放射線帯

50のなぜ

制　作
名古屋大学太陽地球環境研究所
りくべつ宇宙地球科学館
豊川市ジオスペース館

本冊子を James Van Allen 教授 に捧げます

本冊子の最終校閲段階の８月９日、アメリカの友人から「バンアレン教授が亡くなった」というメールが飛び込んできました。放射線帯の発見者というだけではなく、人工衛星探査による宇宙科学の父を失ったという気持ちです。亡くなる直前まで毎日研究室に出かけ、90歳でもレフェリー雑誌に論文を投稿するという、まさに巨人でした。

私がこの分野を専攻に選んだのは、中学生のときに実施された「国際地球観測年」の報道から受けた刺激が強く影響していますが、バンアレン教授はその国際地球観測年の組織責任者の一人だったのです。私と同じ想いで太陽地球系科学に入って来た研究者が多いことも、後に知りました。

私がバンアレン教授に初めてお会いしたのは81年の秋、樹々の黄色い葉が風に舞うアイオワ大学のキャンパス。第一印象は「何と穏やかな方」で、日本からの若手研究者を温かく迎えてくださったのを、昨日のことのように思い出します。

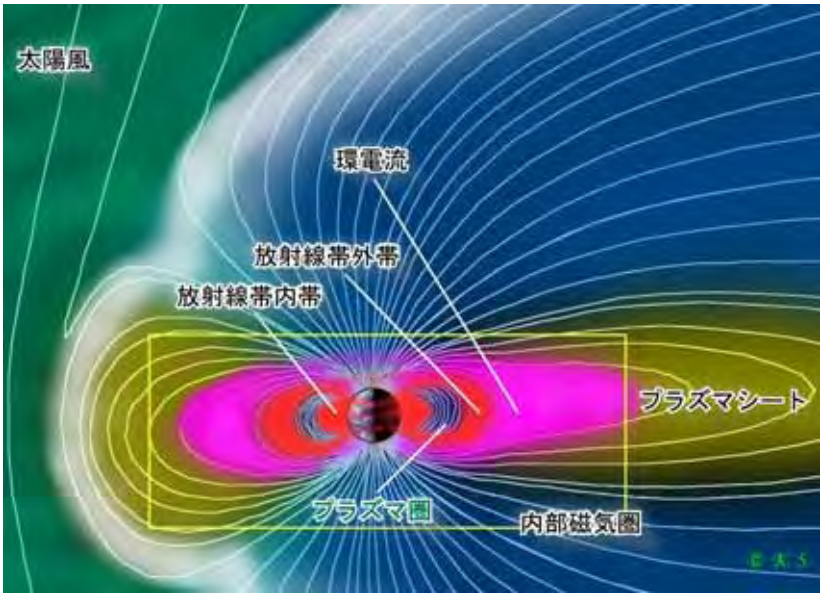
研究室でのバンアレン教授（2004年５月）
Tom Jorgensen/University of Iowa

その後90年代には、Journal of Geophysical Research の editors として一緒に専門誌の編集に携わったりしました。つい先日も、アメリカ地球物理学連合の仕事のためメールをやり取りしたばかりでした。

８月10日付けのニューヨークタイムズは、「宇宙科学のパイオニアというだけではなく、物理学者、天文学者を何世代にもわたって世界中に育て上げた教育者」とも評しています。

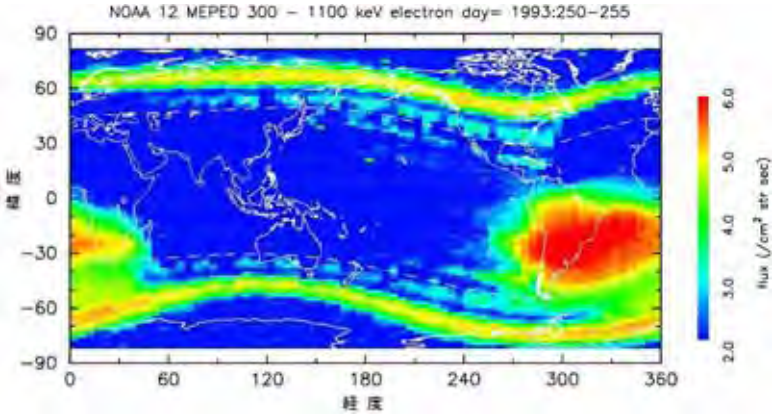
2006年8月

名古屋大学太陽地球環境研究所
広報委員長　上出 洋介

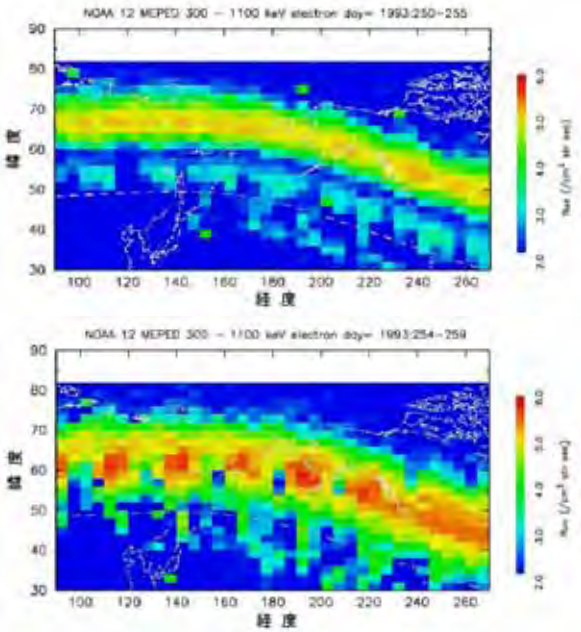


太陽風・地球磁気圏の模式図

地球に近い内部磁気圏とよばれる領域に、放射線帯（内帯、外帯）、環電流、プラズマ圏が分布している。夜側にはプラズマシートがある。太陽は左側にあり、白い細線は磁力線を表わしている。（本文 21）



高度 800 km で計測した電子（エネルギーが 300 keV 以上）の分布を地球規模で見た図。右側のスケールで示すように、電子の量は、青色から赤色へと近付くほど多い。南半球と北半球に、主に緑－黄色の帯状に分布しているのが外帯、その内側の主に水色部分が内帯。外帯と内帯の間にスロット領域（青色）がある。ブラジル上空で電子の量が多いことがはっきりわかる。（本文 23）



上と同様の計測による図の一部を拡大し、磁気圏が静かなとき（上）と磁気嵐が起きているとき（下）で比較。磁気嵐のときには、北海道上空にも放射線帯の電子が降り注ぐ。（本文 24）

もくじ

放射線とは

１．　放射線ってなに？
２．　放射線は身近にある？
３．　放射線は危ない？
４．　放射線は食べ物の中にもある？
５．　放射線は宇宙からもやってくる？
６．　放射線の半減期ってなに？
７．　アルファ線，ベータ線，ガンマ線ってなに？
８．　放射線は医療に役立つ？

放射線帯ってなに

９．　放射線帯ってなに？
１０．　放射線帯はいつ発見されたの？
１１．　放射線帯の存在は予言されていた？
１２．　放射線帯は偶然見つかったの？

13．　放射線帯を作る実験をしたってホント？
14．　磁場の中での粒子のふるまいとは？
15．　放射線帯粒子の基本的な運動ってなに？

放射線帯の特徴

16．　放射線帯はなにからできている？
17．　放射線帯はどんな形？
18．　なぜ電子の放射線帯は 2 つのベルトになっているの？
19．　どのくらいのエネルギーの粒子が存在する？
20．　なぜ放射線帯の電子はエネルギーが高い？
21．　放射線帯の領域には，ほかにどんな粒子の仲間がいる？
22．　なぜ地上には放射線帯の粒子がこない？
23．　ブラジル上空には，放射線帯粒子がたくさん降ってきている？
24．　放射線帯の粒子は日本の上空にもきている？
25．　もし地球に磁場がなかったら？
26．　放射線帯の電子は増えたり減ったりする？
27．　放射線帯の電子はどんな時に増える？
28．　放射線帯の電子が増えるしくみは？
29．　放射線帯の電子が減るしくみは？
30．　放射線帯に雷が影響しているってホント？
31．　人間活動も放射線帯に影響している？
32．　放射線帯の変動は，太陽の 11 年周期と関係する？
33．　新しい放射線帯ってなに？
34．　放射線帯の粒子はオーロラを光らせる？

放射線帯と宇宙活動

35．　宇宙放射線で人工衛星が壊れるってホント？

36．　宇宙飛行士は被害を防ぐためにどうしている？

37．　スペースシャトルで，放射線に関係した実験が行われている？

38．　放射線帯の粒子は宇宙旅行に影響しない？

39．　放射線帯の粒子がオゾン層に影響を与える？

40．　放射線帯をなくす計画って？

41．　宇宙天気研究とは？

42．　放射線帯粒子のデータを見ることはできる？

43．　放射線帯を目で見ることができる？

44．　放射線帯はどのように調べられているの？

45．　日本の衛星も放射線帯を調べている？

ほかの惑星の放射線帯

46．　宇宙空間には、放射線帯の粒子以外にどんな放射線がある？

47．　ほかの惑星にも放射線帯はある？

48．　なぜ放射線帯は磁場を持つ惑星だけにあるの？

49．　木星の放射線帯ってどんな形？

50．　放射線帯の謎とは？

1 放射線ってなに?

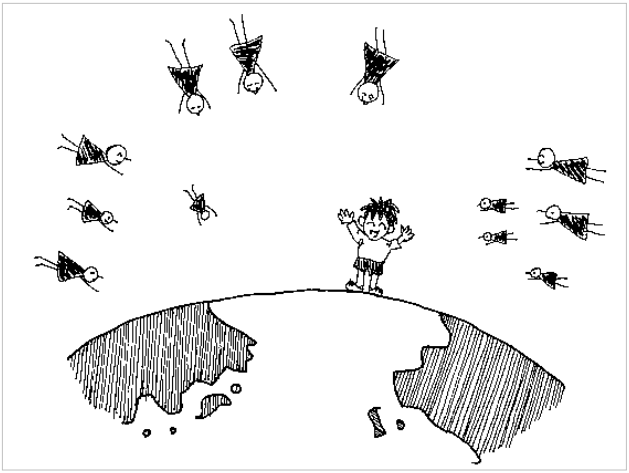
「放射線」とは一般に、「波長が短い電磁波」、そして「高速で動くエネルギーが高い粒子」の両方の意味で使われています。

たとえば、病院で見られる「放射線科」や「放射線治療」という言葉は、身体の内部の検査や治療に「電磁波」を用いるという意味で、「放射線」という語を使っています。

一方、宇宙から「放射線」がやってくるという場合には、「エネルギーの高い粒子」が、地上に降り注いでくることを指します。

この冊子では主に後者の意味で、エネルギーの高い粒子が地球のまわりの宇宙空間で、どのようなふるまいをしているかについて紹介します。

エネルギーが高いというのは、いったいどのくらい高いのでしょうね。



2 放射線は身近にある？

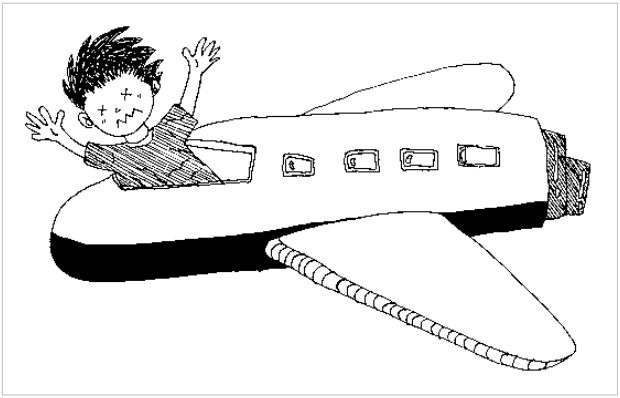
放射線は、いろいろなところからやってきます。私たちがふだんの生活で浴びている放射線は主に、ラドン、地殻、食物、そして宇宙からきます。

ラドンというのは、地中にあるラジウムという天然放射性物質からでてくる、放射性の気体。空気中で崩壊*し、さまざまな放射性物質になります。濃度が高い場合、肺ガンになる恐れもありますが、換気のよい住宅で暮らしていれば、ほとんど心配ありません。

放射線は宇宙からもやってきます。しかし、地表近くの空気などで弱められ、私たちの体にはほとんど届きません。とはいえ、宇宙へいけば被ばくしますし、高い高度を飛行するジェット機に乗ったときにも、地上にいるときよりも放射線を多く浴びることになります。

＊崩壊（ほうかい）：　ここでいう崩壊とは、放射性崩壊のことを指します。放射性崩壊とは、ある元素の原子が、陽子、中性子、電子等を放出することにより、他の元素へと変化することを意味します。この過程は、私たちのまわりでごく自然に起きています。

3 放射線は危ない?



私たちが日常の生活で浴びるような放射線の量では、健康に悪い影響を及ぼすことは、ほとんどないと考えられます。しかし、事故などで多量に浴びたとき、あるいはガン治療で病巣以外の部分が多量に放射線を浴びるとき、その被ばく量は、日常生活で受けるようなレベルに比べ、桁違いに大きくなります。その結果、皮膚炎やガン、遺伝子障害など、身体にさまざまな障害が発生することがわかっています。

後で説明するように、宇宙飛行士は、地上にいる私たちよりもずっと多くの放射線を浴びています。ですから、宇宙飛行士の健康を管理する上で、放射線の影響を正しく見積もることは非常に重要なのです。

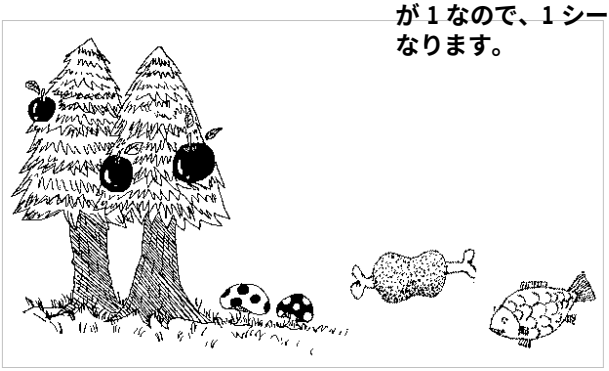
4 放射線は食べ物の中にもある？

私たちは、1 年間に合計約 2.4 ミリシーベルト＊の放射線を自然界から浴びています。その内訳を見てみましょう。

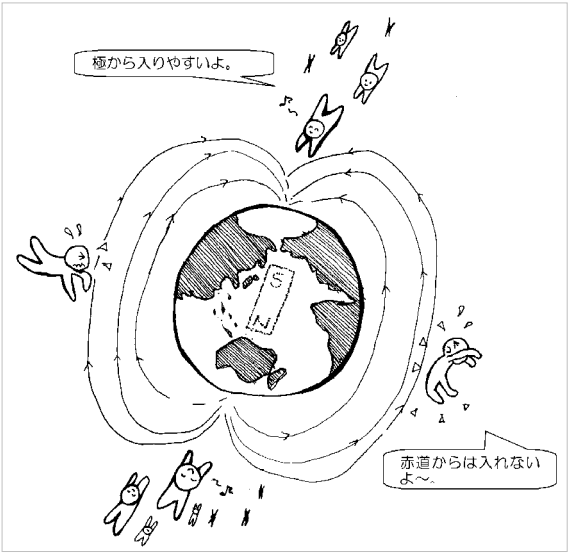
- 空気中にあるラドンという放射性物質から 1.2 ミリシーベルト
- 宇宙からやってくる宇宙放射線（5 を参照）による被ばく量が 0.4 ミリシーベルト
- 地面から約 0.5 ミリシーベルト
- 食べ物から約 0.3 ミリシーベルト

食べ物からも放射線の影響を受けるなんて、驚きではありませんか？　自然界に存在する放射線は、生物が昔からずっと浴びているもので、危険な存在ではありません。ちなみに、胸の X 線診断では、1 回で約 0.01 ミリシーベルト浴びます。

＊シーベルト：　放射線防護の目的に使われている放射線量の単位。実際の放射線の線量（単位はグレイ）に、生き物に与える影響を係数としてかけたものです。たとえば、ガンマ線の場合は、係数が 1 なので、1 シーベルト＝1 グレイとなります。



5 放射線は宇宙からもやってくる？



自然界の放射線のうち、宇宙からやってくるのが「宇宙放射線」です。この冊子では、遠い銀河系からくる「宇宙線」、太陽からくる「太陽放射線」、そして地球の磁気圏（地球の磁場の勢力圏）にある「放射線帯の粒子」を総称して「宇宙放射線」と呼びます。

地球の磁気圏の外からやってくる宇宙線、太陽放射線は、地球の磁場の影響を受けるため、地球の大気に入りやすい場所と入りにくい場所があります。一般に、磁極のある北極、南極地方では入りやすく、低緯度では入りにくいようです。

宇宙線はエネルギーがたいへん高いので（46 参照）、地球の高層大気から地上に向かってくることができます。しかし、途中で

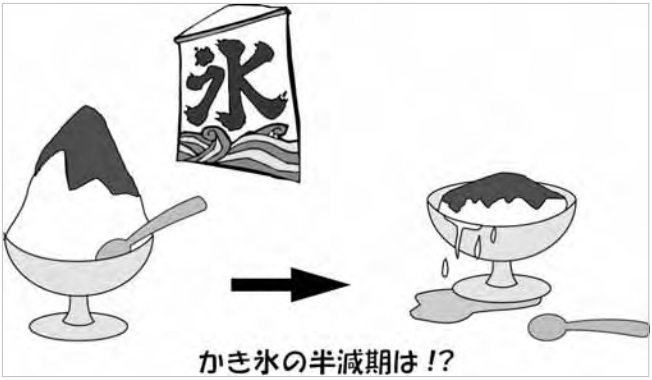
地球の大気と衝突して、そのエネルギーをどんどん失います（正確には、2 次宇宙線を作り出します）。ですから、地上で生活しているかぎり、健康に大きな影響はありません。一方、たとえば飛行機のパイロットや客室乗務員のように、極地方の上空を通る機会の多い職業の人たちは、地上での生活に比べて、宇宙からの放射線の影響を受けやすいことになります。

6 放射線の半減期ってなに?

物質を構成している原子には、ウランやラドンのように、構造が不安定なため、放射線を放出しながら崩壊していくものがあります。これらを放射性同位体と呼びます。

放射性同位体が放射線を放射・崩壊して別の元素に変わるとき、もともとあった元素の個数の半分が別の元素に変わる期間を指して、半減期といいます。これは同位体の安定度を示す値でもあり、半減期が短ければ短いほど、不安定であるということを意味します。

原子の崩壊は、自然界でふつうに起きている現象です。放射性同位体が持つこの性質を利用して、放射線量の減り方から、物質の年齢の測定が行われます。



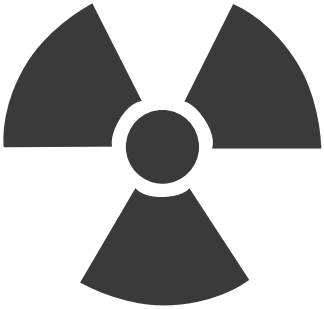
7 アルファ線, ベータ線, ガンマ線ってなに?

放射線に関係して、「アルファ線」、「ベータ線」、「ガンマ線」という言葉を聞いたことがあるでしょう。アルファ線はエネルギーの高いヘリウム粒子、ベータ線はエネルギーの高い電子（電子線ともいいます）、そしてガンマ線は波長が短い電磁波を指します。

もう少し詳しく説明しましょう。アルファ線は、ラジウム、プルトニウム、ウラニウム、ラドンなどの自然崩壊によって発生します。アルファ線は質量が大きく、正の電荷を帯びているため、水中では通常短い距離（1 mm 未満）しか進めません。紙 1 枚でもアルファ線を容易に止めることができます。

ベータ線は、トリチウム（水素の同位体）、炭素 14、リン 32、ストロンチウム 90 などの自然崩壊によって発生します。ベータ線は、そのエネルギー（すなわち速度）に応じて水中での透過距離は異なり、トリチウムの場合は 1 mm 未満です。ガンマ線は、コバルト 60 やセシウム 137 などの自然崩壊により発生します。

この 3 つ以外にも放射線として、「中性子線」、「陽子線」、「X 線」などがあります。



放射線・放射能のマークは、カリフォルニア大学バークレイ放射線研究所で生まれました。原子核（真ん中の円）から、アルファ線、ベータ線、ガンマ線が飛び出している様子を表わしています。

8 放射線は医療に役立つ?

医療の現場で、放射線がさまざまな形で利用されています。みなさんは、レントゲンという言葉を聞いたことがありますね。レントゲンというのは X 線を発見した人の名前で、発見は 1895 年のことです。

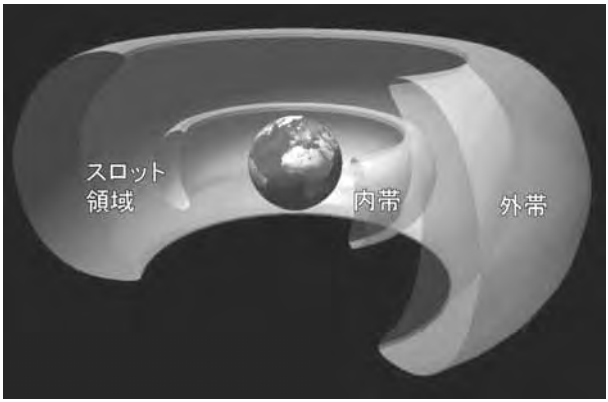
病院では X 線検査として、肺や胃のレントゲン撮影が行われており、病気の診断にとって非常に大切なものです。ほかにも、X 線とコンピュータを用いて人体の輪切りの画像を撮る「CT 装置」、病巣がガンかどうかを確認したり転移の有無を調べたり、治療後の効果を見るための「PET 検査」、強力な磁場により生じる水素原子の磁気共鳴現象を利用して画像を得る「MRI 検査」など、放射線はさまざまに利用されています。

9 放射線帯ってなに?

放射線帯（英語では radiation belts）とは、その名のとおり「エネルギーの高い粒子」がベルト状に地球を取り囲んでいる領域のこと。下の図で、地球の周囲に 2 つのベルトが描かれていますね。それが放射線帯（電子）です。地球のまわりをすっぽりと覆うように、粒子の群が存在しています。この領域には、地球周辺の宇宙空間で最もエネルギーの高い粒子が存在し、ダイナミックに変動しています。

大量の放射線粒子による被ばくは、人間の生命活動に大きな影響を与えるほか、後でお話しするように、人工衛星を誤作動させたり、故障させてしまうこともあります。放射線帯を作っている高エネルギー粒子の変動を把握することは、宇宙空間での安全な活動につながるのです。

この冊子では、放射線帯の構造・変化などについて、歴史的な話題や最新の知識も交えながらご紹介しましょう。



電子の放射線帯の模式図。ドーナツ状の放射線帯（内帯、外帯）が、地球を二重に取り囲んでいます。

10 放射線帯はいつ発見されたの？

放射線帯は 1950 年代末、アメリカ初の人工衛星であるエクスプローラーによって発見されました。1957 - 1958 年には、国際地球観測年（International Geophysical Year、略して IGY）という、「世界各国が協力して、惑星地球号の研究を進めよう」と設定されたプロジェクトが行われました。エクスプローラーは、IGY におけるアメリカの宇宙観測という、重要な役目を持っていたのです。日本初の南極観測も、この IGY にあわせて実施されました。

さて、このエクスプローラーには、宇宙から飛来する宇宙線の観測を目的として、アメリカ・アイオワ大学のバンアレン教授のグループが開発した、高エネルギー粒子を計測する装置が搭載されました。

放射線帯は、バンアレン教授によって発見されたことから、バンアレン帯とも呼ばれています。この発見の後、1960 年代の初頭にかけて、アメリカと当時のソビエト連邦は精力的に探査を行い、放射線帯の空間構造の全貌がわかってきました。

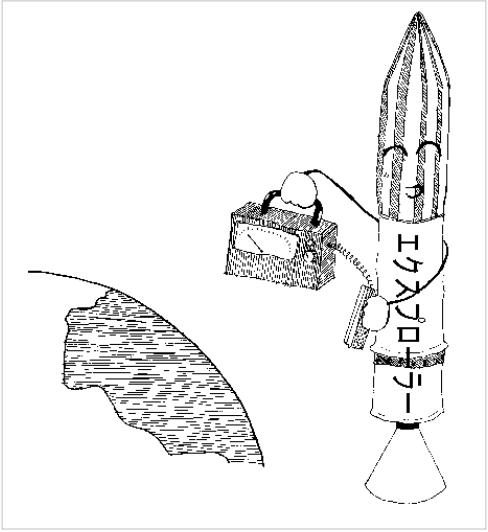
バンアレン教授

11 放射線帯の存在は予言されていた?

地球は巨大な磁石。地球磁気圏の中での荷電粒子（電気を帯びた粒子）の運動は、ステルマーと呼ばれる学者によって計算されました。20 世紀初めのことです。荷電粒子は磁気圏の中でたいへん複雑な動きをするため、その運動を求めるにはたくさんの計算が必要ですが、当時は、コンピュータはもちろん電卓だってありません。ステルマーは約 30 年もかけて、さまざまなパターンについて磁気圏中の荷電粒子の運動をまとめました。そして、磁気圏の外からエネルギーの高い粒子がやってくるとき、ある距離以上になると、地球には近づけないことを発見しました。また、この距離よりも地球に近いところにいる粒子は、永久に地球の磁気圏内に捕らえられてしまうことも明らかにしました。この捕捉領域が、放射線帯に対応するのです。

ステルマーの功績により、荷電粒子が安定に存在する領域が地球の近くにあることは、理論的にわかっていました。しかし、捕捉領域に荷電粒子を注入するメカニズムがわかっていなかったため、本当に粒子が捕らえられているかどうかも不明だったというわけです。

12 放射線帯は偶然見つかったの？



放射線帯の発見については、有名なエピソードが残っています。もともと、バンアレン教授のグループは、宇宙からやってくる宇宙線を測る目的で、放射線の量を測る装置「ガイガーカウンター」をエクスプローラーに搭載しました。

エクスプローラーの打ち上げ後、高度が上がるにしたがって、予想どおり高エネルギー粒子の数が増えていきました。ところが、しばらくすると、その数は 0 になってしまいました。バンアレン教授らは、人工衛星に積んでいたカウンターが壊れたのだと考え、もう一度実験を行いました。しかし、そのときもやはり同じように、0 になったのです。

この結果を見た研究グループの大学院生は、高エネルギー粒子の数が 0 になったのではなく、あまりにも多いために計測器が正確に動かなくなり、見かけ上 0 になったのではないかと考えまし

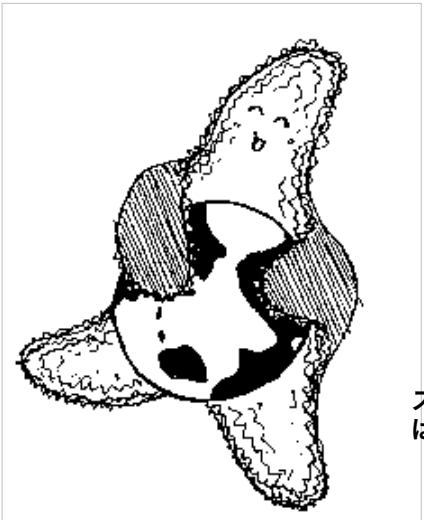
た。そこで今度は、数が多くてもきちんと計測できるように装置を改良し、実験を行いました。その結果、地球のまわりには、エネルギーの高い粒子が大量に満ちている領域、すなわち、放射線帯が存在していることが発見されました。

　こうして、宇宙線を観測するために行った実験から、「地球の磁気圏自身がエネルギーの高い粒子を捕捉している」という、予想外の発見が生まれたのです。この発見から今日に至るまで、人工衛星による地球磁気圏の探査が活発に続けられていますが、バンアレン教授の発見はまさに、「宇宙時代」の幕開けを飾るにふさわしい出来事となりました。

13 放射線帯を作る実験をしたってホント?

1960 年代、アメリカ合衆国と当時のソビエト連邦は、大気圏外での核実験を行っていました。特に有名なのは、1962 年に行われたスターフィッシュ実験と呼ばれるプロジェクトで、大気圏外で水爆の実験が行われました。この実験により、核爆弾によって作られた大量の高エネルギー粒子が磁気圏中にばらまかれ、人工的に放射線帯が作られたのです。

このときの人工放射線帯のふるまいは詳しく研究され、粒子がどのように運ばれ、分布するのか、また、どのように減っていくのかなど、放射線帯の粒子の研究に役立てられました。しかし、人工的に作られた放射線帯は非常に強かったため、実験後は数年以上にもわたり、自然に存在する放射線帯の状態が大きく変わってしまいました。現在では、大気圏内外での核実験は禁止されています。

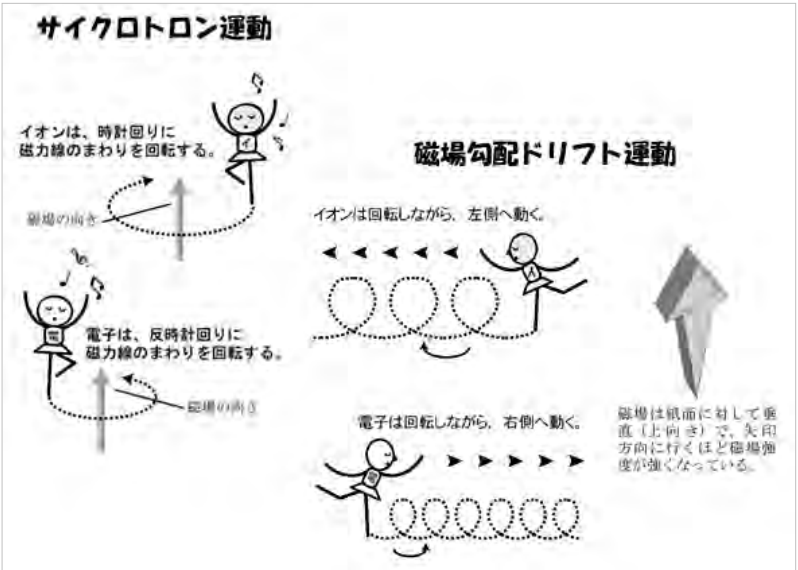


スターフィッシュ（starfish）は、英語でヒトデのことです。

14 磁場の中での粒子のふるまいとは?

磁場の中に荷電粒子をおくと、ローレンツ力と呼ばれる力が働き、運動を始めます。このとき、粒子は磁力線にまきつくように運動します（サイクロトロン運動）。磁場の強さが均一ではない場合、粒子は磁場の強さの変化によっても運動します（磁場勾配ドリフト運動）。さらに、磁力線がカーブしている場合（曲率を持っているといいます）、このカーブの変化の度合いによっても運動します（磁場曲率ドリフト運動）。

サイクロトロン運動、磁場勾配ドリフト運動、磁場曲率ドリフト運動は、磁場の中にいる荷電粒子の代表的な運動パターン。放射線帯の粒子も、地球磁場の中で、この 3 つの基本運動にしたがって分布しているのです。ちなみにドリフトというのは、「漂う」という意味です。

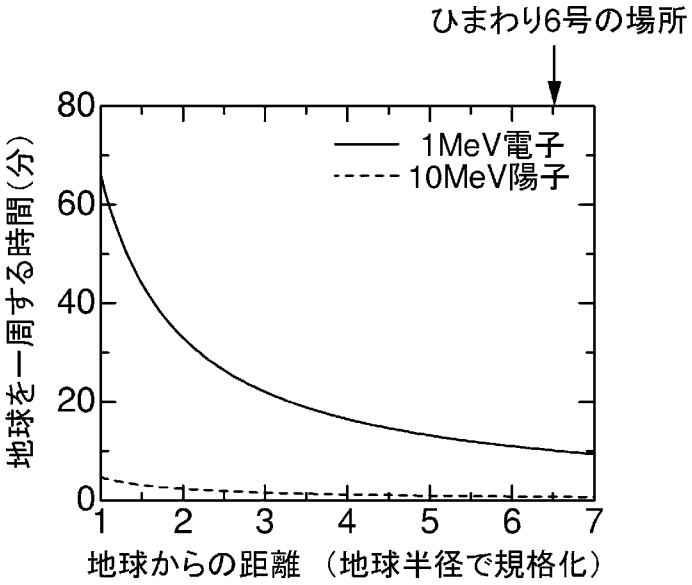


15 放射線帯粒子の基本的な運動ってなに？

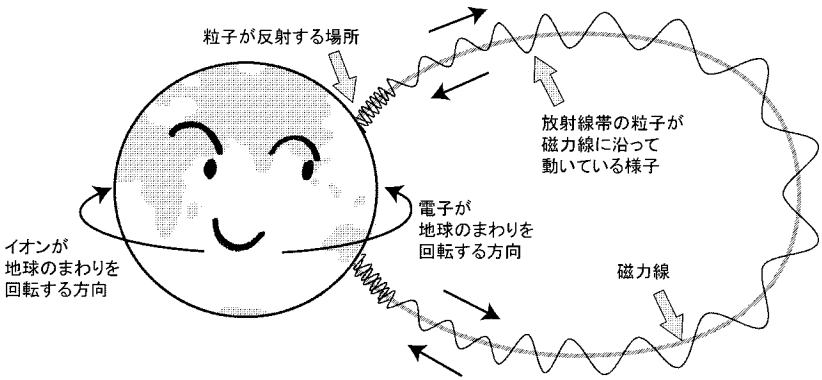
磁場の中での粒子の運動には、サイクロトロン運動、磁場勾配ドリフト運動、磁場曲率ドリフト運動があると説明しました。この運動に基づいて、放射線帯粒子は次の 3 つの基本的な運動をしています。

① 磁力線のまわりをぐるぐる回る（ジャイロ運動）
② 磁力線に沿って、南北を往復する（バウンス運動）
③ 磁力線を横切って、地球のまわりをぐるぐる回る（ドリフト運動）

このうち、①と②がサイクロトロン運動に、③が磁場勾配ドリ



粒子のドリフト運動（エネルギーが 1 MeV 電子と 10 MeV 陽子について）。



地球磁場の中での荷電粒子の運動。

フト運動と磁場曲率ドリフト運動に関係しています。③では、プラスの電気を持ったイオンは西向きに、マイナスの電気を持った電子は東向きに地球のまわりを回ります。そのスピードはエネルギーによって変わりますが、地球から 36000 km 上空の「ひまわり 6 号」衛星がいるあたりでは、約 10 分から 1 時間で地球を 1 周します。

16 放射線帯はなにからできている？

放射線帯は、エネルギーが高い荷電粒子からできています。プラスの電気を持った陽子、マイナスの電気を持った電子が存在していますが、ほかにもヘリウムや酸素など、プラスの電気を持ったイオンが存在することが知られています。

この中で酸素イオンなどは、実は、地球の大気中の酸素が宇宙空間に流れ出していったもの。大気中の酸素はもともと持っているエネルギーがとても低いため、磁気圏に流れていく間に、なんらかの形で加速される必要があります。どのようなメカニズムによって、酸素のような重いイオンが加速されるのかは、磁気圏物理学の大切な問題の 1 つです。酸素が流れていくと聞くと、地球からなくなってしまうのではないかと、心配になりますね。

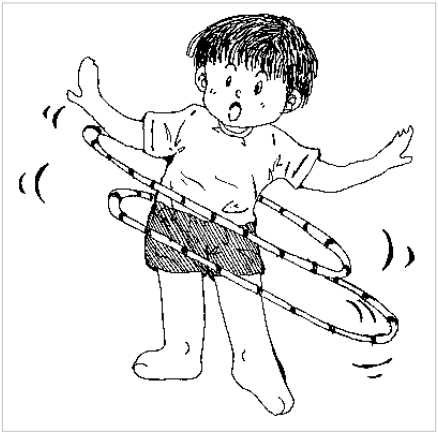
17 放射線帯はどんな形？

放射線帯の構造は、粒子の種類（電子なのか、イオンなのか）やエネルギーによって異なりますが、基本的には地球を取り囲むベルト状になっています。ドーナツ型といってもいいかもしれません。

電子の放射線帯は、赤道上空 3000 km あたりに電子が集中するベルトと、約 20000 km に集中するベルトからできています（9、19 の図を参照）。2 つのベルトのうち、内側のベルトは「内帯」、外側のベルトは「外帯」と呼ばれます。外帯は、ひまわり 6 号などがいる静止軌道付近まで存在します。2 つのベルトの間、つまり、地球の上空約 9000 km から約 15000 km の間には、放射線帯の電子は通常存在していません。この空洞の領域は、「スロット領域」と呼ばれます。

一方、陽子、イオンの放射線帯は、赤道上空 3000 km くらいに集中する 1 つのベルトからできています。

上に述べたような構造は、大きく変化することがあります。特に活発に変わるのは、電子の放射線帯。外帯が消えて再び現れたり、ふだん電子がいないスロット領域で急激に増えたりと、激しく変化します。



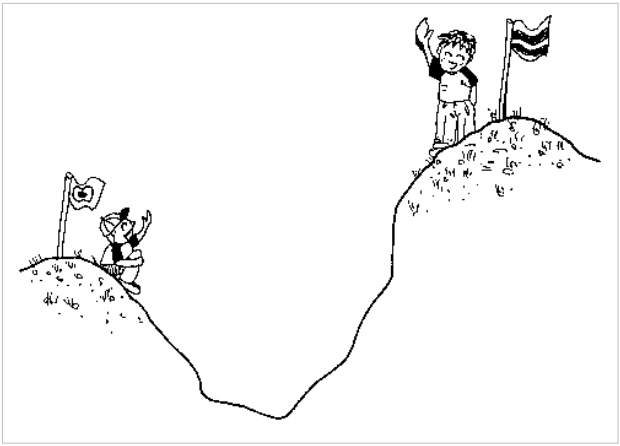
18 なぜ電子の放射線帯は 2 つのベルトになっているの？

17 でお話ししたように、電子の放射線帯は内帯と外帯の 2 重の構造を持っており、その間にあるスロットと呼ばれる領域には、粒子が存在しません。なぜベルトが 2 重になっているのかというと、もともと 1 つだったベルトに、粒子が存在しない領域ができたため、内帯と外帯に分かれたのだと考えられています。

では、どうして粒子はなくなったのでしょう？　放射線帯の粒子が減るしくみの 1 つに、地球の大気に落ちていくというプロセスがあります。スロット領域では他の場所に比べて、この落ちていく効率が高いためだという説が有力です。

このような放射線帯の 2 重構造は、電子だけに見られるユニークなもの。放射線帯イオンの分布は、1 重の構造です。木星や土星にある放射線帯も、リングや衛星などとの相互作用の結果、粒子が存在しない場所がありますが、地球のようなスロット構造はないと考えられています。

この冊子では、以下、電子の放射線帯を中心にご紹介します。

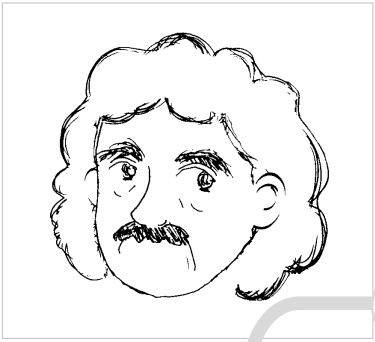


19 どのくらいのエネルギーの粒子が存在する？

アインシュタインの特殊相対性理論によると、電子の持っているエネルギー（静止エネルギー）は約 500 keV*。eV（電子ボルト）とは、粒子のエネルギーの単位で、1 eV の粒子が約 10000 度の温度に対応します。

放射線帯の中には、数百 keV 以上のエネルギーを持つ電子（相対論的電子と呼ばれています）が大量に存在します。現在のところ、エネルギーが数十 MeV*に達する電子と、数百 MeV に達するイオンが、放射線帯に存在していることが観測されています。このうち電子は、20 で説明するように、磁場の強いところに粒子が輸送された結果、エネルギーが高くなったのだとされています。

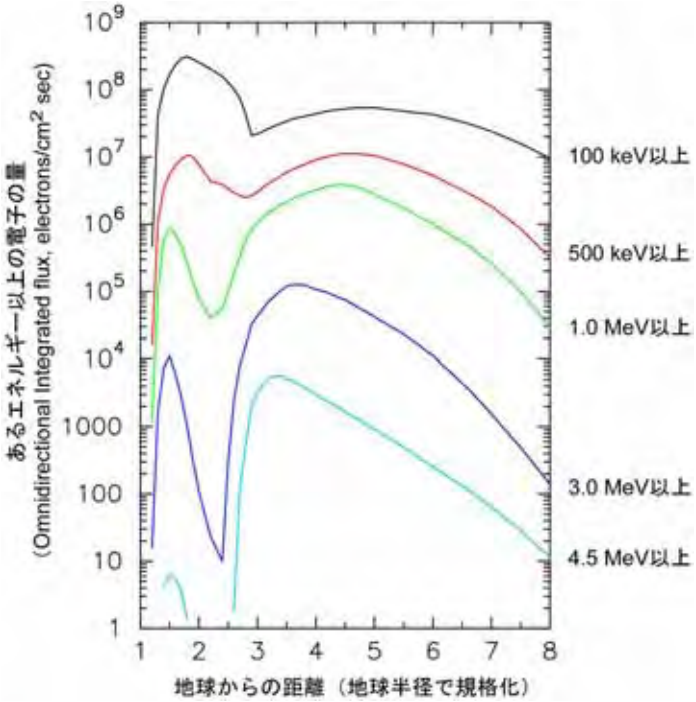
一方、数十 MeV 以上の陽子は、宇宙線が地球の大気に衝突して 2 次的な荷電粒子を放出するプロセス（CRAND: Cosmic Ray



アインシュタイン

相対性理論の発見を始め、いくつもの物理学上の重要な発見を成し遂げた研究者。

光のスピードに近いような粒子の運動は、アインシュタインの相対性理論を使うことで、正確に理解することができます。放射線帯の粒子の運動を理解していく上で、相対性理論は欠かせません。



いろいろなエネルギーごとの放射線帯電子の量が、地球からの距離でどのように変わるのかを表わしています（NASA の経験モデル“AE8-MAX”による）。

Albedo Neutron Decay と呼ばれます）によって、エネルギーの高いイオンが放出され、地球の磁場に捕らえられてできたと考えられます。

　エネルギーが高くなるにしたがって、粒子の数は少なくなっていくこともわかっています。

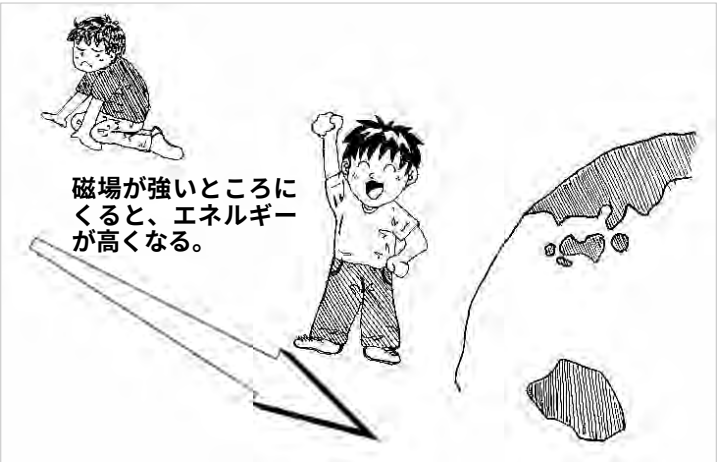
＊keV（キロ電子ボルト）、MeV（メガ電子ボルト）：　キロは 1000 倍、メガは 100 万倍を意味する言葉です。

20 なぜ放射線帯の電子はエネルギーが高い？

放射線帯の特徴の 1 つはエネルギーが高いということ。では、どうしてエネルギーが高くなるのでしょうか。これまでの研究から、地球が磁場を持っていることにその原因があるとわかっています。

磁場の中では、荷電粒子の「エネルギー」と、その粒子がいる場所の「磁場」の比が一定という関係があります。そのため、磁場が弱いところにいるエネルギーの低い粒子を、磁場が強いところに運ぶと、磁場が強くなったのにつりあう形で、粒子のエネルギーも高くなります。

放射線帯が存在しているのは、地球の磁場がとても強いところ。したがって、もともと磁場が弱いところにいた粒子が、地球の近くの磁場が強いところに運ばれてきた結果、エネルギーが高くなったというわけです。

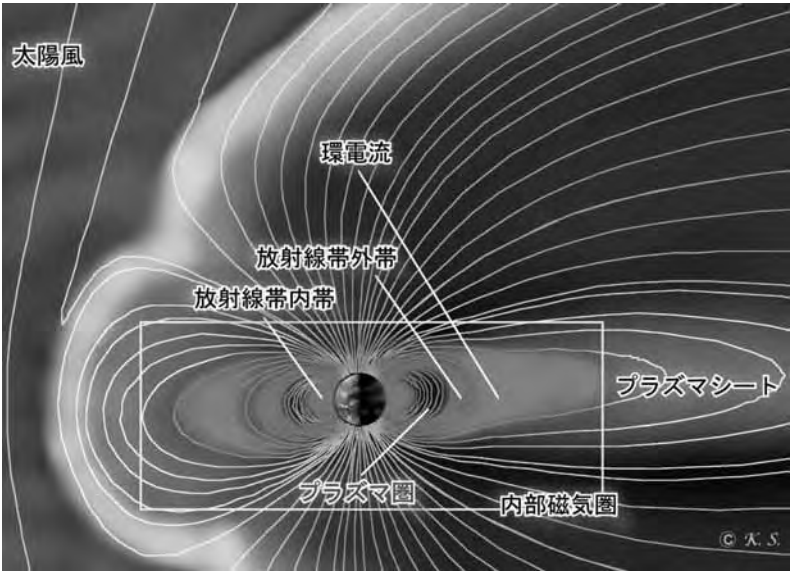


21 放射線帯の領域には，ほかにどんな粒子の仲間がいる？

放射線帯のある内部磁気圏（磁気圏の中で、静止軌道よりも地球に近いところ）には、放射線帯以外にも、エネルギーの異なる粒子たちが存在しています。一番エネルギーの低いのは、プラズマ圏と呼ばれる領域。わずか数 eV 以下の“冷たい”プラズマからできている、地球磁気圏で最も低エネルギーであり、最も密度の高い領域です。プラズマ圏は、地球の大気が磁気圏にわきだすことでできています。

主に数十 keV の“熱い”イオン、電子で構成される、環電流*と呼ばれる粒子群もあります。環電流は、磁気圏の夜側のプラズマシートと呼ばれる領域から、内部磁気圏にプラズマが注入されることで形成され、特に磁気嵐のときに発達します。磁気嵐のときには、地球上の磁場が数日にわたって減少しますが、この減少をひき起こしているのが環電流です。

放射線帯の存在する領域には、数 eV のプラズマ圏から数十 MeV の放射線帯まで、エネルギーが 6 桁以上も違うプラズマ、



太陽風・地球磁気圏の模式図（カラーページ参照）。

粒子が同時に存在していることになります。これまで、放射線帯の高エネルギー粒子の変動は、プラズマ圏や環電流を構成する比較的エネルギーが低いプラズマや粒子の変動とは、独立なものと考えられてきました。しかし最新の研究からは、放射線帯のふるまいは、プラズマ圏や環電流の変動と、密接に相互作用している可能性があることが指摘されています。

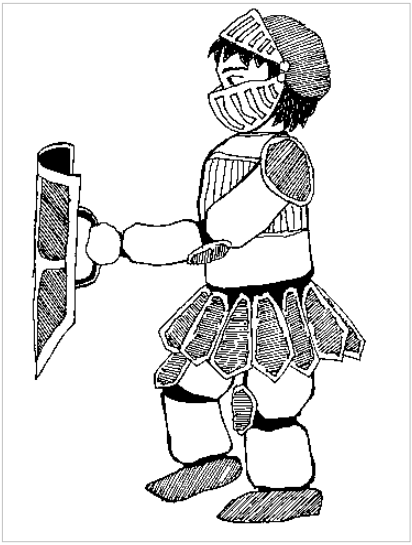
磁気圏で最高のエネルギーと最低のエネルギーの粒子とプラズマが共存し、お互いに相互作用しあっている、ダイナミックな領域が内部磁気圏だといえるでしょう。

＊環電流：　地球のまわりをリング状に取り囲んでいる電流のことで、リングカレントとも呼ばれます。磁気嵐のときには、特に強い環電流が流れます。

22 なぜ地上には放射線帯の粒子がこない?

実は、私たちの住む地上は、2 つのバリアによって放射線帯の粒子から守られています。1 つめのバリアは、地球の磁場。放射線帯の粒子は、磁力線に沿って南北に往復していて、ある一定の高度にくるとそれより下には進めず、磁力線に沿って上向きに戻っていきます（15 参照)。つまり、放射線帯の粒子は、地表には直接届かないことになります。

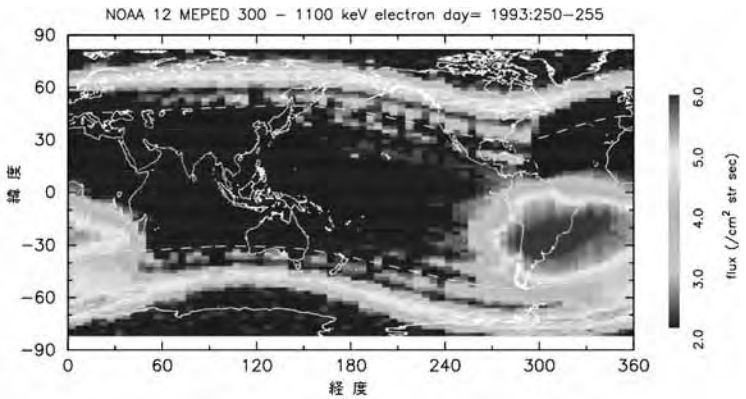
そして、もう 1 つのバリアは大気。南北に往復している粒子のうち、いくつかは反射されずにそのまま低高度に進んできます。粒子が低高度に進むにつれて、地球の大気の密度はどんどん濃くなり、粒子は大気と衝突してエネルギーを失っていきます。エネルギーが小さくなってしまうと、そのまま進み続けることはできません。ですから、放射線帯の粒子が直接地表にくることはないのです。ちなみに、約 1 MeV のエネルギーを持つ電子なら、高度 80 - 90 km まで入ってくることが知られています。



23 ブラジル上空には，放射線帯粒子がたくさん降ってきている？

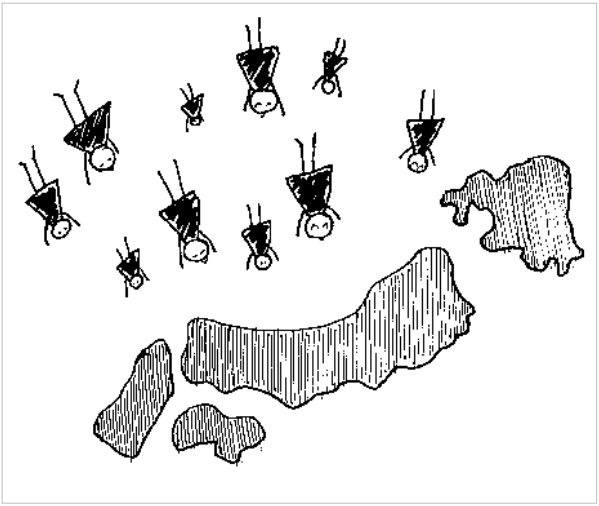
地球は巨大な磁石ですが、地球上の場所によって磁場の力は強かったり弱かったりします。ブラジルから南大西洋へかけては、現在地球上でもっとも磁場が弱い場所で、南大西洋磁気異常領域（あるいは、ブラジル異常領域）と呼ばれます。磁場が弱いと、地球にやってきた粒子が磁気圏に戻っていく（バウンス運動）高度がずっと低くなります。つまり、ブラジルの上空では、他の緯度・経度に比べて、たくさんの放射線帯粒子が磁気圏から降り注いでいるということ。高度 300 - 400 km を飛ぶスペースシャトルや人工衛星は、ブラジル上空で機器の誤動作の回数が増えます。このようなトラブルを避けるため、ブラジル上空で装置の一部をオフにする人工衛星さえあります。

南大西洋磁気異常領域は、ゆっくりと西側に移動していますので、それとともに放射線帯粒子が降り注ぐ場所も、西へ向かって動いていることが確かめられています。



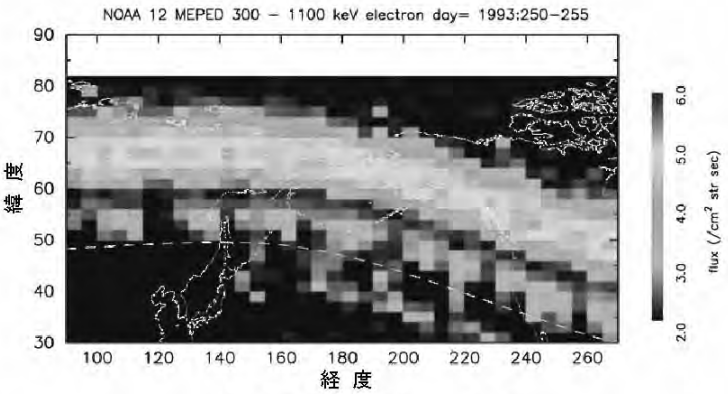
高度 800 km で計測した電子（エネルギーが 300 keV 以上）の分布を、地球規模で見た図（カラーページ参照）。

24 放射線帯の粒子は日本の上空にもきている？

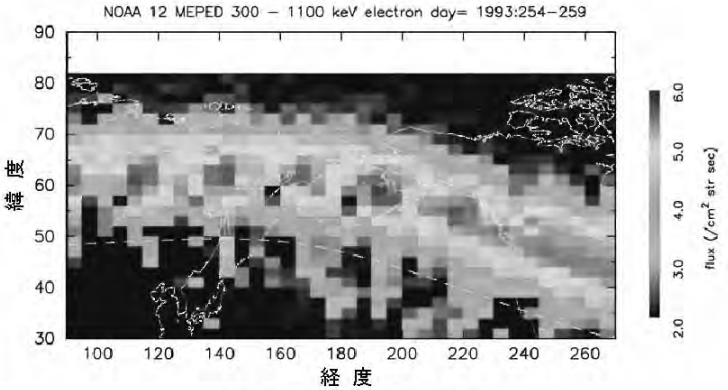


日本の緯度は北緯 20 - 40 度付近ですが、地球磁場の緯度ではもっと低緯度になっており、日本を通る磁力線は、放射線帯の中心位置よりも内側を通っています。そのため、日本上空に存在する放射線帯粒子は、ふつうはそれほど多くありません。

しかし、磁気嵐のように、放射線帯の中心が地球方向に移動し、また粒子の数がとても多く増えるときには、日本の上空にも放射線帯の粒子が降ってきます。事実、2003 年 10 月に発生した巨大磁気嵐のときには、日本上空にも大量の放射線帯粒子が降ってきたことが、人工衛星の観測からわかっています。



地球の磁気圏が静かなときの
高度800 kmでの電子の分布



磁気嵐が起きているときの
高度800 kmでの電子の分布

23 の図と同様の計測による分布図の一部を拡大。磁気嵐のときには、北海道上空にも放射線帯の電子が降り注ぎます（カラーページ参照）。

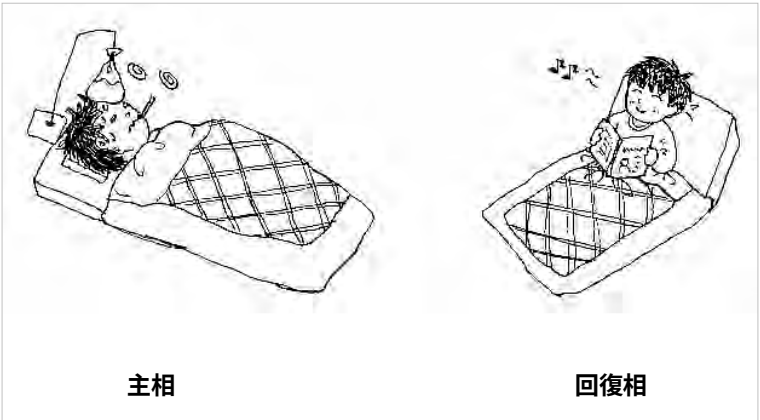
25 もし地球に磁場がなかったら？

地球の長い歴史の中で、何度か磁場の強度が弱くなったり、ときには南磁極と北磁極が入れ替わってしまったことがあります。では、地球に磁場がなくなってしまったら、いったいどうなると思いますか？

地球の磁場のおかげで、放射線帯の粒子だけではなく、宇宙線や太陽放射線も地球に直接やってくることはできません。磁場がなくなると、この「磁場のバリア」が効かなくなり、宇宙からの放射線が直接届くようになるでしょう。金星や火星のように磁場を持たない惑星では、「磁場のバリア」ではなく、「大気のバリア」が宇宙線や太陽放射線を防いでいるようです。

一方、地球に磁場があることによって、「安定に捕らえられた」エネルギーの高い放射線帯が存在します。そのため、磁場がない惑星には、放射線帯は存在しません。地球に磁場がなくなると、いわゆる「放射線帯」はなくなってしまうでしょう。

26 放射線帯の電子は増えたり減ったりする？



放射線帯の電子は、内帯と外帯の 2 重構造を持っています（9、17 参照）。外帯の電子のようすは、磁気嵐と呼ばれる磁気圏が大きく変動するときに、非常に激しく変化します。どのような変化なのか、もう少し詳しくお話ししましょう。

磁気嵐は、「主相」と「回復相」という 2 つの期間から成ります。地上の磁場が数時間から半日ほど減少する期間が「主相」、そのあと数日ほどかけてゆるやかに回復する期間が「回復相」。放射線帯外帯の電子の数は、主相で減少し、回復相で回復あるいは増大します。主相での減少は磁気嵐のたびに起こりますが、そのあと放射線帯の電子の数が回復するのか、増大するのかについては、磁気嵐ごとで異なります。

2003 年に発表された研究によると、約 50%の磁気嵐において回復相で放射線帯が増大、25%において回復、残り 25%においては減少したままということが示されています。27 で説明するように、放射線帯が増加するかどうかは、磁気嵐がどのような

太陽風の変動によって引き起こされたかにも、大きく依存しているようです。

　それでは、内帯も変化するのでしょうか？　内帯の粒子分布は安定しており、通常はほとんど変化しません。しかし、巨大磁気嵐のときは例外です。2003 年 10 月に巨大磁気嵐が起きたときには、内帯の領域での電子の数が大きく増加したことが観測されています（24 参照）。

　イオンの放射線帯の変化については、変動の詳しい様子はまだわかっていませんが、電子の放射線帯のような激しい変化はないようです。

27 放射線帯の電子はどんなときに増える？

放射線帯の電子は、磁気嵐のときに大きく増えます。最新の研究により、放射線帯の変動は、どのような太陽風が地球にくるかということと密接な関係があると明らかになりました。

磁気嵐を起こす太陽の現象としては、コロナ質量放出と呼ばれる太陽面の爆発現象（CME）と、高速太陽風が低速太陽風を圧縮した領域の通過に伴うもの（CIR）が知られています。静止軌道付近を含む放射線帯の外帯の電子は、CME よりも CIR がやってきたときのほうが、圧倒的に数が増えることが最近わかってきたのです。

一方、地球に近いところ（スロット領域のあたり）では、CIR がきても、放射線帯の電子の数はそれほど増えません。むしろ、CME にともない大きな磁気嵐が起きたときに増えます。たとえば、2003 年 10 月下旬に非常に大きな磁気嵐が発生して、日本でもオーロラが見えて話題になりましたが、このときの磁気嵐は CME によって引き起こされました。そして、地球半径の 2 倍付近のところでは、放射線帯電子の増大が過去 10 年間で最大になったことが観測されたのです。

28 放射線帯の電子が増えるしくみは?

放射線帯の電子の数は、いくつかの磁気嵐の回復相で非常に増えますが、その理由についてはいまも議論が続いています。

現在のところ、次の 2 つの異なる立場からのメカニズムが提案されています。1 つは、これまで紹介したように、粒子を磁場の強い場所に輸送することで粒子のエネルギーを上げ（断熱加速）、放射線帯の電子の数を増やすメカニズム。もう 1 つは、粒子を輸送させることなく、その場でなんらかの作用により粒子のエネルギーを上げる（非断熱加速）メカニズムです。

以前は、前者のプロセスによって放射線帯の粒子は増えると考えられていました。しかし 1990 年代後半からは、特にプラズマ波動*による非断熱加速が有効に働いて、後者のプロセスにより放射線帯の粒子が増える可能性が、クローズアップされてきました。

いま、この 2 つの異なるメカニズムがどのようなときに起こりやすいか、またどちらが粒子を増やすのに関わっているかなどについて、精力的に研究が行われています。

放射線帯の粒子が増えるしくみを解明することは、放射線帯の研究だけではなく、宇宙における粒子の加速の問題、そして自然がどうやって相対論的なエネルギーを持つ粒子を作り出すのか（19 参照）といった問題につながる、重要な研究テーマです。

＊プラズマ波動：　宇宙空間の 99%を占めているのがプラズマ。プラズマの中には、いろいろな波が存在しています。その波は、プラズマの中で情報を伝えたり、エネルギーの受け渡しをするなど、大切な役割を果たします。

29 放射線帯の電子が減るしくみは？

磁気嵐が起きると、その主相と呼ばれる期間に、放射線帯の外帯の電子が減少することはお話ししました。しかし、なぜこのような減少が起きるのかは、まだきちんとわかっていません。現在、減るメカニズムとして、次の 3 つが有力候補と考えられています。

① もともと放射線帯にあった粒子が、磁気嵐が起きると磁気圏の外に逃げ出してしまう。

② 磁気嵐が起きると強いプラズマ波動が発生し、もともと放射線帯にあった粒子が、プラズマ波動と相互作用することで大気に落下してしまう（30 参照）。

③ 磁気嵐が起きると、内部磁気圏の磁場の強さが減少し、その減少にあわせて（20 で紹介したように、磁場の強さと粒子のエネルギーには密接な関係があります）、粒子のエネルギーも減ってしまう。

①と②については、実際に逃げ出していく、あるいは落下していく粒子の観測がまだ不十分なため、どちらのメカニズムが、どのように粒子の消失に作用しているのかはよくわかっていません。

③のプロセスは、実際に磁気嵐のときに粒子を減らしていますが、このプロセスの場合、磁気嵐が終わると粒子の数はもとに戻るはずです。しかし、磁気嵐が終わっても、粒子の数がもとに戻らない例がいくつもあるので、③のプロセスだけでは不十分だと考えられているのです。

放射線帯の電子が減るしくみについては、どうして増加するのかという問題とならんで、未解明の大切な問題として盛んに研究が行われています。

30 放射線帯に雷が影響しているってホント?

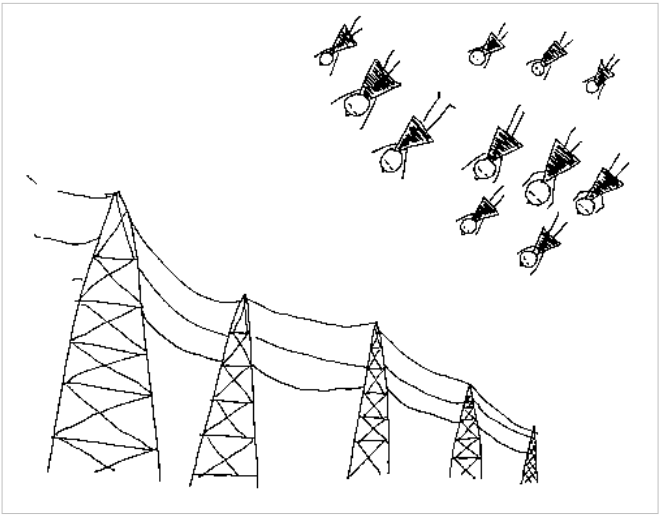
放射線帯の電子が磁気圏からなくなるメカニズムの 1 つに、プラズマ中で起きているプラズマ波動（28 参照）と粒子との相互作用があります。プラズマ波動によって、磁力線に巻きつきながら運動している粒子の軌道は変えられてしまいます。軌道が変化した結果、粒子は南北両半球を往復運動することができなくなり、ついには大気に落下していくというわけです。

磁気圏のプラズマ波動を起こすメカニズムにはいろいろありますが、雷もその重要な一つ。雷の発生にともない、プラズマ波動が磁気圏に伝わっていきます。このプラズマ波動が放射線帯の電子と出会うと、電子を大気に落としていきます。実際に人工衛星の観測では、雷によって生じたプラズマ波動が多く見つかっています。

31 人間活動も放射線帯に影響している？

放射線帯に雷が影響しているという話をしました。人間が出す電波も同じように、磁気圏に波動として伝わっていきます。たとえば、通信に使っている長波や、送電線に流れる電流によって生じる電波などが、地上から磁気圏に伝わることがわかっています。このような波動と放射線帯の電子が出会うと、雷のときと同様に電子は大気に落ちていきます。

人間活動による電波が、自然に存在している波動と比べて、どのくらい放射線帯電子の落下に影響しているのかは、議論が続いている問題です。人類が電気を使い始めたことによって、放射線帯が無くなっていく割合は増えているかもしれません。

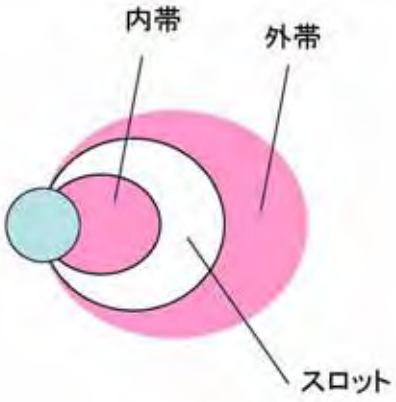


32 放射線帯の変動は，太陽の 11 年周期と関係する？

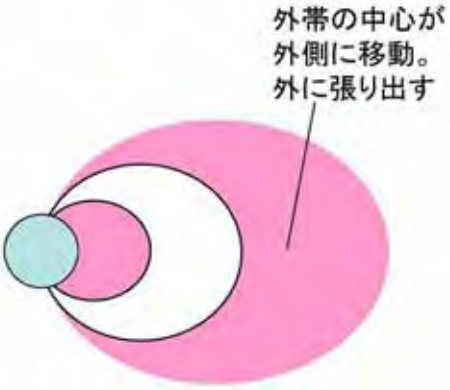
太陽活動が 11 年で変化することは、ご存じでしょう。たとえば、黒点の数は 11 年で増えたり減ったりしています。コロナ質量放出（CME）や太陽風のスピードなど、地球の磁気圏にいろいろな影響を及ぼす現象も、11 年という時間スケールで見ると変化することが知られています。

それでは、放射線帯にも、太陽の長期的な変化と関係する変動はあるのでしょうか？　実は、この 11 年というサイクルで、放射線帯の構造は変化しているのです。通常、放射線帯の外帯の中心（もっとも電子の数が多いところ）は、地球半径の 4 - 5 倍に位置しています。それが、太陽活動の極大期には、中心位置は地球方向にシフトし、逆に太陽活動が極小期に向かう下降期では、外側にシフトすることが最近の研究からわかってきました。そのため、静止軌道などが位置する外帯の外の方では、太陽活動の極大期付近には粒子の数が少なく、下降期には増加します。逆に、地球半径の 3 倍くらいの場所では、太陽活動の極大期付近で粒子の数が増加し、極小期に近付くにつれて減っていくのです。

放射線帯がなぜこのような長期的な変動を起こすのか、詳細なことはまだ明らかになっていません。先にお話しした（27 参照）磁気嵐の 2 つの原因（CME、CIR）の発生頻度が太陽活動とともに変化するために、放射線帯の構造も変わるという可能性が指摘されています。



太陽活動期



太陽活動下降期

33 新しい放射線帯ってなに?

これまで見てきたように、放射線帯は、電子については外帯と内帯の２重構造、イオンについては１重の構造を持っています。

それに加えて、1990 年代に入ると、新たな放射線帯が赤道面付近に見つかりました。この放射線帯は、主に 50 MeV 以下の、酸素、窒素、ヘリウム、炭素といった重イオンからできています。詳細を知るための研究が現在も続いていますが、宇宙空間に存在している宇宙線が、地球の磁場に捕らえられたものがその起源ではないかと考えられています。

これまでの観測によると、イオンのベルトの場所は、粒子の種類によって少しずつ異なります。ヘリウムの場合、分布の中心は地球半径の 2.5 倍のところ、鉄の場合は地球半径の 2 倍のところにあるようです。

重イオン粒子が増えるのは、磁気嵐の大きさ、そして太陽放射線の強度に依存していると考えられます。1 太陽活動周期 11 年のうち、数回しか起きない巨大な磁気嵐のときに、特に大きく増えているようです。

34 放射線帯の粒子はオーロラを光らせる？

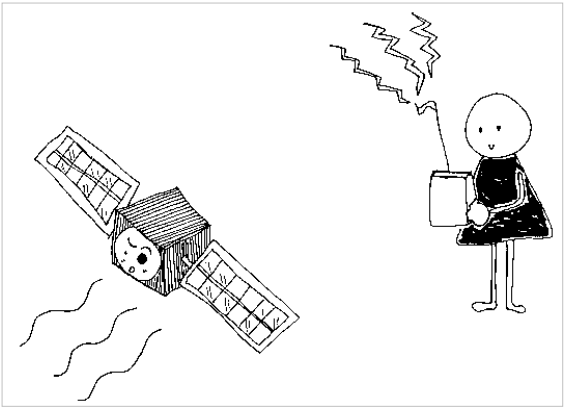
オーロラは、磁気圏から降り込んできた荷電粒子が、上空の大気と衝突して発光する現象。地球では、磁気圏の夜側のプラズマが豊富にたくわえられているプラズマシート（21 の図参照）から、数百 eV から 10 keV くらいの粒子が振り込んできて、オーロラを光らせます。発光する高さは、降り込んでくる粒子のエネルギーによりますが、おおよそ 100 - 200 km。

放射線帯の粒子だって大気に降り込んできているのですから、オーロラが光りそうなものですね。しかし、オーロラを光らせているプラズマシートの粒子に比べて、ずっと数が少ないため、発光が見えることはありません。もし、降ってくる放射線帯の粒子の数が多ければ、オーロラよりも低緯度で光るでしょう。実際、かつて水爆を使った実験により、磁気圏で人工的に放射線帯を作ったときには（13 参照）、赤道の上空でもオーロラが見えたということです。

35 宇宙放射線で人工衛星が壊れるってホント？

放射線帯の粒子はエネルギーがとても高いので、物質を通過することができます。人工衛星にはシールドがほどこされ、放射線粒子が機器に直接衝突しないよう工夫されていますが、それでもときにはシールドを突き抜けて、搭載コンピュータに直接ぶつかり、誤動作させて偽の命令を人工衛星にだすことがあります（ファントムコマンドと呼ばれます）。それに、人工衛星の中に電荷をためてしまい（帯電）、放電事故を起こす原因になったりもします。放射線帯粒子の影響で、衛星放送の中継がとだえてしまったこともありました。

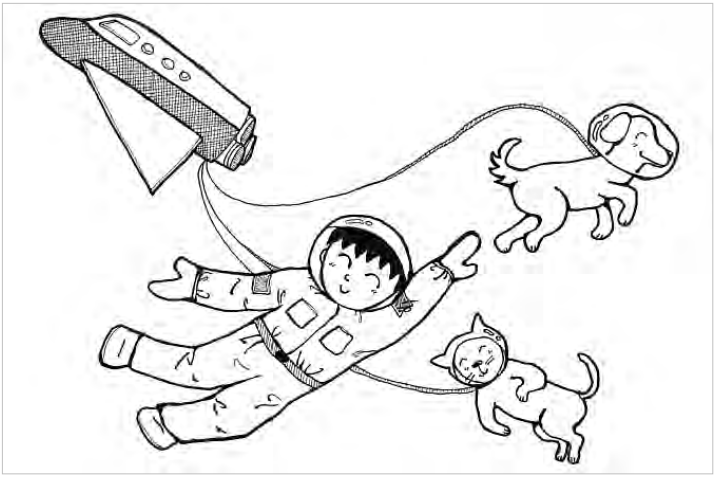
人類が宇宙を安全・安心に利用するために、放射線粒子の影響に強い衛星の設計や、搭載装置の開発が続けられています。さらに、放射線帯の粒子がいつ増えるのかといったことがわかれば、人工衛星の一部の装置のスイッチを事前に切るなどして、影響をおさえることができます。放射線帯の粒子の変動を把握し、予測を行うことの大切さがわかりますね。



36 宇宙飛行士は被害を防ぐためにどうしている？

放射線帯の粒子、太陽放射線、宇宙線は、宇宙飛行士の被ばくを引き起こす危険な存在。特に宇宙ステーションのような場所では、放射線帯の粒子と太陽放射線が大きな影響を及ぼします。

現在、世界中の機関で宇宙環境の監視が行われており、放射線帯粒子や太陽放射線の変動を捉えています。これらの放射線があるレベルを超えそうだというときには、レベルに応じて、船外活動の中止や、待避室での待機が勧告されます。放射線帯粒子の変動、特に、いつどこでその数が増えるのかを予測することは、宇宙での安全な活動のために欠かせません。

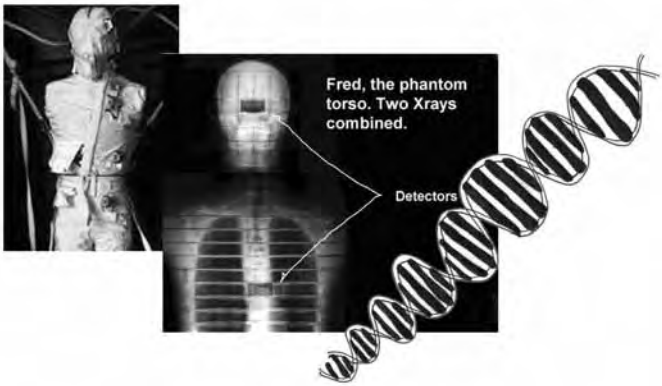


37 スペースシャトルで，宇宙放射線に関係した実験が行われている？

スペースシャトルでは、宇宙放射線環境の計測だけではなく、実験も行われています。スペースシャトルや国際宇宙ステーションの軌道領域での宇宙放射線を計測し、あわせて人体・生命への影響を評価するというのがその目的。

たとえば、人の体に似せた物質で人体モデルを作り、そのモデルに吸収された放射線を調べたり、放射線によって遺伝子などが損傷を受けた場合、どのように修復されるのかを研究するのです。日本の宇宙航空研究開発機構も、独自にプログラムを企画・実施しています。

ほかにも、無重力や高真空状態といった宇宙空間ならではの環境を活かして、生物、物質科学、材料製造など、さまざまな分野に関連して実験が行われています。人類にとって、宇宙空間は決して安全な環境ではありません。しかし逆に、宇宙空間の環境を利用することで、地上では難しい実験や研究を行うことができるのです。



人体への放射線の影響を調べるためのモデル。フレッドと名付けられています。

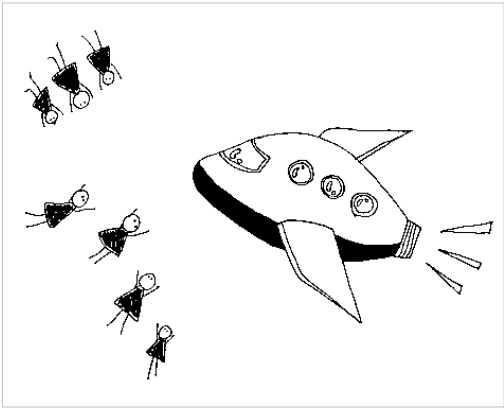
38 放射線帯の粒子は宇宙旅行に影響する？

放射線帯にある高エネルギー粒子がもし人間に当たったら、細胞が破壊されるなど、非常に危険です。高いエネルギーを持つ粒子は、宇宙船の機械を誤作動させることも....。放射線帯の粒子は、宇宙空間での人類の安全・安心な活動を脅かす危険な存在ですね。

現在、宇宙空間で、常に人間がいて活動しているところは、高度約 400 km の国際宇宙ステーションの領域。この領域の放射線環境は、もちろん人間にとって危険ですが、放射線帯の中心部よりは、粒子の数が少なくなっています。

しかし、将来、月や火星へ人間がいくことになったら、放射線帯の中心を横切らなくてはなりません。特に火星にいく場合には、地球の磁場のバリアの外に飛び出すわけですから、宇宙線や太陽放射線を浴びる量も、ずっと増えることになります。

後で説明しますが（40 参照）、放射線帯による影響を少しでも減らすために、たとえば、人工的に電波を放射して放射線帯粒子を減らす研究も行われています。人類が火星にいくときに備えて、アメリカは、2010 年代初めに科学衛星によって放射線帯を探査する計画を立てています。



39 放射線帯の粒子がオゾン層に影響を与える？

地球の上空にはオゾン層があり、太陽の紫外線から地上の生命を守っています。フロンガスはオゾン層を破壊するため、使用を規制されていることはご存じですね。実は、エネルギーの高い粒子も、オゾン層に影響を及ぼすことが知られているのです。

たとえば、太陽放射線が地球の大気に降り注いでいるときには、成層圏上部（高度 50 km 付近）にあるオゾンが減ることがわかっています。また、放射線帯の電子によっても、中間圏（高度 70 - 90 km 付近）のオゾンが減る可能性のあることが、理論やモデル計算から指摘されています。

放射線帯の電子がオゾン層に及ぼすこのような影響については、観測例が少ないため、まだ十分に理解されていません。放射線帯電子が特に大きく増える期間を中心に、オゾンの変動と放射線帯電子の変動の関係を調べる研究が続いています。

40 放射線帯をなくす計画って？

放射線帯は人類の宇宙活動にとって危険な存在だということは、もう十分にわかりましたね？　宇宙空間で安全に活動するためにも、放射線帯の粒子の量を人工的に減らすことができないか、研究が行われています。

これまで説明したように（29、30 参照）、放射線帯の電子にプラズマ波動が作用すると、地球の大気に落ちていきます。自然界に存在するプラズマ波動によって、地球の大気にじわじわと粒子が落下しているのです。それなら、強いプラズマ波動を人工的に作り、地上から宇宙空間に放射してやれば、好きなときに放射線帯の粒子の量を減らすことができるかもしれません。

実際に、アメリカでは、地上に作った送電設備から強いプラズマ波動を磁気圏に放射して、粒子に作用させ、放射線帯粒子を落とす計画が進められています。

41 宇宙天気研究とは？

磁気嵐を始め、地球磁気圏が変動するとき、放射線帯の粒子は大きく減ったり増えたりします。このようなときには、地球上空の電離圏（高度 60 - 1000 km）の電子密度も大幅に変化し、通信電波の伝わりやすさや、GPS 衛星による位置決定の精度に深刻な影響を与えます。ですから、地球磁気圏、電離圏の変動を正しく把握することは、人間が安全に活動するために必要なのです。

放射線帯や電離圏の変化、そして磁気嵐のような大規模な変動現象は、太陽面の爆発現象や太陽風の変化と密接に関わっています。つまり、放射線帯や電離圏の変動を把握・予測していくためには、太陽面から惑星間空間、磁気圏、電離圏に至るすべての領

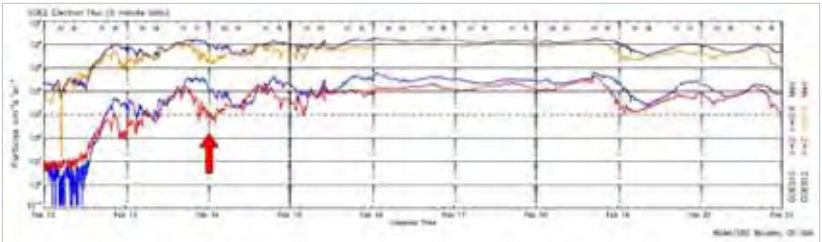
域での観測、研究が必要だということ。

　このように、特に人間活動と密接に関わる宇宙空間を総合的に研究することは、宇宙天気（Space Weather）研究と呼ばれ、世界各国でさまざまな取り組みが行われています。宇宙の様子を、インターネットを使ってリアルタイムで配信することも、重要な取り組みの 1 つ。太陽風や電離圏の密度の変化に加え、放射線帯のデータなど、リアルタイムで公開されているデータにより、地球周辺の宇宙空間がどんな状態にあるのかを知ることができますし、予測にも用いられています。

42 放射線帯粒子のデータを見ることはできる？

アメリカの気象衛星 GOES/NOAA などには、放射線帯の粒子モニターが搭載されており、放射線帯の科学研究のほか、私たちが宇宙天気の現況を捉えたり予報をするためのデータを送ってくれます。データのいくつかは、インターネットで広く公開され、誰でも気軽に見ることができます。

最近では、太陽面で大きな爆発が起きると、「日本でオーロラが見えるかもしれません」などと報道されることがありますね。こういうときには、ぜひあなたも、放射線帯粒子の変動の様子を眺めてみてください。きっと、大きく増えたり、あるいは減ったりと、複雑に変化している様子がわかるでしょう。



2004 年 2 月に米国海洋大気局（NOAA）の気象衛星 GOES が計測した放射線帯電子データ（http://www.sec.noaa.gov/rt_plots/elec_3d.html）。横軸は時間（2 月 12 日〜21 日）、縦軸は電子の量を表しています。12 日後半あたりから、放射線帯の電子がとても増えていることがわかります。矢印（14 日）のときに通信衛星に障害が生じ、BS 放送が途絶える事故がありました。

BS 放送中断を報じる記事。
（日本経済新聞　2004 年 2 月 15 日）

BSデジタル放送一時中断

NHKと一部民放

NHKと一部民放のBSデジタル放送で、十四日午後四時五十五分ごろから約四十五分間にわたり、全国で放送が中断するトラブルが起きた。

中断したのはNHKのBS1、BS2、BSハイビジョン、民放の映画専門局「スター・チャンネルBS」、音楽放送「ミュージックバード」、データ放送など。民放キー局のBSデジタル放送には影響はなかった。NHKによると、放送が映らなかったり、画面が固まったまま動かなくなるなどして、視聴者から問い合わせが相次いだ。

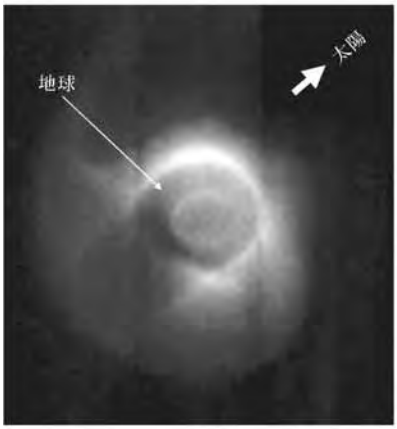
NHKと民放などが出資する衛星運用会社の放送衛星システム（東京）で、放送衛星（BS）を予備の衛星に切り替え復旧した。トラブルのあった放送は、衛星の中継器を共有しており、この中継器の故障が原因とみて調査している。当時、NHKのBS1とBSハイビジョンでは大相撲の韓国公演を生中継していた。

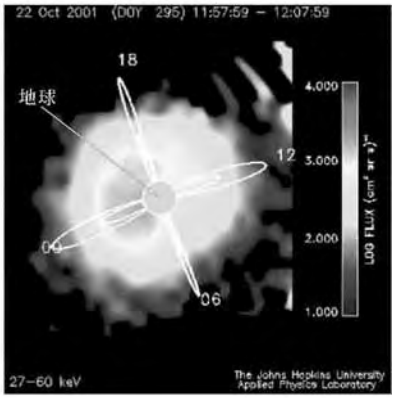
43 放射線帯を目で見ることができる?

人間が目で物を見るためには、その物がなんらかの波長で光を出しているか、あるいは光を反射する必要があります。残念ながら、放射線帯の電子、イオンはともに自分で光を放射したり、光を有効に反射することができません。目で見ることはできないのです。

一方、放射線帯と同じ領域に存在しているプラズマ圏や環電流については、1990 年代後半から始まった新しい観測によって、その姿を画像として見ることが可能になりました。今では、アメリカが打ち上げた IMAGE という衛星*が、プラズマ圏、環電流の姿を連続して私たちに伝えてくれます。

＊IMAGE 衛星は、2006 年 8 月現在、運用を停止しています。



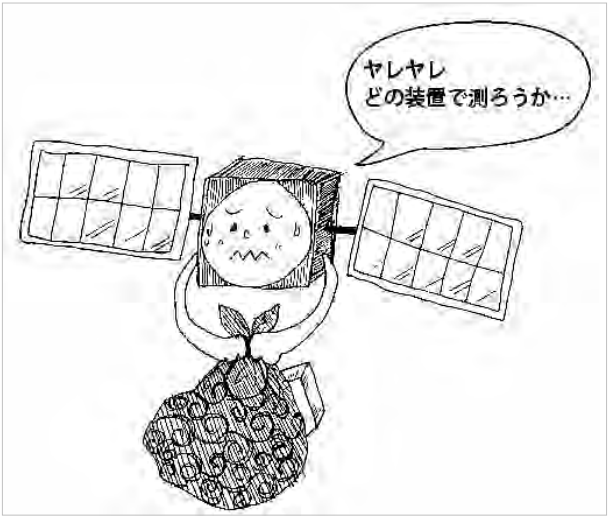


＜左＞ IMAGE 衛星が捉えたプラズマ圏。北極上空からの撮影で、真ん中の丸い部分が地球、そのまわりにうすく写っているのがプラズマ圏。＜右＞ IMAGE 衛星が撮影した、北極上空から見た環電流のイオン。（カラーページ参照）

44 放射線帯はどのように調べられているの？

放射線帯の粒子は目で見ることができません。そのため、粒子計測装置を人工衛星に搭載して、放射線帯の中で直接調べることになります。計測装置にはいくつかの種類がありますが、「半導体検出器」を用いる方法が一般的。科学衛星が観測する詳細なデータを解析することで、放射線帯の粒子変動を解明します。科学衛星から得たデータの中には、放射線帯の粒子だけではなく、その変動に影響を及ぼしていると考えられる磁場や電場、プラズマ波動といったものも含まれています。

最近では、放射線帯の粒子の変動をリアルタイムで知ることができるようになり、宇宙環境を把握する上で大きな役割を果しています。アメリカでは、GOES/NOAA のような気象衛星や、GPS衛星に粒子計測器を搭載し、時々刻々と変化する粒子の数を測っています。放射線帯粒子や磁場を計測する装置を、気象衛星などの実用衛星に搭載することは、今後ますます重要になるでしょう。

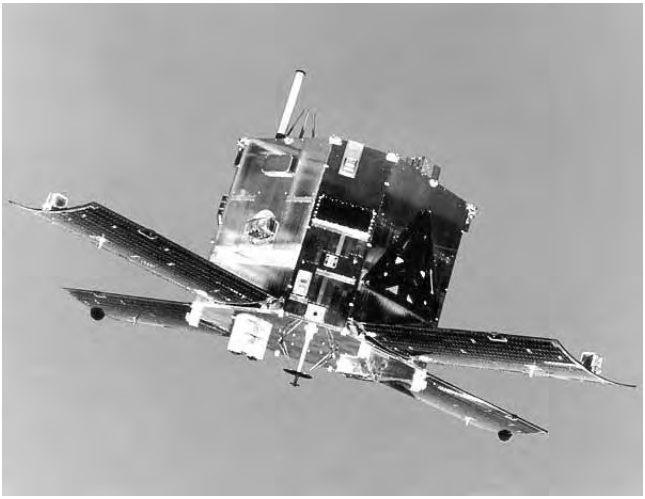


45 日本の衛星も放射線帯を調べている？

宇宙の探査は、アメリカやヨーロッパ、ロシアだけが行ってきたわけではありません。日本も 1970 年代後半から、科学衛星による磁気圏の探査を続けています。1978 年に打ち上げられた「じきけん」衛星の軌道は、放射線帯を横切るものでしたが、残念ながら高エネルギー粒子の計測は行いませんでした。その代わりに、プラズマ圏やそこに存在するプラズマ波動について、詳細な観測を行いました。

1989 年に打ち上げられ、現在まで連続して観測を行っている極軌道衛星「あけぼの」は、主な目的であるオーロラ領域の観測だけではなく、内部磁気圏においても多くの発見をしました。また、単独の衛星としては初めて、太陽活動の全周期にわたる放射線帯の変動を明らかにしています。

2002 年に打ち上げられた「つばさ」衛星は、人工衛星に使わ



「あけぼの」衛星。

れる部品が放射線帯中でどのような影響を受けるかを調べるために、内部磁気圏の赤道面での粒子観測を行いました。

　放射線帯を解明するためには、赤道面において、放射線帯の粒子だけではなく、もっとエネルギーの低い粒子や、磁場やプラズマ波動など、プラズマ環境を総合的に観測する必要があります。このような観測は、1990 年にアメリカが実施して以来、ずっと行われていません。現在、次の太陽活動極大期（2010 年頃）での打ち上げを目指し、日本も含めた世界各国で衛星計画の検討が進んでいます。

46 宇宙空間には，放射線帯の粒子以外にどんな放射線がある？

5 などで説明したように、宇宙放射線には、放射線帯の粒子、遠い銀河系からやってくる宇宙線、太陽からやってくる太陽放射線があります。3 つの中で最もエネルギーが高いのは宇宙線。そのエネルギーは、TeV*にも達します。

「自然界に存在する粒子のエネルギーは、最高でどれくらい高いのか？」という問いは、物理学のきわめて重要な課題です。しかし、太陽系や遠くの銀河系で、実際に粒子の加速が起こり、高エネルギー粒子がつくられている「現場」は、人工衛星などで直接調べることができません。

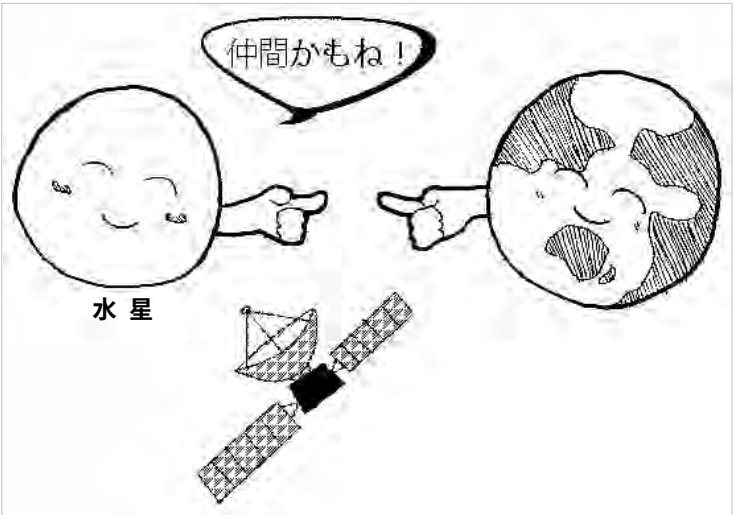
一方、地球の放射線帯はというと、太陽放射線や宇宙線に比べて最高エネルギーは低いものの、粒子の加速が起こっている現場を直接調べることができますね。したがって、放射線帯の粒子加速を研究することは、宇宙の最高エネルギーの粒子の研究にもつながる、意義深いことなのです。

＊TeV（テラエレクトロンボルト）：テラとは、10 の 12 乗の単位。1 TeV は 1,000,000,000,000 eV のことで、1 TeV の粒子は、地球の磁気圏にある MeV の粒子よりも、さらに 100 万倍以上も高いエネルギーを持っています。

47 ほかの惑星にも放射線帯はある？

太陽系にある惑星の中で、水星、地球、木星、土星、天王星、海王星には磁場があります。それでは、放射線帯はあるのでしょうか？　実は、地球以外にも、木星、土星、天王星、海王星に放射線帯が存在することが、人工衛星などの観測から明らかになっています。残る水星については、まだ議論は続いているものの、磁場の強さに比べて水星本体が大きな場所を占めているので、エネルギーの高い粒子が安定に存在する放射線帯はないだろうとの推測がされています。

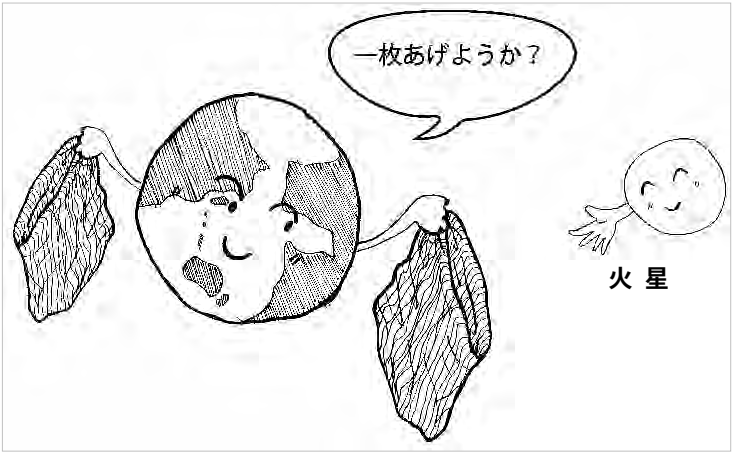
現在、日本とヨーロッパが協力して、水星に探査機を打ち上げる「ベピ・コロンボ計画」を進めています。この計画によって、水星に放射線帯が存在するかどうかがわかるでしょう。



48 なぜ放射線帯は磁場を持つ惑星だけにあるの？

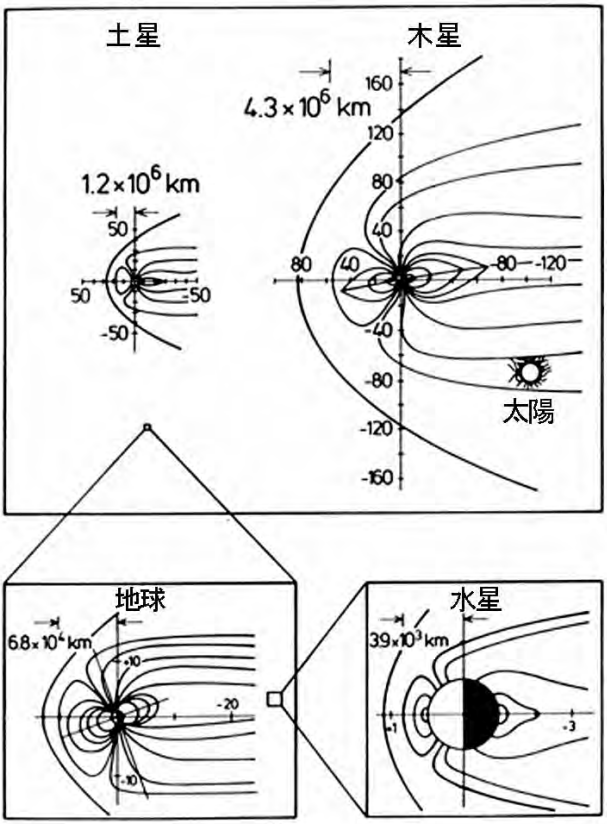
電気を帯びた粒子は、磁場のまわりに巻き付く性質があります（14、15 参照）。そのため、磁場を持つ惑星の場合、磁場のまわりに粒子が捕らえられます。また、粒子が強い磁場の中に入ると、磁場の変化に応じてエネルギーが高くなることは、既にお話ししましたね。

このように、一般に磁場のある天体のまわりには、高エネルギー粒子の捕捉帯、すなわち放射線帯ができやすいのです。というわけで、磁場のない天体、金星、火星には放射線帯はありません。



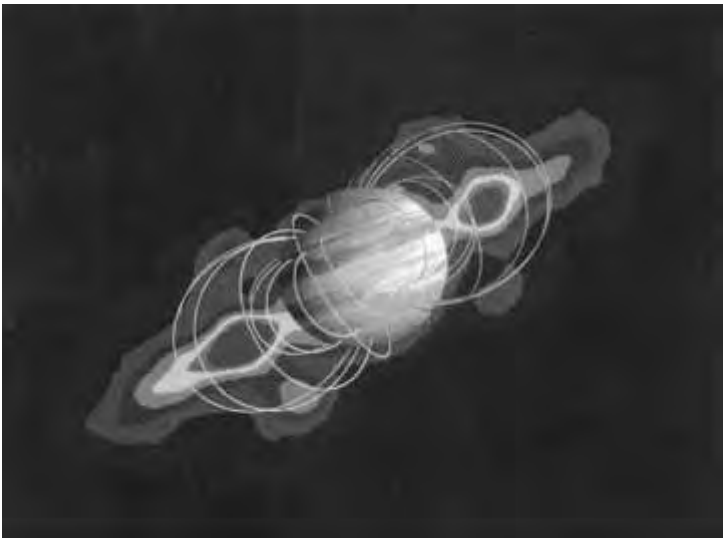
49 木星の放射線帯はどうなっている？

木星はこれまで、パイオニア 10、11 号、ボイジャー1、2 号、ユリシーズ、ガリレオ、カッシーニの 7 つの探査機によって観測が行われ、磁気圏の様子が調べられてきました。一般に木星の放射線帯という場合には、木星半径の 20 倍程度よりも内側を指します。また、木星半径の 6 倍よりも内側を内部放射線帯と呼ぶこ



木星磁気圏と他の惑星の磁気圏の比較。

ともあります。
　木星の磁気圏には、地球の磁気圏と大きく異なる点があります。それは、エネルギーの高い粒子が、木星に近い場所だけではなく、磁気圏のあらゆるところに存在しているということ。通常は、磁気圏の外側では磁場が弱いため、高エネルギー粒子はほぼ存在しないだろうとされています。ではなぜ、木星の場合には、あらゆるところに高エネルギー粒子が存在しているのでしょうか？　これはまだ解決されていない重要な問題です。
　木星は地球とは異なり、複数の月やリングを持っていますが、その周辺では放射線帯粒子は少なくなっているというのも特徴的です。月やリングに衝突して失われたというのが、その原因として考えられています。
　さらに、エネルギーが数百 MeV にも達する火山性イオンが見つかっていることも、木星の磁気圏の大きな特徴です。木星の月イオには火山があり、イオからは、硫黄や酸素といった重い火山性イオンが、磁気圏に大量に放出されているためです。しかし、これらの火山性ガスはもともとのエネルギーがとても低いため、どのようなメカニズムによって数百 MeV にまで加速されるのかについては、謎が残っています。
　さて、43 では、地球の放射線帯は残念ながら目で見ることはできません... と説明しました。それでは、木星の場合は？　実は、木星の放射線帯の電子からは、「シンクロトロン電波」と呼ばれる電波が放射されています。シンクロトロン電波は、電子が磁場のまわりを回るサイクロトロン運動（14）をしているときに出される電波。磁場が強いところで、エネルギーの高い電子から、強く電波が放射されます。
　木星のシンクロトロン電波は、地球から観測することができます。たくさんの電波望遠鏡を組み合わせる「電波干渉計」という手法によって、どのあたりで電波が強いか、つまり、どのあたりに木星放射線帯の電子がたくさんあるのかがわかるのです。地球の放射線帯が発見されたのとほぼ同じ頃に、電波望遠鏡の観測



電波干渉計による木星シンクロトロン電波の 2 次元図。放射線帯の電子がどのように存在しているかがわかります（カラーページ参照）。

により、木星からのシンクロトロン電波が発見され、放射線帯の存在が明らかになりました。地球の放射線帯の電子からもシンクロトロン電波は出ていますが、強度が非常に弱いために検出するのは難しいでしょう。

　シンクロトロン電波は、惑星の放射線帯からだけではなく、「かに星雲」を始め、宇宙に存在する磁場を持つ天体から、よく観測されています。惑星や天体の磁気圏を研究する上で、シンクロトロン電波の観測はとても重要です。

50 放射線帯の謎とは?

皆さん、いかがでしたか？　ちょっと難しかったかも知れませんが、地球をぐるりとドーナツ状に取り巻いている高エネルギー粒子の帯について、少しわかっていただけたでしょうか。

この冊子で紹介しましたように、放射線帯について、現在の研究レベルでは答えがわかっていない謎が、まだまだたくさんあります。現在計画中の新しい人工衛星が打ち上げられると、わくわくするようなデータがたくさん出てきて、それらの謎のいくつかは解決されることでしょう。でも、いままで人類が考えてもいなかったような新しい謎も、たくさん出てくることと思います。

エネルギーが高い粒子は、宇宙のあちこちで生まれています。しかし、地球から遠い天体は、私たちが直接探査することができません。直接調べることができる地球の放射線帯の研究を通して、遠くの天体で起きていることも調べていくことができるのです。

資料／イラストの提供・出典

9	Windows to the Universe, http://www.windows.ucar.edu
21	**関華奈子**
23, 24, 42	**(放射線帯電子データ)** NOAA
33	NASA
43	IMAGE homepage
45	**宇宙航空研究開発機構** (JAXA)
49	**(惑星の磁気圏)** http://space.rice.edu/hmns/dlt/Jupmag.html
	(木星シンクロトロン電波) Bolton and Thorne, 1997

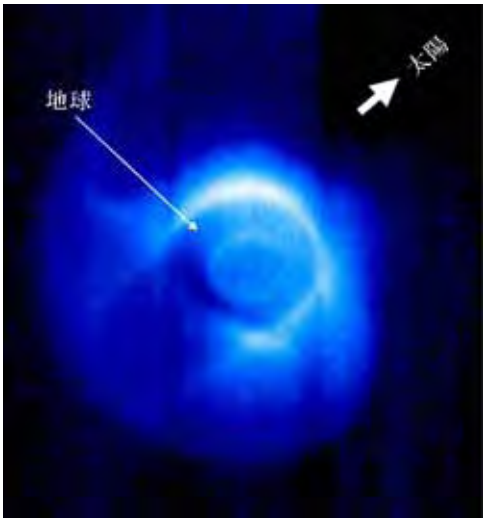


IMAGE 衛星が捉えた地球のプラズマ圏

北極上空からの撮影で、真ん中の丸い部分が地球、そのまわりにうすく写っているのがプラズマ圏。極を中心にリング状に見えるのはオーロラ。（本文 43）

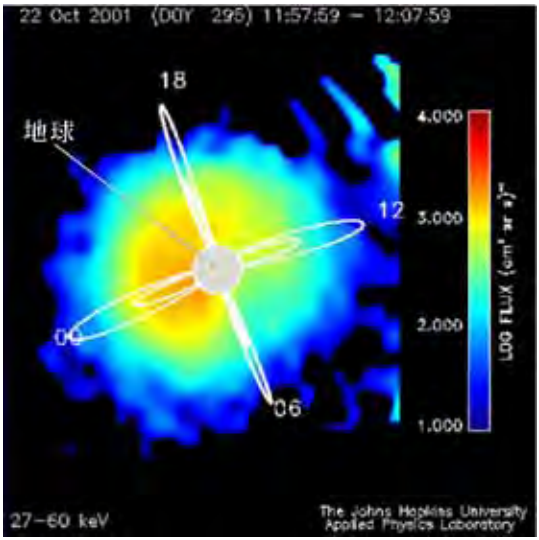
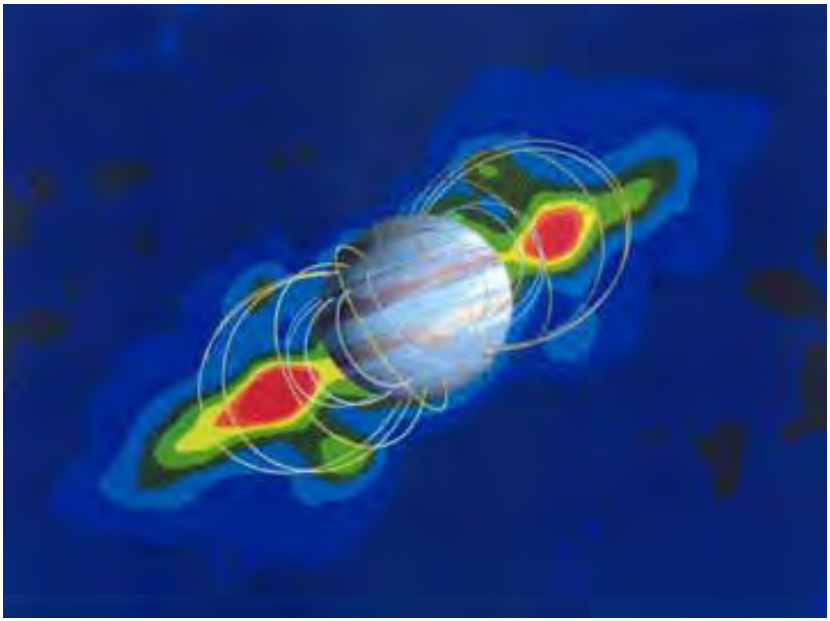


IMAGE 衛星が撮影した環電流のイオン

環電流イオンの量は、青色から赤色へと近付くほど多いことを意味する。白い線は、モデルによって描いた地球の磁力線。北極上空から見たもので、太陽は 12 の方向にある。（本文 43）



電波干渉計による木星シンクロトロン電波の２次元図
赤色の部分でシンクロトロン電波の強度が強く、放射線帯の電子が多く存在することを示している。図中の白い曲線は、木星磁気圏の磁力線。（本文 49）

発行日　**2006 年 8 月**

企画・制作　名古屋大学太陽地球環境研究所
りくべつ宇宙地球科学館
豊川市ジオスペース館

文　**三好　由純**
絵　**大村　純子**
編集　**野田ゆかり**

発行　**名古屋大学太陽地球環境研究所**
（〒464-8601　名古屋市千種区不老町）
http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/

印刷／製本　**大陽出版株式会社**
（〒441-8077　豊橋市神野新田町ロノ割 200）

本冊子は、平成 18 年度名古屋大学地域貢献特別支援事業の一環として制作されました。
All rights reserved.

放射線帯
50のなぜ

GEOSPACE

STEL

•Forest of the Galaxy•