

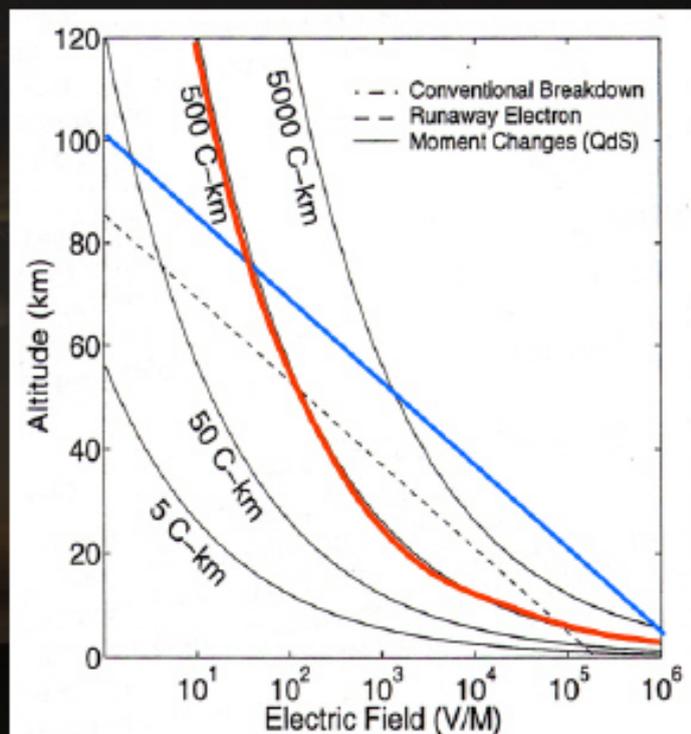
スプライトの発生メカニズム

準静電場モデル [Pasko et al., 1997]
(Quasi-Electrostatic model)

“準” : $T_E > \tau = \epsilon_0 / \sigma$

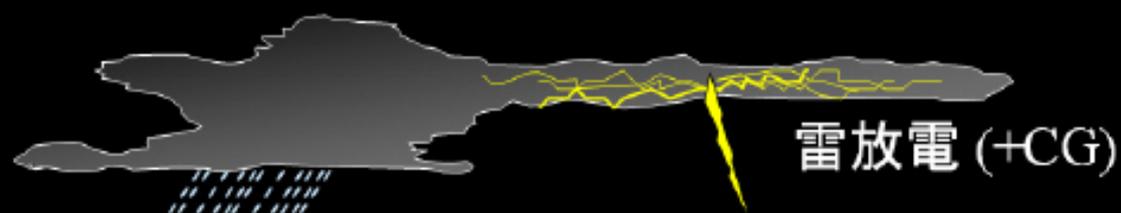
- QE 電場による絶縁破壊
電子が雪崩的に増殖
↓
大気衝突
- CGの電荷モーメント (Qdl)
> 1000 C·km

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot dl}{r^3}$$

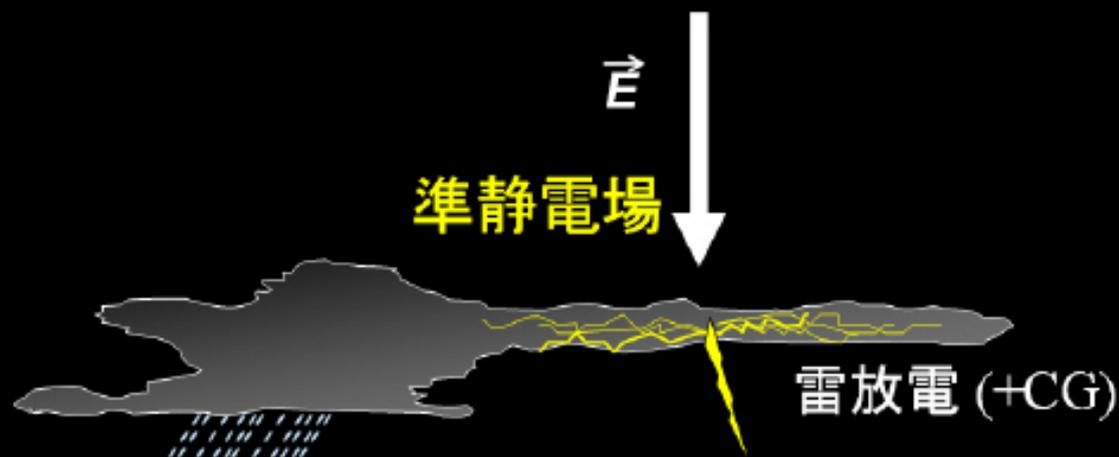


Hu et al. [1999]

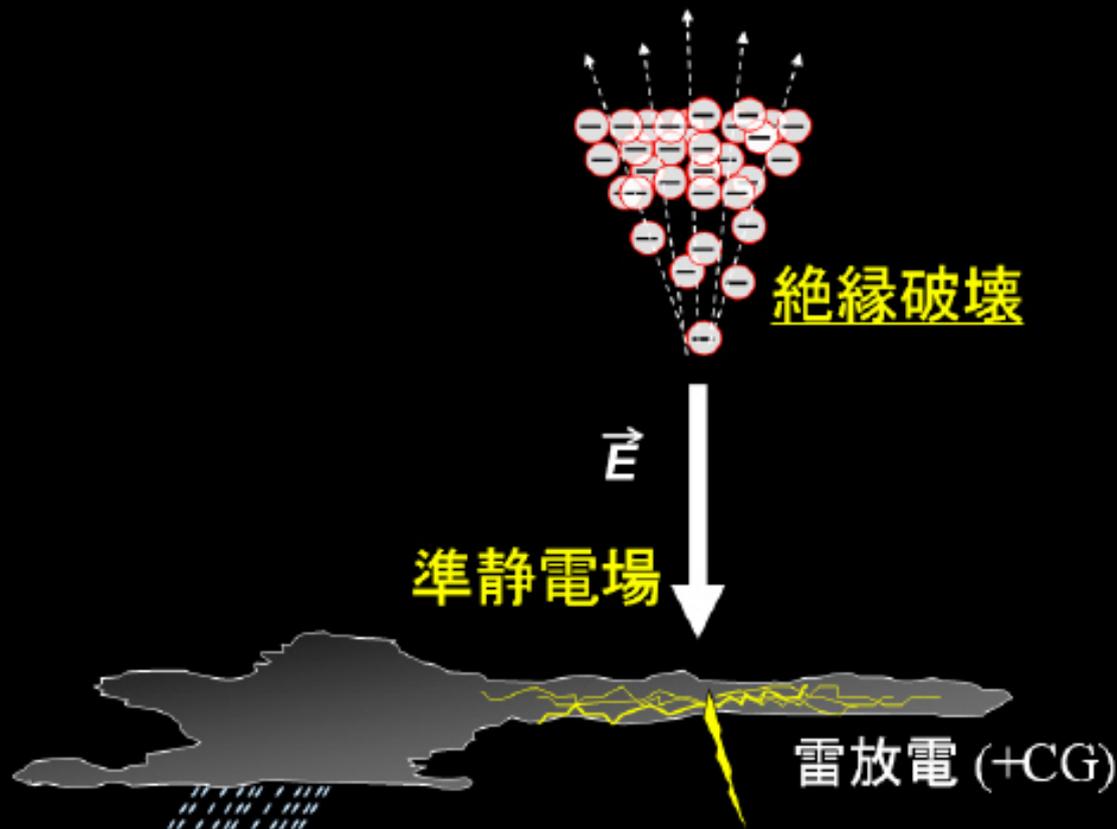
QEモデル



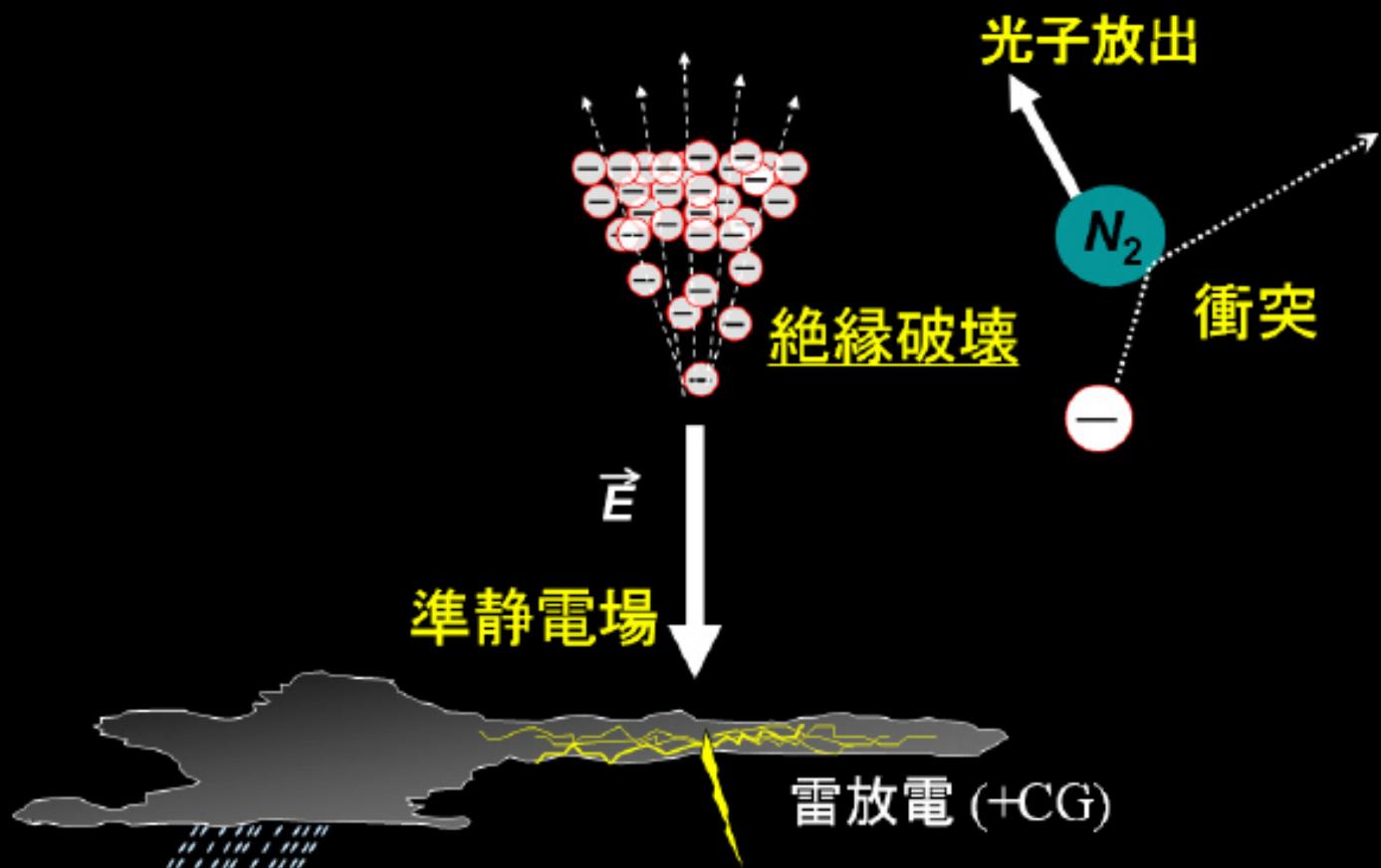
QEモデル



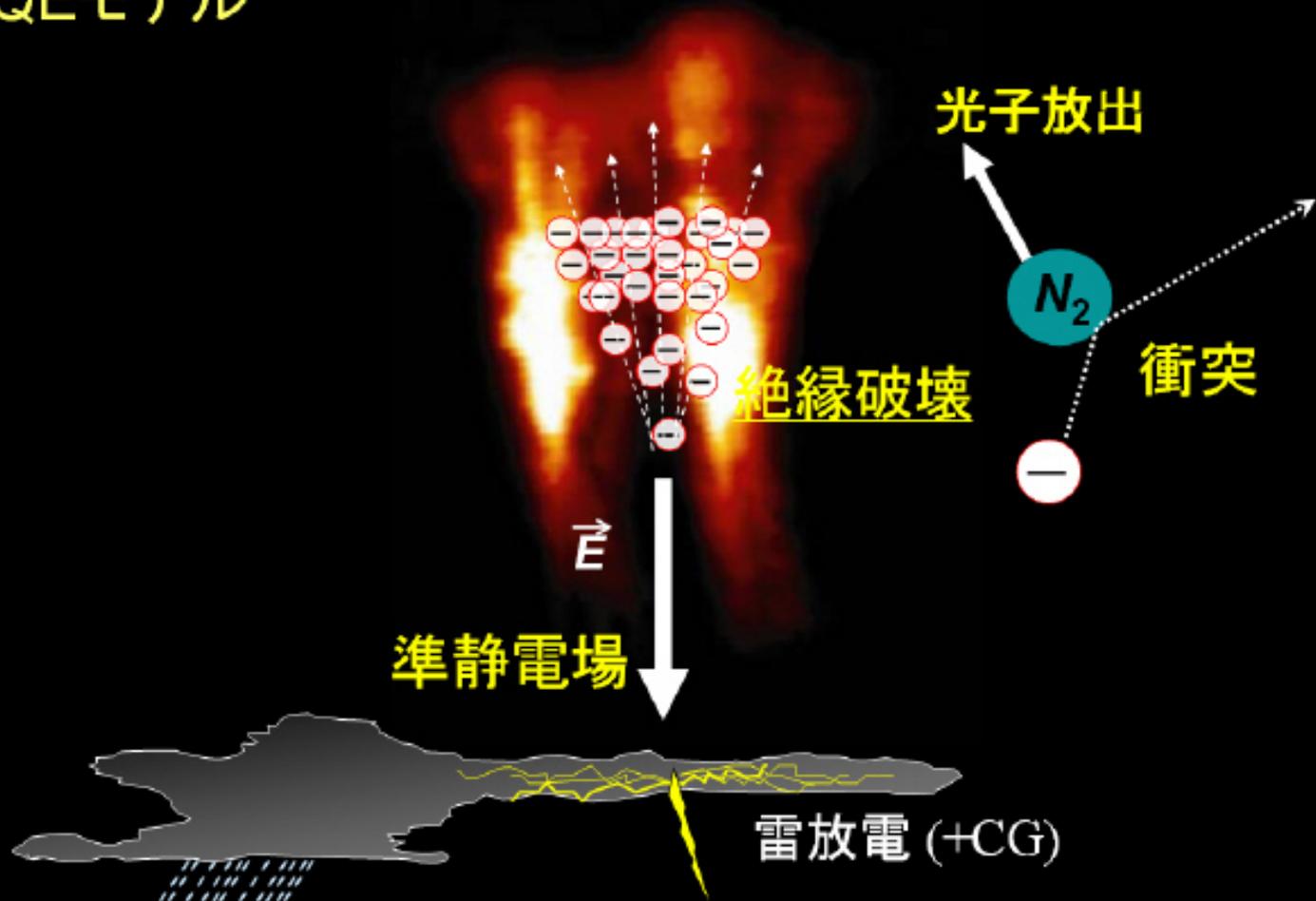
QEモデル



QEモデル



QEモデル



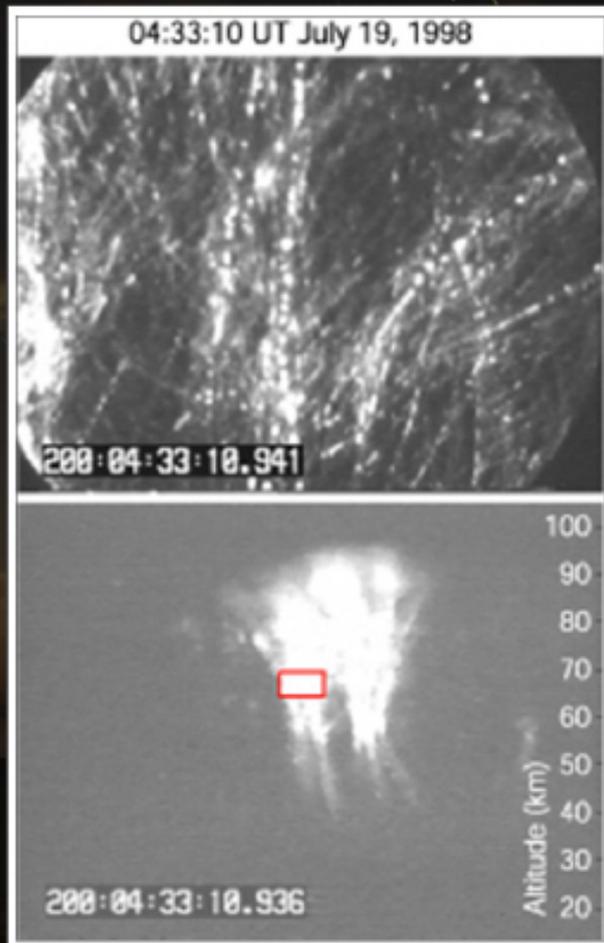
スプライトの微細構造

- **Narrow FOV CCD Camera**

Dobsonian Telescope (F=4.5)
FOV = 0.7° (v) \times 0.92° (h)
S-VHS Video Recording

- **Wide FOV CCD Camera**

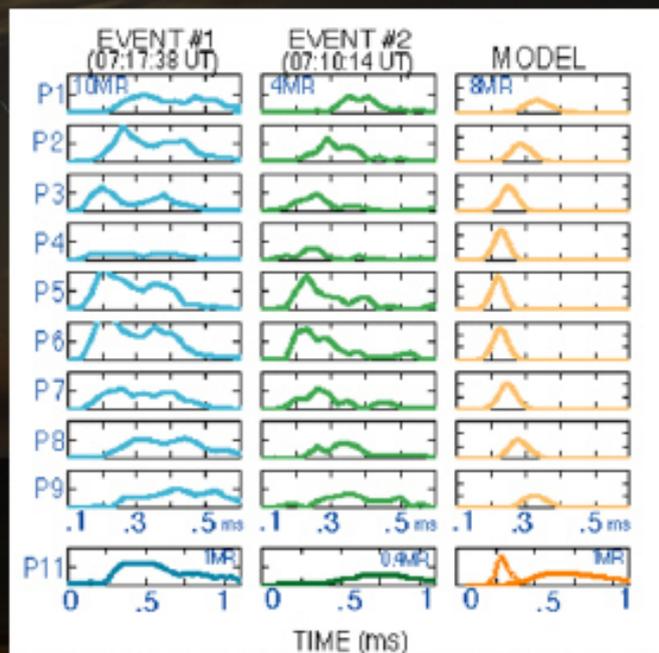
f=50 mm, F=1.4
FOV = 9° (v) \times 12° (h)
S-VHS Video Recording



エルブス



- ・雷放電の電磁パルス EMP (ElectroMagnetic Pulse)による電子加熱
- ・高度約90 km
- ・水平方向の伝搬速度 $V \approx 3c$

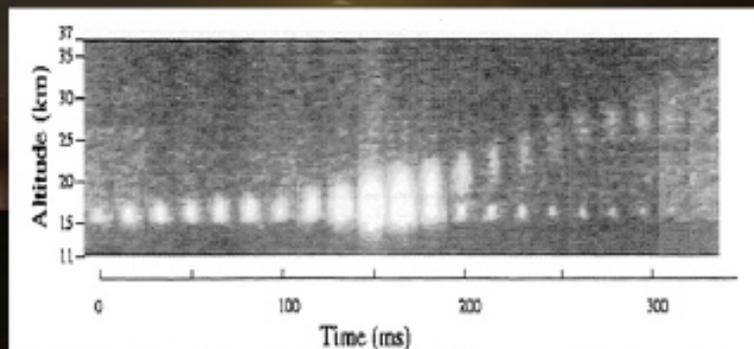


ブルージェット



成層圏での発光現象

- ・発光時間: ~ 300 ms
- ・発光高度: 雲頂 - 高度40 km
(成層圏)
- ・伝搬速度: ~ 100 km/s

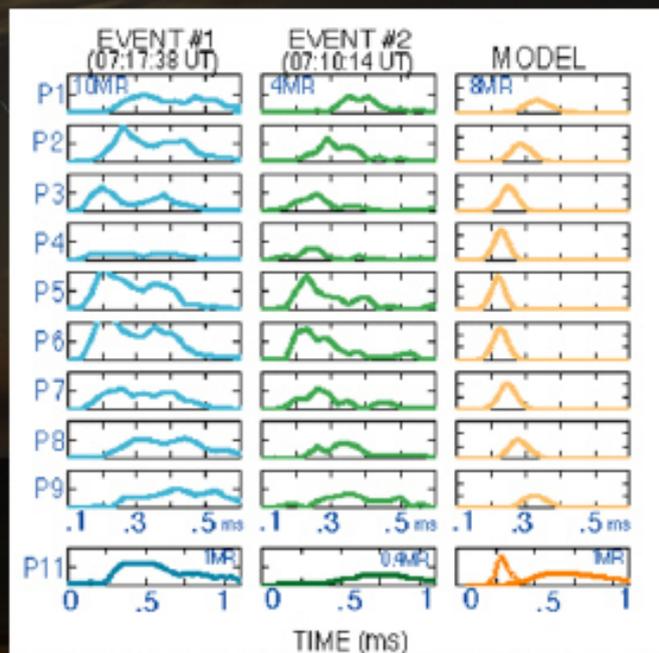


Wescott et al. [2001]

エルブス



- ・雷放電の電磁パルス EMP (ElectroMagnetic Pulse)による電子加熱
- ・高度約90 km
- ・水平方向の伝搬速度 $V \approx 3c$

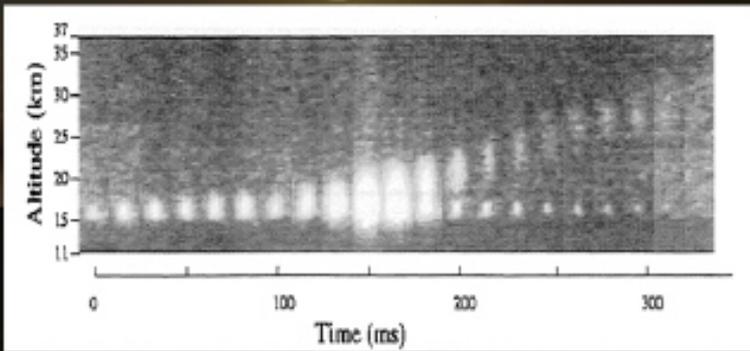


ブルージェット



成層圏での発光現象

- ・発光時間: ~ 300 ms
- ・発光高度: 雲頂 - 高度40 km
(成層圏)
- ・伝搬速度: ~ 100 km/s



Wescott et al. [2001]

ブルージェット

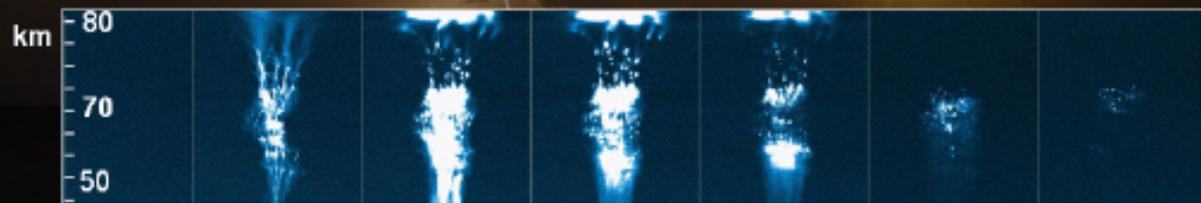
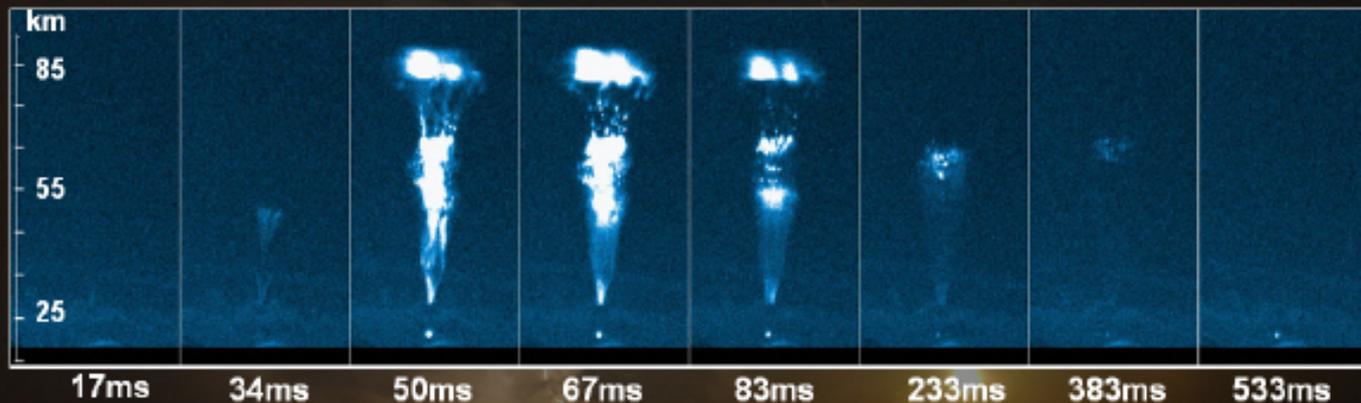
発光の時定数: 数100 ms

QuickTimey C²
èLiÉÉvÉçÉOÉaÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNÉ'ÉÉÇ¼ãÇÇÉÇžÇ¼Ç... ÇÖiKóvÇ-ÇIÄB

巨大ジェット

- ・ Gigantic Jetを引き起こすCGが検知されていない
- ・ 雷雲上端 - 電離層まで繋がった放電発光現象

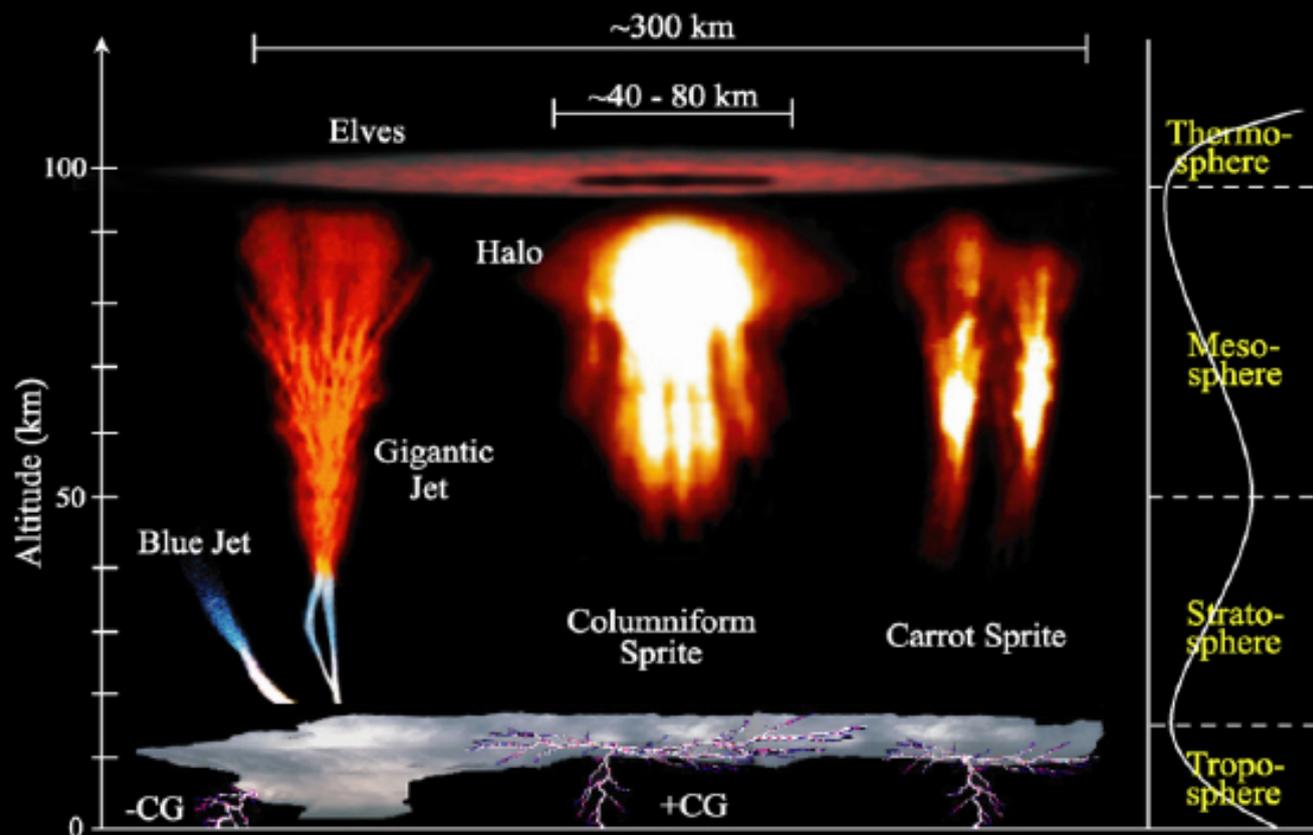
20mm camera



50mm camera

⇒ Size of the beads: 0.3~1.6 km

高高度放電発光現象(TLEs) (Transient Luminous Events)

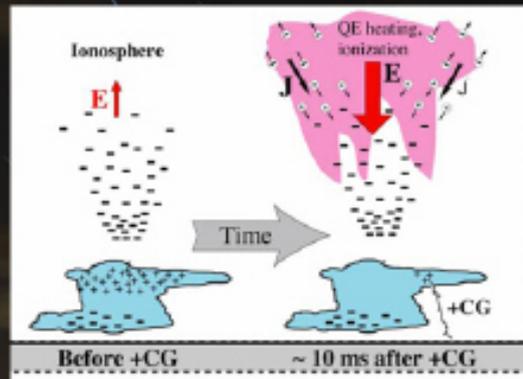


QE Model

QE Modelは最も支持されているスプライト発生モデル

しかし...

以下の観測事実を説明できない

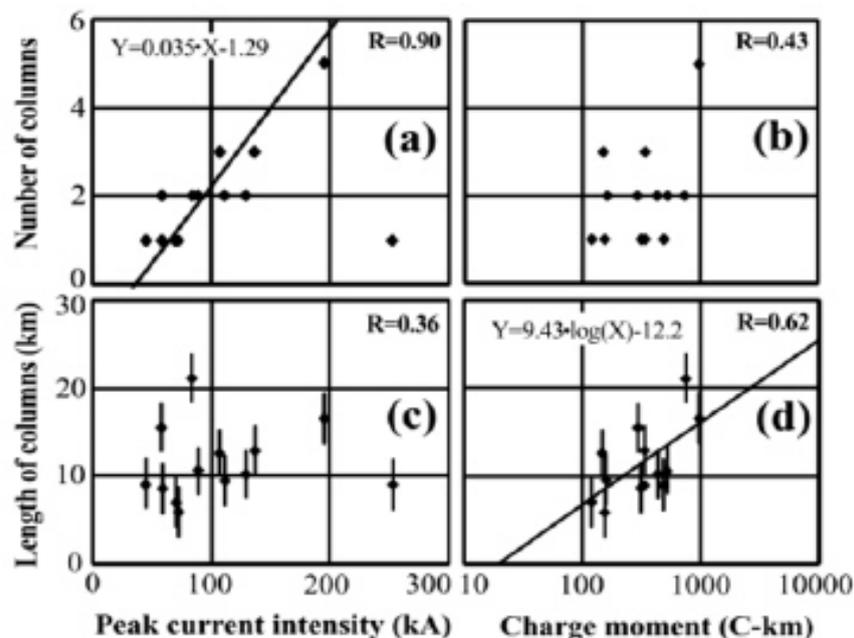


- (a) 電荷モーメントが数 $100\text{C}\cdot\text{km}$ と小さくてもスプライトが発生する点
- (b) スプライトが必ずしもCGの直上で発生せず最大 50 km の位置ずれが起こる点
- (c) CGとスプライトには数 ms から数 100ms の遅延時間が存在する点
- (d) カラム状やキャロット状など異なった発生形態が生じる点
- (e) 同時に複数のカラム状スプライトが発生する点

スプライト発生条件

何がスプライトの発生条件を決めているのか？

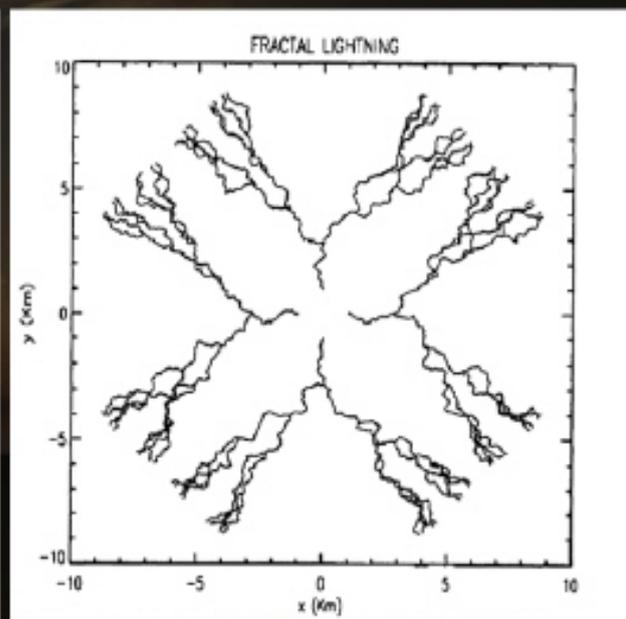
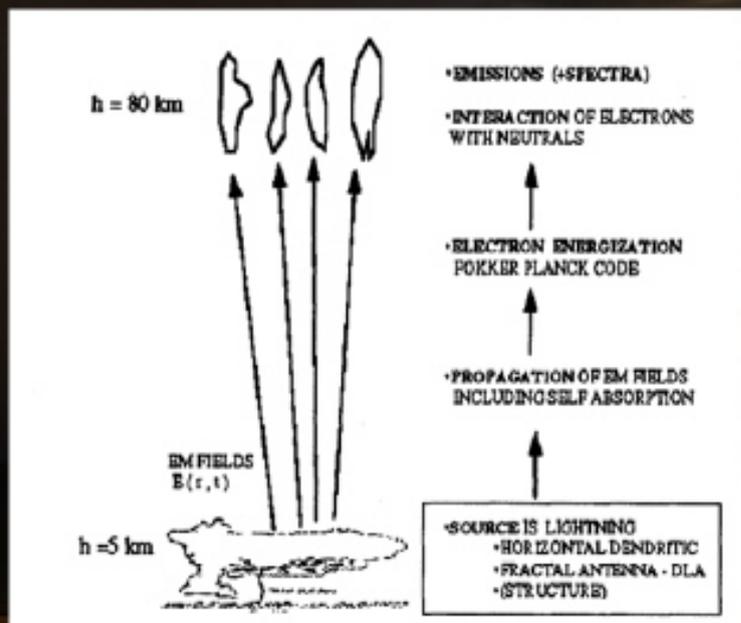
EMPが"種"をつくる？



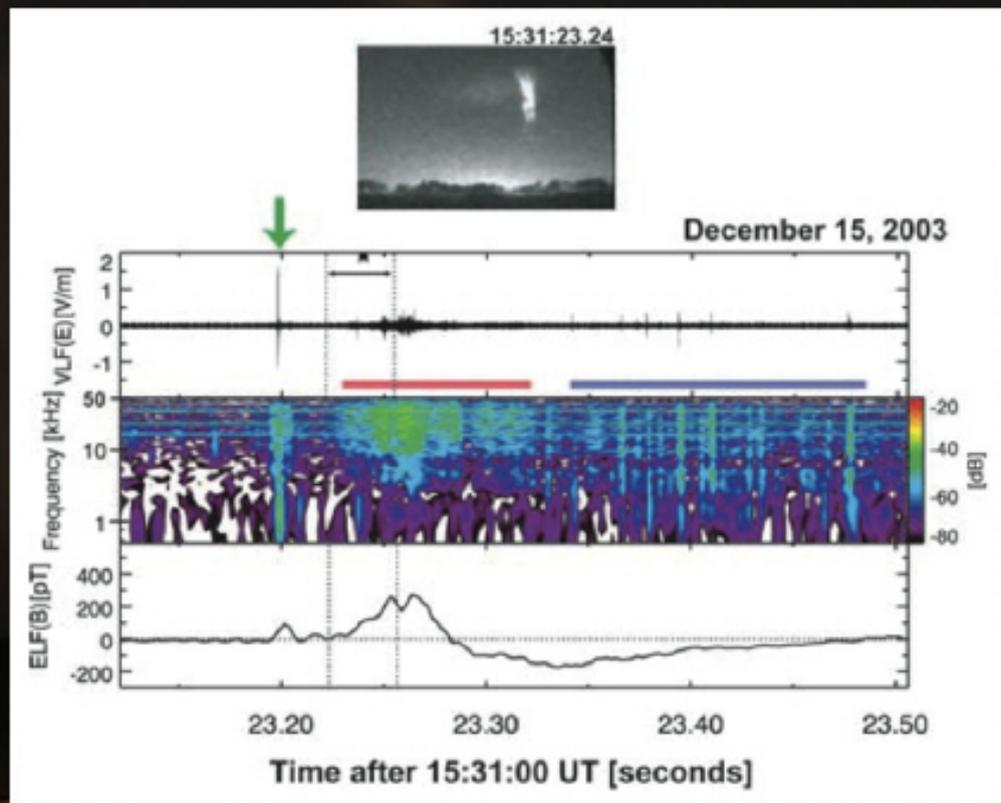
スプライト発生条件

何がスプライトの発生条件を決めているのか？

雷放電の水平電流の効果



スプライト発生条件



Space Shuttleからの光学観測

宇宙空間からSprite観測を行うことの意義

- > 広い範囲を一度に観測可能
(地理・気候の制約から解放)
- > 全球発生頻度分布
- > スプライトの青色発光を捉えられる
(電子エネルギーの推定)



MEIDEX (Mediterranean Israeli Dust Experiment)

> 2003年1月 Space Shuttle Columbia STS-107

- ・ Dust 流出・輸送メカニズム解明のための観測

Sprite 観測

Xybion II-CCD Camera (486 × 704 pixels)

FOV = 10.76° (v) × 14.04° (h)

Video Frame Rate

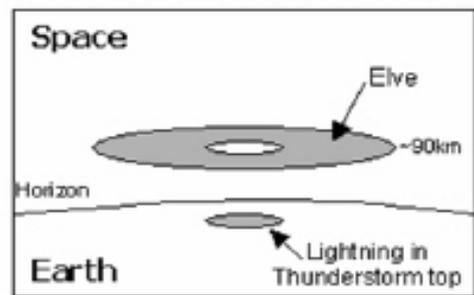
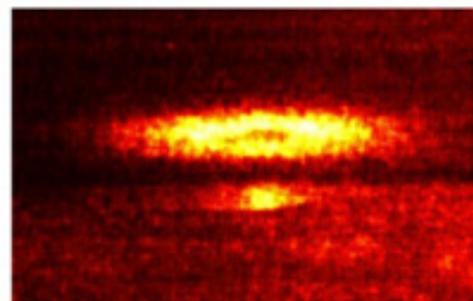
Filter: 340, 380, 470, 555, 665, 860 nm



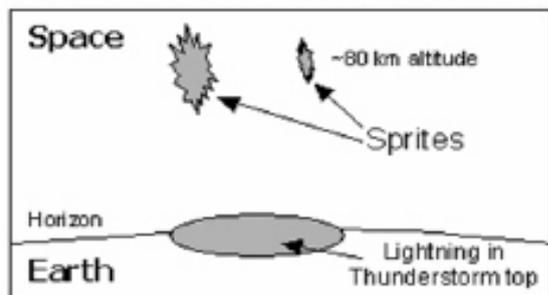
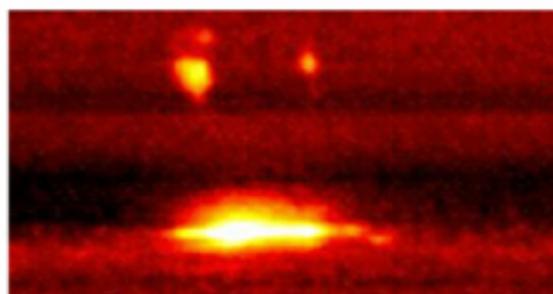
Space Shuttleからの光学観測

Color Enhanced Images

Elve over South Pacific



Sprites over SE Australia



Space Shuttleからの光学観測

宇宙空間からSprite観測を行うことの意義

- > 広い範囲を一度に観測可能
(地理・気候の制約から解放)
- > 全球発生頻度分布
- > スプライトの青色発光を捉えられる
(電子エネルギーの推定)



MEIDEX (Mediterranean Israeli Dust Experiment)

> 2003年1月 Space Shuttle Columbia STS-107

- ・ Dust 流出・輸送メカニズム解明のための観測

Sprite 観測

Xybion II-CCD Camera (486 × 704 pixels)

FOV = 10.76° (v) × 14.04° (h)

Video Frame Rate

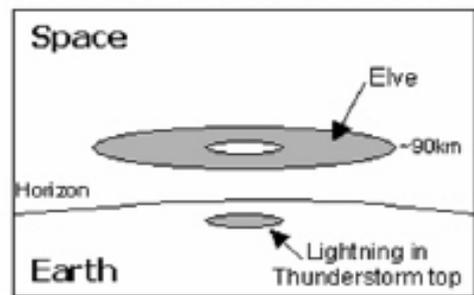
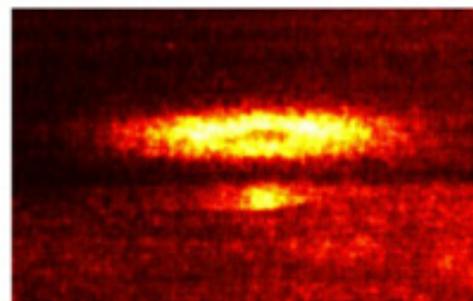
Filter: 340, 380, 470, 555, 665, 860 nm



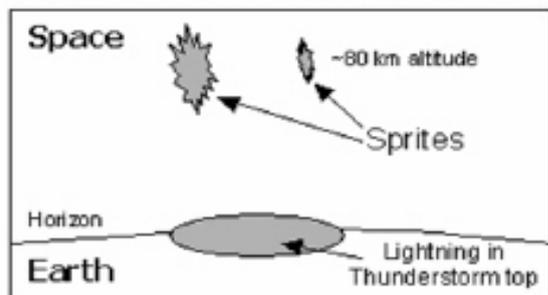
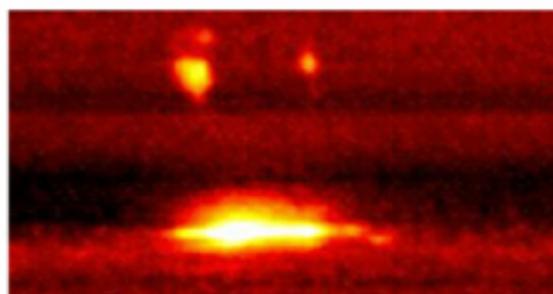
Space Shuttleからの光学観測

Color Enhanced Images

Elve over South Pacific



Sprites over SE Australia



ISSからの光学観測

Spriteの水平方向の空間構造を捉える

> 2001年10月

> LSO (Lightning and Sprite Observation)

Nadir Sprite 観測

Digital CCD Camera × 2 (512 × 512 pixels)

1) Filter : 756 - 766 nm

2) No Filter (visible)

FOV = $\sim 2^\circ$ × $\sim 2^\circ$

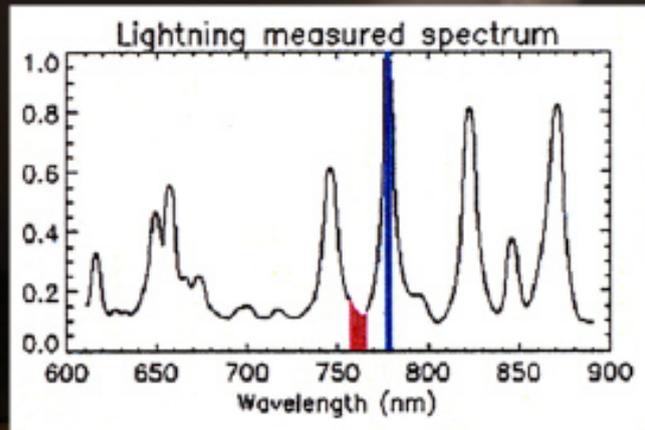


Fig 雷雲上空から観測したときの雷の発光スペクトル

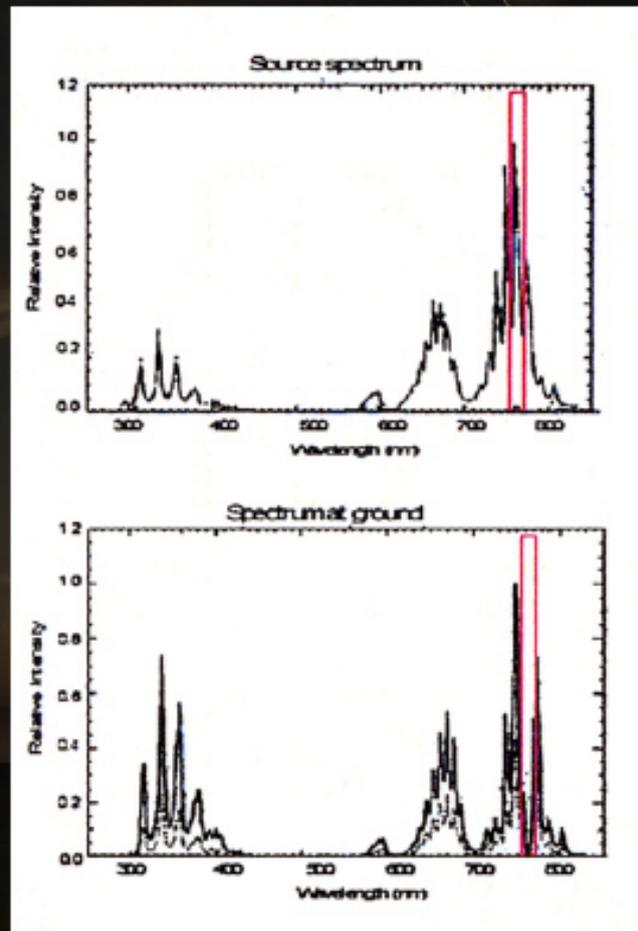
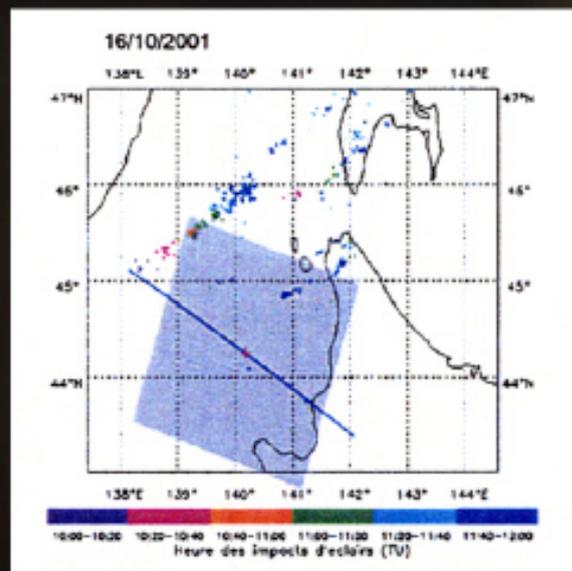


Fig (上) スプライトのモデル予測スペクトル。(下) 地上からのスプライト観測スペクトル。

ISSからの光学観測



推定されたSpriteの明るさ
> 125 kR

推定されたSpriteの明るさ
> 30 - 60 kR

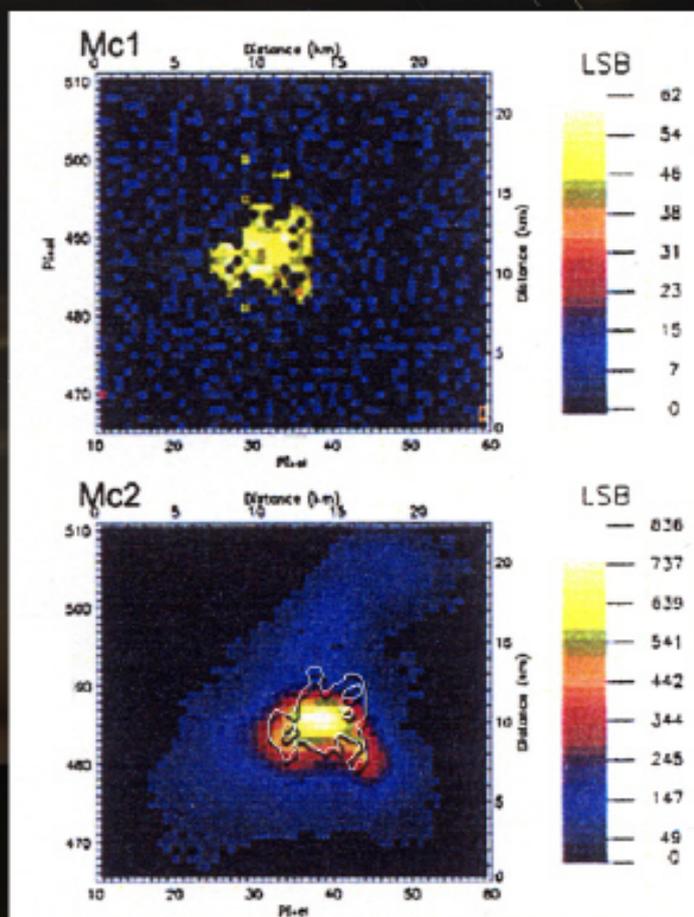


Fig. (上) Filter付きのCCD画像 (下) FilterなしのCCD画像.

TLEsの衛星観測

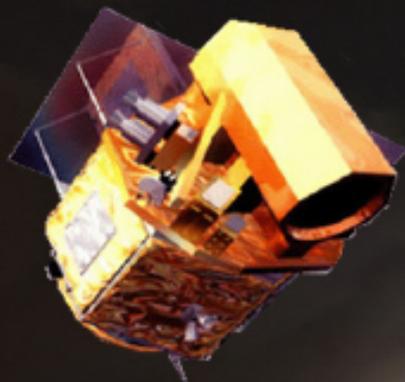


Fig. FORMOSAT-2 satellite.

FORMOSAT-2衛星 / ISUAL

TLEsの全球観測 → 発生頻度, 発生分布

Limb Observation !!

Sprite



Elves



Sprite
+
Elves

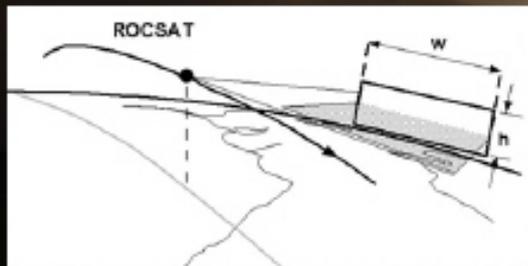
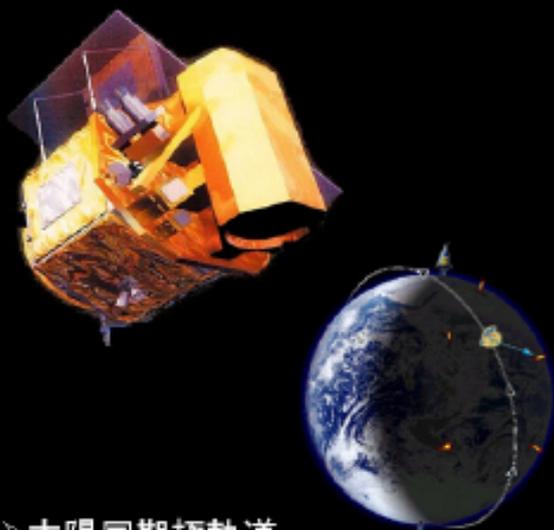


Fig. Observation geometry.

Figs. ISUAL/Imager data of sprite, elves and sprite/elves event. # 17

TLE観測衛星

FORMOSAT-2 衛星



- 太陽同期極軌道
(891 km, 9:30–21:30 LT、14 rev/day)
- 打上: 2004年5月20日
- 運用: 5年以上

ISUAL (Imager for Sprites and Upper Atmospheric Lightning)



Imager

- ・空間構造

Spectrophotometer (SP)

- ・6波長
- ・時間変化



Array photometer (AP)

- ・2波長
- ・時空間変化

ISUALの観測手法

観測器の視野はリム方向を指向
→ TLEsの高度方向の特徴を捉える

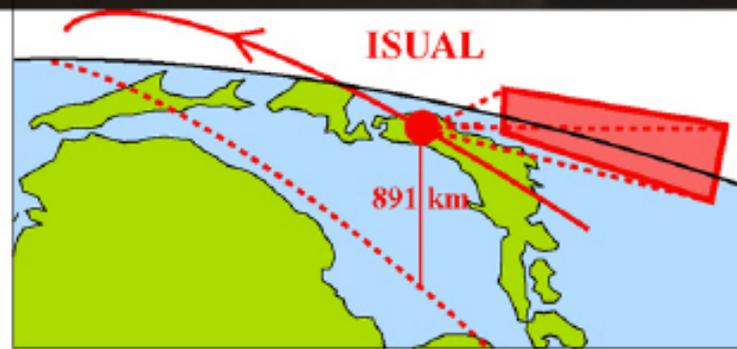


Fig. 観測ジオメトリ

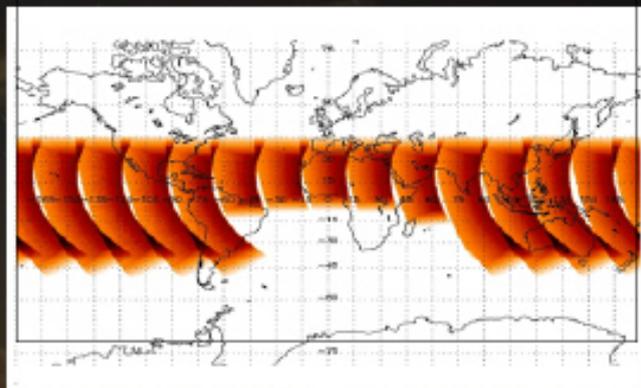


Fig. 観測視野の全球マップ

表. 観測のまとめ

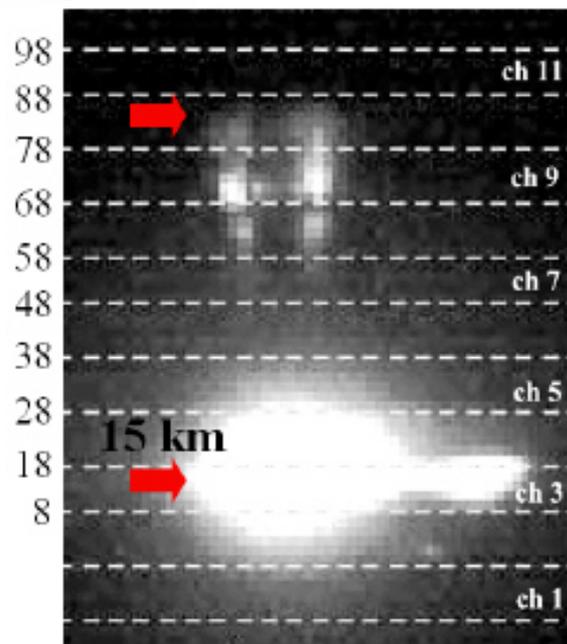
期間	2004/07/04– 2006年/06/25
観測日数	530 日間
スプライト	482 イベント

Sprite Halo とStreamerの発生条件

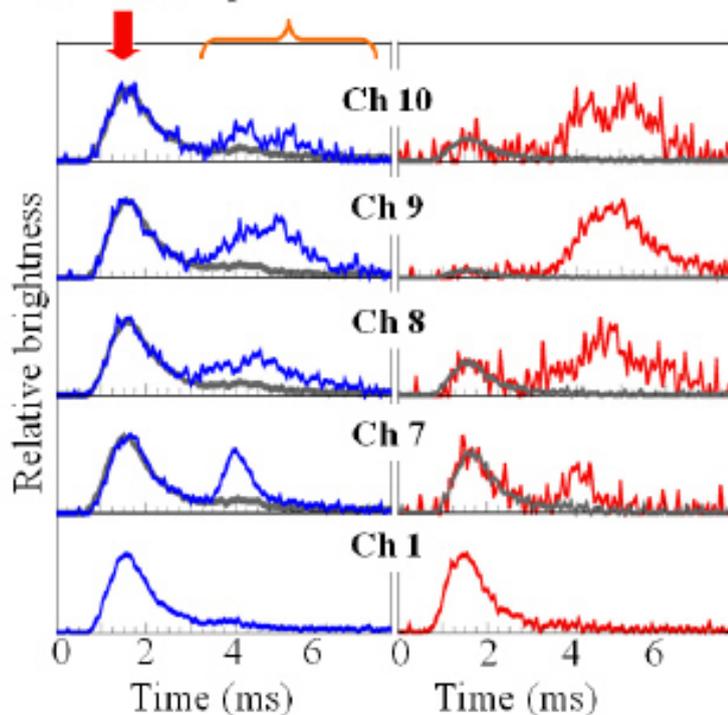
What determine halo or streamers?

[Adachi, PhD thesis, 2007]

Height (km)



Lightning Sprites



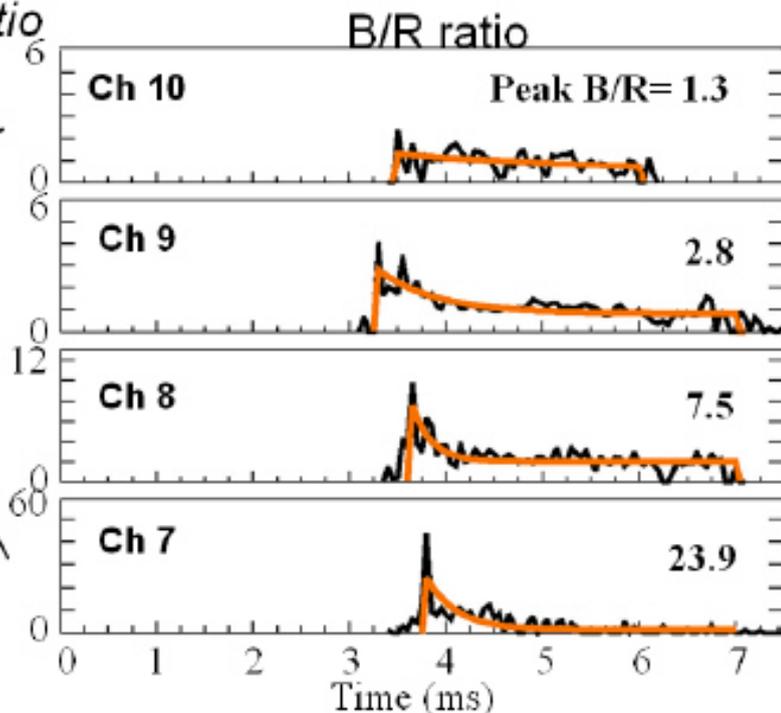
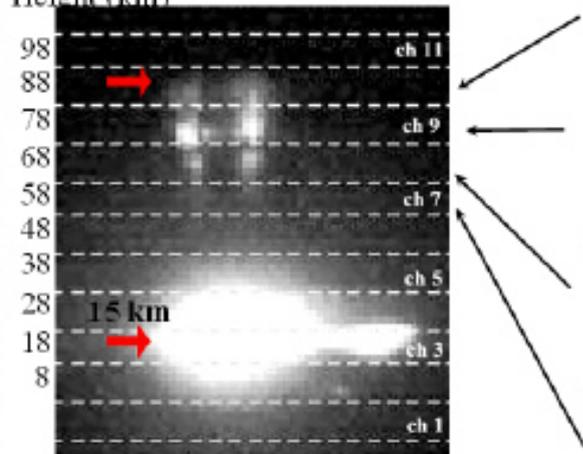
Streamers observed at 11:19:36 (UT) 2004/9/13 by ISUAL

Sprite Halo とStreamerの発生条件

[Adachi, PhD thesis, 2007]

Estimation of Blue/Red Ratio

Height (km)



Intensity ratio of Blue/Red (Black) and fitted exponential function (orange).

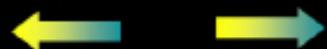
$$(B/R \text{ ratio}) \rightarrow (\text{Electron energy}) \rightarrow (\text{Electric field}) \rightarrow (E/N)$$

Sprite Halo とStreamerの発生条件

Streamer: 20 events
 Halo: 3 events

[Adachi, PhD thesis, 2007]

attachment ionization



Error ± 3 Td @ 85 km
 ± 40 Td @ 60 km

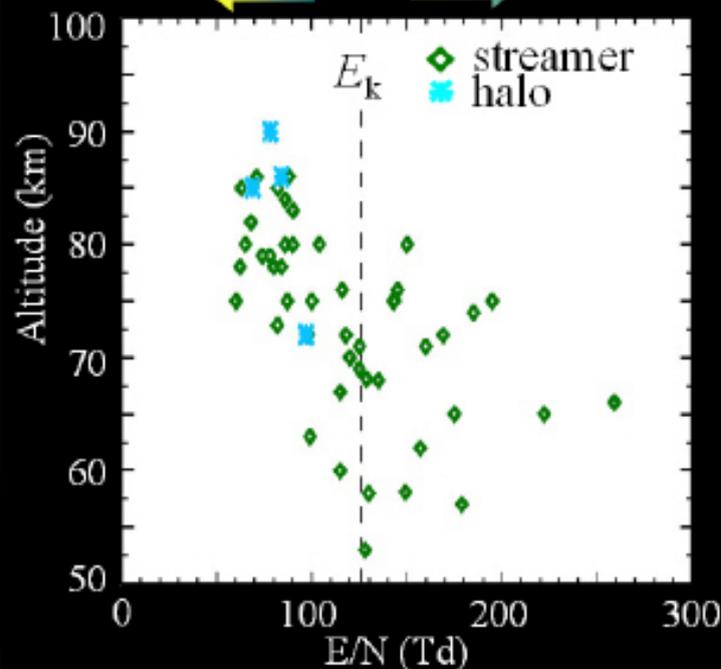


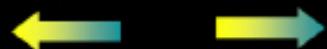
Fig. Altitude profile of E/N.

Sprite Halo とStreamerの発生条件

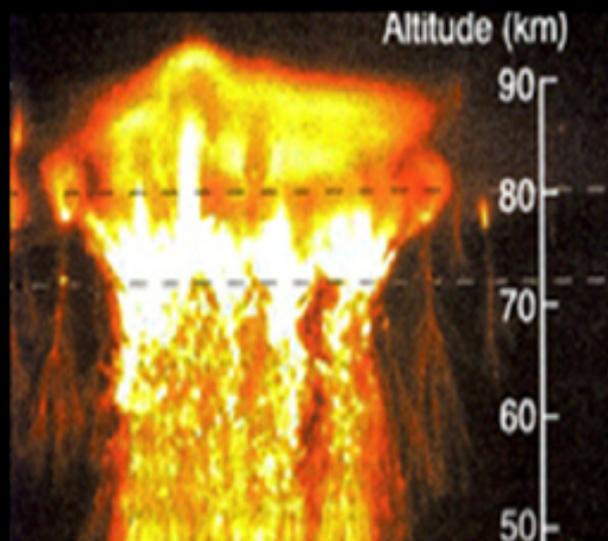
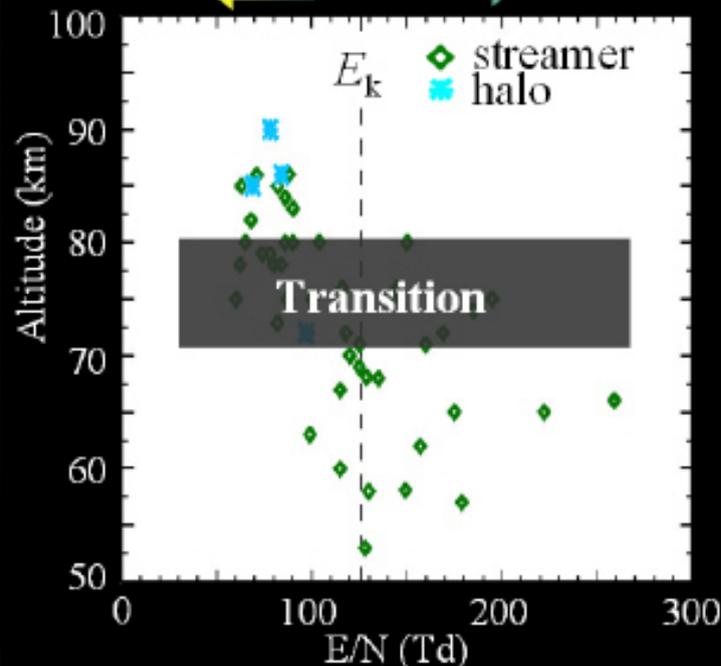
Streamer: 20 events
 Halo: 3 events

[Adachi, PhD thesis, 2007]

attachment ionization



Error ± 3 Td @ 85 km
 ± 40 Td @ 60 km

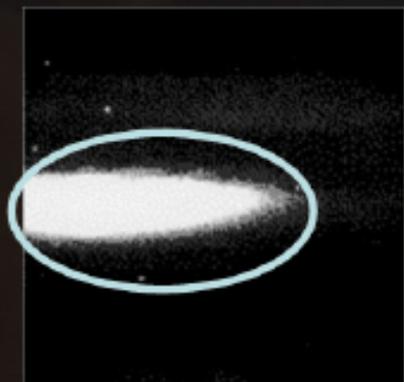


[Pasko and Stenbaek-Nielsen, 2001]

Fig. Altitude profile of E/N.

発光内部の電気力学過程

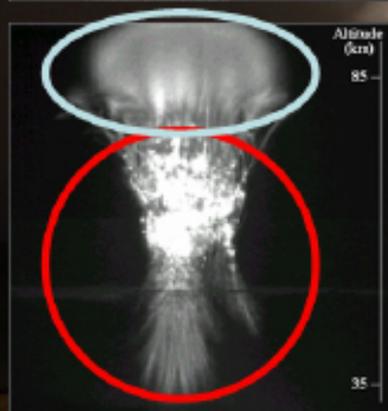
[Adachi, PhD thesis, 2007]



Diffuse領域

$$E = 0.6-0.8 E_k$$

- 電子付着 > イオン化
- ambientな電子の衝突による窒素分子の励起



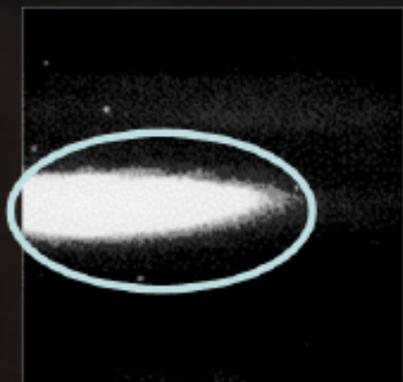
Structured領域

$$E = 1-2 E_k$$

- 電子付着 < イオン化
- 電子なだれ⇒ストリーマ放電

発光内部の電気力学過程

[Adachi, PhD thesis, 2007]



Diffuse領域

$$E = 0.6-0.8 E_k$$

- 電子付着 > イオン化
- ambientな電子の衝突による窒素分子の励起

絶縁破壊が発生していない!!



Structured領域

$$E = 1-2 E_k$$

- 電子付着 < イオン化
- 電子なだれ⇒ストリーマ放電

TLEsの地上・宇宙からの観測

- ISUAL/FORMOSAT-2衛星によるスプライトのリム観測から、高度方向の発生形態の違いを定量的に議論できるようになった
- QEモデルは最も支持された発生メカニズムだが、多くの観測事実を説明できない
- 雷放電水平電流が発生条件を決めている可能性

Chemical Model

Photochemical equations are solved only for the species shown in Figure 5.

- We referenced midnight data set, given by a 1-D diurnal model (*Ogawa and Shimazaki [1975]*), as values in photochemical equilibrium state.

- 20 positive cluster ions are included.

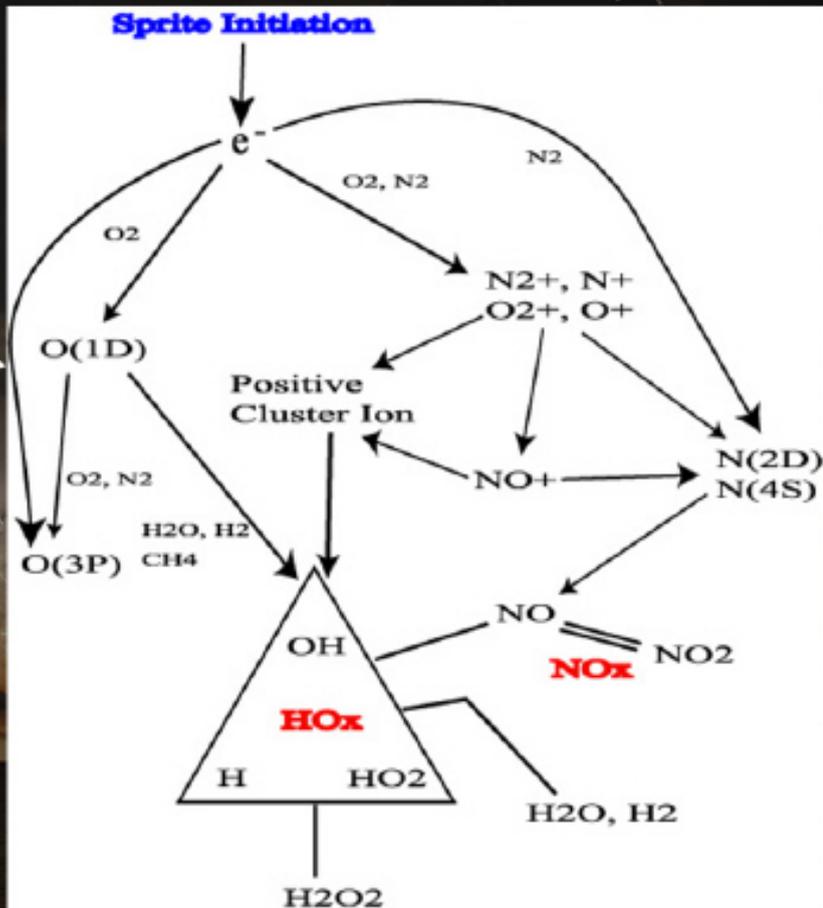


Figure 5. Chemical reactions which are possibly enhanced by the occurrence of sprites.

Chemical Model

Photochemical equations are solved only for the species shown in Figure 5.

- We referenced midnight data set, given by a 1-D diurnal model (*Ogawa and Shimazaki [1975]*), as values in photochemical equilibrium state.

- 20 positive cluster ions are included.

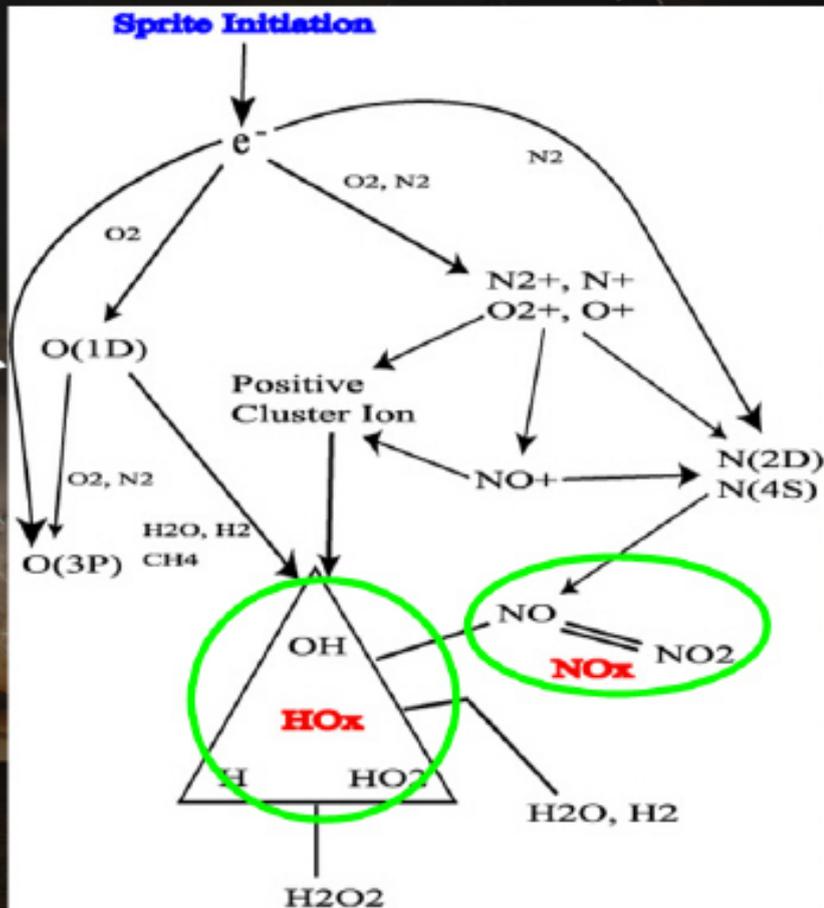
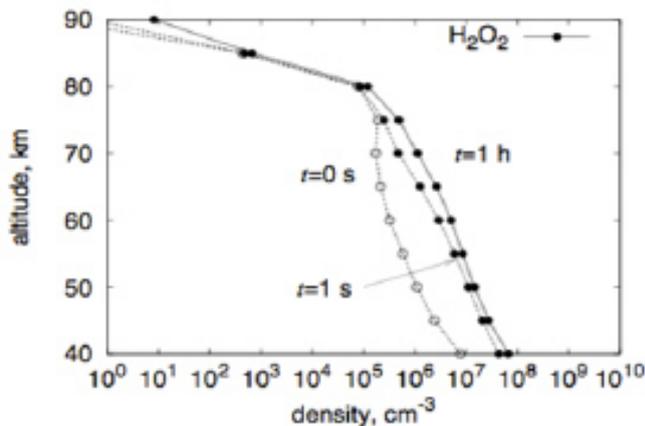
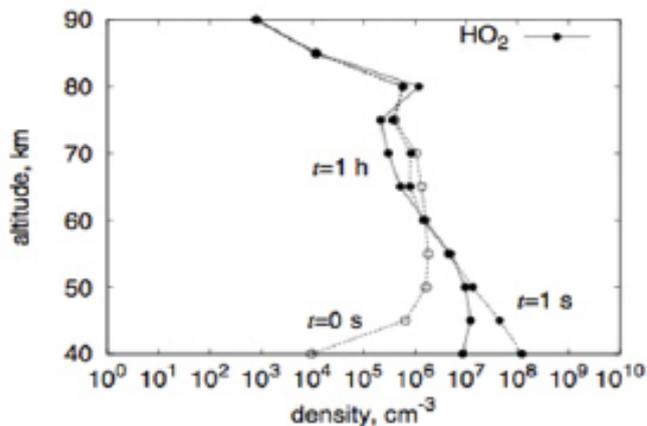
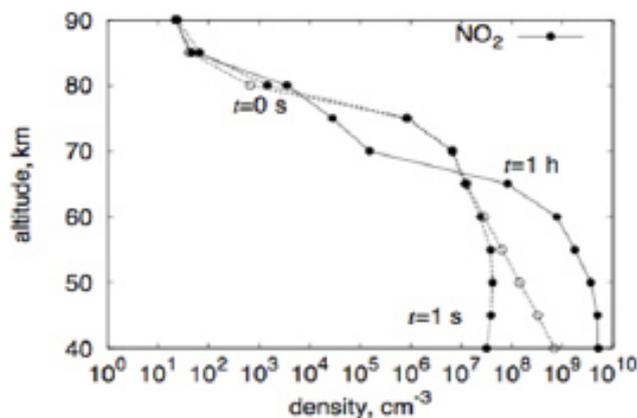
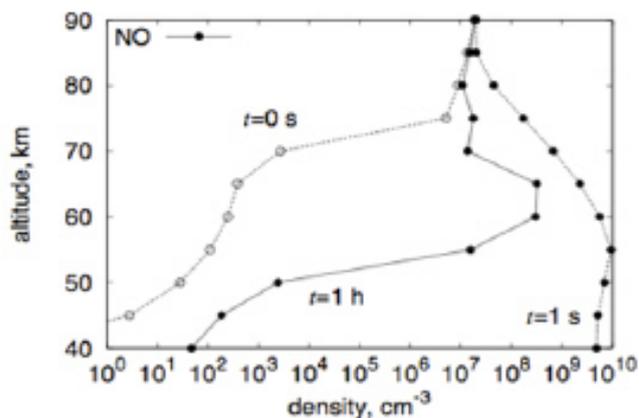


Figure 5. Chemical reactions which are possibly enhanced by the occurrence of sprites.

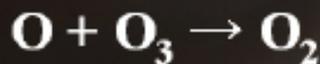
スプライトによるNO_x, HO_x生成

[Hiraki et al, 2008]



O₃化学への影響

Catalytic reactions to decrease the ozone density are possibly excited, e. g. the following reactions.



Ozone depletion ??

Ozone production.



This reaction is also enhanced!!

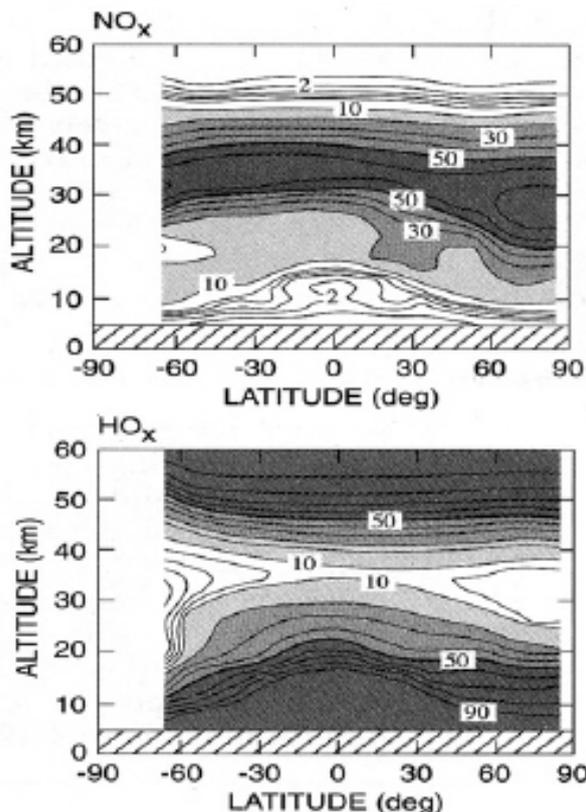
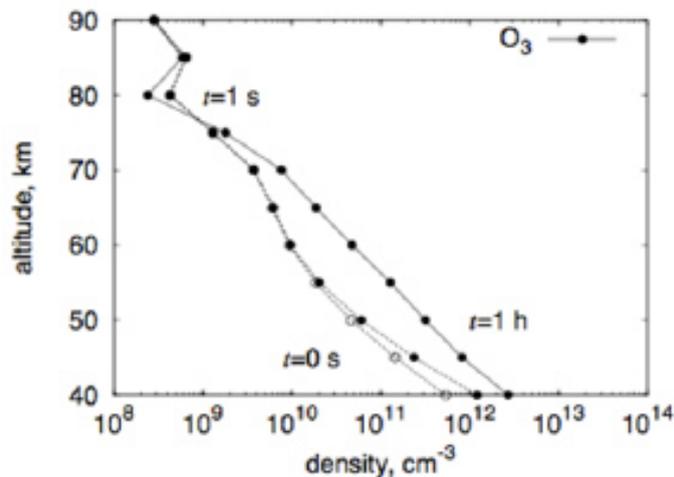
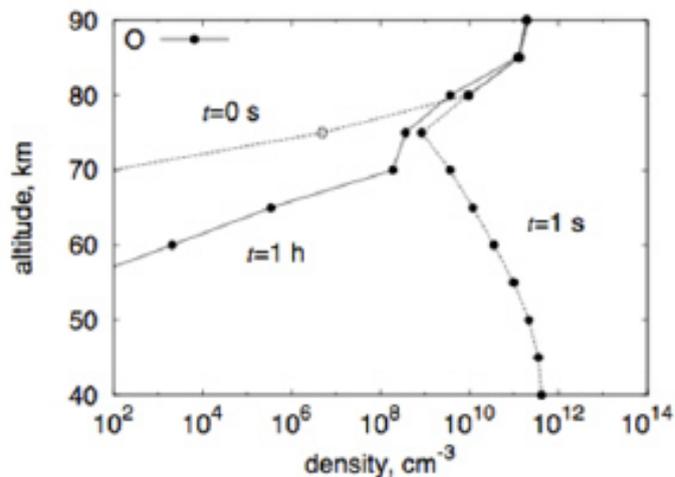


Figure Relative contribution of some chemical families to the destruction rate of odd oxygen. (G. Brasseur, [1999])

O₃化学への影響

[Hiraki et al, 2008]



スプライトによってO₃は増えているのか？

雷放電の地上電磁波観測

- スプライトやエルブスなどの発生条件を特定するためには、地上からの光学観測データのみならず、雷放電の発生形態を知ることが重要

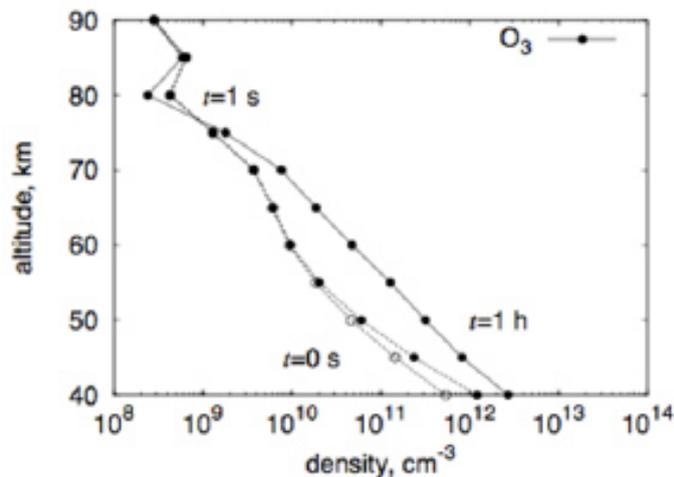
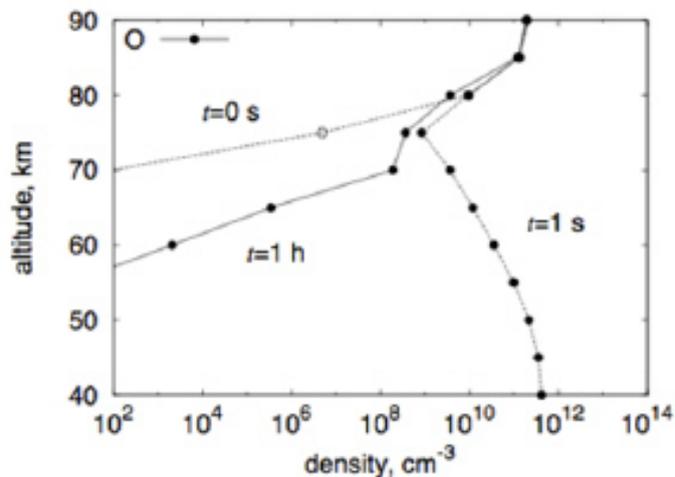
(位置、時間、極性、ピーク電流値、放電電荷量)

- TLEs雷放電から放射されるELF/MLF波動観測は、時間・場所を選ばずに観測を行うことができる

- 特に、ELF波動は雷放電の放電エネルギーを推定することが可能である

O₃化学への影響

[Hiraki et al, 2008]



スプライトによってO₃は増えているのか？

雷放電の地上電磁波観測

- スプライトやエルブスなどの発生条件を特定するためには、地上からの光学観測データのみならず、雷放電の発生形態を知ることが重要

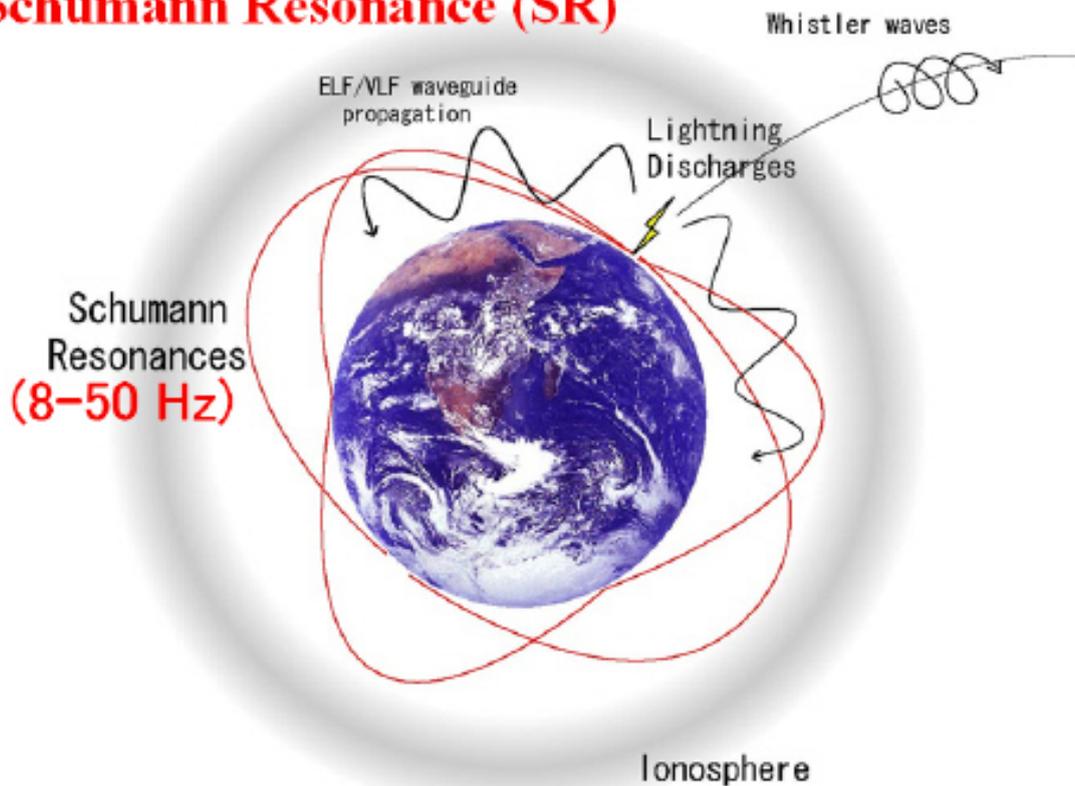
(位置、時間、極性、ピーク電流値、放電電荷量)

- TLEs雷放電から放射されるELF/MLF波動観測は、時間・場所を選ばずに観測を行うことができる

- 特に、ELF波動は雷放電の放電エネルギーを推定することが可能である

雷の放射する電磁波

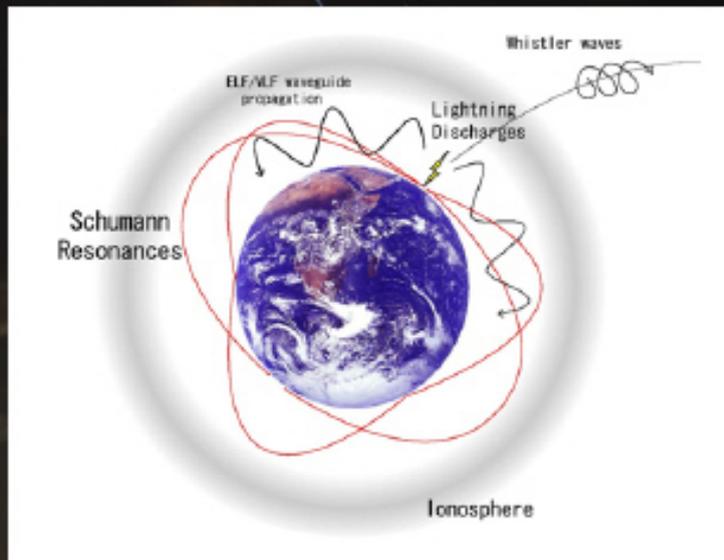
Schumann Resonance (SR)



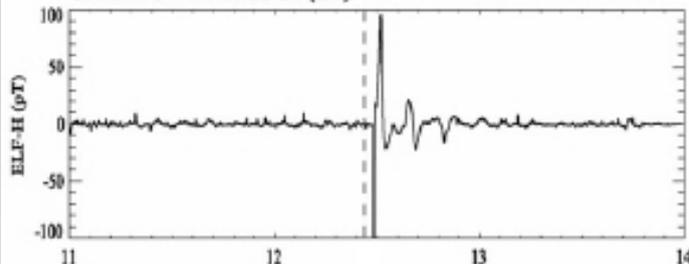
・シューマン共鳴 (SR)

- * ELF range (8-50 Hz)
- * 導波管伝搬 (D層-地表)
- * 低減衰率 (< -1 dB/Mm)

LLTV Data YRFS, Colorado
2000/07/04 04:04:12.434 (UT)



ELF Data West Ongul, Syowa
2000/07/04 04:04:11-14 (UT)



・トランジェントSR波動 (Q-burst)

- * 放電エネルギーの大きな雷放電
- * スプライト、エルブスなどに相関

[Bocippio et al., 1995]

・全球的雷・スプライトの監視

Search Coil Magnetometers

(0.3 mV/pT @1-400 Hz)



ELF Main Amplifier

(Gain/6-66 dB, Notch Fil./50,100,150 Hz)



Data Recording System

(400 Hzサンプリング, 16-bit A/D)





• 1-100 Hz ELF波動観測網

- * search coil 磁力計 (NS, EW)
- * アンプ (6-66 dB)
- * データ記録計 (16bit, $f_s=400\text{Hz}$)

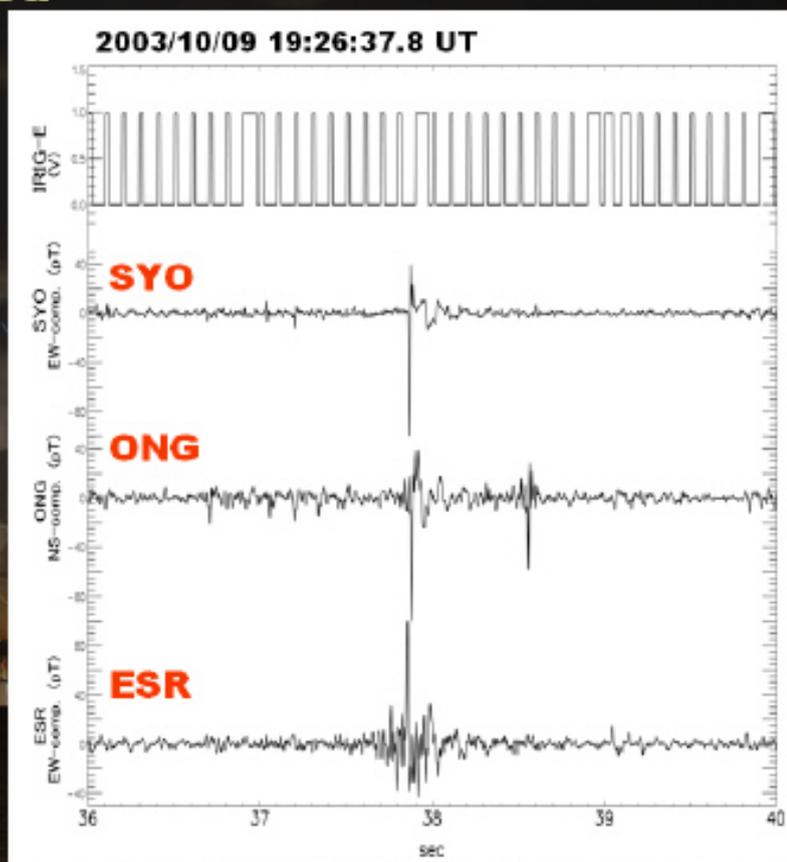


Syowa	(SYO)	(39.5°E, 69.0°S)	Feb., 2000 –
Onagawa	(ONG)	(141.5°E, 38.4°N)	June, 2001 –
Kiruna	(ESR)	(21.1°E, 67.9°N)	Aug., 2003 –
Santa Cruz	(SCZ)	(21.1°E, 67.9°N)	Mar., 2006 –

CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

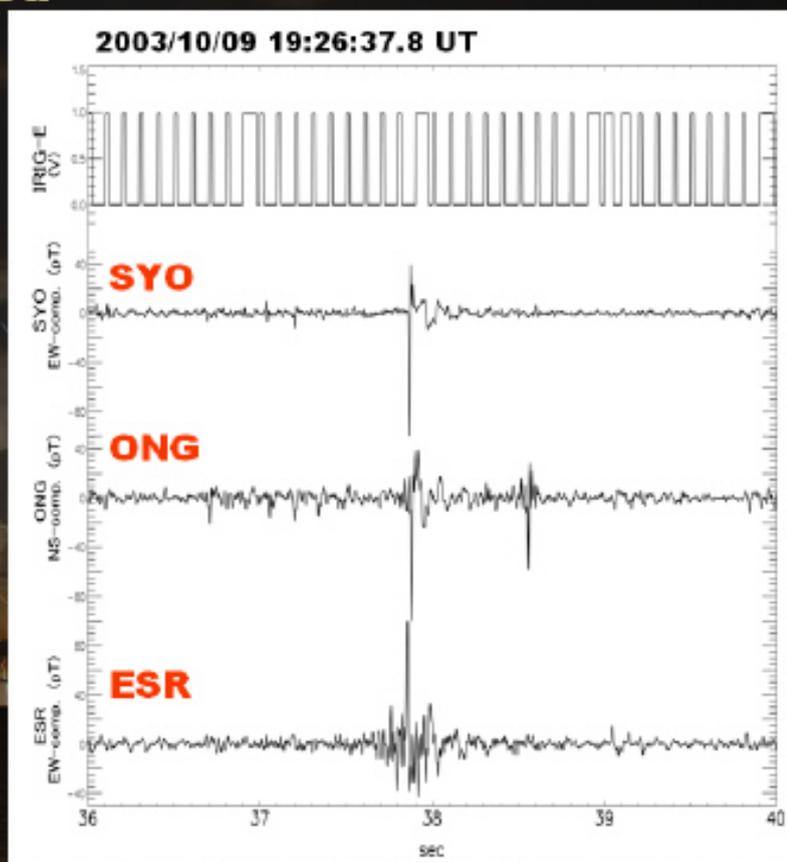
イベント選出
(閾値 > 40 pT)



CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)



CG Triangulation Method

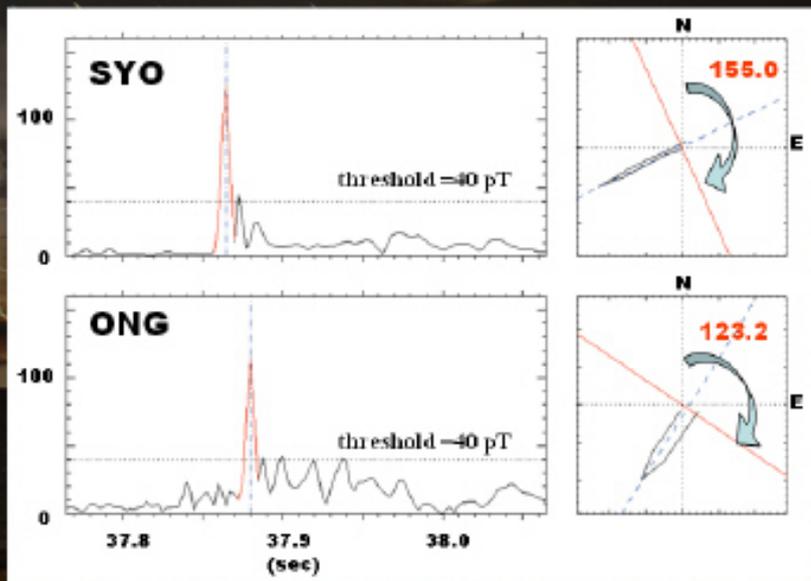
- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)



(SYO - ONG)

- 1) Lissajous プロット
波動の伝搬方向の推定



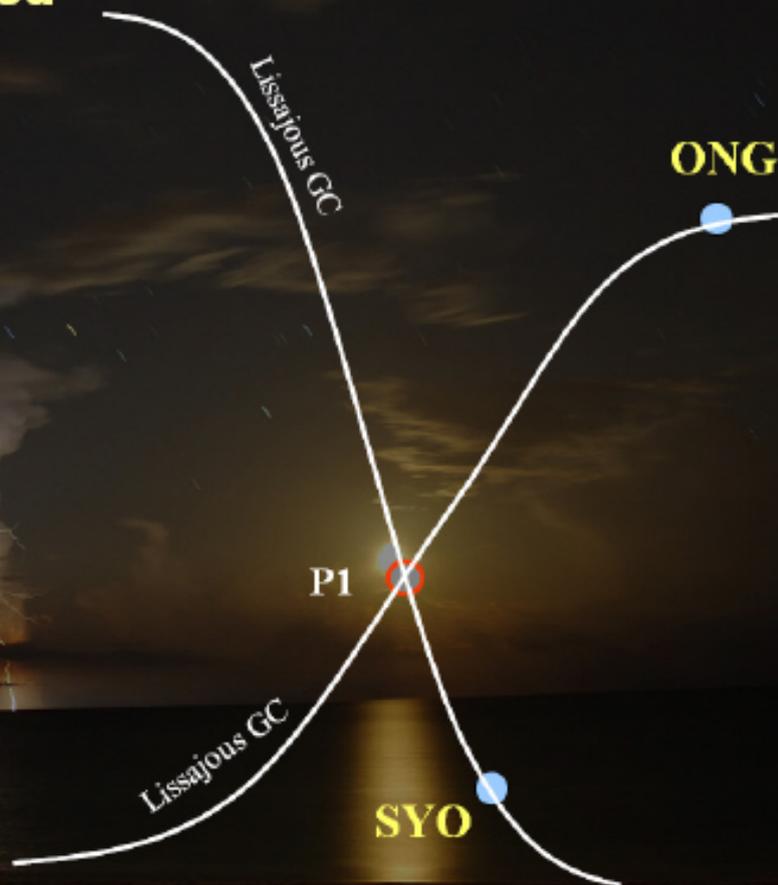
CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)

(SYO - ONG)

- 1) Lissajous プロット
波動の伝搬方向の推定



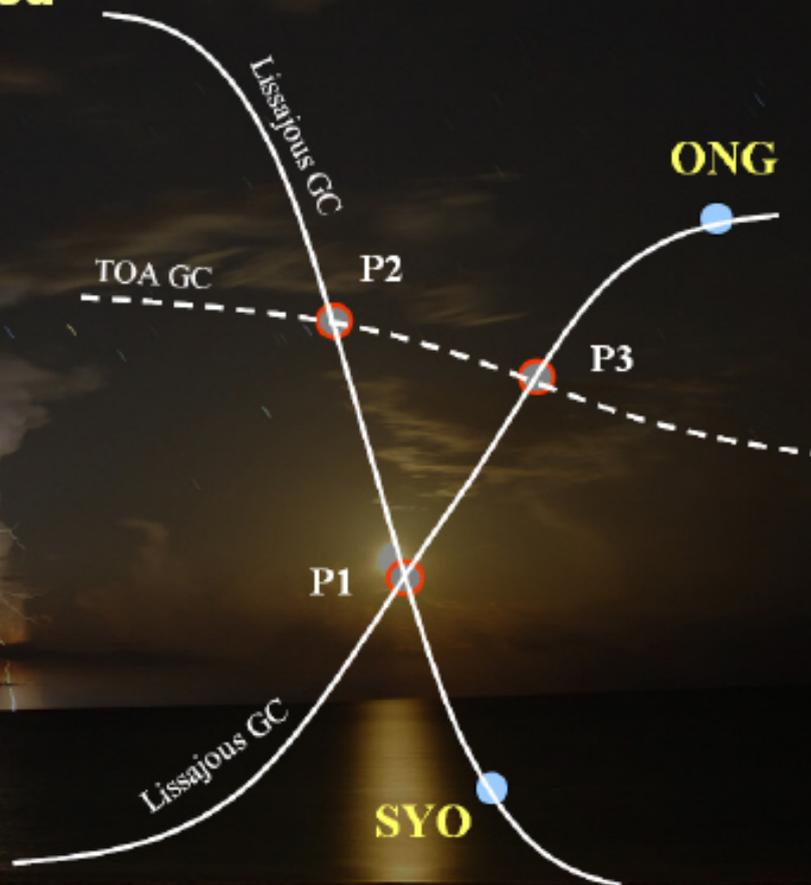
CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)

(SYO - ONG)

- 1) Lissajous プロット
波動の伝搬方向の推定
- 2) 波動到来時間差 (TOA)
TOA大円



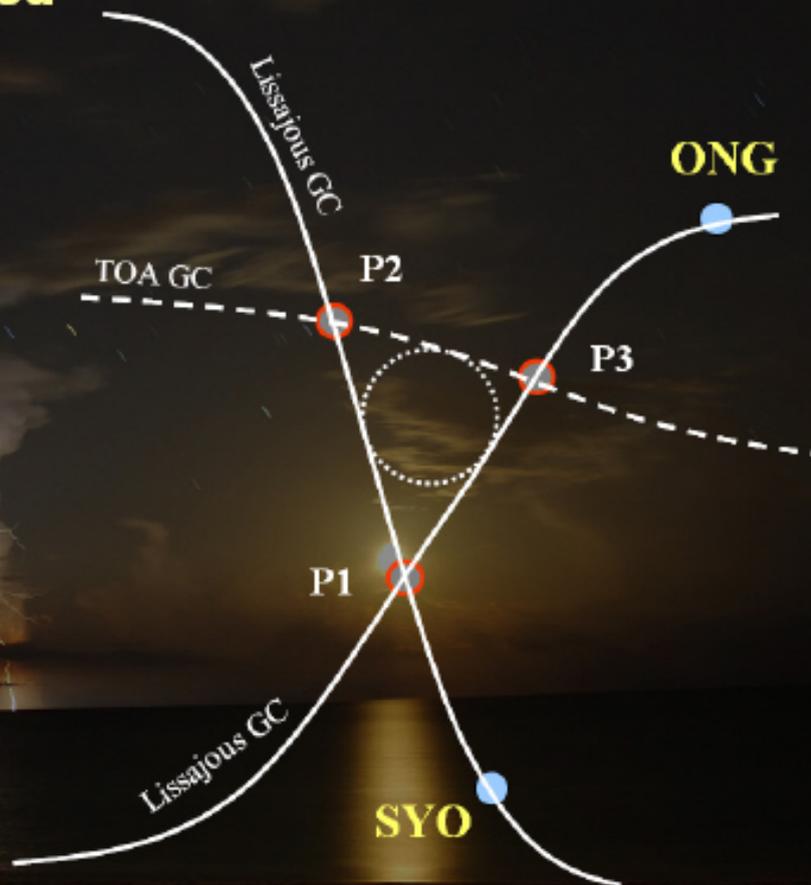
CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)

(SYO - ONG)

- 1) Lissajous プロット
波動の伝搬方向の推定
- 2) 波動到来時間差 (TOA)
TOA大円



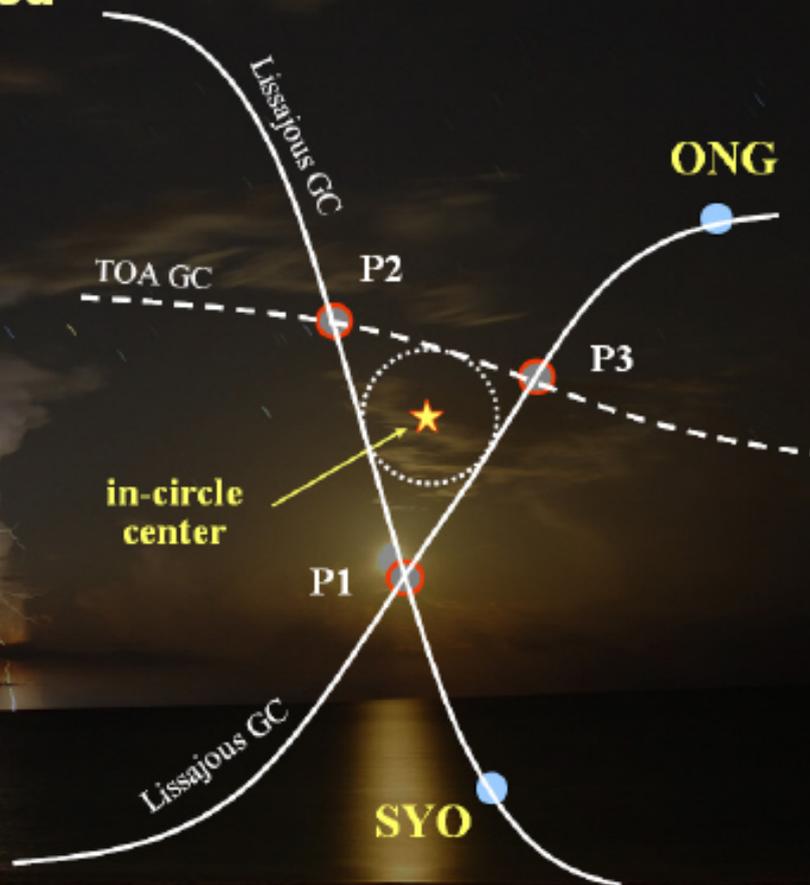
CG Triangulation Method

- 3点のELF波動データ
(昭和基地、女川、キルナ)

イベント選出
(閾値 > 40 pT)

(SYO - ONG)

- 1) Lissajous プロット
波動の伝搬方向の推定
- 2) 波動到来時間差 (TOA)
TOA大円



ESR



ONG



1



SYO



↓
(SYO - ESR)

ESR

ONG

#1



#2

SYO



(SYO - ESR)

(ONG - ESR)

ESR

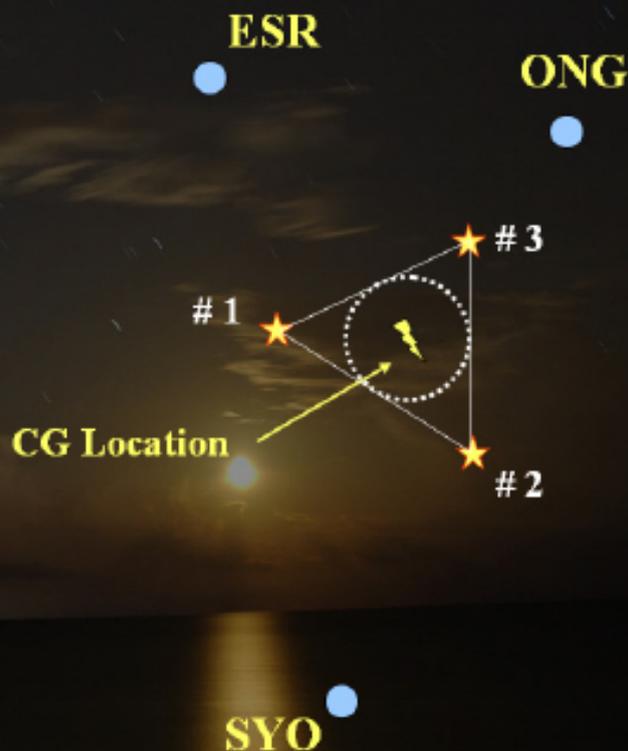
ONG

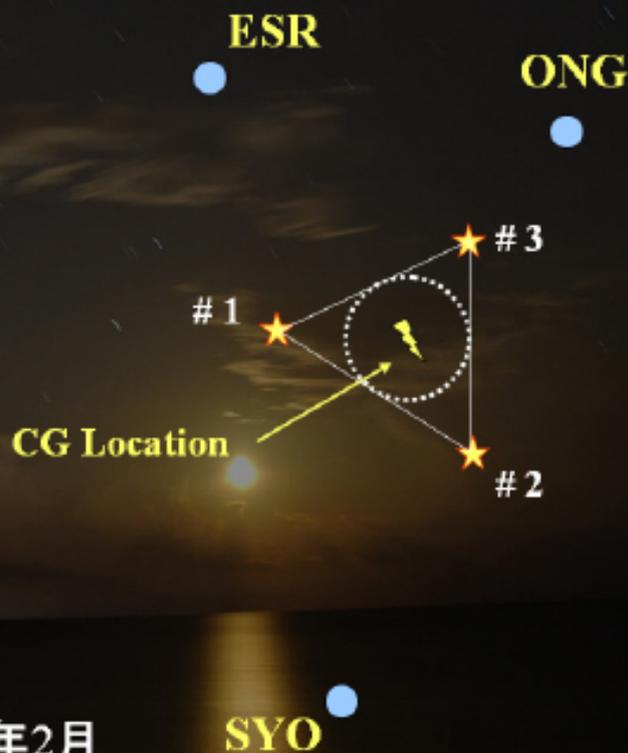
★ #3

#1 ★

★ #2

SYO





Data Analysis

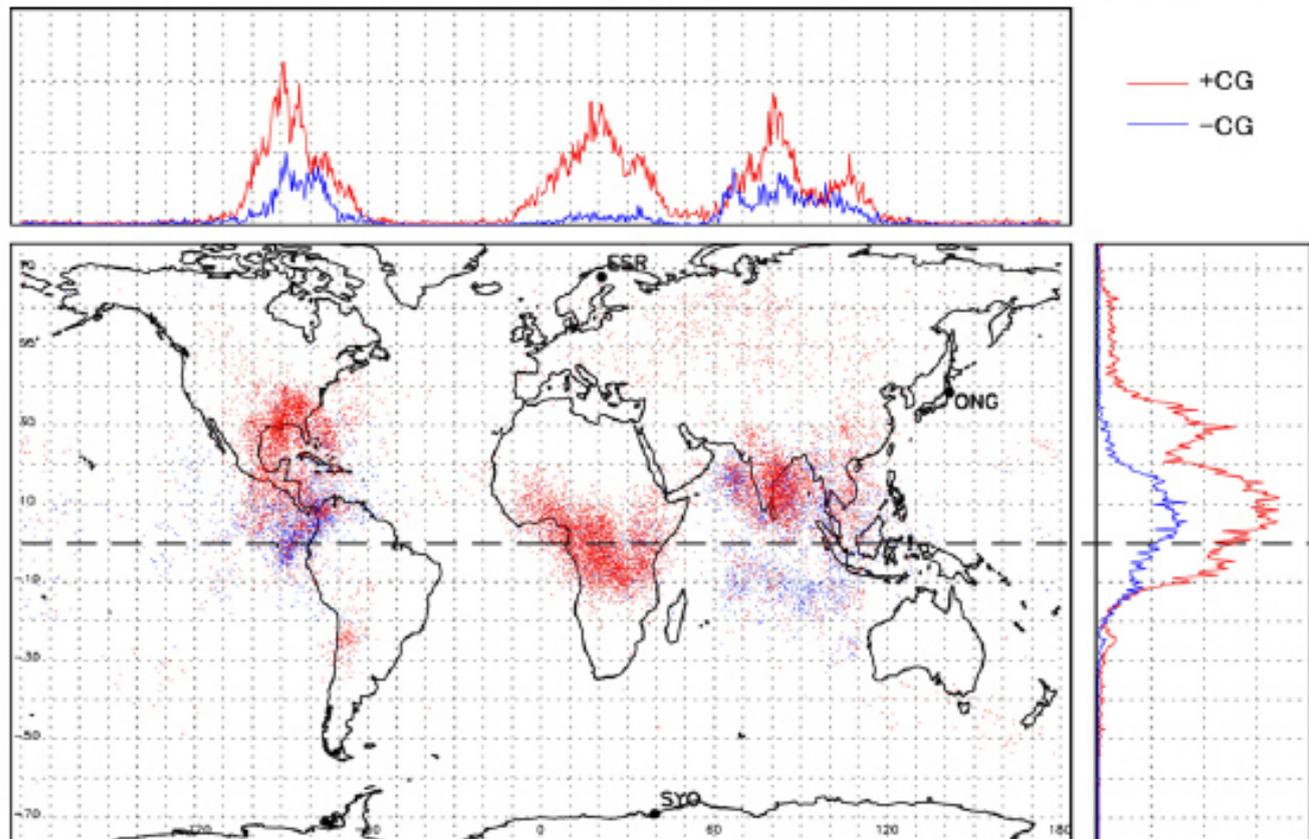
2003年9月～2004年8月

- Spring : 2004年3～5月
- Summer : 2004年6～8月
- Fall : 2003年9～11月
- Winter : 2003年12月～2004年2月

1.7×10^5 events を解析

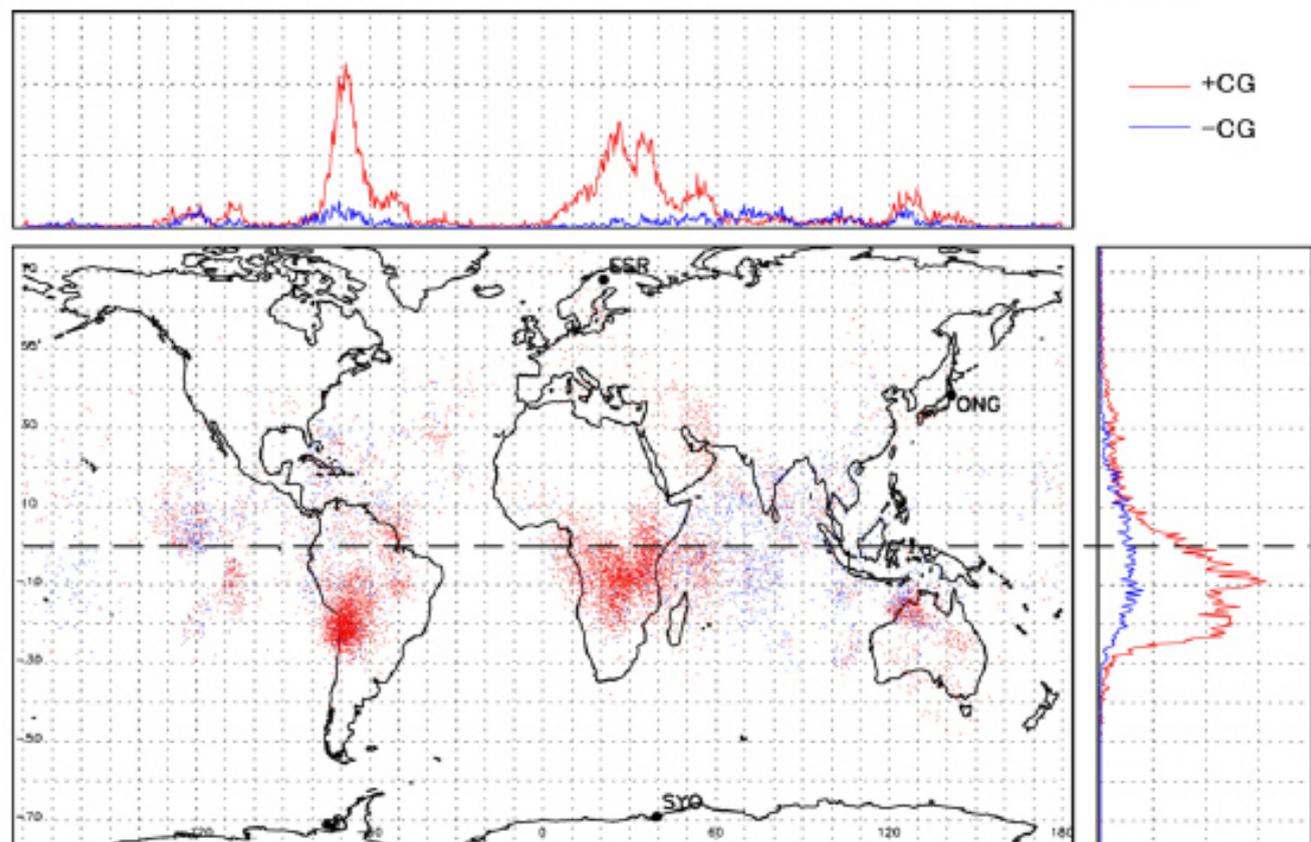
Global Lightning Distribution

2004年6月 (Summer) の1ヶ月の雷全球分布

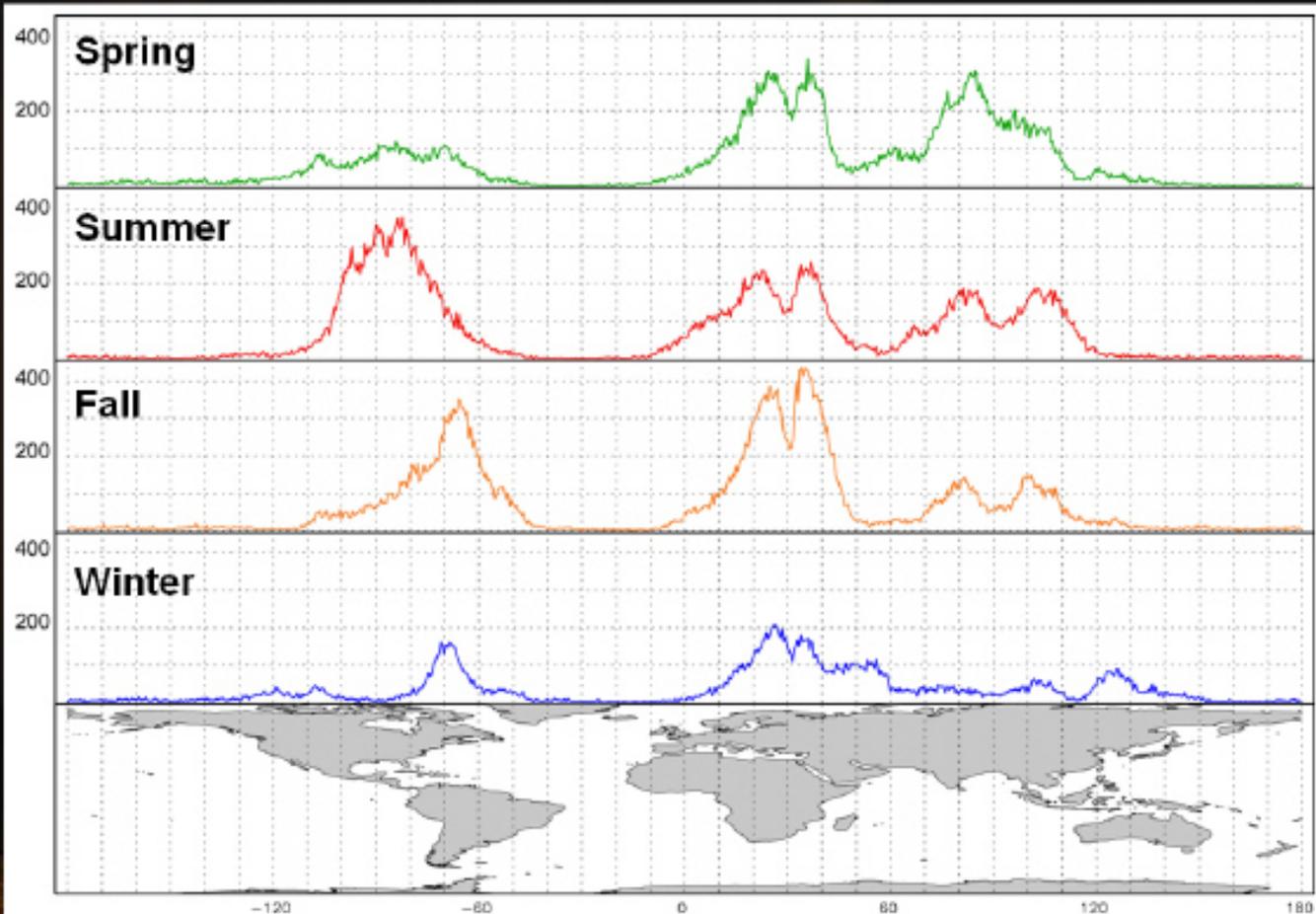


Global Lightning Distribution

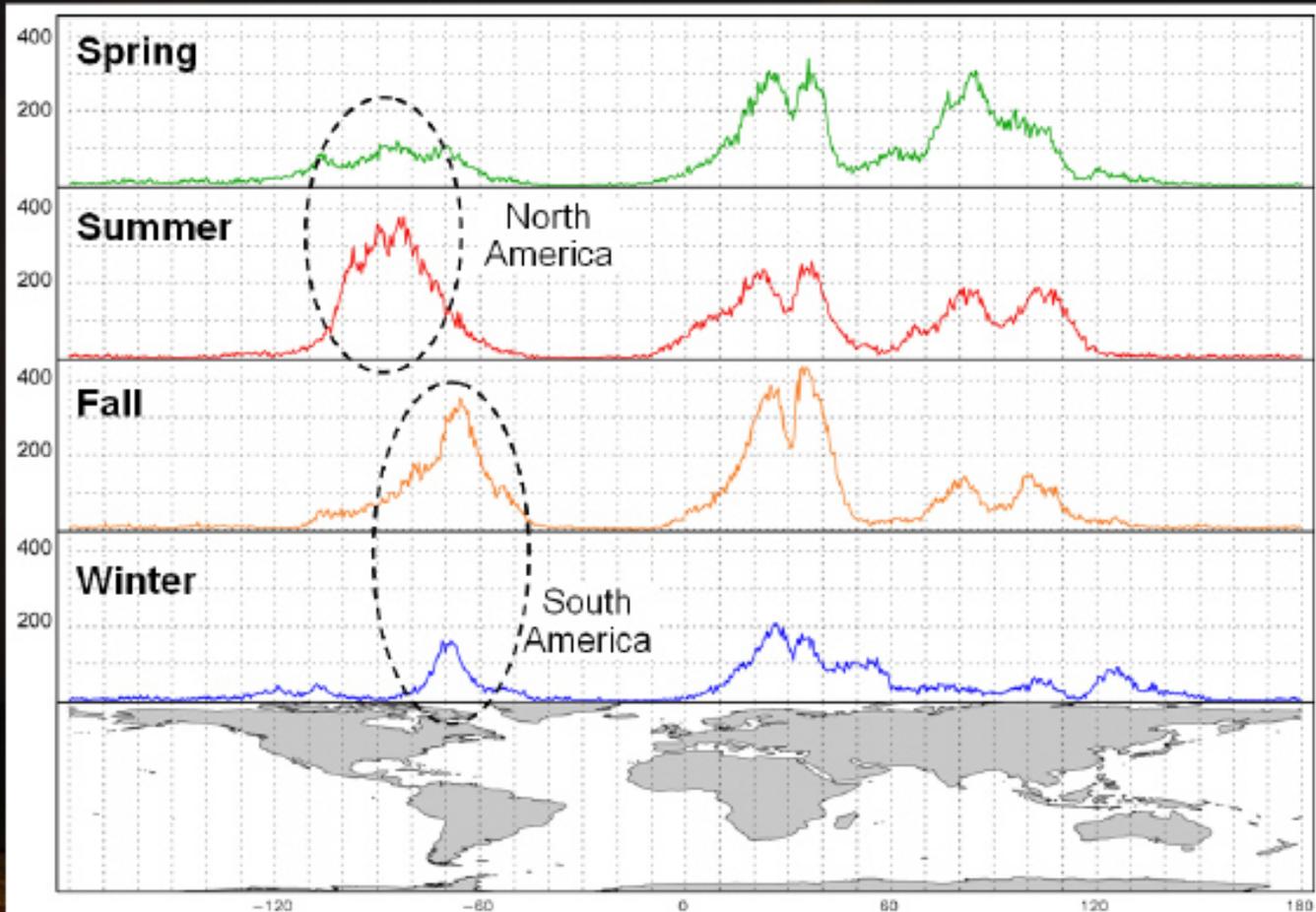
2003年12月(Winter)の1ヶ月の雷全球分布



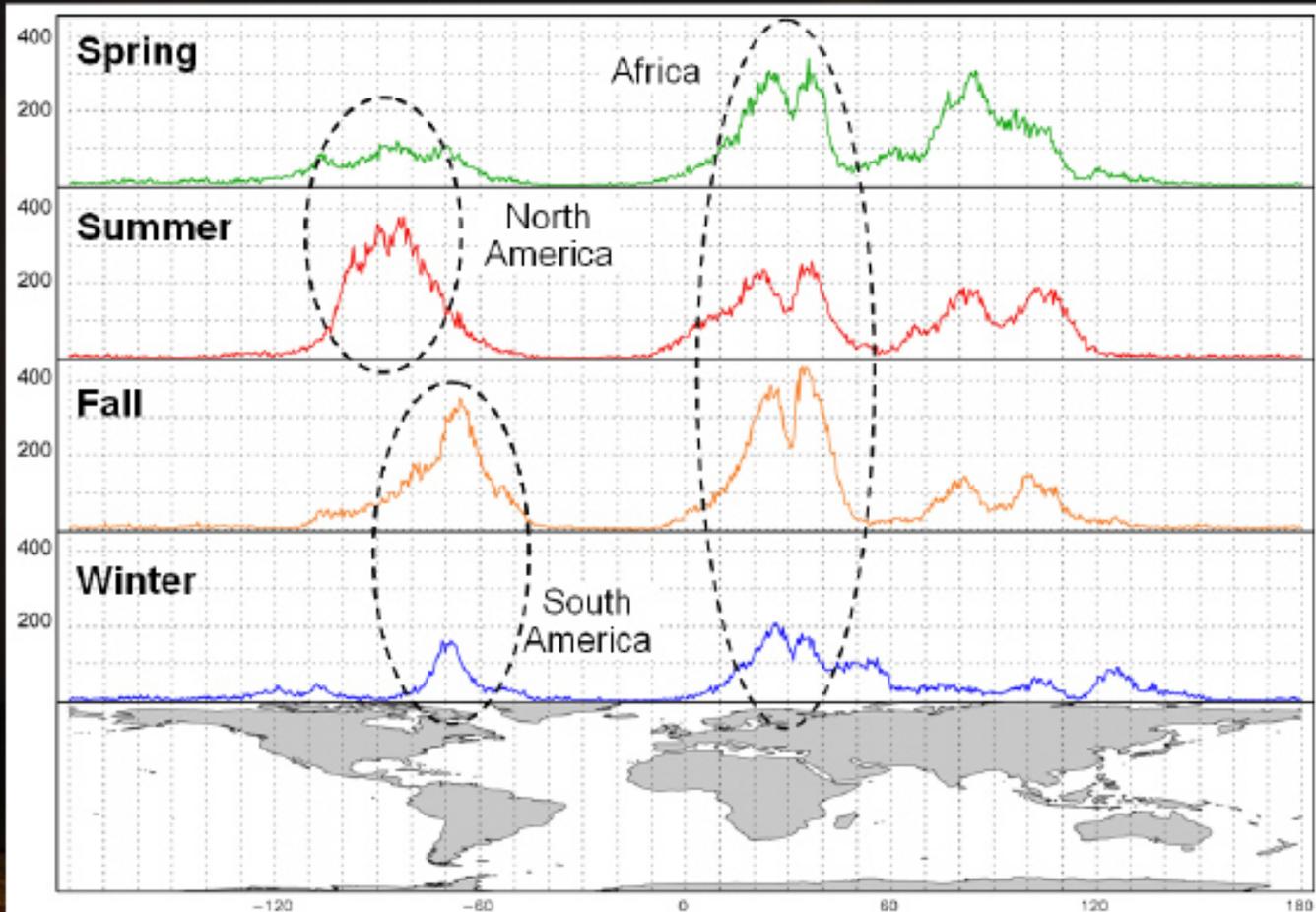
Longitudinal Distribution



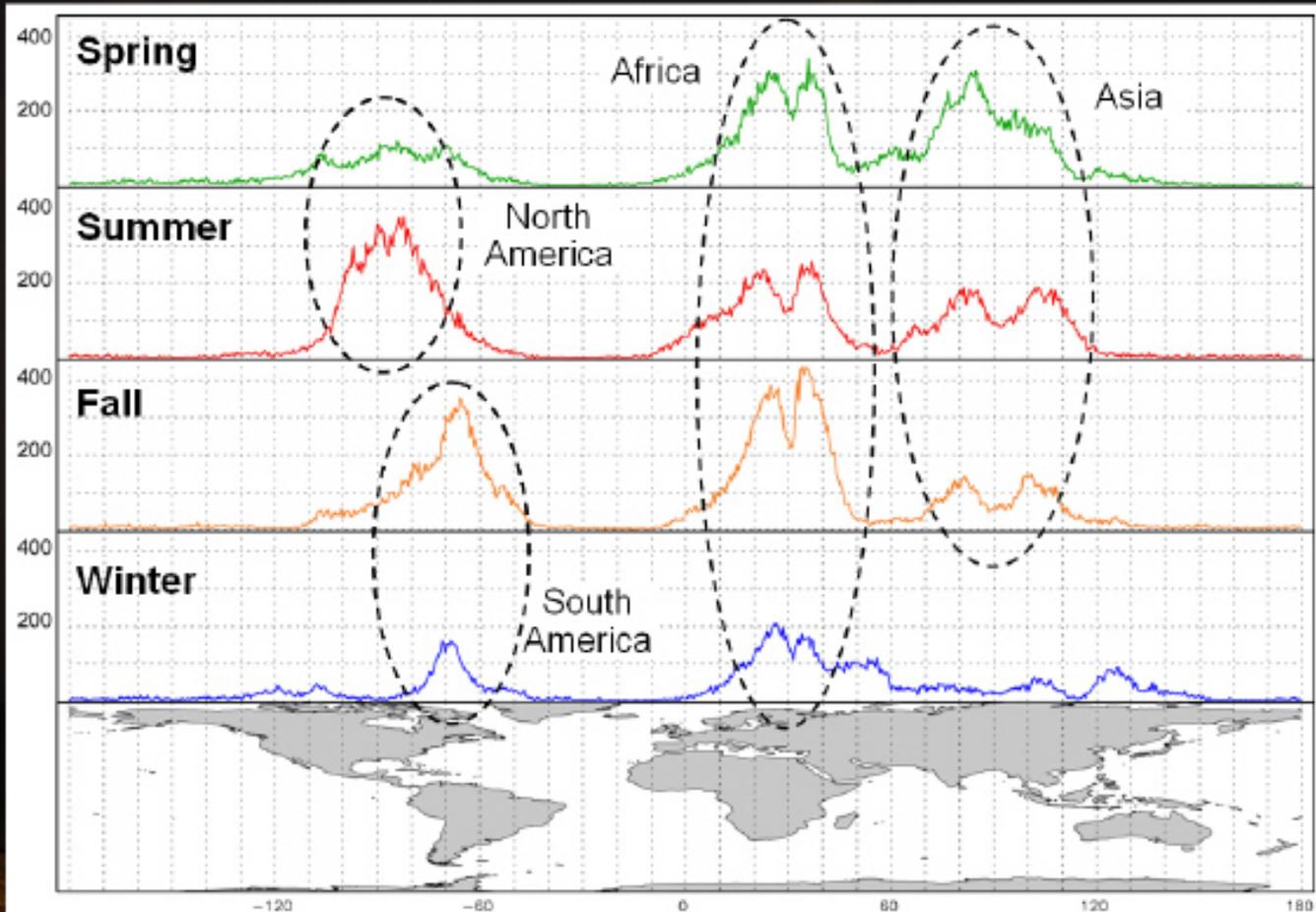
Longitudinal Distribution



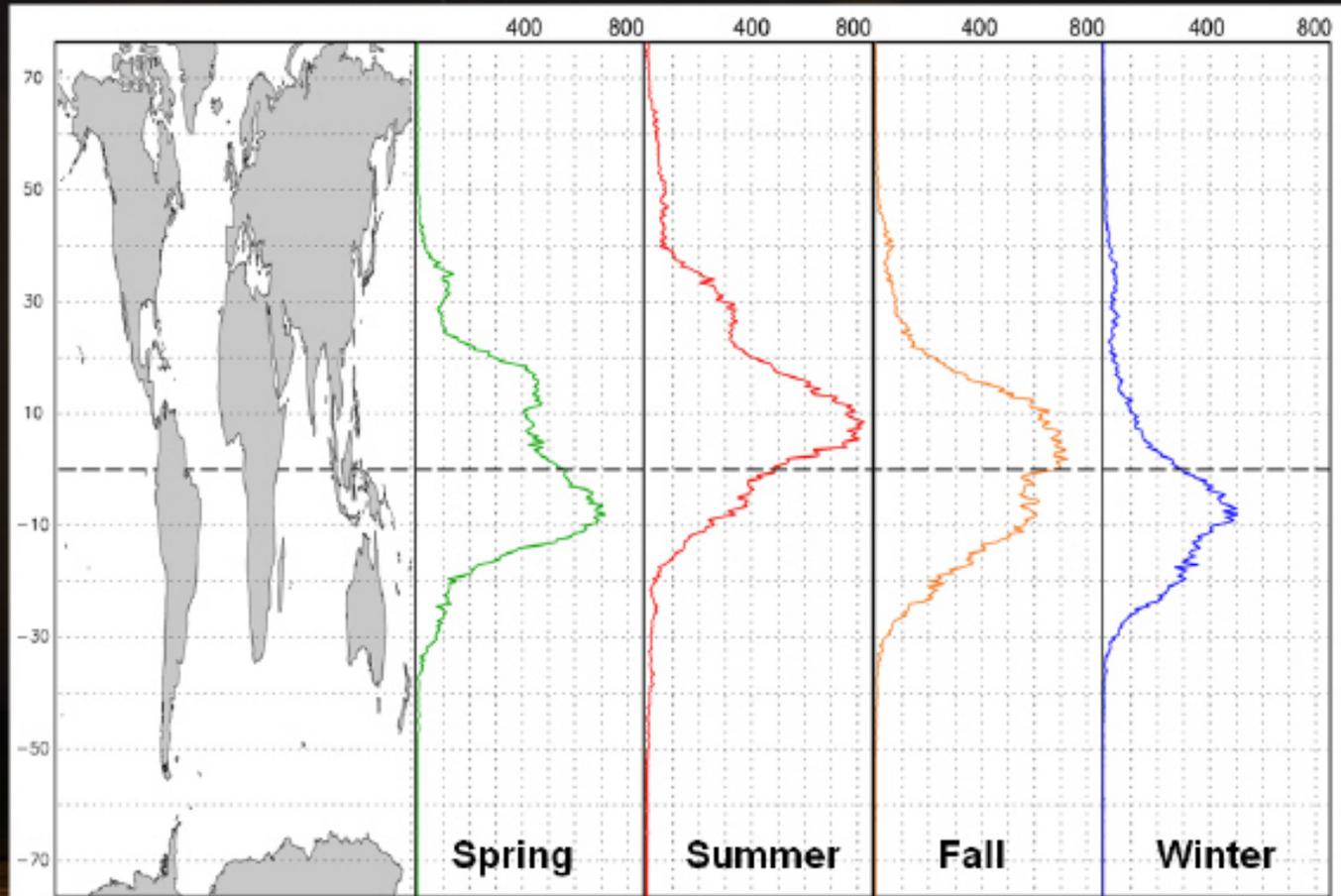
Longitudinal Distribution



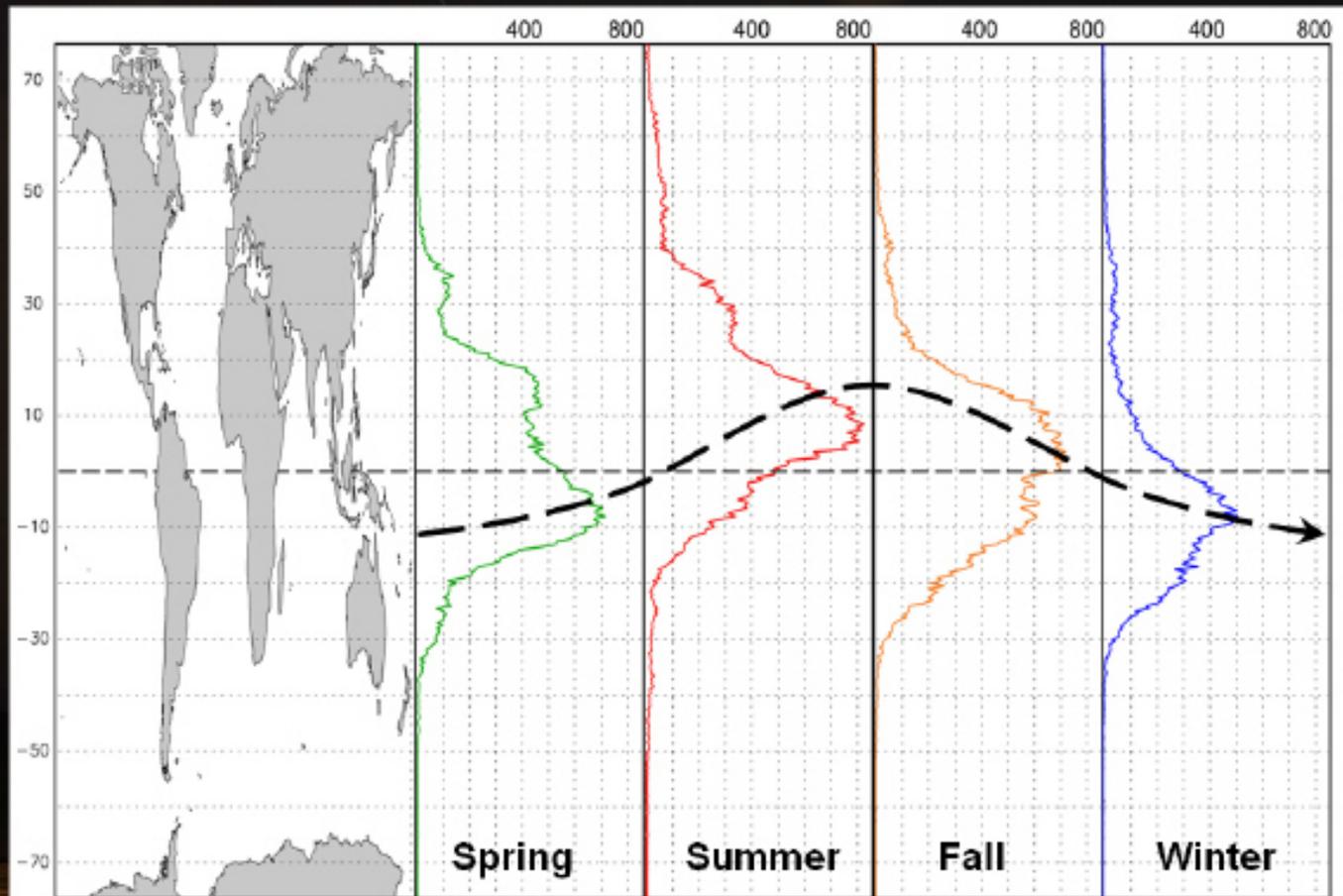
Longitudinal Distribution



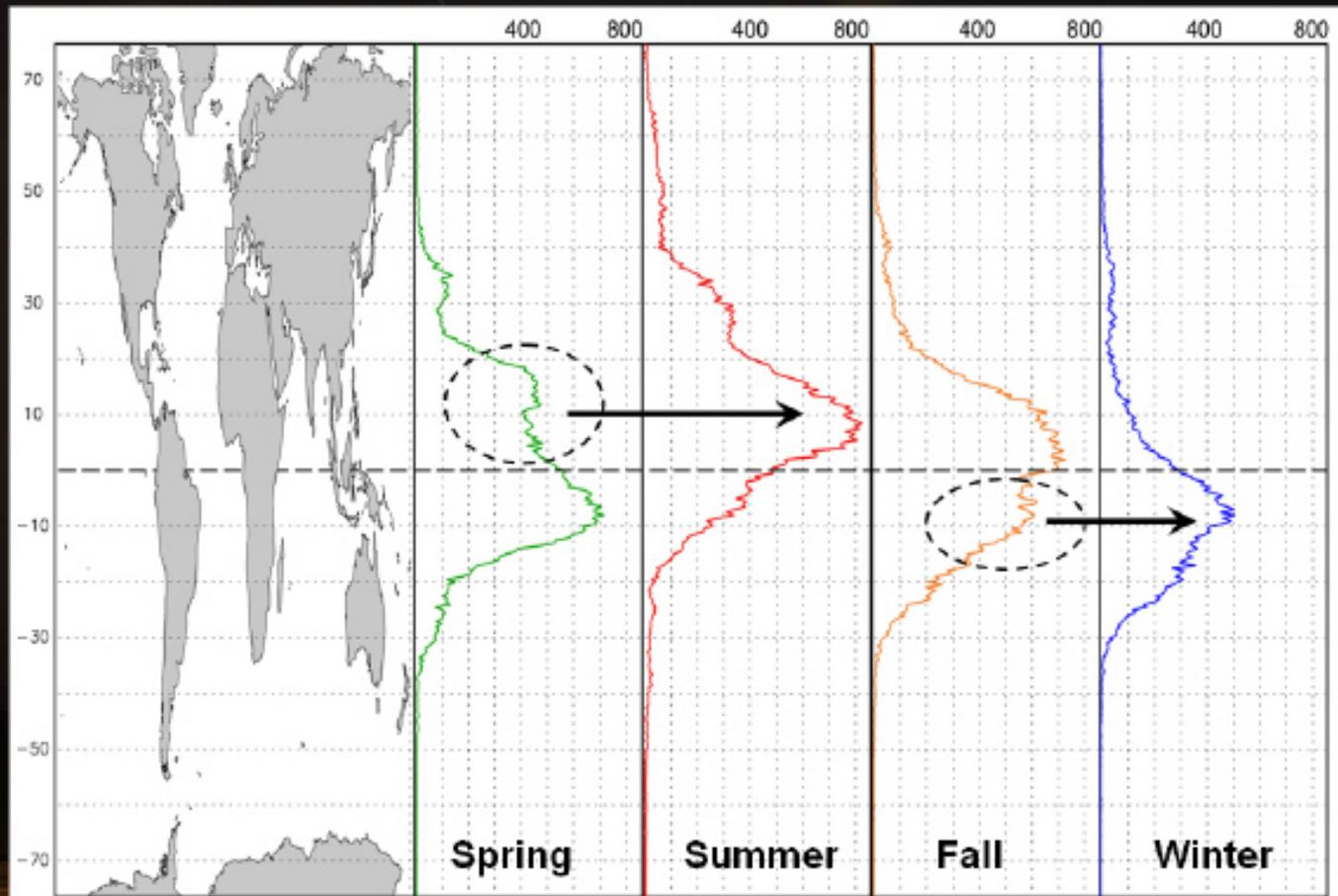
Latitudinal Distribution



Latitudinal Distribution

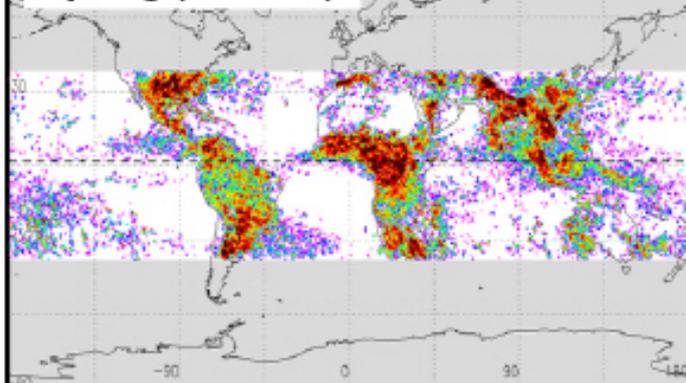


Latitudinal Distribution

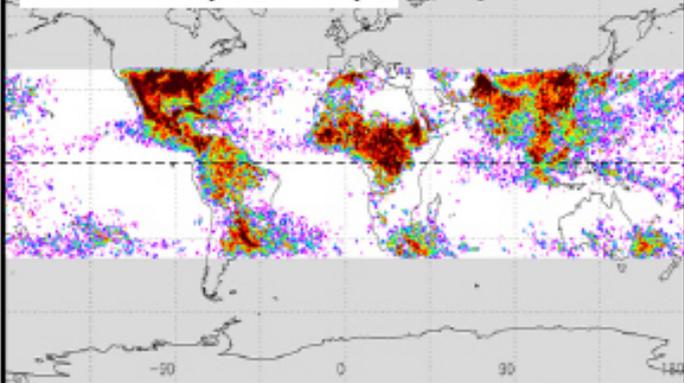


Global Lightning Activity (TRMM/LIS)

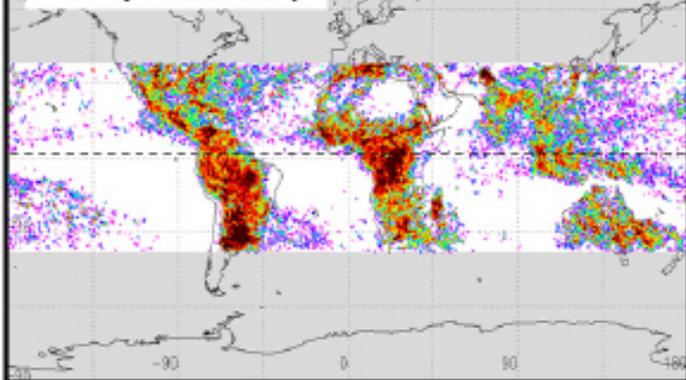
Spring (^{04/ 3-5})



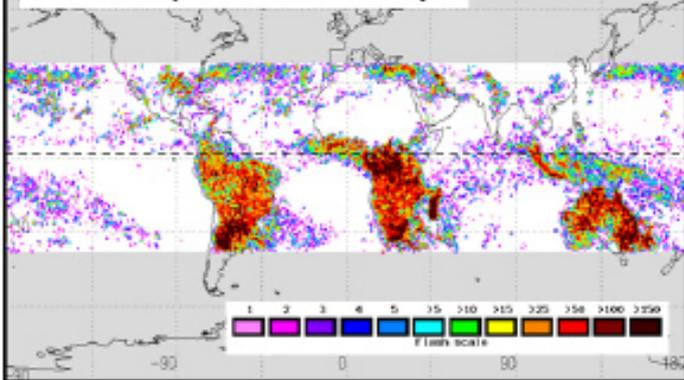
Summer (^{04/ 6-8})



Fall (^{03/ 9-11})

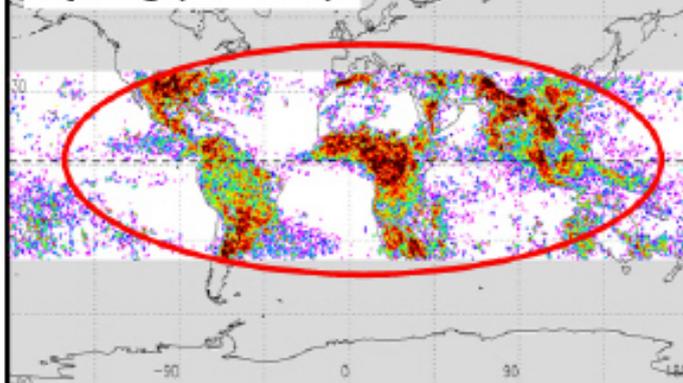


Winter (^{03/12 - 04/1})

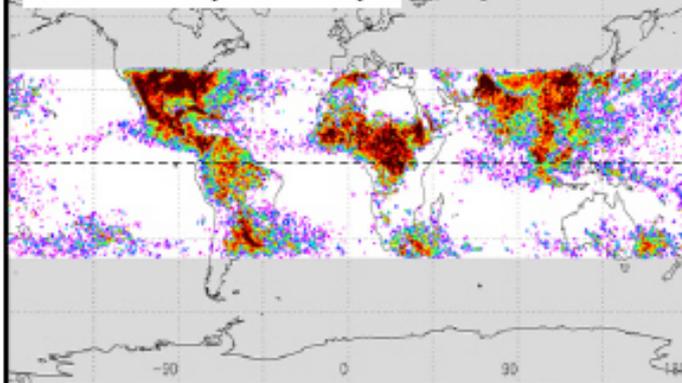


Global Lightning Activity (TRMM/LIS)

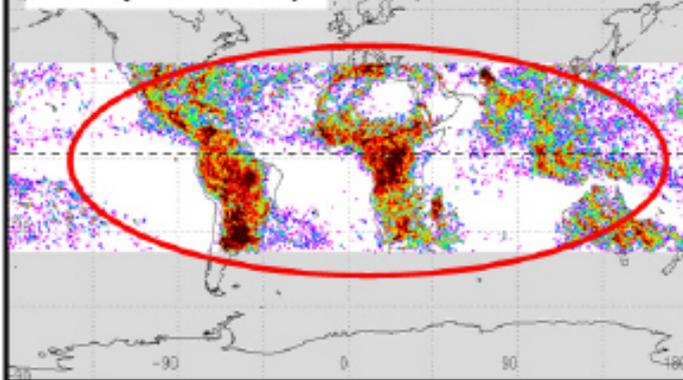
Spring ('04/ 3-5)



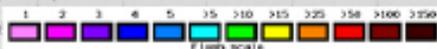
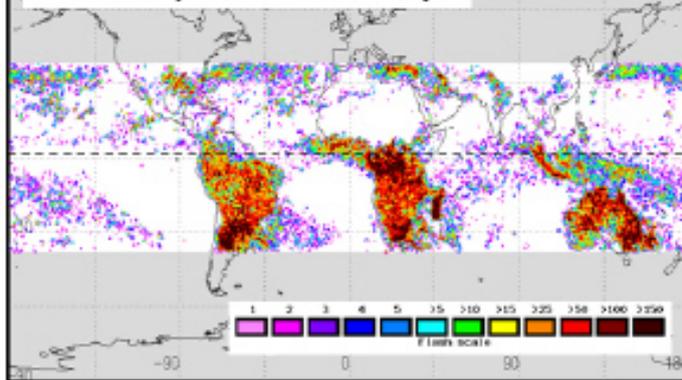
Summer ('04/ 6-8)



Fall ('03/ 9-11)

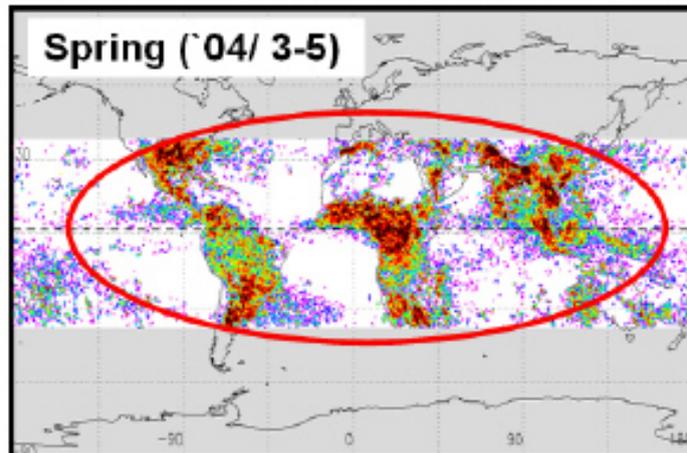


Winter ('03/12 - '04/1)

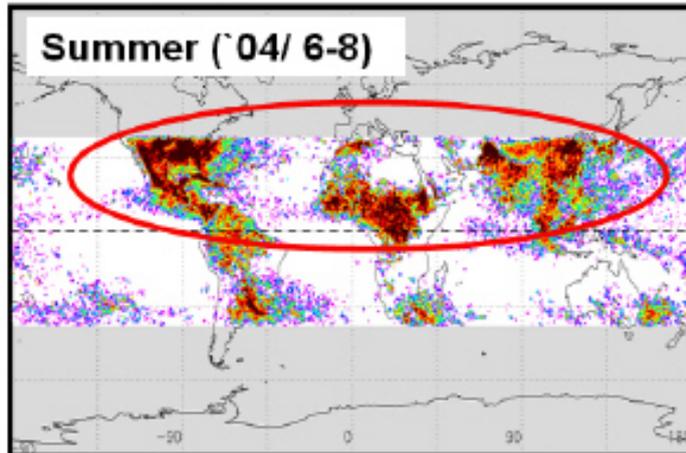


Global Lightning Activity (TRMM/LIS)

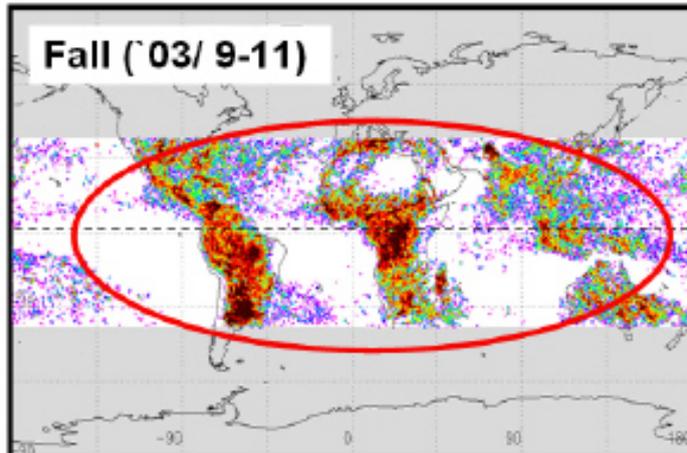
Spring ('04/ 3-5)



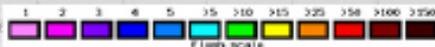
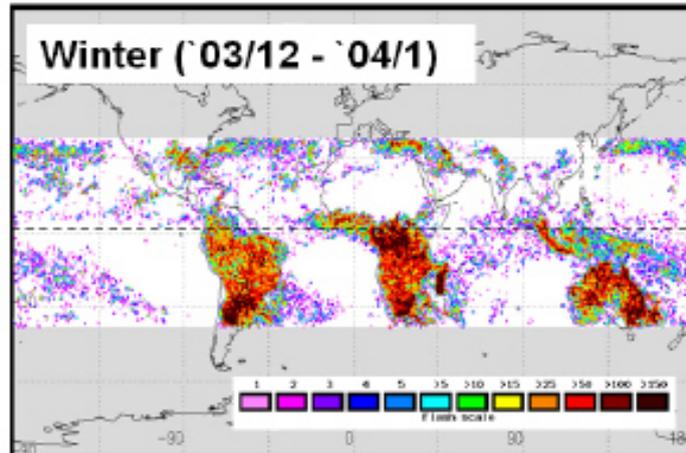
Summer ('04/ 6-8)



Fall ('03/ 9-11)

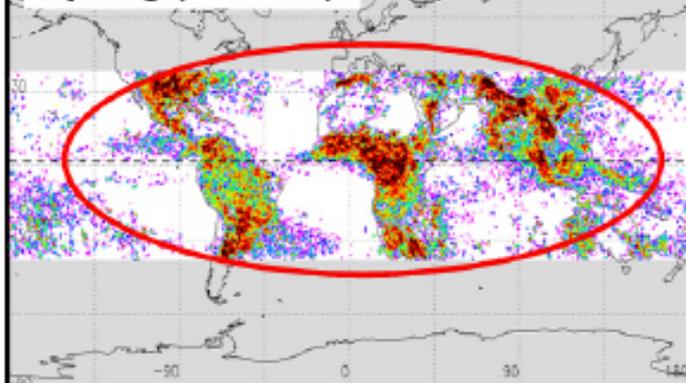


Winter ('03/12 - '04/1)

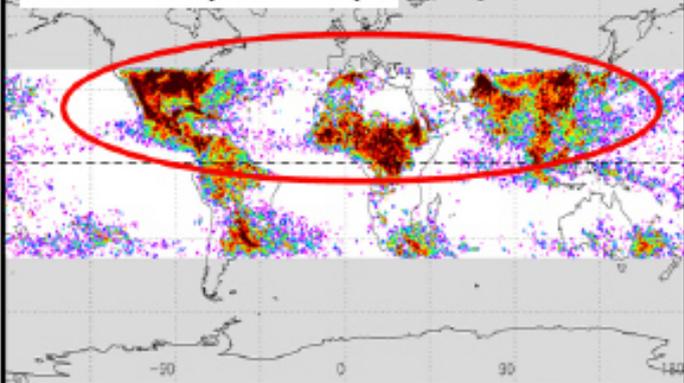


Global Lightning Activity (TRMM/LIS)

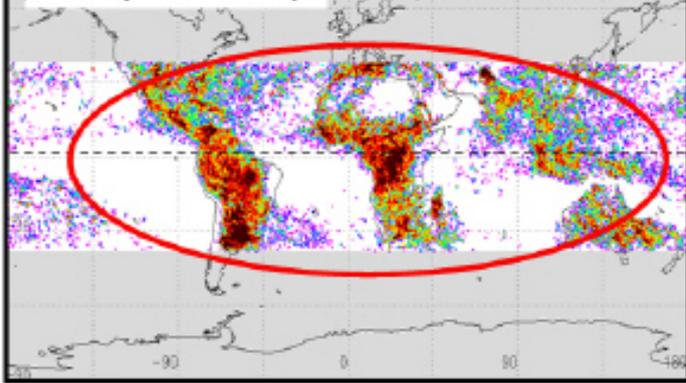
Spring ('04/ 3-5)



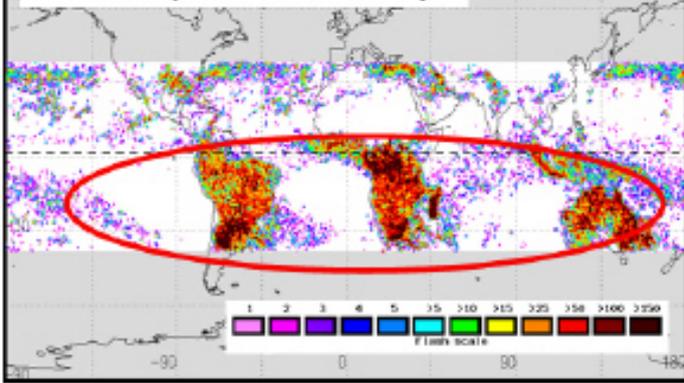
Summer ('04/ 6-8)



Fall ('03/ 9-11)



Winter ('03/12 - '04/1)



Charge Moment Estimation

電荷モーメント = $Q \cdot dl$

Q : 放電電荷量
 dl : 放電距離

雷雲上空の準静電場

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qdl}{r^3} \rightarrow \text{スプライト}$$

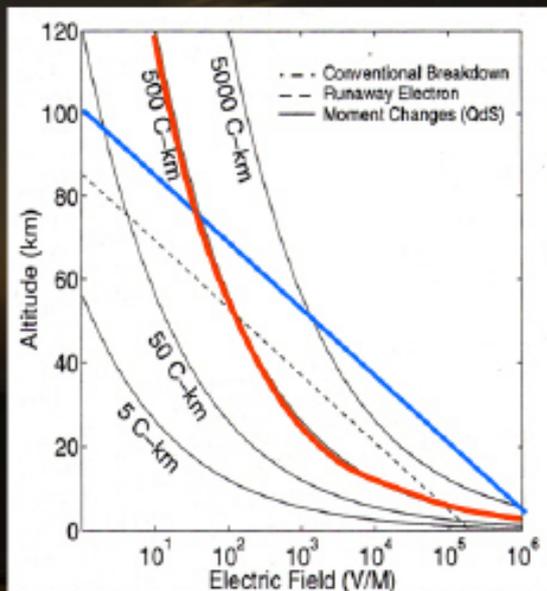
<推定方法>

$$H_\phi = \frac{Idl(\omega)}{4\pi h R_E} \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)-v(v+1)} P_n^1(\cos\theta)$$

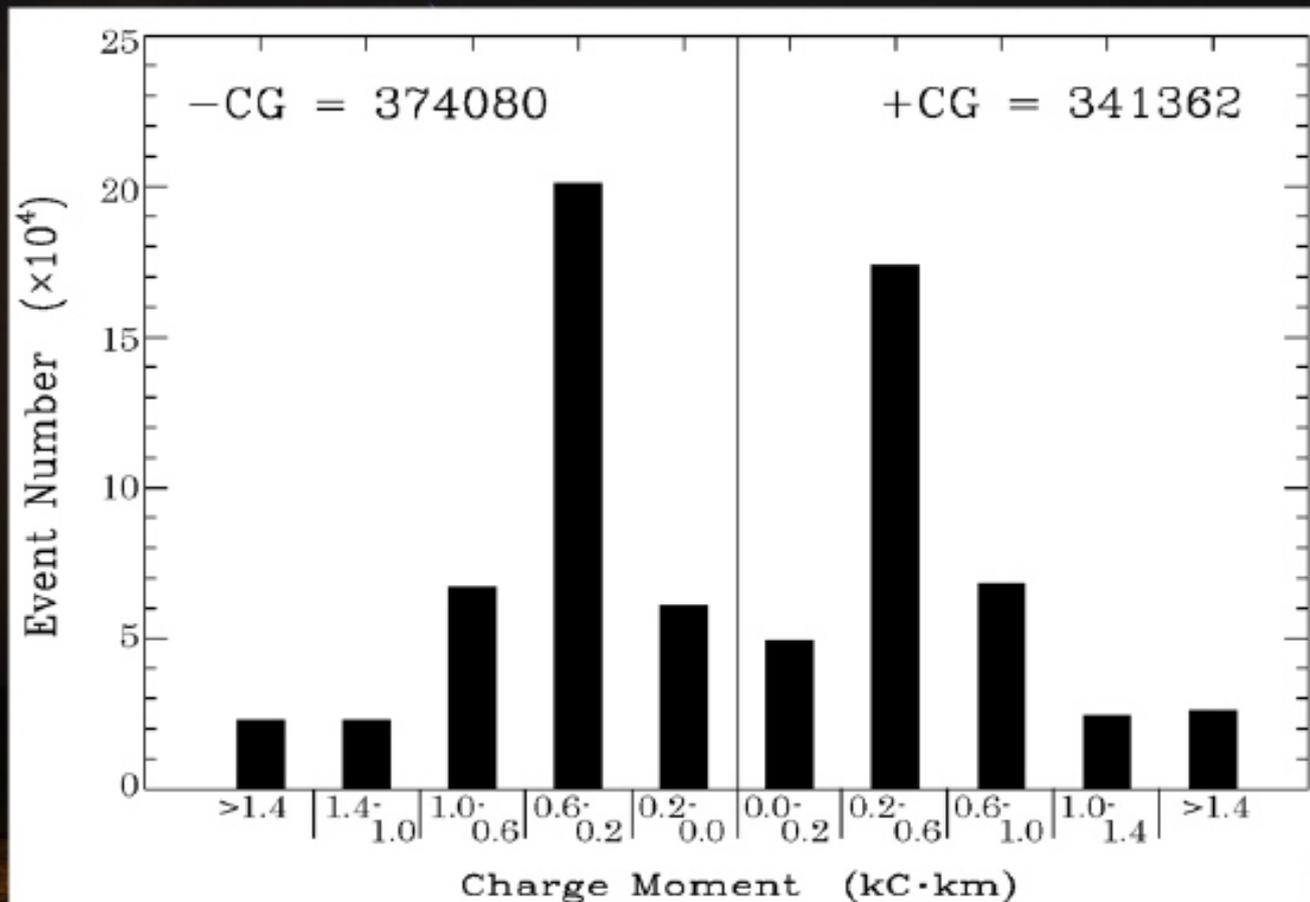
$$Idl(t) = I_0 dl \exp(-t/\tau)$$

$$Idl(f) = \frac{I_0 dl \cdot \tau}{1 + i2\pi f \tau} = I_0 dl \tau \quad (\text{for } 2\pi f \ll 1/\tau)$$

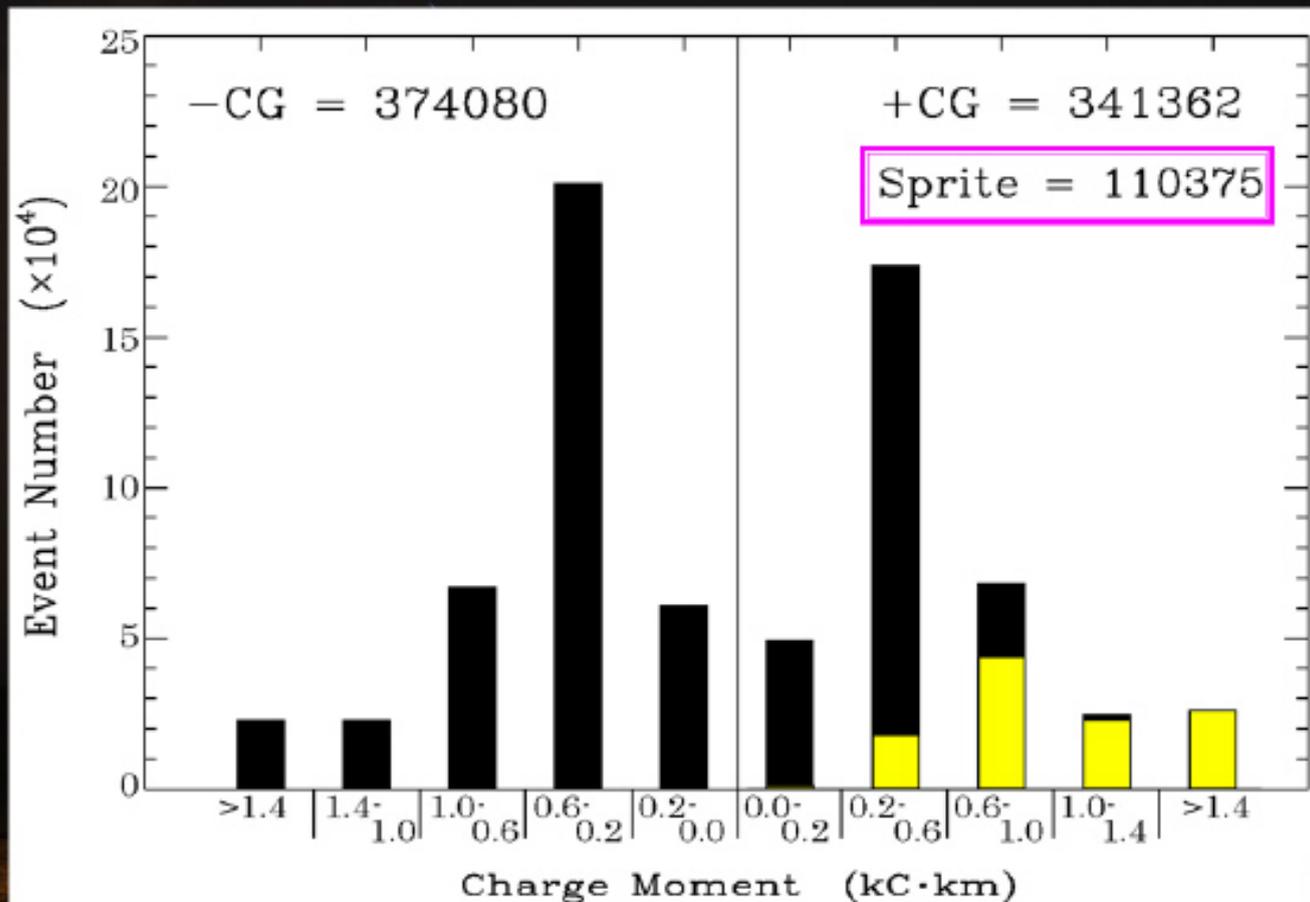
$$= Qdl$$



雷放電電荷モーメントのヒストグラム & スプライト発生頻度



雷放電電荷モーメントのヒストグラム & スプライト発生頻度



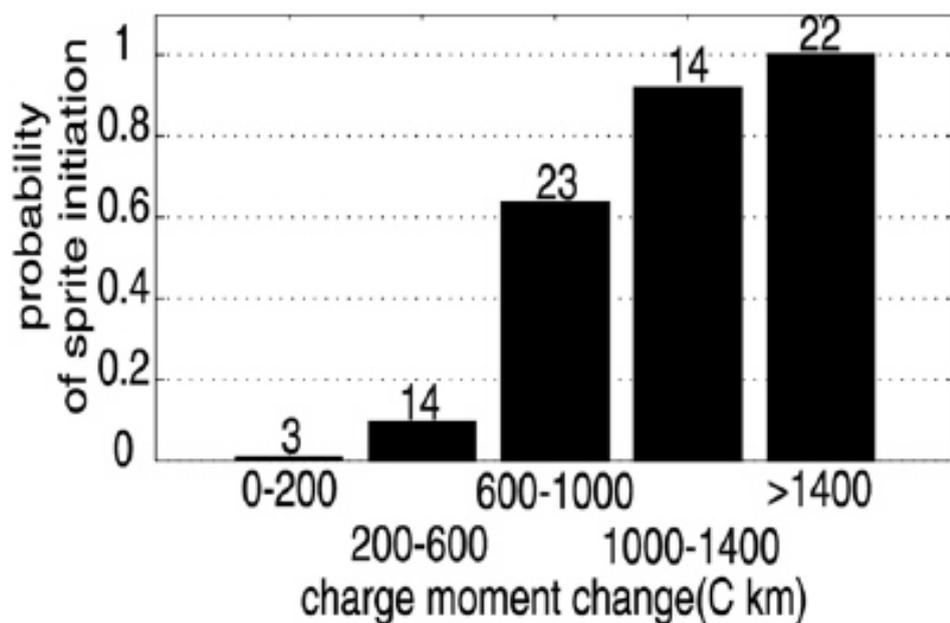
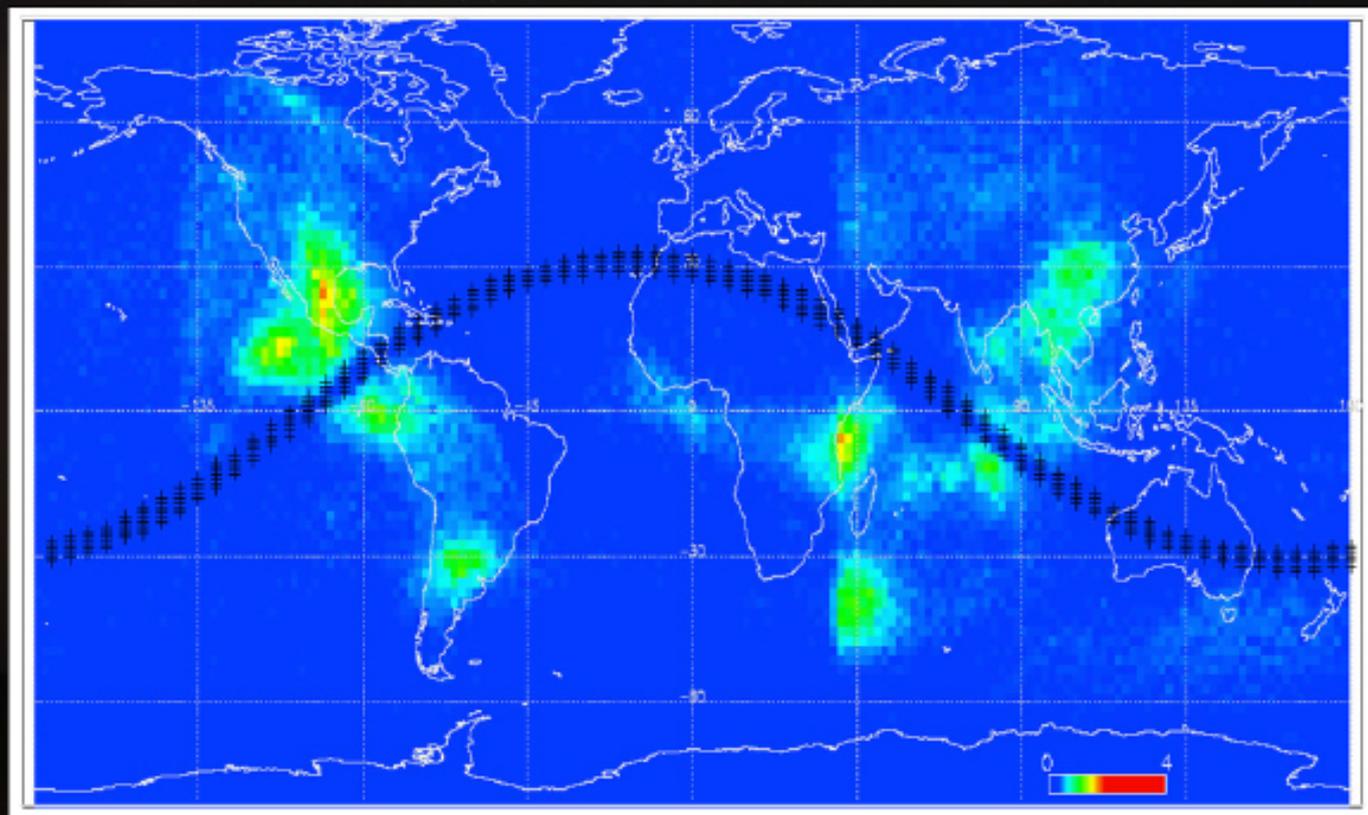
ある大きさの $Q \cdot dl$ をもつ +CG が Sprite を引き起こす確率

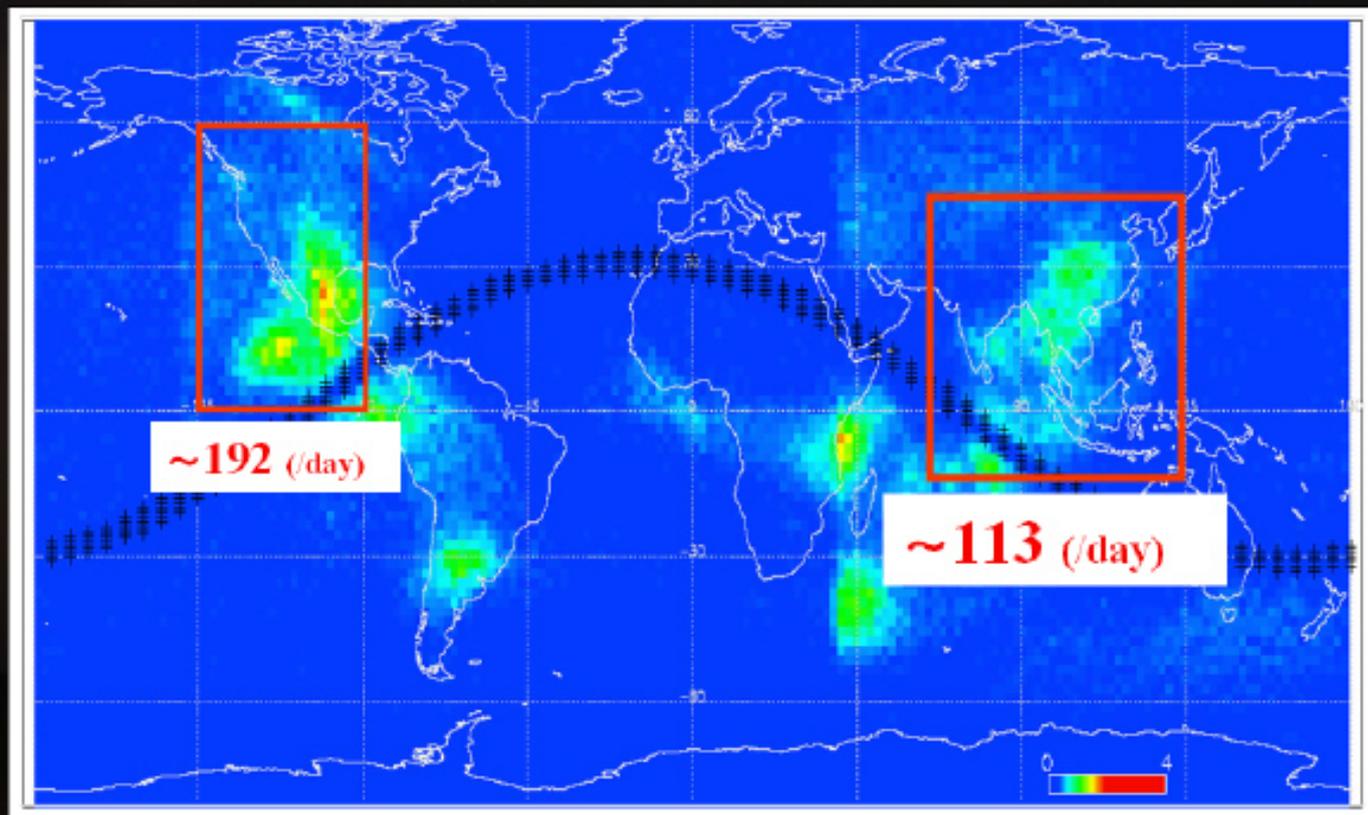
Figure 6. Probability of sprite initiation for positive lighting discharges with different charge moment changes. The number labeled above each bar corresponds to the number of sprite events in each bin.

[Hu et al., G.R.L., 2002]

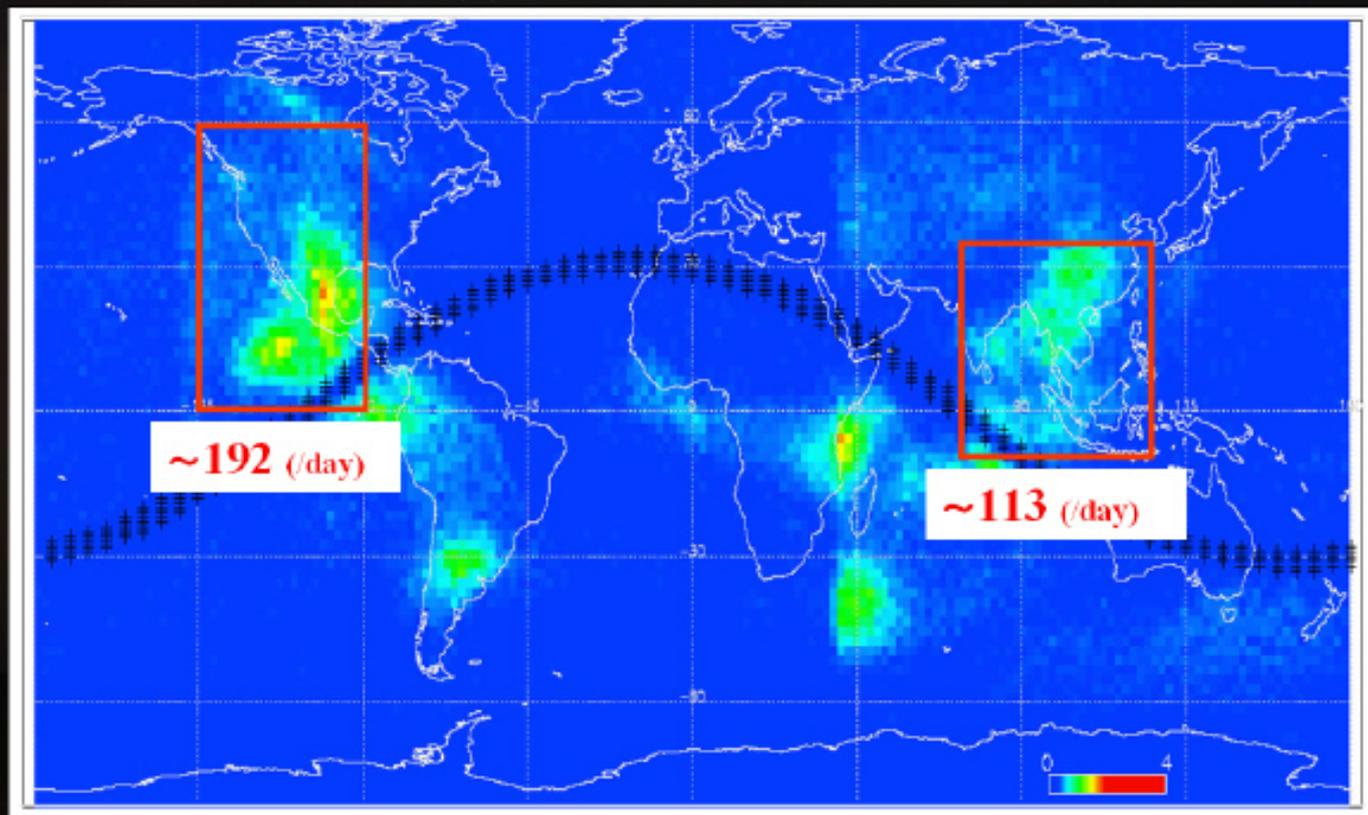
2001/06 -08 (北半球夏) Sprite発生頻度分布 (1日平均)



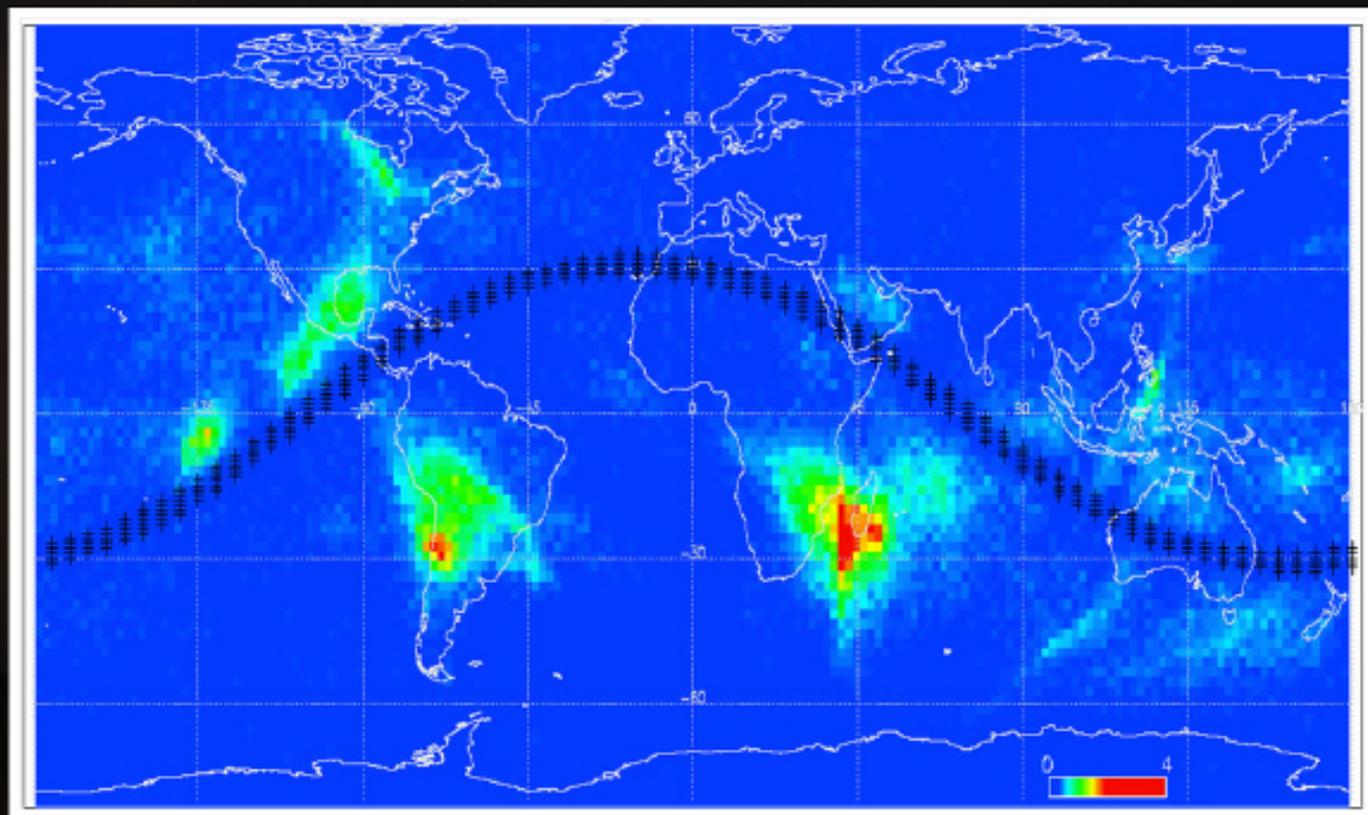
2001/06 - 08 (北半球夏) Sprite発生頻度分布 (1日平均)



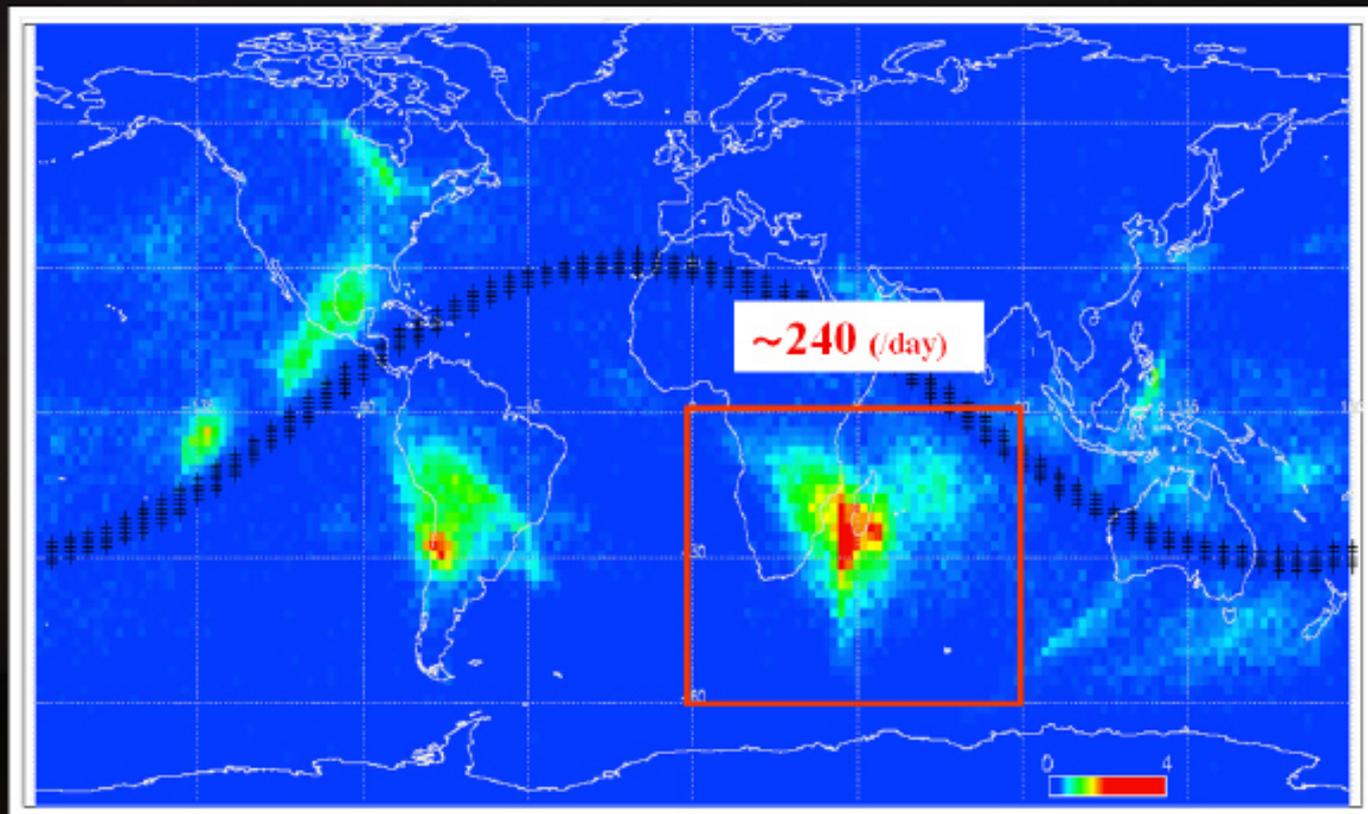
2001/06 - 08 (北半球夏) Sprite発生頻度分布 (1日平均)



2001/12 - 2002/01 (北半球冬) Sprite発生頻度分布 (1日平均)



2001/12 - 2002/01 (北半球冬) Sprite発生頻度分布 (1日平均)



全球スプライト発生頻度 [Sato and Fukunishi, 2003]

	平均電荷モーメント Qdl (C·km)		平均発生頻度 (events/day)
	-CG	+CG	
夏 (2001/ 06/20 – 08/29)	-649.3	695.4	1176
秋 (2001/ 09/08 – 11/30)	-660.5	730.9	1291
冬 (2001/ 12/01 – 2002/ 01/20)	-586.0	632.3	1342
平均	-631.9	686.2	1270

大気化学

大気組成変化
(NO_x, HO_x, O₃, ...)

超高層物理 ↔ 大気電気

雷・超高層雷放電

↕ 大気電気

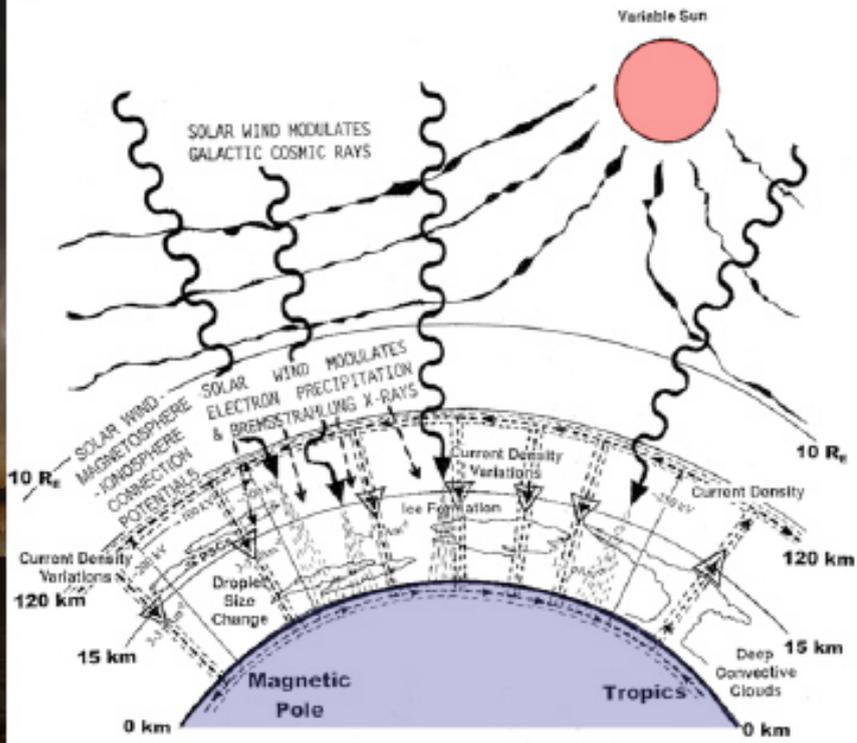
Global Circuit
エアロゾル分布

↕ 気象物理

雲分布変化
気候変動

Global Electric Circuit

FORCINGS BY SPACE PARTICLE FLUXES



大気化学

大気組成変化
(NO_x, HO_x, O₃, ...)

超高層物理 ↔ 大気電気

雷・超高層雷放電

↕ 大気電気

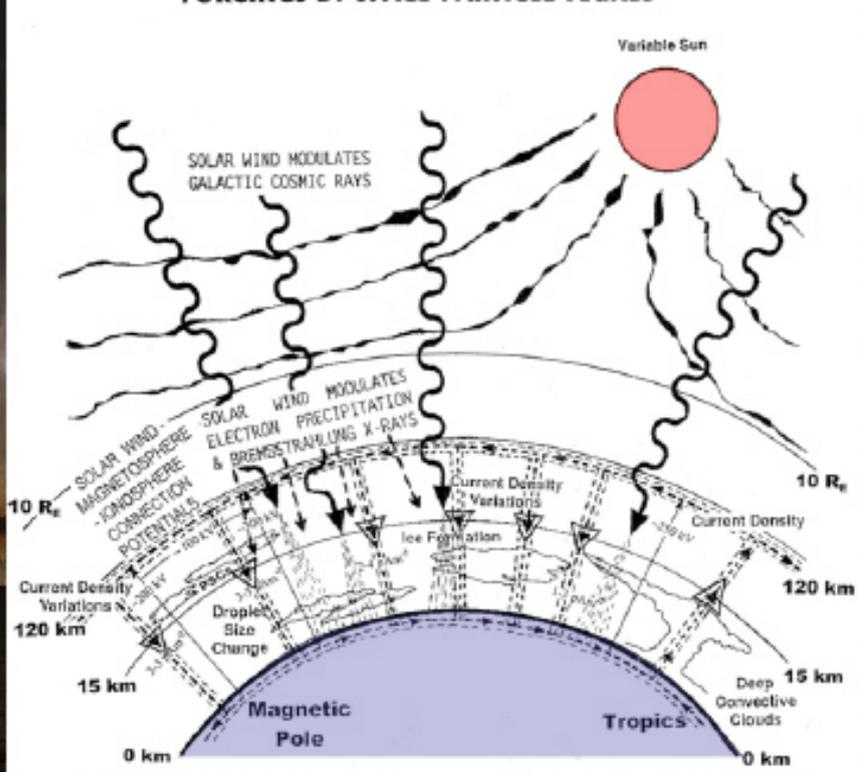
Global Circuit
エアロゾル分布

↕ 気象物理

雲分布変化
気候変動

Global Electric Circuit

FORCINGS BY SPACE PARTICLE FLUXES



大気化学

大気組成変化
(NO_x, HO_x, O₃, ...)

超高層物理 ↔ 大気電気

雷・超高層雷放電

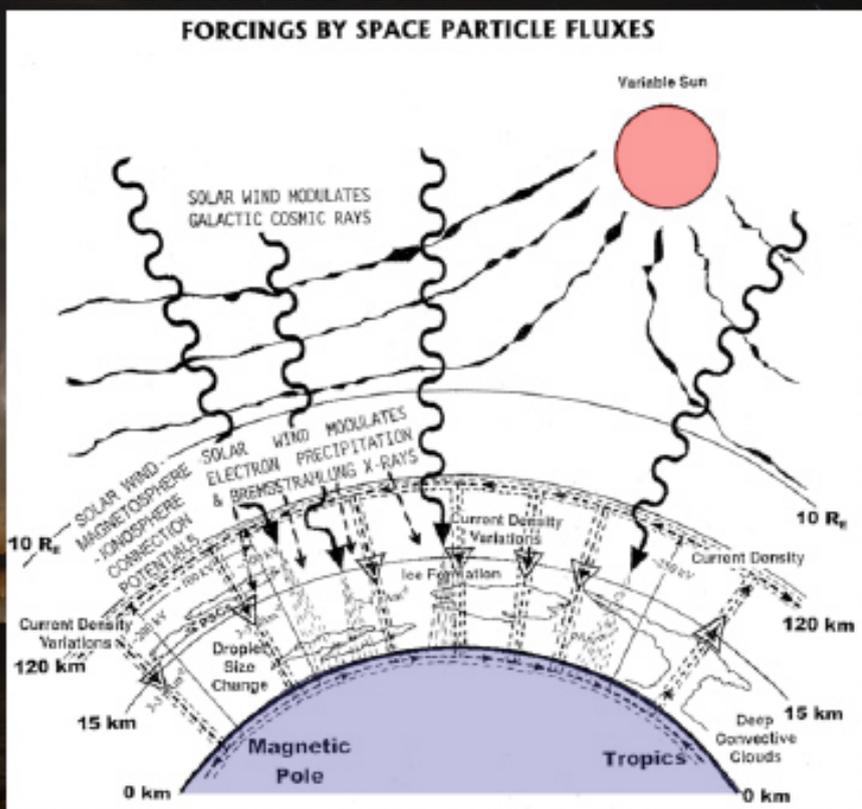
↕ 大気電気

Global Circuit
エアロゾル分布

↕ 気象物理

雲分布変化
気候変動

Global Electric Circuit



大気化学

大気組成変化
(NO_x, HO_x, O₃, ...)

超高層物理 ↔ 大気電気

雷・超高層雷放電

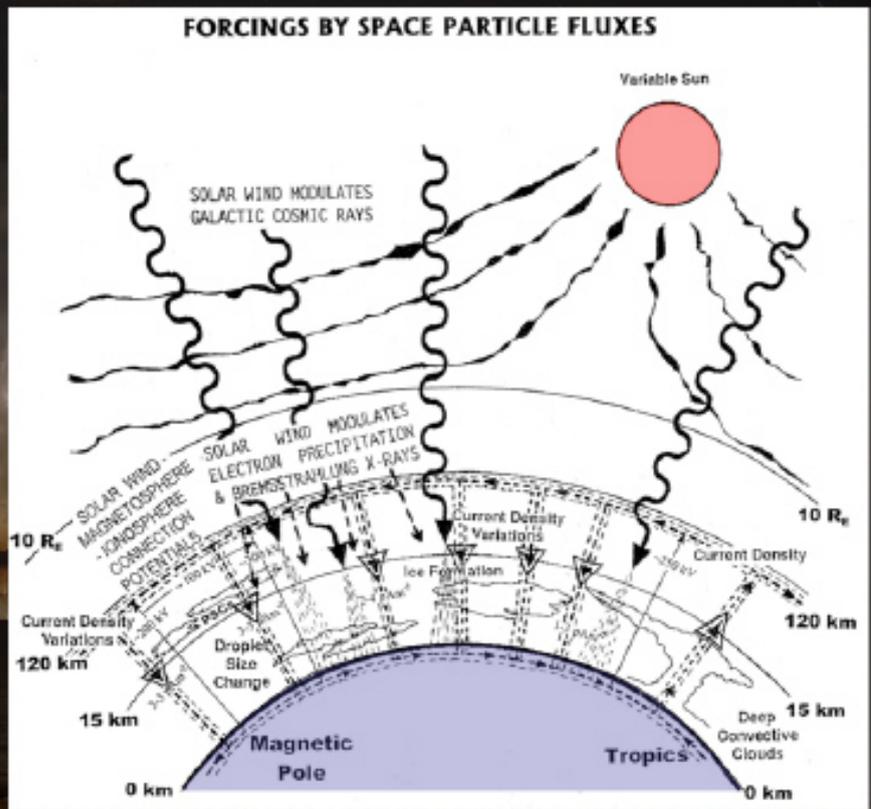
↕ 大気電気

Global Circuit
エアロゾル分布

↕ 気象物理

雲分布変化
気候変動

Global Electric Circuit



大気化学

大気組成変化
(NO_x, HO_x, O₃, ...)

超高層物理 ↔ 大気電気

雷・超高層雷放電

↕ 大気電気

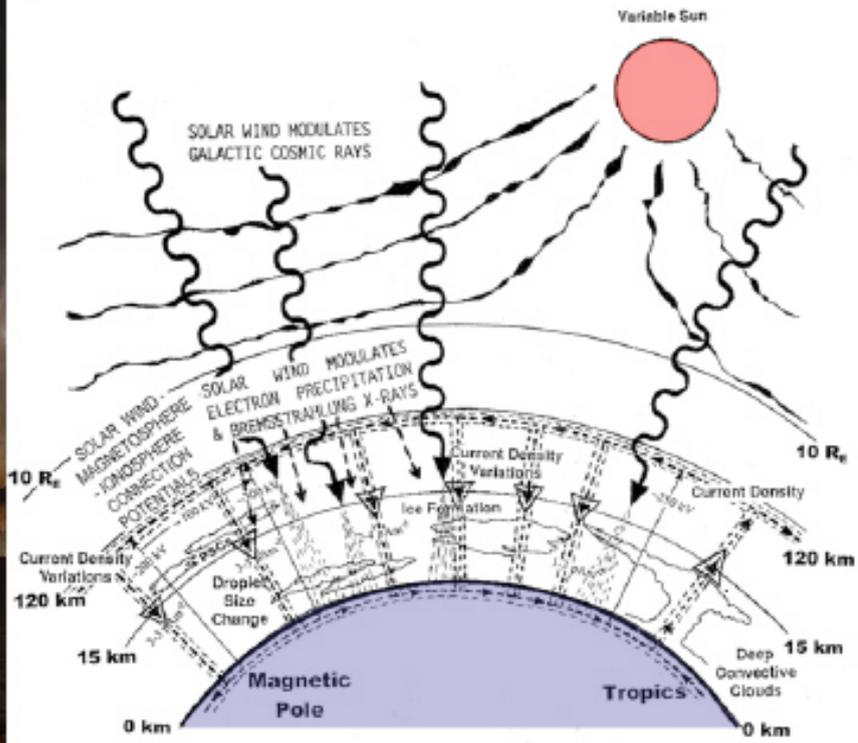
Global Circuit
エアロゾル分布

↕ 気象物理

雲分布変化
気候変動

Global Electric Circuit

FORCINGS BY SPACE PARTICLE FLUXES



TGFs

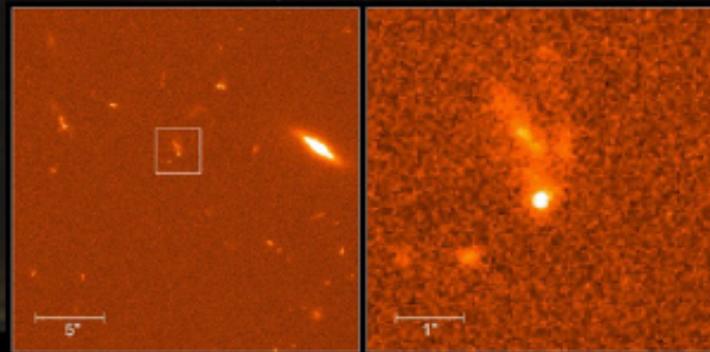
(Terrestrial Gamma-ray Flashes)



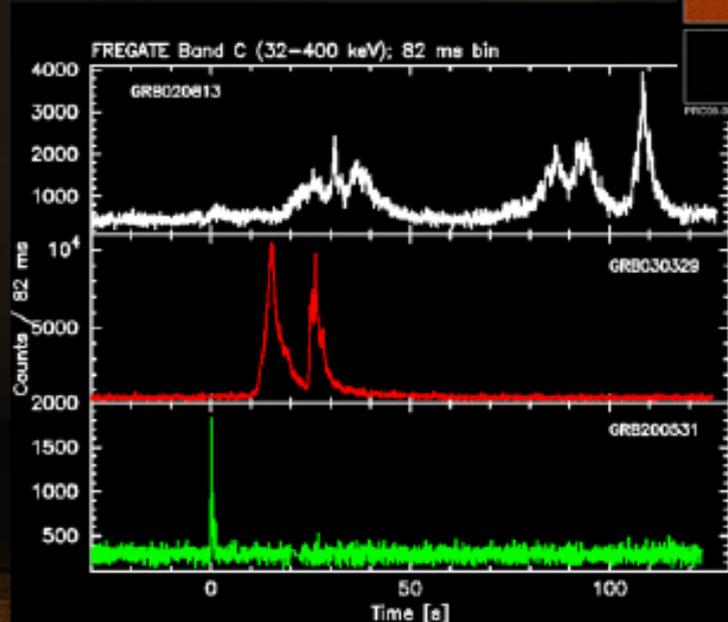
地球に飛来するガンマ線

GRB (Gamma-Ray Burst)

- ・ 継続時間: 数秒〜数時間



Gamma Ray Burst GRB990123
Hubble Space Telescope • STIS



↑ HSTによるGRB

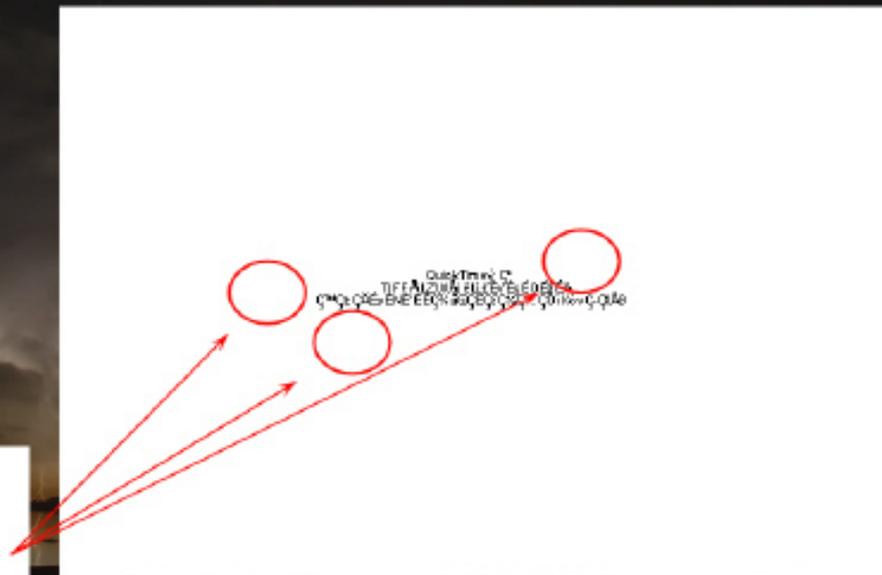
← HETE-2によるGRB

地球ガンマ線

TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash)

1994年に地球起源のガンマ線放射を発見

- GRB観測
- 核爆発モニタ

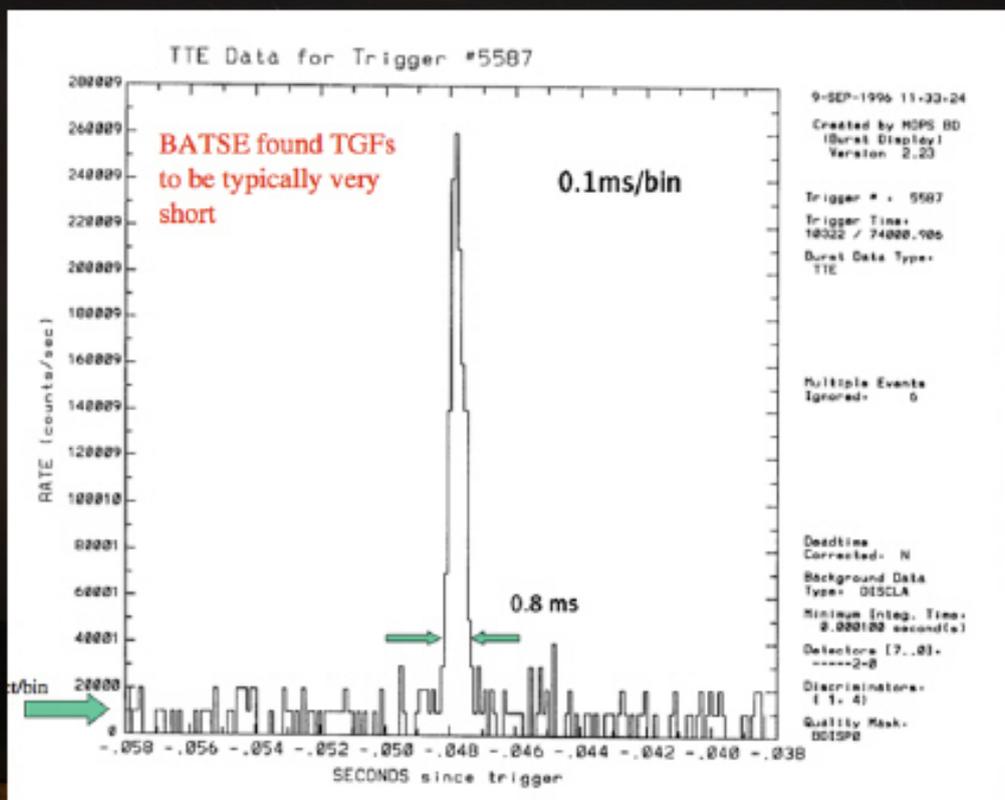


Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) /
Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

Fishman et al. [1994]

地球ガンマ線

TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash)

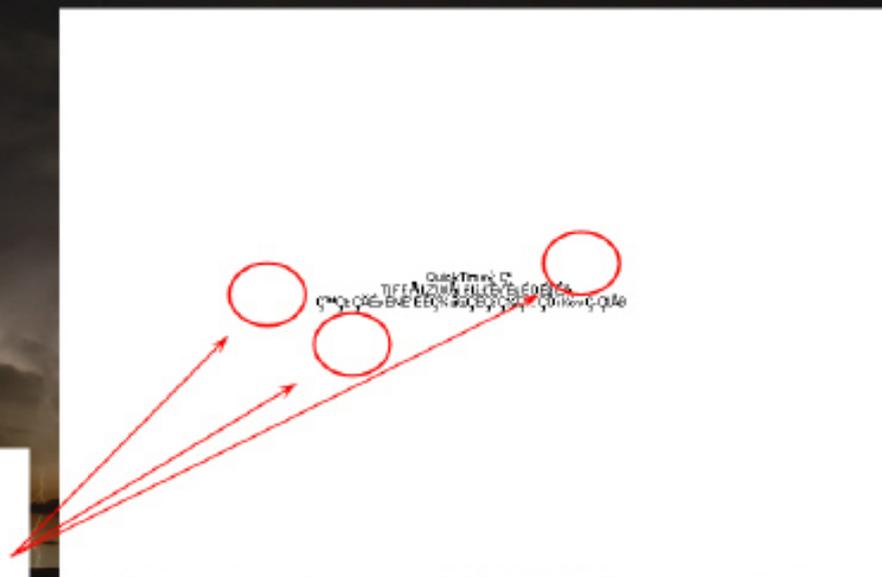


地球ガンマ線

TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash)

1994年に地球起源のガンマ線放射を発見

- GRB観測
- 核爆発モニタ

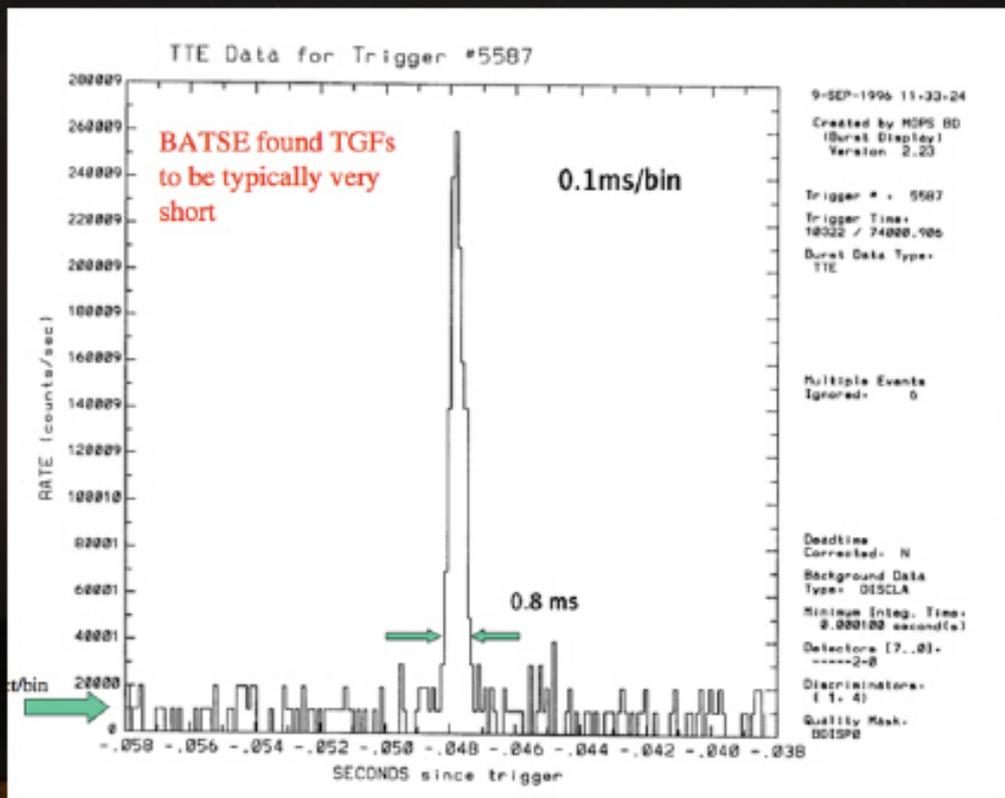


Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) /
Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

Fishman et al. [1994]

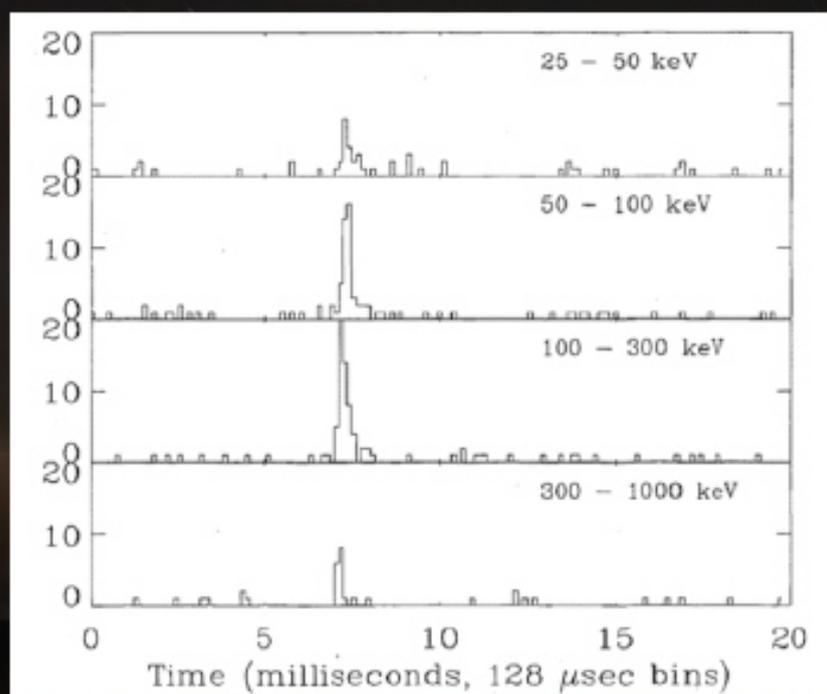
地球ガンマ線

TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash)



地球ガンマ線

TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash)

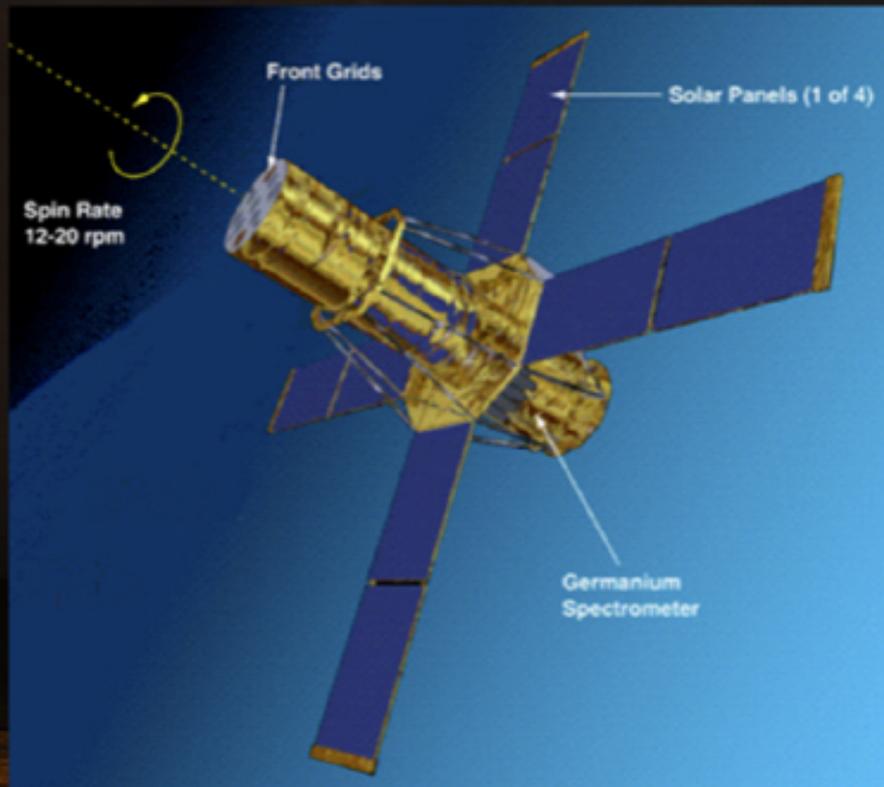


Nemiroff et al. [1997]

BATSEで観測されたTGFsはたかだか50例程度...

RHESSI衛星によるTGFs観測

(Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)



- Solar Flareの観測
- TGFの観測

地球ガンマ線

・ RHESSI衛星によるTGF観測

Smith et al. [2005]

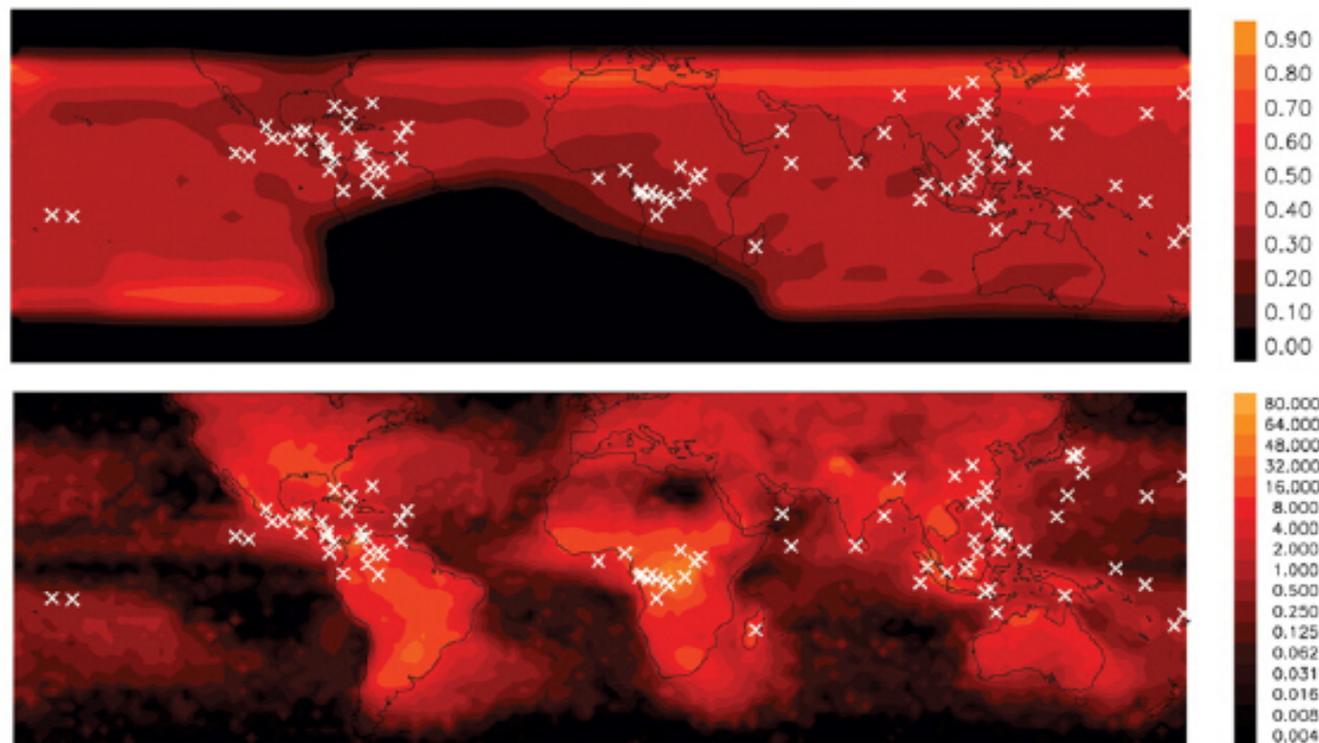
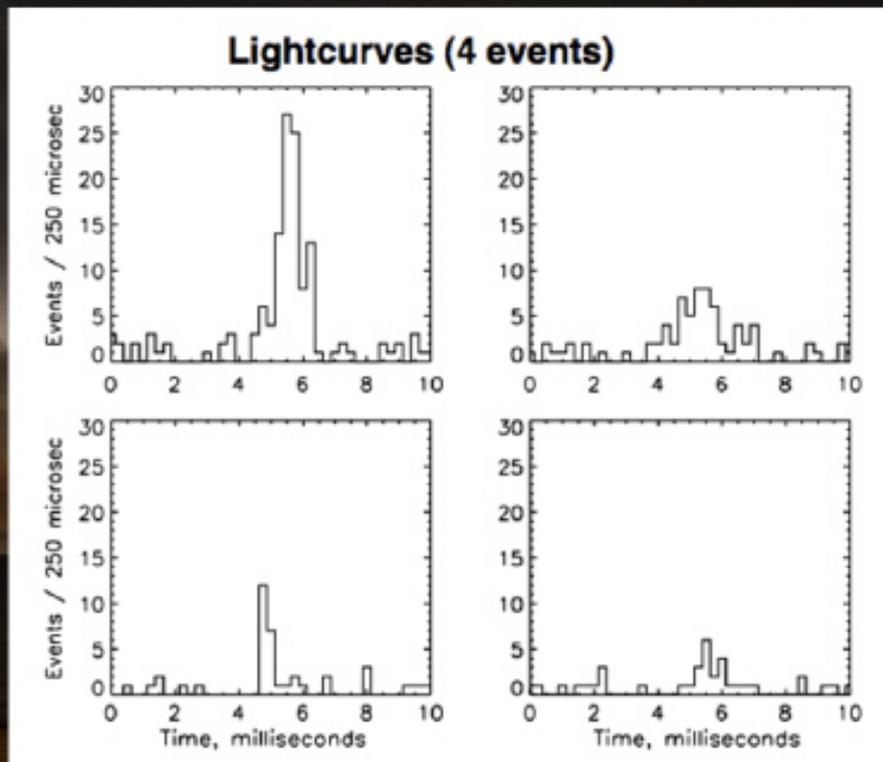


Fig. 1. RHESSI position during each recorded TGF, plotted over (i) the expected distribution of observed TGFs if the population were evenly distributed over the globe, with the scale in fraction of maximum exposure (top); and (ii) long-term lightning frequency data (29), with the scale in flashes per square kilometer per year (bottom).

地球ガンマ線

- RHESSI衛星によるTGF観測
- > 500 TGF events
- 頻度 = 1 event / 2 日
- 雷放電に起因?

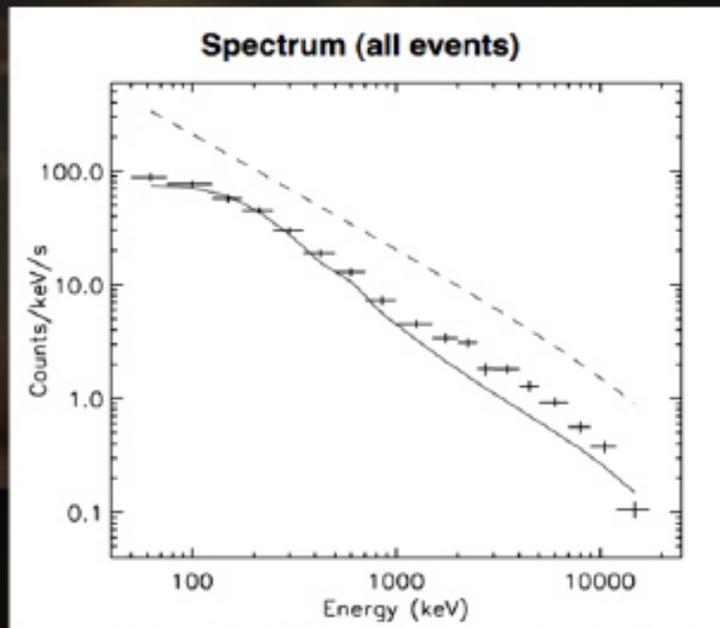
Smith et al. [2005]



地球ガンマ線

- 平均エネルギースペクトル
- 20 MeV程度までのエネルギーレンジ

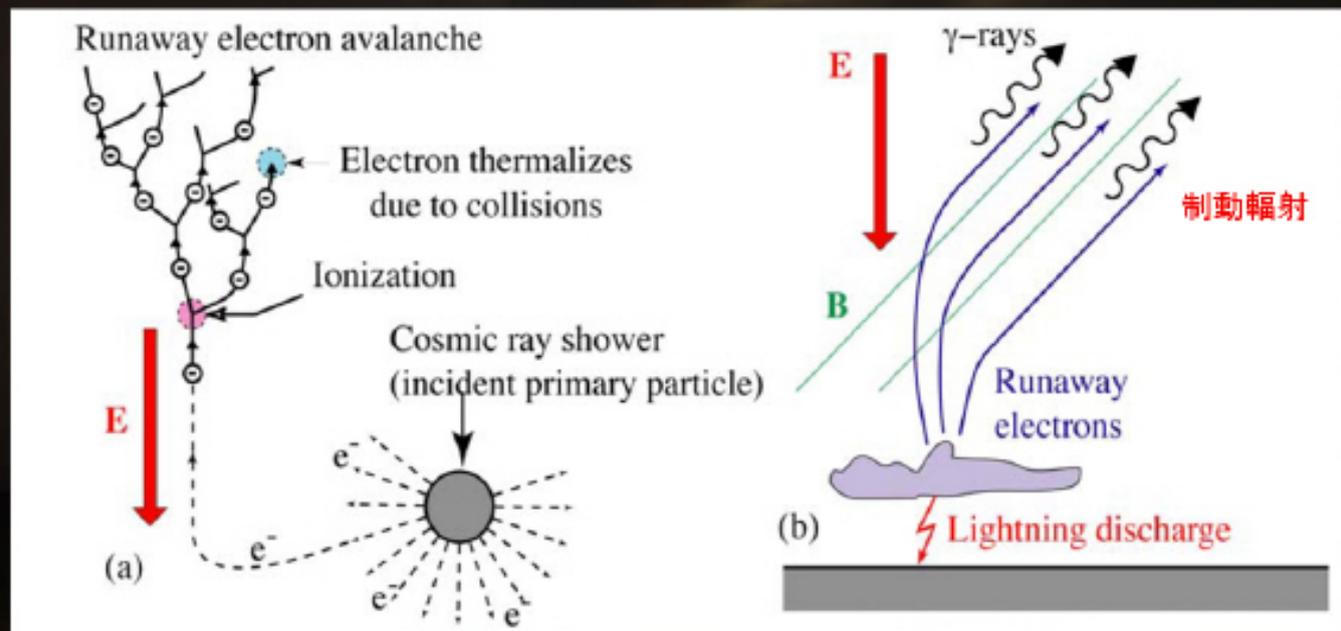
- “+”線 : 平均スペクトル
- 実線 : 検出器の感度を補正したときのスペクトル
- 波線 : $E_{\text{cut}}=35$ MeVを仮定したときのエネルギースペクトル



Smith et al. [2005]

TGFの発生メカニズム?

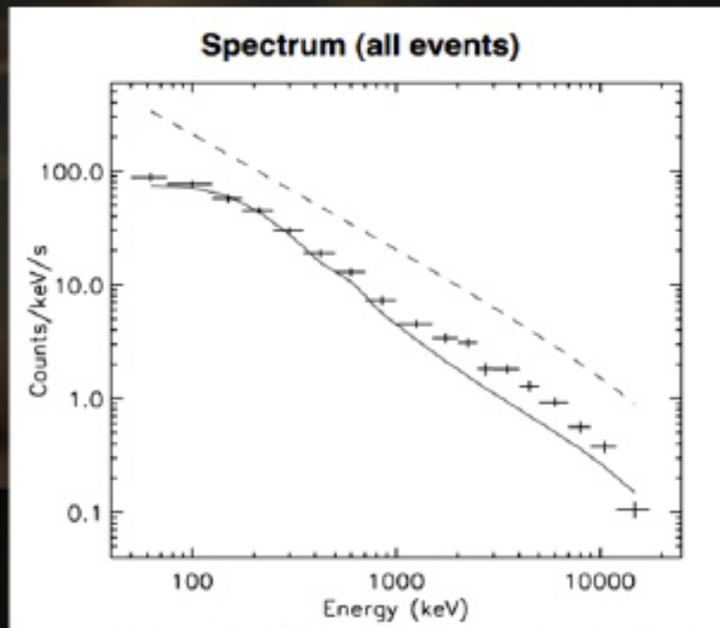
CRsによる2次電子生成 → 準静電場加速 →
 逃走電子生成 → 制動輻射 → ガンマ線



地球ガンマ線

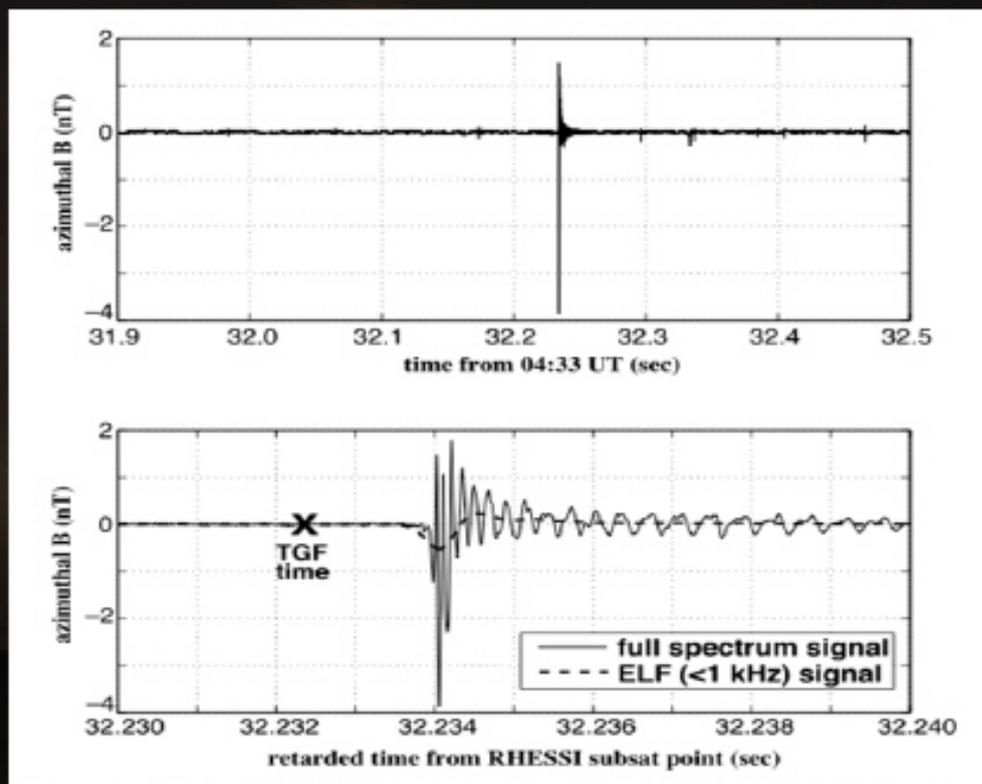
- 平均エネルギースペクトル
- 20 MeV程度までのエネルギーレンジ

- “+”線 : 平均スペクトル
- 実線 : 検出器の感度を補正したときのスペクトル
- 波線 : $E_{\text{cut}}=35$ MeVを仮定したときのエネルギースペクトル

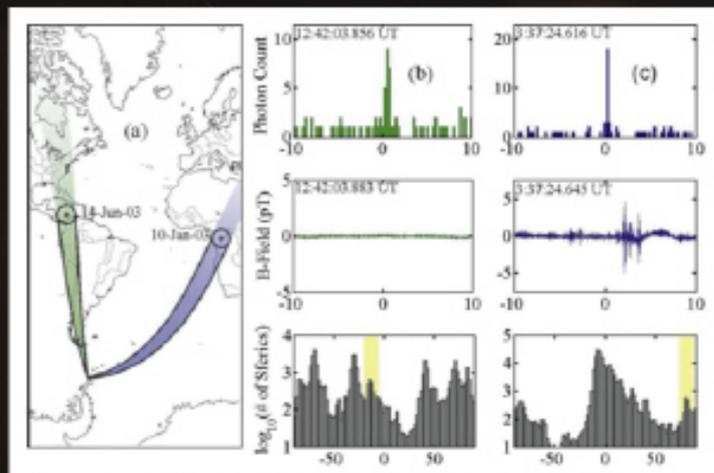


Smith et al. [2005]

地上雷放電電波観測データとの比較

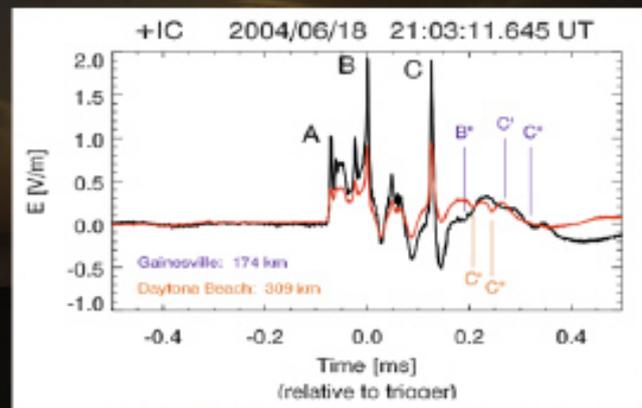


地上雷放電電波観測データとの比較



Inan et al. [2006]

← 先行放電はない...



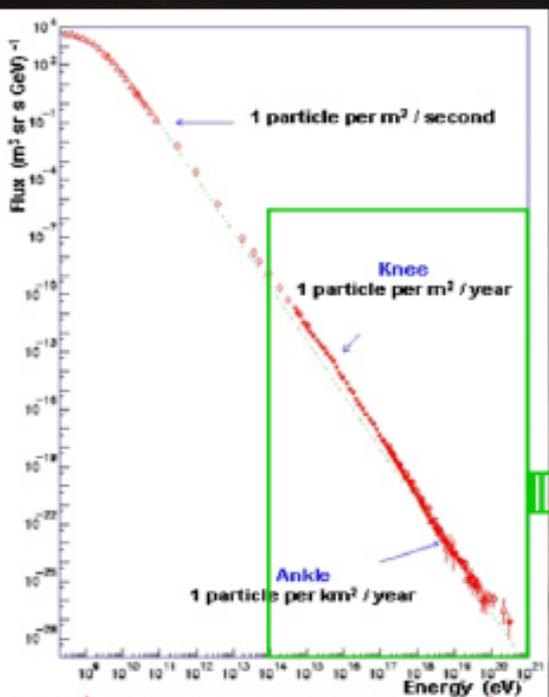
Stanley et al. [2006]

雲間放電に相关联している →

TGFsの発生メカニズムは何か？

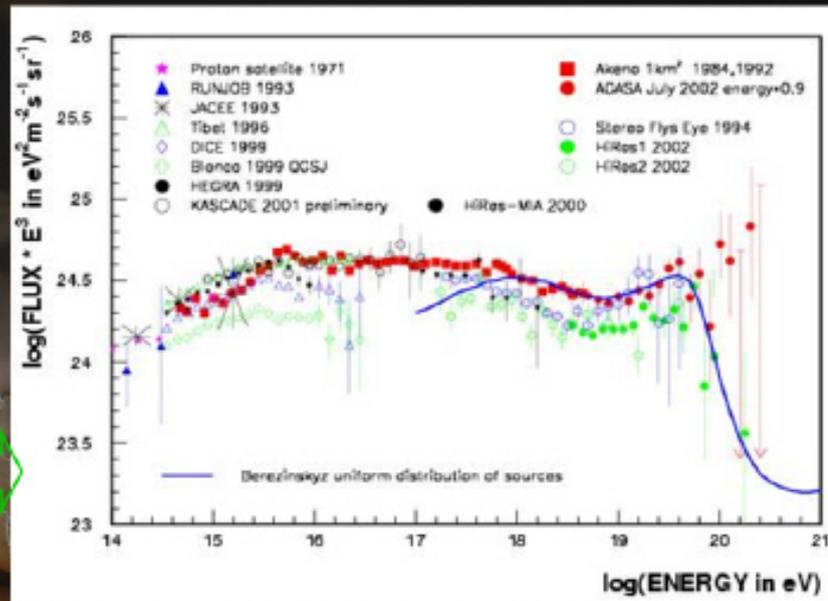
- RHESSIの観測結果は、TGFsが雷放電と関連していることを強く示唆する
- 地上雷放電電波観測データとの比較では、“親”となる雷放電が検出される場合もあれば、されない場合もある
- TGFsの発生と雷放電エネルギーとの間には相関が乏しい
- そもそも、RHESSIの時刻精度が悪いことが問題
→ 同時観測の必要性(宇宙からの光学・ガンマ線観測)

Energy Spectrum of CRs



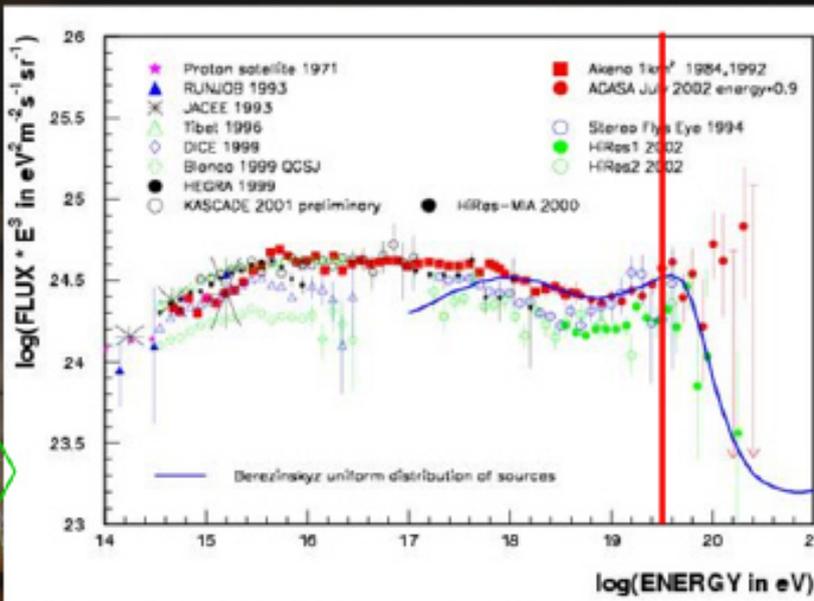
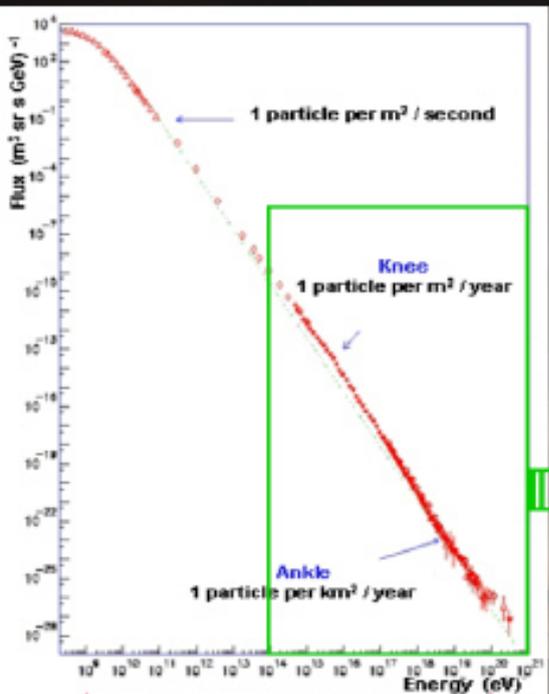
10^9 eV

10^{20} eV



Energy Spectrum of CRs

Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) Cutoff

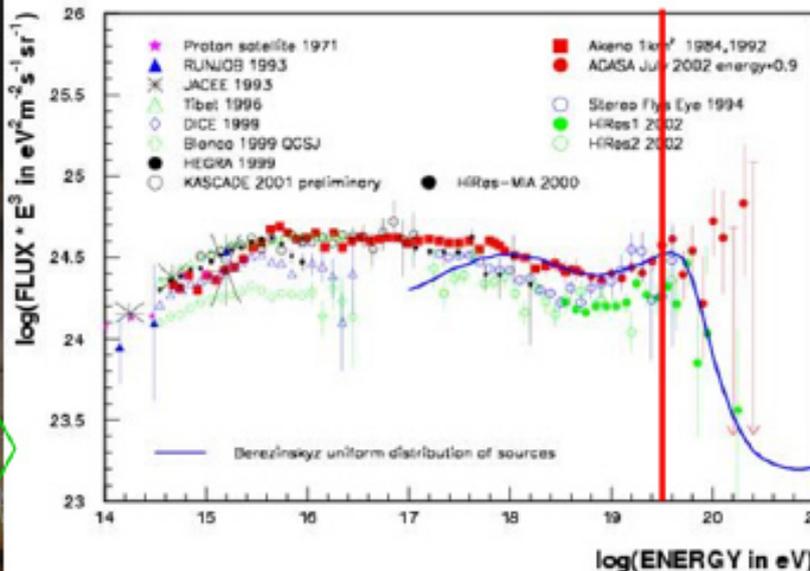
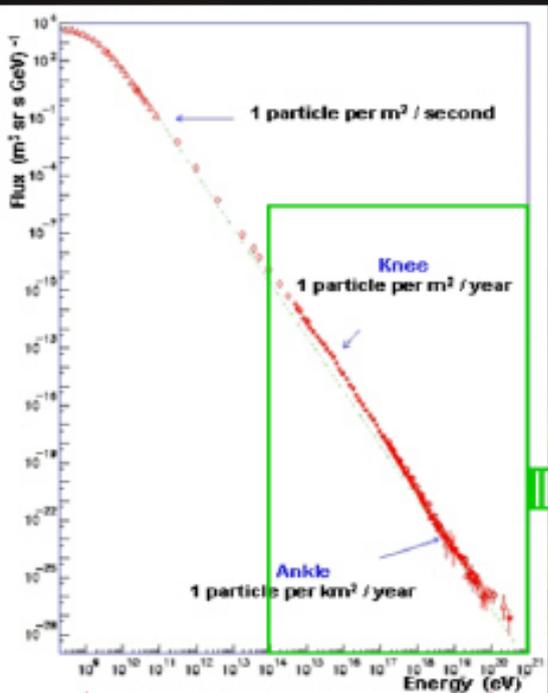


10^9 eV

10^{20} eV

Energy Spectrum of CRs

Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) Cutoff



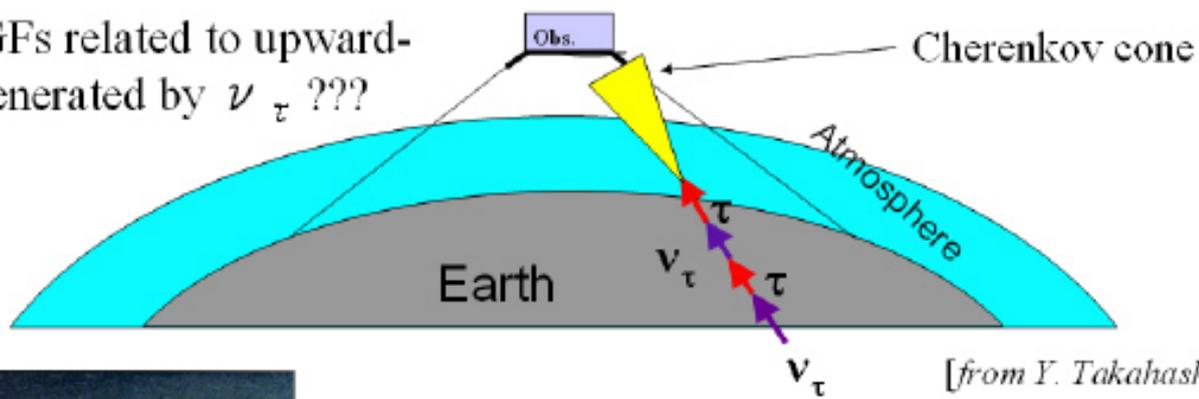
10^9 eV

10^{20} eV

- Source region in the universe??
- Propagation mechanism??

Relation between TGFs, blue jets, and ν_τ

Are TGFs related to upward-EAS generated by ν_τ ???



[from Y. Takahashi]



← Blue Jets

↓ Gigantic Jets

20mm camera

