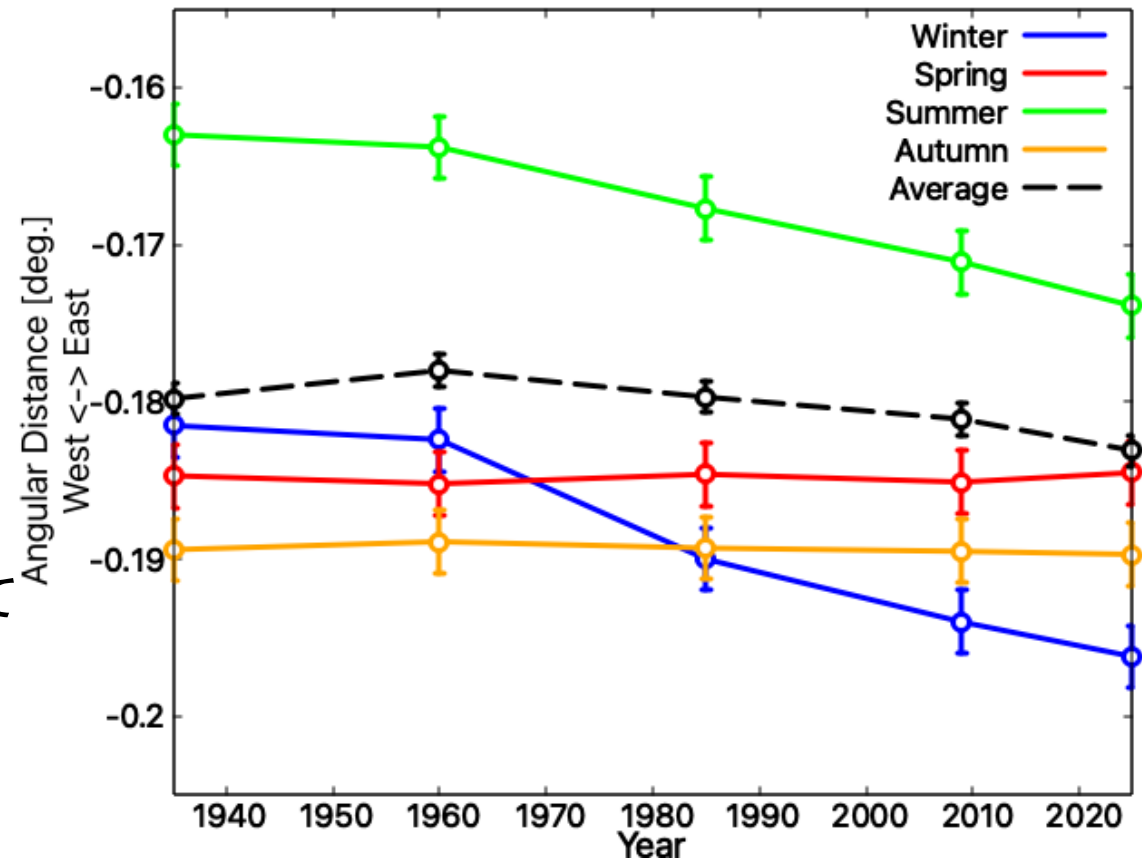
$8.13 \times 10^{22} \text{ Am}^2 \rightarrow 7.70 \times 10^{22} \text{ Am}^2$



地磁気変動を適用させた場合の月の影

東西方向

- ・夏と冬は西へ変動
夏: 西方向に 0.013° 冬: 西方向に 0.015°
(1935年→2025年)
→地磁気変動推定に利用できるか?
- ・春と秋はほとんど変化しない
→実験装置のキャリブレーションに利用
- ・チベット実験のデータでも同様の解析をして
結果があっているかの確認が必要



まとめ

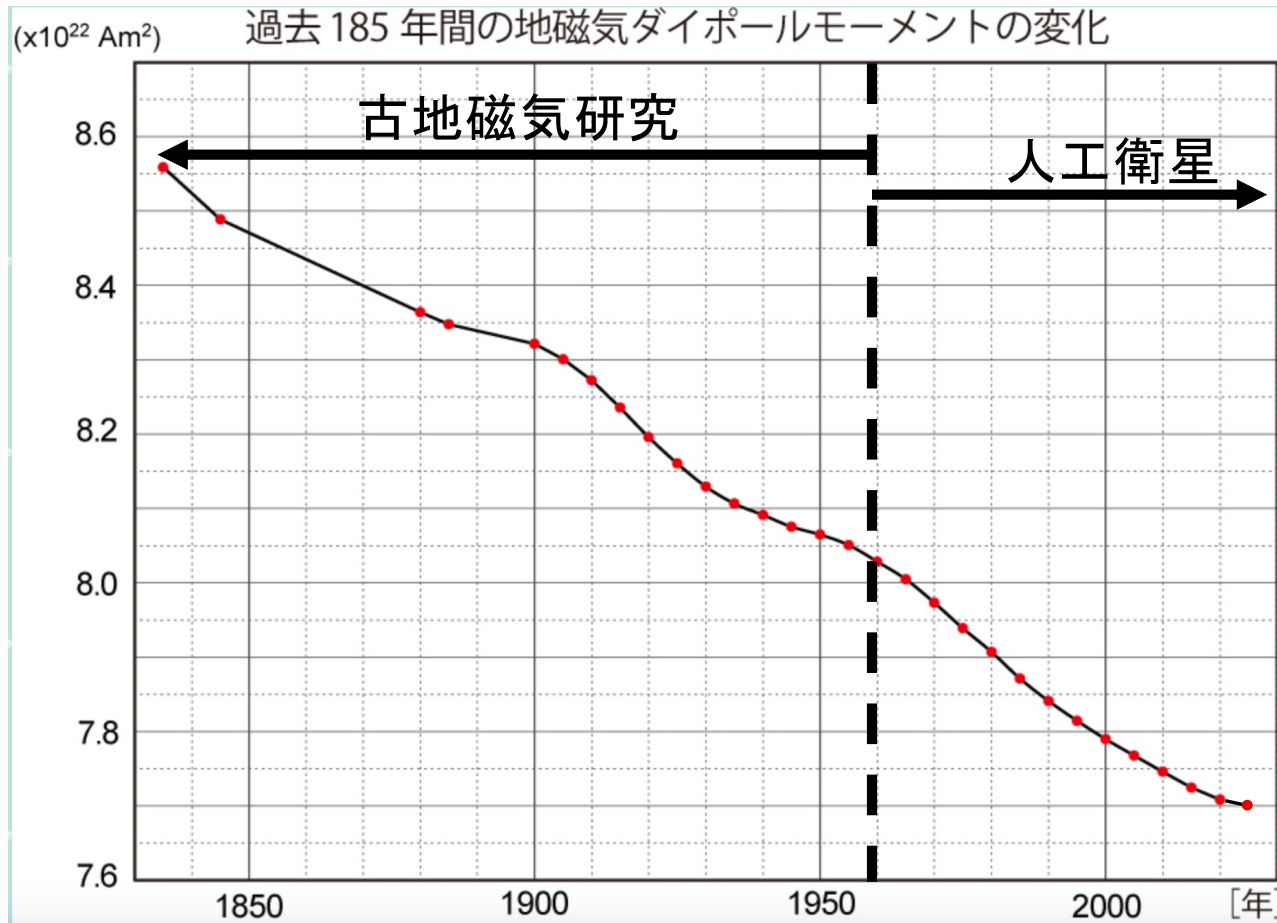
- ・今回は地磁気変動を月による宇宙線遮蔽効果(月の影)を利用して測定するために現実的な地磁気モデルと月軌道を仮定した月の影のシミュレーションをした
- ・90年間で月の影は夏冬が西に $0.01\sim 0.02^\circ$ ほど移動し、春と秋はほとんど移動しない
- ・地磁気変動を推定するのに最適なのは夏と冬の月の影

<今後の課題>

- ・チベット実験のデータでも同様の解析をして、シミュレーションの結果があっているのかの検証
- ・夏冬の変動が大きく、春秋の変動が小さいという結果のメカニズムの解明

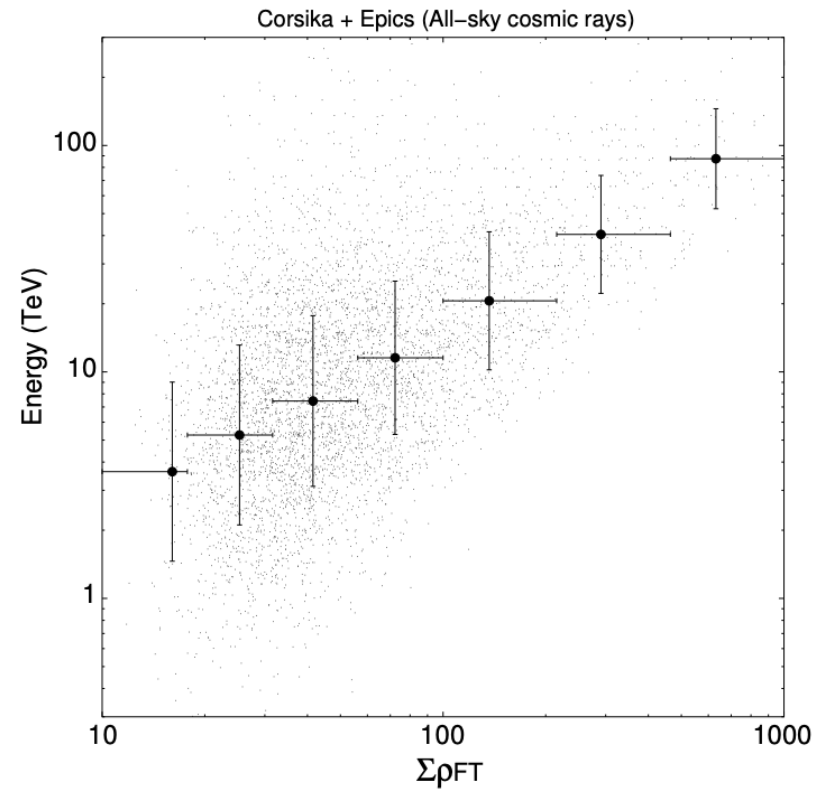
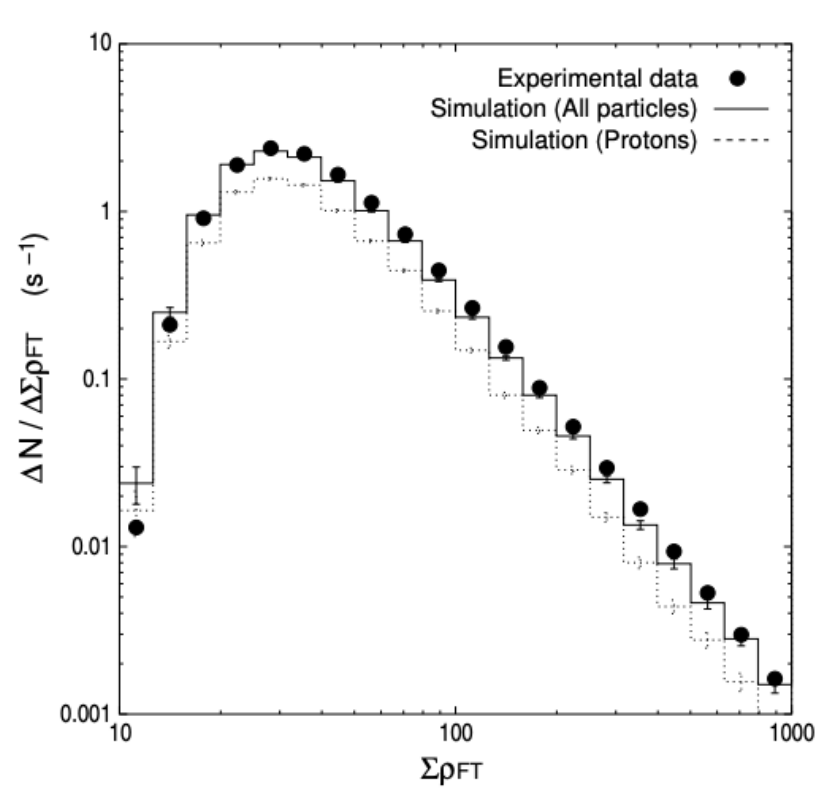
Back up slide

地磁気変動(双極子モーメント強度の変動)

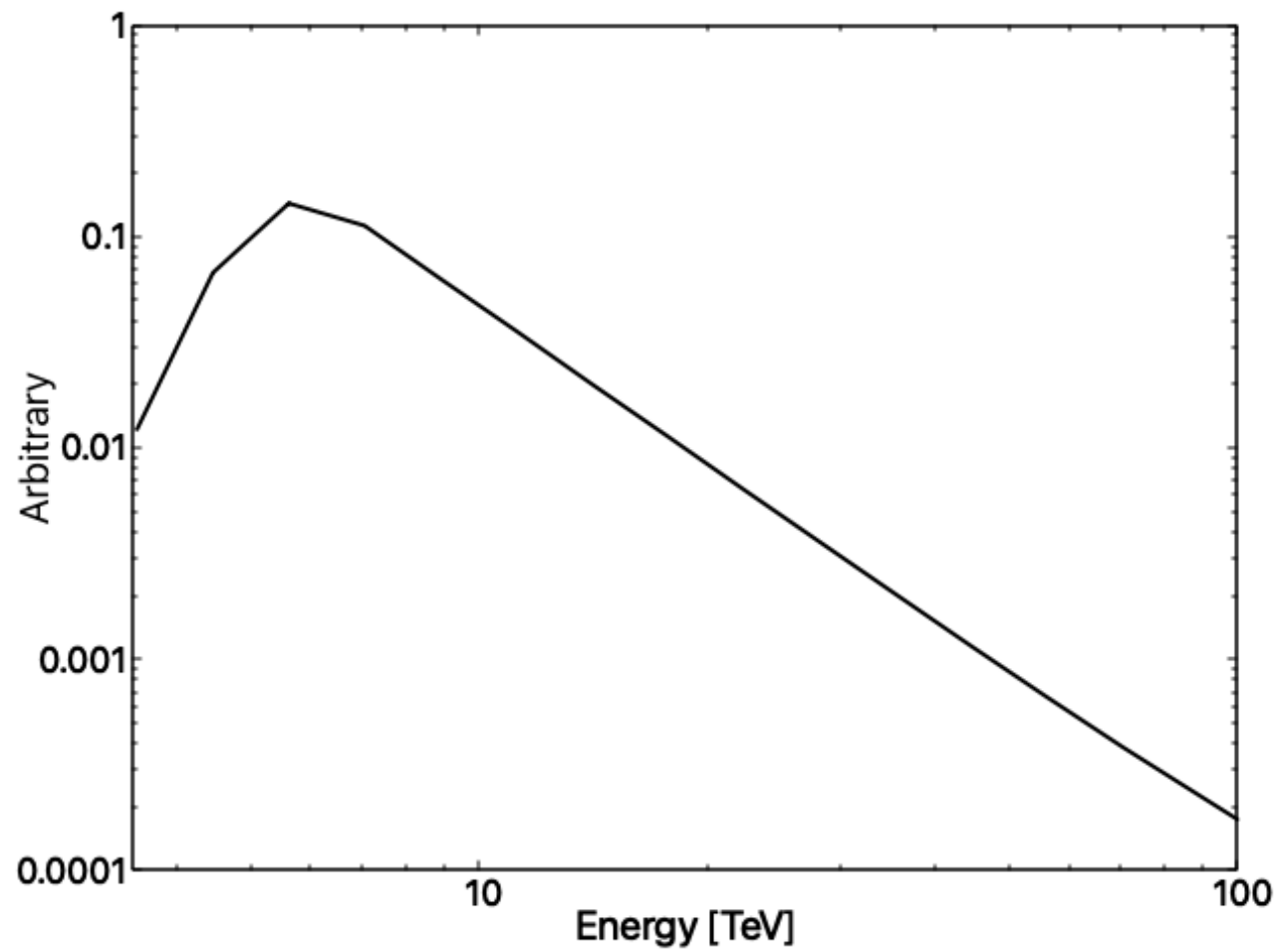


Alken, P., et al., *International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation*, *Earth Planets Space* 73, 49, 2021

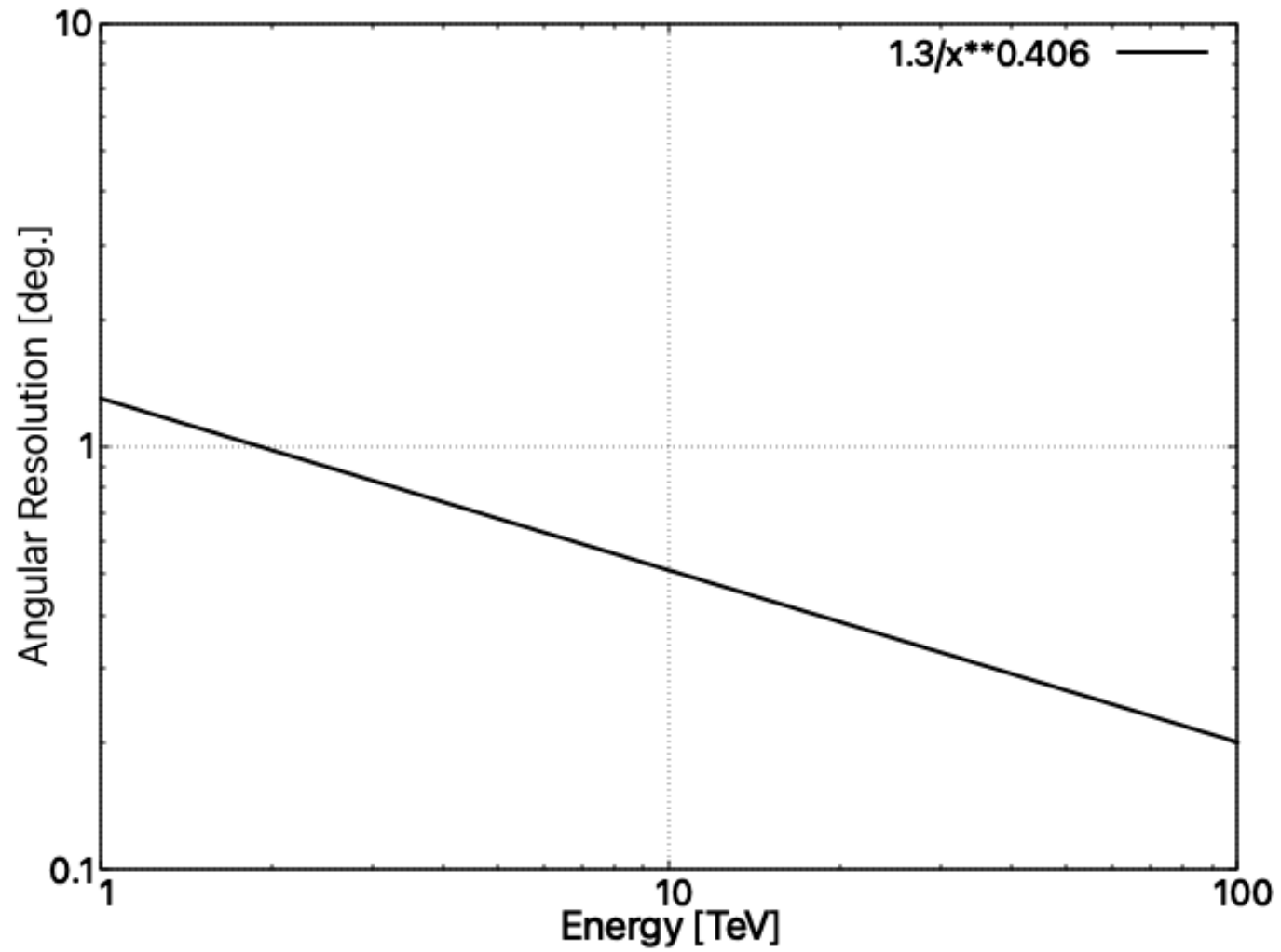
シミュレーションで使ったエネルギー



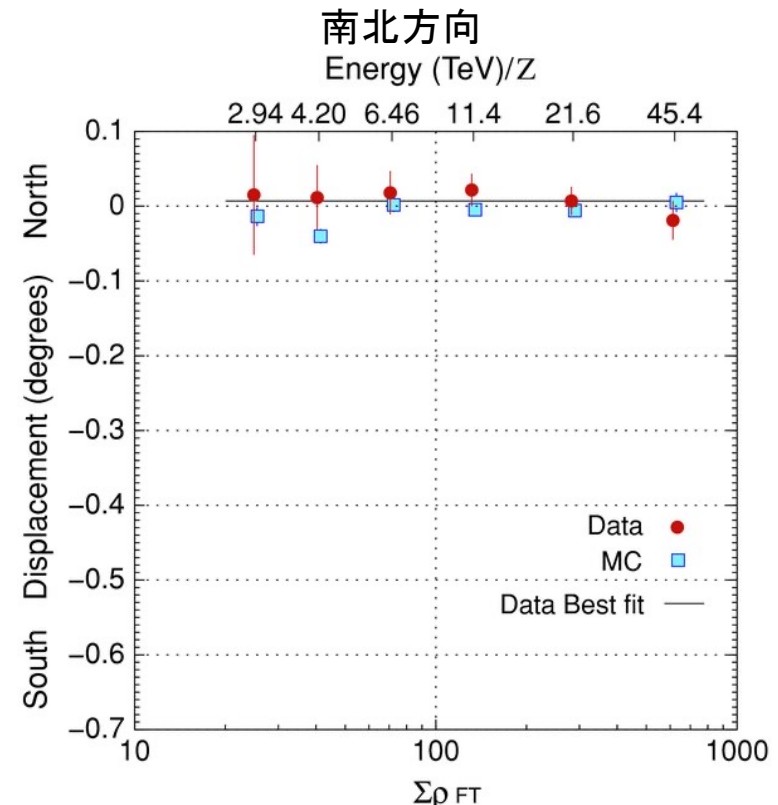
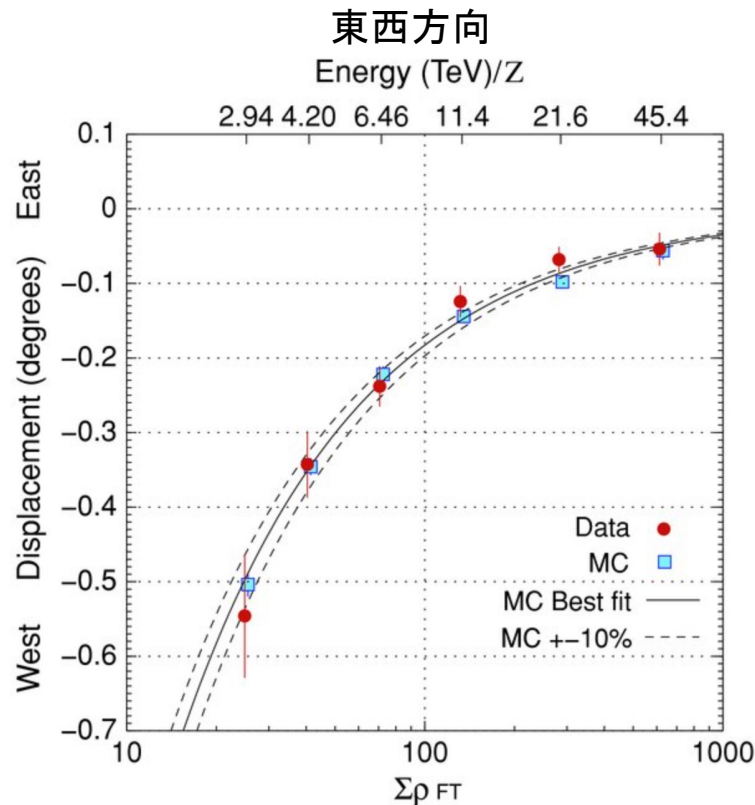
エネルギースペクトル



角度分解能

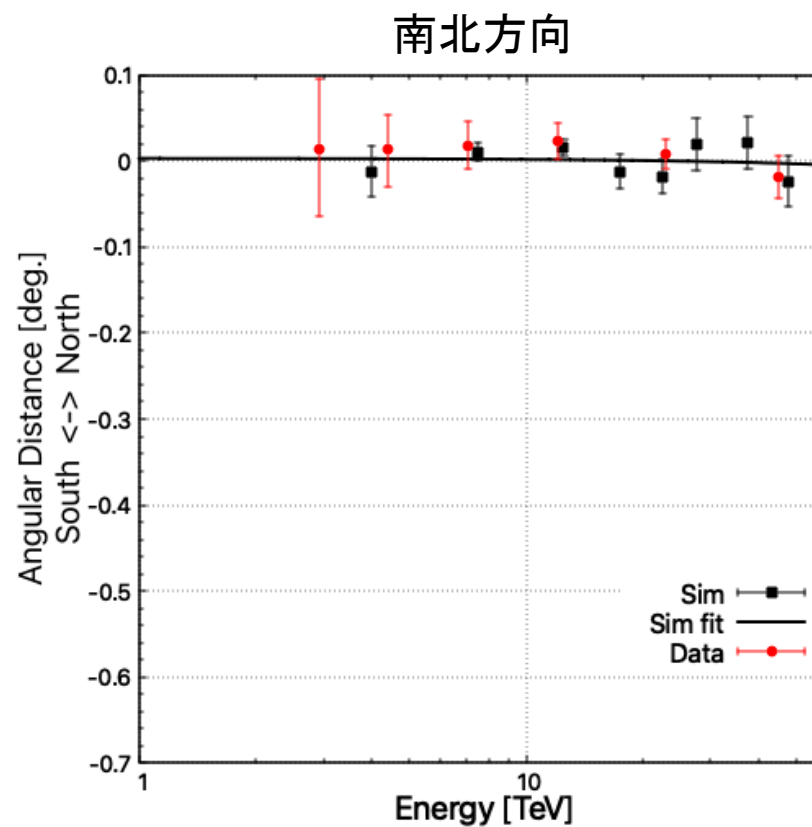
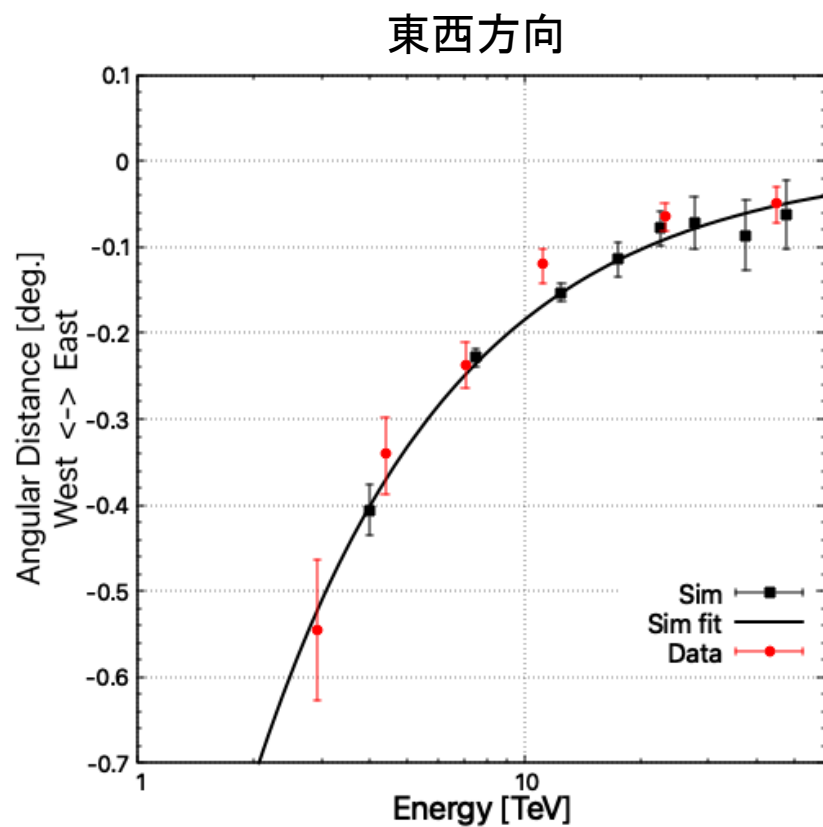


一次宇宙線のエネルギーと月影のずれ



- ・月影の東西方向のずれは一次宇宙線のエネルギー、磁場強度に依存
- ・直接的に一次宇宙線のエネルギースケールを推定
- ・南北方向はほとんど動かない

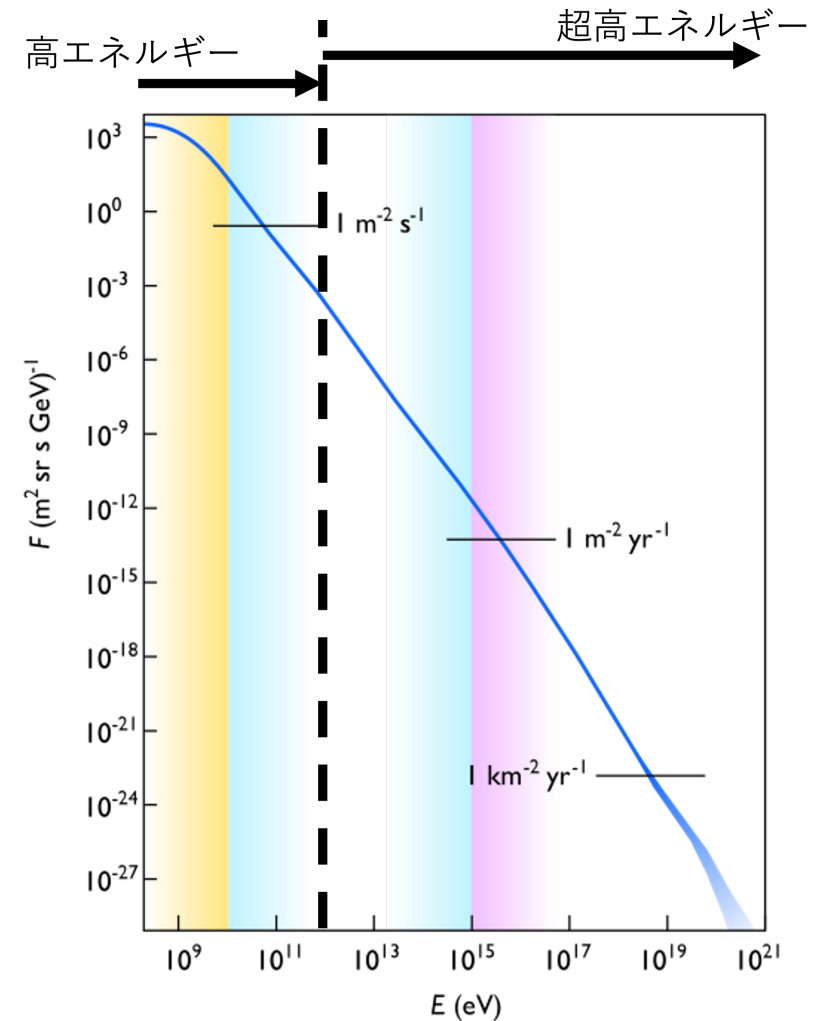
エネルギーごとの月の影のずれ(月の影の平均位置)



宇宙線のエネルギースペクトル

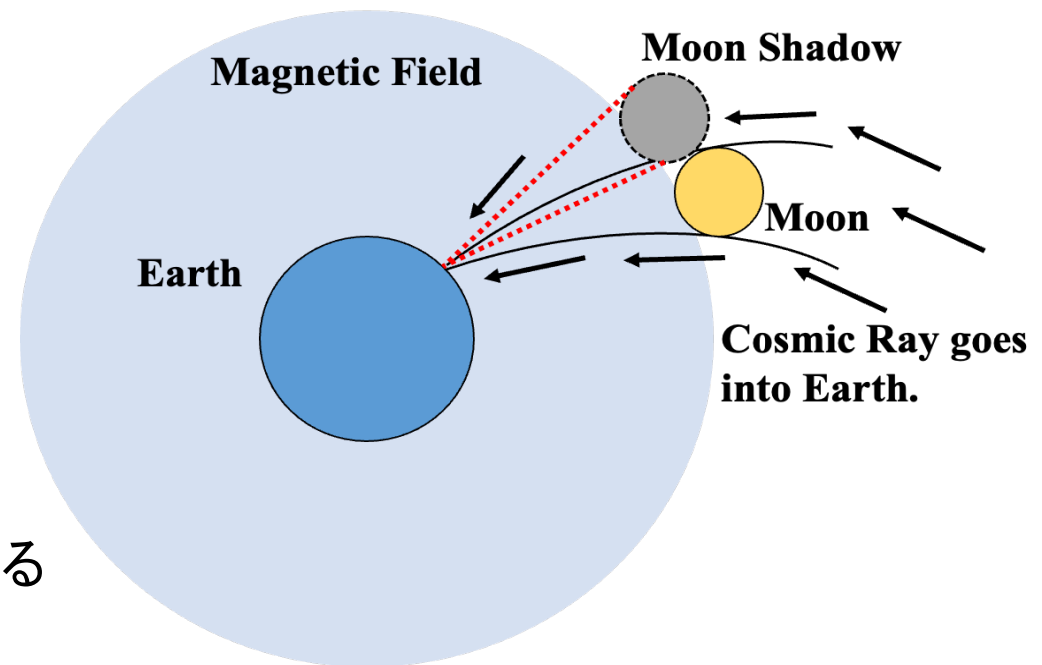
- ・宇宙線は全天から一様に到来する
- ・到来してくる宇宙線は主に荷電粒子(陽子、ヘリウム等)
- ・ E^{-3} 程度のべき関数に依存して減少

高エネルギー宇宙線 $10^9 \text{eV} \leq E < 10^{12} \text{eV}$
 超高エネルギー宇宙線 $E \geq 10^{12} \text{eV}$

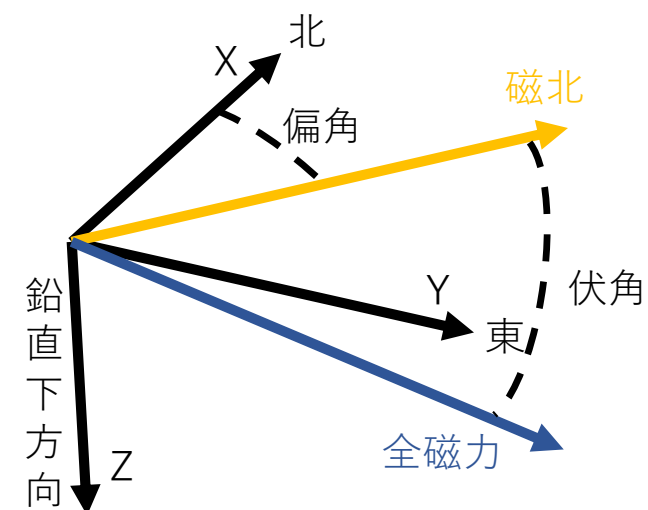
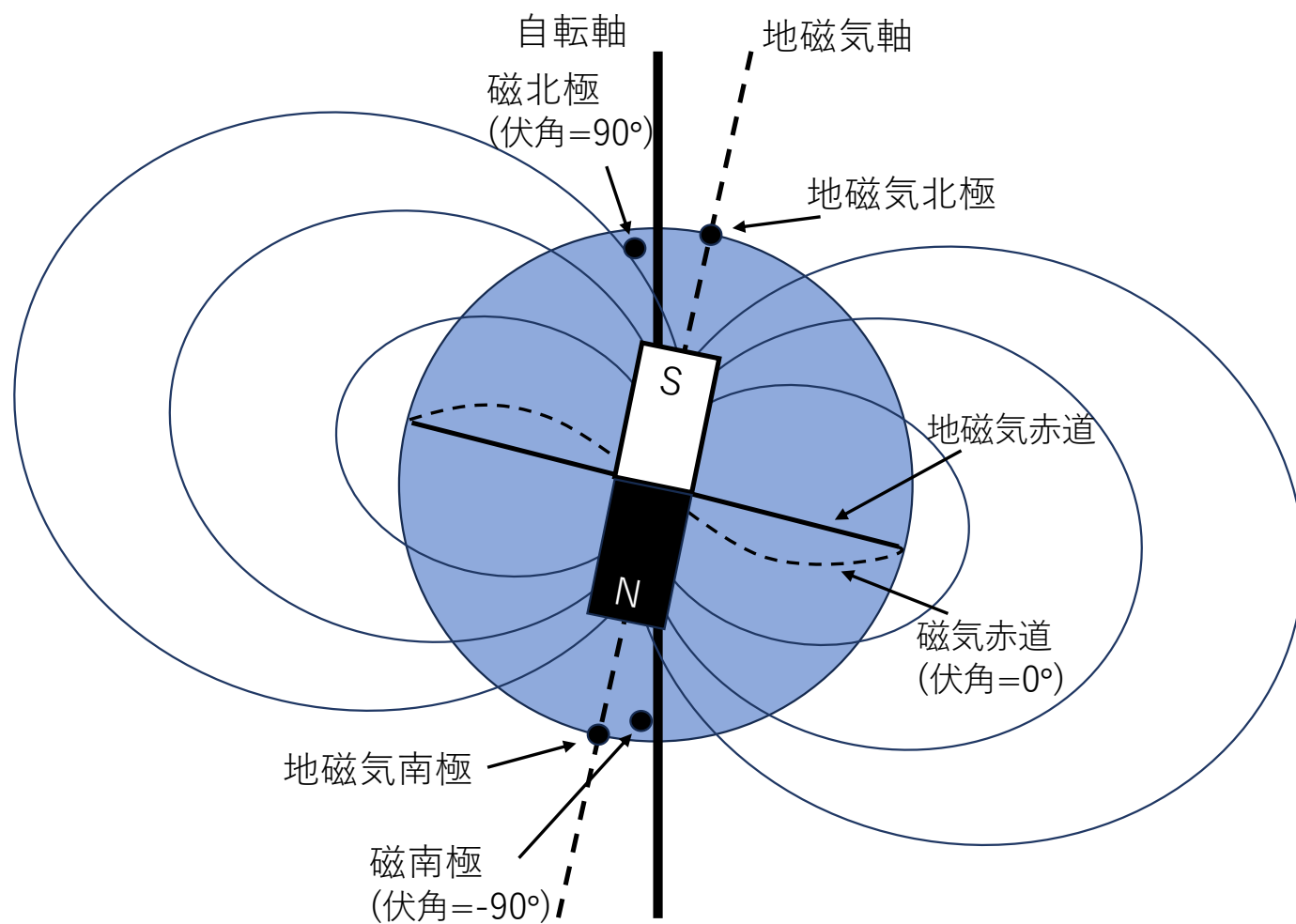


月による宇宙線遮蔽効果(月の影)

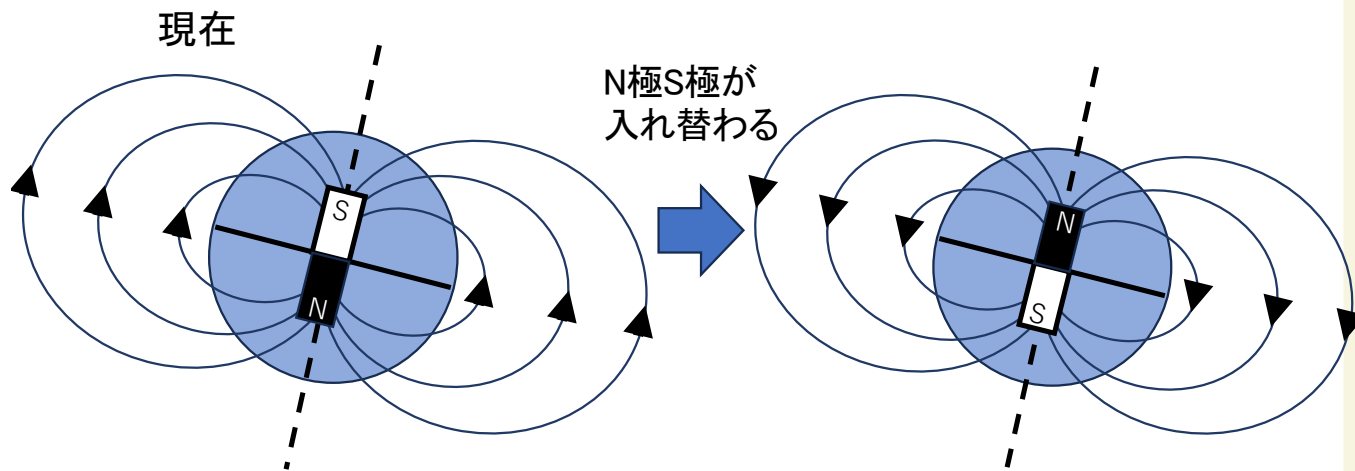
- ・宇宙線の到来頻度は全天で一様な分布
- ・月によって宇宙線が遮蔽される
→その方向からの宇宙線の到来頻度が減少
- ・荷電粒子は地磁気によってローレンツ力を受ける
→月の影は実際の月方向からズレて観測される



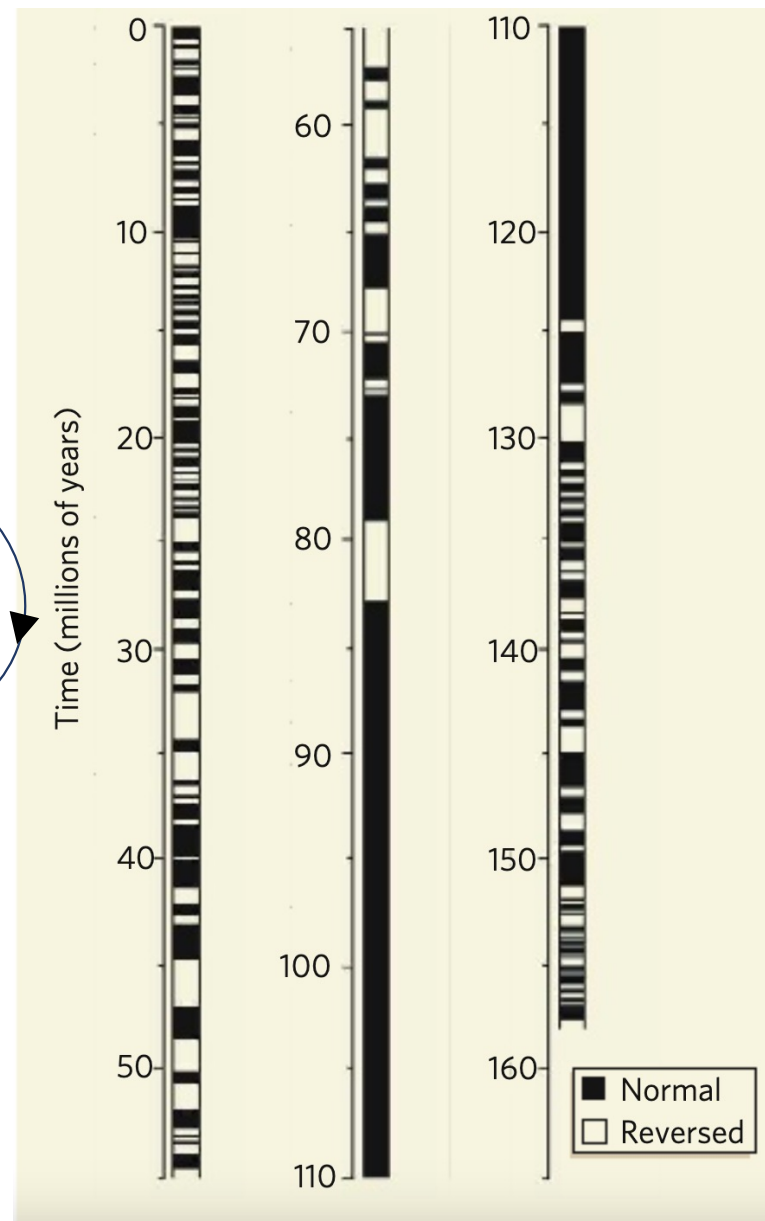
磁極と地磁気極



地磁気逆転

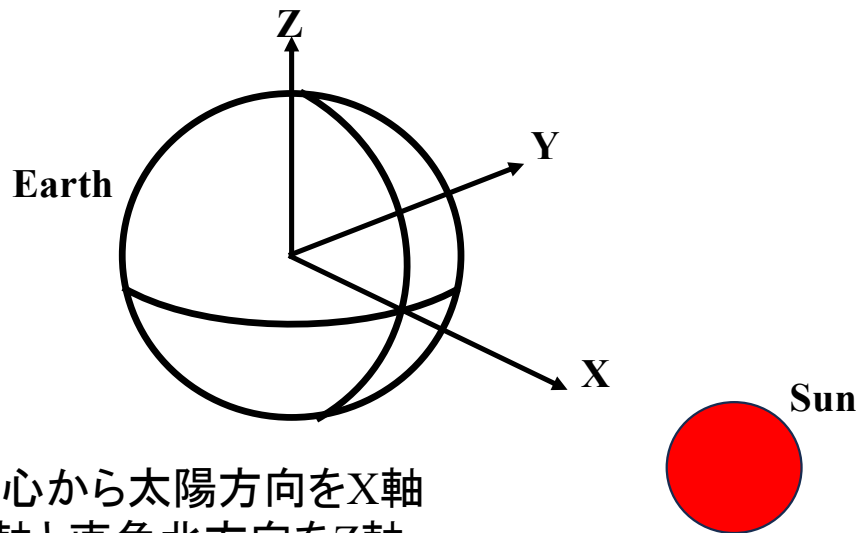


- ・数万～数千万年の間隔で地磁気の極性が逆転
- ・極性が逆転する時期は双極子モーメントが弱まる
→現在の双極子モーメントは同様の傾向



座標系と運動方程式

GSM(Geocentric Solar Magnetospheric Coordinates)座標系



地心から太陽方向をX軸
X軸と直角北方向をZ軸

特殊相対論を考慮した
ローレンツ力による運動方程式

$$\gamma A m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{Ze}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

γ : ローレンツ因子

A : 質量数=1

m : 粒子の質量 = 1.673×10^{-27} [kg]

r : 曲率半径

Ze : 電荷量 = -1.602×10^{-19} [C]

c : 光速

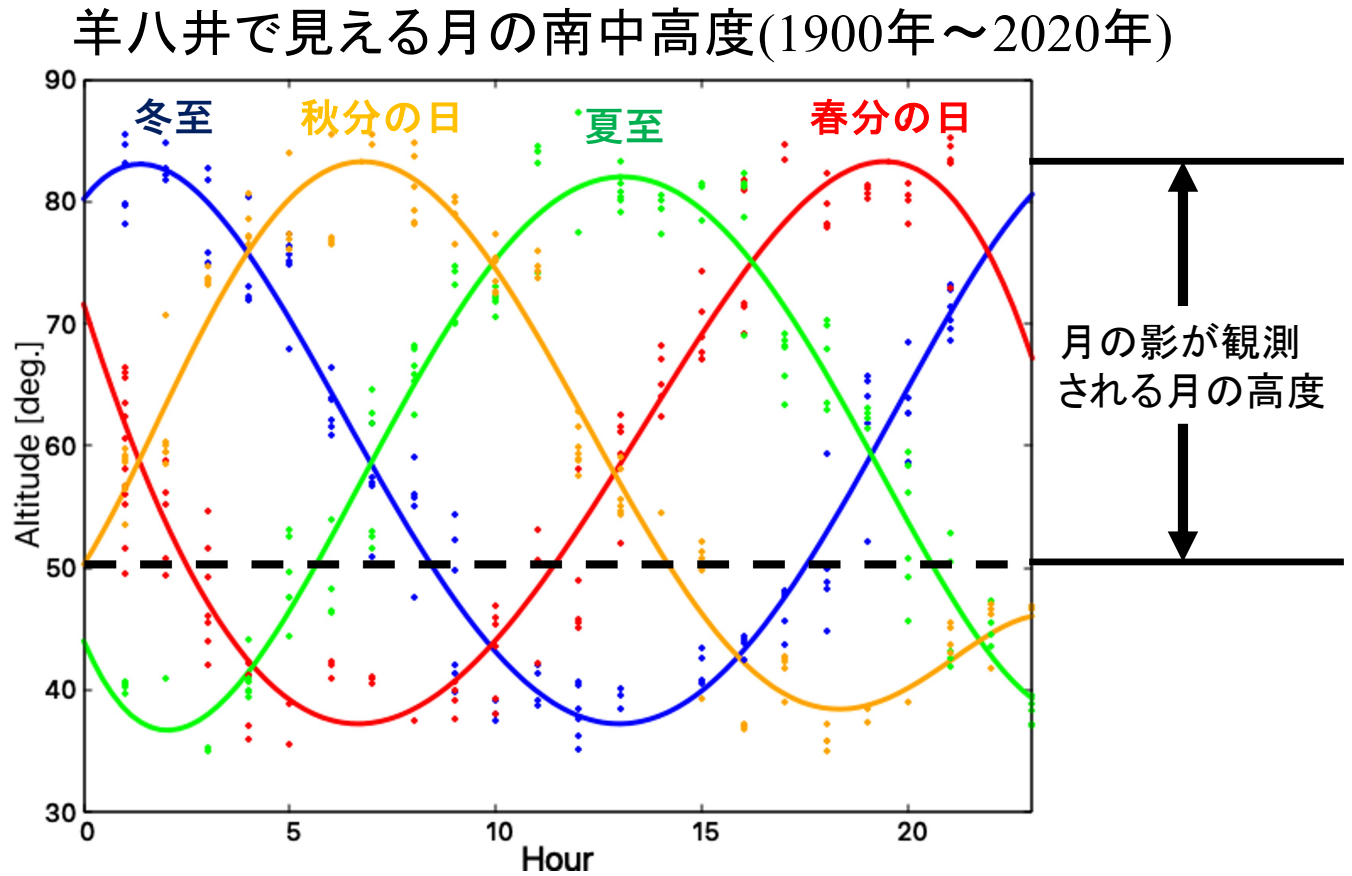
v : 粒子の速度

B : 磁場強度

※反陽子の値

月軌道

- チベット実験で解析に用いられる
到来方向天頂角は 40° 以下
→月の高度が 50° 以上となる
日時を選択する必要がある
- 月の高度は季節ごとに
高くなる時間帯がある
春→夕方 夏→昼
秋→早朝 冬→深夜

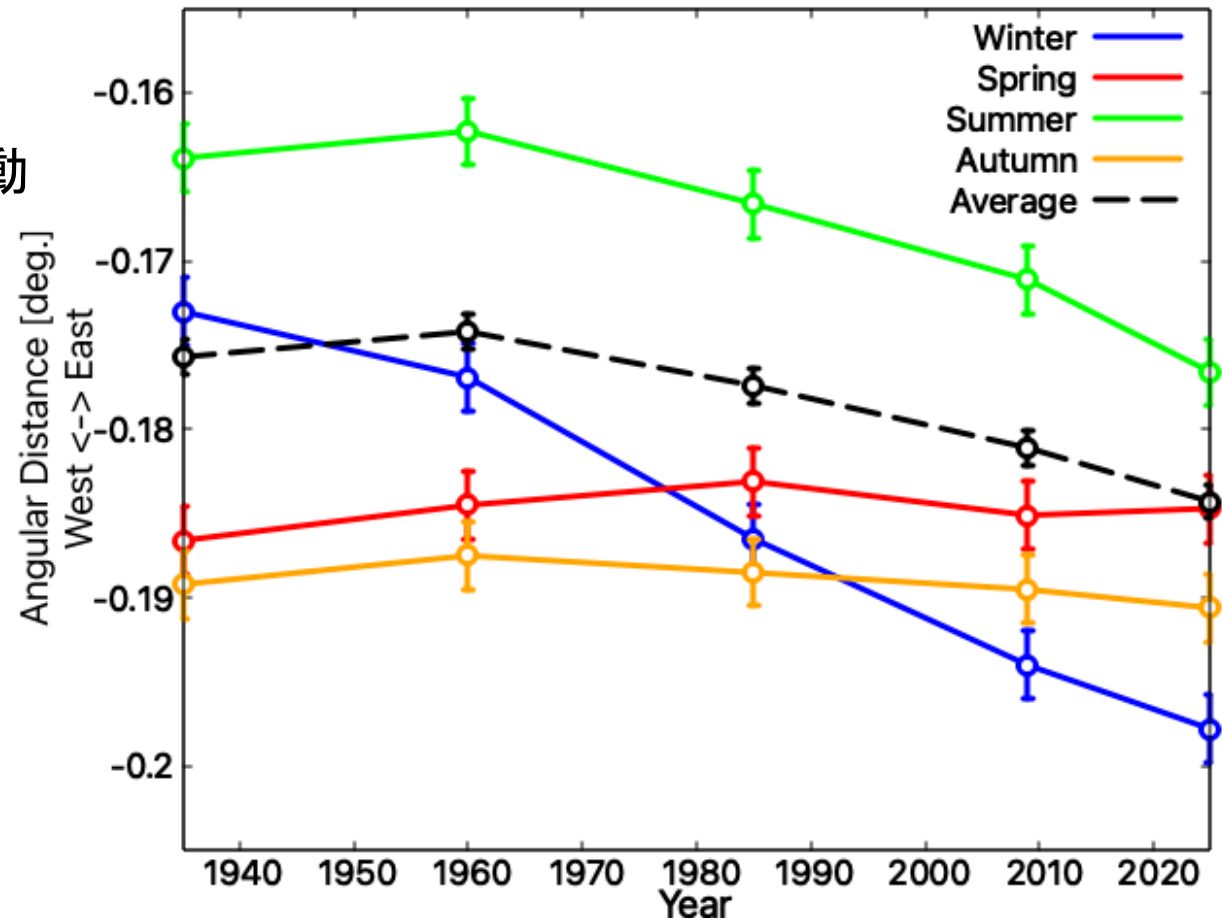


地磁気極の座標を移動させた場合の月の影

東西方向

1935年→1960年の地磁気極
西経方向に1°、北緯方向に0.1°移動
1960年→2025年の地磁気極
東経方向に5°、北緯方向に5°移動

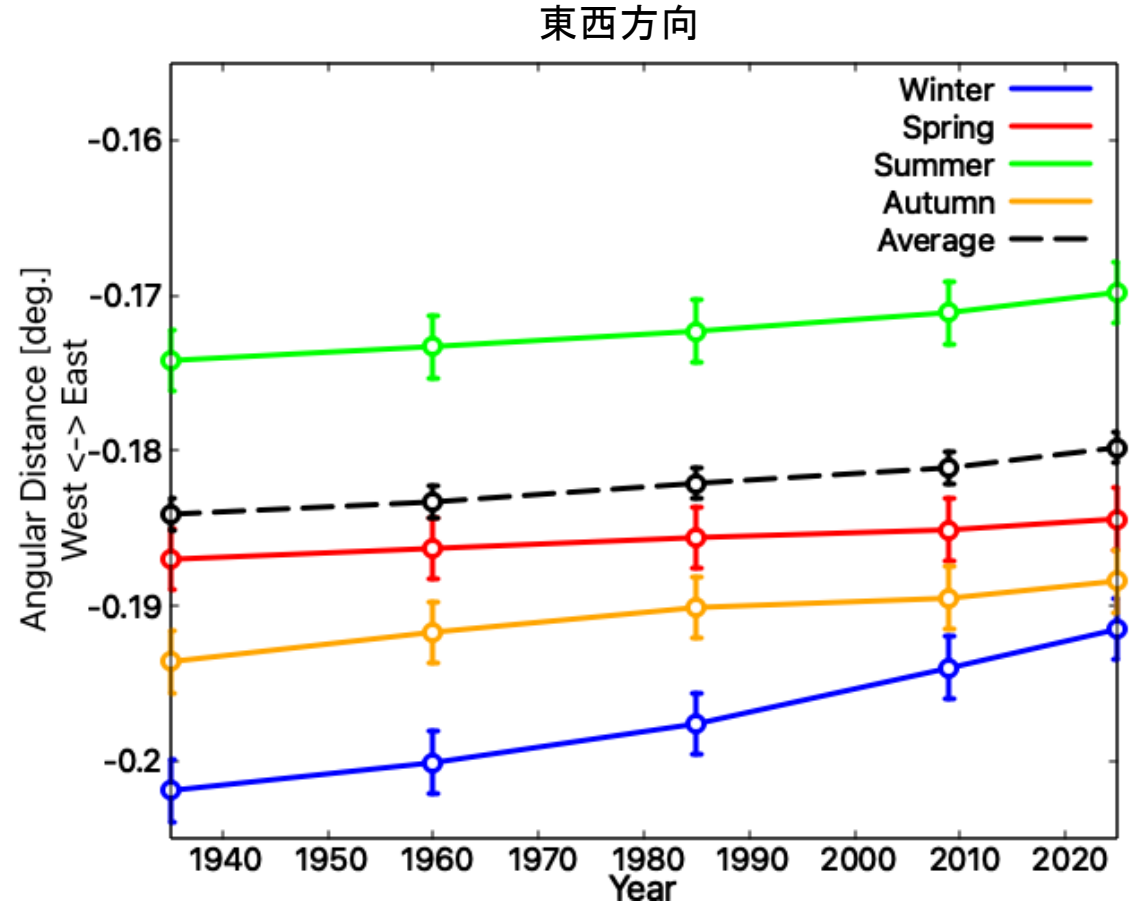
- ・夏と冬の変動が大きい
- ・近年になるほど西へずれる
- ・春と秋はほとんど変動しない



双極子モーメント強度を変動させた場合の月の影

1935年→2025年の双極子モーメント
 $8.13 \times 10^{22} \text{ Am}^2 \rightarrow 7.70 \times 10^{22} \text{ Am}^2$

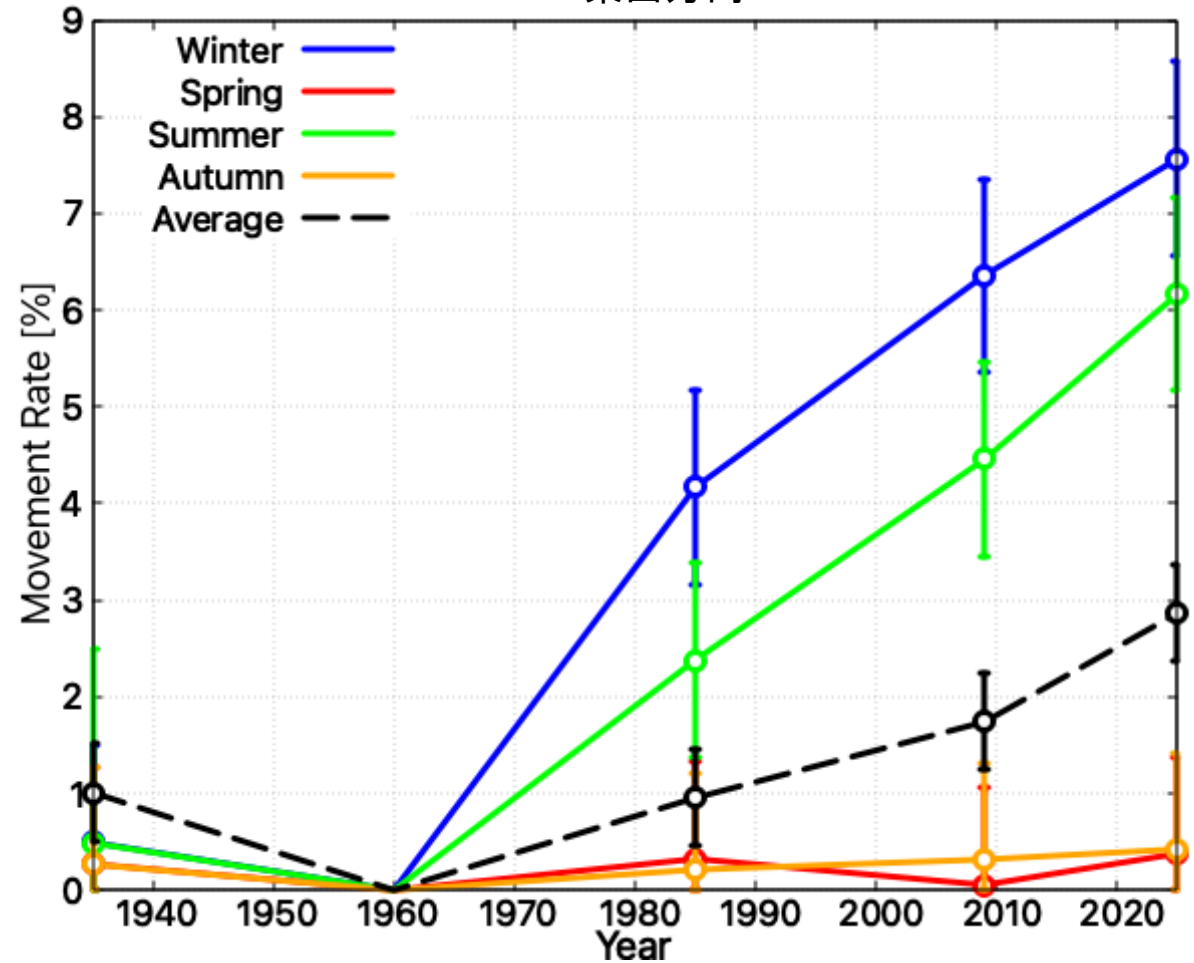
- ・どの季節でも近年になるにつれて月の影のずれは徐々に小さくなった
 →双極子モーメントの変化に依存
- ・地磁気極を移動させた場合と逆方向に変動した



1960年を基準とした月の影の東西方向の移動率

東西方向

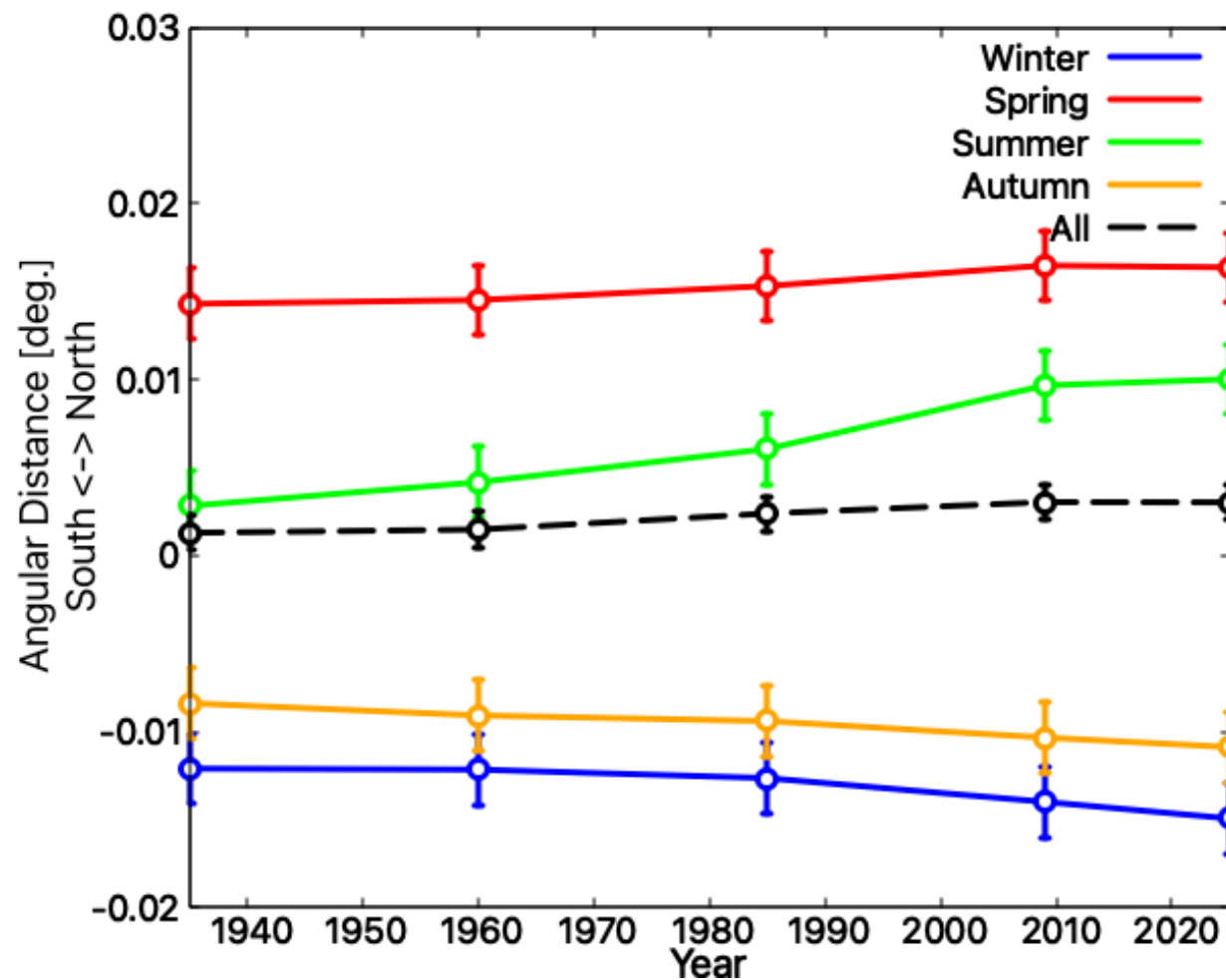
- ・1960年から65年間の移動率が大きいのは夏と冬
夏:6% 冬7.5%
- ・地磁気変動を推定するためには移動率が大きい夏と冬に着目すると良い
- ・実験装置のキャリブレーションは移動率が小さい春と秋の方が精度が良い



月の影のピーク比較

	東西方向[deg.]	南北方向[deg.]
チベットデータ	西に0.2	北に 0.008 ± 0.011
平均	西に 0.181 ± 0.001	北に 0.003 ± 0.001
春	西に 0.185 ± 0.001	北に 0.016 ± 0.001
夏	西に 0.171 ± 0.001	北に 0.009 ± 0.001
秋	西に 0.190 ± 0.001	南に 0.008 ± 0.001
冬	西に 0.194 ± 0.001	南に 0.014 ± 0.001

南北方向の月の影



太陽黒点数との比較

- ・太陽黒点数は11年周期で増減を繰り返す
- ・夏の月の影は似たような分布になった
→年毎の太陽風のデータも使って
シミュレーションをする必要がある

