

平成 28 年度 西宮市生涯学習大学ラジオ講座 宇宙はここまで理解できた—宇宙物理学入門— 質問・感想集

1. 湯川博士の業績と日本の宇宙物理学（質問）

物理学の分野で私の今に最大の関心事は、大統一理論が私の生きている間（現在 59 才）に完成するかということです。初回の講座からこの話が出てきたのが楽しみです。また私は神戸市在住ですが、職場が西宮にあり、大学も西宮です。私にとって西宮は、第 2 の故郷のような場所です。湯川博士が中間子の構想を得たのが西宮在住の時であったことに感慨深いものがあります。

———講師より———

4つの力すべてを統一する大統一理論がいつ完成するかはわかりません。ひょっとしたら理論のブレークスルーがすぐに起きて解決するかもしれませんが、100年後かもしれません。

湯川博士は、宇宙の起源について、どのように考えていたのでしょうか。ビッグバン宇宙論を支持していたのでしょうか。

———講師より———

ビッグバン宇宙論が登場した直後にどう思われていたのかは定かではありませんが、林忠四郎に宇宙物理学に関わることを勧めたわけですから、宇宙における高エネルギー状態についての予見は十分に持っておられたと考えられます。ビッグバン宇宙モデルも支持されていたのではないのでしょうか。

原子に関する質問です（テキスト 12 ページ）。

- ①原子核と電子からなる構造はどのような方法で実証出来ますか。
- ②電子を動かす電磁気力はどこから供給されるのですか、電子は永久運動ですか。
- ③電子が運動する目的は—静止してはダメですか。
- ④原子核の直径や軌道の直径（？）はどのようにして測定するのですか。
- ⑤原子は自然消滅したり誕生することはありますか。
- ⑥理論上原子を人工的に改造することは可能ですか。

———講師より———

- ①ラザフォードによる実験で確認されました。薄い金箔に粒子を照射すると、時折大きな散乱角になることから、原子核の存在が考えられました。
- ②永久運動です。月が地球を回り続けるように力が作用していれば運動が続きます。
- ③上記と同様に、電気的な力がはたらくので運動を続けます。力のバランスが保たれれば静止することができますが、そのような状態は自然界にはほとんど発生しません。
- ④ラザフォードによる実験のように、粒子（電子）を原子核で散乱させることにより、原子核や原子の直径を測定することができます。
- ⑤原子核を構成する核子（陽子・中性子）と電子は基本的にはなりません。組み替えで原子核の構造を変える反応（核融合反応、核分裂反応）は存在します。陽子の数によって、原子の区別がされるので、その意味では原子は生成・消滅します。
- ⑥核融合反応、核分裂反応が相当します。

大雑把に話が進むので良く理解できない。力が粒子の交換により働いていると言った概念が突然出て来て面喰ってしまう。強い力、弱い力、重力 e t c、どのような力（引力も斥力も）でも粒子の交換で説明できるのか、質量のある粒子の交換で力が働いているのなら、どの程度の頻度で交換が起こっているのか等々多くの疑問が湧くが、この辺りの基礎を解説した書籍等あれば紹介してほしいし、テキストにも、初・中・上級と知識レベルに応じた参考書（s i t eでも良い）を記載してほしい。

——— 講師より ———

力の正体は粒子の交換である、という考えは素粒子物理学の基本です。実際に粒子が交換しているところが見えているわけではありませんので、仮説と思っていただいても結構です。電磁気力は光子、強い力はグルーオン、弱い力は W ボゾンと Z ボゾン、重力はグラビトンという粒子が媒介するとして名前がつけられています。

参考書案内はウェブによるサポートページで紹介しています。ご利用ください。

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/nishinomiya/radio.html>

〔事務局より〕

上記サポートページは、インターネットの受講者専用ページからご覧いただけます。詳しくはテキスト 7 ページをご覧ください。

今回は湯川博士の伝統的な話と中間子論の概説で、表面的には難解な部分は、なかったのですが、原子核と電子の間隙間は、真空でないとの指摘で、原子、元素、分子、単原子分子、多原子分子と区別があることを再認識しました。電子の軌道と原子核の間は何かで埋まっているのでしょうか？ N₂ や O₂ は入り込めないほど小さいのは分かりますが、隙間があると言われると、真空ではと思ってしまいます。「真空とは何か」という問も難しいと思います。機会があれば解説をお願いします。

——— 講師より ———

ここで使った真空という言葉は、空気を薄くしていった状態の意味で使いました。空気分子（窒素分子や酸素分子）の密度が小さくなり、まばらになった状態を真空といいますが、分子あるいは分子を構成する原子はそのままの状態です。電氣的な力がはたらく空間が原子核と電子の間にあるのです。

テキスト 1 3 ページの周期表で枠（升目）外上部、側部に記されている A, B s d , f , p の意味を教えてくださいませんか。

——— 講師より ———

上に記載された, I, II, III, …は縦に並んだものを I 族, II 族, …と呼ぶことを示しています。A, B はこれらを 2 つに分類するときの記号です。中央部は 4 段目から登場しますので B と名付けます。左に記載した 1, 2, 3, は原子核から外側に向かって順に存在する電子軌道を示します。第 1 軌道には s 軌道 1 つが存在し、電子が 2 個まで入るので 2 番目の He でいっぱいになります。第 2 軌道には s 軌道 1 つと p 軌道 3 つが存在し、電子が 8 個まで入るので、10 番目の Ne でいっぱいになります。第 3 軌道には s 軌道 1 つと p 軌道 3 つと d 軌道 5 つが存在します。Ar までと Sc から Zn がこれらの軌道に順に電子を詰め込んでいきます。

思いつきの記述であり恐縮ですが、

- ①講座開始と同時にニホニウム（Nh）が認定されるとの話題で日本中が喜びました。⇒p13 の周期表で 113 番目の原子は Uut と記述されていますが——？
- ②周期表と周期律表はおなじですか？

③陽子などの数はどのようにして計りますか？

――講師より――

①Uut は $1 \cdot 1 \cdot 3$ をそのままウンウントリウムと読んだものです。ラテン語とギリシャ語の組み合わせとして、国際純正・応用化学連合(IUPAC)が元素の系統名として未確認の元素の命名法を決めています。

②同じです。

③電気量を測定することで、陽子の数がわかります。

残念ながら、そもそもが理解できないのですが・・・核力や電磁気力を、中間子や光子のやりとりと考える、という事自体が理解できないのです。(ボールの投受自体に必要な力は、斥力になりそうに思いますし・・・) また、力に関わる中間子が単独で宇宙から飛来するというのも理解できません。(ビッグス粒子が、重力に関わる粒子と言われている事も、全く理解できないのです。これらを理解できる入門書はないでしょうか?)

――講師より――

力を粒子の交換で置き換えて理解する、という考え方は、湯川にはじまり、アメリカのファインマンらを通じて確立しました。粒子どうしが力を及ぼしあうのであれば、その媒介となる粒子を考えて説明しようというアイデアです。実際にそのような相互作用をリアルタイムで観測できたわけはありません。

宇宙から飛来する電子などの宇宙線は、地球の大気にぶつかりとミュオン中間子などに一瞬変身します。高エネルギー状態での素粒子反応では、中間子の状態を経て次の粒子になる様子が見られるのです。

湯川博士の中間子論で陽子と中性子が中間子により結びつくとありますが、陽子どうしを結びつける粒子というものはあるのでしょうか、必ず中性子を介して結びつけるのでしょうか。それとも別の説明があるのでしょうか。

――講師より――

現在の素粒子物理学では、陽子も中性子もクォークという素粒子が結合してできているものと考えられていて、これらを結びつけるものはグルーオンという力を媒介する粒子です。原子核を結びつける力もグルーオンです。

今回初めてラジオ講座を受講します。以下質問があります。

テキスト12ページ図1, 3において原子の大きさ(領域)に比べ原子核は小さく「スカスカ」ということですが、実際の固体を外部から押しても原子同士が「のめりこんで」しまわないのはなぜでしょうか？理由は以下のように考えました。「固体の場合、原子は周囲に存在する電子の電磁気力により結合し、間隔を保っている。」という理解でよろしいでしょうか？

――講師より――

そのご理解で正しいです。電気的な力によって原子どうしは反発し合っているのです。原子核は陽子(電氣的にプラス)から成り立っているため、原子核2つをくっつけることは容易ではありません。

宇宙の大きさと素粒子の小ささ、一見別分野と思えるものが結局は一体不可分というかところが不思議です。10⁻¹⁵m~10²⁶mとのスケール観の実感が湧きません。

――講師より――

素粒子以下のスケールを議論する物理学がないので、宇宙の始まりも本当の意味では不明です。

宇宙ビッグバンで「H」と「He」が合成、次々と核融合により元素（Feまで）が合成されていた。周期表で「U」迄は天然品と聴きましたが「U」も最終的に「F e」になるとの理解でよろしいのでしょうか？ or [P b]？

——— 講師より ———

ウランの原子核は核分裂によって分裂します。核分裂の系列も最終的には鉄 Fe になって終了します。

物理学における基本的な力（相互作用）は学生の頃からの難題で、概念的な理解が今でもできていません。例のキャッチボールの例えもなる程とは思いますが、光子とかグルーオンがどのように作用しているのかわかりにくいです。

今回の話で、結局湯川先生の提唱したパイ中間子は「強い力」の作用に係るグルーオンとは別の粒子で力の作用には関係ないものであるということだったんですね。

——— 講師より ———

光子やグルーオンそのものの運動を実験で見ることはできませんので、物理学者の説明も「例え話」になってしまいます。湯川の提唱したパイ中間子は、その後の物理学の進展で、クォークと反クォークという素粒子からできていることがわかり、2つのクォークはグルーオンで結びついています。現在の素粒子物理学の理解では、強い力を媒介するのはグルーオンになります。したがってパイ中間子もグルーオンも同じ現象を説明する2つの言葉です。

テキスト14ページ、「ベータ崩壊でエネルギーを持ち出ししているのではないか」というパウリの考えがどのようにエネルギー保存則と結びつき、そのことが如何に「核力に応用することをおもいついた」のかという箇所の結びきかたがわかりません。単純に“未知の粒子”という考えを取り入れたという理解でよろしいでしょうか。

——— 講師より ———

パウリはニュートリノという未知の粒子を仮定してベータ崩壊現象を説明しました。エネルギーが保存するためには、未知の粒子がエネルギーを持ち去っている、というアイデアからです。湯川はパウリのように「未知の粒子」を仮定すれば核力の謎を説明できると思いついたのです。

1. 湯川博士の業績と日本の宇宙物理学（感想）

少し内容がむつかしかったです。西宮市と湯川氏の関わりが分かりよかったです。

湯川先生はすごい人なのか変人なのかが分からないぐらい難しいことを理論付けた人と思った。

昨年、真貝先生の日常の物理学の講座に参加し、楽しくも夢のある話に引き込まれました。今回は私にとっては大変難しく理解出来ない部分がほとんどかもしれませんが私達を引き込む先生の話し方に引っ張られて最後まで受講したいと思います。また私はNHKのサイエンスを見るのが楽しみで私にとっては夢のような話ですが現実なのですね。30分が短いです。

天文学と「宇宙物理学」の違いに始まって非常に明快なご講義であったと思う、私は湯川秀樹、朝永振一郎、坂田昌一の博士はよく存じていたし、「旅人」など著書も多く読んでいたが林忠四郎博士の流れは初めて知りました、今後は楽しみです。

2. 宇宙の大規模構造（質問）

宇宙の拡がりの大きさ、含まれる銀河の個数の多さに圧倒される思い。今まで宇宙については考えた事がなかったので講義内容すべてが新鮮です。宇宙スケールを計ろうとする場合 AU と LY は定義なので、実際は年周視差が計測できる数値だと思うのですが Mpc まで判るくらい角度は精密に測定できるのでしょうか。

——— 講師より ———

年周視差が測れるのは非常に近い所までで、現在の記録は、ヒッパルコス衛星による 150pc までです (1/1000 秒角までです)。Mpc には遠く及びません。

今日の講義で太陽系の月、太陽、惑星さらに銀河系までの概略が分かりました。ところで 7/7 は国際宇宙ステーションに長期滞在する日本人宇宙飛行士の大西卓哉さんら 3 人を乗せたロシアのソユーズ宇宙船が 7 日午前打ち上げに成功しました、5/3 1 には火星が地球に最も接近したり、だれしもが宇宙に関心が高まる時にこの講座が開催されたことはより理解しやすくなります。大西さんが滞在する国際宇宙ステーションは地球から高度 400 キロといわれますがなぜこの位置が最適な高度といえるのでしょうか。

——— 講師より ———

地球から離れると、宇宙から到来する紫外線や宇宙線によって乗務員が被曝します。また、高度 300 キロですと、これまでに打ち上げられた人工衛星の残骸（デブリ）が多数あり、航行に危険なのだそうです。

スケールの大きい話が先人達の仕事でより正しい知識となってきたことに感心します。40 億年後のアンドロメダとの合体があるとしたらお互いの中心にあるブラックホールも 1 つになるのでしょうか、すさまじい重力波が生まれたり、新たな天体ショーがあるのでしょね、でもその頃の太陽や地球はどうなっているのか、予想はできるでしょう、一番難しい予想は数 100 年後の人類ですね。

——— 講師より ———

銀河が合体して 1 つの大きな銀河になったとすると、中心のブラックホールも合体して大きく成長すると考えられます。

① 准惑星 Ceres の日本語表記として「ケレス」と「セレス」が見られます、テキストでも P2 2 に「ケレス」P2 3 の表に「セレス」とあります Ceres の正しい発音はどちらでしょうか
② パーセク (Pc) の定義は理解できましたが、単に距離の単位としての意義しかもたないのでしょうか、もしそれだけなら ly でよいのに、、、と考えるのですが、、、

——— 講師より ———

① 統一すべきでした。失礼しました。ラテン語ではケレス、英語読みではセレスでどちらも使われます。Wikipedia はケレス、国立天文台はセレスと表記しています。
② 歴史的にいろいろな単位が存在しています。

① 光の速度はどの様に測ったのですか？
 ② 星との距離光年はどのように測ったのですか？

講師より

① 拙著「ブラックホール・膨張宇宙・重力波」(光文社新書, 2015) より図を引用します。

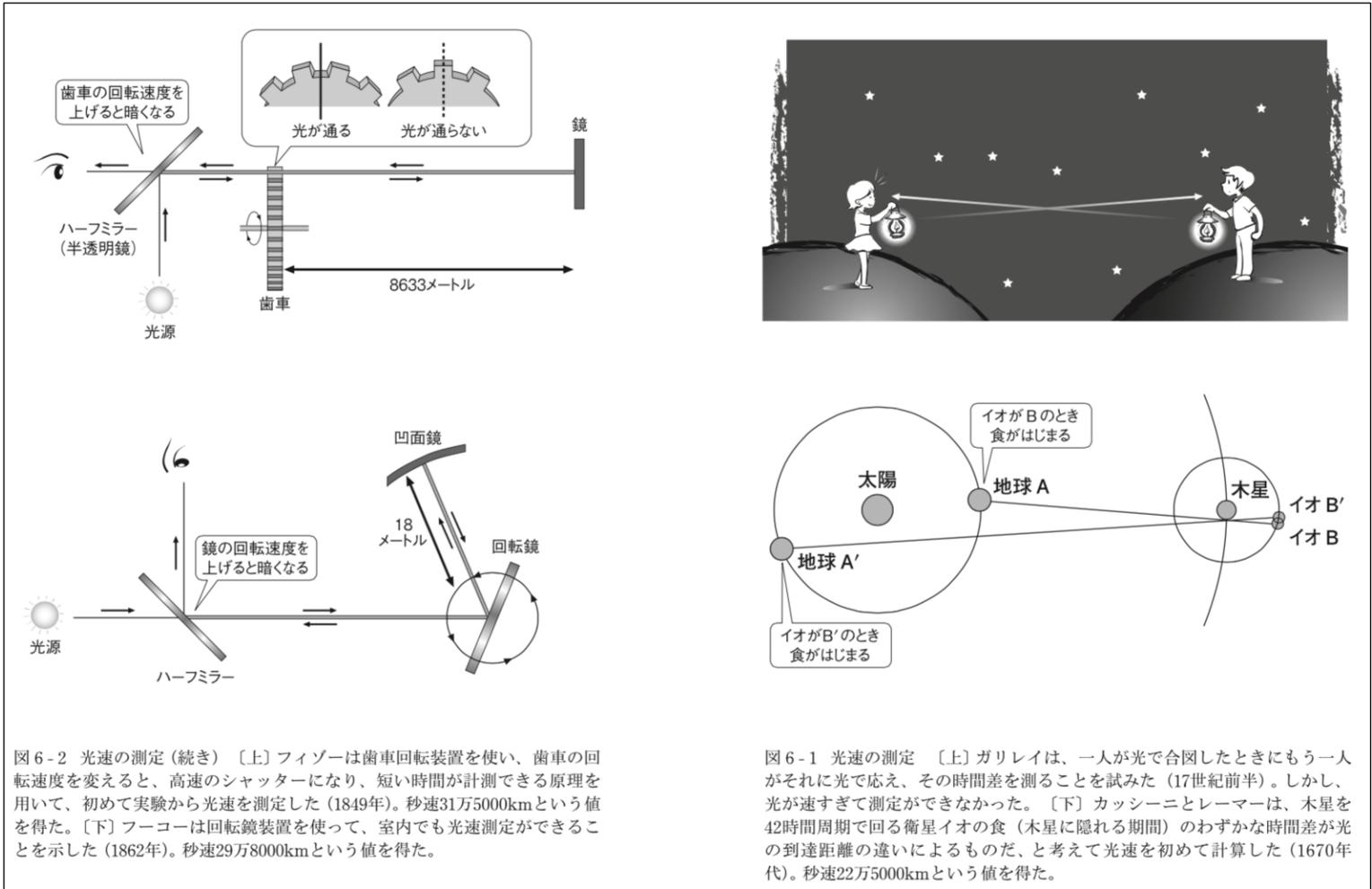


図 6-2 光速の測定(続き) [上] フィゾーは歯車回転装置を使い、歯車の回転速度を変えると、高速のシャッターになり、短い時間が計測できる原理を用いて、初めて実験から光速を測定した(1849年)。秒速31万5000kmという値を得た。[下] フーコーは回転鏡装置を使って、室内でも光速測定ができることを示した(1862年)。秒速29万8000kmという値を得た。

図 6-1 光速の測定 [上] ガリレイは、一人が光で合図したときにもう一人がそれに光で応え、その時間差を測ることを試みた(17世紀前半)。しかし、光が速すぎて測定ができなかった。[下] カッシーニとレーマーは、木星を42時間周期で回る衛星イオの食(木星に隠れる期間)のわずかな時間差が光の到達距離の違いによるものだと考えて光速を初めて計算した(1670年代)。秒速22万5000kmという値を得た。

② 近くの星(100 パーセク程度まで)は年周視差で測ることができですが、それより遠い星は、梯子のように近くの星を基準にして測っていきます。まず、近くの星を観測することにより、その星の実際の明るさが分かりますので、星の明るさと色の関係がわかります。そこで星の明るさと色を使うことによって、銀河系内のもう少し遠い星までの距離が推定できます。近くの銀河までの距離は、その銀河の中に、周期的に色を変化させる脈動変光星を探します。脈動変光星も実際の明るさが決まっていますので、観測した変光星の明るさから距離が推定できます。また、同じように超新星爆発(Ia型超新星)を使っても距離がわかります。遠くの銀河までの距離は超新星爆発の明るさから推定できるのです。超新星爆発はスタンダード・キャンドル(キャンドルはロウソクの意味)とも呼ばれます。

① 太陽を周回する地球等の惑星及び ② 銀河系の中心を周回する太陽等の恒星の公転エネルギー(運動エネルギー 2分の1 m^2)はどこから供給されている(または供給された)のでしょうか。

講師より

太陽系が誕生した時に、大きなガスや塵が収縮して、太陽や星になったと考えられます。そのときの収縮で動いたものが惑星の運動エネルギーになります。宇宙空間は真空で抵抗がありませんので、ひとたび獲得されたエネルギーは保存されます。

月は現在潮汐力固定、月の裏面には隕石がどんどん衝突とか、月の質量が増加し続けた場合どのような状況が考えられるのでしょうか。

講師より

現在は、隕石が落ちてくるといっても小さなものばかりですので、質量が増加して運動が変わるほどではありません。

1 000兆個の銀河、その各銀河に2000億から1兆個の恒星、すごい量だがこの見えている物質は全体の数パーセントにすぎないとは圧倒される。

講師より

最近の観測(2016年9月)によれば、宇宙全体の銀河の数は1桁増えて10の12乗個のようです。

テキスト27ページの3次元地図ですが、宇宙は膨張しているということですから時間とともに位置すなわち分布が変わると思うのです、ですから現在の分布と24億年前の分布が混在してよいものか疑問に思うのですが、時間を固定しなくてよいものでしょうか。

講師より

宇宙全体の銀河観測図は、あくまでも現在我々が見ることのできる銀河をプロットしたものです。ですので、遠方の銀河ほど過去の光を見ていることになります。宇宙全体は膨張しているので過去は小さな宇宙をみているはずですが、全天で見ている方向に対して深くプロットするために、このような図の表現では宇宙膨張を感じることはできません。テキストに付属した「宇宙図」の中央部の涙のしずく部分が私たちが見ることのできる宇宙になります。

① 地球の自転軸は公転面に直角になることはないのでしょうか。
② ブラックホールの質量はどのように推測されているのでしょうか。

講師より

- ① 地球の自転軸はコマのように周期1万2000年で少しずつ回転しています。そのため北極星の位置もずれます。(歳差運動といいます)。ですが、公転面に直角になることはないようです。
- ② 周囲の天体の運動から、ブラックホールの質量を計算することができます。人工衛星の運動から地球の質量がわかるのと同じ原理です。

① テキスト18ページの「月」の項で3行目の最後で「3.8m先」は10cm×30＝「3m先」と思いますが？

- ② 19ページの月の表裏写真でクレーターの面積・数に差があります。これは表裏の温度差と共に、隕石の衝突数が月の表側は地球にガードされているので数が少なかった為と思えますが、どうでしょうか？
- ③ 天の川は、夏場は白鳥座のデネブからさそり座の方へ南下しているように見えますが、天の川の中心部(バルジ? 巨大ブラックホール?)はどのあたりでしょうか？
- ④ 白鳥座やさそり座などは天の川銀河の一員でしょうか？

講師より

- ① ご指摘の通りです。3.0mに訂正します。
- ② そうです。月はいつも同じ面を地球に向けているので、遠方から地球をめがけて落下してくる隕石は月の裏側に衝突することが多いのです。
- ③ いて座とさそり座の間付近が、私たちの銀河の中心です。Sgr A* という名前と呼ばれている天体です。
- ④ 私たちから見えているすべての星は、天の川銀河の中にある(しかも近傍の)星です。

① 地球から見える星は 2000 光年という事ですがハッブル望遠鏡は宇宙のどのあたりにありこの望遠鏡で見る事の出来る範囲はどのあたりまででしょうか？

② 宇宙の膨張速度と光の速さはどちらかがどれだけ違うのでしょうか

講師より

① ハッブル望遠鏡は地球上空 560km を周回しています。134 億年前の銀河を発見した報告があります。

② 宇宙膨張は遠方ほどはやく遠ざかりますので、私たちから見える宇宙の最遠方は原理的には、光速で膨張している限界になります。実際には遠方を見ることは過去の宇宙をみることになり、そこまでの限界には達しません。

天の川銀河とアンドロメダ銀河が約 40 億年後に合体すると地球はどうなるのでしょうか、もっとも人類はとうの昔に滅亡しているのでしょうか。

講師より

銀河系が合体しても星同士はほとんど合体しません。星と星の距離はそれぞれかなり離れているので合体する確率はゼロに近くなります。

人類が月において 40 年その時私は月に宇宙ステーションができ人がたえず住むことを予想しました。

① 月に宇宙ステーションが難しい理由を聞きたいです。

② 真貝先生が活着ている間に月に行き「月で飲む西宮の酒は最高だ」??? 可能性はありますか？よろしく

講師より

① 空気や水がないこと、建設資材の運搬や人の往復を含めて多額の費用がかかることです。火星への移住計画が先行しているのは、火星に大気と水があるからです。

② いけたら行きたいですね。月に行かなくても山田錦をはじめとする西宮の酒は最高です。私は、毎年誕生日の前後 6 ヶ月はプレゼントを受け付けております。

2. 宇宙の大規模構造（感想）

宇宙のことを考えると気の遠くなるような大きさに愕然とします、まだまだ未知の世界が広がっていることは大いに私たちを魅了します、と同時に何の偶然か、神の業か人類を始め生物が存在することができる地球、本当に大切にしなければとつくづく思います

月がいつも同じ面を地球に向けている理由について、潮汐力固定の説明を聞き、初めて納得しました。天文書では自転周期と公転周期が同じ、との説明だけだったので、それがなぜかが以前から知りたかった。

ブラックホールの重力で銀河ができているのは不思議に思います。

とほうもない宇宙の大きさ実感できないまでも想像するだけで心の宇宙が広がった。

3. 宇宙の理解(1)ケプラーからニュートンへ（質問）

今 ある理論があやしいと思う人が出現した時に、超新星が現れるとは何やら不思議な気もします。物理は確かに数式のオンパレードでそのせいで高校時代、興味はあるのに断念しました。年を経てなんとかもう一度やり直そうと思っていますが、やはりネックとなっています。「そう言うものだ」とあれこれ考えずとにかく覚えて使おうとしますが、なかなかこれが、、、うまく覚えるコツはありますか？

—————講師より—————

数式は覚えて使うものではありません。必要になったら調べればよいのです。入試ではありませんから。

太 陽系の惑星はすべて同一平面で公転していると聞いていましたが先生の土星火星の縦並びがあるのは同一平面では説明出来ません、調べてみると僅かながら平面にずれがあるようです、このような公転平面の惑星間のずれはどのような天体の影響に由来するものなのでしょうか、疑問です

—————講師より—————

太陽系の惑星は、「ほぼ」同一平面にあります。銀河系の星も「ほぼ」同一平面に分布しています。これらは、もともと球状に分布していたガスや塵（ちり）が重力によって収縮する際に、3次元分布から2次元分布（平面）になるような収縮が先に生じることに由来します。ひとたび平面状に物質があつまると星を形成し、星がまわりのガスや塵を掃除機のように吸い込んで成長します。現在の太陽系惑星はほぼ平面上にあり、公転していますが、長い年月が経てば、より平面内に収まるものと考えられます。

天 の川銀河における太陽及びその他の恒星の公転軌道は、円、楕円又はその他の形状でしょうか。

—————講師より—————

楕円運動です。楕円軌道・放物線軌道・双曲線軌道のどれになるのかは、初期の速度がどれだけあるのかで決まります。中心の大きな重力源から逃れられない状態が楕円軌道（その特別な場合が円軌道）に相当します。銀河系を回転しているということは、楕円軌道している、と言えます。

楕 円軌道は太陽系惑星の位置関係で太陽が250万km移動するのは惑星との万有引力の法則に従っているとの理解でよろしいでしょうか。

—————講師より—————

太陽系の中心は太陽の中にありますが、太陽自身も重心を中心として動きます。これは惑星の公転運動によるものですから、万有引力の結果といえるでしょう。

天 動説の場面ではよく「完全な円」という表現を聞きますが、それほど完璧な真円を意味していたのでしょうか。日常生活の場面では、「真円」と「楕円」を厳密に使い分けていないと思うのですが。

—————講師より—————

宗教的な意味合いもあって、「完全な円」という言葉が登場します。実際の惑星の軌道は、もっとも離心率の大きい火星の軌道でも見た目では円と変わらないほどです。

かに星雲のもととなった超新星爆発の記述がヨーロッパにないのは戦争とペストの流行との話があったと思うのですが。

講師より

かに星雲のよとの超新星爆発は 1054 年です。ヨーロッパのペストの流行は 14 世紀からでは？

- ① 「地球は球体である」との認識は、何時の時代からあったと考えられているのでしょうか？
同様に月についてはどうでしょうか？
- ② この認識があれば万有引力の法則はもっと早く発見されていてもおかしくないように思うのですがそれも当時の宗教的世界観が邪魔をしたと考えられますか？
- ③ 「修正天動説」でも地球は固定ではなく円軌道を描いているとの考えも入れるようになったとありますが、結局ガリレイ裁判は当時のローマ教皇庁のご都合主義の表れと考えられますか？

講師より

- ① 月や太陽が丸いことから、地球が球であるという認識は比較的古い頃からあった、といわれています。
- ② 万有引力の法則は、2 つの天体が互いにどちらも引力を及ぼしあう、というアイデアです。しかも、その大きさが質量の積に比例し、距離の 2 乗に反比例することを含めての法則です。ニュートン以前ではこのような発想は無理だったと思います。
- ③ 私は歴史家ではないので真相はわかりませんが、ガリレイ裁判があっても、科学者は素直に地動説を受け入れ、人々にも広がっていったことは、実証された真実を認める社会が成熟していたことの表れかだと思います。

コペルニクスやガリレオ、ニュートンなどよく聞く名前の偉人達の業績を改めて聞くにつけ科学の進歩は人々のものの考え方にも大きな影響を及ぼしてきたとの思いを新たにしました。惜しむらくは精密で膨大な観測データを残したティコ・ブラーエが年周視差を観測できなかつたゆえに地動説を支持できなかったこと。当時の観測技術では難しかったのでしょうか？機会があれば御解説いただければ幸いです。

講師より

もっとも近い星（ケンタウルス座α星、4.37 光年）でも、年周視差は 742 ミリ秒角（0.2 度=1.2 分角）ですので、そのような星を宇宙から 1 つ探し出すことは肉眼で観測するのは無理だったと思います。（天体望遠鏡が発明される以前のティコの観測の分解能は 2-3 分角でした）。

3. 宇宙の理解(1)ケプラーからニュートンへ（感想）

今回はコペルニクスからガリレオ、ニュートンまでの歴史を講義頂き、「プラトンの立体」といった知らないトピックスが満載で興味深かつた。量子論、相対論登場以前の時代のなんというか嵐の前の静けさのような安心感が伝わってきました。次回は嵐に遭遇するようすが理解に努めますのでよろしくお願ひします。

宗教的な世界観に支配されていた事で「超新星」の観測データも残せなかつた！天文学者達が、うつ病を発症しなかつた事を祈ります。

真貝先生の丁寧な講義に著作と同じく魅力があります。物理学とは「自然現象を数字を用いて表す」学問であるという適格な説明ですが 16~17 世紀に先人たちが数式で表したことはすごいことだと思ひます。数式を理解するだけでも大変です。1572 年のティコの新星の発見も

学問の発見は重要な出来事でした。天体の観測で数式化するのは大変な偉業です。これからも楽しみにしています。8/11のコズミック Fr でケプラーがティコを毒殺とありましたが、最後に否定されてほっとしました。

私は10年程前に「宇宙創成」(サイモン・シン)を読んで触発させられました。これまでに多くの人が宇宙の謎の解明に挑んで来られたこと、そのために「神」の領域にせまるようなことまで一般の人でも分かるようになってきたことに感銘し続けています、60歳過ぎてあと何年生きるかわかりませんが、自分がどこから来てどこへ行くのかそれを知ることが生きる一つの望みです。だからこうした研究が国民にどう寄与するのかわからないこと言わずにもっと私の税金を投入してもらいたいです。今、私が見る夜空には星が少ししかありません。今回の登場人物もこんな夜空だったら、多分業績残せなかったでしょうね。

今回の講座は、宇宙に関する科学史でしたが、〇〇年に誰々が何かを発見したというだけでなく、宗教などの文化的、社会的背景が関係していることがわかりました。

ティコとケプラーの関係なども、興味深く聞かせていただきました。

正確な観測による事実を、数学を使ったモデルで説明することで天文「物理」学が進展していったと理解しました。

慣性の法則の説明に納得出来ました。

コペルニクス・ガリレオ・ニュートンの時代のお話しは、書籍や講演などでよく見聞きいたしますが、何度聞いてもわくわくする時代です。とても面白く拝聴いたしました。

キリスト教世界観に支配されている世界から独立していく困難さを思う。データを信じる科学者が進歩を支えてきたことがすばらしい。

4. 宇宙の理解(1)アインシュタイン (質問)

① 海王星の発見でルヴェリエとアダムスがニュートン力学で計算したというのはどのような内容だったのでしょか？

② 相対性理論と量子力学の糸口を作ったアインシュタインはすばらしい。どうしてこんな説明が出来たのでしょうか。コラム7の量子論の図解は大変分かり易くていい説明です。付録A・Bは自己学習いたします。

————— 講師より —————

① 天王星の動きを観測していると、ニュートン力学で予想された位置からわずかにずれることが判明していたために、その外側にもう一つ惑星があるのではないかと考えて、その惑星の位置と質量を計算したのです。

② アインシュタインは、目の前にある実験事実をもっともシンプルに説明する原理をいつも追い求めていました。柔軟な発想とともに、自然界の「美しさ」も信じていたように感じます。(しかし、膨張宇宙や量子論に反対するなど、自分に自信がありすぎて招いた失敗も多々あるところが、人間味を感じさせます)。

星子論について容易に理解できない世界だということはわかります、あれこれ考えるよりとにかく現象をそのまま受け入れましょうというのわかります。でもやはり「わからない世界」

です。マクロの世界にいるからミクロの世界がわからないのであれば、逆にミクロの世界からマクロの世界を見るときっと常識はずれなことでしょう、だとすればこの2つの世界の境目はどこでしょうか？そこはどのような世界なのでしょう？そもそもそういう「区切りのつく場所」は存在するのでしょうか？しよせんこの世はすべて確率で成り立っているのでしょうか？

――講師より――

明確に区切りとなる長さやエネルギースケールはありませんが、特徴的なふるまいが見られるのは原子・電子のスケールです（プランク定数のスケールです）。しかし、小さなものだけに見られるというものではありません。例えば遠くの星が私たちに見えるのは、光が目の網膜の視細胞を刺激するからですが、これは光が波ではなく粒子であることの表れです。波として考えると天文学的な距離でエネルギーはすぐに減衰してしまい、細胞を刺激するほどの大きさになりませんが、光子として届けば一つの粒子のもつエネルギーが細胞を刺激して「光が届いた」情報を伝えることができるのです。

ニュートン力学で表された運動を光速近くにすると特殊相対性理論になりますが、徐々に以降するのと同じです。我々の日常生活では、ニュートン力学が成り立ちますので、すべての物理現象が確率的に表されているわけではありません。

- ① 永久磁石で発電するとき磁石の磁力は消耗しますか、
- ② 自然界に存在する永久磁石はどうして誕生したのですか。
- ③ 電磁波を伝える電波の媒体は存在するのですか。
- ④ 光の強弱で発光色の種類は光子の量や種類或いは波形により決定するのですか。
- ⑤ 宇宙空間を通過する光は強大な重力の引力により屈折することですが、引力が作用する質量を光子がもっているのですか。
- ⑥ 宇宙空間では地球上と同様に光は消滅しますか。
- ⑦ ブラウン運動は永久運動ですか、運動に必要なエネルギーはどのように供給されるのですか。

――講師より――

- ① 永久磁石であれば、磁力は保たれます。発電のエネルギーは磁石を回転させるエネルギーから供給されます。
- ② 磁力の源は、電子の回転運動です。多数の電子が揃って回転すると、磁場が揃って磁力を生み出します。そのような性質をもつ物質を磁性体といいます。地磁気が存在や、強力な磁場をもつ物体が近くにあれば、徐々に多数の電子の回転運動が揃います。
- ③ 光は電磁波の一種です。光が真空中で伝わるように、電磁波も真空中で伝わります。質量がゼロのエネルギー伝播だからです。
- ④ 色は光の波長で決まります。可視光では、波長が長いと赤へ、短いと青くなります。光の強弱は波の振幅で決まります。光（電磁波）は振動として伝わりますが、波形は単純な正弦波（サインカーブ）です。
- ⑤ 一般相対性理論では、重力の正体が空間の曲がりであることが示されます。質量ゼロの光が重力で屈折するのは、空間が曲がり直線の定義が変わることが原因です。
- ⑥ 光は原子にエネルギーを吸収されると消滅します。逆に原子の電子軌道が変わると放出されます。暗黒星雲として知られる黒い領域は、遠方からの光が手前のガスで吸収された領域です。
- ⑦ ブラウン運動（たとえば花粉を水の上にまいたとき）は、水分子が花粉を叩き上げることにより発生します。水分子のエネルギーは温度による熱エネルギーですので、ほぼ永久です。

- ① p45 上段で「・・・光を伝える媒体としてエーテルの、…」～このエーテルは現在実在のエーテルとは異なると思いますが、当時どのようなものを想像していたのでしょうか？
- ② p44 奇跡の年の論文で、その実用性について、光電効果と特殊相対性理論の実用性は、想像がつかますが、ブラウン運動の実用展開はどう考えればよいのでしょうか？

- ①化学ではジエチルエーテルをエーテルと称することがありますが、ここでのエーテルは全くの別物です。宇宙のどこにでも存在するもの、という意味のギリシャ語のアイテールという言葉の語源とするようです。
- ②物理学に統計的手法を取り入れたことが革命的でした。多数の物体のランダムな運動を統計的性質として扱うことで、物性物理学の基本的な手法として発展します。

いよいよ相対性理論が登場してきました。空間と時間が不変で速度が可変と考える代わりに光の速度が不変で空間と時間が可変と考えるパラダイムシフトに感動したものです。相対性理論は、諸行無常や輪廻転生などの東洋的思想に通ずるものがあるとのお話を聞いたことがあります。確かに絶対空間や絶対時間を基にしたニュートン力学は「唯一神」につながり座標系毎に異なる時間があると考える相対論は「八百万の神」に通ずるような気がします。機会があれば先生のご感想などでお伺いできれば幸いです。

私としてはアインシュタインはむしろ「光の速さは誰から見ても一定」という原理ひとつに集約した一神教に感じます。シンプルな物理法則を求めた結果でしょう。

4. 宇宙の理解(1)アインシュタイン（感想）

アインシュタインはミレヴァとグロスマンに出あった事で研究者としての道が開け成果を得ることが出来ました。しかし理解者と出会う事なく周囲から“変人”と扱われ埋もれてしまった“天才”は大勢いたのでしょうか。

重力による運動を科学的に証明したガリレオとケプラー、17世紀末、重力を体系化し力学の基礎を作ったニュートン、磁場と電場の考察から生まれたファラデーの「場」の認識、そして今回ご説明のあった重力と空間の関係を見つけたアインシュタインに繋がる。

1905年、物理学の分水嶺とも言われるアインシュタインの「相対性理論」と「量子論」という二つの論文がでて近代物理学が始まった歴史が今日の講義で良く分かりました。アインシュタインは大正時代に日本にもきているのですね。

今回の講座は、難しかったです。ニュートン力学まではわかりますが、量子論や相対性理論は、触れる機会はありませんでしたが、今でもよく分からないままです。しかし、アインシュタインたちが成し遂げた事柄が今の科学を支え発展させていることは間違いないと思います。理解できなくても宇宙が存在し星が生まれ星が滅びるそんな営みを思い描けることに感謝します。

スクーリング講座。相対性理論入門（質問）

テキスト P117 にブラックホールの解としてシュヴァルトシルトの解がありますがこれはアインシュタイン方程式を球対称の条件で解いた特殊解だと思います。特殊解として他に富松・佐藤の解がありますがそうすると一般解というものはあるのでしょうか？もしくはまだ発見されていないのでしょうか？よろしくお願い致します。

一般解はまだ求められていません。おそらく求めることは非常に難しく無理だと思われる。アインシュタイン方程式は非線形の 10 本の連立偏微分方程式だからです。数値シミュレーションでブラックホールの運動が解けるようになってからまだ 10 年です。

先日のスクーリング講座は大変興味深く面白く聞かせていただきました。

もう少し時間があれば質問させていただきたかったのがホワイトホールとワームホールについてです。ブラックホールは光さえも脱出できずあらゆるものを飲み込むとされていますがエネルギー保存の法則を考えるとその対極としてホワイトホールがあるのではないかといわれていると思います。またそれらを結ぶトンネルとしてのワームホールの存在も提唱されています。今後のブラックホールに関するトピックスの中でこのようなお話も出てくるのでしょうか？機会があれば言及いただけると幸いです。

ご指摘のようなホワイトホールは、理論的には存在すると考えられます。アインシュタイン方程式の解としても存在します。またご指摘のワームホール構造もアインシュタイン方程式の解として存在します。しかし、どちらもこれまでに観測されたことはありません。本講座の最終回で少しコメントいたします。詳しくは拙著「図解雑学 タイムマシンと時空の科学」をご覧ください。

5. トピック(1)超新星爆発（質問）

① 「恒星の末路はその大きさに依存する」のであれば、最初の大きさを決定する要因は何でしょうか？われわれの太陽が現実より大きくなる（あるいは小さくなる）可能性はあったのでしょうか。

②鉄 Fe が最も重い、とはどういう理由でしょうか？原子の構造上、そういうことになるのでしょうか。

————— 講師より —————

①星の質量は、はじめにどれだけのガスが収縮するかによって決まります。太陽は宇宙では標準的な大きさです。大きいものも小さいものもあります。

②鉄 Fe は 110 種類あまりある元素の中で最も安定な原子核であると申し上げました。最も重いわけではありません。ここでの安定性は、陽子と中性子の合体による結合エネルギーが、鉄 Fe の組み合わせのときに最小になり、それ以上の核融合・核分裂反応が生じない、という意味です。

地球に最も近い恒星であるケンタウルス座アルファ星の C 星（プロキシマ・ケンタウリ）は「赤色矮星」と聞きました。今回の講義にあった「白色矮星」とはどう違うのでしょうか。

————— 講師より —————

赤色矮星は主系列星の中でも小さなもので、ゆっくりと核融合を進め、水素までの燃焼後、ヘリウムの燃焼に点火できずに徐々に冷えていく星です。

- ① 超新星爆発には2種類あるとのことですが、チャンドラセカール限界をはるかにこえたケースは理解できますが、白色矮星がどうして超新星爆発をおこすのでしょうか？
- ② 鉄以上の重い元素が超新星爆発でつくられるとのことですがそのメカニズムはいかなるものなのでしょうか
- ③ PP チェインとはどのような核融合反応なのでしょう？以上よろしくお願いします。

――講師より――

- ① 白色矮星は燃え尽きた恒星が収縮してできる最後の姿の1つです。超新星爆発がおきるのは、収縮して中心部に中性子の塊ができる場合です。
- ② ガスが収縮して縮み、中性子の塊にぶつくと跳ね返り、こんどは外側に向かって飛び出しますが、外側からは収縮してくるガスもあるために、高温・高圧でガスの大混合が生じます。このときに原子核の合体が一気に進むものと考えられています。
- ③ p とは陽子(proton)の頭文字です。pp チェインとは、2つの水素 1H (水素の原子核は陽子が1つ) が結合して重水素 2H となる核融合反応のことです。1個の陽子が中性子に変換し陽電子とニュートリノが放出され、熱を発生します。太陽の内部で発生している核融合反応です。

- ① 星の最後で白色矮星、中性子星、そして超新星爆発。この爆発した塵ガスは再集合して星を生成するとの考え方でよろしいでしょうか。
- ② また、生成した星(太陽、地球を含め)の自転は星生成時物体の衝突エネルギーが変化したものでしょうか。

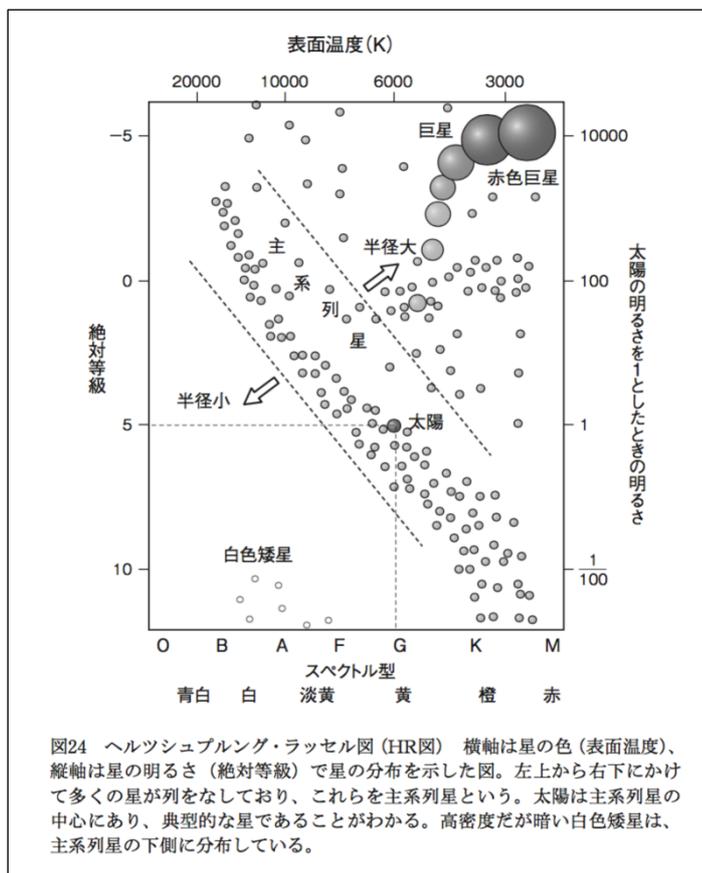
――講師より――

- ① その通りです。宇宙に誕生した初代の星は短命で1万年から100万年の寿命であったろうと考えられています。太陽などの現在の恒星は宇宙における第3世代であると考えられています。
- ② 自転する現象は、広いところに分布したガスが小さな天体に集合することで発生します。角運動量保存則という法則があり、フィギュアスケートの選手が手を伸ばした回転を始めた後、手を体にくっつけると、高速で回転することと同じ原理で、ガスが小さな天体に集まると、はじめにゆっくりと回転していたエネルギーが、天体を自転させる作用になります。

太陽系列の元になった超新星爆発後に太陽系以外の恒星になった星は推定されていないのでしょうか、天の川銀河内に太陽近隣の星は、太陽と違う元素構成なのでしょうか。

――講師より――

星の色と明るさ(絶対光度)を一覧にすると、ほとんどの星が一行に並ぶことが知られています。(右図、ヘルツシュプルング・ラッセル図、拙著「ブラックホール・膨張宇宙・重力波」より)。これを主系列星と呼びます。太陽はこのなかでちょうど中央にあり、典型的な星と言えます。主系列星の進化を説明するのが星の理論です。水素が燃え、燃え尽きるとヘリウムが燃え、その順に鉄ができるまで燃える、というモデルです。多くの星が一つの理論で説明できるようになっています。従って恒星の内部構成は星の一生のうちに変わりますが、皆、同様の運命を辿っていると考えられます。



- ①核分裂や核融合反応では、核の質量減少分に相当するエネルギーが原子核から放出されるのでしょうか？電子には何も影響を与えないのでしょうか？
- ②P 5 0 「星は宇宙空間に散らばった塵やガスが集まって燃え始める」とありますが、水素分子がバラバラに存在している中で重力により集まり始めるとは考えにくいのですが、始めにガスや塵がどんな作用で集積し出すのでしょうか？
- ③P 5 2 重力崩壊で鉄原子核の陽子と電子が合体して中性子星になるとありますが中性子星の中の中性子同志を結合させている力は何でしょうか？重力だけでしょうか？P 1 4 で原子核内の陽子と中性子の間の力はn中間子の交換によるとありますが、この核内の中性子と中性子の間には力は働いていないのでしょうか？
- ④p 5 2 「もっとたくさんの物質が中心部の中性子コアに重力崩壊してきたら... (略)... 超新星爆発だとありますが「たくさんの物質というのは鉄以外にどんなものがあるのでしょうか？「硬い中性子のコアにぶつかるとはねかえされることになる」とありますが重力崩壊をおこす程の強い重力に引きつけられコアにぶつかった後にそれを打ち負かせて物質をはねかえすとは何でしょうか？引きつけられた物質はなぜコアと一体化しないのでしょうか？
- ⑤p 5 2 「中性子も潰されてブラックホールと呼ばれる光さえも脱出できない強い重力の塊になる...」とありますが、その中の中性子はどのようなものになっているのでしょうか？中性子という形態ではなくなりクオークの集合体のようなものになっているのでしょうか？
- ⑥P 5 4 「どの超新星爆発もほぼ同じ質量の星が爆発する...」とありますが、P 5 2 から太陽質量の1, 4 倍以上と言うことが想像されるのですが「ほぼ同じ質量」とは如何程のものでしょうか？表 5, 2 の分類によって各々の型で質量がほぼ一定ということでしょうか？
- ⑦P 4 9 表 5, 2 で「ia 型ケイ素①S②の吸収線がある」「ic 型 S②の吸収線も He の吸収線も He の吸収線もない」とありますが①②は si か s かどちらが正しいのでしょうか？
- ⑧P 5 0 「巨大な星」「小さな星」とありますがなぜこのような差異が生じるのでしょうか？星の形成過程においてその星の周りにあった塵やガスの分布の不均一性が原因でしょうか？「巨大な星」は「小さな星」を経由して形成されるのでしょうか？
- ⑨P 5 4 「超新星爆発ではカルシウムや鉄、ニッケルなど重い元素がどんどん作られるがその変化のしかたも同じになる」とありますが、爆発前の中性子量の周りの塵やガス(H₂?)が原料となるのでしょうか？そうだとすると上記 8 の疑問と関連して理解できないのですが教えて戴ければ幸いです、質問ばかりで恐縮です。

——講師より——

- ①中性子や陽子と電子とでは、質量に 1800 倍の違いがあるため、原子核の構造はほとんど中性子と陽子の結合によって説明することができます。
- ②宇宙空間がほんとうに一様でどこも均質であれば収縮は生じませんが、少しでもゆらぎのあるガスの分布であれば、密度の高い所へガスが集まり始めます。ひとたび収縮が始まると、質量がどんどんと増えていくので、さらに周囲のガスを引き寄せることになります。つまり、答えは重力による引力です。
- ③原子核内の陽子と中性子の間の結合力は、湯川によるn中間子の理論によって説明されましたが、その後の素粒子物理学では、陽子も中性子もクオークが 3 つ結合してできたものであると考えられるようになりました。隣り合う陽子・中性子では常に中間子(実態はクオークが 2 つ)が交換されて両者は結合している力(強い核力)がはたらきます。中性子だけでは不安定で、単独で存在する中性子は約 10 分の半減期で陽子と電子に崩壊します。
- ④燃え尽きた星は、中心部に鉄がありますが、外側には燃え残った水素・ヘリウム・リチウムなどが球殻状に存在していますので、それらが落下してきます。落下してきたものが中性子塊で跳ね返るのは、中性子の塊が、角砂糖 1 つあたり 10 億トンほどの非常に高密度で硬いことによります。一部はコアと合体しますが、跳ね返るものがあり、それらが超新星爆発として観測されることとなります。
- ⑤ブラックホールが形成されたあとの内部がどうなるのかはまったく不明です。
- ⑥恒星の質量によって、最期の運命が、白色矮星か中性子星かブラックホールになりますので、超

新星爆発をおこすような中性子になる運命の星は、ほぼ質量が決まっている（太陽の数倍から10倍程度の星）、という意味です。天文学で「ほぼ決まっている」というときは「桁が決まっている程度」とお考えください。

⑦ご指摘ありがとうございます。Siが正解です。訂正します。

⑧星の質量は、はじめに、どれだけガスや塵が集まったかによって決まります。もちろん、ある程度大きな星は、周囲の小さな星を吸い込んで成長します。星の分布も銀河の分布も、初期宇宙のガスのゆらぎがどれほどであったかで決まるものと考えられています。ゆらぎの程度を解析することが宇宙論のスタートを決める重要な要素です。

⑨ほぼ同じ程度の質量の星が超新星爆発を起こしますので、結果として生成される重元素量もほぼ同じであろうと考えられています。太陽の周りが真空であるように、星の周囲の宇宙空間には何もなく、星がもつ元素のみでダイナミクスが決まると考えてよいでしょう。

①星の最後の項で「星は核融合反応を繰り返し、次第に重元素を合成していく、しかし鉄まで合成されるとこの反応は進まなくなる。鉄は元素の中でもっとも安定だからだ。」とあるが宇宙空間の中で何故鉄がもっとも安定なのか？

②5, 3の項で第2パラグラフ3行目に「大爆発のメカニズムは物理的に決まっていたどの超新星爆発もほぼ同じ質量の星が爆発するので」とあるが何故同質量の星が爆発するのか？

――講師より――

①原子核をつくる中性子と陽子の結合エネルギーを計算すると、鉄のときに最も結合エネルギーの総和が小さくなることから、鉄がもっとも安定な元素である、と考えられます。「なぜ」という質問には答えられません。

②恒星の質量によって、最期の運命が、白色矮星か中性子星かブラックホールになりますので、超新星爆発をおこすような中性子になる運命の星は、ほぼ質量が決まっている（太陽の数倍から10倍程度の星）、という意味です。上限と下限がほぼ決まっているという意味です。

テキスト49ページ表5, 2 超新星の分類について詳しく説明をお願いします。Ia型～C、II型はそれぞれどれくらいの割合でしょうか。Ia型以外の超新星はスタンダードキャンドルとはならないのですか。

――講師より――

II型の超新星爆発は、Ia型の数倍多く観測されています。Ib型、Ic型はIaよりも少ないようです。Ia型はとても明るく、遠方で発生しても見えることと、発生するメカニズムがわかっているほぼ同じ明るさで輝くことがわかっていますのでスタンダードキャンドルとして使われます。Ia型以外は、さまざまな大きさの星になりますので、明るさもいろいろで、距離の測定には向きません。

5. トピック(1)超新星爆発（感想）

現在の地球上の元素で水素、ヘリウム以外は、太陽系ができる前の恒星の核融合や(リチウム～鉄)、超新星爆発（鉄より重い元素）で作られたとの事でした。超新星爆発は、遠く離れた所で起こっている現象と感じていましたが（近くだと大変なことになります）、自分の体や地球自体が、超新星爆発の結果の産物となると、身近な現象に思われます。

同様に、現在地球上で人類が利用しているエネルギーの由来について考えてみました。

- ・太陽光発電など
→もちろん太陽の核融合エネルギーに由来する。
- ・風力発電、波力発電

→太陽からの熱エネルギーを、地球が吸収し放出する過程で、大気の循環が発生し、風や波が発生する。

・水力発電

→上記の大気の循環で、水が位置エネルギー（重力ポテンシャル）を得る。

・火力発電（化石燃料）

→太陽光エネルギーを、生物が光合成で化学エネルギーに変換たものが、堆積した。

ここまでは、現在の太陽のエネルギーに由来するものですが、以下のものは、先代の恒星や超新星爆発に由来すると考えました。

・原子力発電（核分裂）

→超新星爆発で合成されたウランの、核分裂エネルギーを使っている。

・地熱発電（崩壊熱）

→恒星や超新星爆発で合成された同位体が、崩壊するエネルギーが地熱になる。

・地熱発電（重力ポテンシャル）

→超新星爆発で飛び散った塵が、再び円盤状に集まり、微惑星となり集積(落下)して地球（マグマオーシャン）を作り、位置エネルギーが熱エネルギーに変わった。

・潮力（潮汐）発電

→上記の塵が円盤状に集まった時の角運動量が、地球の自転、月の公転角運動量となった。

最後の二つは、かなり苦しいこじつけですが、私たちは超新星爆発の莫大なエネルギーの残りを、ほんの少しだけ使っていると思います。

突然現れた超新星、時期的に平家政権の末期、源頼朝や木曾義仲の旗揚げ、世情不安から陰陽師に報告を求めたのは藤原定家以外の公家も大勢いた事でしょう。

・ ・ ・ 編 集 後 記 ・ ・ ・

第1～5回目までの放送について、皆様からたくさんのお便りをお寄せいただきました。毎回熱心にご受講いただき、ありがとうございます。

当初、皆様からのご質問に対しては第10回放送にてお答えする予定でしたが、真貝先生のご厚意により、このお便り集の中で回答を掲載することができました。紙面スペースの都合上、残念ながらすべての質問・感想の掲載はいたしかねますことをご了承ください

第6～10回目分の平成29年3月下旬にお送りする予定です。ぜひ引き続き、講座に関するご感想・ご質問をお寄せください。

なお、本講座ではラジオでの放送のほか、インターネットでの音声配信も行っています（再放送の翌日から）。「ラジオを受信しづらい」「繰り返し講座を聴きたい」という方は、ぜひご利用ください。また、こちらにも先生のご厚意で、各回講座内容の関連資料をインターネット上に掲載いただいております。いずれもインターネットの「受講者専用ページ」からご利用いただけます。利用方法は、テキスト6,7ページをご確認ください。

最後に、本講座に関するアンケート用ハガキを、このお便り集に同封しております。今後のよりよい講座作りの参考とさせていただきたく、ぜひご協力をお願いいたします。3月の第10回放送終了後、ご記入の上ご提出いただけましたら幸いです（切手は不要です）。

日増しに寒さが厳しく感じられるこの頃ですが、皆様体調にはお気をつけてお過ごしください。引き続き、ラジオ講座をよろしく願いいたします。