

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、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

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？

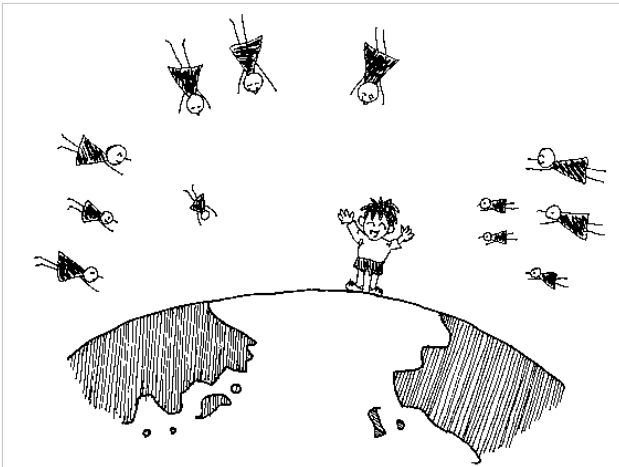
「放射線」とは一般に、「波長が短い電磁波」、そして「高速で動くエネルギーが高い粒子」の両方の意味で使われています。

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か。



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。

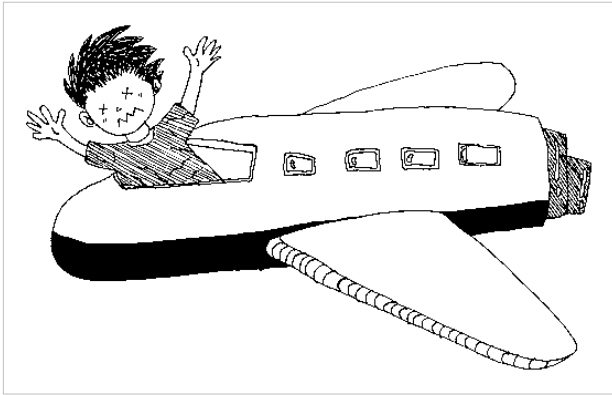
ラドンというのは、地中にあるラジウムという天然放射性物質からでてくる、放射性の気体。空気中で崩壊*し、さまざまな放射性物質になります。濃度が高い場合、肺ガンになる恐れもありますが、換気のよい住宅で暮らしていれば、ほとんど心配ありません。

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。

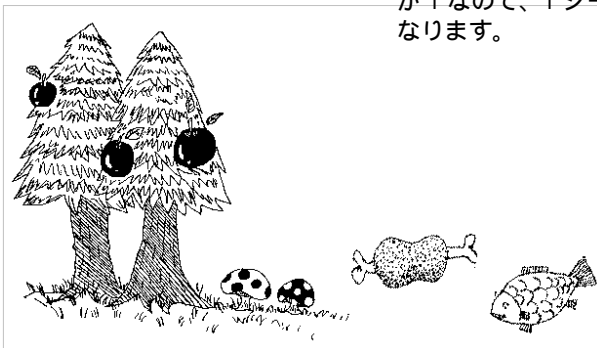
4 放射線は食べ物の中にもある？

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。

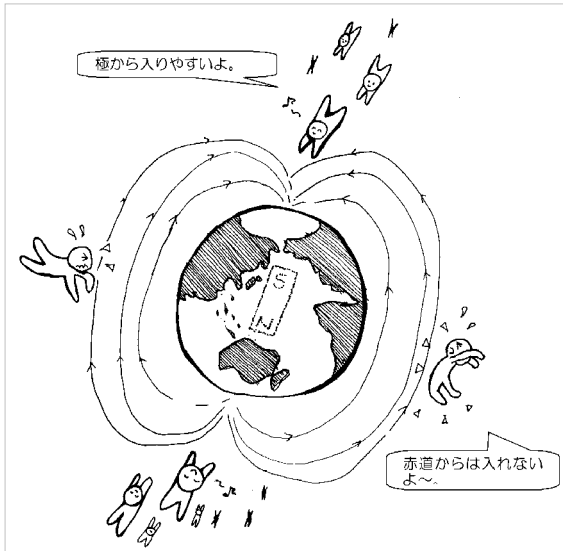
- ・ 空気中にあるラドンという放射性物質から 1.2 ミリシーベルト
- ・ 宇宙からやってくる宇宙放射線(5を参照)による被ばく量が 0.4 ミリシーベルト
- ・ 地面から約 0.5 ミリシーベルト
- ・ 食べ物から約 0.3 ミリシーベルト

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示します。

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、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。

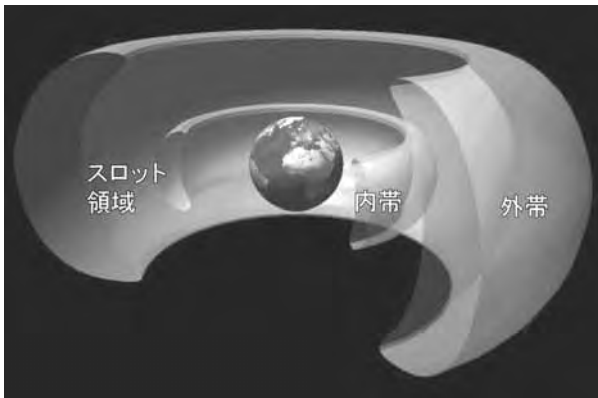


9 放射線帯ってなに？

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

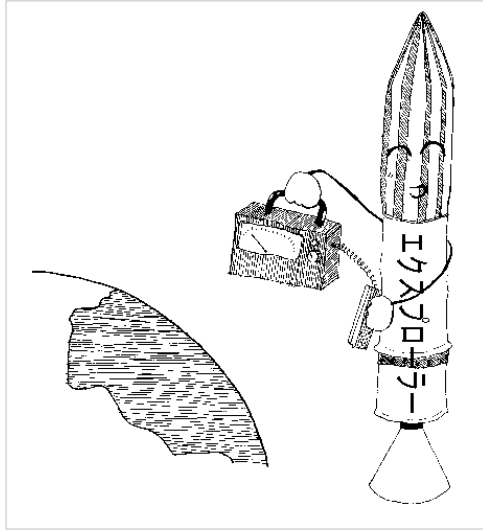
11 放射線帯の存在は予言されていた?

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時、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

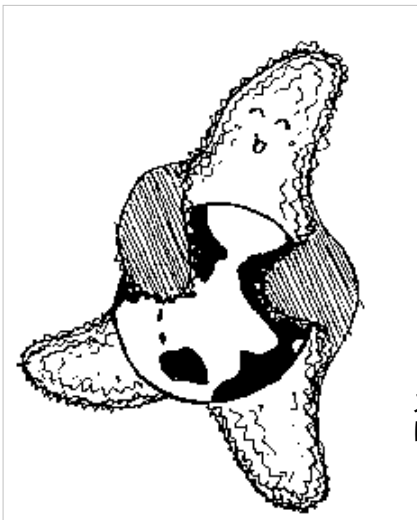
た。そこで今度は、数が多くてもきちんと計測できるように装置を改良し、実験を行いました。その結果、地球のまわりには、エネルギーの高い粒子が大量に満ちている領域、すなわち、放射線帯が存在していることが発見されました。

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。

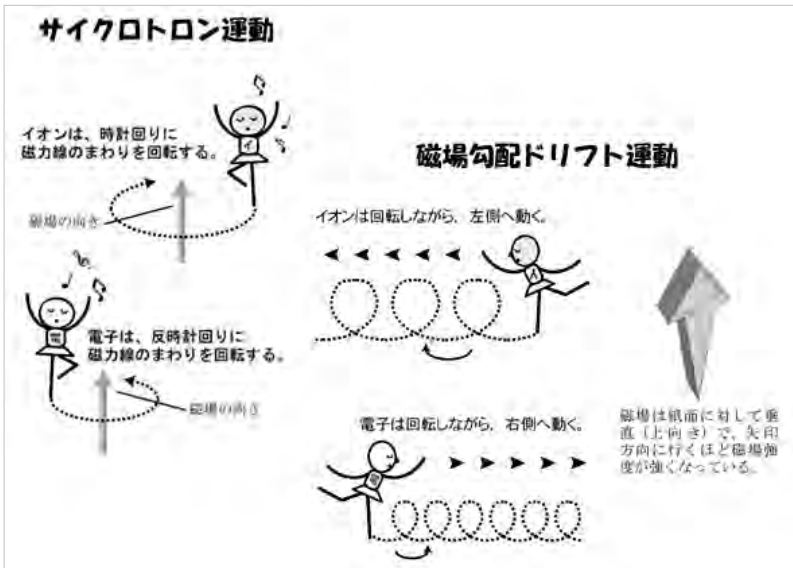


スターフィッシュ (starfish) は、英語でヒトデのことです。

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。

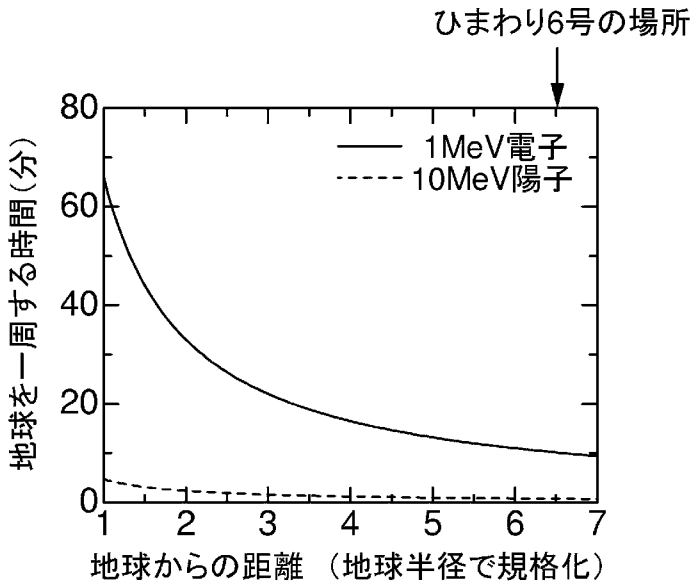


15 放射線帯粒子の基本的な運動ってなに?

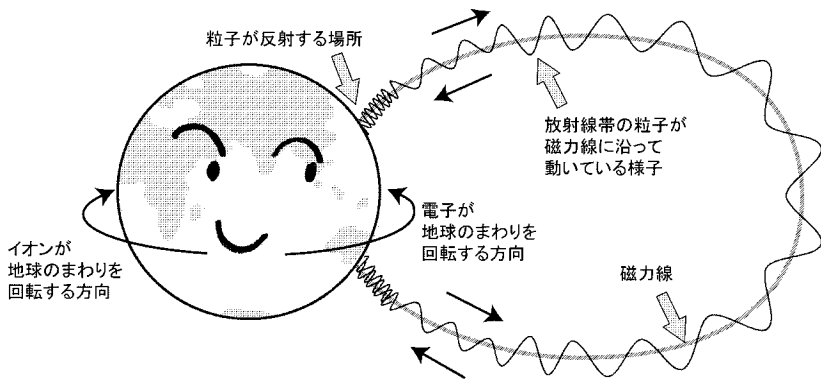
磁場の中での粒子の運動には、サイクロトロン運動、磁場勾配ドリフト運動、磁場曲率ドリフト運動があると説明しました。この運動に基づいて、放射線帯粒子は次の3つの基本的な運動をしています。

- 磁力線のまわりをぐるぐる回る（ジャイロ運動）
- 磁力線に沿って、南北を往復する（バウンス運動）
- 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、 と がサイクロトロン運動に、 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。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。