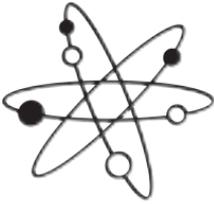


はやぶさ2 から
ブラックホールまで

宇宙
まるごと
Q&A

北本 俊二
原田 知広
亀田 真吾





はやぶさ2 から
ブラックホールまで

宇宙
まるごと
Q&A

北本 俊二
原田 知広
亀田 真吾



宇宙
まるごと
Q&A

はやぶさ2から
ブラックホールまで

北本 俊二
原田 知広
亀田 真吾

はじめに

2020年度のノーベル物理学賞は、ブラックホールの理論的研究で功績を挙げたロジャー・ペンローズ博士と、私たちの住む銀河系の中心にブラックホールが存在することを明らかにした、ラインハルト・ゲンツェル博士とアンドレア・ゲズ博士でした。そして、2020年12月には、「はやぶさ2」が小惑星「リュウグウ」からサンプルを携えて帰還しました。2019年度のノーベル物理学賞は宇宙論の理論的研究で功績を挙げたジェームズ・ピーブルズ博士と、太陽系外の惑星を初めて発見したミシェル・マイヨール博士とディディエ・ケロー博士でした。イベントホライズンテレスコープによるM87銀河の中心にある超大質量ブラックホールの影の撮像が大ニュースとなったのは2019年4月でした。さらに2017年度のノーベル物理学賞は、ブラックホールの合体で放射された重力波の初めての検出という功績に与えられました。このように、ここ数年で、宇宙の研究に関して、大発見が報じられるとともに、ノーベル物理学賞として数々の功績が称えられました。世界中で宇宙への関心が高まるばかりです。

ところで、皆様は、都会から離れて、街明かりの少ない山や海に行つて、よく晴れて澄み切った、月明かりの無い夜空を眺めたことがあるでしょうか。そこに見える満天の星は何なのだろう、天の川は何なのだろう、広がる宇宙はどうなっているのだろうか、等々の疑問をもったことはないでしょうか。古代ギリシャの時代から多くの哲学者や科学者が同じような疑問をもち、その疑問を解き明かそうと努めてきました。私たちが、私た

ちの住む宇宙、星、地球の構造や進化に興味を持つのは本能的な欲求かもしれません。現代でも、物理学者や天文学者が、宇宙の謎、天体の謎、太陽系の謎を、最新物理学を使った理論的研究や最新技術を駆使した観測的研究で、次々と明らかにしつつも、まだまだ多くの謎が未解決のまま残され、さらに新しい謎も生み出されています。

本書は、私たちの住む地球から、太陽・惑星系、星や私たちの銀河系、そして、銀河系の外の世界、宇宙そのものの、さらにはブラックホールやタイムマシンにまで広範囲に及ぶ題材を、みんなが持つ疑問という形で取り上げ、それらに関する最新の研究成果を解説しました。なお、現在でも謎の部分は謎のままであるとして残してあります。本書を読んで、皆さんが、さらに新たな疑問を持ち、宇宙についてもっと知りたい、研究したいと、好奇心を膨らませていただければ幸いです。

宇宙まるごとQ&A

— 目次

はじめに i

第一章

人類の宇宙像、地球、太陽、惑星、太陽系 (亀田・北本) 1

- Q 1 地球はなぜ丸いと分かるのでしょうか? 2
- Q 2 地球は磁石? 4
- Q 3 地球にはなぜ季節があるの? 6
- Q 4 潮の満ち引きはなぜ起きる? 8
- Q 5 空はなぜ青いのですか? 10
- Q 6 月のクレーターはどうやってできた? 12
- Q 7 月はどうやってできた? 14
- Q 8 太陽から出た光が地球に届くまでどれくらいの時間がかかる? 16
- Q 9 太陽の密度はどれくらい? 18
- Q 10 太陽黒点とは何ですか? 20
- Q 11 太陽も磁石? 22
- Q 12 オーロラはどうして光る? 24
- Q 13 太陽はあと何年光っていられるの? 26

Q 14 惑星とは何ですか？ 冥王星は惑星ではないのですか？ 28

Q 15 太陽系の大きさはどれぐらい？ 30

Q 16 他の惑星でも山の気温は低い？ 32

Q 17 土星の環は何でできているの？ 34

Q 18 小惑星とは何ですか？ 36

Q 19 隕石や流星はどこから来る？ 38

エピソード〜古代ギリシャ時代に、地球の半径を測定した人〜 40

エピソード〜古代ギリシャ時代に地動説を唱えた人〜 42

星

(北本・原田) 45

第2章

Q 1 星というのは何ですか？ 46

Q 2 季節によって見える星が変わるのはなぜですか？ 48

Q 3 北極星はどれくらい遠くにあるの？ 50

Q 4 星の距離はどうやってはかりますか？ 52

Q 5 星はどうして自分で光るのですか？ (1) 54

Q 6 星はどうして自分で光るのですか？ (2) 56

Q 7 星の明るさはどうやって決まりますか？ 58

Q 8 星の色はどうやって決まりますか？ (1) 60

Q 9 星の色はどうやって決まりますか？ (2) 62

Q 10 星はバラバラに存在するのですか？ 64

Q 11 星の半径はどれくらい？ 66

Q 12 星の重さ(質量)はどれくらい？ 68

Q 13 星の寿命はどれくらい？ 70

Q 14 白色矮星とは何ですか？ 72

Q 15 中性子星とは何ですか？ 74

Q 16 ブラックホールとは何ですか？ 76

Q 17 ブラックホールの中に入ったらどうなるの？ 78

Q 18 ブラックホールはどうすれば観測できるの？ 80

Q 19 どんなブラックホールが見つかっているの？ 82

エピソード〜ブラックホール、永遠に潰れる星(1)〜 84

第3章

私たちの銀河系 (北本)

89

- Q 1 星と星の間は何もないの? 90
- Q 2 星と星の間はどんなガスがあるの? 92
- Q 3 星の最後はどうなるの? (白色矮星) 94
- Q 4 星の最後はどうなるの? (超新星爆発) 96
- Q 5 超新星はどれくらい明るい? (昔の記録) 98
- Q 6 超新星はどれくらい明るい? (現代) 100
- Q 7 天の川とは何ですか? 102
- Q 8 私たちの銀河系はどんなものでできているのですか? 104
- Q 9 私たちの銀河系の大きさはどれくらいですか? 106
- Q 10 宇宙には地図があるの? 番地がついているの? (赤道座標) 108
- Q 11 宇宙には地図があるの? 番地がついているの? (銀河座標) 110

第4章

銀河と銀河団、大規模構造 (北本・原田)

113

- Q 1 アンドロメダ銀河とは何ですか? 114
- Q 2 銀河はどんな形をしていますか? 116
- Q 3 銀河の大きさはどれくらいですか? 118
- Q 4 銀河の質量はどれくらいですか? 120
- Q 5 銀河と銀河の間隔はどれくらいですか? 122
- Q 6 銀河の中で変わった種類を教えてください 124

- Q 7 銀河はバラバラに存在するのですか？ 126
- Q 8 私たちの銀河系はどこにあるのですか？ 128
- Q 9 銀河はなぜ集まっているのですか？ 130
- Q 10 ビッグバンとは何ですか？ 132

第5章

地球外生命と宇宙旅行 (亀田)

143

- Q 1 地球のような惑星は他にもあるのでしょうか？ 144
- Q 2 最初に見つかった系外惑星はどんな惑星？ 146
- Q 3 系外惑星はどうやって見つける？ 148
- Q 4 地球に住めなくなったら、どこに住めば良い？ 150
- Q 5 私は月や火星に行くことはできるでしょうか？ 152

第6章

宇宙の果て (原田・北本)

165

- Q 1 宇宙はどんな形をしていて宇宙には果てはあるのですか？ 166

- Q 11 ビッグバンが起こったことはなぜ分かる？ 134
- Q 12 銀河はどのようにしてできたのですか？ 136
- Q 13 宇宙はどのように膨張しているのですか？ 138
- Q 14 インフレーション宇宙論とは何ですか？ 140

- Q 6 宇宙ではなぜ宇宙服を着ないといけないのでしょうか？ 154
- Q 7 月でラーメンは食べられますか？ 156
- Q 8 人工衛星はなぜ落ちないのですか？ 158
- エピソードはやぶさ2の開発段階から帰還まで 160

- Q 2 宇宙に始まりや終わりはあるのですか？ 168
- Q 3 暗黒物質とダークエネルギーとは何ですか？ 170

Q 4	重力とは何ですか？	172
Q 5	重力波とは何ですか？	174
Q 6	光を追いかけたら光は遅くなりますか？	176
Q 7	世の中の物質はどうやってできたのですか？	178
Q 8	ワープとは何ですか？	180
Q 9	相対性理論とは何ですか？	182
Q 10	タイムマシンは作れますか？	184
Q 11	ガンマ線バーストというのは何ですか？	186
Q 12	ガンマ線バーストの距離論争	188
エピソード	宇宙で1番〇〇なのは何ですか？	190

第1章

人類の宇宙像、地球、太陽、惑星、太陽系

Q1 地球はなぜ丸いと分かるのでしょうか？

私たちの日常生活では地球が丸いと感じることはほとんどありません。地球は半径約6400kmの球に近い形をしています。しかし、私たち人間に比べて非常に大きいので、自分の周りだけを見てみると平らに見えてしまいます。実際、古代の人々は地面が平らであり、球ではないと考えていました。

技術が進み、自分の周りだけでなく遠くのことまで観測できるようになり、地球は丸いということが分かってきました。南北方向に十分離れていれば、同じ時刻で影の長さが異なり、港から船が出航し、沖合に到達すると船底の方が水平線より沈んで見えます。これらのことは地球が丸いことから説明できる現象です。大航海時代に入り、世界1周が達成されたことにより、地球には端がなく丸い形をしている、と広く考えられるようになりました。最近では宇宙から地球の写真を撮ることができており、丸いことは明らかです（図1-1は、はやぶさ2が撮った地球の写真）。

さて、それでは地球はなぜ丸いのでしょうか？ これは主に重力によるものと考えられます。洗面器に水をはると、水を入れている間は水面が揺れています、時間がたつと水面は平らになります。この状態から水面が一部盛り上がると、その状態は不安定となり、盛り上がった部分から左右に水が流れ、徐々に水面が平らになります。地球ができた時にも同様のことが起きました。地球の場合は、中心に向かって球対称に重力がかかるため、球の表面が安定した面となります。基本的にはこの面から出っ張った高地から、低地にものが流れま

す。この結果、地球は丸くなったと考えられます。

細かく見れば地球は単純な球ではなく、高地や海溝があります。最も高い山はエベレスト山（標高約9 km）であり、最も深いのはマリアナ海溝（深さ約11 km）です。人間に比べるとはるかに大きいものですが、地球の直径に比べるとその高低差は約600分の1となります。およそリングの大きさに対して、皮よりも厚み位になっていて、地形の凹凸は地球全体から比べると小さいのです。

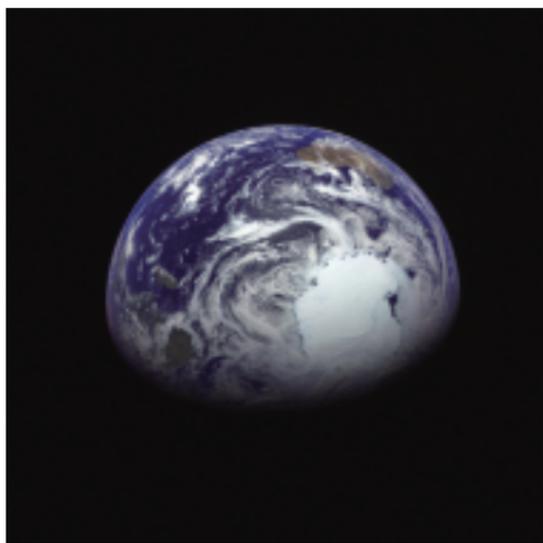


図1-1 「はやぶさ2」が地球スイングバイ後に撮影した地球
提供：JAXA、東大など

Q 2 地球は磁石？

磁石にはN極とS極があり、これらは引き合う性質をもっています。また、磁石を糸でつるしておく、N極が北を向きます。方角を知るために使うコンパスはこの性質を利用しています（N極のNはNorth（北）、S極のSはSouth（南）からきています）。地上では南北方向に磁力が働いている、ということは古くから知られていたことなのですが、地球全体が磁力をもっていると考えられるようになったのは、15世紀に入ってからです。イギリスのウィリアム・ギルバートは北に行くと、コンパスの針が水平方向に対して傾いていくことに注目し、地球の内部が磁石になっていればこの現象が説明できるということを発見しました。磁力の向きと水平面の角度を伏角とよびます。図1・2は、棒磁石と砂鉄でN極、S極間の磁力の方向を目に見えるようにした状態を示しています。地球内部にこの棒磁石のような磁力をもつものがあれば、地表での伏角が再現できる、ということです。

それでは、なぜ地球は磁力をもつのでしょうか。実際に棒磁石があるのでしょいか。私たちが目にする棒磁石は熱すると磁力を失ってしまいます。地球の内部は高温になっているため、同じような棒磁石が入っているとは考えにくいのです。そこで、電流の流れによって磁力を発生させる電磁石があると考えられています。銅線をつくるぐる巻いたコイルに電流を流すと磁力が発生します。これが電磁石です。電気を使ったモーター等に使用されています。実際の地球の内部ではどうなっているのでしょうか。

地球は内側から、核、マントル、地殻で構成されています。このうち核は鉄を主成分としており、固体の状態となっている内側の内核、どろどろの流体になっている外側の外核に分けられます。この外核内の流体の動きによって電流が発生し、磁力が発生していると考えられています。これは「ダイナモ理論」とよばれています。この理論で、多くの現象が説明できるようになってきていますが、まだまだ精力的に研究が進められています。

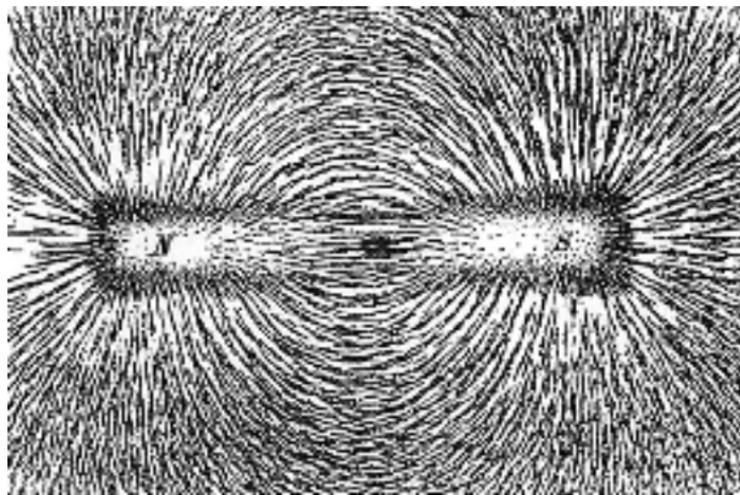


図1-2 磁石と砂鉄による磁力の向き

Q3 地球にはなぜ季節があるの？

日本では7～8月ごろが1番暑く夏とよばれ、1～2月ごろに1番寒く冬とよばれます。これを1年ごとに繰り返しています。これは地球の動きと関係があります。

地球は太陽の周りを1年で1周しています。これを公転とよびます。この軌道は円にかなり近く、太陽からの距離は1年でほとんど一定であり、太陽から地球全体に届くエネルギーはほとんど変わりません。季節があることを説明するためには、さらに地球の自転を考える必要があります。

地球は、北極と南極を結ぶ線を中心に約1日で1回転しています。これを自転とよびます。この自転軸の方向は、公転の面に対して 23.4 度傾いています(図1.3上)。そのため夏の間は太陽高度(水平面からの太陽方向の角度)が大きくなり、そうすると、太陽から地表面が受け取るエネルギーが大きくなります。図1.3下に示すように、同じ大きさの平面板を太陽光と垂直に置いた時と、斜めに置いた時で、受け取るエネルギーは垂直に置いたときの方が大きくなるわけです。

受け取る太陽光強度が1番強くなるのは6月下旬であり、その後、地表・大気が暖められて7～8月が最も暑くなります。また、12月下旬には受け取るエネルギーが最も小さくなり、その後1～2月が最も寒くなります。これは日本だけでなく北半球(特に緯度 23.4 度以上)では共通しています。一方で、南半球では逆のことが起きているので、7～8月が寒く、1～2月が暑い、ということになります。

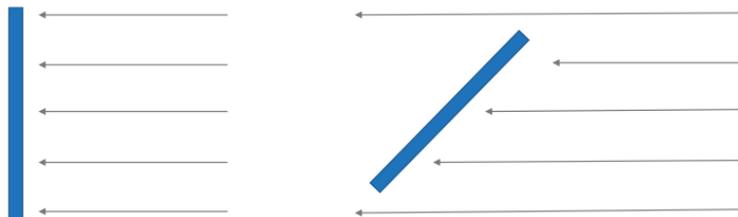
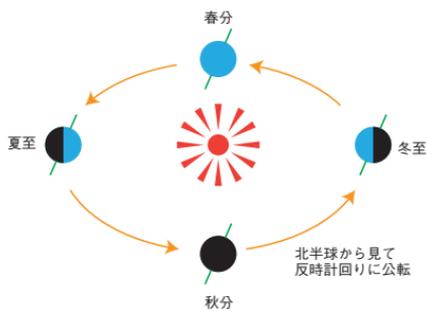


図1-3 (上) 地球の公転運動と自転軸の傾き (下) 平板に当たる光

Q 4 潮の満ち引きはなぜ起きる？

海の水位は半日の周期で上がったたり下がったりを繰り返しており、これを潮の満ち引きといいます。水位が1番上がった時を満潮、下がった時を干潮とよんでいます。高低差は数mから、場所によっては十数mを超えます。これは主に月によって引き起こされる現象です。

地球と月は引力で引き合っていて、ほぼ同じ距離を保っています。宇宙空間では、物体は引力などの力を受けなければまっすぐに進みます。そのため、ある宇宙船が無視できるほど小さい引力の天体の近くを通り過ぎる場合は、宇宙船はほぼまっすぐに進み、天体の距離はどんどん変わっていきます。一方、月は大きな地球の引力を受けて、直進できずに地球側に曲げられた軌道を通ります。この曲がり具合がちょうど地球との距離を一定に保つようになっていのです。

一方で、地球も月から同じ大きさの引力を受けています。地球は月よりもずっと重いので、月に比べるとほとんど動いていないように見えますが、月と同じ周期で、円に近い軌道をとります。この円は小さく、円周上を回っているというよりは、ふらついているようなイメージです。

これを踏まえて、地球表面の海に目を向けてみましょう。地球全体としては、月の引力を受けつつ円の上を回っていますが、引力は距離が近いと強く、遠いと弱くなるため、月に1番近い点には地球の中心の点が受ける引力より強い引力が働き、月と逆側の点には弱い力が働きます(図1.4)。中心の点はちょうど良い速さで

回っていて、月との距離を一定に保っています。月側の点は同じ速さで回っているのに引力が強いため、より月側に引っ張られる向きに力がかかります。月と逆側の点は、引力が弱いために遠ざかる向きに力がかかります。この力に対して地球の地殻が固いためほとんど変形しませんが、液体の海は変形します。これによって、月側の海面だけでなく、月と逆側の海面の上昇が引き起こされることとなります。

しかし、実際には月が真上に来る時間と、満潮の時間は同じではなく、大きくずれており、場所によっても異なります。海面が力を受けて盛り上がっていく間にも地球が自転しているため、ある位置が満潮になる間に月の真下の位置からずれていくことが原因の1つです。潮の満ち引きは地球上で月の引力を感じることでできる数少ない重要な現象です。

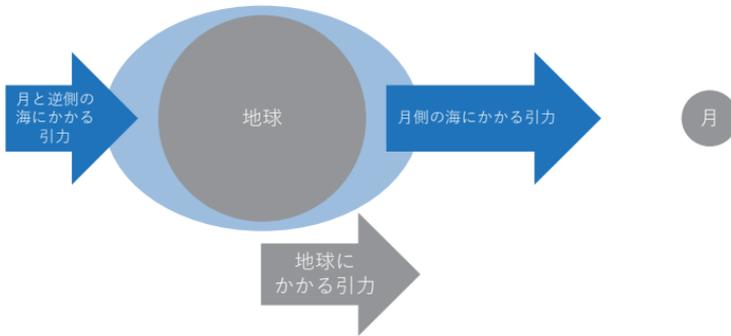


図1-4 月による潮の満ち引き

①月による潮の満ち引き。ただし実際には地球の自転により満潮の位置はずれる。

エピソード〈古代ギリシャ時代に地動説を唱えた人〉

実は、エラトステネスが地球の半径を求めたころより前に、ギリシャには太陽の距離が月の距離よりうんと遠いと考えた学者もいました。アリストアルコス（紀元前310〜230ごろ）という学者です。アリストアルコスは、月が正確に半月に見える時の太陽と月のなす角を測りました。上弦の月だと、夕方太陽は西に、月は南に見えるので、月と太陽のなす角を測ることができるのです。下弦の月だと、朝太陽が東に、月は南に見えるので、下弦でも構いません。測定した角度は $86 \cdot 983$ 度だったそうです。図1-21の上に示すように、月がちようど半月なので、太陽・月・観測者の角度は90度です。一方、月・観測者・太陽の角度が $86 \cdot 983$ 度です。これで決まる直角三角形を書くと、

$\cos(86.983 \text{度}) \parallel (\text{月} - \text{観測者の距離}) \setminus (\text{太陽} - \text{観測者の距離}) \sim 0.0526 \sim 1/19$ ですから、太陽は月より。およそ19倍遠いことになります。（実際は390倍遠いのです。390倍遠いとして、測定されるべき角度は $89 \cdot 85$ 度です。測定が難しかったのでしようね）。

アリストアルコスはさらに考えました。日食の時確認できるように、月と太陽は見かけの大きさがほとんど同じです。一方、月食の時は、図1-21の下に示すように月は地球の影の中に入ります。月は地球の影の3分の1程度であることがわかります。だから月は地球の3分の1程度の大きさに違いありません（実際は約3・7分の1です）。そして、「19倍も遠くにあるはずの太陽が地球の3分の1程度の大きさの月と同じくらいの大

さに見えるのだから、太陽は月より、また、地球よりうんと大きくなければいけない。したがって太陽が地球の周りを回っているという考え（天動説）はおかしい。地球が太陽の周りを回っている（地動説）と考えるべきだ」というわけです。年代を見ると、アリストアルコスがエラトステネスより35歳年上だから、エラトステネスはアリストアルコスが考えていた地動説を信じていたのでしょう。

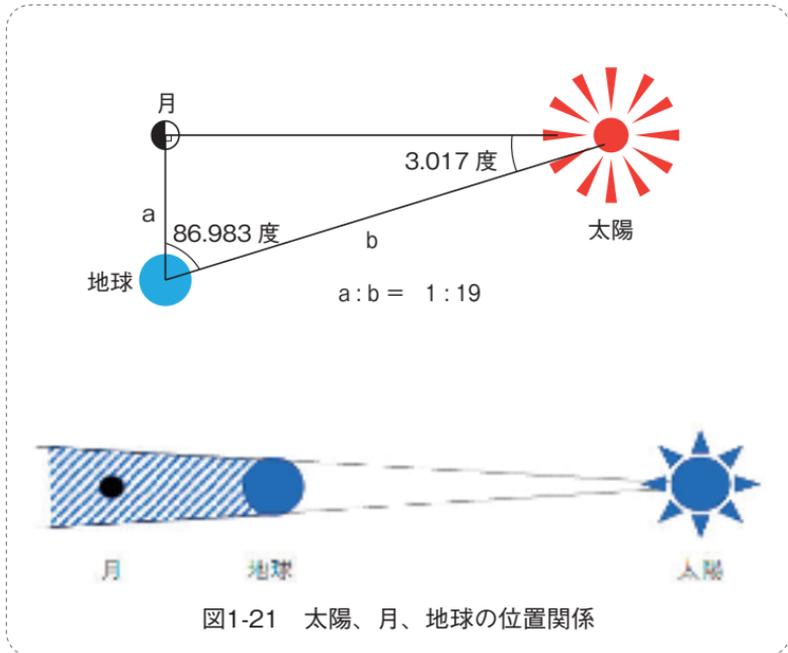


図1-21 太陽、月、地球の位置関係

第2章 星

Q1 星というのは何ですか？

夜空には色々な星が輝いています。でも、どれも同じというわけではありません。特殊な星を除けば、火星や金星、木星や土星のような惑星、月のような衛星と、太陽のような恒星とよばれる星があります。

月は、皆さん知っているように、三日月になったり、半月になったり、満月になったりします。月は地球の周りを回る地球の衛星とよばれる天体で、ほぼ球形の岩石でできています。自分では光っていません。太陽に照らされているところだけが、太陽の光を反射・散乱して光っています。

惑星は、月や地球と同じように岩石でできている金星や火星等と、主にガスでできている木星や土星があります。どれも月と同じように、自分では輝いておらず、太陽に照らされて太陽の光を反射・散乱しているだけです。また、惑星は地球と同じように太陽の周りを回転（公転）しています。そのため、地球と太陽と惑星の位置関係は時期により変化します。その結果、惑星は太陽に対していろいろな方向に見えることとなります。

一方、月や惑星以外の多くの星々（恒星）は、昔からほぼ同じ方向に見えています。昔の人は、星々の位置関係から人や動物や道具の形を連想して星座を考え出しました。図2-1は、冬の星座、オリオン座付近の星空の写真です。これらの星々は惑星と比べて、私たちからは非常に遠くにある、太陽と同じように輝いている天体です。惑星と同じくらい、あるいは、惑星より暗く見えるのは、遠くにあるからです。もし、近くへ行っ

て見ることができれば、太陽のように明るいのです。また、それぞれの星は、実はそれぞれ動いているのです

が、非常に遠くにあるので、少しくらい動いても、私たちから見ていると、ほとんど移動しているようには見え、長い間いつも同じ方向に見えてお互いの位置関係を保っているように見えます。

では、太陽のような恒星というのは、どんなものでしょうか。実はガスの塊です。多くの星では、ほとんど水素でできたガスです。ヘリウムもある程度含まれており、さらにもっと違う種類の元素も少し入っています。ガスが集まって宇宙空間にぼっかり浮いているような存在です。



図2-1 オリオン座
提供：国立天文台

Q2 季節によって見える星が変わるのはなぜですか？

恒星とよばれる自分で輝いている太陽のような星は、地球から見て方向がほとんど変わりません。星座を思い出してください。夏の星座はくちよう座、わし座、こと座が有名です。秋になると、アンドロメダ座やペガサス座が見えます。冬はオリオン座、春はおとめ座やしし座が有名ですね。

恒星はほとんど動かないのに、季節によって見える星座が違ってするのは、どうしてでしょう。もう少し考えてみると、季節によって星座の見え方が変わりますが、その形は変わりません。また、1年がたつと、1年前と同じように星座が見えます。実は秋の星座というのは、秋の夜9時とか10時ごろに見える星座ということ。夏の星座は夏の夜9時から10時ごろに見える星座ですが、時間が経過して真夜中に近づくと、秋の星座が東から登り出し、真夜中には見ごろになります。さらに明け方には冬の星座たちが東の空から登り出します。地球から見える時刻が変わってしまったのですね。ある決まった星を詳しく観察すると、地球から見て同じ方向に見える時間が毎日約4分早くなってきました。だから、星座をつくる恒星たちが動いたというより、地球は1日にほぼ1回転するのだけれど、実は23時間56分で1回転すると考えた方が良いでしょう。

では、1日というのはなんでしたっけ。1日というのは、地球から見て、太陽が地球の周りを1周する時間です。ところが、地球は太陽に対しては1周するけど、恒星に対してはおよそ23時間56分で1周していることになります。1日おおよそ4分ずつのズレが、1年の365日蓄積すると、1440分、すなわち24時間分変わっ

てしまいます。あたかも、太陽が恒星たちの間を1年かけて1周回るように見えているのです。逆に地球が太陽の周りを1年かけて1周回っていると考えるのも良いですね。すなわち、地球が太陽の周りを1年かけて1周していると考えるとうまく説明できません。図2-2のように1日で地球が太陽の周りを少し回るので、恒星に対して1周しても、太陽は元の方向にはならず、1周の365分の1だけ方向がズレてしまったので、およそ4分（すなわち24時間の365分の1）だけ、遅れて、太陽は元の方向に見えるのです。

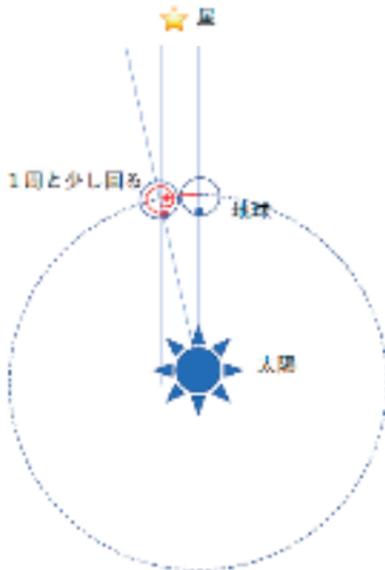


図2-2 太陽の周りを公転する地球

Q3 北極星はどれくらい遠くにあるの？

恒星は非常に遠くにあるため、本当は太陽のように明るいけれど、夜空の星としてささやかに輝いて見えています。では、どれくらい遠くにあるのでしょうか。

皆さんは北極星を見たことがありますか。昔は、山の旅や海の航海では迷わないように星を見て方角を知ったのですが、その時、いつも北の方向に見える北極星が頼りになるのです。でも、北極星は2等星で特に明るい星ではありません。距離は433光年です。1光年とは光が1年の間に進む距離ですから、私たちが見ている北極星からの光は、北極星を433年前に出発した光です。光は1秒間におよそ3億m進みます。1年はおよそ3千万秒ですから、3億mの3千万倍の433倍の距離にあるということです。

さて、太陽をのぞいて1番近い恒星は、ケンタウルス座のアルファ星です。私たちから4.3光年離れたところにあります。4.3光年ですから、光の速度で4.3年かかる距離ということです。太陽までは光の速度でおよそ500秒ですから、太陽に比べておよそ27万倍の距離ということになります。北極星はケンタウルス座アルファ星のおよそ100倍の距離にあります。

みなさんは天の川を見たことがあるでしょうか。天の川はボヤッと光る雲のように見えます。これはたくさん星が密集しているからです。私たちは、銀河系とよばれる巨大な星やガスなどの集まりの中の、比較的端の方に位置する太陽系の中の地球に住んでいます。また、銀河系は比較的平たい形をしているので、私たちが、

この銀河系の平たい面に沿った方向を見ると、たくさん星が天の川として見えるのです（図2-3）。この銀河系の中心までの距離はおよそ2万5千光年です。銀河系そのものは半径4万から5万光年ですから、私たちから見ると、銀河系の中心を超えた方向側の端、およそ7万光年の間に多くの星が存在しているわけです。私たちの銀河系から外に出ると、星はほとんど無くなりますが、私たちの銀河系と同じような星やガスなどの集まりである銀河が点在しています。これら銀河の中の星は私たちの銀河系内の星々よりもっと遠くにあるというわけです。



図2-3 天の川（銀河系の中心方向）

提供：福島英雄

Q 4 星の距離はどうやってはかりますか？

恒星は非常に遠くて、いろいろな距離にあります。光の速さでも、何年も何百年も、もつとかかる距離にある星もあります。さて、そんな遠くの星の距離はどうしたら測ることができるのでしょうか。

実は、星の距離を測定することは大変難しい研究です。地球は太陽の周りを1年かけて1周します。月夜に散歩すると、月がついて来るように感じた経験はありませんか。電車から外の景色をながめたら、近くの景色はどんどん後ろ方向に流れていくのに、遠くの景色はゆっくりとしか流れていきません。同じように、私たちが月夜の夜道を歩いても、遠くの月の方向はほとんど変化しないので、月は私たちについて来るように感じるので。

同じように地球が太陽の周りをぐるぐる回ると、遠くの星はほとんど方向が変わらないけれど、比較的近い星は地球の動きにあわせて、見える方向が変わります(図2.4)。1年間、星の方向を精密に測定すると、近くの星は遠くの星に比べて1周ぐるりと回転しているように見えるのです。地球が太陽の周りを回る半径は分かっているのです。この星の回転する大きさを調べることで、星までの距離を知ることができます。三角測量の原理です。この方法で比較的近い星の距離が測定されています。

一方、遠くの星は変化が小さくて測定するのが困難です。そこで、距離の分かっていた星の性質、例えば、ある種類の周期的に明るさが変わる星では、周期が分かれば、本当の明るさ(ある決まった距離にあれば、どれく

らしいの明るさに見えるか)を知ることができます。そうすると、見えている明るさを観測すれば、どれくらいの距離にあるか計算できるといわけです。その他にも、いろいろな方法で星の距離の測定が行われています。

三角測量の方法は大変分かりやすく、間違いのない方法です。星の方向を測定する精度をどんどんあげると、遠くの星まで三角測量で距離を求めることができます。三角測量で星の距離を測定することを目的として、2013年12月19日に欧州宇宙機関(ESA)から、ガイア衛星が打ち上げられました。ガイア衛星は、今もたくさん星々の距離や、また、星々の微小な動きを観測し続けています。

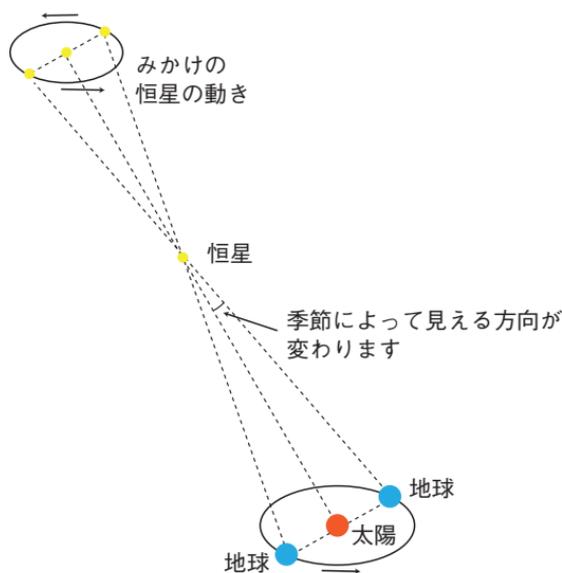


図2-4 地球の公転を利用した三角測量

Q5 星はどうして自分で光るのですか？ (1)

恒星と惑星の違いは、恒星は自分で光っているけれど、惑星は自分では光らず、太陽等の光を反射や散乱しているだけ、ということでした。では、恒星はどうして自分で光ることができるのでしょうか。

皆さんは万有引力という言葉聞いたことがあるでしょうか。17世紀にニュートンが木から落ちるのを見て発見した、と言われていた、万有引力です。その名の通り、すべての物質が互いに引き付け合うという性質です。恒星は、主に水素のガスが集まって宇宙にぽっかり浮いているガスの塊のようなものでした。恒星であるガスの塊も、ガスに含まれる水素等の原子同士の万有引力により、お互いに引き付けあっています。そしてますます集まろうとする力が働いています。

まずは、恒星ではなく、希薄だけど周りよりは数密度が大きな原子や分子の雲があつたとしましょう。雲の中にさらに周りより数密度の大きな部分があると、原子や分子は、お互いに引っ張り合うのですから、その部分はより収縮し、原子や分子の数密度がより高くなり、温度も上がります。温度が上がると、原子や分子が飛散しようとする運動のために、さらに収縮することができなくなるのですが、分子等が光を出すことでエネルギーを減らしながら、さほど温度が上がらず、さらに収縮することが可能となります。

このようにして、数密度の大きな原子や分子の塊ができます。温度も収縮するにつれて、高くなっていきます。縮んでいる原子や分子の全質量が重いと、中心が高温、高密度になります。そうなると、ただ単に万有引

力で引っ張り合うことで温度が上がるばかりではなく、実は、核融合反応という反応を起こして、さらに大きなエネルギーを出すことが可能となります。核融合反応で大きなエネルギーを出すようになれば、このエネルギーで原子や分子はさらに高温になることができるのです。そして、万有引力で縮もうとする働きと、核融合反応で生み出されたエネルギーで高温となり飛散してしまおうとする働きが釣り合います（図2-5）。また、核融合反応で生み出されたエネルギーは、原子でできたガスの塊の表面から、光として放出されます。ガスの塊は、中心付近で核融合反応を続け、生み出したエネルギーをガスの塊の表面から光として放射しながら、ガスの塊の温度を、万有引力で縮もうとする働きを止めるほどの高温に安定に保ちます。これが、恒星というわけです。

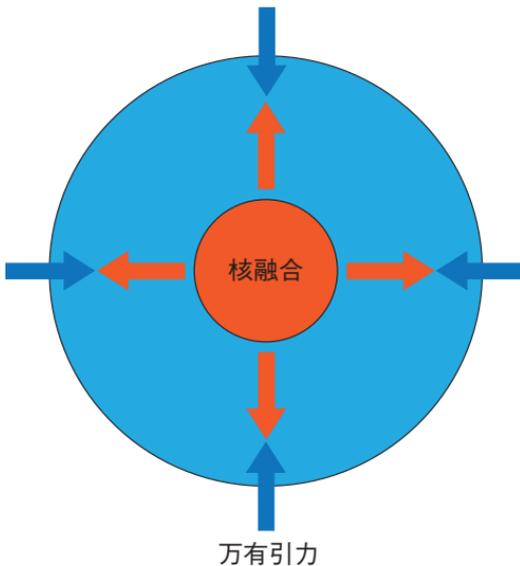


図2-5 万有引力を高温ガスが支える恒星

第3章 私たちの銀河系

Q1 星と星の間は何もないの？

太陽に最も近い恒星、ケンタウルス座のアルファ星でも、光の速さで4・3年かかるほど遠く、すなわち4・3光年離れたところにあります。天文学ではパーセク（pc）とよぶ距離の単位もあります。1 pcはおよそ3・3光年です。太陽近傍の恒星たちの間隔はおよそ1 pcよりすこし大きいくらいです。

この星と星の間を星間空間とよびますが、どんな場所なのでしょうか。宇宙ですからほぼ真空ですが、私たちの住む銀河系内の星間空間では、平均するとおよそ 1 cm^3 あたり数個の主に水素の原子や分子が存在します。もちろん、場所によってもっと数密度の高いところもあります。また、水素原子が1個ずつ（H）で存在する場合もあれば、2個の原子がくっついて分子（ H_2 ）になっている場合もあります。さらに、原子がイオンと電子に分かれて存在している場合もあります。

地球の気圧は 1 cm^3 あたり何個の分子があるか知っていますか。 1 cm^3 あたりおよそ3兆の1万倍個です。実験室で真空にする装置（真空ポンプといいます）を、頑張つて使っている工夫を凝らして真空状態を実現しようと努力しても 1 cm^3 あたり数百個（千兆分の1気圧のさらに百分の1）ぐらいが今の限界なようです。これも極高真空とよびます。この値に比べても、星間空間は、本当に物がない状態に近いことができます。

星間空間を漂う原子や分子の数密度は、平均すれば 1 cm^3 あたりおよそ数個でした。これらの原子や分子の温度は、絶対温度で数万度のところもあれば、数十度のところもあります。また、温度が低いところは数密度が

高くなっています。大雑把に 1cm^3 あたり1個で温度が 10000 度と仮定して、分子の持つ運動エネルギーを計算すると、 1cm^3 あたりおよそ 2J の千兆分の1のさらに10万分の1です。それ以外の星からの光や宇宙ができた頃から存在する光（宇宙マイクロ波背景放射）も漂っています。宇宙ができた頃から存在する光のエネルギー密度は、漂う原子や分子と同程度です。そればかりか、どこで作られたか未だ謎である、宇宙線とよばれる高エネルギー（高速で飛んでいる）の粒子も存在し、 1cm^3 あたりの平均エネルギーにすると、漂う原子や分子の運動エネルギーを超えるほどになります。また、磁場も存在し、そのエネルギー密度もおおよそ宇宙線と同程度です。エネルギーで比べると、漂う原子や分子がもつエネルギーより、光のエネルギーや高速で走り回る宇宙線、さらに宇宙に存在する磁場の方が大きいのです（図3-1）。

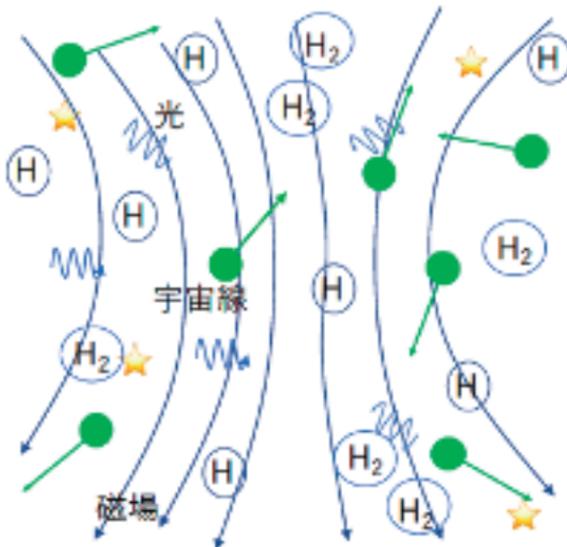


図3-1 星間空間のガス、光、宇宙線と磁場

Q2 星と星の間はどんなガスがあるの？

星間空間を漂うガスを構成する原子や分子の粒子数は、平均すれば 1 cm^3 あたりおよそ数個でしたが、もちろん濃いところもあります。分子雲とよばれるところは、漢字の通り水素の分子が主な構成物で、密度が比較的に濃いところでは、 1 cm^3 あたり何万、何十万個もある場合もあります。水素分子 (H_2) ばかりではなく、一酸化炭素 (CO) や一酸化窒素 (CN) などにも観測されています。さらに、複雑な分子も発見されています。

分子雲の絶対温度はおよそ10度程度です。密度が高いところでは、万有引力のためにさらに粒子が集まり、分子雲コアとよばれる特に濃いところができます。分子雲コアにさらに粒子が集まってくると星の素である原始星ができます。粒子が集まる時は、集まる粒子以外に放出する粒子も伴います。原始星の周りでは、分子の外向きの流れ（双極分子流）があったり、原始星からの光により原子が電離されたりします。原始星からの光や近傍のガスの吹き出しによって原子や分子のガスの温度も上がり、密度も下がって、水素の電離ガスによる領域（H II 領域）ができます。この H II 領域では、水素の出す特徴的な光で観測すると輝いて見えます。

やがて原始星は進化して中心で核融合反応が起こりはじめ、恒星が誕生します。1つの分子雲の中で、同じところに多くの恒星が生まれることがあります。この星たちの周りにはふくざつな構造が観測されます。生まれた恒星のまわりにある、水素の特徴的な光で輝く電離した水素の領域（H II 領域）やその周りのまだ恒星の影響を受けていない原子や分子の密度が大きい領域が、生まれた星の光を散乱や反射して光って見える雲（反射

星雲)、また、粒子の数密度の大きい領域が反射星雲やH II領域の手前に存在して影として見える領域(暗黒星雲)などが混在します。図3-2は、誕生したばかりの星々のまわりに、反射星雲やH II領域、暗黒星雲がよく見える三裂星雲(M20)とよばれる領域です。

星間空間には、もっと高温で粒子の数密度が低いところがあります。かつて超新星が爆発して、大量の光などととも周りにエネルギーの高い粒子を放出した残骸です。超新星残骸とよびます。そこにあるガスの温度は数百万度から数千万度、粒子の数密度は 1cm^3 あたり数個から数百個です。私たちの銀河系の中にはあちこちに超新星残骸が点在します。



図3-2 三裂星雲 (M20)

提供：国立天文台

「宇宙で1番速いものは？」正解は光です。特殊相対論により通常の物体は光の速さを超えることができません。実は光よりも速い粒子タキオンが提案されたことがあるのですが、いままで全く見つかっていません。

「宇宙で1番熱いものは？」現在の宇宙に限ってみると、中性子星連星の合体は非常に高温の現象で約1兆度を超えるかもしれないといわれています。また、宇宙誕生直後にはさらに高温・高密度の状態が実現していたと考えられています。

「宇宙で1番冷たいものは？」宇宙は絶対温度2・725 Kの宇宙マイクロ波背景放射で満たされていますが、これより温度を下げることも可能です。しかし、温度には絶対的な最低温度（絶対零度）があります。摂氏マイナス273・15度です。これより低い温度は存在しません。



索引

【あ】

アインシュタイン, アルバート 182
 アインシュタイン方程式 84
 青い空 10
 朝焼け 10
 アリスタルコス 42
 アルマ電波望遠鏡 67
 暗黒星雲 93
 暗黒物質 104, 120, 127, 130, 136, 170
 アンテナ銀河 122
 イトカワ 38
 一般相対性理論 84, 86, 172, 182
 イベントホライズン望遠鏡 80
 隕石 38
 インフレーション理論 140
 ウィーラー, ジョン 86
 渦巻銀河 116
 宇宙項 171
 宇宙の泡構造 130
 宇宙の地平線 138, 140, 166
 宇宙飛行士 154
 宇宙膨張 132, 134
 宇宙マイクロ波背景放射 134
 カイパーベルト, エッジワース 30
 エディントン, アーサー 84
 エラトステネス 40
 遠心力 18
 円盤銀河 116
 小田稔 86
 オッペンハイマー, ロバート 86
 オリンボス山 32

オールト, ヤン 106
 オールトの雲 30
 オーロラ 24
 温暖化 150

【か】

ガイア衛星 53, 111
 カー解 82
 角運動量 159
 核分裂反応 56
 核融合反応 26, 55, 56
 カシオペア座 A 98
 火星 32, 152
 火星衛星探査機 MMX 15, 153
 加速膨張 140
 活動銀河核 125
 褐色矮星 68
 かに星雲 99
 カミオカンデ 100
 かみのけ座銀河団 126
 干潮 8
 ガンマ線バースト 186, 188
 季節 6
 球状星団 65
 局所 (あるいは局部) 銀河群 128
 局所 (あるいは局部) 超銀河団 129
 極超新星 (ハイパーノバ) 101, 186, 189
 巨星 66
 巨大衝突説 14
 銀緯 110
 銀河 51
 銀河間ガス 126

- 銀河群 126
- 銀河系 50
- 銀河座標 110
- 銀河団 118, 126
- 銀河団ガス 126
- 銀経 110
- 金星 32
- 空間曲率 166
- キューサー 124
- クレーター 12
- 系外惑星 145, 146, 148, 150
- ゲズ、アンドレア 105
- ケプラー、ヨハネス 98
- ケプラー宇宙望遠鏡 144, 149
- ケプラーの第3法則 16
- ケレス 36
- 元素 56, 178
- ケンタウルス座アルファ星 50
- ゲンツェル、ラインハルト 105
- 光学航法カメラ ONC 160
- 光条 12
- 恒星 46
- 構造形成 137
- 光速一定の原理 176
- 光年 50
- 黒点 20
- 国立極地研究所 南極・北極科学館
24
- 小柴昌俊 100
- 【さ】**
- 三角測量 52
- 散開星団 64
- 酸素濃度 150
- 潮の満ち引き 8
- 時間の遅れ 184
- 時空特異点 78, 168
- 事象の地平面 76, 78
- 重力 172
- 重力波 174
- 重力波観測装置 175
- 縮退 94
- 縮退圧 72, 74
- 主系列星 66
- シュヴァルツシルト解 82
- 準惑星 28, 36
- 小惑星 36
- 小惑星帯 36
- ショートガンマ線バースト 187
- 磁力 4
- 人工衛星 159
- 彗星 38
- すばる 64
- スピカ 70
- スローンデジタルスカイサーベイ
(SDSS) 130
- 星界の報告 102
- 星間空間 90
- セイファート、カール 124
- セイファート銀河 124
- セイファートの6つ子銀河 122
- 赤緯 108
- 赤経 109
- 赤色巨星 27, 94
- 赤色超巨星 96
- 赤道座標 108
- 赤方偏移 134
- 絶対等級 58
- 絶対零度 191
- セファイド型変光星 114
- ゼーマン効果 20
- シュヴァルツシルト、カール 84
- 双極分子流 92
- ソフトガンマ線リピーター 186

【た】

ダイナモ理論 5
 タイムマシン 184
 ダイモス 15
 太陽 10
 太陽観測衛星「ひので」 22
 太陽系外惑星 29
 橢円銀河 116, 118
 タキオン 191
 ダークエネルギー 170
 タランチュラ星雲 68
 地殻 5
 地球 2, 4, 6, 150, 158
 地動説 43
 チャドウィック、ジェームズ 85
 チャンドラセカール、スプラマニア
 ン 72, 84
 チャンドラセカール限界 84
 中性子星 74, 85, 86
 潮汐力 78
 超新星 98
 超新星残骸 93
 超新星爆発 96, 179
 超新星1987A 100
 月 12, 152, 156, 159
 月旅行 152
 電磁波 176
 天動説 43
 特殊相対性理論 183
 土星 34
 土星探査機「カッシーニ」 35
 ドップラー効果 138
 ドップラー法 148
 トポロジー 166
 トラピスト1 144
 トランジット法 148
 トルマン・オープンハイマー・ヴォ
 ルコフ限界 86

【な】

ニホニウム 56
 ニュートリノ 96
 【は】
 バウリの排他律 97
 爆縮 96
 白色矮星 27, 72, 84, 95
 はくちょう座 X-1 86
 パーセク 58, 90
 ハッブル、エドウィン 114
 ハッブル-ルメートルの法則 138
 ハビタブルゾーン 144
 パラドックス 185
 パルサー 75
 バルジ 107
 ハロー 107
 はやぶさ 37, 38
 はやぶさ2 13, 37, 39, 160
 反射星雲 93
 万有引力 172
 ビッグバン 130, 132
 ビッグバン元素合成 178
 ビッグバン特異点 168
 ビッグリップ特異点 169
 ヒューイッシュ、アントニー 86
 フォボス 15
 不規則銀河 117
 藤原定家 98
 負のエネルギー密度 181
 ブラーエ、ティコ 98
 プラズマ 22, 24
 ブラックホール 76, 80, 86, 97
 フレア 23
 プロキシマケンタウリ 144
 プロキシマ星 66
 分子雲 92
 分子雲コア 92

ベガサス座51番星 146
 ヘル、ジョージ 20
 偏光 21
 ベンローズ, ロジャー 76
 ボイジャー1号 31
 ヴォイド 127, 130
 棒渦巻銀河 116
 捕獲説 14
 ホーグの天体 124
 北極星 50
 ティティウス・ボーデの法則 36

【ま】

マクスウェル山 32
 マントル 5
 満潮 8
 冥王星 28
 明月記 98
 メシエカタログ 114

【や】

夕焼け 10
 揺らぎ 136
 ヨーロッパ南天天文台 (ESO) 71

【5】

リュウグウ 13, 37, 39, 160
 りゅうこつ座イータ星 68, 71
 流星 38
 量子力学 84, 86
 レーダー 16
 連星系 64
 連星パルサー 175
 ロングガンマ線バースト 186
 ローレンツ変換 176

【わ】

矮小銀河 118

矮小楕円銀河 118
 矮小不規則銀河 118
 惑星状星雲 95
 ワームホール 180
 ワープ 180

【英数字】

BeppoSAX 189
 G1.9+03 98
 HII 領域 92
 KAGRA 175
 LIGO 80
 M1 99
 M57 95
 R136a1 68, 71
 SN1006 99
 X 線観測衛星「ウフル」 86
 2重星 60
 3C58 99

【著者紹介】

北本 俊二（きたもと しゅんじ）

立教大学 理学部 教授

理学博士

専門分野：高エネルギー天文学

原田 知広（はらだ ともひろ）

立教大学 理学部 教授

博士（理学）

専門分野：一般相対性理論・宇宙物理学・宇宙論

亀田 真吾（かめだ しんご）

立教大学 理学部 教授

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所特任教授

博士（理学）

専門分野：惑星科学

宇宙まるごとQ&A ーはやぶさ2からブラックホールまでー

2021年2月11日 初版第1刷発行



著者 北本 俊二
原田 知広
亀田 真吾
発行者 柴山 斐呂子

発行所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町27-2
電話 03 (3230) 0221 (代表)
FAX 03 (3262) 8247
振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikhothouse.co.jp>

© 北本 俊二 2020 Printed in Japan

ISBN978-4-8446-0904-9

印刷・製本 丸井工文社

*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員





9784844609049



1923044015009

ISBN978-4-8446-0904-9

C3044 ¥1500E

定価（本体 1500 円＋税）

自然科学

一般 / 宇宙 Q & A

