

第 64 回定例仁科記念講演会

アイソトープで探る宇宙

屋久杉に刻まれた過去の太陽活動

名古屋大学宇宙地球環境研究所 准教授

三宅 芙沙

南極の氷からひもとく宇宙と地球の歴史

理化学研究所仁科加速器科学研究センター

雪氷宇宙科学研究開発室 室長

望月 優子

2018 年 11 月

仁科記念講演会
2018



アイソトープ
isotope
で
探る宇宙

主催：公益財団法人 仁科記念財団
後援：日本アイソトープ協会

11/11 [日] 17:10 - 19:10
(開場 17:00) 多摩六都科学館サイエンスエッグ

定員
200名
中学生以上

挨拶 小林 誠 仁科記念財団理事長
高柳 雄一 多摩六都科学館館長

講演1 屋久杉に刻まれた過去の太陽活動
三宅 美沙 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 准教授

講演2 南極の氷からひもとく宇宙と地球の歴史
望月 優子 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター
雪氷宇宙科学研究開発室 室長



▲仁科記念財団について



▼お申込みはこちら

事前申込 10/29(月) 必着

仁科記念講演会 アイソトープ isotope で 探る宇宙

主催：公益財団法人 仁科記念財団
後援：日本アイソトープ協会

開催日：2018年11月11日(日)

時間：17:10～19:10(開場17:00)

会場：多摩六都科学館サイエンスエッグ

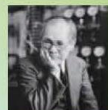
対象：中学生～大人 ※参加者以外入室不可

定員：200名

参加費：無料 ※多摩六都科学館入館も無料

仁科記念講演会について

仁科記念財団は、仁科博士の誕生日にあたる12月6日前後に定例の記念講演会を東京で催す他、地方講演会、外国の著名物理学者を財団で招聘し特別講演会を開催しています。



講演1 屋久杉に刻まれた過去の太陽活動 三宅 美沙 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 准教授

樹木の年輪には過去の太陽活動や宇宙線の情報が刻まれています。これまでに屋久杉を用いて、長期的な太陽活動について調べてきました。講演では、奈良・平安時代に見つかった宇宙線の急増や過去の太陽活動について紹介します。



講演2 南極の氷からひもとく宇宙と地球の歴史 望月 優子 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 雪氷宇宙科学研究開発室 室長

南極基地「ドームふじ」の地下深くの氷を分析すると、過去の気候変動や太陽活動、天の川銀河系内の超新星爆発などの痕跡を探れます。それらの一端を紹介し、私たちの住む地球と宇宙とのつながりについて考えます。



申込方法

10/29(月)必着

多摩六都科学館ウェブサイトからお申し込みできます。QRコード⇒

はがきの場合は、イベント名、郵便番号、住所、氏名(フリガナ)、年齢(学年)、電話番号を明記の上、多摩六都科学館宛にお送りください。

定員を超える応募があった場合は抽選し、当選者にのみ締切から3日以内に参加券を発送します。



お問合せ 東京都西東京市芝久保町 5-10-64
TEL:042-469-6100
開館時間 9:30～17:00(入館は16:00まで)
休館日 月曜日(祝日及び振替休日は開館し、翌日休館)
※10/2～5はメンテナンス休館
WEB <https://www.tamarokuto.or.jp>

料金	大人	小人
入館券(展示室)	500円	200円
観覧付入館券 (展示室+プラネタリウムまたは大型観覧1回)	1,000円	400円
セット券 (展示室+プラネタリウム1回+大型観覧1回)	1,400円	500円

多摩六都科学館は小平市、東村山市、清瀬市、東久留米市、西東京市で運営しています

バス路線	バス名	乗車時間	下車駅
池袋方面	池袋バス(第4北ルート)田無駅行	8分	多摩六都科学館下車
池袋方面	池袋バス(第4北ルート)花小金井駅行	17分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第44)田無駅行	15分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第12)東久留米駅行	10分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第13)東久留米駅行	16分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第64)花小金井駅行	30分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第12)東久留米駅行	20分	多摩六都科学館下車
西武バス	西武バス(第13)東久留米駅行	25分	多摩六都科学館下車



多摩六都科学館
Tamarokuto Science Center

屋久杉に刻まれた過去の太陽活動

三宅 芙沙

名古屋大学 宇宙地球環境研究所
多摩六都科学館 2018,11,11

スライド 1

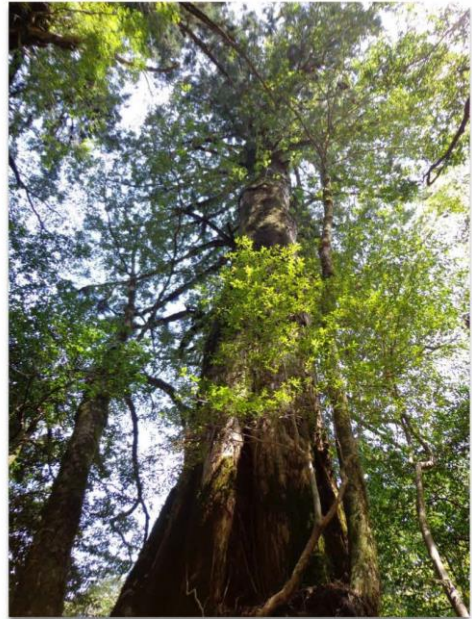
ご紹介いただきありがとうございます。改めて名古屋大学の三宅と申します。本日はこのようにたくさんの皆様にお集まりいただき、誠にありがとうございます。

早速ですが、本日は素敵なプラネタリウムで講演会を実施させていただけるということで、初めにきれいな星空を博物館の方にご用意いただきました。だんだん日が沈み、夜空が暗くなってまいりました。こちらに映っているのは屋久杉の写真です。この星空は、本日屋久島からみた星々です。私は屋久杉も天体観測も大好きなので、この映像は私にとってとても美しいですね。まるで屋久杉が星々、宇宙を見ているようです。

本日はこのような屋久杉に刻まれた宇宙の現象、特に過去の太陽活動について紹介させていただきたいと思います。よろしくお願いいたします。

自己紹介

- 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
宇宙線研究部 准教授
- 中学から宇宙に、大学から太陽に興味を持つ
- 樹木年輪から過去の太陽活動
& 宇宙線変動を探る



スライド 2

それでは、初めに自己紹介を簡単にさせていただきます。私は名古屋大学宇宙地球環境研究所の宇宙線研究部に所属して、日々研究を行っています。

小さいころから星を見たり、プラネタリウムに行ったりするのが好きだったのですが、中学で自分の好きなテーマについて調べるという授業があり、そこで宇宙をテーマに選び、宇宙にはまだわかっていないことがたくさんあることを知り宇宙の研究に興味を持つようになりました。

大学に進学し授業を受ける中で、私たちに最も身近な星である太陽についてさえよくわかっていないことがあると知り、太陽に興味を持ちました。さらに私たちの身の回りに存在する樹木の年輪に過去の太陽活動が刻まれているという点に強く惹かれ、これを現在の研究テーマにしています。

本日は、この赤字で書かれている、「樹木年輪」、「宇宙線」、さらに「太陽」の関係について明らかにしていきたいと思います。

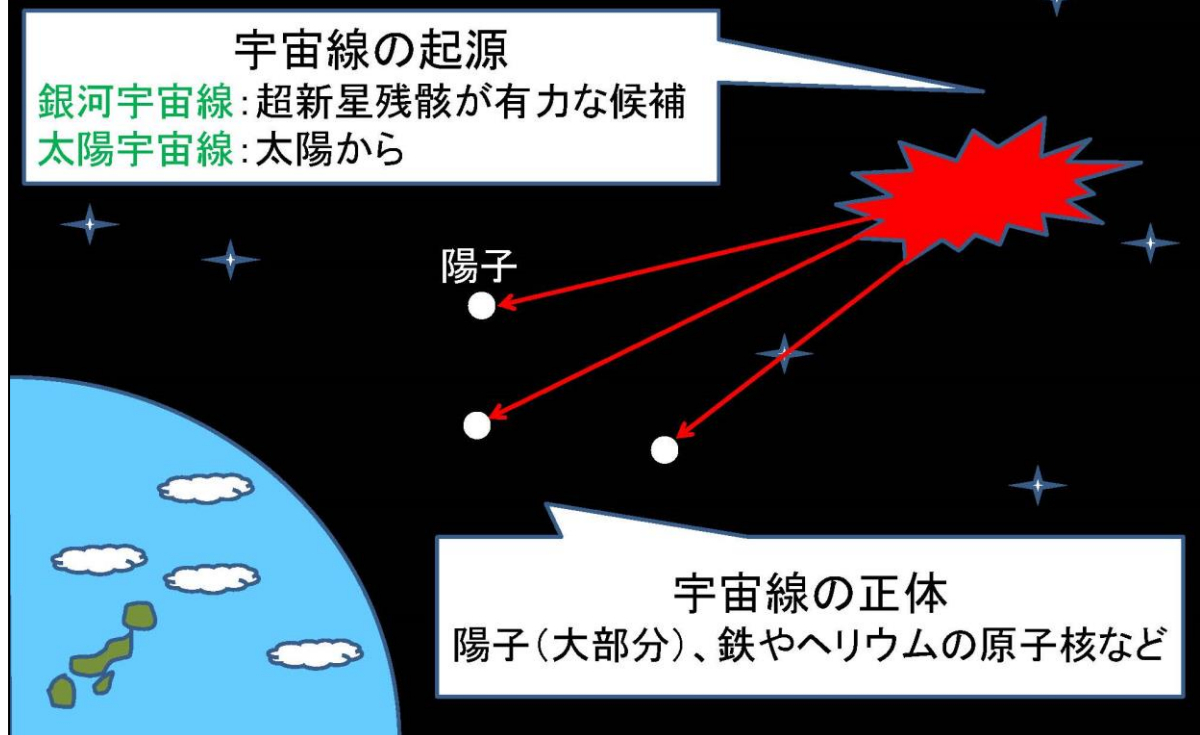
宇宙線とは？



スライド 3

さて、みなさん「うちゅうせん」と聞いて何を思い浮かべるでしょうか。通常は「うちゅうせん」といった場合、宇宙を旅する船の宇宙船が一般的かと思います。

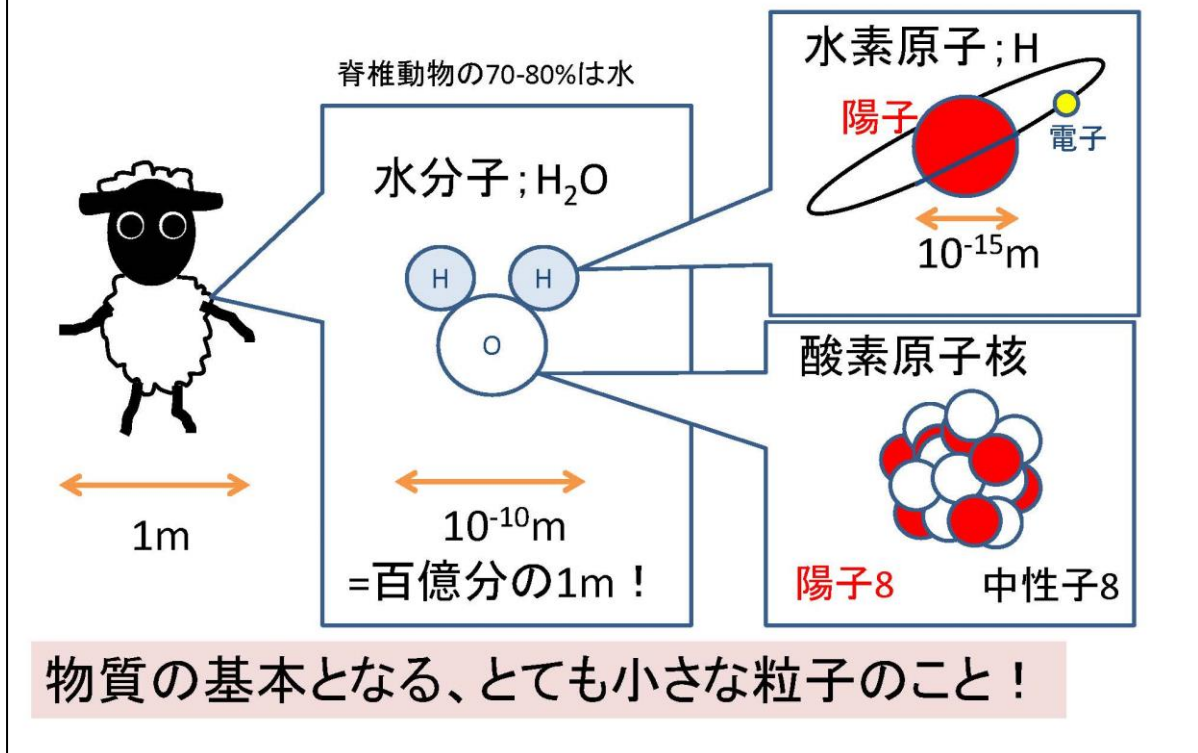
宇宙線・・・宇宙空間を飛びかう放射線



スライド 4

しかし、今日の宇宙線は宇宙を旅する船ではなく、宇宙空間を飛び交う放射線のことです。宇宙線の起源は主に2つあり、太陽系の外から飛んできている銀河宇宙線と太陽から飛んでくる太陽宇宙線があります。銀河宇宙線のふるさととは超新星残骸と呼ばれる天体が有力な候補と考えられています。また、宇宙線の正体は大部分が陽子で、それ以外に鉄やヘリウムの原子核などが含まれています。

宇宙線の正体 ～陽子とは？～



スライド 5

ここで宇宙線の正体の陽子について少しおさらいしてみましょう。

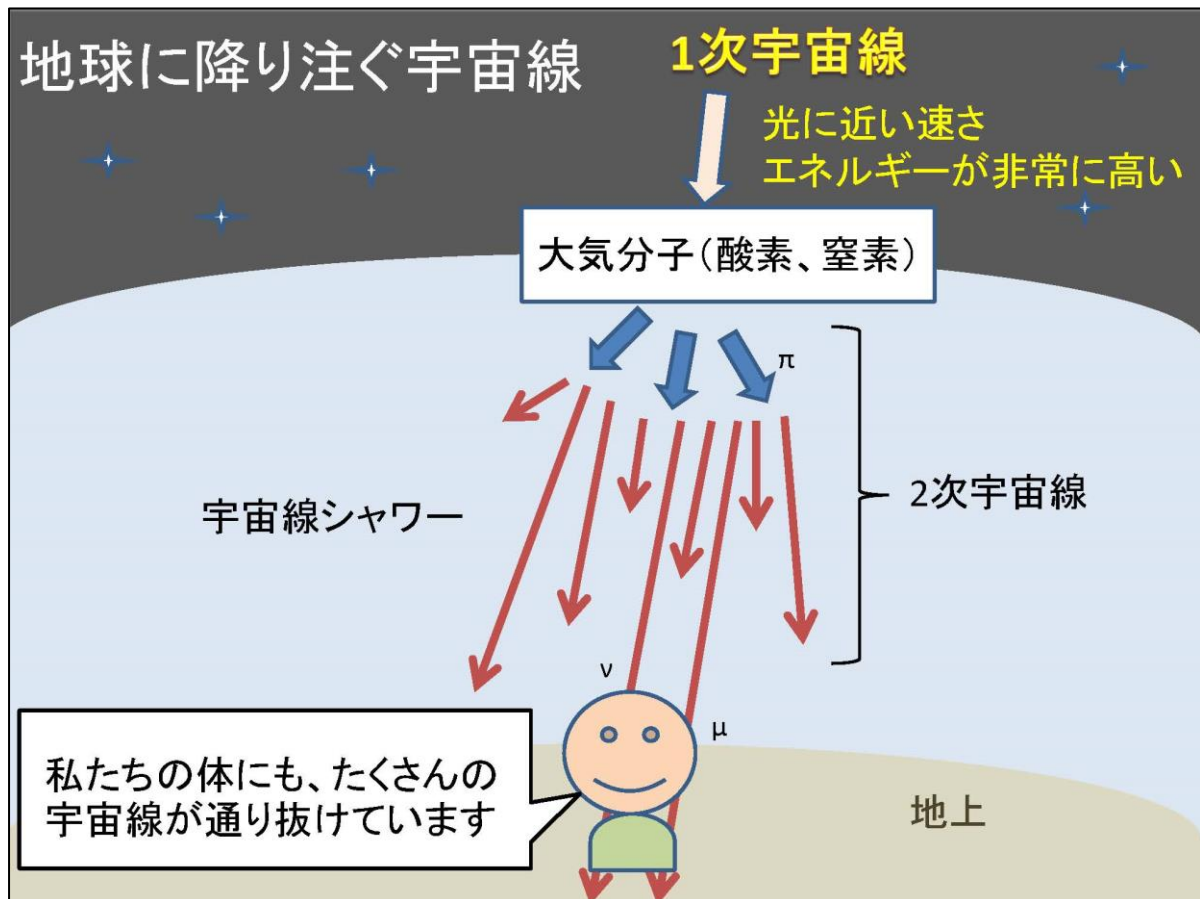
こちらにいるのは、私も私の子供も大好きな羊です。脊椎動物の7割から8割は水でできているため、この羊を拡大していくと水の一番小さい構造である水分子が見えてきます。元の羊が 1m とすると、水分子の大きさは、そのおよそ百億分の一 m ととても小さいですね。

水分子をよく見てみると、H と書かれた水素原子 2 つと O と書かれた酸素原子から構成されています。

この水素原子をさらに拡大していくと、やっと宇宙線の正体である陽子が見えてきます。陽子の大きさは水分子よりさらに5桁小さい、つまり約10万分の一の大きさです。

一方、酸素原子を拡大してみると、陽子が8個と中性子と呼ばれる粒が8個から構成されています。

宇宙線の正体の陽子とは、物質の基本となるとても小さな粒子であるといえます。



スライド 6

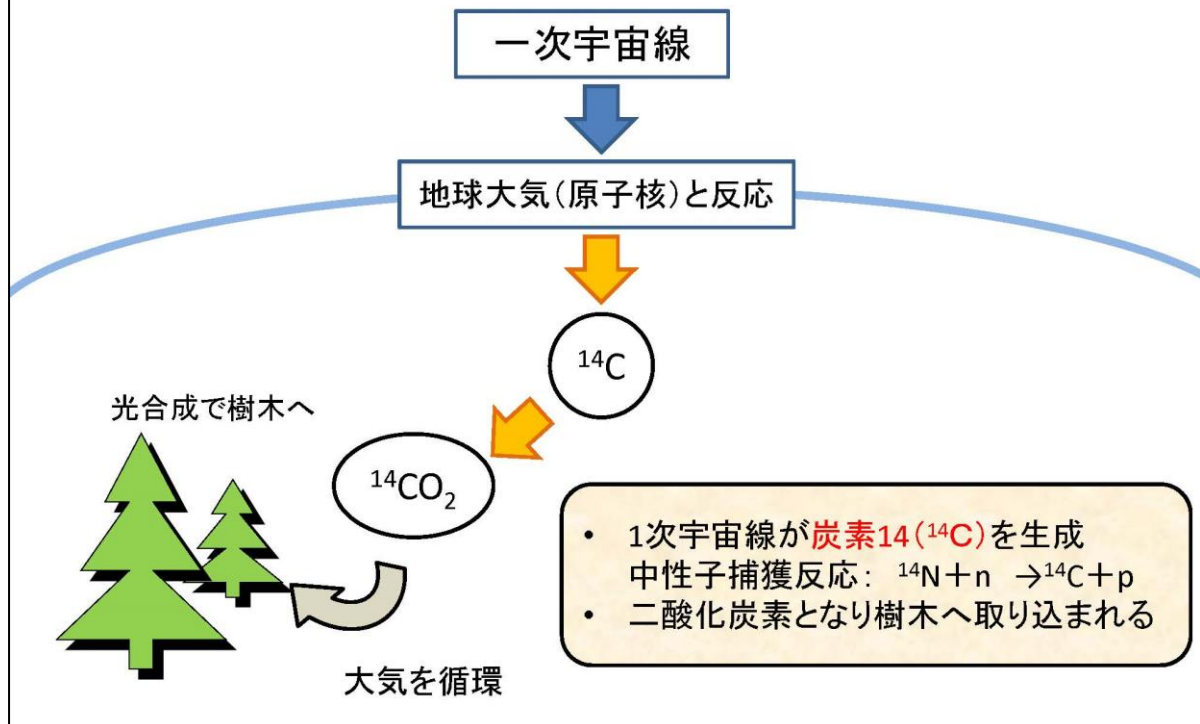
このような宇宙線が宇宙空間を飛び交っているわけですが、宇宙線はとても早く、光に近い速さで動いているため、とても高いエネルギーを持っています。

このようなエネルギーの高い粒子が地球の大気に突入すると、大気を構成している窒素や酸素といった大気分子をばらばらに壊してしまいます。その結果、大気中で新たにたくさんの種類の粒子が作られます。

地球に入射するもとの宇宙線のことを「一次宇宙線」、大気中でできた粒子のことを「二次宇宙線」と呼んでいます。この大気中で次々に新たな宇宙線を作っていく様子がシャワーのように見えることから、このことは「宇宙線シャワー」と呼ばれています。

地上にも多くの二次宇宙線が降り注ぎ、皆さんの体を今も多くの宇宙線が通り抜けています。

宇宙線の記録：年輪中 ^{14}C 濃度

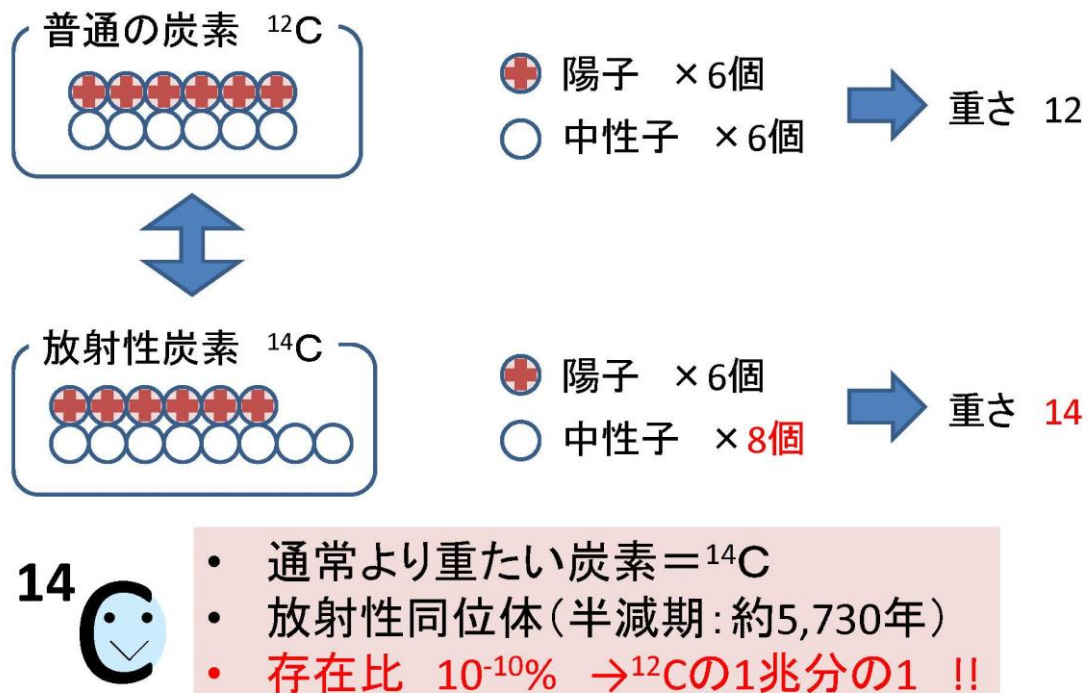


スライド 7

大気中で多くの粒子が作られるわけですが、その中に、今日のお話の中心となる炭素 14 があります。

炭素 14 は宇宙線によって大気で作られた後、二酸化炭素となって大気をめぐって一部は樹木年輪に取り込まれます。これは樹木の光合成によるものです。

炭素の仲間 ～同位体:アイソトープ～



スライド 8

炭素 14 とはその名の通り、炭素の仲間なのですが、通常の炭素とは少し違います。通常の炭素は、陽子が 6 個と中性子が 6 個から構成されているのですが、炭素 14 は陽子が 6 個と中性子が 8 個から構成されています。

このように陽子の数は同じであるものの、中性子の数が異なる原子のグループのことを、同位体、あるいはアイソトープと呼んでいます。本日の講演会のタイトルは「アイソトープで探る宇宙」ですが、炭素 14 はまさしく炭素のアイソトープということですね。このように、宇宙線によって作られる炭素 14 は、通常の炭素よりも少し重い炭素で、自然界にわずか、通常の炭素の約 1 兆分の 1 と、ごく微量にしか存在しません。

年輪：樹木にできる縞々



年輪はどうしてできる
のでしょうか？

→春～夏：白い
夏～秋：黒い
1年に1年輪

☆クイズ
外側と内側の年輪で
古い方はどちら？

スライド 9

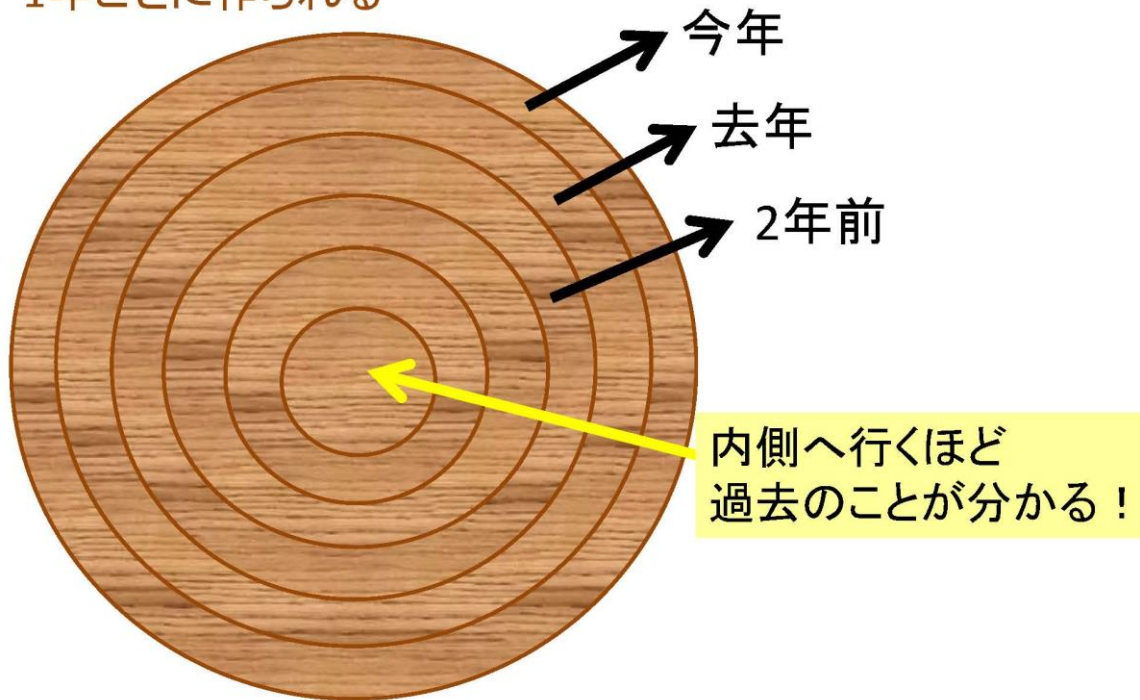
続いて樹木の年輪について詳しく見てみましょう。

これは樹木の断面ですが、縞々がみえます。明るい色の部分は春から夏にかけて形成され、暗い色の部分は夏から秋に形成されます。1年に明暗の2層が形成されるため、縞々として1年を認識できるのですね。

ここでクイズを出したいと思います。年輪は中側と外側とどちらから形成されるでしょうか。会場が暗いので手を挙げてもらえないと思いますので、心の中でお答えください。内側から外側だと思われる方。外側から内側だと思われる方。正解は内側から外側に形成されます。樹木の一番外側に樹皮がありますが、樹皮のすぐ内側の形成層という場所で一番新しい年輪が形成され、どんどん外側に樹木は成長します。

年輪：過去の宇宙線の強さを記録

1年ごとに作られる

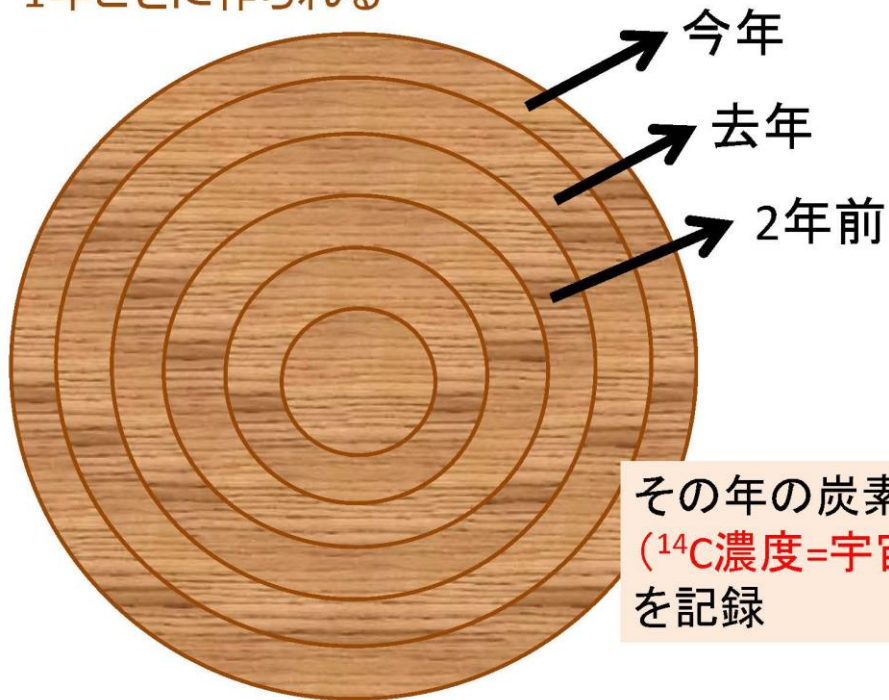


スライド 10

このように一番外側の年輪が今年形成されたものだとする、一つ内側は去年形成されたもの、さらに内側は一昨年形成されたもの、と年輪の内側に行くにつれて過去のことがわかるということになります。

年輪：過去の宇宙線の強さを記録

1年ごとに作られる

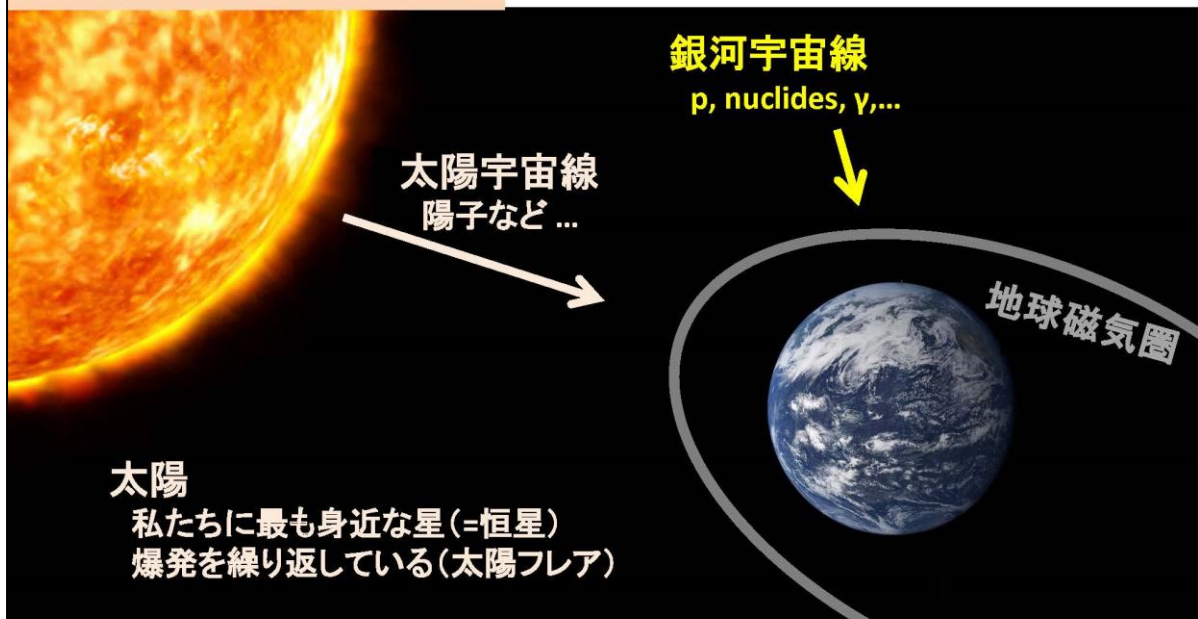


スライド 11

樹木はその年に取り込んだ炭素をもとに年輪を形成しますので、ある年輪の炭素 14 の量、つまり炭素 14 濃度を調べると、その年の宇宙線の量を調べることができます。

したがって、年輪は地球へ飛んできた宇宙線の量を刻々と記録しているタイムカプセルというわけです。

太陽活動と宇宙線



年輪の ^{14}C に刻まれている情報

- 太陽磁場、地球磁場の長期的な活動
- 太陽フレアなどによる短期的な宇宙線増加

スライド 12

樹木の年輪が過去の宇宙線の量を記録しているということが、何となくお判りいただけたかと思います。地球へ飛んでくる宇宙線の量は、実はいろいろな要因によって時間とともに変化しています。

そういった要因の一つとして、太陽や地球の磁場の変化があります。太陽と地球はそれぞれ固有の磁場を持っているのですが、磁場の強さが時間とともにそれぞれ変化することが知られています。例えば、太陽の磁場は 11 年の周期変動をすることが知られています。そういった磁場の影響を受けて宇宙線量も変化するのです。

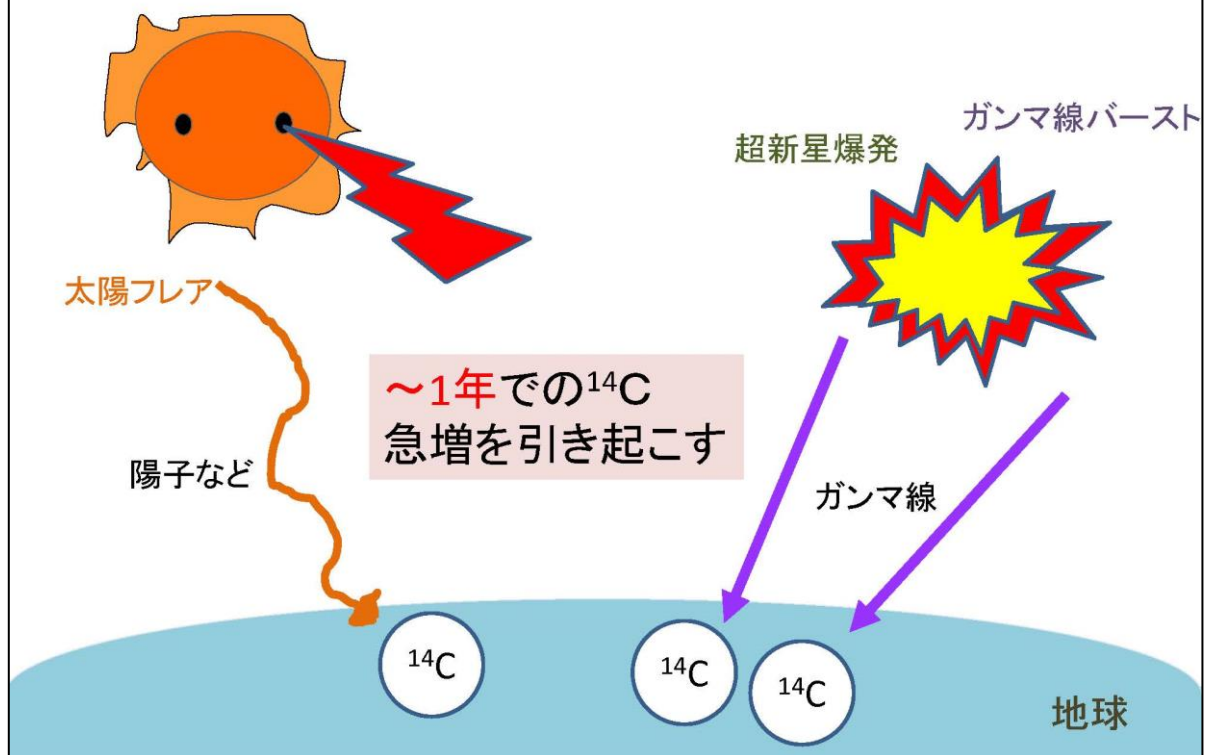
2 つ目の要因として、宇宙線自体をたくさん放出するような宇宙の高エネルギー現象があります。そのような現象が地球の近くで起きればたくさんの宇宙線が地球に降り注ぐと考えられます。高エネルギー現象のひとつとして太陽面の爆発現象である太陽フレアがあります。

今日はこの太陽フレアなどによる短期的な宇宙線増加について詳しく見ていきたいと思います。

【映像】

ここで見ているのは、2003 年の 10 月末から 11 月にかけて、たくさんの太陽面の爆発が発生した様子をとらえた映像です。ちょうどハロウィーンの頃に発生したため、「ハロウィーンイベント」として知られています。何度も太陽から爆発的に何かが噴出しているのがみられますが、これが太陽面爆発の様子です。爆発のすぐ後に、映像に白い雪のようなものがたくさん現れますが、これは爆発によって発生した太陽からの宇宙線がカメラをたたいて見えているノイズになります。このように太陽面で爆発があると、地球にたくさんの宇宙線が降り注ぐことがあるのです。

宇宙線を大量に放出：宇宙高エネルギー現象



スライド 13

太陽面爆発のほかにも短期間の宇宙線増加を起こす原因として、地球の近くで起きる超新星爆発やガンマ線バーストといった星の爆発現象が挙げられます。これらの現象については後程少し詳しく説明したいと思います。

こういった現象が起きると瞬時に地球に宇宙線がたくさん降り注ぎ、大気で炭素 14 を作ると考えられます。短期間の宇宙線の増加は、1 年で炭素 14 濃度を増加させるため、年輪を 1 年ごとに調べれば、このような宇宙の現象を捕らえられる可能性があります。

私たちの研究グループでは、1 年の分解能で炭素 14 濃度が急に増加していた年代を探することで、過去に発生した宇宙の高エネルギー現象を調査してきました。

過去の高エネルギー現象の探索

: ^{14}C 濃度の1年での急増を探そう！

スライド 14

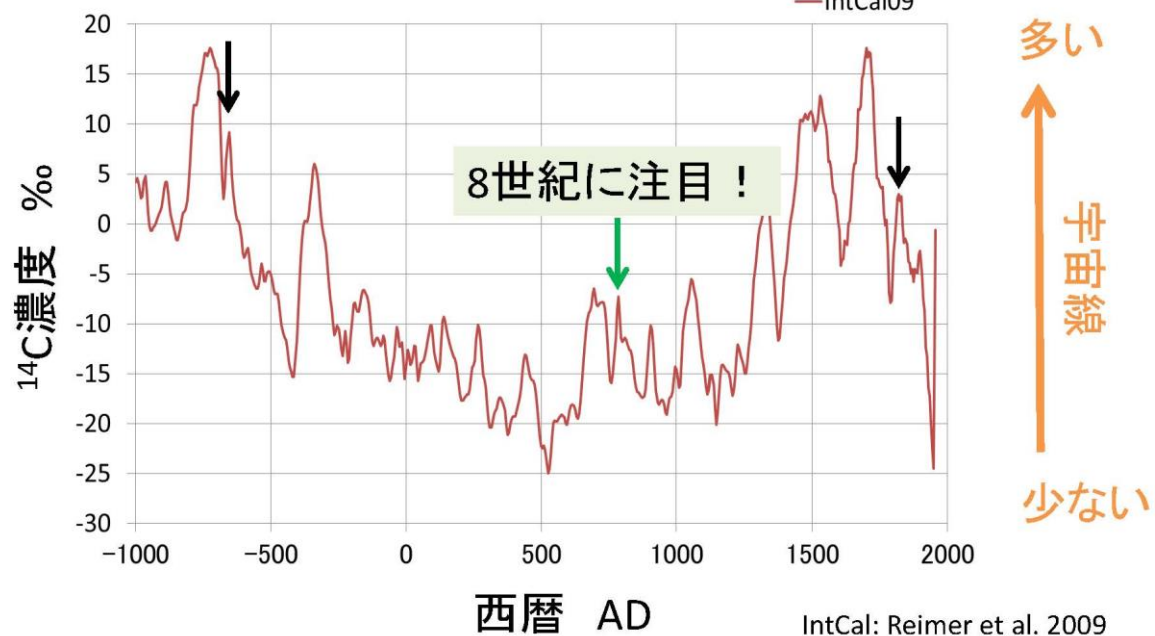
というわけで、年輪の炭素 14 濃度を 1 年ずつ調査していくわけですが、やみくもに調べるのではなく、まずは急激な炭素 14 増加がありそうな年代について調べることにしました。

今までの測定_イントカル

北半球樹木サンプル(10年データ)

主に考古試料の年代
測定に用いられる

大きな ^{14}C 増加があればイントカルに見えるはず



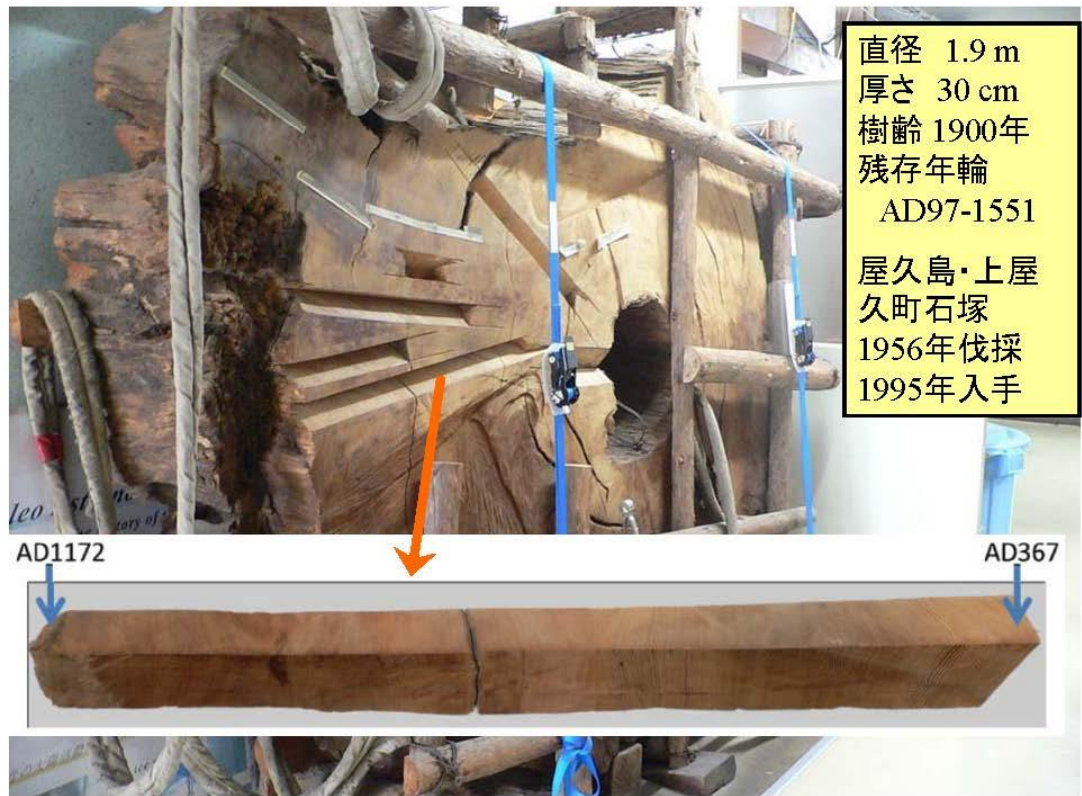
スライド 15

参考にしたのは、イントカルと呼ばれる炭素 14 を代表するデータセットになります。

イントカルは過去 1 万年程度の期間について、樹木の炭素 14 濃度を 10 年の分解能で、つまり 10 年分の年輪をまとめて測定されたデータです。主に考古学の試料など年代が分からないサンプルの年代測定に使われています。仮に 1 年の大きな炭素 14 増加があるならば、この 10 年分解能のイントカルにおいても急激な変化として現れると考えられます。

こちらのグラフは過去 3000 年間の炭素 14 濃度を示しています。グラフで炭素 14 濃度が大きいということは、たくさんの宇宙線が降り注いで炭素 14 を作っていたということで、グラフの上の方に行くほど多くの宇宙線が到来していたことを意味します。過去 3000 年間に於いて特に急激な炭素 14 増加を示すこちら、8 世紀に注目して、詳しく調べることにしました。

サンプル 屋久杉

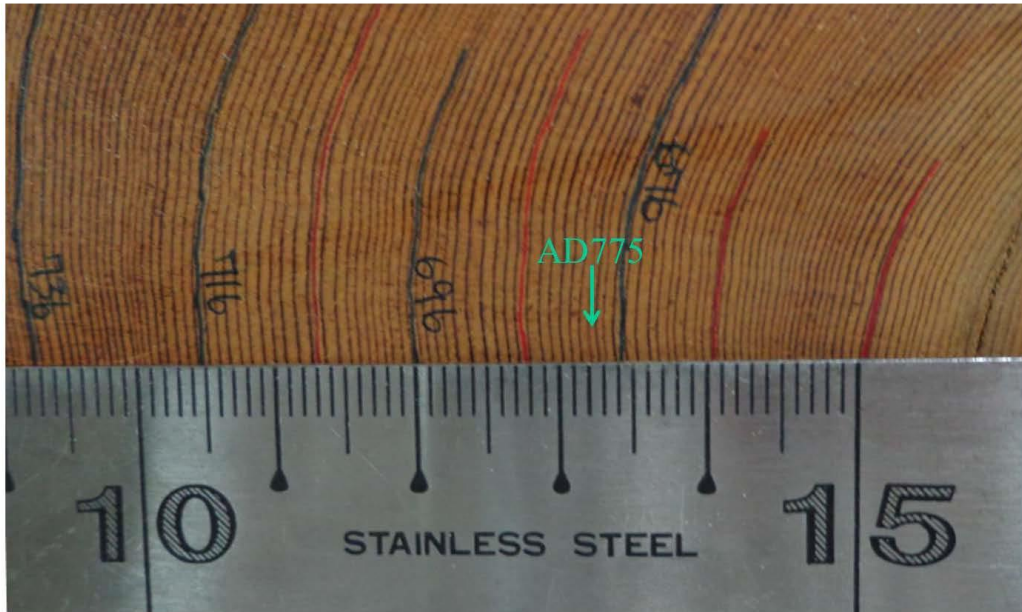


スライド 16

分析に利用したのは、長い寿命で有名な屋久杉になります。この写真は分析に使った屋久杉サンプルですが、直径約 2m、厚さ 30cm と非常に大きな屋久杉の輪切りです。樹齢は約 1900 年と考えられています。1956 年に屋久島の営林所によって伐採された個体で、切り株として残っていた部分を 1995 年に私たちの研究グループが購入しました。

元のサンプルはとても大きいので、このように細長い木片を切り出して分析に使います。

屋久杉の特徴



- 非常に年輪幅が細かい
- 油脂成分が多い(通常の5-6倍)→とっても良い香り！

スライド 17

屋久杉の特徴として、まず年輪幅が非常に細かい点が挙げられます。この写真のように1年輪が1mmに満たないものも多く見られます。

また、樹脂を多く含むことでも知られ、屋久杉を削っているととても良い香りがするので、私はこの切り分け作業が大好きです。

削り出し

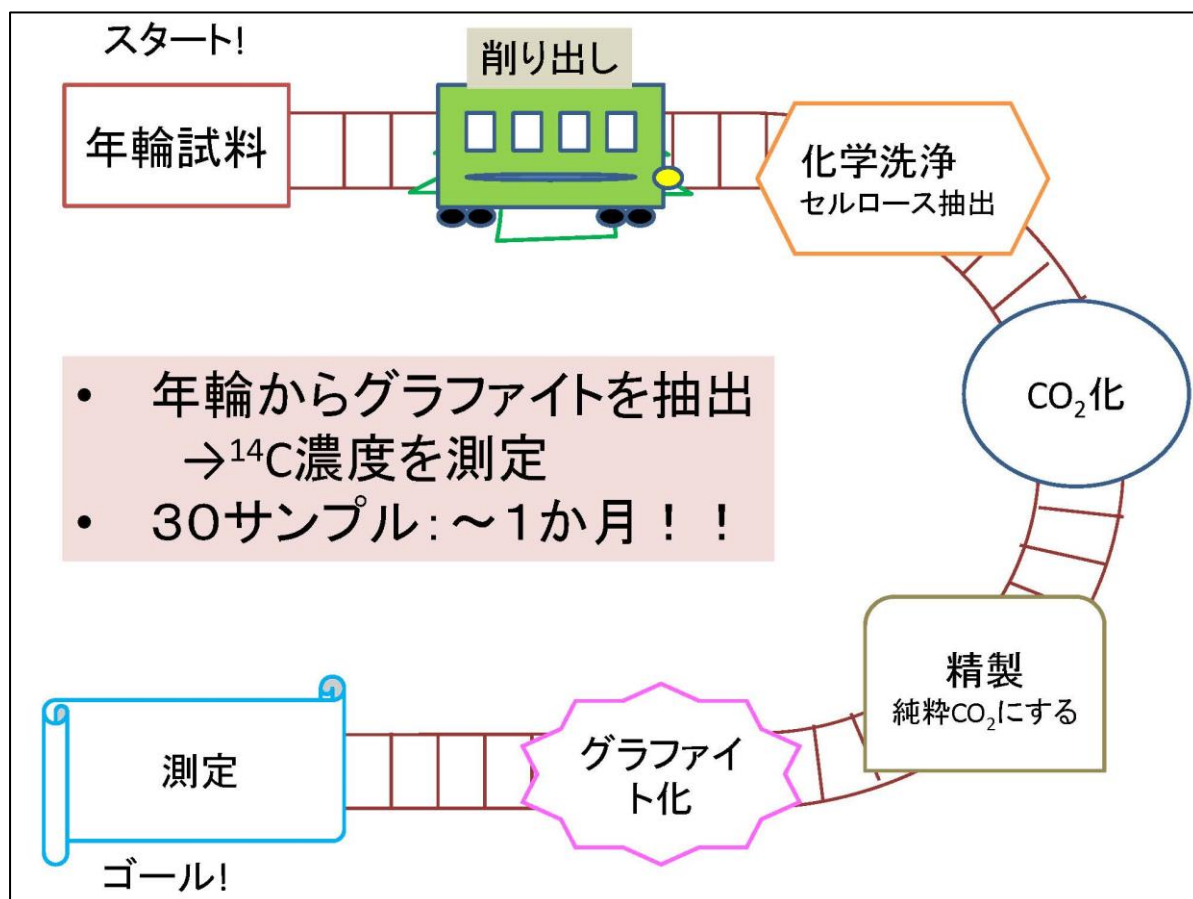


- カッターナイフを使って隣の年輪が入らないようにする
- 1年輪; 15-20分くらい

スライド 18

1年輪ごとに分けるのは、このようにカッターナイフを使って隣の年輪が入らないように細心の注意を払いながら削ります。先ほど1年が1mmに満たないと申し上げましたが、正確に削り分けるには熟練の技が必要で、この研究を行うには最初にしばらく練習期間を要します。

削ったサンプルは、このようにかつお節のような状態になります。

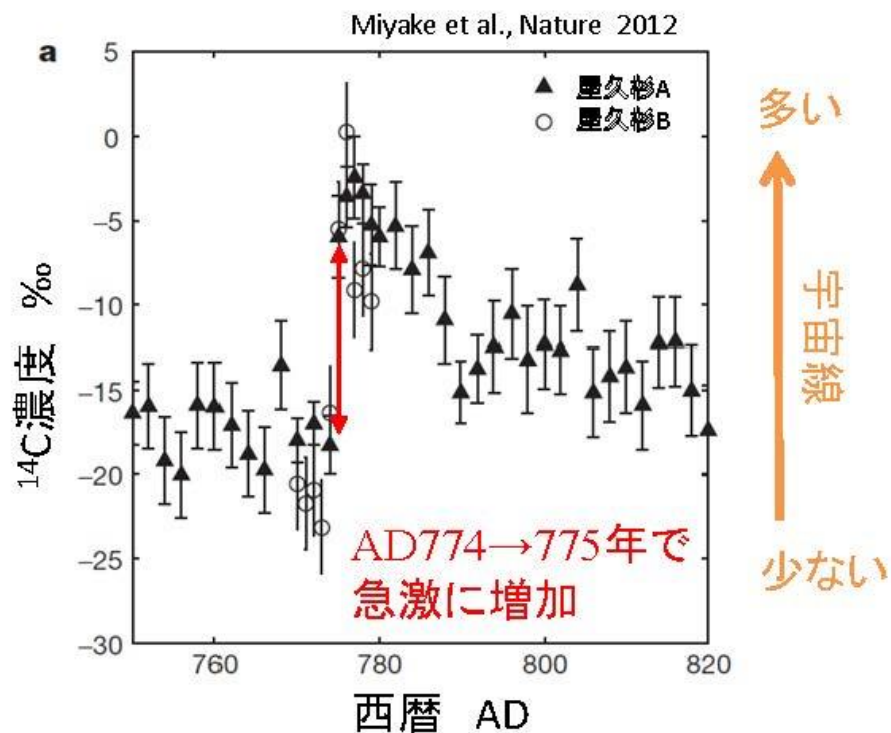


スライド 19

年輪サンプルから炭素 14 濃度を測定するまでにいくつかの前処理工程が必要です。簡単に見てみると、酸やアルカリといった化学処理をして、年輪間を移動しない成分であるセルロースを抽出し、その後、二酸化炭素にします。二酸化炭素を真空ラインで純粋な二酸化炭素とし、グラファイト、つまり炭素の塊にします。最後にグラファイトサンプルの炭素 14 濃度を加速器質量分析計という装置を用いて測定します。

この前処理過程には多くの手作業が含まれ、1 年輪を分析するのにも多くの時間がかかります。長期にわたる年代を調査するためには、地道な作業を積み重ねなければなりません。

測定結果: ^{14}C 増加(1年値)

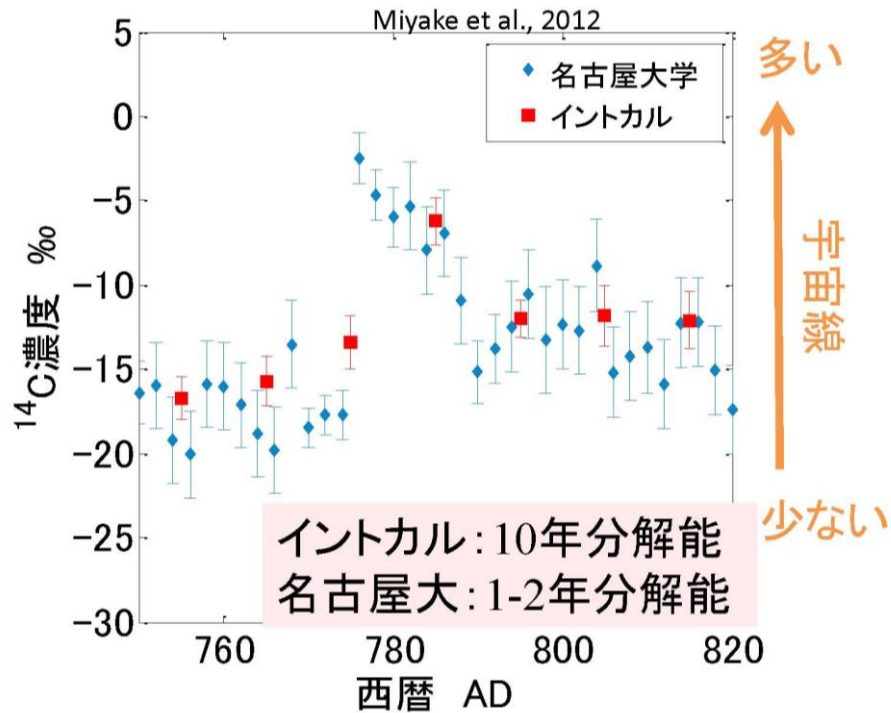


スライド 20

このようにして測定された結果がこちらになります。先ほどイントカルの10年値で急激な変化がみられた8世紀について、1年分解能で測定した結果が示されています。

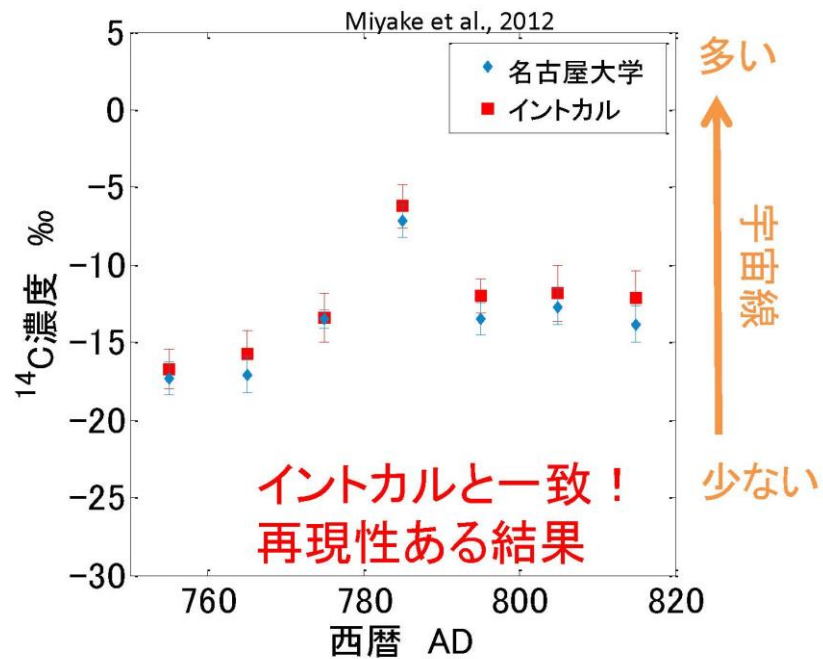
この結果をみると西暦774年から775年にかけて1年で急激に炭素14濃度が増加しています。

イントカルとの比較



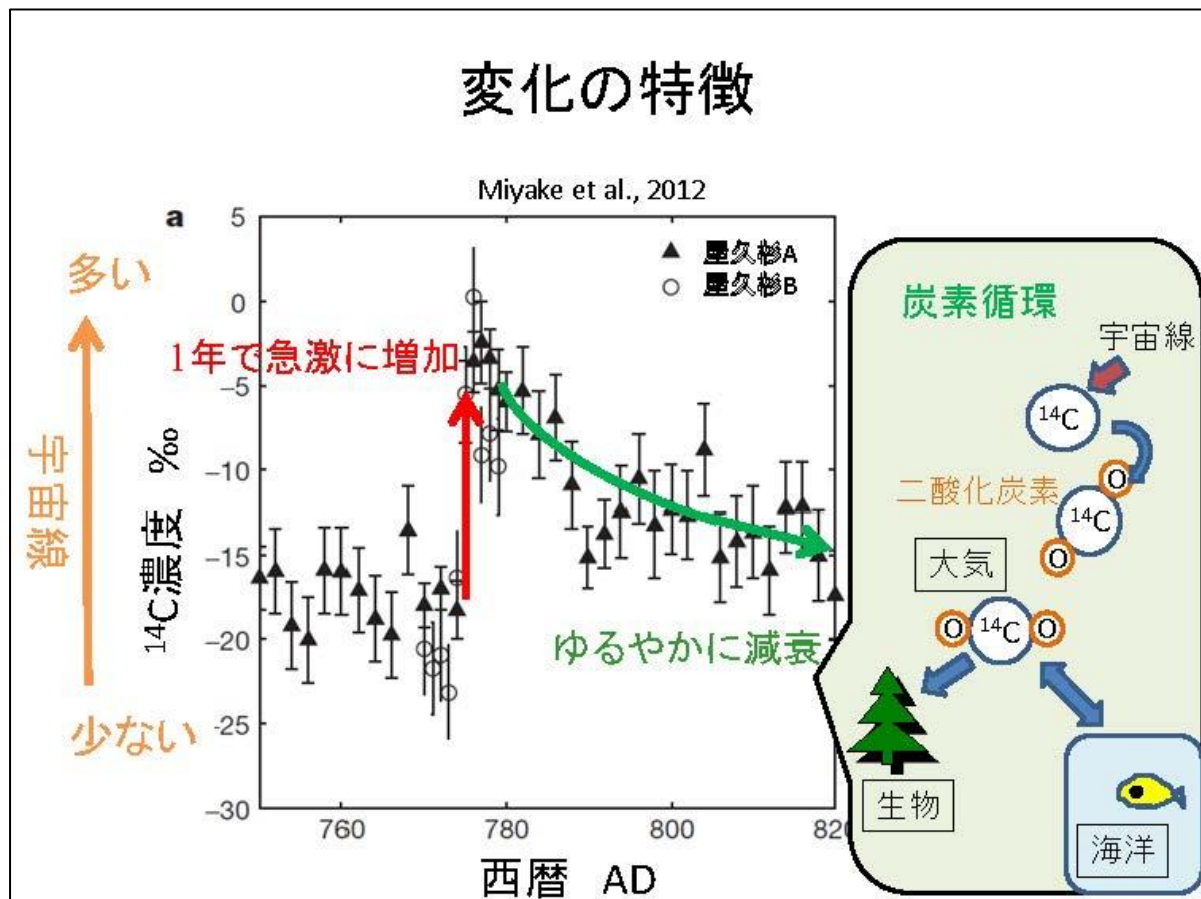
スライド 2 1

イントカルとの比較



スライド 2 2

このグラフはイントカルのデータと屋久杉のデータを比較したのですが、屋久杉のデータをイントカルと同じ間隔になるように、つまり 10 年分を平均すると、両者はよく一致していることがわかります。



スライド 23

さらに、変化の特徴を詳しく見てみると、1 年で急激に増加したのち、緩やかに炭素 ^{14}C 濃度が減衰しています。

先ほど、炭素 ^{14}C は宇宙線によって大気で生成後、大気を巡って樹木に取り込まれると申し上げましたが、大気を循環するだけではなく、海洋や動植物にも取り込まれます。このような炭素の行き来を「炭素循環」と呼んでいます。

話は戻りますが、この急激な増加後の減衰は、大気で生成された炭素 ^{14}C が徐々に海洋等に取り込まれることが原因ということが、炭素循環モデルとの比較からわかりました。

775年の宇宙線増加

LETTER

英科学雑誌 Nature 2012年6月14日号

A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan

Fusa Mivake¹, Kentaro Nagaya¹, Kimiaki Masuda¹ & Toshio Nakamura²

著者：三宅、永治、増田、中村

Increases in ^{14}C concentrations in tree rings could be attributed to cosmic-ray events^{1–7}, as have increases in ^{10}Be and nitrate in ice cores^{8,9}. The record of the past 3,000 years in the IntCal09 data set¹⁰, which is a time series at 5-year intervals describing the ^{14}C content of trees over a period of approximately 10,000 years, shows three periods during which ^{14}C increased at a rate greater than 3‰ over 10 years. Two of these periods have been measured at high time resolution, but neither showed increases on a timescale of about 1 year (refs 11 and 12). Here we report ^{14}C measurements in annual rings of Japanese cedar trees from AD 750 to AD 820 (the remaining period), with 1- and 2-year resolution. We find a rapid increase of about 12‰ in the ^{14}C content from AD 774 to 775, which is about 20 times larger than the change attributed to ordinary solar

日本の樹木年輪に示された
西暦774～775年の宇宙線
増加の痕跡

スライド 24

775年の炭素14濃度の急増を見つける以前は、ここまで急激な1年の炭素14の変化がみつかっていなかったため、これは重要な発見であるということで、「日本の樹木年輪に示された西暦774–775年の宇宙線増加の痕跡」というタイトルで2012年にネイチャー誌に報告しました。

この論文を発表した当初は、原因はよくわからないけれど、たくさんの宇宙線が降り注いだことはわかっていました。このことから謎の放射線バーストが8世紀に地球をおそった、ということで話題に上りました。

世界各地で再現！

- ロシア
- アメリカ(セコイア)
- 日本
- ドイツ
- ニュージーランド
- ポーランド
- アメリカ(マツ)
- などなど

世界中の樹木に刻まれている
→単年タイムマーカー

スライド 25

その後、世界各地の樹木サンプルを用いた検証が行われ、775 年の炭素 14 濃度の増加は世界中で同じように記録されていることが明らかになりました。

イベントの原因は??

通常の太陽活動ではない

~20 × シュワーベサイクル(11年周期):振幅 ~3‰

近傍超新星爆発

ショートガンマ線バースト

地球への彗星衝突

巨大太陽フレア

スライド 26

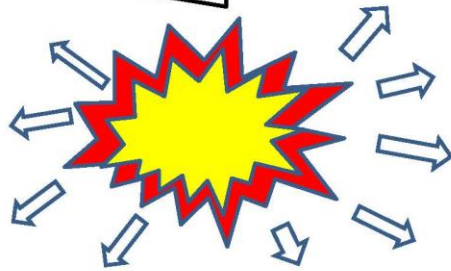
このように世界中で記録されるような炭素 14 増加を引き起こす原因は何か、様々な議論が沸き起こりました。

まず、775 年に観測された炭素 14 増加は通常の太陽活動による変化よりも明らかに大きいため、通常の太陽活動は否定できます。これまでに提案されてきた主な原因として、先ほども少し触れましたが、地球近傍の超新星爆発やガンマ線バーストといった星の爆発現象、大規模な太陽面爆発、また地球への彗星衝突があります。それぞれの仮説について、順番に詳しく見ていきたいと思います。

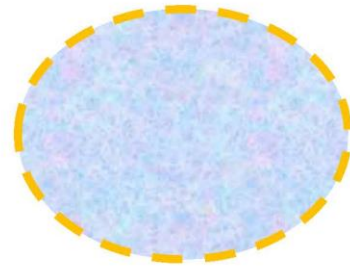
超新星爆発仮説

重い星(太陽の8倍以上)が最期に
起こす大爆発(II型) or
連星系の融合で起きる大爆発(I型)

超新星残骸



爆発後



高エネルギー粒子放出

- 荷電粒子:磁場に曲げられる
- ガンマ線:地球に届き ^{14}C 生成

爆発後は、超新星残骸が残る
⇒該当する超新星残骸なし！

スライド 27

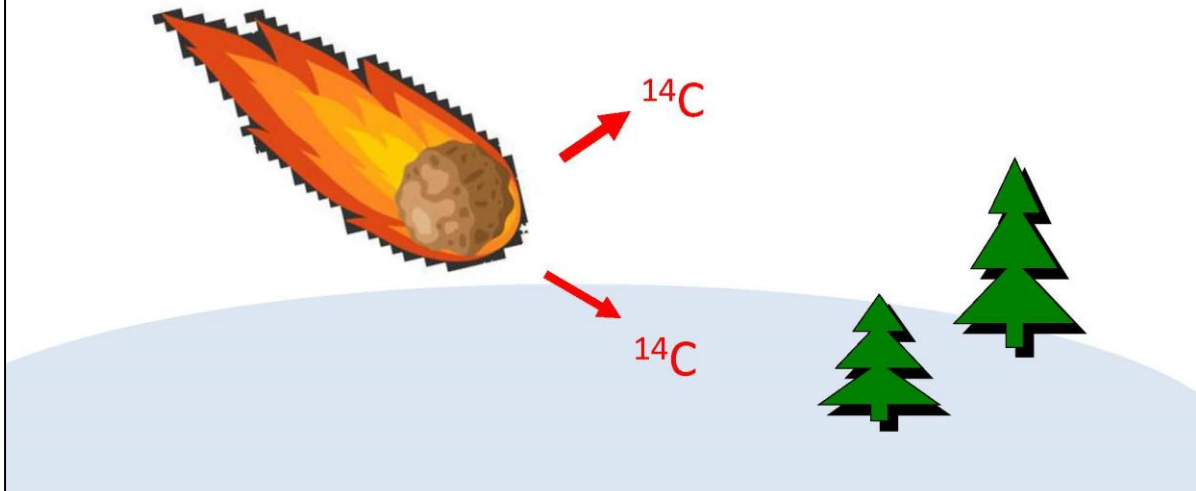
まず初めは超新星爆発仮説になります。超新星爆発とは、太陽の8倍以上の重い星が、星の一生の最後に起こす大爆発、あるいは連星系の融合で起きる大爆発のことで、爆発と共に非常にエネルギーの高い粒子が放出されると考えられています。放出された粒子の中で、電荷を帯びた粒子は星間磁場の影響で曲げられてしまうので爆発直後に地球に到達するのは困難ですが、ガンマ線は到達することが可能で、炭素14が生成されると考えられています。超新星爆発が起きると爆発後にこのような超新星残骸という天体が形成されます。天体写真の本など見ていると、大変美しい天体として超新星残骸は度々登場します。

ここで仮に775年イベントの原因が超新星爆発であった場合、炭素14濃度の増加を説明するには超新星爆発が地球のかなり近くで起きていなければならない、あとに残る超新星残骸も今でも明るく輝いて見えるはずですが、しかし、該当するような超新星残骸は、現在の観測技術で見つかっていません。また、北半球で観測できる超新星爆発であれば歴史記録に残っていそうですが、今のところそういった記録は見つかっていません。

このような理由から、超新星爆発仮説は否定されています。

彗星衝突仮説

Liu et al. 2014



- 直径100km、質量 10^{14-15} トン!! (Usoskin&Kovaltsov 2014)
ツングースカ(1908年)でも直径40m程度と見積もられている
- クレーター等の痕跡なし→原因ではない

スライド 28

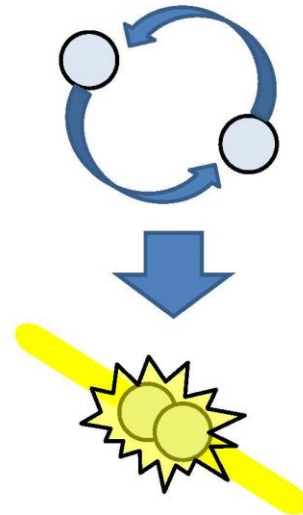
続いて、彗星衝突仮説を見てみたいと思います。彗星はほうき星としても知られ、度々地球へ近づき観測されるので話題に上りますよね。宇宙空間を旅する過程で、彗星の表面にはたくさんの炭素 14 を含む宇宙線が作る核種が形成されています。このような彗星が地球に衝突する際、炭素 14 がばらまかれるという仮説が Liu らによって提案されました。

しかし、後の Usoskin らの検証で、775 年の炭素 14 増加を説明するためには直径が約 100 km ととんでもない大きさの彗星ではないといけなことが明らかになり、そのような彗星が衝突すれば必ず出来るであろうクレーターの痕跡が残されていないことから、彗星衝突仮説も否定されています。

ショートガンマ線バースト仮説

中性子星の連星系

- ショートガンマ線バースト: < 2 sec
- ガンマ線による ^{14}C 生成
- 2つの中性子星(ブラックホール)の融合によって発生
- 超新星残骸が残らない



問題点: 銀河系内のショートガンマ線バーストは稀にしか起きない

融合し、平行ビーム照射が起きる

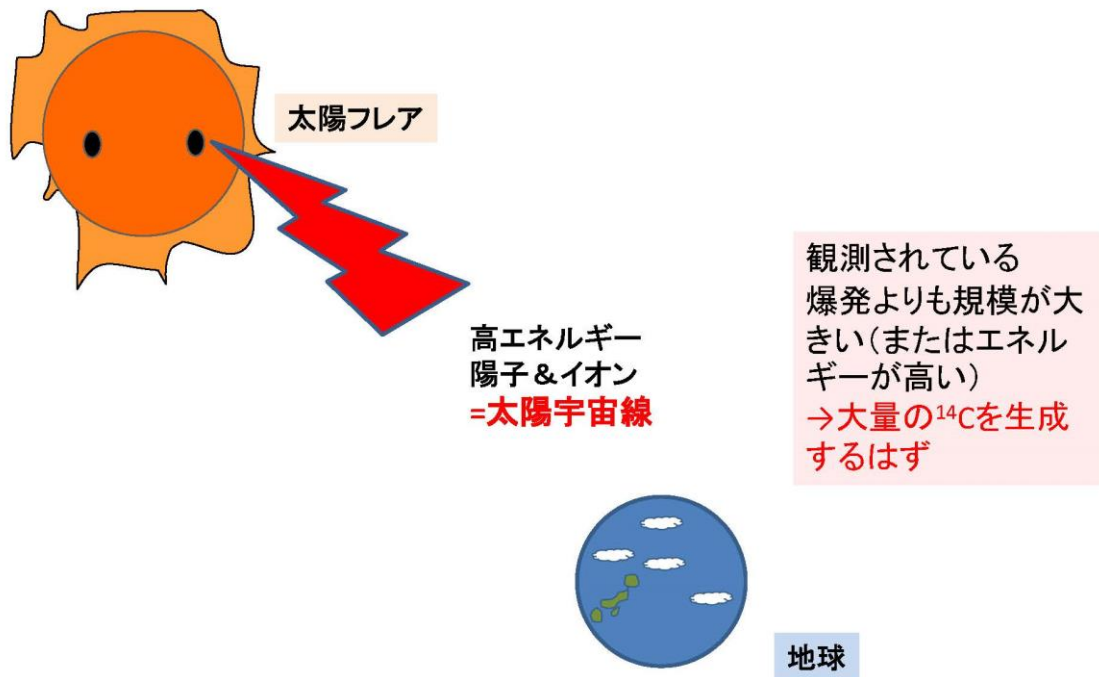
スライド 29

続いてショートガンマ線バースト仮説です。ショートガンマ線バーストは、中性子星の連星系が融合する際に、2秒以下でガンマ線が放射される現象と考えられており、そのガンマ線によって炭素14が生成されると Hambaryan & Neuhäuser によって提案されました。

ショートガンマ線バーストの場合、超新星残骸のようなものがないため、現在の観測で見つかっていなくても問題ないため、原因として可能性があります。さらに、ガンマ線の照射時間も短いことから歴史記録に残っていない点も説明できます。

しかし1点問題なのは、地球近傍のショートガンマ線バーストが頻繁に起きる現象ではないということです。

巨大太陽フレア仮説



スライド 30

最後に大規模な太陽面爆発仮説についてですが、これは前にみたように、太陽面の爆発によって発生した高エネルギー粒子、多くは陽子が地球に降り注いで炭素 14 を作るというものです。ただし、太陽の直接観測で見ついている太陽面爆発では、炭素 14 の増加は見つかっていません。

したがって仮に 775 年イベントの原因が太陽面爆発であるならば、観測されている太陽面爆発よりもはるかに規模の大きいものであることを意味します。

イベントの原因は??

通常の太陽活動ではない

~20 × シュワベサイクル(11年周期): 振幅 ~3‰

近傍超新星爆発

該当する超新星残骸なし

ショートガンマ線バースト

発生頻度 低い

地球への彗星衝突

クレーターへの記録がない

巨大太陽フレア

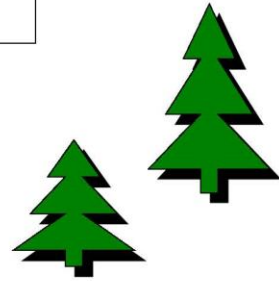
スライド 31

ここまで見てきたように、提案された4つの原因候補のうち、超新星爆発と彗星衝突はその痕跡が見つからないことからそれぞれ否定され、ショートガンマ線バーストは、頻度は低いものの完全に否定できず、巨大な太陽面爆発であれば、観測されているイベントよりもはるかに規模の大きなものと言えます。

探索する年代を広げる

西暦750－820年
→西暦600－1020年

1日1サンプル→1年以上！

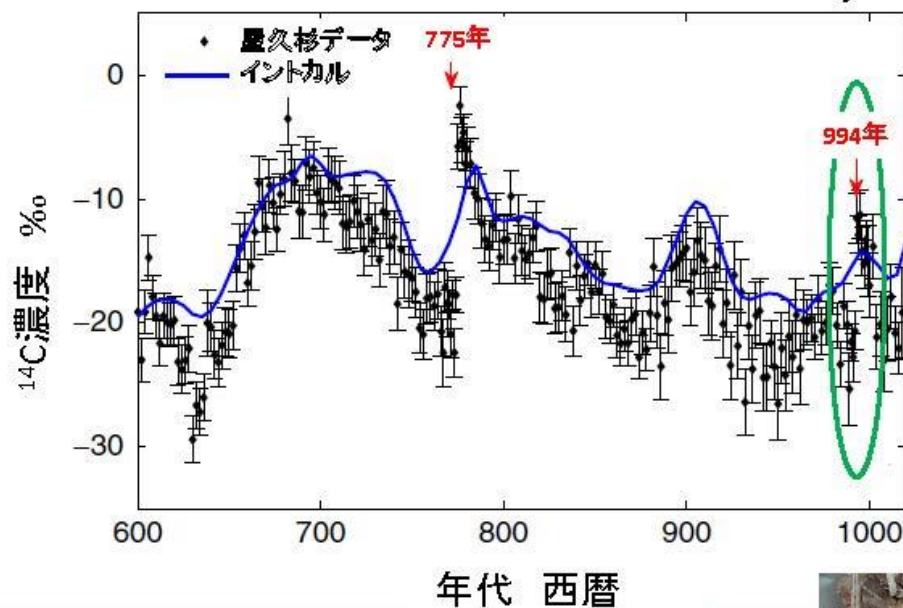


スライド 32

私たちの研究グループでは、他にも 775 年のイベントと同様の急激な炭素 14 の増加がないか探索することにしました。

他イベントの発見

Miyake et al. 2013



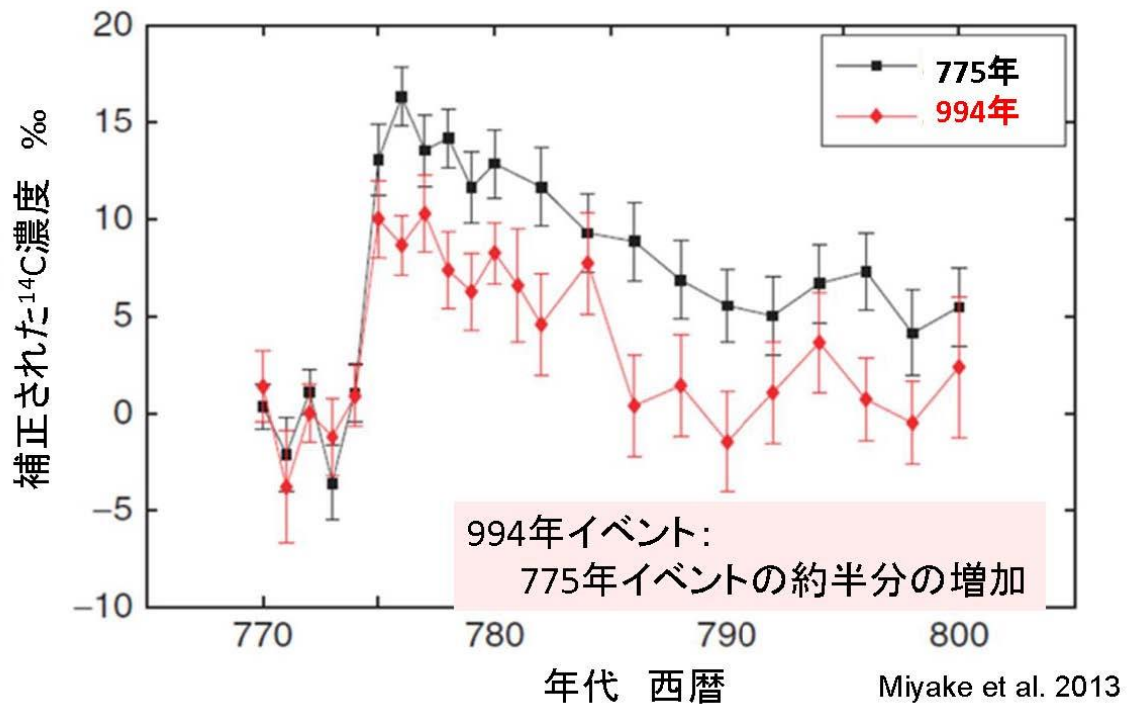
- 屋久杉を用いた測定
- 西暦993-994年にかけての ^{14}C 急増



スライド 33

炭素 14 濃度を測定する年代を広げ、西暦 600 年から 1020 年まで調べた結果がこちらになります。このように、非常に急激で大きな変化として、775 年イベントはこちらに現れていますが、もうひとつ、993 年から 994 年にかけて似たような炭素 14 濃度の急増が見つかりました。

775年と994年: イベントの比較

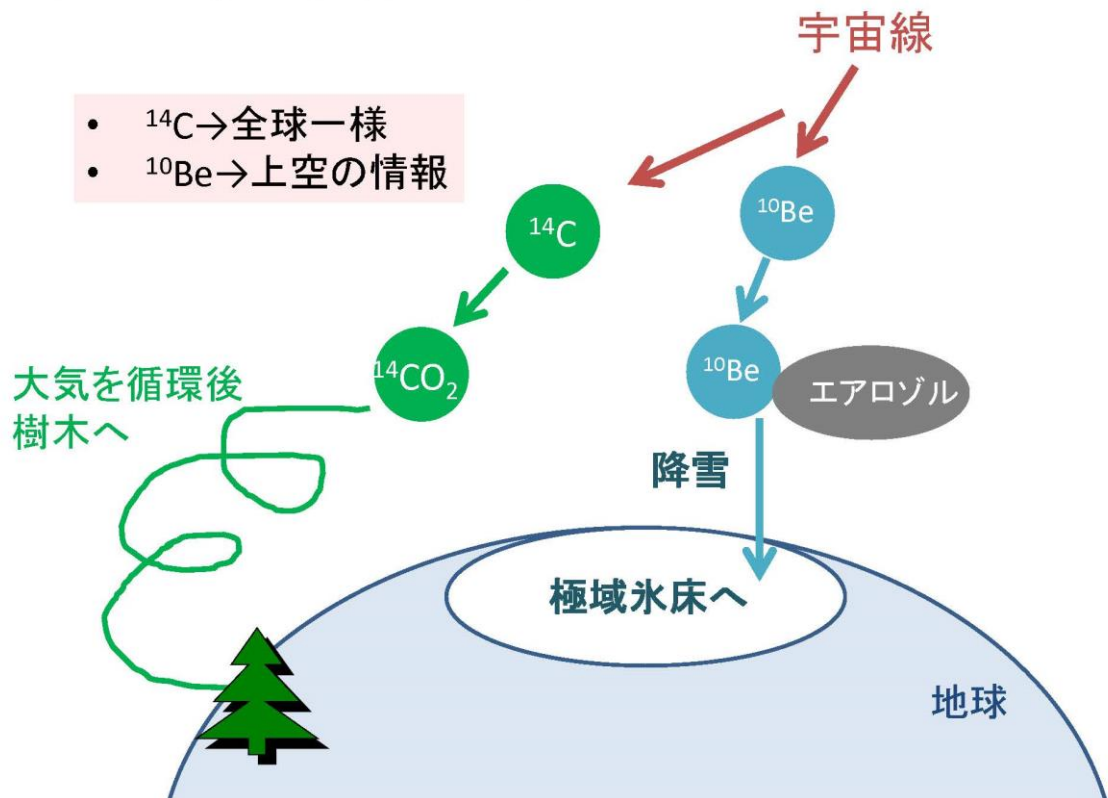


スライド 34

775年と994年の2つのイベントについて比較したものがこちらになります。このグラフをみると、1年で急激に増加した後の炭素14の減衰も見られ、非常によく似た変化をしています。994年のイベントは、775年イベントの約半分の炭素14増加でした。775年、994年と約200年置いて2つのイベントが発生していることから、100年レベルではありますが結構頻繁に発生していたことがわかりました。

さらに原因追求: ベリリウム10 (^{10}Be)

- ^{14}C → 全球一様
- ^{10}Be → 上空の情報

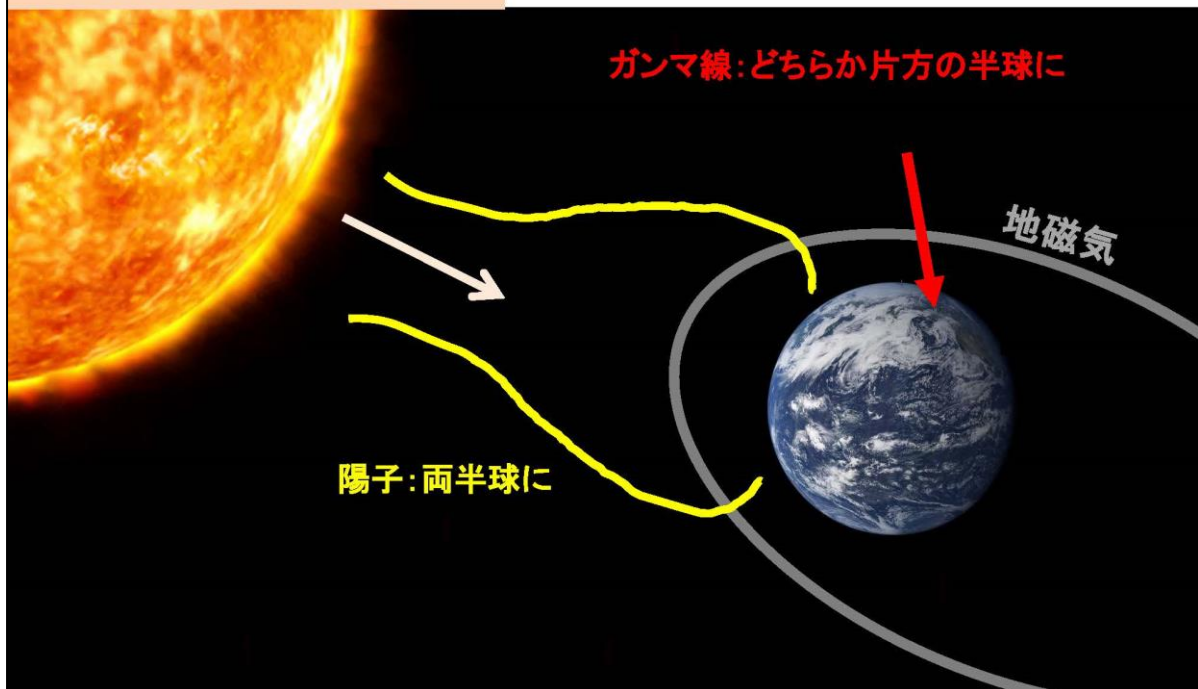


スライド 35

さらにこれらのイベントの原因を追及するために、炭素 14 と同様に宇宙線によって大気中で作られる核種、ベリリウム 10 の測定も行われています。炭素 14 の場合、二酸化炭素になって大気を巡って樹木へと取り込まれるので、全地球的に平均された、全球一様な炭素 14 濃度が得られるのですが、ベリリウム 10 の場合、雪などとともに地上にもたらされるので、ある程度生成された上空の情報を保っていると考えられています。

ベリリウム 10 の場合は、年輪ではなく極域の氷床に順番に蓄積されます。氷床も、年輪と同様に過去遡って調べることができる代表的なサンプルになります。先ほど、原因の候補となっていた太陽面爆発の場合、陽子が主に炭素 14 を生成し、ガンマ線バーストの場合はガンマ線が炭素 14 を生成します。

地球磁場の影響



- 南北対称の地球磁場: 太陽からの陽子は影響を受ける
- 両半球に ^{10}Be ピーク $\rightarrow$ 太陽起源の可能性

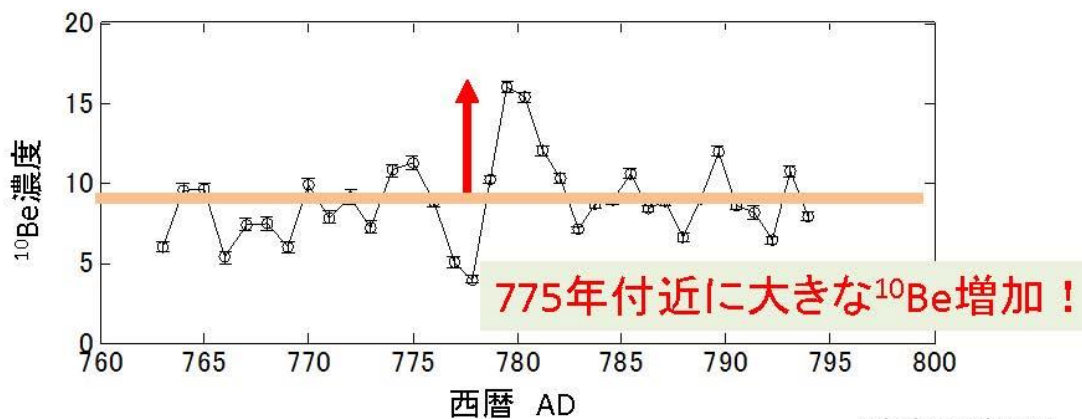
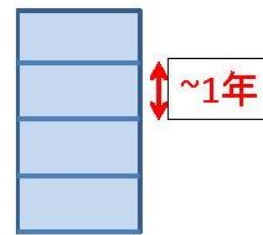
スライド 36

陽子とガンマ線で大きく違う点は、陽子は電荷を帯びているため磁場による影響を受けるのに対してガンマ線は受けません。陽子の場合には地球の南北対称の磁場による影響を受け、両半球に同程度の量が降り注ぐと考えられます。逆にガンマ線の場合は到来した方向によっては両半球で入射量に違いが生まれる可能性があります。したがって、仮に両半球に同程度のベリリウム 10 の増加が認められれば、それは太陽面爆発を支持する結果といえます。

南極の ^{10}Be データ

- ドームふじアイスコア (南極)
- AD 775 周辺
→ 1 年の分解能で調査

↓ 雪など堆積



Miyake et al. 2015

スライド 37

そこで、私たちの研究グループは南極にある日本のドームふじと呼ばれる基地から得られた氷床コアを使ってベリリウム 10 の濃度を調べました。ちょうど 775 年前後と思われる氷床をおおよそ 1 年の間隔になるように切り分けて、分析を行いました。

その結果、775 年付近に非常に大きなベリリウム 10 の増加を発見しました。私たちの研究グループだけではなく、世界の他のグループも南極のドームふじとは異なる氷床コア、またグリーンランドの複数の氷床コアのベリリウム 10 の分析を行い、私たちとほぼ同様のベリリウム 10 の急増を報告しています。

775年イベントの規模

両半球に明白な ^{10}Be ピーク

--南極(ドームふじ、WDC)

--グリーンランド(NEEM,NGRIP) (Siglら 2015, Mekhaldiら 2015)



原因は巨大太陽フレアが有力

観測史上最大といわれるキャリントンフレア(1859年)付近の ^{14}C 濃度は増加せず→775年イベントはキャリントンフレアよりもよほど大きい

スライド 38

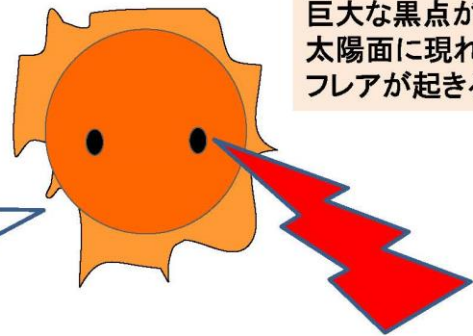
このように、両半球にほぼ同程度のベリリウム 10 の増加が確認されたこと、宇宙線増加イベントは結構頻繁に起きていたということ、さらにほかにもいくつかの検証から 775 年や 994 年のイベントの原因は大規模な太陽面爆発がもっともらしいと考えられています。

観測史上最大の太陽フレアといわれる 1859 年に発生したキャリントンフレアという太陽フレアがありますが、この 1859 年前後に炭素 14 濃度の増加は見つかっていません。したがって 775 年や 994 年のイベントは、キャリントンフレアよりもはるかに大きな太陽面爆発であったということが予想されます。

スーパーフレア

- 観測史上最大の太陽フレアの10倍以上

銀河系にある太陽に似た他の星(恒星)で、たくさん見つかってきています



巨大な黒点が太陽面に現れてフレアが起きる

太陽でスーパーフレアが発生する可能性が議論されている

スライド 39

このような観測史上最大の太陽フレアよりも10倍以上大きなフレアのことを、スーパーフレアと呼んでいます。スーパーフレアは他の恒星で見つかっていましたが、近年、特に太陽に似た星でもスーパーフレアを起こす星がいくつも見つかってきました。以前は私たちの太陽でスーパーフレアが起きるかよくわかっていませんでしたが、このような太陽型の恒星におけるスーパーフレア発見によって、私たちの太陽でもスーパーフレアが発生する可能性について議論されています。

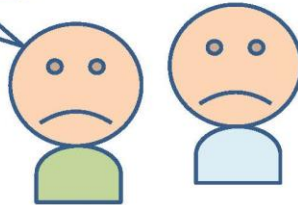
特に 775 年イベントが太陽でスーパーフレアが発生した証拠になるかもしれないため注目を集めています。

人々への影響

- 奈良(AD775年)、平安時代(AD994年)に大規模な太陽フレア発生の痕跡
- 観測史上最大のフレア(キャリントンフレア:1859年)の少なくとも10倍の規模→現代社会に大打撃
- オーロラの記録？

1000年前は大きな被害は出ませんでした

でも現代文明には大きな被害を及ぼします



スライド 40

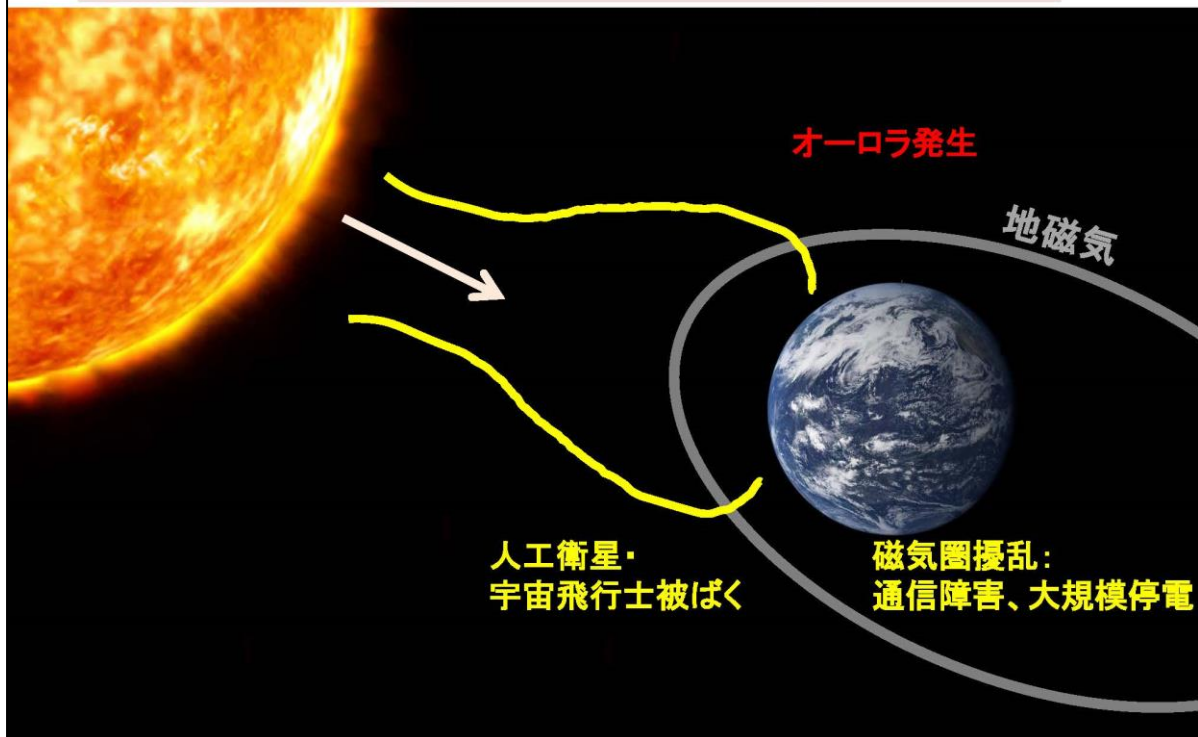
最後に大規模な太陽面爆発がどのような影響を私たちに与えるか見てみたいと思います。

これまでのお話のように、奈良時代である 775 年と平安時代である 994 年にそれぞれ大規模な太陽面爆発が発生した可能性あり、その太陽面爆発はこれまでに観測されているものよりはるかに大きいと考えられます。約 1000 年前は文明があまり発達していなかったため、大きな影響はなかったと考えられます。

大フレアによる影響

大規模停電、GPS故障、通信障害...

過去どの程度の頻度で大規模フレアが発生していたか？



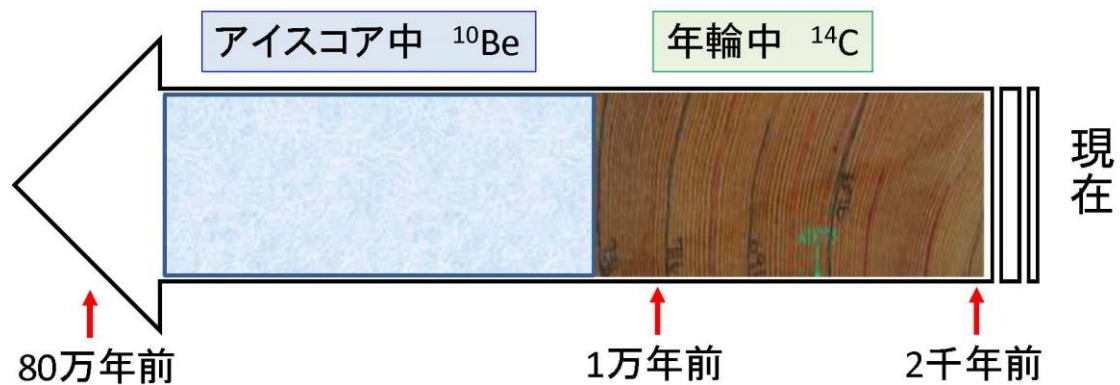
スライド 41

しかし仮に現在大きな太陽面爆発が起きると現代文明に甚大な被害が発生すると危惧されています。例えば、太陽面爆発によって発生した高エネルギー粒子による人工衛星・宇宙飛行士の直接被ばくや、地球の磁気圏の擾乱による通信障害、さらに地上の大規模停電等が引き起こされる可能性があります。775年と994年の炭素14の急増は、このような私たちの生活に大きな影響を与える太陽面爆発が過去に起きていた可能性を示すものです。過去発生していたということは、将来発生する可能性も十分考えられます。

したがって、将来のイベントに備えるために、過去どの程度の頻度でこのようなイベントが発生していたか明らかにすることが重要と考えられます。

今後の展望

- 多くの巨大フレアの痕跡があるかもしれない
- 過去さらに遡って、長期的な太陽活動を調べる



スライド 4 2

私たちは、過去の炭素 14 増加イベントの頻度を明らかにするために、長期にわたる調査を継続しています。この 1 万年程度は年代が確定した樹木のサンプルがあるためそちらを利用できますし、さらに過去遡ると年輪サンプルの利用が難しくなりますが、氷床コアの利用が期待できます。

年輪や氷床コアの分析は地道な作業の積み重ねですが、そこには非常に重要で面白い太陽の謎が隠されています。

今後も引き続き、そのような謎を解き明かしていきたいと思います。