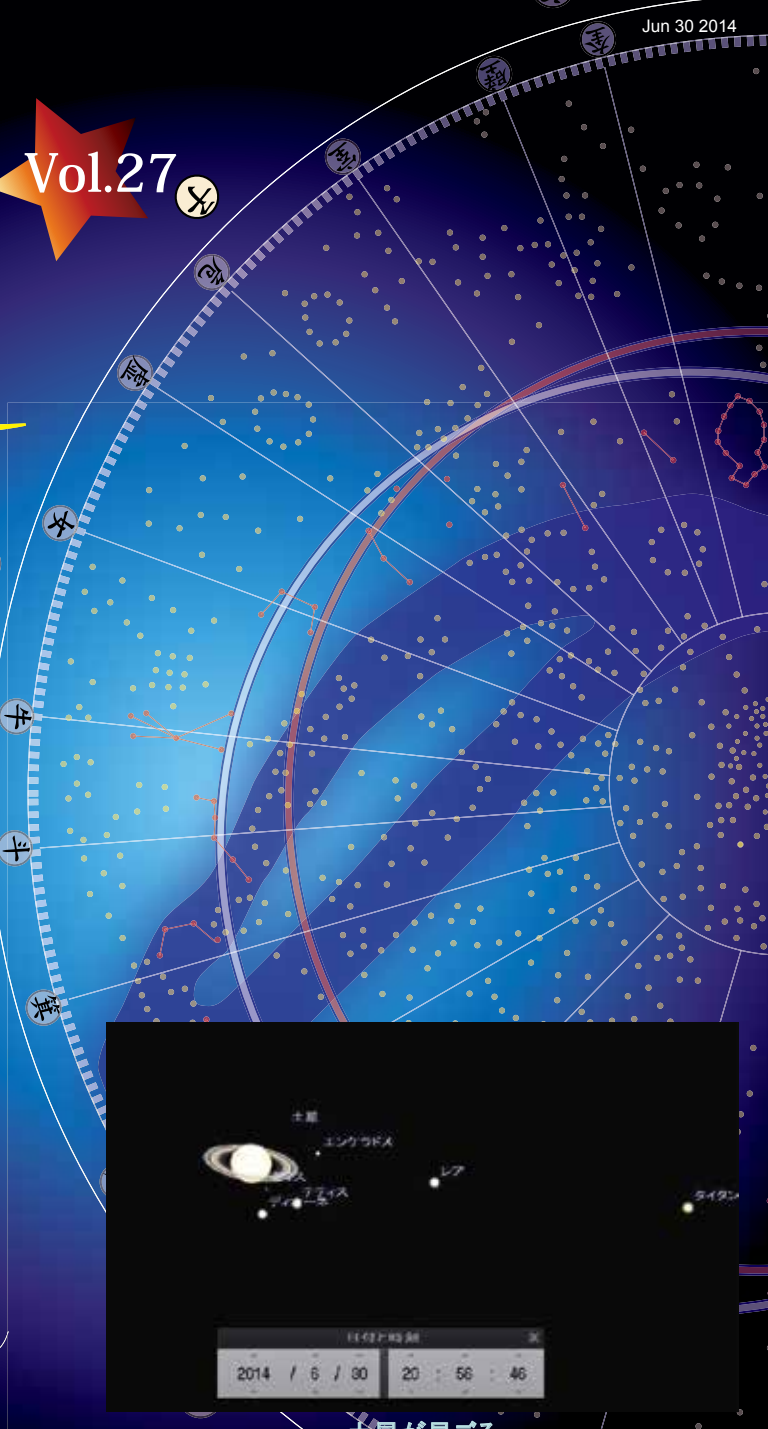


会報

Vol.27

# astron



土星が見ごろ



NPO法人 花山星空ネットワーク

## あすとろん 第27号 目次

太陽系外惑星と宇宙生命	松尾太郎	1
3.8 m望遠鏡で探る様々な突発天体现象	野上大作	8
第13回講演会、第7回通常総会、懇親会の報告	西村昌能	16
今年は閏年？ 太陰太陽暦の作り方	作花一志	21
星空文芸欄	高尾和人他	25
ヒッグスー宇宙の革命児	坂東昌子	26
お知らせ	事務局	

表紙画像 土星が見ごろ  
ステラリウム使用

裏表紙画像 桔梗が咲いた

編集子撮影

晴明神社にて 6月29日

### 定款抜粋

第3条 京都大学花山天文台は、創立当時からアマチュア天文家にも施設を公開して、その育成に貢献すると共に、広く市民にも親しまれてきている。

この法人は、この伝統と精神を継承し、花山天文台および飛驒天文台の施設と知的財産を活用して、科学を愛する市民が主体的に宇宙と自然について学び、研究し、普及活動を行うことの出来る事業を展開する。また、その結果として、青少年の理科教育やより多くの市民の生涯学習に寄与することを目的とする。

第5条 この法人は、第3条の目的を達成するため、次の事業を行う。

(1) 特定非営利活動に係る事業

- 1) 天体観望会の開催
- 2) 天文・宇宙科学に関する講演会の開催
- 3) 花山・飛驒天文台施設・設備・研究成果公開の支援
- 4) 教育関係者研修・理科教育教材開発の支援
- 5) 小・中・高校・大学などの天体観測研究実習の支援
- 6) 市民の天文・宇宙科学に関する研究活動の支援
- 7) 太陽エネルギーの効率的利用普及活動の支援
- 8) 宇宙天気予報の研究・学習の支援
- 9) その他本法人の目的を達成するために必要な事業。

# 太陽系外惑星と宇宙生命

松尾太郎（京都大学大学院理学研究科）

## 太陽系外惑星の発見と多様性

1995年に太陽系外の恒星の周りで惑星が初めて発見されて、現在までに1000以上の惑星が確認されています。太陽系とは似ても似つかない惑星系が多数発見され、その多様性が明らかにされました。例えば、太陽系の木星が太陽を12年かけて1周公転するのに対して、初めて発見されたペガサス座51番星（秋の星座）の惑星系では、木星のような巨大ガス惑星が周期4日で主星（惑星系の中心の恒星を「主星」と呼びます）を公転しています。この惑星は主星のすぐ近くを公転しているので、高温に熱せられていると考えられており、「Hot Jupiter（灼熱の巨大ガス惑星）」と言われています。また、別のHot Jupiterでは、水素大気が熱で散逸していることを支持する観測結果が得られています。このようなHot Jupiterは、稀な存在ではなく、現在までに数百もの惑星が発見されています。一方、主星から遠く離れた木星のような惑星も多く発見されています。太陽系の木星は一般的な存在であることが分かりました。また、発見当初は木星のような重いガス惑星が中心でしたが、技術の急速な進歩によって、検出が難しい軽い惑星も最近発見されるようになりました。地球の20倍重い海王星型惑星や地球の2倍重いスーパーアースと呼ばれる新種の惑星も発見されました。

ここまで紹介した惑星は、ドップラー法と呼ばれる手法によって発見されています。この方法は、名前の通り、ドップラー効果（音を出す車が近づいて遠ざかったりするときに、音が高くなって低くなる現象）を利用します。星の光も音と同様に波の性質を持つので、私たちに近づけば光は青みがかかり、遠ざかれば赤みがかかります。惑星を持つ星は、惑星からの重力によって主星がわずかに揺さぶられます。その速度変化を星からのスペクトルから計測します。したがって、私たちが想像するような写真で惑星の姿を捉えるのではなく、主星からの光を観察して、主星の動きを精度よく調べることによって間接的に惑星の存在を明らかにします。では、惑星の重力によって主星はどれくらい揺さぶられるのでしょうか？惑星が軽くなれば、主星が受ける重力は小さくなるので、その速度変化も小さくなります。例えば、太陽系では、太陽は木星の重力によって12m/sの速度変化、地球の重力によってわずか10cm/sの速度変化しかありません。このように、非常に僅かな速度変化なので、主星の色の変化は非常に小さく、非常に細

## ☆・太陽系外惑星と宇宙生命・☆

かく色の光を分けることが必要です。現在の技術で、1m/s 程度の精度で主星の速度変化を計測できるようになりました。

図1は、ドップラー法により発見された太陽系外惑星の主星からの距離と重さを示したものです。この図から分かるように、系外惑星は次の3つのカテゴリに大別できることが分かります。①主星のすぐ近くを公転する Hot Jupiter (灼熱の巨大ガス惑星)、②主星から遠方にある木星の類似惑星、③地球の2倍から20倍の重さの軽い惑星です。

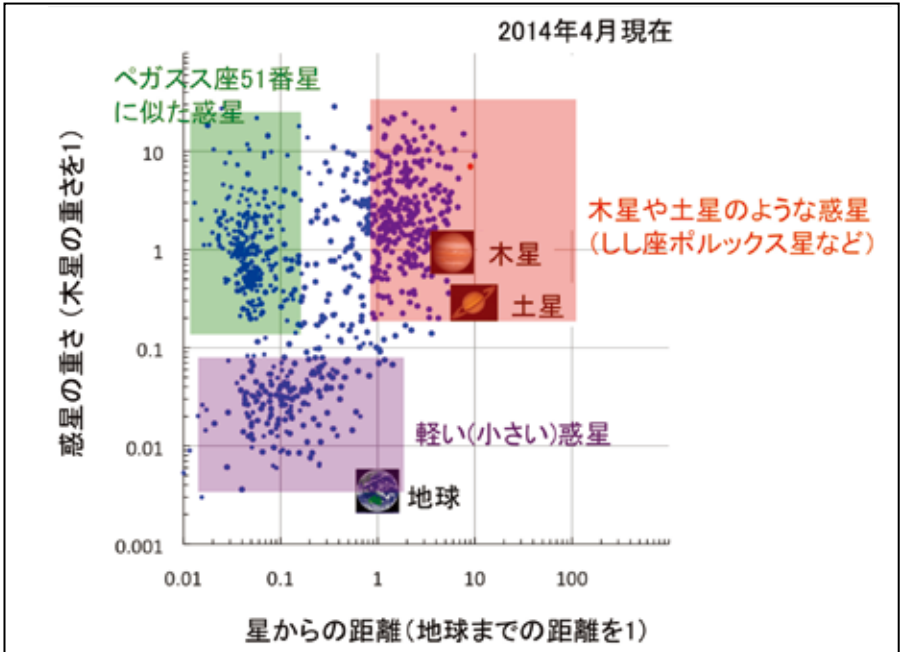


図1 これまでに発見された系外惑星の分布  
(データは Exoplanet Encyclopedia を参照。)

### 地球型惑星の普遍性

地球のような小さな惑星の宇宙における普遍性を調査するために、NASAは2009年にケプラー衛星を打ち上げました。ケプラー衛星は、トランジット(食)法と呼ばれる、惑星が主星の前面を通過する際に惑星の影を観察する方法です。食の身近な例として、2012年6月に太陽の前面を金星が通過した天体現象がありました。この時、ちょうど「太陽」—「金星」—「私

## ☆・太陽系外惑星と宇宙生命・☆

たち観測者」が一直線に並んだので、太陽の前面に金星の影が観察されました。一方で、太陽系の外にある主星は非常に遠いので点として観察されます。その結果、影として認識するのではなく、主星の明るさの変化として捉えることができます。ここで、その明るさの変化は惑星の面積に比例するので、トランジット法は惑星の大きさを計測できます。しかし、その明るさの変化は、太陽の前面を木星と同じ大きさの惑星が通過すれば 1/100、地球では 1/10000 の変化しかありません。そこで、このような僅かな明るさの変化を捉えるために、地球大気を避けて安定した宇宙からの観測が必要になります。ケプラー衛星は、トランジット法に特化した衛星で、1/10000 の明るさの変化を捉えることができます。従って、地球のような大きさの惑星を検出できる感度を持っています。一方、「主星」—「系外惑星」—「観測者」が偶然一直線に並んだ時にだけ食が起こるので、白鳥座の方向の 10 度×10 度にある 15 万 6 千もの恒星を常時モニターしました。

2011 年にケプラー衛星の初期成果が報告されました。その結果は驚くべきものでした。ドップラー法は、15 年積み重ねて 1000 を超える惑星を発見しましたが、たった 2 年でケプラー衛星は 3000 を超える惑星（候補）を報告しました。ここで、候補としているのは、惑星の重さが確認されて初めて惑星として認められるからです。トランジット法は単独では惑星の重さを計測できないので、ドップラー法の追観測が必要です。

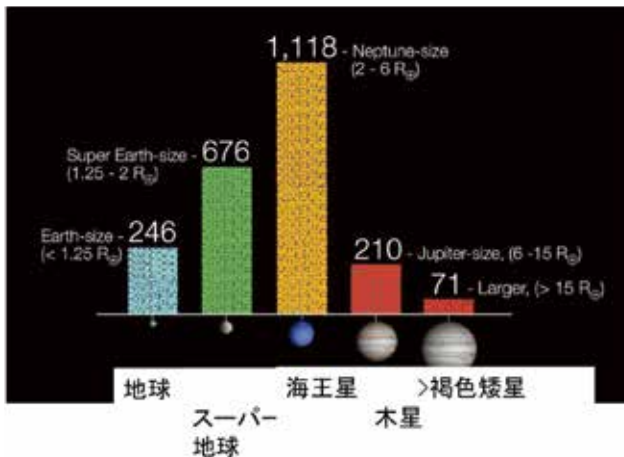


図2 ケプラー衛星で発見された惑星のサイズ分布 (NASA から提供)

図2は、3000 を超える惑星候補について大きさで分類した結果です。地球の10倍の大きさの木星や土星は発見された惑星のうち10%程度の割合で、

## ☆・太陽系外惑星と宇宙生命・☆

地球の 4 倍の大きさの海王星や天王星のような惑星が半分の割合を占めています。さらに、これまでほとんど発見されていなかった、地球の 2 倍程度のスーパーアースと呼ばれる新しいカテゴリの惑星や、地球程度の大きさの惑星も全体の 40% 近くにもなることが分かりました。最新の研究によると、3 割の恒星の周りで地球のような大きさの惑星が存在すると報告されています。このように私たちの住む地球のようなサイズの惑星は普遍的であることが分かったのです。

### ハビタブル惑星

2014 年 4 月にケプラー衛星によって「第 2 の地球候補」が発見され、ニュースで大々的に取り上げられました。この惑星はケプラー186f と名付けられました。では、何が地球と似ているのでしょうか？それは、二つの点で似ています。まず、一つ目の点は、惑星の大きさです。ケプラー186f は、地球 1.1 倍の大きさでほぼ同程度です。二つの点は、ハビタブルゾーンと呼ばれる「惑星の表層に液体の水を有する可能性のある領域」にケプラー186f が位置していることです。液体の水は、私たちの地球生命の進化や維持、表層環境の安定に大きな役割を果たしています。この液体の水は、主星から近すぎても遠すぎても存在しません。図 3 に示すように、太陽のような類似星の周りでは地球軌道付近に、より軽い星（温度の低い星）の周りでは、主星のすぐ近くにあります。ケプラー186f は、水星と同じように主星の近くを公転していますが、太陽に比べて温度の低い星なので、ちょうどハビタブルゾーンの中にあります。これまでに、ケプラー186f の惑星をはじめとして、十数個の候補が報告されています。このような惑星をハビタブル惑星と呼びます。

### 宇宙生命

ハビタブル惑星は、生命が居住できる条件を満たすだけであり、必ず生命が存在するわけではありません。では、仮にその表層に生命が存在する場合に、惑星を観測するときどのようなシグナルが得られるのでしょうか？この問いに答えるために、太陽系の地球型惑星である金星・地球・火星のスペクトル（波長ごとに分けた強度）を比較しましょう。スペクトルを計測する理由は、惑星大気に含まれる分子や原子を調べることにあります。分子や原子はある特定の光を吸収する性質を持つので、その特定の光では暗くなります。例えば、太陽の可視光スペクトルには、数百の暗線が含まれています。これらはフラウンホーファー線と呼ばれており、恒星大気の特定の原子やイオンの吸収によるものです。従って、惑星のスペクトルを観察すれば、その惑星大気に含まれる分子や原子を検出することが

可能になります。

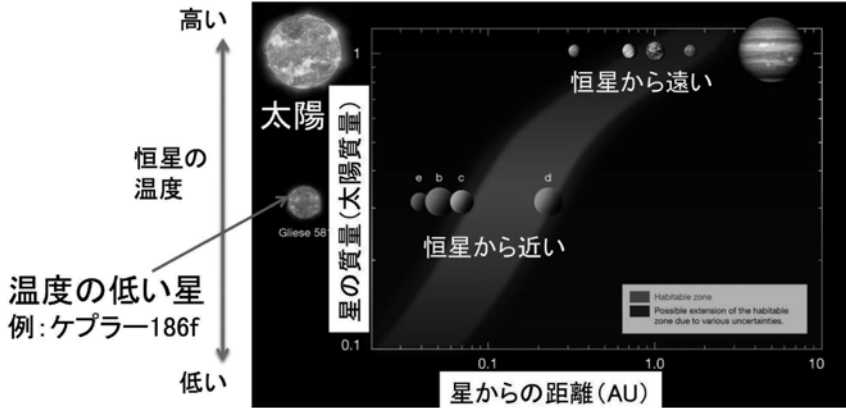


図3 ハビタブルゾーン (画像は欧州天文台の提供)

金星・地球・火星のスペクトル観測から、金星・火星と地球の大気組成は全く異なることが分かりました。特にここで注目するのが、金星・火星にない酸素分子とオゾン分子です。これらの分子は、酸素発生型光合成（水の電気分解による酸素発生）によって地球大気に酸素を供給し、その結果オゾン分子も大気中に形成されたと考えられています。実際、図4に示すように、この光合成が起こる二十数億年前の地球大気に含まれる酸素の割合は、現在の地球に比べて1/1000未満でした。これは、非生物的作用（水蒸気の紫外線分解）では、地球大気に豊富な酸素を供給できないことを意味しています。このように、系外惑星を観測する時に、その惑星大気に豊富な酸素量が確認されれば、惑星表層で生命活動（代謝）が存在することを示唆しています。

### 最後に

天文学における最大の科学的目標の一つに、私たち地球生命以外に存在するかもしれない宇宙生命の探索があります。仮に、宇宙生命体が発見されれば、私たち地球生命をひとつの個体として捉え、生命の比較が行われるでしょう。これは、私たち地球生命の起源や仕組みを探るひとつの大きな手掛かりになると期待されます。また、純粋な科学的価値だけでなく、人種や民族を超えて、生命という新たな価値観を共有することができるかもしれません。京大3.8m望遠鏡に搭載される惑星探査装置(SEICA)は、将来の宇宙生命の本格的探査における重要な一歩になると期待されています。



# 株式会社 西村製作所

代表取締役 西村 有二

〒601-8115

京都市南区上鳥羽尻切町 10 番地

TEL 075-691-9589

FAX 075-672-1338

<http://www.nishimura-opt.co.jp>

【事業内容】望遠鏡・天体観測機器製造



## CHUO

### 天体観測機器・光学機器 設計/製作



豊かな想像力と確かな技術力

有限会社 中央光学

〒491-0827 愛知県一宮市三ツ井 8-5-1

TEL: 0586-81-3517 FAX: 0586-81-3518

<http://www.chuo-opt.com>



アテナとケンタウロス

ボッティチェッリ作

<http://free.artworks.gatag.net/t/2013/04/03/210000.html>



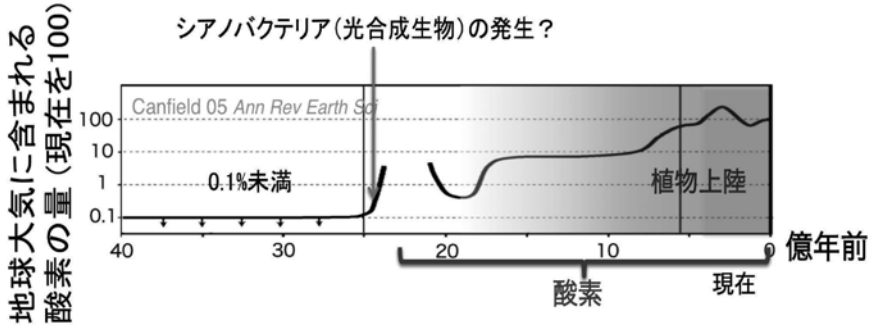


図 4 地球大気に含まれる酸素量の時間変化

お知らせ 編集子より

9月3日より10月19日まで、京大総合博物館で特別展「明月記と最新宇宙像」が開かれます。国宝「明月記」も展示されます。藤原定家の他に山本一清、射場保昭、石塚睦の天文業績も紹介されます。

本 NPO も共催団体になっているので、ぜひご来場ください。

京都大学総合博物館 平成26年度特別展  
**明月記と最新宇宙像**  
 千年を超えて羽ばたく京の宇宙地球科学者たち

2014年9月3日水～10月19日日  
 9時～16時 入場は16時まで  
 ◎休館日 月曜日・天象日(平日・祝日にはあわせて)  
 ◎観覧料 一般 1000円 高校生・大学生 2000円 小学生・中学生 2000円  
 ※20歳以上の場合団体観覧料が適用されます  
 ※20歳以上の方、身体障害者手帳をお持ちの方は無料

主催 京都大学総合博物館 京都大学大学院理学研究科附属天文台  
 京都大学大学院工学研究科物理物理学教育 京都大学大学院  
 理学研究科宇宙物理学教育  
 共催 NPO法人地球科学ネットワーク 京都大学宇宙総合研究ユニット  
 京都大学研究開発アーカイブ  
 協賛 株式会社科学技術振興  
 協力 公益財団法人地球・自然科学研究機関同連天文台

## 3. 8 m 望遠鏡で探る様々な突発天体現象

野上大作（京都大学大学院理学研究科）

### 1. はじめに

この原稿は2014年5月6日に、NPO花山星空ネットワークの講演会でお話をさせてもらったことをもとにして書き起こしたものです。

京都大学大学院理学研究科附属天文台は、京都市山科区にある花山天文台と、岐阜県高山市上宝町にある飛騨天文台からなります(図1)。そして現在、京都大学大学院理学研究科附属天文台と同宇宙物理学教室、国立天文台、株式会社ナノオプトニクス・エナジーが協力して、国立天文台岡山天体物理観測所の敷地内に、新しく口径3.8mの望遠鏡の建設を進めています。完成すれば、京



図1：花山天文台（上）と飛騨天文台（下）の航空写真

都大学が持つ花山・飛騨に次ぐ第3の天文台となります。

正式名称は京大岡山3.8m新技術望遠鏡といい、この口径は国内最大であることはもちろんですが、汎用望遠鏡としてはアジアで最大の望遠鏡となります。「新技術」をうたっているのは、花びら型の分割鏡、超精密研削と干渉計を使う鏡面測定による高速高精度反射鏡製作、斬新な構造を持つ軽量かつ堅固な架台という、望遠鏡建設の未来を先取りする技術開発を行い、それを実証する望遠鏡だからです。この望遠鏡の完成予想図を図2に載せておきます。昨年度（平成25年度）の補正予算で望遠鏡建設の



図2：京大岡山3.8m新技術望遠鏡の完成予想図。18枚の鏡を組み合わせる分割鏡方式で、独特な構造の軽量架台となっている。

### ☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体现象・☆

予算がつかしました。今年度（平成 26 年度）中に竣工して、平成 27 年度には調整とテスト観測へと進んでいく予定です。

この望遠鏡の観測時間のうち、約半分の時間を京都大学が使う予定です。その京都大学の時間枠の中では、1) 突発天体・現象の即時対応観測、2) 直接撮像による系外惑星探査、3) スーパーフレア星の長期間の高分散分光モニター観測をサイエンスの柱としています。2) については、松尾さんの記事[1]をご覧ください。本稿では1) 3) を簡単に説明します。

## 2. 突発天体・現象の観測

一口に突発天体・現象と言っても、宇宙には様々な空間スケール、時間スケール、エネルギースケールでの爆発現象があります。身近(?) などところで言えば、太陽表面での爆発現象、いわゆるフレアがあります。また、超新星爆発、新星爆発という言葉が聞かれたことのある方は多いと思います。他にもブラックホール X 線連星の爆発現象やジェット現象（ブラックホール周辺の降着円盤の突然の増光現象や、ブラックホールに近いところから降着円盤に垂直に噴水状にガスやエネルギーが噴き出る現象）や活動銀河核の爆発現象（銀河の中心にある超巨大ブラックホール周辺の突然の増光現象）などもあります。最近とても注目を浴びているものとしては、重力波天体というものもあります。コンパクト星（ブラックホール、中性子星、白色矮星）同士の連星でこれが合体するとき大爆発を起こします。

それぞれに非常に面白い天体や現象であり、3.8m 望遠鏡での研究対象なのですが、全てを紹介するスペースはありませんので、ここでは「宇宙最大の爆発現象」と呼ばれるガンマ線バーストを紹介します。

ガンマ線バーストは 1967 年にアメリカの軍事衛星 Vela で発見されました。ガンマ線は核反応に伴って出てくる放射線（電磁波）なのですが、宇宙から、時折ごく短時間だけ(10 ミリ秒～数百秒程度)、つまりバースト的にガンマ線がたくさん飛んでくる現象が観測されたのです。発見以来 30 年ほど、その起源は様々な説が出されましたが、未解明のままです。

そうしたなか、1997 年 2 月 28 日のガンマ線バーストで、ガンマ線での減光速度ほどではありませんが、X 線と可視光ですごい速さで暗くなっていく点源が同定されました[2]。ガンマ線バーストが可視光でも観測される(可視光残光と呼ばれます)と、研究は一気に進み、1998 年 4 月 25 日に起きた

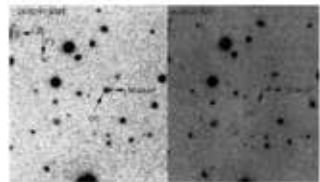


図 3: ガンマ線バースト GRB970228 の光学対応天体(矢印)[2]。ガンマ線バーストが発見されてから 8 時間後の画像(左)と 2 日後の画像(右)。

### ☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体现象・☆

ガンマ線バーストの可視光残光のスペクトル中に、非常に質量の大きな星の最後の大爆発である Ic 型超新星のスペクトルとそっくりな成分が検出されました[3]。現在では、ある種の超新星爆発では、中心にブラックホールができそこから超相対論的なジェットが吹き出して、たまたまその延長上に地球がある場合に、(長い) ガンマ線バーストとして観測される、と考えられています[4] (短いガンマ線バーストというのもあって、重力波天体の最後?としてこれまた面白いのですが、割愛します)。

さてこのガンマ線バースト、宇宙最大の爆発現象と言われるだけあって、大変に明るいのです。明るければ、遠いところで起こったガンマ線バーストでも観測できることになります。宇宙でこれまでに観測された最遠方の天体・現象の記録を争っているのが、ガンマ線バースト、あるいは活動銀河中心核です。これまでに見つかった最も遠いガンマ線バーストは GRB090429B で、131 億光年より遠いと言われていています[5]。即ち、宇宙の始まりから 7 億年弱の時の爆発で、131 億年も昔のことを人類は観測したことになります(ただしこのように遠い現象は、宇宙が膨張している影響で赤方偏移の効果が大きくて、残念ながら可視光では暗くなってしまいます)。

めちゃくちゃ遠いというほどではない(と言っても非常に遠いのですが)現象については、可視光でも大変明るくなることがあります。例えば、2008 年 3 月 19 日に発見された 2 つ目のガンマ線バースト GRB080318B は、最も明るい時で  $V=5.8$  等まで明るくなった! という報告があります[6]。約 75 億光年先で起こった爆発のようです。5.8 等ってすごいと思いませんか? 肉眼で見える最も暗い星が 6 等級だとする(京都、大阪のように夜空が明るい場所では、6 等星が肉眼で見えることはまずあり得ないだろうと思います)と、数十秒程度ですが目で見えたことになります。あなたが今夜、星空を眺めていて「おや?何か微かに光った?」と感じるようなことがあれば、ひょっとすると何十億光年も先で起こった爆発だったのかもしれない。

ガンマ線バーストはとて大きなエネルギーを放出しますが、明るく輝いて見える時間は非常に短く、長くてもせいぜい数時間です。ですので、これを研究しようと思ったら、ガンマ線衛星からの発見通報を受けたら、すぐにそちらの方に動く望遠鏡が必要です。3.8m 望遠鏡は突発天体・現象の即時対応観測をサイエンスのメインの柱の 1 つとする、世界で最大の望遠鏡になります。ガンマ線バーストが起こる機構や非常に遠くの宇宙環境の解明が期待されます。

### 3. 太陽型星のスーパーフレア

皆さんは、太陽表面で大きな爆発現象(フレア)が起こるということを聞かれたことがあると思います。フレアでは大量のプラズマや放射線、高

### ☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体現象・☆

エネルギー粒子などが、惑星間空間に飛び出していきます。これが地球の方向に飛んでくると、地球環境に重大な影響を及ぼすことがあります。1859年に人類が初めて詳しい観測記録を残したフレアは、観測者の名前をとってキャリントン・フレアと呼ばれます(図4)[7]。これは150年くらい経った現在でも、観測史上最大級のエネルギーのフレアであると考えられていて、過去200年で最大級の磁気嵐があつたり、ヨーロッパや北アメリカの広範囲で電信システムが故障したり、という記録が残っています。また、1989年3月13日には、その2日前に起こったフレアによる噴出物の影響で、変電所の設備が壊れ、カナダのケベック州を中心に600万人が9時間もの停電を経験するという大被害がおきました。今や、その時代よりも衛星やインターネットでの通信に頼る生活になっており、もし同じようなことが起これば、全地球規模で大きな被害が出るでしょう[8]。

大きなフレアで地球に被害が出るとするのなら、これまでに観測されてきた最大級のフレアの10倍以上にもなるようなフレア(スーパーフレアと呼びます)がもし起こったとすれば、..、なんていうことは、考えるだけで恐ろしいものがあります。では実際にそんな大きなエネルギーのフレアは起こるのでしょうか?太陽のフレアでは、エネルギーが1桁上がると発生頻度がだいたい1桁下がるという関係が知られており、キャリントン・フレア級で数十年に1度程度です。この頻度のものが最大というのは、太陽フレアの観測の歴史が150年程度なので妥当だと思われませんが、では1000年、1万年の間にスーパーフレアは起こらないのでしょうか?

実際に、今後の太陽1万年分をこれから数年で観測する、というのはもちろん現実的ではありません。それではどうすればよいのでしょうか。私たちは、夜空に輝く星のうちで、太陽に近い性質の星(太陽は地球に近いのであんなに明るく見えますが、夜空の星と全く同じものです!)を観測す

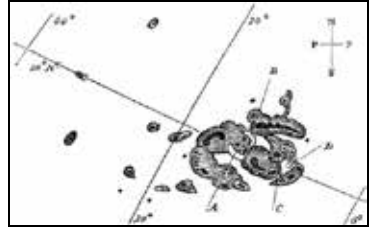


図4: キャリントン[7]が残したフレアのスケッチ。黒点中でA~Dの場所が白色で光ったといわれる。

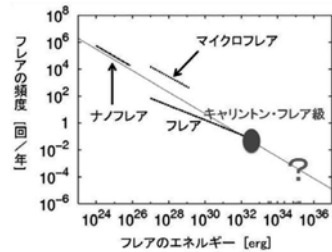


図5: 太陽フレアのエネルギーと発生頻度の関係。エネルギーが1桁上がると頻度は一桁下がるようだが、スーパーフレアでは?

☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体現象・☆

ればよいのではないかと考えました。太陽 1 個を 1 万年観測するのも、太陽型星（この稿では G 型主系列星を指します）を 1 万個、1 年間観測するのも同じような意味だろう、という考え方です。しかし、最大級の太陽フレアでも、太陽全体の明るさとしては 1 万分の 1 程度しか変化しません。地上での観測では、この変化を自信を持って検出するのは、現在の技術では不可能です。

そこで我々は、ケプラー宇宙望遠鏡のデータに目を付けました（図 6）。この望遠鏡は太陽系外惑星の探査を目的として打ち上げられたもので、惑星が星の前を横切るときにわずかに暗くなるトランジット

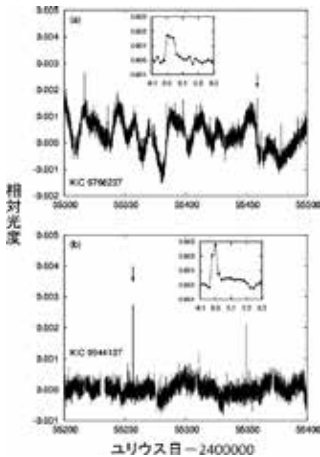


図 7：スーパーフレアの例。矢印で示したのが検出されたスーパーフレアで、拡大図を小さな図として入れ込んでいる。スーパーフレア以外の 10 日程度の周期の変化は、大きな黒点を伴った星の自転によるものであると考えている。

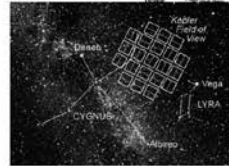


図 6：ケプラー宇宙望遠鏡の外観（上）と観測領域（NASA のホームページより）。はくちょう座とこと座の間の領域を約 30 分おきに観測し続けた。

と呼ばれる現象を検出することを目的としているので、同じ星について長期間非常に高精度で明るさを記録します。この目的でも数千の系外惑星及び候補天体を見つけるという大成功を収めていますが、他にも様々な方面で天文学の歴史に残る成果を生み出しています。

公開されている約 15 万個の星のうち、9 万個弱が太陽型星で、2009 年から 4 年と少しの観測データを残しましたが、我々はそのうちの最初の約 500 日のデータを解析し、約 300 個の星で約 1500 個のスーパーフレアを検出しました[9,10]！エネルギーが最大のもは、 $10^{36}$ エルグ、即ち最大級の太陽フレアの 1 万倍にも及ぶものでした。図 7 が実際の観測例です。スーパーフレア以外の周期の長い変動は、大きな黒点を持つスーパーフレア星が自転をして、黒点を手前に来たときに暗くなり、向こう側に隠れてしまう時に明るくなることによるものだ

☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体現象・☆

と考えられます。スーパーフレアが太陽と同じように、黒点に蓄えられる磁気エネルギーの爆発的解放現象であれば、巨大な黒点が必要になるので、この解釈は妥当といえるでしょう[11]。

さて、エネルギーと頻度の統計はどうなったのでしょうか？図8が、図5の太陽だけのグラフに、スーパーフレアのものを書き加えたものです。スーパーフレアが太陽フレアのエネルギーの大きな側に延長した関係になっていることがわかります。

では、スーパーフレア星は本当に太陽と同じような星なののでしょうか？太陽型星と

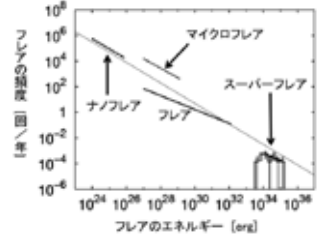


図8：太陽フレアとスーパーフレアのエネルギーと頻度の関係。スーパーフレアが見事に太陽フレアの延長上にきていることがわかる。

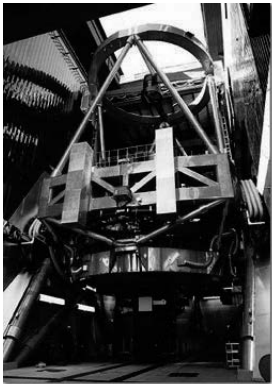


図9：国立天文台ハワイ観測所にある口径8.2mのすばる望遠鏡(国立天文台のホームページより)。

しました。

2011年、2012年、2013年と3回にわたって観測をさせてもらい、これまでに既に50個の高分散分光データを得ています。その中で2星KIC9944137とKIC9766237については、本当に太陽とそっくりなもの

は言っているものの、これは実は星の明るさと色に基づいてケプラーでの観測用に作られたカタログ(Kepler Input Catalog)に載っている情報に過ぎません。

そこで、本当に太陽と同じような星なのかどうかを調べるため、我々はすばる望遠鏡(図9)で高分散分光観測を行い、詳しく調べることにし

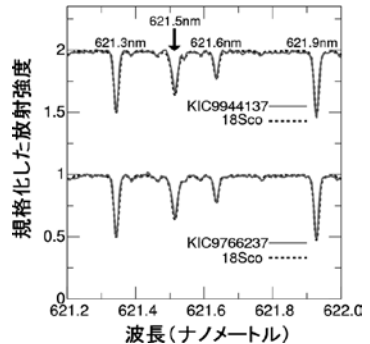


図10：中性の鉄の吸収線。このような星の表面(光球)で作られていると思われる線の深さや形を調べることで、星の様々な性質がわかる。18 Scoというのは太陽の双子星と呼ばれるほど太陽と似ている星で、これと高分散分光データがよく似ていることから、これらの星も太陽とよく似た性質である。

### ☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体现象・☆

であることがわかりました[12]。図 10 では、鉄の吸収線の例を載せています。光には波の性質があり、波長は色に対応します。たとえば、波長が 480 ナノメートルの光だと青く見えますし、650 ナノメートルの光だと赤く見える、という感じです。中学や高校の理科・化学で「すいへいりーべぼくのふね、、、」というような感じで、水素やヘリウムなどの元素が 100 種類くらいあるというのを習ったかと思いますが、それぞれの元素で決まった色（波長）の光を吸収する、または放出するという性質があります。図 10 では太陽の表面にある鉄の原子が 4 つの波長の光を吸収しています。それぞれの色の吸収の仕方は、原子の数、温度、重力の強さなどで変わってきますので、このような吸収線の深さや形を調べることで、星の有効温度、表面重力、金属量等がわかります。また、音を出しているものが動くとき音が高くなったり低くなったりするというドップラー効果があります（よく例に出されるのは、パトカーや救急車がすれ違うときに、音が低くなって聞こえるようになることです）が、光にも同じような性質があり、色（波長）が少し変わります。星が自転していると、手前側に動く方と向こう側に動くほうがありますので、色が青い方と赤い方に少しずつずれるというドップラー効果が起こり、吸収線の幅が広がります。つまり吸収線の幅を調べてやることで自転の速さがわかります。説明が長くなってしまいましたが、図 10 にあるような鉄のたくさんの吸収線を調べたところ、自転速度も太陽とほとんど同じでした。これは、黒点による明るさの変化が、これらの星では太陽の自転周期（赤道付近で約 25 日）と同じくらいの周期（KIC9944137 と KIC9766137 でそれぞれ 21.8 日と 25.3 日）だったということと対応します。

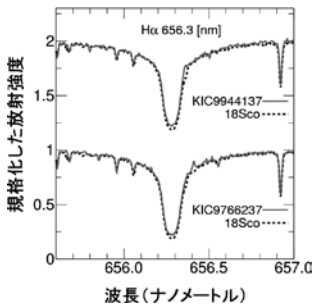


図 11 : KIC9944137 と KIC9766137 の H $\alpha$  の吸収線。

また、彩層活動（星の表面からたくさんの磁力線が出ていると活動が活発だと思ってください）の指標となる水素の吸収線 H $\alpha$  (図 11) や、一階電離したカルシウム Ca<sup>+</sup> の吸収線の Ca II 8542 は、18 Sco よりは若干浅い、つまり太陽よりは若干活動的であることを示しています。しかし、太陽型星としてはこれよりもっともっと活動的な星は多くあり、太陽と同じくおとなしい星として分類されるようです。

これらの話を総合すると、太陽と非常によく似た性質の星でスーパーフレアを起こしているものがあることが見つかった、ということは、やはり太陽でもスーパーフレアが起こる可能性がある、ということになります。スーパーフレアが起こるということは、とても活動的であっておかしくな



### ☆・3. 8m 望遠鏡で探る様々な突発天体现象・☆

さそうですが、どうもこれまでよく言われている意味での活動性は低くてもスーパーフレアは起こるようです。

さて、ではスーパーフレア星はずっとスーパーフレアを起こし続けるのでしょうか？あるいは、太陽で11年周期の活動性の変化があることが知られていますが、スーパーフレア星でもサイクルがあつて、普段はまったく起こさないのに、極端に活動的になっている状態だけスーパーフレアを起こすのでしょうか？また、スーパーフレアを起こすメカニズムは本当に太陽と同じなのでしょう？色々な疑問の答えは、これからの観測で明らかになっていくでしょう。長い時間がかかるかもしれませんが、幸い3.8m望遠鏡ではたくさんの観測時間を使わせてもらえる予定です。どうぞご期待ください。

#### 4. 終りに

京大岡山3.8m新技術望遠鏡が完成すれば、京大理学研究所附属天文台は、花山、飛騨、岡山の3つの天文台を持つことになります。そこで、附属天文台全体の持続的安定的な運用を皆様に支援して頂こうと、天文台基金を作り、寄附を募っています。詳しくは附属天文台のホームページの天文台基金のページ<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/kikin/>をご覧ください。観望会や施設公開も積極的に行い、一般の方に開かれた天文台づくりを目指しています。皆様に温かく見守っていただけますと幸いです。

#### 参考文献

- [1] 松尾太郎、2014、あすとろん、今月号
- [2] van Paradijs, et al., 1997, Nature 386, 686
- [3] Galama, et al., 1998, Nature, 395, 670
- [4] Hjorth, J., & Bloom, J. S., 2012, Chapter 9 in “Gamma-Ray Bursts”, Cambridge Astrophysics Series 51, p.169
- [5] Cucchiara, et al., 2011, ApJ, 763, 7
- [6] Cwiok, et al., 2008, GCN Circular No. 7445
- [7] Carrington, R. C., 1859, MNRAS, 20, 13
- [8] 興味がおありの方は、  
[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may\\_carringtonflare/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/) をご覧ください。
- [9] Maehara, et al., 2012, Nature, 475, 478
- [10] Shibayama, et al., 2013, ApJS, 209, 5
- [11] Notsu, et al., 2013, ApJ, 771, 127
- [12] Nogami, et al., 2013, PASJ, 66, L4

## 第13回講演会、第7回通常総会、懇親会の報告

西村昌能 (NPO 花山星空ネットワーク理事・  
京都府立洛東高等学校)

### 1) はじめに

2014年5月11日、まさに五月晴れの鮮やかな日差しの下で、総会に先立ち講演会が始まりました。

司会は、柴田一成副理事長(理学部附属天文台長)。13時から開催されました。今回は、たくさんの参加者(110名!)をお迎えして開催することができました。司会からは、「二つの講演の趣旨は、京大が岡山に設置する新望遠鏡が目指す観測についてです。ようやく、岡山に3.8m望遠鏡の予算がついたことはたいへんありがたいことです。ただ、その予算は十分ではありません。さらに本体の花山、飛騨両天文台の予算が削減され困ったことになっています。みなさまのご支援をいただきたいと思います。」というお話がありました。

つぎに、黒河宏企理事長から挨拶と本ネットワークの活動紹介がありました。

1) 京都大学大学院理学研究科附属天文台と飛騨天文台の施設と知的財産の活用

2) 青少年の理科教育への貢献

3) 市民の生涯学習への貢献がこの会の趣旨で、講演会、天体観望会、飛騨天文台のツアーなどの紹介をされました。また「認定NPO法人になりましたので、寄付していただくと税制優遇措置を受けて頂けることになりました。「あすとろん」の発行もしています。」とのことでした。

続いて、京都千年天文学街道実行副委員長の青木成一郎(天文台職員)さんから、詳しいコースの紹介をしていただきました。

### 2) 第13回講演会

最初の講演は、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室特定准教授の松尾太郎さんの「京大3.8m望遠鏡で探す太陽系外惑星と宇宙生命」というものでした。司会から松尾さんの紹介がありました。先生のご専攻は太陽系外惑星科学です。



若い先生ですが、高校生など若い人にもわかるように工夫された講演をして頂きました。聞いていた若い人の中には、宇宙生命を探そうとする方が増えそうです。講演内容は、本号の松尾先生の記事をお読みください。講演の後、たくさんの質問をいただきました。

質問 1：京大のシステムとすばる望遠鏡の補正技術とどう違うのか？

答え：100 倍精度をあげている。京大のシステムは、すばるでは、1,000 分の 1 秒のところを 2 万分の 1 秒にし、細かな揺らぎを補正するように 10 倍細かく制御できる。

質問 2：トランジットでターゲットを決める方法は？

答え：ケプラー衛星は、たくさんの恒星の明るさを測定するようにして 156000 個の星を 1 度に見ることにした。無作為に調べている。見つかった惑星の 100 倍くらいの惑星があるはずだ。

質問 3：ケプラー衛星は天の川銀河添いの恒星で 1000 個発見した。他の銀河で同じであろうといっても良いですね。知的生命体は百万あるといってもいいですね。

答え：銀河系は重元素量が多いので他では少ないかもしれない。銀河のハビタブルゾーンがあり太陽はちょうどいいところである。新しく発見された惑星は、M 型星では、フレアが多発し、惑星が恒星に近いので被爆する可能性は非常に高い（柴田）。

質問 4：トランジット法での減光は巨大黒点でもおこるのではないかと？

答え：誤検出の可能性はある。黒点と惑星の暗くなり方が違います。黒点は端に行くと楕円になるが惑星は円形のまま。

休憩を挟んで続いて行われた講演は司会が作花一志理事（京都情報大学院大学教授）に代わり、京都大学理学研究科附属天文台助教の野上大作さんの「京大 3.8m 望遠鏡で探る様々な突発天体现象」でした。

「最初に花山天文台、飛騨天文台の紹介をします。」という軽妙な語り口の印象深い楽しい講演でした。この講演の内容も先生ご自身の記事をご覧ください。



質問コーナーでは、たくさんの質問がでました。一部を紹介すると、

質問 1：スーパーフレア星とスーパーフレア発生の割合は、長く観測する

とどうなるか？

答え：ケプラー衛星は4年で観測終了した。120日の観測よりたくさんのスーパーフレアが見つかった。同じ星が何度もスーパーフレアを起こすと考えられる。

質問2：フレア星と同じか？

答え：スーパーフレア星はG型のもので、M型のフレア星とは違う。

質問3：ブラックホールのジェットはどうしてみえるのか？

答え：磁場によってジェットがでると考えている。これがブラックホールの外側で中に落ち込めなかったガスが外へ出ていく現象である（柴田）。

質問4：3.8m望遠鏡はどこまで作られているか？

答え：本体はかなりできているが、付属品やドームはまだ。現物は名古屋大学にある。

コメント：3.8mでベテルギウスがいつ爆発するかなど、モニターして予報をだしていくと1000年前の天文博士の観測に匹敵すると思います。



講師の先生方と黒河理事長、司会の柴田副理事長、作花理事

### 3) 第7回通常総会

#### (1) 黒河理事長の挨拶

「25年度の活動報告が主な仕事ですが、後ほど資料を見ていただくこととして、一番大きく変わったことは、認定NPO法人になったということでしょう。

2年前に新しいNPO法に変わり、所轄官庁が京都市に変わりました。また、これに伴って認定NPO法人となる際に越えなければならないパブリックサポートテスト（PST）のハードルが低くなりました。府・市の基準にあえば、PSTが得られます。そこで市の指導を受けて市と府の認定団体になれたのです。認定の有効期間は5年間です。無償労力提供者が年間200時間必要ですが、私たちのNPOは、観望会で毎回20人の方が7時間も働いてくださるので、基準をすぐにクリアできます。ありがとうございます。また、ぜひ寄附の方もお願いいたします。」

(2) 議長と議事録署名人の選出

議長は上善理事に満場一致で決定しました。おなじく、議事録署名人についても、理事長と副理事長に満場一致で決定しました。

正会員は、416 名です。正会員の半数（208 名）で総会が成立します。委任状は書面で 193 人分いただいています。そして会場に 70 名がおられたので総会は成立しました。

(3) 議事

(イ) 平成 25 年度事業報告（総会配布資料 1 参照）

天体観測会事業：花山天文台での天体観望会の開催報告である。

天体観測体験教室：飛騨天文台での子ども対象のものと大人対象のものである。

第 7 回こども飛騨天文台天体観測教室：天気が悪かったが、子ども達の反応は良かった。第 4 回飛騨天文台自然再発見ツアーでは、早朝星空を観察し、冬の星座に銀河・黄道光の観測ができた。

理科教育推進事業：京大の取組へ協力

天文学振興のための講演会等：京都千年天文学街道、アストロトーク、金環日食の解析（結果はあすとろん 26 号に掲載）。

刊行物：HP の更新や「あすとろん」の 23 号、24 号、25 号、26 号を発行

(ロ) 平成 25 年度 会計収支報告書

独立行政法人青少年教育振興機構の「子ども夢基金」に「第 7 回子ども飛騨天文台天体観測教室」の活動が採択された。

認定法人になったので市の補助を得てミニリーフレットを作成した。

当期収入は 6,108,823 円で、前年度からの繰越金をあわせると収入合計は 11,539,607 円であった。

当期支出は、6,618,114 円（管理費の案分率は 30%にしている。）で、当期収入に比べると-509,291 円であったので、次期繰越金は 4,921,493 円となった。

(ハ) 会計財産目録

資産合計は、5,457,680 円で、負債は、536,187 円。正味財産合計は、4,921,493 円である。

これらの事業報告、会計収支報告についての監査は西川宝監事、北井礼三郎監事によって行われた。

北井監事から「5月8日に北井と西川で説明を受け、誤りの無いことを確かめたので報告します。」と会場で報告をいただきました。

(ニ) 法改正に伴う定款の一部変更について

☆・第13回講演会 第7回通常総会 懇親会の報告・☆

NPO法の一部改正により次の3点の改正が必要になった。

1. (職務) 理事長以外の理事はこの法人の業務について、この法人を代表しない。
2. 収支予算書・収支計算書から、活動予算書・活動計算書に変更になるので、「収支」を「活動」に、「収入」を「収益」に、文言を変える。
3. (定款の変更)に関する条文の変更  
「軽微な事項」を「規定する事項」に変更する。  
これらの変更について、満場一致で決議された。

以上の議決で第7回通常総会は終了しました。



#### 4) 懇親会

懇親会の準備時間を利用して、天気も良いので、屋外で記念写真を撮影しました。これは、初めての試みです。

懇親会の司会は有本淳一理事です。軽妙な司会で和やかな雰囲気になりました。色々な方からお話をいただき、ほんとうに楽しい会になりました。



## 今年は閏年？ 太陰太陽暦の作り方

作花一志 (京都情報大学院大学)

### 閏月とは

現在私達が使っている暦(グレゴリオ暦)は、太陽の動きを基にして作られているため、「太陽暦」と呼ばれます。一方、季節をあらわす太陽の動きと月の満ち欠けを基に作られた暦は「太陰太陽暦」と呼ばれ日本では明治五年まで使われていました。正確には明治五年十二月二日の翌日が明治6年(1873年)1月1日となりました。わが国の旧暦は中国の暦を基にしていますが、古代においてほとんどの民族は太陰太陽暦を使っていました。一口に太陰太陽暦といっても、歴史の中ではたくさんの暦があり、私たちが通常「旧暦」と呼んでいるのは、太陽暦への改暦の直前まで使われていた「天保暦」(施行1844年～1872年)と呼ばれる暦です。

太陰太陽暦では、月が新月になる日を月の始まりと考え、各月の1日とします。それから翌日を2日、その次の日を3日と数え、次の新月の日がやってくると、それを次の月の1日とします。月の満ち欠け周期(朔望月)は29.530589・・・日だから1月の日数は29日または30日となります。新月から新月までは平均して約29.5日の間隔で、12ヶ月間では29.5日×12=354日であり、太陽暦の1年より約11日短いため、そのままではどんどん季節とずれていってしまいます。もしそのまままったく修正をしないと、17年経つと187日(約半年)のズレ、すなわち真夏に元日を迎えることになってしまいます。四季のない砂漠の民族はそれでも構わないでしょうが、モンスーン地帯の農耕民族はそうはいきません。そこで、暦と季節のズレが1月分に近くなると、閏(うるう)月というものをに入れて、ズレを修正しました。例えば、3月の次に閏月が入るとその月は「閏3月」と呼ばれ、その年は13ヶ月間あるということになります。閏月は19年に7回入れればいいことがすでに古代ギリシア(メトンの周期という)でも戦国時代の中国(章法という)でも知られていました。

天保暦で閏月を置く規則は

- ・ 新月の日を毎月の1日とする。
- ・ 春分は二月、夏至は五月、秋分は八月、冬至は十一月に含まれる。
- ・ 二十四節気の「中」を含まない月は前の月を繰り返し、閏〇月と呼ぶ。

## ☆・今年は何年？ 太陰太陽暦の作り方・☆

新月の日を決めるのは容易ですが、春分夏至など二十四節気の日を決めるのは大変です。現在では両方とも国立天文台暦計算室のサイト[1]から求めることができます。

### 今年の日保暦を作る

ではこの3原則に基づいて日保暦を作ってみましょう。まず新月を、次いで二十四節気の日付を上記サイトから求めます。

- ・春分は二月に含まれるのだからその直前の新月が旧二月一日
- ・夏至は五月に含まれるのだからその直前の新月が旧五月一日
- ・秋分は八月に含まれるのだからその直前の新月が旧八月一日
- ・冬至は十一月に含まれるのだから、その日が新月ならばその日が旧十一月一日です。1、2、3番目は難なく理解できますが、4番目はわかりにくい。同様に考えて「霜降は九月に含まれ新月 9/24 が旧九月一日」ですが「小雪は十月に含まれ新月 11/22 が旧十月一日」となります。では 10/24 から 11/21 までは何月でしょうか？この間には「二十四節気の中」が存在しないので前の月を繰り返して閏九月となります。

新月	24 節気 (中)	旧暦一日	新月	24 節気 (中)	旧暦一日
1/31	2/19 雨水	一月	7/27	8/23 処暑	七月
3/01	<b>3/21 春分</b>	二月	8/25	<b>9/23 秋分</b>	八月
3/31	4/20 穀雨	三月	9/24	10/23 霜降	九月
4/29	5/21 小満	四月	10/24		閏九月
5/29	<b>6/21 夏至</b>	五月	11/22	11/22 小雪	十月
6/27	7/23 大暑	六月	12/22	<b>12/22 冬至</b>	十一月

したがって

旧正月（一月一日）は 1 月 31 日

伝統的七夕（七月七日）は 8 月 2 日

中秋の名月（八月十五日）は 9 月 8 日 となります。

この方法で現行暦から日保暦へ変換ができますが、それには非常に煩雑な計算を要します。そこで和暦サイト[2]を利用すると便利です。

なお日保暦は 2033 年には不可になることがわかっています。しかしその公式サポートは行われていません。

### 「閏月は 19 年に 7 回」の根拠は？

1 年は太陽が天球上の元の位置に戻ってくる周期（回帰年）、



☆・今年は閏年？ 太陰太陽暦の作り方・☆

365.242194・・・日であり、1月は月の満ち欠け周期(朔望月) 29.530589・・・日です。したがって 1年=12.368266・・・月=12ヶ月と約11日で、きれいな整数比になりません。そのため、何年かに何度かは閏月をおいて1年を13月として調整しなければなりません。12.368266・・・に近い最も簡単な分数は 235/19 です。19年と235月(=19×12+7)の差はわずか0.087日だから、この間に7回ほど閏月を置けばほぼ実用的な暦ができます。実際に2~3年に1回は閏月が入っています。ところが200年もするとこのわずかな誤差が成長して約1日もずれてきます。235/19の次に簡単な分数となると 3661/296 で、296年間に109回の閏月、100年間に約1時間半のズレですから前述の数値よりずっと正確です。しかしこの数を求めるには非常に冗長な計算が必要になるし実用にも適しません。

中国では戦国時代から1回歸年、1朔望月の値の取り方や年初の置き方でさまざまな暦が使われてきました。南朝の大数学者である祖冲之(429-

n	m	n%m	nm0	nm1
19	235	7	-0.087	-10.9552
38	470	14	-0.173	-10.9552
296	3661	109	0.203	1.6467
315	3896	116	0.116	0.8866
334	4131	123	0.030	0.2130
353	4366	130	-0.057	-0.3882
372	4601	137	-0.144	-0.9279
391	4836	144	-0.231	-1.4151
630	7792	232	0.233	0.8866
649	8027	239	0.146	0.5399
668	8262	246	0.059	0.2130
687	8497	253	-0.027	-0.0959
706	8732	260	-0.114	-0.3882
725	8967	267	-0.201	-0.6651
983	12158	362	0.176	0.4288

500)は391年間に144回閏月を置くという「大明暦」を作りました。上記の近似分数として 4836/391 という数値を求めたのです。これは数百年経過しても誤差は数時間に収まるという非常に優れた暦です。しかしこの暦は作成が難しかったせいか、採用されたのは彼が亡くなって50年後のことでした。

左表はn年~mヶ月となるような整数 m, nを求める計算結果で、第3欄はこの n年間に置くべき閏月の回数、次にこの n年と mヶ月の誤差(日)、そして100年間の誤差(時)を表しています。余りと2重ループと If 文の演習問題ですから、トライしてみませんか。ただしまともにやると PC が停まってしまうからご用心を。

また彼は円周率を当時世界の最高レベルの値 3.141592 で求めました。ヨーロッパでこれより詳しい値が知られたのは16世紀になってから、すなわち祖冲之は1000年以上も世界最高記録を持っていたことになります。彼はよほど計算達人だったのでしょう。果たしてどんなアルゴリズムを使ったのか？これらが記されているという彼の著書『綴術』は残っていません。

## ☆・今年は何年？ 太陰太陽暦の作り方・☆

彼の役職は「太史令」という天文官かつ歴史官です。古代中国では人民に時を知らせることは皇帝の重要な仕事であり、そのため暦の作成・配布のために専属の官吏が任命されていました。彼らは暦を作るだけでなく、日食・月食・惑星運行の記録や予報も行っています。さらに国家の安泰・王朝の命運のための占いもします。もちろん歴史の編纂もします。かの大歴史学者である司馬遷(BC145－BC87)も漢の太史令でした[3]。

### 今も生きている旧暦

現在世界中どこの国でも公式には太陽暦を使っていますが、伝統行事は今も太陰太陽暦で受け継がれているし、将来も続くでしょう。実際、日本とフィリピンを除く殆どの東アジアの国々では新年は旧正月で祝っています。中国語圏の春節、ベトナムのテトなどは大規模な行事で有名です。旧1月1日は「雨水」直前の新月の瞬間を含む日ですが、国によって時差があるため、日が異なることがあります。2007年のその瞬間は日本標準時2月18日1時14分で、中国(時差：-1時間)では同日でしたが、ベトナム(時差：-2時間)の旧正月は前日の17日でした。同じことが2030年(2月3日1時08分JST)にも起こります。さらに2027年と2028年には新年の新月はそれぞれ2月7日0時56分、1月27日0時12分に起こりこの瞬間は中国でもベトナムでも前日なので、春節もテトも日本より前日です。新年の日だけでなく「1月」の日付がすべてずれずれます。この現象は旧1月に限ったことではなく、新月の瞬間が午前0時～1時となると起ります。2014年には起こりませんが、2012年には旧7月、旧9月の日付がずれていました。

正月やひな祭り、中秋の名月などのお節供などの日付が毎年変わり、季節感と合わなくなることもあります。今後も使われていきそうです。ただし本稿執筆中に本能寺の変の起こった日は天正十年六月二日(=1582年6月21日)であるのを「1582年6月2日」と和暦西暦が混合使用されている新聞記事を見かけましたが、これはやめてほしいですね。

### 参考サイト

- [1] <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>
- [2] <http://www.wagoyomi.info/>
- [3] <http://web1.kcg.edu/~sakka/oldchina/zu.htm>

## 星空文芸欄

高尾和人・宮川美栄子(NPO 法人花山星空ネットワーク)

夢叶う我が家にドーム古希の空  
腕組んで星を語った過去の恋  
花山から夜景眺める曇天日  
流れ星願いを言って舌を噛み  
いつの日かバーゲンで行く月旅行

高尾和人

コスモスは系外惑星夢いっぱい  
4次元で宇宙の星を手づかみし  
木星の月を確認夢かなう  
木星と十三夜の月ランデブー  
満月に望遠鏡でご挨拶  
満月と並んで煌めく赤い星  
火星にも月が二つと目を開く  
赤い星地球に近づく春の宵

宮川美栄子

梅雨の中癒しをさそう桔梗かな  
七夕の星はいずこに厚き雲

詠み人知らず

あすとろんでは、宇宙をネタにした小噺、川柳、狂歌などを皆さまからご応募いただき、選考の上誌上で発表しています。選考委員会（委員長は落語家の林家染二さん）より年間最優秀作品に賞品を出す予定です。またいい作品は落語に取り入れて翌年の宇宙落語会で発表しますので、どしどしご応募ください。

## ヒッグスー宇宙の革命児

坂東昌子（知的人材ネットワーク あいんしゅたいん）

### 1 はじめに

実は、2014年3月1日から1週間開かれたアメリカ物理学会（APS）に参加し、今帰りの空港でこれを書いています。この学会は、日本と違って人数も桁違いに多いのですが、専門から遠い物性分野の学会で、「ソカクウ」（素粒子・核理論・宇宙を指す）は4月に開かれます。ここにきたわけは、3・11の福島事故後、低線量の放射線の影響をきちんと評価できる数理モデルを作ったのですが、ここAPSのフォーカスセッションに、「Physics of Cancer（がんの物理）」で発表してみんなの意見を聞きたかったためです。アメリカでは、みんなにわかりやすい話をするのに、日本よりはるかによく訓練しています。子供のときから発表の機会をたくさんあります。例えば、小学校のときには「Show and Tell」という授業がありましたね。私はこれを見て感心しました。ですので、発表の技術は日本よりは厳しく問われます。せっかくだから、と思って、招待講演「Physics for Envelope」で、「Higgs and Beyond」というのがあるので、聞いて参考にしようと思いました。この原稿のことがあったので、他分野の研究者にどう説明するのか興味があったからです。でも、がっかりしました。あんな説明では、ほかの分野の人にわかるはずがない、参考になりません。その前の、[Journey of the Center of Earth]があまりにもわかりやすく、迫力があったのですが、比較になりませんでした。あれでは、素粒子実験も浮かばれません。

というわけで、帰りの飛行機の中で、これを苦心惨憺しながら書いているというわけです。うまくわかるようにかけるかな・・・。

### 2 宇宙の進化と素粒子論

さて、みなさんは、「物理」というとどんなイメージを持っていますか？ ここにお集まりの皆さんは、私達の住む地球を暖かく包んでくれる太陽や、夜空にきためく星々をみて、広大な宇宙に、神秘的に満ちたものロマンを感じているかもしれません。また、地球から一番近いお月様にいつてみたい、などと思っている人もおられるかもしれません。そして、また、「物は何かからできているのだろうか」という問題を、「宇宙はいつどうして始まったのか」という問いと同じく、知りたいと思っておられるのではないのでしょうか。この2つの問いは、極端に大きな世界と極端に小さな世界です。と

ころが、この2つの世界が、お互いにつながっていることが本当にわかってきたのは、つい最近のことです。それは、この宇宙ができたところからどのように現在までつながってきたかを考えるガモフの「ビッグバン」という仕組みに関係しています。ガモフは、大変興味の広い人で、しかもそれも優れたアイデアの持ち主でした。それでも、ビッグバンという素粒子と宇宙の始まりを結びつけたアルファ・ベータ・ガンマ理論

(Alpher-Bethe-Gamow という3人の著者による論文)は、実は、アルファが、ガモフの指導の下に書いた博士論文がもとになっており、ついでに、審査委員だったベータを加えて論文にしたということです。この論文は、1948年4月1日のフィジカル・レビューに掲載されたのですが、短くて冗談のような論文ですね。4月1日付となっているのは偶然でしょうか？

さて、このビッグバンの論文は、まあ、その後、大して注目もされなかったのですが、1964年に、ペンジアスとウィルソンが、偶然に（というか、それまでもノイズがあることはかなり見つけていたらしいのですが、説明がつかないので無視していたらしいです）宇宙のあらゆる方向からやってくる電波ノイズを観測し、これが「宇宙の背景輻射」であって、ビッグバン理論であると予言されていたものだとわかったのです。こうして、原子核物理学と宇宙論のお話は結びついたので。さて、こうして、宇宙の初期のお話と、原子核が結びついてみると、背景輻射だけではなく、いろいろな素粒子が、宇宙の進化の中で、生成される過程が、研究冴えるようになりました。今では素粒子論と宇宙の始まりとのストーリーが全部関係していることは当たり前だということになってきたのです。まさにそれが、ヒッグス粒子と結びついているのですね。

今回は、そのヒッグスが宇宙の始まりと結びつきたいきさつを、できるだけわかりやすくお話しようと思ったのですが、あとから「難しかった」といわれてショックを受けました。ウーン、やっぱり難しいかなあ。この解説もまだまだ満足のものではありませんが、時間切れで難しいままの説明になっていると思いますが、お許しください。では、どんな革命が宇宙で起きたのかをごいっしょに冒険してみましょ！

### 3 神の粒子 ヒッグス

ヒッグス粒子は、「物質に重さを与え、万物を生み出す神の粒子」などと言われます。「重さを与える」とか、「万物を生み出す」、まして、「神の粒子」などと言われると、私はちょっとひっかかります。

最近も、「ヒッグスが、質量を与えるというのはどういうことですか？」とある会合で阿部光幸先生（放射線医学）にきかれました。

「質量というのは、力を与えた時に、どれだけそのものが動くか（加速

## ☆・ヒッグスー宇宙の革命児・☆

するか) がちがいますが、この動かしにくさを表すのが質量なのです。ほらニュートンの式

$$F=ma \quad (F \text{ が力で、} a \text{ が加速度、その係数が } m)$$

というのを高校で習います。」とって、

「私たちが空気中で動くのに比べて水の中で動こうとすると抵抗があるのであまり動けません、つまり見かけの質量が増えたような状態になりますね。それと同じように、ヒッグス粒子が満ち満ちている、ヒッグス粒子の海では、真空中より粒子を動かすのに比べて抵抗が大きいの、見かけの質量が大きくなります」と、そのときは、よく巷で説明されている言い方で説明したのですが、あまり納得してもらえませんでした。でもよく考えてみると、このよくあるたとえ話は、わからなくて当然だと思います。阿部先生は、「それは見かけだけで、質量が大きくなったわけではないのでは？」と思われたのではないのでしょうか？実際に粒子の質量が増えていないのに、周りから受ける抵抗が大きくなったといっても、それでは雨粒が落ちてくるとき、加速度と抵抗がつりあって一定の速度で落ちてくると、雨粒の質量が大きくなったなどとはいわないですね。ですから、こういう説明の仕方です満足しないのは当たり前、と気になっていました。今回、花山星空ネットワークからヒッグスの話を頼まれて、もっといい説明はないものか、とずっと気になっていました。今回、ここでヒッグスの話をするようになっていい説明はないのか、とずっと気になっていました。この機会にもう少し明快な説明を試みたいですね。

それに、実際のところ、ヒッグス粒子が、「神の粒子」などといわれるのにも、違和感があります。それよりは、実は、ヒッグス粒子は、宇宙の全体の様相が急速に変化させる、つまり宇宙の革命が起こったときの仕掛け人というか革命児だという方が当たっていると重いです。宇宙の革命児が、どうして、「質量を与える」ことができるのでしょうか？ここが面白いところなのですね。

そこで、この機会にもう少し明快な説明を試みてみました。講演では、どうしても宇宙の革命児のほうの話が中心になるので、質量といった基本的な話は、当日の講演よりは詳しく説明しておきたいと思えます。まずは、ヒッグス粒子の現状からお話しして、だんだん、宇宙との繋がりをお話しします。

### 3 国際協力のお手本

スイスとフランスの国境をまたいで位置するセルン（CERN 欧州原子核研究機構）の超大型加速器、LHC を用いた衝突実験が始まったのは 2008 年、南部・小林・益川のノーベル賞受賞にわいた年です。LHC の最大の標

的はヒッグス粒子でした。2012年からデータのなかにヒッグス粒子の兆候が見え始めました。私も7月に「ヒッグス粒子と巨大科学」をブログ（その91 <http://jein.jp/blog-bando/239-blog91.html>）に書きました。この間、「ヒッグス粒子らしい」のを、もっとしっかり確認するためセルンでは加速器の休暇期間を返上し続けて実験したそうです。今か今かと結果を待っていたのですが、予想通り、2013年10月4日、プレスリリースしました。ノーベル賞に間に合わせましたね。3000名もの大チーム、AtlasとCMSが、お互いに独立に解析し一致したところで、論文をまとめ、超特急で、10月7日付の欧州の専門誌フィジクス・レターズBに掲載されるというスピードです。セルンの集会は、ノーベル物理学賞が発表される1日前、まさに、余裕の舞台効果というところでしょうか。今年のノーベル賞は大方の予想通りだったというわけです。

今、科学の世界では、真実を追究するためというより、その研究を遂行するお金を取るためもあって、巨大科学として恥っているビッグプロジェクトは、かなり政治的な駆け引きが重視され、純粋な科学の目的のために動いているとは限らないのですが、このヒッグス粒子発見へとつながったCERNのプロジェクトは、本当に真の国際協力によって成果を挙げたという意味では、お手本になる成果だと思います。

この実験の舞台になったのは、スイスのジュネーブ郊外にあるCERN：ヨーロッパ合同原子核研究機関です。ここは、世界の科学者が協力して、真理の追究という目的のために協力しています。欧州諸国が出資して運営されている研究所なのです。CERNの敷地は、一方はスイスと、他方フランスにつながっています。つまり敷地内に国境があるのです。

物理学では巨大観測装置や巨大加速器などを用いた国際的レベルのプロジェクトを組み、時には千人を超えるチームの共同研究が行われています。日本のチームはATLASに加わっています。このような研究活動では、国際的な規模で各国の科学者がそれぞれ分担しながら1つの目的に向かって協力して仕事をします。今回のATLASとCMSのチームには、各々、およそ3,000人、総勢6,000人にもなるそうです。トップクォークの発見の時は、440人で、論文の1ページでは全員の名前が書ききれなくて2ページにわたっていて目を回しましたが、今度は3000人ですね。どうするのかなあ、と思います。いろいろな国の研究者が協力する、まさに国際協力の見本ですね。国際チームの中では、データを共有し、情報を交換することが必要です。ですので、CERNでは、もう随分昔から、情報を交換し、知識を共有するためのネットワークシステムが必発達してきました。そのため、腕のある物理学者たちは、委託事業に出すことなく、自らの手で実際にシステム開発し、ネットワーク構築を成し遂げ、研究活動の国際化・効率化を

さらに発展させてきました。みんなが今では日常的に使っている馴染みの **www** という仕組みも、実は、こうした中で生まれた **CERN** の発明なのです。さらに、グリッドなども、生まれています。今ではスマートグリッドなどといって慣れ親しむ時代になりましたが、データをネットワーク上で自由に共有し必要な時に仕事を分担するグリッドなどもずいぶん昔から開発してきたわけです。日本で、ネットワークの要になる **IP** アドレス管理サービスを、高エネルギー研究所 (**KEK**) が受け持ったのですが、みんな知らないうちにお世話になっているのですね。実は、このサービスのため **KEK** の **IP** アドレスは **ac** がついていないのですよ。更に、素粒子・原子核実験における粒子検出器のシミュレーションを行うために開発された **GEANT**、格子ゲージ理論など大掛かりなシミュレータの開発技術では抜群の腕を持った物理学者が活躍しています。これらは、今では、国際協力の下、共同開発で広がりを見せており、物理分野のみならず、その技術は医療・宇宙開発等にも応用されているのです。「原理から出発して技術を構築する能力」は、さまざまところに応用されているとも言えます。しかも、どれも、特許もとらず万人に共有されている優れものなのです。そして、ここには、面白いのは、**EU** という連合ができる前から、**CERN** は存在していたということですよ。

ヒッグス粒子発見をきっかけにして、日本も世界も一緒になって作り上げてきた純粋な形での巨大科学と国際協力の偉大な取り組みの成果ではなかったかと、つくづく私は思っています。

#### 4 ヒッグス粒子は質量を与える？

ヒッグス粒子の説明が難しいのは、その役割が、実はいろいろあるからです。

- ① 質量を与えるヒッグス粒子
- ② 宇宙に満ち満ちているヒッグス粒子
- ③ 宇宙の劇的な変化を起こすヒッグス粒子
- ④ 標準理論でなくてはならないヒッグス粒子

などといわれています。これらは、実際には、南部陽一郎先生がノーベル賞をもらわれて以来、みんなが口にするようになった「自発的対象性の破れ」という仕組みが基本になっているのです。おいおい説明していきましょう。ヒッグス粒子のホントのすごいところは、宇宙の革命が起こったときの仕掛け人だということです。この宇宙の革命児は、どうして、「質量を与える」ということと関係しているのでしょうか？講演では、どうしても宇宙の革命児のほうの話が中心になるので、質量の基本的な概念だけは、話が長引かないよう、説明しておきますね。



## 5 質量について

砂糖を水に溶かしたら、砂糖が消えたように見えるけど、砂糖水の重さは、砂糖水の重さは、砂糖と水の重さを足したものになっています。小学校ではこういう形で「重さは形を変えても変わらない」と学びます。これを「質量保存の法則」といいますね。「え？いつの間に質量というふうに置き換えたの？」と思うでしょうね。質量は、「重さ」を測ることによって調べることができるのですが、それは地球がものを引っ張る力を利用しているのですね。地球がものを引きつける力(重さ)は、そのものの質量に比例します。ですからまあ、「重さ」を「質量」に換算しているのです。近頃は人工衛星の中では無重力状態になることを知っています。つまり重さはゼロです。重さは変わったけれど、質量は変わらないのだ、と中学校では学びますね。このようにして、私たちは、「重さ」と「質量」の違いを理解してきました。重さ変わりますが、「質量」は、どこに行っても不変なのでしたよね。そうなら、「ヒッグスの海の中を通り抜けるにはたくさんの力が必要だから質量が大きくなる」という説明は納得できないですね。お風呂に入ったからといって「水の中を歩くのに力が余分にいるから、質量が大きくなった」とはいけません。そんなことで、太ったり痩せたりしないですね。

## 6 エネルギーと質量

ところが、人間は、今までの常識が通用していた範囲を超えると、その常識が成り立たないような場合にまで認識が発展させます。断っておきますが、今までの常識が間違っているわけではありません。新しい状況に応じて、質量というものの概念がもっと広く捉えられるようになるのだ、ということです。

アインシュタインは、時間という概念を変えたことをご存じでしょう。同時に、質量とエネルギーの換算式、 $E=mc^2$  ( $c=299\,792\,458\text{ m/s}$  は光の速さ、 $E$ はエネルギー、 $m$ は質量)を出しました。つまり、質量はエネルギーに変換されるのです。このことは、質量というのはエネルギーの塊というイメージになります。どういうことかといいますと、質量というのは、超高エネルギーの世界では、エネルギーと同じ概念で捉えられるということがわかったのです。素粒子の世界では、エネルギーが粒子に、粒子がほかの粒子に変身することはよく起こるのです。今まで常識だと思っていた事を、基本概念から考えていかないといけなりました。いわば、質量をもつ粒子とは、エネルギーの塊だというようなイメージが出てきます。素粒子論という学問は、ともかくなんでも基本概念から考えて原理をはっきりさせないと気が済みません。質量は粒子固有のもの、不変だと思っていたのは、質量とエネルギーの変換レートがあまりにも大き過ぎたせいなので

す。例えて言うと、ドルを円に変えるようなものです。日本の中では円だけで十分ですが海外ではドルに交換して使います。ただ、違うのは、質量とエネルギーの場合、為替レートはとてつもなく大きいので、普通のちょっとしたお金持ちでも交換できないのです。質量1 gをエネルギーに変えるだけでも、 $9 \times 10^{13} \text{ J}$  (ジュール)  $\approx 2 \times 10^{13} \text{ cal}$  (カロリー)、逆に質量をもつ粒子をエネルギーから作ろうと思うと、莫大なエネルギーが必要だということです。素粒子の中でも結構質量の大きなヒッグス粒子を生み出すにはすごいエネルギーがいることも想像できますね。

## 7 質量差

原子は原子核の周りを電子が回っているというイメージですね。このとき、例えば電磁波 (光子) を原子に照射してエネルギーを与えてやると、周りの電子が、その光子を取り込んで、前より元気になり、活発に動いようになります。つまり、エネルギーの高い状態になります。原子全体を外から眺めると、原子はそのエネルギー分だけ (ホンの少しですが) 原子の質量が増えます。私たちは普通、そういう状態を「はじめの状態よりエネルギーの高い状態」ということで、「励起状態」といいます。こうして同じ原子でも励起状態は質量が大きいのです。

別に光をわざわざ当てなくても、例えば、電気を持った素粒子なら、電気を持っていない素粒子に比べて、周りに電磁波を引き寄せ、いわば光の雲をまとっているのも、それだけ電荷をもっていない素粒子に比べて、ほんの少しですが質量に差が出ます。例えば、湯川先生が予言されたパイ中間子は、電荷を持っている  $\pi$  土の方が、中性の  $\pi$  0 に比べて少しだけですが質量が増えます (電磁相互作用による質量差)。この計算は、場の理論という処方で計算できるのですが、その際、無限大が出てきたりして、ちょっと面倒なことがあるので、苦労しましたが、今では大体のものは計算できます (朝永先生の繰り込み理論)。まあ、これは、人間が着物を着てそれをまとった時に体重が増えるような感覚です。あ、食べ物を食べて、その分、質量が増えたと思ってもいいと思います。相互作用がない時の質量を、私たちは「裸の質量」と呼んだりします。以上は一例ですが、質量は、外界との相互作用によって変化するのだということなのですね。質量が異なるいろいろな素粒子を「質量が違うから同じ仲間ではありえない」などという固定概念から「統一的に理解する」ことを可能にしたのは、この概念変更があったからです。この質量をかえる立役者は、別にヒッグス粒子に限った話ではありません。つまりヒッグス粒子でなくても、質量を上げたり下げたりするというのは普通に行われていることでヒッグス粒子に限った話ではありません。じゃあ、ヒッグス粒子は、どこが違うので、神の粒子

などと言われるのでしょうか？

## 8 素粒子の質量

この世にある今まで知られている粒子は物質のもととなっているクォークやレプトン（フェルミオン）と、力の起源となるゲージ粒子（ボゾン）という2つに分類されます。

ここからはみ出ているのが実はヒッグス粒子なのですが、それはさて置き、この2種類の素粒子は実は自転していて、その角運動量(スピンといいます。こまのように回るグルまわっているイメージですね)は、各々、フェルミオンは1/2、ゲージボゾンは1と決まっています。これらをまとめると図1のようになります(高エネルギー研究所のKEK

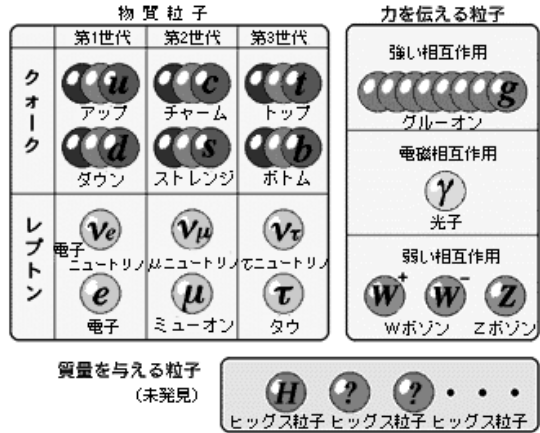


図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

「キッズサイエンス」(<http://kids.kek.jp/class/particle/class01-10.html> から引用)。よく似た図はたくさん出ていますので、みたことがあるでしょう。これらは、よく標準模型の粒子として出ていますが、今のところ、基本の素粒子はこれで全部で、標準模型は、単にこれらを再現する模型になっているということです。見ればわかりますが、フェルミオンは3つのグループに分かれていて、それぞれ「世代」と呼ばれています。なぜそう呼ぶかという、同じ構成(家族)になっていて違うのは質量だけなので「世代が繰り返されている」というイメージでそう呼ばれているのです。ともかく、この世を作る素粒子は今のところこれだけあるのです。家族構成過不足なく同じというのも実はゲージ対称性があるからなのですが、どうして世代が3つあるのか、そしてその質量がどのように決まるのか、それは、何も標準模型は語ってくれません。標準模型を超えた「統一理論」を考ええなくなるのはこんなところにもあります。そして下に書いてあるヒッグス粒子だけが今まで見つかってなかったのです。それが見つかったということです。ここには「質量を与える粒子」とかいてあります。どういうことでしょうか？

## 9 質量ゼロのゲージ粒子と対称性

さて、質量はその素粒子(ここでは素粒子の質量を問題にします)に固有の値だというわけではないことは、すでに説明しました。ただ、ここで、1つ、大切なことがあります。質量は周りの環境や相互作用で変わるとは言いましたが、質量の変化は、「裸の質量」との掛け算の形で求められます。裸の質量がゼロなら、いつまでも質量ゼロです。相互作用によって出てくる質量の変化は、裸の質量がある場合の話です。そうすると、問題は、「裸の質量」の起源です。「質量って、はじめから与えられた固有の値なのに、まだ、それ以上は追求するの?」、という人があるでしょうね。この世はなぜ空間が3次元なの?宇宙はどうやってできたの?こんな質問はナンセンスだと思いますか?そもそも、どこまで追求するつもり?と思うでしょうね。なんで、世の中にあるものは、その存在に理由がなければならないのか?そう思われるかもしれません。自然の法則は、厳密な理論的な秩序を守っています。中でも、対称性の原則は、自然現象には法則があることの証なのです。詳しく説明しませんが、宇宙ができた頃はあらゆる対称性があり立っていた時代なのです。そうすると、ゲージボゾンもフェルミオンも、各々ゲージ対称性(やカイラル対称性)が成り立っています。つまり質量はすべてゼロのはずなのです。私たちが、物事の本質を保ちつつ単純な形に追い込み、そのきれいなところでは、共通するものを見つけ出せます。この、「共通するもの」というのは、いつでもどこでも、見方を変えても成り立つ客観性のあるもの、それが法則なのです。特に、この宇宙が生まれたての頃は、超高エネルギーの状態です。そこでは、すべては平等の世界です。個々の違いに目を奪われて、人間としてもつ共通の感情や思いを共有して初めて、人としての連帯感が出てくるのは、これに似ているかもしれません。一見、対称性が破れているように見えても、そこを貫く対称性の流れを追い続けると、そこに新しい自然の豊富な現象が理解できるようになります。原則がどういう形で貫かれているのか、それをしっかり見通す知性と熱意がそこには必要です。この世界では、唯一理屈がつくのは、「質量ゼロ」の場合です。実は質量ゼロというのは特別の意味があったのです。両方共、質量ゼロの粒子は、厳然として対称性を満たしています。前者は、カイラル対称性、後者はゲージ対称性です。

## 10 ゲージ原理

ゲージ粒子が質量ゼロというのは、「ゲージ対称性」が成り立っているからです。これはゲージ原理とも言われていますが、これは力と空間の関係に深く関係しています。力は空間を伝わって届くもの、という原理です。私はこれを「地方自治の原理」になぞらえています。ある情報が伝わるの

に、お上が一斉に命令して届けるのではなく、じわじわ（といっても光速で、ですが）伝わって離れたところからに広がっていくのです。ずっと広がっていくには、その質量はゼロでないと労力があるので途中でくたびれてダウンしてしまいます。質量を持っているとその粒子（情報）が伝わる距離は質量に反比例して短くなります。太っている人は遠くまでいけないのですね。「え？ でも電磁波だって、遠くでは弱まっていくではないか」。そう思うかもしれませんが、いいえ、それは薄まっているだけです。光の粒子が光源から 100 個飛び出ても、放射状に 3 次元の空間に広がっていきますから距離が遠くなるとその距離で囲まれた球の面積 ( $4\pi r^2$ ) に拡散していきますので、光源から遠いほど薄まりますが、へたばらないで届いているのです。力の強さが光源からの距離の 2 乗に反比例するのはそういうわけです(クーロンの法則)。薄まっているだけでみんな届いているのです。

特に、ゲージ粒子が質量ゼロというのは、「ゲージ対称性」が成り立っているからです。これはゲージ原理とも言われていますが、これは力と空間の関係に深く関係した胸にすんと納得できる原理です。力は空間を伝わって届くものだ、という直感的に納得のいく原理です。私はこれを「地方自治の原理」になぞらえています。ある情報が伝わるのに、お上が一斉に命令して届けるのではなく、じわじわ（といっても光速で、ですが）伝わってローカルなところから広がっていくのです。ずっと広がっていくには、その質量はゼロでないと途中でくたびれてダウンしてしまいます。質量を持っているとその粒子（情報）が伝わる距離は質量に反比例して短くなります。太っている人は遠くまでいけないのですね。この厳然とした対称性は、ちょっとやさそと揺すぶっても、対称性という掟を破らない限り、質量はゼロです。だから、理論的には質量ゼロの粒子が質量を持つことはない、そう思っていました。ところが・・・。

## 1.1 ゲージ粒子が質量をもつ？

20 世紀初頭に、ある種の金属では、超低温度になると、電気抵抗が急にゼロになる現象が見つかりました。これは最終的には、1957 年にバーディーン (Bardeen)、クーパー (Cooper)、シュリーファー (Schrieffer) による BCS 理論で説明されたのですが、この超伝導現象では金属の表面に超電流が流れるのですが、その中は超伝導状態になっていて、そこには磁束が入り込めない、つまりゲージ粒子は普通質量ゼロなので超伝導状態の中まで浸透するはずなのに、少し浸透するだけだ、ということが実験で確かめられました。つまり電磁相互作用を受け持つゲージ粒子が質量ゼロではなくなったという現象 (マイスナー効果) が見つかったのです。実際に光が質量を持つ現象が見つかったのですね！

BCS理論が出た時に、この中で一番若かったシュリーファーが、シカゴ大学で説明をしました。この時、このセミナーの参加者1人が南部先生でした。「ゲージ対称性が破れたのか？おかしい、ゲージ対称性はどこへ行ったのか」、こういう論理的な問題に突き当たったわけです。

この問題に原理的な意味を問い直して、新しい方向に導いたのが、あの南部陽一郎先生でした。それは「自発的対称性の破れ」と言われます。実際には、「対称性が、別の形で具現されている」というべきで、「対称性の別の姿」とでも言うべきかもしれません。問題は、見事に解決されました。しかも、その例を自然の中で知っていたのです。光が超伝導状態になると質量をもつのです。そしてそれは、対称性の原理はしっかり守りながら、新しい豊かな現象を生み出すのだということだったのです。

## 12 自発的対称性の破れと相転移

この状態が実現するのは、超伝導状態という特殊な状態になったときです。それには、その立役者になるような新しい革命児が出てこなければなりません。超伝導の場合は、「クーパー対」と呼ばれています。このためには電子同士が固く団結して、クーパー対がまるで1つの粒子のように振舞うようになって、周りを返信させる状況を作り出すのです。このクーパー対は、単に、ポツリと1つだけできるわけではありません。団結が強いだけに、あちこちでクーパー対ができます。気がついてみると、周りは全部この革命児ばかりがいるという状態になるのです。このクーパー対が、周りに影響を及ぼし、ゲージ粒子にくっついて質量を与え、まわりの状況を変えて、今まで何もエネルギーが沸いてこなかった空間に、新しい活力を与えるのです。つまり、おとなしかった粒子がくっついて革命児に変身するのです。普通は電子と電子の間にはプラス同志だから団結などしません、ある種の金属の中では、周りにくぼみができてそのくぼみに電子が入り込んで、まるで、仲人がいるおかげで、2つの電子がひきつけあうような状況になるのです。つまり、この中にいるほうが安心できて居心地がいい（エネルギーが低い状態）ので、どんどんクーパー対ができて、今までよりもっと低いくぼみにみんな落ち込みます。しまいにはどんどんたまってクーパー対の海になってしまいます。その様子はちょうど水が常気圧のもとで、摂氏0℃になると氷の塊になるようなイメージです。

皆さんの中には、「エネルギーに低い状態になったら何で革命が起こせるようなエネルギーが出てくるの？」と思われるかもしれません。もっともな質問です。実は周りが氷の状態になると、それまでエネルギーがないように見えた水の状態は、すごいエネルギーがあることになります。つまりエネルギーというのは、「使えるようになったエネルギーの事を一般に意味

しています。例えば夏の暑い空気は、周りが全部暑い環境では何の役にも立ちませんが、冬の寒いときに、もしもってこられたら、役に立ちますね？高い山の上にある水は、仕事をしませんが、低いところと接触させると水は下に流れて仕事をします。これを利用したのが水力発電です。もちろん水を高いところに持つていくためには、やっぱり、エネルギーが必要ですので、別にどこかからエネルギーが沸いてきたわけではありません。この場合は、仕掛け人は太陽エネルギーです。貸与で暖められて上昇した水蒸気が山の上に水を運んだのですね。

### 1 3 自発的対称性の破れ

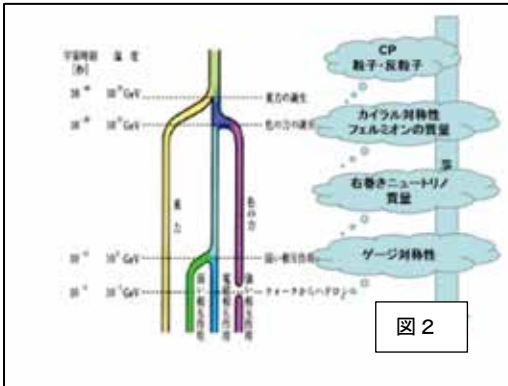
南部先生のお話をもっとすごくて、フェルミオンとその反粒子が強く団結した革命児です。これは電荷もゼロですので空間を埋め尽くすと、今まで思っていた真空よりもっとエネルギーの低い空間ができます。そこから測れば、フェルミオンもエネルギーを持っているので質量があることになります。つまり「空間を一様に埋め尽くすほど強く団結した革命児だらけになると、革命児は今まで質量ゼロだったゲージ粒子やフェルミオンのまわりに絡まり質量を与えます。この革命児のことを、南部ゴールドストーン粒子といいます。実は、これがゲージ粒子にもまとわりついて質量を与えるのですね。「ヒッグスの海」と言われているものは、こういう状態を言うのです。ゲージ粒子にまつわりつくと、革命児ヒッグスは、ゲージ粒子と渾然一体となって、ゲージ粒子と区別がつかなくなります。

このようなストーリーは、素粒子の世界に、大きな変化を及ぼし、それぞれ固有の質量をもつようになり、まるでゲージ対称性がなくなったかのような状況を引き起こします。そして、もともとは、同じような顔をしていた粒子たちが、エネルギーを革命児からもらって、別の顔になり、個性豊かな粒子になるのです。今ある素粒子が、みんな、それぞれ異なった質量をもち、異なった振る舞い（ゲージ相互作用）をする粒子へと変身するのです。

### 1 4 宇宙の進化と革命児ヒッグス

素粒子たちが個性を持ち始めたことは、実は、宇宙の進化の歴史と関係しているのだ、ということは、みんな理解していたのですが、これを見事に表現した図（図 2）を描いたのは、佐藤文隆さんです。佐藤さんは、「あの図は僕が最初に描いたのだ」と威張っておられますが、なるほど、たいした感性だと私も思います。この 2 つの図を見てください。横のものをたてにしてくださいね！図 3 は、素粒子の場の理論で使う図で、右に行くほどエネルギーが高い状態になっています。エネルギーが高いということは、

☆・ヒッグスー宇宙の革命児・☆



先ほど言ったちょっとした「くぼみ」は、気にしなくていいということになります。そうすると、少々ゲージ粒子が質量を持っても、質量ゼロと思っても近似的にはいいでしょう（もっとも対称性の議論をする時は厳密な話をしなくてははいけません）。

ところで、図 2 は、宇宙の進化を表しています。上が昔、下が現在です。時間の矢印は上から下になっています。宇宙が初期に扱った時代は、すべて平等でのっぺらぼうだったのですが、冷えてくるにしたがって、相転移を起こして、はじめにあった対称性が自発的に破れ、それにつれて、差別化されていき、個性豊かな粒子たちが

生まれ、というシナリオが浮かび上がります。革命児がいたからこそ、この世の中は、宇宙の初期の超平等だった世界から、豊かな個性を持つ素粒子が生まれ、そこから豊かな物質が生み出され、そして、星々が生まれ、平坦だった宇宙が、豊富な形で私達の前に現れたのです。そして最後には、地球が生まれ、その地球が、活発に活動の中で海や山ができ、生命が生まれ、山あり谷ありの豊かな自然環境を生み出したのです。



その地球が、活発に活動の中で海や山ができ、生命が生まれ、山あり谷ありの豊かな自然環境を生み出したのです。

こうして、超マイクロと超マクロの世界が、同じメカニズムで動いていること、お互いに深く関係があることがわかってきました。図 4 はそれを表したもので、誰が描き始めたのかは知りませんが、よく使われています。ものが、原子からできていること、そして、それがたくさん集まって分子になり、さらに豊かな物質ができ、それがまた、もっと複雑に絡み合った生命を作る基本単位である細胞を作り、それらが集まって、自ら増殖し代謝し、動き回れる生物が生み出され、そして、物を考える人間が生まれた。物理学・天文学・生物学・脳科学、という分野がすべてサイエンスの分野として研究の対象になっていますが、「生きているとはどういうことか」と「考

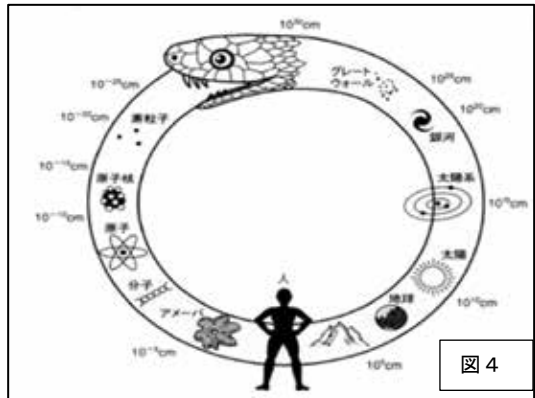


## ☆・ヒッグスー宇宙の革命児・☆

えるってどういうこと？」という基本的な問いに対する解明は、まだまだ緒についたばかりです。おのおの世界でわかってきたことを、そこだけで終わらず、ほかの領域とつなげてみると、思わぬ世界が見えてきます。物質科学と宇宙科学は、いまや切り離せないことが、どんどんわかってきたのですね。

### 15 終わりに

どうやらもうすぐ日本につく時間になりました。安物のフライトスケジュールで、電気のパワーもためていたものが、なくなりそうになってきました。あ、警告が出ました！ 飛行機の中では、ビジネスクラスには電気をもらえるのですが、安い飛行機に乗ってきたので、電気をもらえません。まだまだ言い足りないことはたくさんありますが、ひとまず終わりにします。



この記事は昨年12月7日に行われた第12回NPO講演会で話された講演内容に加筆されたものです。左から青木、柴田、小林、坂東、作花、黒河



プラネタリウムのなかでは、  
おおきな宇宙への夢が  
育っています。



## コニカミノルタ プラネタリウム株式会社

東京事業所 〒170-8630 東京都豊島区東池袋3-1-3  
大阪事業所 〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町2-3-10 西本町インテス11階  
東海事業所 〒442-8558 愛知県豊川市金屋西町1-8  
URL: <http://pla.konicaminolta.jp>

TEL (03)5985-1711  
TEL (06)6110-0570  
TEL (0533)89-3570

# HERO

一人ひとりが HERO ! アナログ人間の味方です!

## 株式会社ヒーロー

代表取締役 岡村 勝

〒532-0011 大阪市淀川区西中島 6丁目6-6 NLC 新大阪 11 号館 7階  
TEL:06-6309-5265 FAX:06-6309-5285 <http://www.herojp.co.jp>

### 【事業紹介】

- ・ソフトウェア開発
  - 物流業務システム、スマートフォンアプリ、各種ゲーム etc.
- ・技術者派遣 (流通分野、SNS 分野) ・コンサルティング
- ・製品販売 ~英雄(ヒーロー)シリーズ~
  - 楽図英雄 (図面付受注書作成システム)、勤怠英雄(就業管理システム)
- ・アニメパンフ「キャラクター+ストーリー」でわかりやすく社内案内・観光案内・商品説明。用途いろいろ!



## Advanced Engineering Services



株式会社エイ・イー・エス  
Advanced Engineering Services Co.,Ltd.



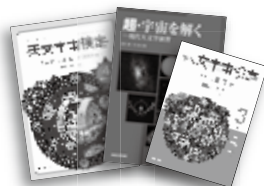
AES Small Satellite

株式会社エイ・イー・エスは  
航空宇宙で培った技術を基に、  
お客様のニーズにあったあらゆる分野に  
おける設計、製造、試験を提供いたします。  
さらに、自社製小型衛星の打上げを  
平成 26 年 5 月 24 日に予定しています。

〒305-0032 茨城県つくば市竹園 1-6-1  
TEL:029-855-2001 FAX:029-855-9815

## 天文宇宙検定

公式テキスト・参考書・問題集



公式テキスト B5判・フルカラー・定価(本体 1,500 円+税)

- 2級 銀河博士 高校地学程度の幅広い知識が身に付く。
- 3級 星空博士 教養としての天文学を学べる入門書。
- 4級 星博士ジュニア 天文学の基礎を丁寧に解説。7月下旬刊行予定

公式参考書 B5判・定価(本体 5,000 円+税)

超・宇宙を解く—現代天文学演習 福江 純・沢 武文 編  
1級合格の指針となる理系大学レベルの天文学テキスト。

公式問題集 A5判・二色・予価各(本体 1,800 円+税)

- 1級 天文宇宙博士 2級 銀河博士
- 3級 星空博士 4級 星博士ジュニア

出題傾向がわかる過去問題、模擬問題を収録した。8月上旬刊行予定

〒160-0008 東京都新宿区三栄町 8  
TEL 03-3359-7371 FAX 03-3359-7375 <http://www.kouseisha.com/>

恒星社厚生閣

## 事務局からのお知らせ

梅雨入り前に真夏日が続いて、35 度を超える猛暑日も現れたりしましたので、今年の夏はどうなることやと身構えたものですが、その後は比較的落ち着いて、いつものように山々の緑は深く、水田には稲の順調な生育が確認できる頃となりました。

今年の花山天体観望会は3・4・5月と、いずれも晴天に恵まれて、幸先の良いスタートを切ることが出来ましたが、次は7月21日(月：海の日)です。7月26日(土)に予定されている飛騨天文台の一般公開と重ならないように、例年より1週間早い日となりましたが、京都では祇園祭の頃に梅雨が明けると云われていますので、4連続の晴天観望会となるものと期待しています。

この後も、盛夏から秋にかけて、天候の変化に一喜一憂しながら豊かな自然と天体観望を楽しんで頂くイベントを、次々と用意していますので、是非皆様方の積極的なご参加をお願い致します。

7/21 (月：祝日)： 第49回花山天体観望会「土星と夏の星座」

7/26 (土)： 飛騨天文台一般公開

8/3 (日)～8/5 (火)： 第8回子ども飛騨天文台天体観測教室

9/6 (土)： 第50回花山天体観望会「名月と名曲」

10/11 (土)～10/13 (月：祝日)： 第5回飛騨天文台自然再発見ツアー

10/18 (土)： 第51回花山天体観望会「星雲」

11/1 (土)： 花山天文台一般公開

11/15 (土)： 第52回花山天体観望会「太陽」

### 編集後記

今回は3つの講演内容を掲載しました。いずれも解りやすく読みごたえがあります。「あすとろん」は本NPOの活動を紹介し、また会員間の理解を深めるために発行されている季刊誌です。今後さらに内容を充実していくために、会員の皆様から天文ニュース、普及活動報告、思い出の星空、天文書・ソフト、和歌・俳句・川柳、天体写真・イラストなど投稿、また掲載された記事へのご意見などをお寄せくださるようお願いいたします。

原稿締め切り日は3の倍数月の15日で、投稿に関しては、なるべくテンプレート(Word)を<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/hosizora/astron.html>からダウンロードして、エディタに書いたテキスト文をそこにコピー貼り付けして作成して下さるようお願いいたします。

編集者

## 桔梗が咲いた



晴明神社にて 6月29日

### NPO法人花山星空ネットワークへの入会方法

住所・氏名・連絡先電話番号を電子メール または電話でお知らせ下さい。

電子メール：hosizora@kwasan.kyoto-u.ac.jp 電話：075-581-1461。

入会申込書と会費の振込用紙を郵送いたします。

- (1) 正会員（一般）・入会金 2,000円 ・年会費 3,000円  
（学生）・入会金 1,000円 ・年会費 2,000円
- (2) 準会員 ・入会金 1,000円 ・年会費 2,000円
- (3) 賛助会員 年額1口以上 （1口30,000円）

### 発行人 NPO法人花山星空ネットワーク

〒607-8471 京都市山科区北花山大峰町 京都大学花山天文台内

Tel 075-581-1461 URL <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/hosizora>

### 印刷所 株式会社あおぞら印刷

〒604-8431 京都市中京区西ノ京原町15

2014年6月30日発行

定価：300円