

宇宙科学実習 I : 天体の位置と距離

今回は Ubuntu 環境で作業をしてください。

今回の作業

- 銀河系内の星団の天球上での分布。
- 天体の距離，大きさの計算問題。
- 銀河系内の星団の 3 次元的位置関係。

物理定数

この実習ではいろいろな物理定数を使いますが，これらは理科年表のような年鑑の他に，ウェブ上でも情報を得ることができます。例えばアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) の物理定数検索ページ

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

は信頼できる値を得ることができます。また，Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>) では無料で物理定数や素粒子物理関連のデータブックレットを提供しています。

1 天球上の天体の位置

見かけ上の天体の位置を，地球を中心とする仮想的な球面（天球面）に投影して表すことを考えます。天球面上の天体の位置を表す方法は，その用途によっていくつかあります。天球面は 2 次元なので，角度座標 2 つの組によって天体の位置は表せます。

1.1 赤道座標（赤経 α ・赤緯 δ ）

地球の自転軸の延長と天球面の仮想的な交点を天の北極，天の南極といいます。また，地球の赤道面と天球面との交線である大円を天の赤道といいます。天の赤道上で春分点¹を原点として，東周りに角度を時・分・秒単位で測ります（ 360° は 24^h ， 1^h は 15° ， 1^m は $15/60 = 0.25^\circ$ ， 1^s は $15/3600 = 0.004166\dots^\circ$ に対応）。この角度座標を赤経（Right Ascension, R.A., α と表記）といいます。一方天の赤道から北極に向かって正の緯度を定義して赤緯（Declination, δ と表記）といいます。赤緯は（度，degree）を単位にして測ります。赤経・赤緯によって天体の位置を表す座標系を赤道座標系といいます。

赤道以外は赤緯一定（ δ 一定）の線が大円でないので，同じ赤経の差の値をもつ天球面上の線分の長さはその赤緯によって異なってきます。赤緯 δ の円周は赤道上で円周（大円）に比べて $\cos \delta$ の因子だけ小さ

¹ 天の赤道と黄道（太陽の天球上での軌道）との交点のうち，太陽が南から北へ昇る方の点（昇交点）。

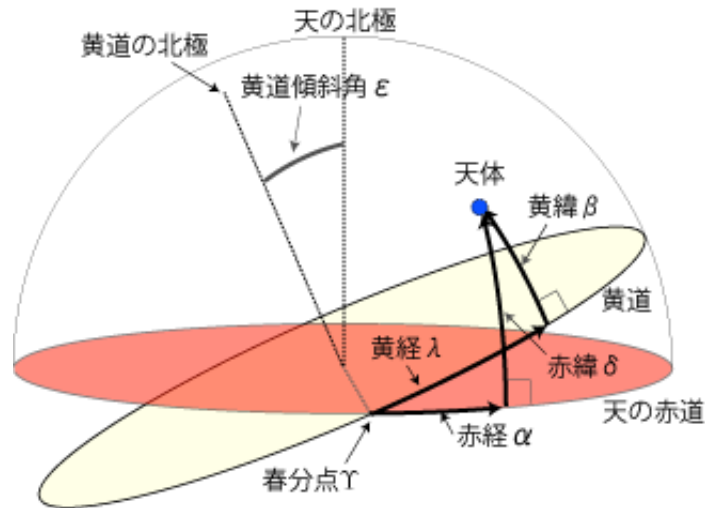


図 1: 赤経・赤緯および黄経・黄緯の定義．eco.mtk.nao.ac.jp より．

くなります．例えば，ある天体が赤道座標 (α_0, δ_0) を中心として赤経方向に $\pm\Delta\alpha$ 赤緯方向に $\pm\Delta\delta$ の広がりを持つとします．この天体は赤緯方向には $2\Delta\delta$ の視直径，赤経方向には $2\Delta\alpha \cdot \cos \delta_0$ の視直径をもつこととなります．

[変化する赤道座標]

春分点，地球の回転軸（地軸），赤道面は時間の経過によって変化します（地軸の歳差，章動，黄道面の歳差）．この変動をある決められた時刻の近傍で平均して平均春分点，平均赤道面を決めます．それによって定義された赤経，赤緯（平均赤経，平均赤緯）が通常使われる赤経，赤緯です．この「時刻」は 1992 年から現在までのところでは，西暦 2000.0 年として決められています（2000 年分点）．それ以前は西暦 1950.0 年に基づいて赤経，赤緯が決められていました（1950 年分点）．天体の位置を表す星図ではこれらの分点を明記して区別しています．

1.2 銀河座標（銀経 l ・銀緯 b ）

銀河内での天体の位置を表すには銀河の構造を反映した銀河座標系がしばしば使われます．これは，銀河中心（いて座 A*(Sgr A*) という強い電波源がある）を経度（銀経 (l)）と緯度（銀緯 (b)）の原点とし，銀河面に垂直な方向に緯度を測り（かみのけ座の方向に北極がある），それに垂直な方向に銀経（赤経が増加する方向に増加，あるいは銀河中心に向かって左向きに）を定義するものです．銀経は時角ではなく，角度の「度」で測ります ($0^\circ \leq l \leq 360^\circ$) ．

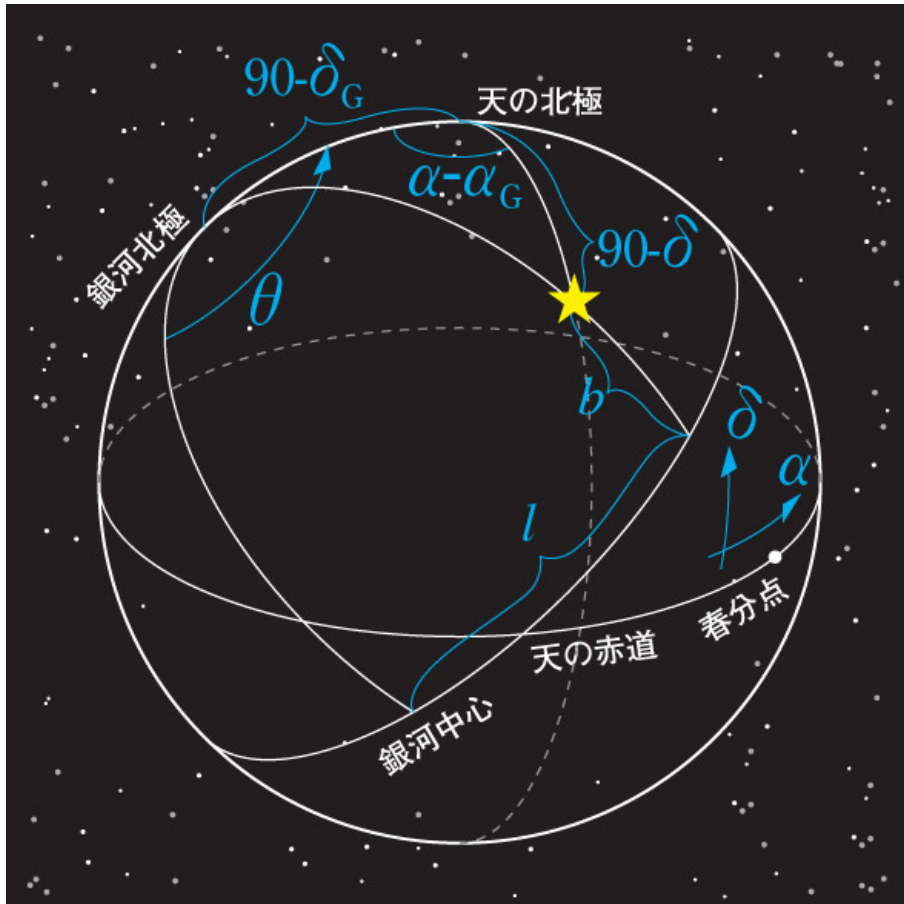


図 2: 銀経・銀緯の定義 . www.rikanenpyo.jp より .

課題 1

授業の Web サイトにアクセスしてファイルをダウンロードしてください。

1. opencluster2D.dat は私たちの銀河系内の散開星団（比較的若い星の集まりである恒星系）の赤経，赤緯のデータです．第一から三列が赤経 α で，それぞれ時角の時・分・秒になります．第五から七列までが赤緯で，それぞれ角度の度・分・秒になります．第四列は，赤緯の符号です．このデータを読み込んで，横軸を赤経（時），縦軸を赤緯（度）としてプロットする gnuplot の手続きファイルを書き，それを用いて星団の分布をプロットしてみなさい．
2. 銀河中心（赤経 $17^h 45^m 40.04^s$ ，赤緯 $-29^\circ 00' 28.1''$ ）を上とのデータと同じ面内にプロットしてその位置を確認しなさい．
3. mwgc.dat は銀河系内の球状星団の位置情報を含むデータファイルです．その第一から第七列は opencluster2D.dat と同じ形式になっています．これを上の図に重ねてプロットしてみなさい．球状星団の分布は散開星団と同じような分布になっているでしょうか．

gnuplot の手続きファイルについて

ここでは数字の表形式のデータファイルからグラフを描く方法をみます。四列の数字列を含む仮想的なデータファイル test.dat の第三列の常用対数をとったものを横軸に、第二列の2乗を縦軸にとる場合を考えます。

```
ex1.plt
set xlabel 'log10(f)'
set ylabel 'B'
plot 'test.dat' using (log10($3)):(($2)**2)
```

gnuplot を起動して、

```
load 'ex1.plt'
```

と、load コマンドでファイルを読み込むと実行してグラフを描いてくれます。手続きファイルには一行に一つの命令を書いておきます。1行目はターミナルの設定、2行目と3行目は x, y 軸のラベルの設定です。4行目で test.dat をプロットしています。この際、データの1列目の数値の常用対数を取り、2列目の数字は二乗してプロットする命令になっています。「(x 軸の表式):(y 軸の表式)」の形が一般形です。gnuplot では「データの n 列目の変数」を表すのに「\$n」という表現を使います。ここでは「(x 軸の表式)」が (log10(\$1)) となっていて、これは「グラフの x 軸として test.dat の 1 列目の変数の常用対数を取ったものを使いなさい」という意味になります。y 軸の表式は「((\$2)**2)」となっていて、これはデータファイルの 2 列目を二乗しなさいという意味になります。

1.3 固有運動

天体の見かけの位置は、この直ぐ後に述べる年周視差（地球が太陽の周りを公転することで起きるみかけの変化）だけでなく、太陽にたいして天体が相対的に運動する効果によっても変化します。これを天体の固有運動 (proper motion) と呼びます。固有運動は通常、天体の赤経・赤緯の 1 年あたりの変化量によって表しますが、慣例では双方ともに角度秒の単位で表記します（赤経方向の固有運動は時間を単位としていないので混乱しないように注意してください）。赤経方向の固有運動は μ_α 、赤緯方向の固有運動は μ_δ としばしば表されます。

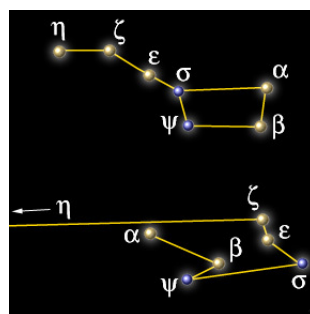


図 3: 北斗七星の固有運動。下図は固有運動の結果、1 万年後に予想される星の位置関係。

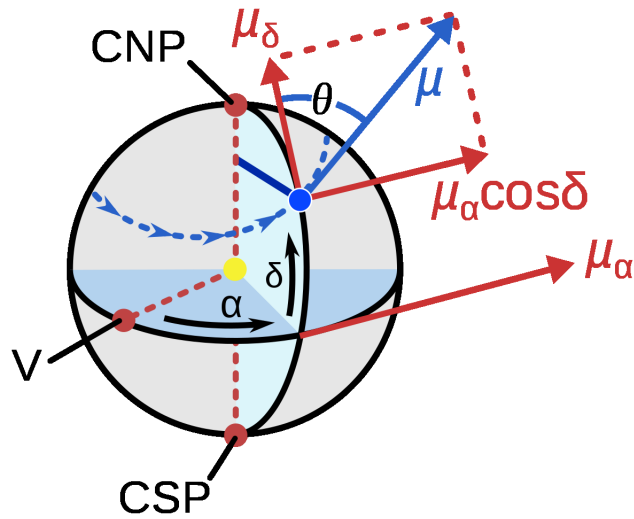


図 4: 固有運動のベクトルの概念図。CNP, CSP はそれぞれ天の北極と南極。V は春分点。黄色の点が観測者の位置で、青い点が天体の位置。天体が球面に接する方向の(角)速度が固有運動である。赤道上以外では、赤緯 δ が一定となる円は大円ではないので、単位時間あたりの赤経 α の変化 μ_α は固有運動ベクトルの α 方向の射影成分ではないことに注意(赤緯の補正因子 $\cos \delta$ が掛かる)。

問

ケンタウルス座 星 (αCen) の位置はユリウス日^a JD2451543.5 (2000 年 1 月 1 日正午) に赤経 $\alpha = 14^{\text{h}}36.8^{\text{m}}$ 赤緯 $\delta = -60^\circ 50'$ であったとします。その固有運動の座標成分は $\mu_\alpha = -3.678$ (角度秒/年), $\mu_\delta = +0.482$ (角度秒/年) です。この時点での αCen の固有運動の大きさを(角度秒/年)単位で表すといくらですか。

^a長時間に渡る天文学の観測では、通常私たちが使っている暦のような1年ごとにリセットされる日付の数え方は不便です。このためある時点を原点として日付、時間をカウントする暦表示を行います。ユリウス日 (Julian Day, JD) とは紀元前 4713 年 1 月 1 日 12^h(正午) から数えた日単位の経過時間をいいます。この日付は世界時 (\approx グリニッジ標準時) で測ります。天文学において時間をどう定義し、測るかということは実は簡単な問題ではありません。興味のある方は、シリーズ現代の天文学 13 「天体の位置と運動」(福島登志夫 編; 日本評論社) を参照してください。

2 天体までの距離

ここでは天体までの距離について概観します。

2.1 長さ, 距離

地球-太陽間の平均距離は天体までの距離を測るための基礎となります。この距離を 1 天文単位 (AU, Astronomical Unit) といい

$$1\text{AU} = 1.496 \times 10^8 \text{km} = 1.496 \times 10^{11} \text{m} \quad (1)$$

です。

問：1AU を求める

地球-太陽間の距離を求めるには色々な方法がありますが，ここでは金星による電波反射（レーダー）の観測を考えてみましょう．地球にある電波レーダーから金星に向かってある波長の電波を放射すると一部が反射されて戻ってきます．この往復の経過時間と，真空での光速 c が一定であることから金星の軌道半径と地球-太陽間距離などが求まります．ここでは簡単のために金星と地球はそれぞれ太陽を中心とする同心円状の軌道を描いて公転しているとします．地上のレーダーから金星に向けて発射された電波は最短で 4.6 分，最長で 28.7 分かかって戻ってくるとします．このとき，地球-太陽間の距離は何 m ですか．ただし $c = 2.9979 \times 10^8$ (m/s) とします．

太陽系内の天体までの距離は AU を単位として測るのが便利です．

地球から天体までの距離は有限であるために，地球が太陽の周りを公転することに伴って，その天体の天球上での射影の位置は非常に小さいながらも変化しています．これを天体の年周視差といいます．地球-太陽間距離を基線とする三角測量により，この年周視差の値を使って天体までの距離を定義することができます．

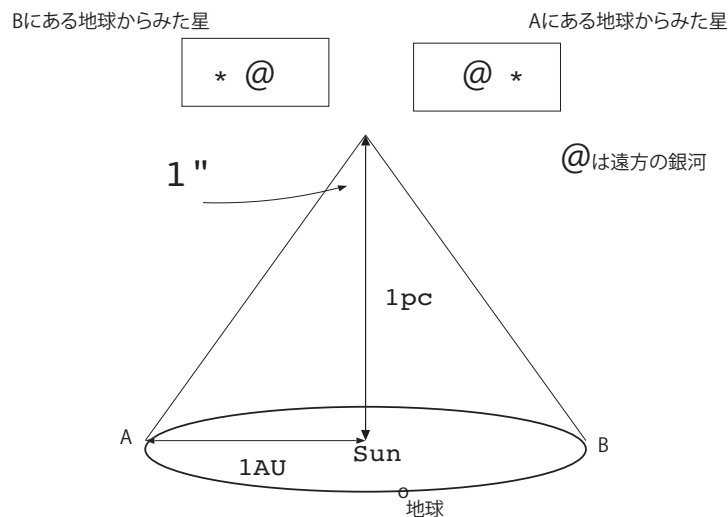


図 5: 1 パーセク (1 pc) の定義．遠方の銀河を背景にしたとき，星 * は地球の位置に依って，天球上の異なる位置にあるように見える． $\frac{1}{2}$ 年での見かけの移動の角距離の半分が $1''$ の場合，その星は 1 パーセクにある，と定義される．

1 pc (パーセク; parsec) とは，年周視差の値が 1 秒角になるような天体までの距離です (図 5)．年周視差 p'' と天体までの距離 D (pc) とは

$$D = 1/p \tag{2}$$

の関係があります．

[$1''$ はこんなに小さい!]

長さ 15cm のペンをどのくらいの距離だけ離れて見たときに，その角度が $1''$ になるか概算してみます．その距離を d とすると，

$$d \times \frac{1''}{3600} \times \frac{\pi}{180} = 15(\text{cm}) \tag{3}$$

という関係が得られます。この式を解くと、 $d = 31\text{km}$ になります。教養学部一号館時計台上においたペンを八王子、上尾、千葉などから見たときの角度がおよそ $1''$ です。

問

1pc は何メートルですか？(Google などに頼らず、自分で計算式を立ててください。)

一方、光が1年かけて進む距離(1光年)も距離の単位として使われることがあります。

問

太陽系から最も近い恒星 Proxima Centauri (α Cen C) の視差は $0.772''$ です。この星までの距離は何光年ですか？

問

日米欧の共同研究グループが、史上初めてブラックホールの影 (black hole shadow)^a の撮像に成功したという発表が 4/10 にありました (図 6)。リングのみかけの直径は $42\mu\text{as}$ とすると (μ は 10^{-6} : マイクロ秒角)^b、影の実際の大きさは冥王星の軌道の大きさ (軌道長半径 40AU) を超えることを確認しなさい。ただし、M87 までの距離は 16.8Mpc とします (M(メガ)= 10^6)。

^aブラックホール本体より少し大きな黒い円形領域が、ブラックホールの周りに存在する高温ガスからの光を遮っている様子です。

^bThe Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L1 (2019)



図 6: M87 楕円銀河の中心で観測されたブラックホールシャドウ (光のリングの真ん中の暗い領域)。

課題 2

1. `opencluster3D.dat` は太陽近傍の散開星団の 3 次元的な位置情報のデータです。第一列は銀経 ℓ 、第二列は銀緯 b 、第三列は太陽系から星団までの距離 $d(\text{pc})$ です。太陽を原点とし、銀河中心方向に x 軸の正方向、銀経 90 度方向に y 軸の正方向、銀緯 90 度方向に z 軸の正方向をとったデカルト座標を導入し、各星団の (x, y, z) 座標を (ℓ, b, d) から計算する式をつくりなさい (距離は kpc 単位でとることにします)。
2. `opencluster3D.dat` のデータを読み込んで星団のデカルト座標を 3 次元プロットする `gnuplot` の手続きファイルを作り、星団の空間分布をプロットしてみなさい。
3. `mwgc.dat` の第八列は銀経 ℓ 、第九列は銀緯 b 、第十列は太陽系からの距離 (kpc) となっています。これを読み込んで、散開星団の場合と同じスケールでプロットするように上の手続きファイルを書き直してプロットしてみなさい。両星団の分布の大きな違いは何ですか。