**宇宙科学Ⅰ　蜂巣先生　試験対策プリント（２０１４年夏学期作成）**

**もふもふ（S３-１６）**

**先輩方のすばらしいシケプリをもとに、宇宙科学Ⅰで点数をとることだけを目的にしたシケプリを作成しました。**

**今までの出題範囲はほぼ網羅してあると思います。なお、最頻出事項については黄色のマーカーをひいてあります。単位だけを欲しい人は黄色の部分とレポート課題（第1.6.7問）を覚えれば十分でしょう。**

**試験問題は語句の説明問題数問、星の一生に関する問題１問、レポート課題（特に第1.6.7問）に関連する問題１問、その他１問だと思われます。**

**それでは赤シートを片手に頑張ってください！！**

第２回　宇宙の距離を測る・天体の明るさ

・ハッブルの宇宙膨張則

　　　天体までの距離測定が非常に重要な例のひとつ

　　　　　銀河の後退速度＝比例定数（ハッブル定数）×　銀河までの距離

　　　ハッブル定数が決まると宇宙年齢が決まる。

　　遠方の銀河ほど速く遠ざかることを表し、時間を過去に戻せば、各銀河がある1点から出発したことがわかる

　・宇宙の距離の測り方

　　遠方の天体までの距離を精度よく測りたいため、いくつかのステップを踏む

　　　　→「宇宙はしごを登る」と表現される

1. 金星や火星のレーダーエコー実験（星が最も近づいたときに電波を出して星の表面に反射して戻ってくる時間を測る）、ケプラーの第３法則(惑星の[公転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E8%BB%A2)周期の2乗は、軌道の長半径の3乗に比例)　により、地球の軌道半径の決定
2. 三角測量の原理において年周視差の利用により、太陽近傍の星の距離が決定する。
3. セファイド型変光星の絶対光度を決定し、周期―光度関係を導出
4. 近傍銀河中のセファイド型変光星の周期から、セファイド型変光星の絶対光度の決定（このとき③で求めた周期―光度関係を用いる）
5. 絶対光度と見かけの光度から、近傍銀河の距離が決定する。

・パーセクについて

　年周視差を用いて星までの距離を測るとき、年周視差に逆比例して星までの距離は遠くなるが、この年周視差が１角度秒（ラジアン）＝π÷１８０÷６０÷６０となる距離を１パーセクと定義。

・エネルギーフラックスについて

　単位時間・単位面積あたりに入ってくるエネルギーの総量。星の光度と星からの距離により決定する。星からの距離の二乗に反比例する。星の見かけの等級と絶対等級の比較に使用される。また年周視差が測れないような遠方の天体の場合、この比較から距離を求める。

・セファイドについて

　一群の変光星の総称。星の距離を決定するときに非常に重要な役割を担う。

1. セファイドは周期的（２日から２００日程度）に明るさが変化する。時間平均した光度を平均光度といい、平均光度をセファイドの明るさと定義する。
2. 太陽近傍セファイドの距離を年周視差から決定し、その絶対光度を求めてみると、絶対光度の明るいセファイドほど周期が長い、周期―光度関係が判明する。

4πr2f＝光度L＝一定　f:エネルギーフラックス

周期―光度関係を使うと、セファイドの周期を測れば絶対光度がわかる。これと見かけの明るさからその星までの距離がわかる。

M-m=5-5log10(d)

M:絶対等級　m:見かけの等級（観測値）　d:距離（pc単位）

年周視差が測れないほど遠方の天体の場合に使われる。

絶対光度のわかる天体が距離を測定する際の目安。このような天体を標準光源という。標準光源によく使われるのがセファイド。

・色指数について

　天体の明るさを紫外線（U）、青い光（B）、黄緑の光（V）の各フィルタを通して測定。このときの各等級をB等級、V等級などと表現すると、B等級とV等級の差（B－V）を色指数とよぶ。また、縦軸に星の絶対等級、横軸に色指数をプロットしたものはＨＲ図と呼ばれ、星の大きさや進化の仕方に対応するとっても重要な図。

　星の色は星の温度に非常に関係してくる。すなわち色指数を測定することで星の温度が決まる。（色指数が小さい＝温度が高い）

第３回　天体からの情報・スペクトル　　重要度低め

* 黒体輻射

輻射と物質が熱平行にある場合に温度だけに依存して決まる輻射のこと。太陽のような恒星の輻射スペクトルは黒体輻射スペクトルで近似できる。またエネルギーフラックスも、温度のみに依存するプランクの黒体輻射公式で解析的な式として与えられ、これを積分することで、星から単位時間に出てくるエネルギーの総量（光度）を求めることができる。

ステファンボルツマンの式　f=σT4 L=4πR2σT4

* ウィーンの変位則

黒体輻射のエネルギーフラックスのピークの波長は温度により変化する。つまり高温の天体（物質）は波長の短い光（電磁波）を出すということ。

* ライマン系列とバルマー系列

水素原子の軌道中で電子が落ち込むときにはエネルギー分の光子を放出、たたきだされるときには光子を吸収して、スペクトルはそれぞれ輝線と吸収線になる。

ライマン系列：n→１、１→nの場合。エネルギーが高く紫外線の領域で大気に吸収されて地上では観測できない。

バルマー系列：n→２　２→nの場合。可視光の領域であるため観測可能。

またn→∞の場合、それぞれライマンエッジ、バルマーエッジと呼ぶ。

第４回　望遠鏡　　重要度低め

重力レンズ効果：非常に強い重力場があると、光の進路はその重力場によって曲げられる現象。

　　　　　　　　見えない質量（ダークマター）の存在を示唆する。

大気の窓：大気の影響で、γ・X・紫外線などは吸収されて地上まで届かない。これ以外の吸収を受けずに大気を透過するいくつかの電磁波の波長帯の名称。

第５回　星の誕生と進化　その一

* 星の内部の熱輸送

光子が物質にぶつかりながら熱を伝えていく＝光子拡散（熱伝導）

熱伝導で熱が伝わりにくい場合、対流による熱輸送（こちらの方が効率がよく熱を流せる）

* 星の内部の原子核融合反応

主系列星のエネルギー源は、原子核と電子がバラバラ状態の中心部で起こる核融合反応であり、２種類に分けられる。

星の中心で水素の核融合反応がおこっているこれらの段階の星を、主系列星・主系列段階という。

　　・ppチェイン

　陽子が高温条件下で互いの反発力に勝る運動エネルギーをもち、核力によって合体。これを繰り返してヘリウム原子核になる核反応。1.1倍太陽質量より軽い星（中心温度低）で主体。

　　・CNOサイクル

　炭素、窒素、酸素の原子核を触媒とした核反応。水素よりも原子核のもつ反発力が大きいので、大きな運動エネルギーが必要となる。そのためppチェインに比べると高温の領域で、初めて核反応がおこる。またppチェインに比べ、熱発生率は温度の上昇に敏感である。

※輻射平衡と対流平衡

　星の内部で光子拡散（熱伝導）・対流によって熱が運ばれるそれぞれの領域について、輻射平衡・対流平衡と呼ぶ。ｐｐチェインが主となっている星では中心で輻射平衡、外側で対流平衡。CNOサイクルの星ではその逆。CNOサイクルの中心部は高温、それゆえ中心部で温度のムラができる（温度勾配）。それを改善しようと、熱効率のよい対流が中心部で起きる、だからCNOサイクルは中心で対流…と覚えましょう。ｐｐはその逆。

* 星の内部での核融合反応の安定性

　水爆などと異なり、主系列星の水素核融合が安定である理由は、星が自己重力系であり系全体の比熱が負であるという性質による。つまり星の内部において、核融合の熱が多く発生し、星全体が膨らむ。しかしこれは断熱膨張であるため逆に中心温度が下がり、核反応率は下がる。それゆえ、見かけの比熱が負であるかのようにふるまう。これにより核融合反応は安定化する。

・電子の縮退圧

　絶対零度において、理想気体の熱運動による圧力は０であるが、量子力学的な電子の圧力は存在する。この圧力は電子の縮退圧とよぶ。星の内部において、密度が非常に高いか温度が非常に低温であるとき、縮退圧が重力に対抗する圧力勾配を作り出し、理想気体の状態方程式で温度から決まる圧力より大きくなる場合、「星は縮退する」という。

・白色矮星

　電子の縮退圧で支えられている星。太陽と同程度の質量なのに地球と同程度の大きさという、非常に高密度な状態。質量が増えるほど、半径が小さく密度が高くなる。しかしその質量には限界があり、それをチャンドラセカール限界質量と呼ばれる。（1.4倍太陽質量）縮退圧がきく星では、温度が圧力に関係しないので、見かけの比熱が負という性質はなく、熱が発生すれば温度はずっとあがっていくため核融合反応に不安定で爆発もありうる。

* 1倍太陽質量の星の進化

縦軸は星の光度の対数、横軸は星の表面温度の対数

　

　A：ゼロ年齢主系列。ｐｐチェインによる水素核融合反応。中心で輻射平衡、外層で対流平衡。

　B：中心付近で水素を燃やしつくし、主系列を離れる。

　C：ヘリウム中心核の形成、その周りに水素の層。ヘリウム核は密度が高いため縮退している。

　　D：水素核の燃焼が進むとヘリウム核の質量が増え密度が上がって半径が縮む。それにつれ水素核がさらに激しく燃え、外層は膨らみ表面温度が下がり、水素外層が対流層になり、林トラックに乗る。

※C→Dの段階の星を赤色巨星と呼ぶ。

　E：ヘリウム核が0.46倍太陽質量まで成長し、中心でヘリウム燃焼（トリプルアルファ反応）がおこる。

　　ヘリウム核は縮退しているため、ヘリウム燃焼は激しく起こるのでヘリウムフラッシュとなる。

　　※ヘリウムフラッシュ

　　　　ヘリウム核が縮退圧で支えられているために、燃焼による熱が出ても圧力が増えず、温度上昇のみが起こる。これによりヘリウム燃焼は加速する。この不安定核燃焼がヘリウムフラッシュである。

　 F：ヘリウム燃焼が安定化、水平分岐に乗る。

　 G：ヘリウム核にヘリウムがなくなってくると、トリプルアルファ反応により炭素・酸素による核が形成される。つまり内側から、炭素＆酸素→ヘリウム→水素の層となる。このときヘリウムはこの周りで核燃焼。この外には水素殻があり、二重殻燃焼と呼ばれる。その後、炭素・酸素コアが成長するにつれて、半径が増大し、恒星風が吹き始める。そして水素外層が失われて、最終的には炭素・酸素コアのみ残る。

第6回　星の誕生と進化　その二　　重要度　☆☆☆☆☆

・7倍太陽質量の星の進化

　

　A：ゼロ年齢主系列。CNOサイクルによる水素核融合反応。中心部は対流平衡。

　B：中心の対流核全体で水素を燃やし尽くし、水素燃焼の火が消える。同時にヘリウム核の形成。比較的温度が高く密度が小さいのでヘリウム核は縮退しない。水素がヘリウム核全体でなくなるため、熱源がなくなり星全体が収縮をはじめ、重力エネルギーを解放する。外層も収縮するから星の表面温度が上がる。

　C：ヘリウム核の温度が上昇した結果、ヘリウム核のまわりの水素に火がつき水素殻燃焼に移行する。このとき水素外層の収縮はとまる。しかしヘリウム核は収縮を続けて温度を上げるので、水素殻燃焼は盛んになって逆に外層は一層膨らみ、表面温度を下げる。この移動は短い時間であるため、この位置にある星はめったに見つからない。このC→Dをヘルツシュプラング・ギャップと呼ぶ。

　D：水素外層がすべて対流層になり、林トラックに乗る。

　　E：比較的温度が高く密度が小さいのでヘリウム核は縮退しない。ヘリウム核の質量が1.4倍太陽質量まで太ると、ヘリウムに火がついてトリプルアルファ反応が起こる。

　F：ヘリウム燃焼が安定化、水平分岐に乗る。中心部は対流層。

　G：中心でヘリウムがなくなるとヘリウム殻燃焼に移行する。それにより水素外層はすべて対流層になり林トラックにのる。その後、炭素・酸素コアが成長し、半径が増大し、恒星風が吹き始め、水素外層が喪失し、炭素・酸素コアのみ残る。

　また、上図の青く塗りつぶされた四角の領域を、セファイド不安定帯という。

・20倍太陽質量の星の進化



　A：ゼロ年齢主系列CNOサイクルによる水素核融合反応。中心部は対流平衡。

　B：星の中心部は対流平衡で、一気に水素がなくなり、燃えるものがないため水素核燃焼がやむ。主系列を離れる。ヘリウムコアには熱源がなくなるのでコア自身が収縮して重力エネルギーを解放し、星全体も収縮するので、星の表面温度が上昇する。

　C：ヘリウムコアの収縮で温度が上昇し、ヘリウムコアのまわりの水素に火がつく。　ヘリウム核には熱源がないので常に収縮し、ヘリウム核の質量が増え、半径は縮む。

　D：水素がより激しく燃えて外層が膨らみ、表面温度が下がって水素外層がすべて対流層になると、林トラックに乗る。

　E：ヘリウム核は温度が比較的高く、密度もそれほど大きくないので縮退していない。ヘリウム殻が6倍太陽質量となり、中心でトリプルアルファ反応が始まる。

　F：ヘリウム燃焼が安定化し、水平分岐に乗る。中心部は対流層。

　G：中心でヘリウムがなくなりヘリウム殻燃焼に移行、それにより水素外層が再び対流層に。その後、炭素・酸素コアが成長するにつれ半径が増大し恒星風が吹き始める。この後、中心の炭素・酸素コアは縮退しないので収縮しながら温度を上昇させる。温度上昇により、炭素、ネオン、酸素、シリコンと重い元素が次々燃える。シリコンが燃えて鉄になったら終了。しかし鉄の中心核の温度が重力収縮で100億度を超えると、黒体輻射の高エネルギー光子がガンマ線となって飛び交っているため、鉄の原子核がこれを吸収してバラバラになる。これを鉄の光分解という。これが引き金となって超新星爆発がおこる。

（７倍太陽質量との違いを下線部で強調しました。）

第7回　超新星爆発

* 超新星

星の進化の最終段階で星全体が吹き飛んでしまうような爆発現象。このメカニズムは以下の２つに分類される。

1. 鉄の光分解型（上記参照）
2. 炭素爆燃焼型：炭素・酸素コアからなる白色矮星に相手の星からガスが降ってきて、白色矮星の質量が増え、チャンドラセカール限界質量になったとき中心で爆発的燃焼が起こり、星全体が吹き飛ぶ。
* なぜ明るく輝くのか

中性子星ができるときの反動で生じた衝撃波が中心部から表面へ抜け出るとき、表面温度が上昇すると同時に激しく膨張する。ここで星の明るさはステファンボルツマンの式（$L=4πR^{2}T^{4}$）より、半径の上昇・温度の上昇が同時に起こるので非常に明るく輝く。

ただし、膨張が進むにつれ表面温度は低下するので、明るさはあるところでピークとなる。その後、放射性同位元素ニッケル56の崩壊熱によりエネルギーが放出されて明るさは次第に暗くなる。

* 超新星の意義

宇宙が生まれたときには水素とヘリウムしか存在しなかったが、これより重い元素は恒星の内部の核融合によって作られ、このままだと中にとどまるだけである。そこで超新星爆発により、それらが宇宙にばらまかれ、重元素が増えていく。つまり超新星は生命の源である。

第９回　ブラックホール　　重要度　☆☆☆☆☆

* ブラックホール

脱出速度は$ \frac{１}{２} $mv2-$ \frac{GmM}{R}$ = 0から求められる。

強い重力：星表面の脱出速度と光速度がほぼ等しいとき（中性子星など。一般相対論で議論）

弱い重力：脱出速度がはるかに小さいとき（太陽など。ニュートン力学で議論）

太陽程度の質量で考えると、強い重力の極限（脱出速度＝光速）となる半径は約３㎞。つまり、太陽質量を３㎞の球につめると、その表面から光は脱出できない。このようにして決める半径をシュバルツシュルト半径という。

* 潮汐力

太陽質量のブラックホールに人間はどこまで入れるか？　答え：約880㎞、すなわちブラックホールの半径は約３㎞で考えているわけだから、ブラックホールに入るよりもずっと前に人間は引き裂かれるということ。

* 量子論的理論

ハイゼンベルクの不確定性理論によれば非常に短い時間なら微小エネルギーをもった粒子・反粒子の対の生成・消滅が可能。反粒子がシュバルツシュルト半径の内側・粒子が外側に出てくるとき、粒子がブラックホールから飛び出てきたように見える。この現象は確率的で、統計的な処理をすると、ブラックホールの温度やその黒体輻射を定義できる。初めて温度を定義したのはホーキング。ブラックホールの温度は質量に逆比例し、１gだと温度が非常に高く、光度も非常に明るいが、短時間で輻射を出してしまい、すぐなくなってしまう。このように、質量の小さな非常に高温のブラックホールが輻射を出して消えてしまうことを「ブラックホールの蒸発」という。

第１０回　銀河系と銀河団　　重要度低め

* ダークマター

銀河に存在する全ての星やガスの質量を合計したときに、理論的に考えられる速さよりも、ずっと速く銀河は回転している。その銀河の回転速度を説明するためには、銀河内に、目に見えないが、質量を持った物質、すなわちダークマター(dark matter)が存在すると考える必要がある

第11回　ビッグバンと宇宙膨張

* ビッグバン宇宙の観測的証拠
1. ハッブル則

遠くの銀河ほどその距離に比例して早く遠ざかる。つまり昔は一点から出発したことを示す。

1. ヘリウムの存在量

宇宙におけるヘリウムは重量比で約25％。しかしヘリウムが星の内部で作られたとすると、まったく足りない。また星がないところでも同じ量のヘリウムが存在することから、ある最低量のヘリウムは宇宙が生まれたときにビッグバンの条件下（火の玉宇宙）で作られたと考えなければ矛盾する。

1. ３K宇宙背景放射

昔、ビッグバンにより3000Kの黒体輻射が宇宙を満たしていたと仮定する。ウィーンの変位則によれば黒体輻射の波長と温度にはλT＝一定、の関係があり、宇宙がビッグバン後に1000倍膨張したならばλも1000倍したことになる。すると温度は1000分の1になるはずであり、実際に現在の宇宙を満たす黒体輻射は3Kでありつじつまがあっている。

第12回　惑星系の形成と生命の誕生

* 月の形成モデル

最も有力な説：ジャイアントインパクト説

原始地球形成時に、地球と同程度の原始惑星が地球に衝突し、地球とその惑星の一部が地球の周りに飛散したものから月が形成された。このとき飛散したガスが冷却され塵となる。塵がジーンズ不安定をおこし、集合して微衛星となり、微衛星が寡占的成長をして現在の月となった。

第１３回　宇宙生命と宇宙文明（年度によっては範囲外のことがあるようです）

・宇宙文明の存在数

　銀河系に存在する文明の数は、ドレイクの式により表される。（講義ノート参照、文字が何を表しているか覚えるべし）ただし、これは、地球のように生命発生に適した条件を備えた惑星には必ず生命が発生するということが前提。

・宇宙人へのメッセージ

　講義ノート参照。