

第8章 暗黒物質の存在

8.1 宇宙のバリオン組成

8.1.1 光る星

宇宙の組成はまず光る物質を数え上げることから始まる。

表 8.1: 宇宙のバリオン組成 (単位は $\Omega = \rho/\rho_c$) (Fukugita, M. et al., APJ 503 (1998) 518)
通常物質が星となっているのはごくわずか (バリオンの中の 15%)。大部分は星間ガス。

成 分	中央値 ($z \approx 0$ での観測値)	最大値	最小値	評価
1. 球状星団内の星	$0.0026 h_{70}^{-1}$	$0.0043 h_{70}^{-1}$	$0.0014 h_{70}^{-1}$	A
2. 円盤内の星	$0.00086 h_{70}^{-1}$	$0.00129 h_{70}^{-1}$	$0.00051 h_{70}^{-1}$	A ⁻
3. 不規則銀河内の星	$0.000069 h_{70}^{-1}$	$0.000116 h_{70}^{-1}$	$0.000033 h_{70}^{-1}$	B
4. 中性原子気体	$0.00033 h_{70}^{-1}$	$0.00041 h_{70}^{-1}$	$0.00025 h_{70}^{-1}$	A
5. 分子気体	$0.00030 h_{70}^{-1}$	$0.00037 h_{70}^{-1}$	$0.00023 h_{70}^{-1}$	A ⁻
6. 銀河団内プラズマ	$0.0026 h_{70}^{-1.5}$	$0.0044 h_{70}^{-1.5}$	$0.0014 h_{70}^{-1.5}$	A
7a. 暖いプラズマ群 *1)	$0.0056 h_{70}^{-1.5}$	$0.0115 h_{70}^{-1.5}$	$0.0029 h_{70}^{-1.5}$	B
7b. 寒いプラズマ	$0.002 h_{70}^{-1}$	$0.003 h_{70}^{-1}$	$0.0007 h_{70}^{-1}$	C
7'. プラズマ群 *2)	$0.014 h_{70}^{-1}$	$0.030 h_{70}^{-1}$	$0.0072 h_{70}^{-1}$	B
8. 合計 ($h=70$ 、 $z \approx 0$)	0.021	0.041	0.007	...

*1 銀河団間に分布する銀河に付随する。

*2 原理的には $7' = 7a + 7b$ 、但し見積もり法が異なる。合計には $7'$ を使用。

しかし、表 8.1 から判るように、星の形で光を発している物質量は、全バリオンの中の $\lesssim 15\%$ 程度であり、大部分は星間ガスという形で存在する (図 8.1)。熱いプラズマは X 線源であり、暖かいプラズマはより波長の低い電磁波を放出するが、大部分は冷たいガスであるので光を発しない。こうしてあらゆる形態の気体を足し挙げると、全宇宙エネルギーに対するバリオン密度比 ($\Omega_B = \rho_B/\rho_c$) は、ほぼ 2% となる。これは、ビッグバン宇宙論より計算されるバリオン比をほぼ (2 倍以内の精度で) 再現する。

8.1.2 ビッグバン元素合成からのバリオン質量推定値

元素合成については、既に述べた。簡単に復習すると、ニュートリノがビッグバン後～1 秒で切り離され、直後に陽電子と電子の大部分が対消滅し、フォトンとごく少数(対フォトン比 $\sim 10^{-10}$) の陽子、同数の電子そして中性子が残り、3 分後に元素合成が行われて全ての中性子がヘリウムとわずかの重水素やリシウムになる。このとき生産された軽元素の計算量の最終値と観測値を図 8.3 に示す。これらの値は、 $\eta_B = \text{フォトン数}/\text{バリオン数}$ に依存するが、 $\eta_B \simeq 5 \sim 7 \times 10^{-10}$ とすると観測値を良く再現し、ビッグバン宇宙論検証の重要な証拠となつた。

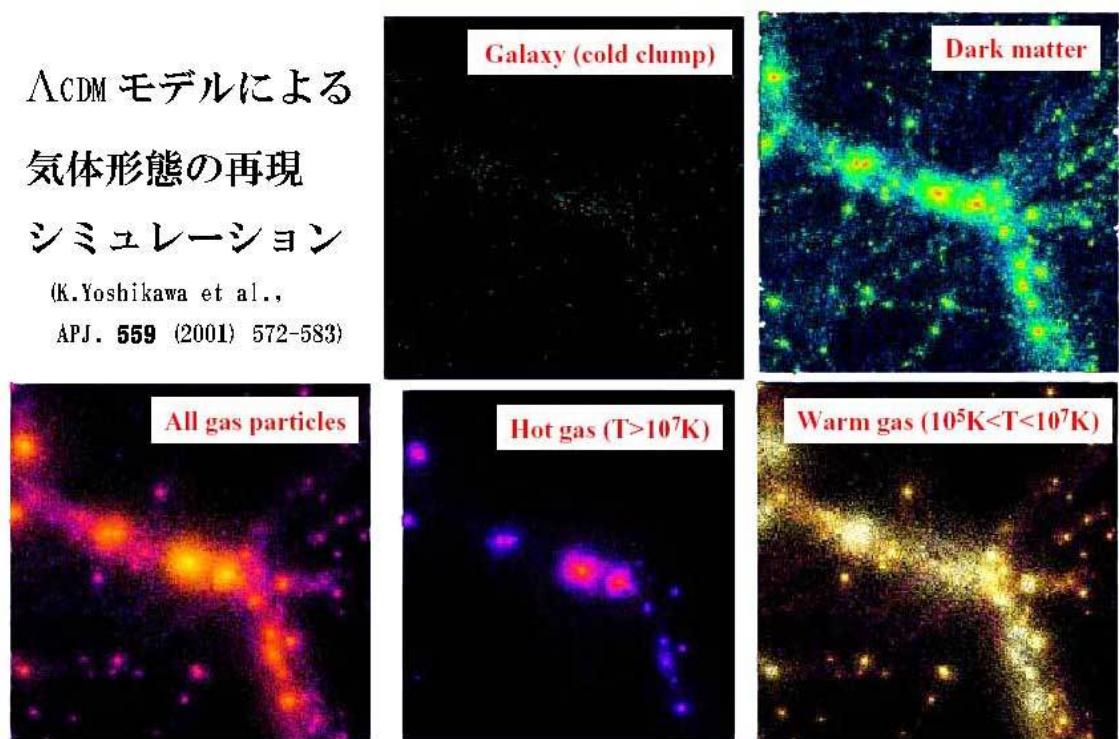


図 8.1: バリオン: 星間ガスの様々な形態。をシミュレーションで再現。



図 8.2: A group (i.e. a very small cluster) of galaxies superimposed on a x-ray image from the ROSAT satellite、

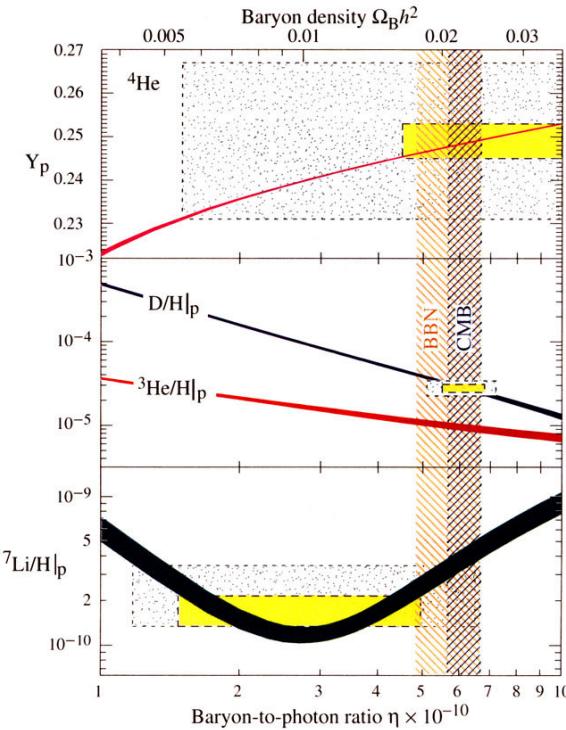


図 8.3: η_{10} (バリオン数/フォトン数の比(単位は $\eta_{10} = 10^{-10}$)) の関数で、軽元素観測値から決めた値は WMAP の背景輻射スペクトルより決めた値 ($\eta_{10} \simeq 6$) とほぼ合っている。(Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP1) Observations: Draft: March 16, 2006)。

重水素存在比は $\eta_B = n_B/n_\gamma$ に強く依存するので、観測値から η_B が、従って $\Omega_B = 0.021 \pm 0.004$ が精度良く決められた。

8.2 暗黒物質の存在証拠

暗黒物質の存在は、歴史的には 1933 年、かみの毛座銀河団内の銀河が、見える銀河の重力だけでは説明できないほど大きな速度分散を持つことから、ツヴィッキー (F.Zwicky) が始めて指摘した (Helv. Phys. Acta, 6 (1933) 110)。その後、1970 年代後半に電波 (HI ガス 21cm 輝線) による渦巻き銀河回転曲線の観測で、銀河内にも暗黒物質の存在することが発見されると共に、様々な天体物質における M/L(質量対輝度比)、X 線源、重力レンズなどの観測により、暗黒物質の存在は確固たる観測証拠の裏付けがある。

理論的にも暗黒物質は必要とされる。その理由は、

- 1) 銀河形成のシミュレーションによると、球状分布の大質量が無いと、銀河の円盤は重力的に不安定である。
(J.Ostriker and P.Peebles: ApJ 186(1973)467)
- 2) CMBR の温度ゆらぎは $\delta T/T \sim 10^{-5}$ であり、これから晴れ上がり時点 ($z=1100$) でのバリオンのエネルギー密度の一様性からのずれは、たかだか $\delta\rho/\rho < 10^{-4}$ 程度となる。質量ゆらぎの発達理論によれば、バリオンがフォトンと切り離されるまでは、質量ゆらぎは発達できない、またゆらぎが小さいときの成長率は、宇宙スケールに比例して線形的に発達する。現在の銀河分布など、小さいスケール ($R \lesssim 8h^{-1}Mpc$) での質量分布のゆらぎは 1 を越えているので、 $z=1100$ 時点でのゆらぎは少なくとも 10^{-3} を越えていなければならない。フォトンやバリオンと結合しない暗黒物質が存在すれば、晴れ上がり以前の物質輻射拮抗した時期から質量ゆらぎを発達させることができる。バリオンはフォトンから切り離された後、暗黒物質の持つ重力ポテンシャルに落ち込み、暗黒物質の質量ゆらぎに追随することで矛盾が解ける。以下、観測証拠について順に述べる。

8.2.1 銀河回転速度より

電波望遠鏡による中性水素分子の出す 21cm 輝線の測定により、銀河の光る円盤をはるかに越えた所まで、水素分子の回転速度が一定であることが判明した(図 8.4、8.5)。

ニュートン力学のエネルギー保存則の式を書くと

$$\frac{1}{2}mv^2 - Gm\frac{M}{r} = E \rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}, \quad \therefore v = \text{const.} \rightarrow M \propto r \quad (8.1)$$

銀河回転曲線からは、銀河質量は少なくも見える質量の数倍の物質量を含むことが判明した。

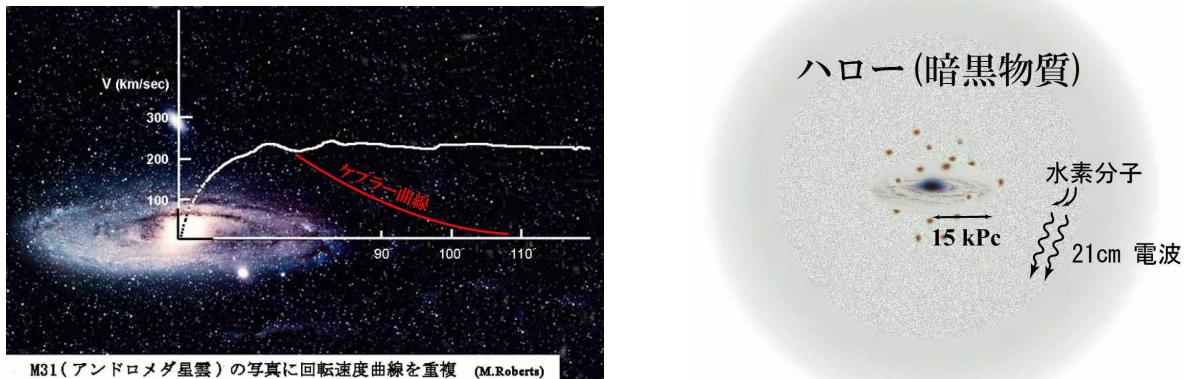


図 8.4: (左) アンドロメダ星雲の回転曲線。(右) 暗黒物質は銀河円盤を中心に球状に分布する。中性の水素分子(HI)の出す 21cm 電波を観測する事により、光らない部分の回転速度も分かる。

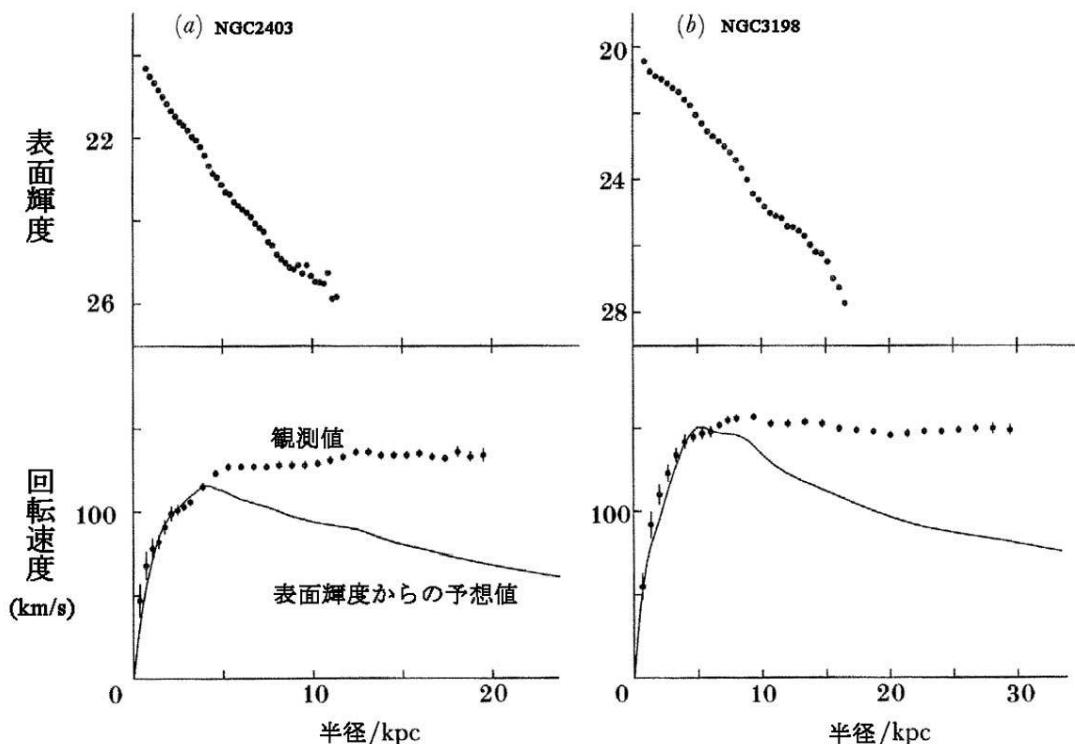


図8.5: 銀河の回転速度はほぼ一定であり、重力源質量が半径に比例して増えることを示す。速度一定の範囲は光る星の集団である円盤を越えた遠いところまでおよび、暗黒物質の存在を示す。

8.2.2 銀河団のヴィリアル質量

銀河の固有運動: 銀河団は束縛状態にある宇宙最大の天体物質である。銀河団内の個々の銀河の運動は乱雑である。完全に熱平衡状態にあるかどうかは議論のあるところであるが、少なくも次の議論ができる程度には発達していると仮定する。粒子が重力による束縛状態かつ熱的平衡にあれば、ヴィリアル定理(§8.7参照)により

$$E = \langle K \rangle + \langle U \rangle = \frac{1}{2} \langle U \rangle, \quad \langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle \quad (8.2a)$$

$$\langle K \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{G}{2} \int \frac{dm}{r} \simeq \frac{GM}{R} \quad (8.2b)$$

ここに、 $\langle K \rangle$ は銀河の持つ平均運動エネルギー、 $\langle U \rangle$ は平均ポテンシャルエネルギーである。すなわち銀河団内の銀河の速度分散と平均距離が判れば、銀河団の総質量が判る。多数の大銀河団(銀河数が数百以上)について $M = 10^{14} \sim 10^{15} M_{\odot} > 10 \times$ 光る物質量である。



図8.6: かみの毛座銀河団。3.5億光年の彼方。1000個以上の多くはだ円銀河を含むほぼ球状の銀河団。

8.2.3 巨大X線源

銀河団はしばしば強力なX線を放出している(図8.7参照)。X線は高温 $\sim 10\text{keV}$ (~ 1 億度)のバリオンガスが制動輻射により発生するものであり、このような高温の気体をつなぎ止めるには相応の重力が必要である。X線源の強度や全エネルギーから必要な全質量を計算できる。やはり、光る銀河団を大幅に上回る質量を与える。

観測によれば、X線源ガスの質量は、見える質量の1-5倍あり、銀河団全体の $\sim 7\%$ を占め、全銀河団質量は、 $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$ と計算される。見える質量の寄与は $\sim 2\%$ である。こうしてX線輝度から計算した銀河団質量は、先のヴィリアル質量とほぼ一致する。

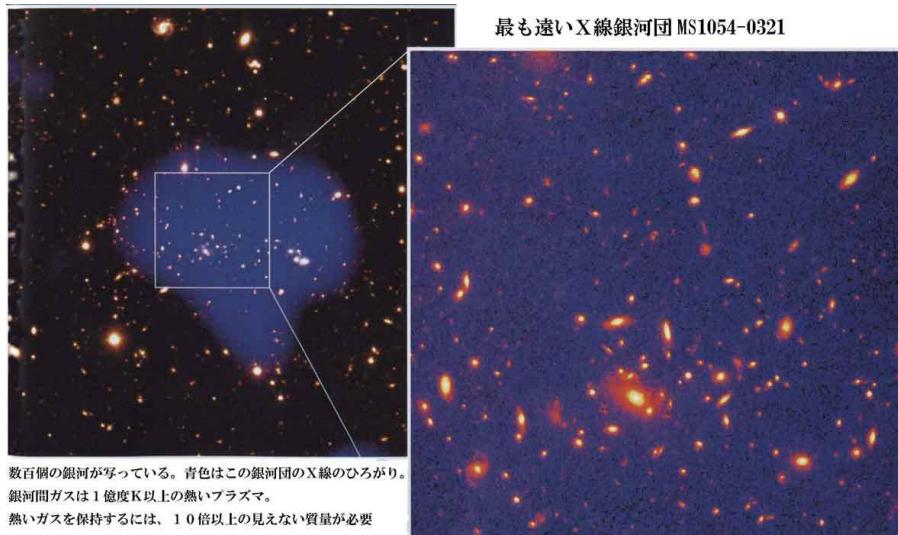


図 8.7: 銀河団 MS1054-0321: 80 億光年 ($z=0.831$) の彼方にある。 $M > 8 \times 10^{14} M_{\odot}$ で、さしわたし $\sim 3Mpc$ の宇宙空間に数千もの銀河を含む。(左) 銀河団の写真に X 線映像(青色)を重ねたもの(共に地上で撮影)。(右) ハッブル望遠鏡で撮影した拡大図

演習問題 8.2.1. $R = 3Mpc$ の球状分布の銀河団から、一様に X 線が放射されているとしよう。X 線を放射するバリオンの平均運動エネルギーを $\sim 1KeV$ として、式 (8.2b) を使って、銀河団質量 M を計算すれば、 $M \sim 6.6 \times 10^{14} M_{\odot}$ であることを示せ。銀河質量 $= 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ とすれば、これは大体銀河 3300 個分の質量に相当する。

8.2.4 重力レンズ

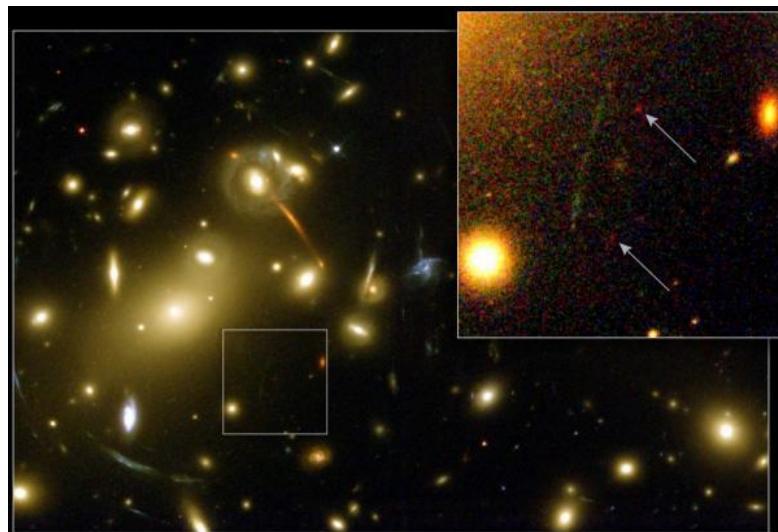


図 8.8: Abel2218 超銀河団 (20 億光年) の重力レンズ効果による遠方銀河のアーク状映像。ハッブル・ケック望遠鏡合作。青:若く熱い星。黄・白:様々な星。赤:冷たく年老いた星。(右上挿入写真)一部拡大図:重力レンズにより ~ 30 倍に拡大された非常に遠方 (134 億光年) にある銀河の 2 重像(矢印)が見える。この非常に若い銀河は、わずか $\sim 10^6$ 個の銀河を含むだけであり、初期銀河形成の知識を与える。

8.3 宇宙物質重量比 Ω_m 値の推定

8.3.1 質量対輝度比 (M/L) による算出

M/L(質量対輝度比) は、銀河から双子銀河、銀河群、銀河団、大銀河団とサイズ (R) 大きくするとと共に大きくなる。典型的な大銀河団は、 $R \gtrsim 1\text{ Mpc}$ で $M = 10^{14} \sim 10^{15} M_\odot$ 、 $M/L \sim 300$ を持つ。この比が宇宙の至る所で成り立つとして、全宇宙の輝度分布について積分してやれば、宇宙における全質量密度が求められ、 $\Omega_m = 0.2 \sim 0.3$ となる(図 8.9 左)。この計算結果は、M/L 比が暗いところと明るいところで異なると変わり得るという不確定性を持つ。

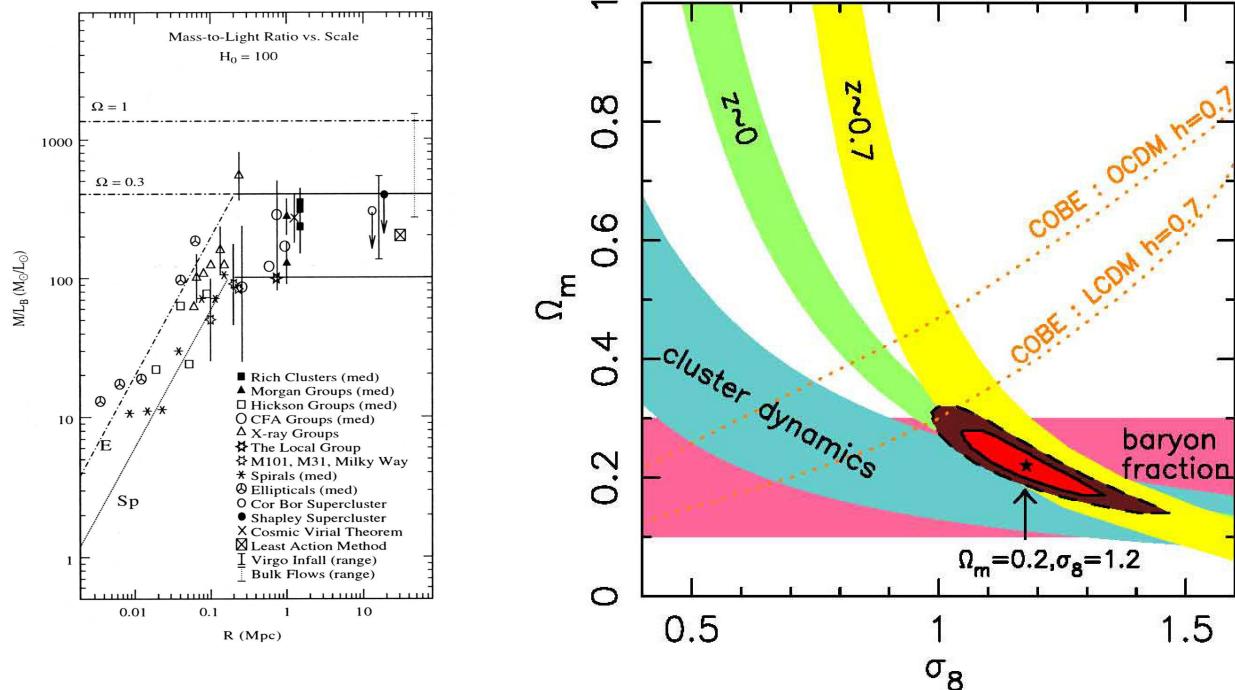


図 8.9: (左) M/L_B (質量対輝度比 : L_B は青色光輝度) を太陽の M_\odot/L_\odot を単位とし、対象天体の広がり (R) の関数としてプロットしたもの。 $R \gtrsim 0.3\text{ Mpc}$ で平坦になり $\Omega_m \simeq 0.2 \sim 0.3$ であることを示している。(右) 銀河団分布観測値を冷たい暗黒物質シミュレーションで解析すると、 $\sigma_8 \Omega_m$ の値が得られる。異なる z での値から、解が求められる。Cluster Dynamics は M/L から、baryon fraction は、銀河団 X 線源によるバリオン質量比と元素合成によるバリオン密度予想値から得られる値を示す。(N.A.Bahcall; Physica Scripta T85(2000) 32-36)

8.3.2 バリオン質量/暗黒質量

星の重量推定値は

$$0.0002 < \Omega_* \simeq 0.003 \quad (8.3)$$

これからバリオンの大部分は銀河間ガスとして存在することが判る。遠い($z \lesssim 6$) クエーザーの出すライマンアルファ(Ry α) の吸収線より、宇宙に分布する中性水素元素の厚みが測定でき、中性原子の重量が推定できる。

$$\Omega_{HI} \simeq 10^{-5.5} h^{-1} \quad (8.4)$$

これはバリオン総数よりはるかに小さい量であるので、銀河間バリオンガスは高度にイオン化していることが判る。Ry α の森(密集した吸収線)の解析から、重水素存在量を精度良く決めることができ、ビッグバン軽元素合成理論と比較してバリオン重量比

$$\Omega_B h^2 = 0.021 \pm 0.004 \quad (8.5)$$

と決められる。銀河間プラズマは密度が濃いと制動輻射によりX線を放出するが、この現象は銀河内において特に顕著である。このX線強度を調べることにより、X線を放出するバリオン量が分かる。不明所在のバリオンがあることを考慮すると、X線放出源によるバリオン量推定値は、バリオン存在比の最低値と見なせる。X線源をつなぎ止める暗黒物質の量(§8.2.3 参照)との比から。

$$\frac{M_{\text{バリオン}}}{M_{\text{total}}} \gtrsim 0.009 + (0.066 \pm 0.003)h^{-2/3} \sim 0.12 \quad (8.6)$$

すなわち、バリオンは全物質(暗黒物質+バリオン)の少なくも12%を占めていることが判り、上のバリオン存在比を入れると全物質量の上限値が $\Omega_m \leq 0.175h^2 \sim 0.35$ と与えられる。これは、質量光度比から推定した暗黒物質存在量よりはるかに確度の高い上限値を与える。

8.3.3 銀河団の成長速度

銀河分布質量ゆらぎの参照によく使われる σ_8 は、 $8h^{-1}\text{Mpc}$ スケールの質量ゆらぎで、銀河観測は $\sigma_8 \simeq 1$ を与えるが、ヴォイドなど暗い部分での値は不明である。質量分布が輝度分布に追随するのであれば、宇宙全体の σ_8 も ~ 1 であるが、暗い部分における質量存在比は小さいとすれば、宇宙全体では小さい値となり得る。現時刻($z=0$)での銀河団分布観測値を、冷たい暗黒物質のシミュレーションで解析して、 $\sigma_8 \Omega_m^{1/2} \sim 0.5$ という関係式を得ることができた。この式ひとつだけのみからは、 Ω_m と σ_8 を分離できない。しかし、銀河集団は Ω_m の値が大きいほど発達速度が大きいので、異なる z での銀河集団数分布、特に大銀河団数分布を観測することにより、 $\sigma_8 \Omega$ の別の値を得て、この縮退を解くことができる。図8.9では $z = 0$ と ~ 0.7 の二つの観測値を合わせて、 $\Omega_m \sim 0.2$, $\sigma_8 \sim 1.2$ を得た。対バリオン重量比から決めた Ω_m の値(§8.3.2 参照)と良い一致を示している。^{*1)}

8.4 宇宙マイクロ波(WMAPの成果)

宇宙マイクロ波は、引き続き熱的平衡状態にあり、再結合時^{*2)} ($t = t_{\text{rec}} \sim 25$ 万年くらい)までは、フォトン・電子・バリオンが結合したプラズマ状態にあった。 $t = t_{\text{rec}}$ で、電子と水素ヘリウム原子核が結合して中性原子となり、電気的に中性となるので、この時刻以降はフォトンは散乱されずに自由に飛来できる。これを晴れ上がり^{*3)}と呼ぶ。再結合以前は、フォトン・バリオンプラズマは音波として振動している。音速は $v_s \simeq \sqrt{\frac{1}{3}}c$ で光速度に近い。音波は粗密波があるので、密度の濃いところと薄いところでエネルギー密度に差が従って温度に差ができる^{*4)}。パイプ内の音波が、半波長の整数倍がパイプ長に一致するところで共鳴を起こすように、宇宙マイクロ波フォトンもまた、波長が時刻ゼロより音波で到達可能な最大距離(音波の地平線)の整数倍の所で共鳴を起こし、この強弱が観測可能である。スペクトルの形を調べることにより種々の宇宙変数が決められるが、ここで重要なのは、山の間隔=音波地平線の長さ(より正確には見込み角)から、宇宙空間の曲率が判り、n番目とn+1番目(n=1)の山の高さの相対比からバリオン密度 Ω_m が判る。理由は、フォトンとバリオンは堅く結合したプラズマ状態にあるが、バリオンは重いので引きずり効果があり、圧縮は助け膨張は妨げる方向に働く。従って最大圧縮(第1の山)と次の最大膨張(第2の山)では同じ振幅にならない。種々の宇宙変数を変えたときのゆらぎのスペクトル変化を図8.10に示す。最近のWMAP観測衛星の得た宇宙マイクロ波の温度ゆらぎデータを解析した結果から得られた η_B は、元素合成理論から得られた値と一致する。

^{*1)} 最近のWMAPデータによる値は、 $\sigma_8 = 0.9 \pm 0.1$, $\sigma_8 \Omega_m^{0.6} = 0.44 \pm 0.1$ である。

^{*2)} Recombination: 電子と陽子は始めて結合するので再結合というのは少しおかしいが、慣例的にこう呼ぶ。

^{*3)} 再結合は、中性原子とプラズマがほぼ半々になる時期で、晴れ上がりは宇宙がフォトンに対して透明になるとき、すなわち電子による散乱率がハッブル定数より小さくなる時期である。プラズマ成分は($X_e = 10^{-4} \sim 10^{-5}$)位となっている。

^{*4)} 視角が大きいところは、温度のゆらぎの原因が異なる。すなわち音波地平線より大きいところは、暗黒物質の重力ポテンシャルをはい上がることに伴う赤方遷移が原因である。

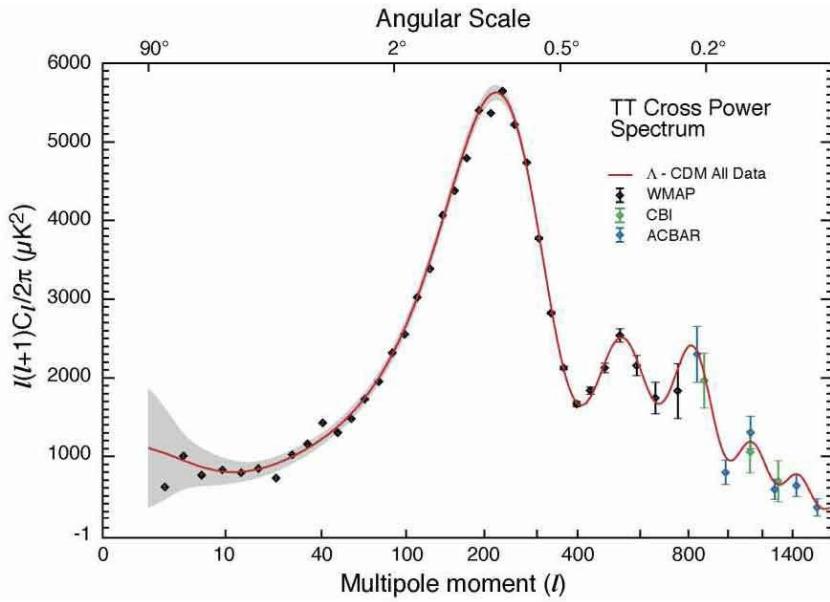


図 8.10: WMAP の背景輻射スペクトルより決めた値 ($\eta_{10} \simeq 6$) は、重水素の存在比観測値とビッグバン元素合成理論から決めた値と合っている。(Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP1) Observations: Draft: March 16, 2006)。

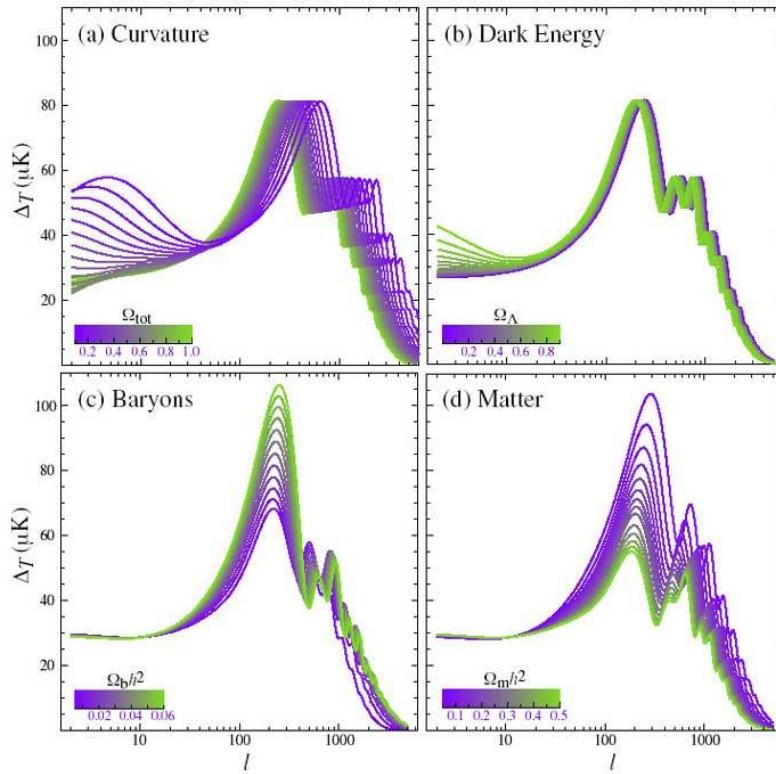


Plate 4: Sensitivity of the acoustic temperature spectrum to four fundamental cosmological parameters (a) the curvature as quantified by Ω_{tot} (b) the dark energy as quantified by the cosmological constant Ω_Λ ($w_\Lambda = -1$) (c) the physical baryon density $\Omega_b h^2$ (d) the physical matter density $\Omega_m h^2$, all varied around a fiducial model of $\Omega_{\text{tot}} = 1$, $\Omega_\Lambda = 0.65$, $\Omega_b h^2 = 0.02$, $\Omega_m h^2 = 0.147$, $n = 1$, $z_n = 0$, $E_i = 0$.

図 8.11: WMAP の背景輻射スペクトルより決めた値 (背景輻射スペクトルのパラメーター依存性。 (W.Hu and Dodelson: Cosmic Microwave Background Anisotropies, Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 2002)

図 8.10 右のシミュレーションを観測値と合わせることにより

$$\Omega_{m0} \equiv \Omega_{total\ matter} h^2 = 0.135 \pm 0.009 \quad (8.7)$$

という値が得られる。また $\Omega_B h^2 = 0.0223 \pm 0.006$ であり、 $h = 0.72$ を入れると $\Omega_B \simeq 0.043$ となる。

なお、再結合によって中性化した水素原子は、1億年後位 ($z \sim 15$) に、最初の天体 (巨大星) が形成されるとその放射紫外光により、ふたたびイオン化する。実際、クエーザーが発するライマン α 電波の観測から、銀河間ガスはほとんどプラズマ状態にあることが分かっている。

次の表に、WMAP による宇宙マイクロ波観測の解析から得られた代表的な宇宙変数の値を示す。

(http://map.gsfc.nasa.gov/m_m/pub_papers/threeyear.html)。

図 8.12 は、現時点での宇宙組成を示す。

ハッブル定数	$H_0 = 100h \text{ km sec}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ ($h = 0.732 \pm 0.03$)
ハッブル時間	$t_H = H_0^{-1} = h \times (9.778 \text{ Gyr})^{-1} \simeq 1.37 \times 10^{10} \text{ years}$
宇宙年齢	$13.7 \pm 0.3 \text{ Gyears}$
バリオン密度	$\Omega_B = 0.02233 h^2 \pm 0.0008 \simeq 0.044$
バリオン数/フォトン数	$\eta_B = 6.1 \pm 0.3 \times 10^{-10}$
物質密度 (バリオン+暗黒物質)	$\Omega_m h^2 = 0.1262 \pm 0.006 \rightarrow \Omega_m = 0.236 \pm 0.03$
真空密度	$\Omega_\Lambda = 0.728 \pm 0.03$
曲率 ($\Omega_K = 1 - \Omega_m - \Omega_{rad} - \Omega_\Lambda$)	$\Omega_K = -0.010 \pm 0.015$
σ_8	0.737 ± 0.04

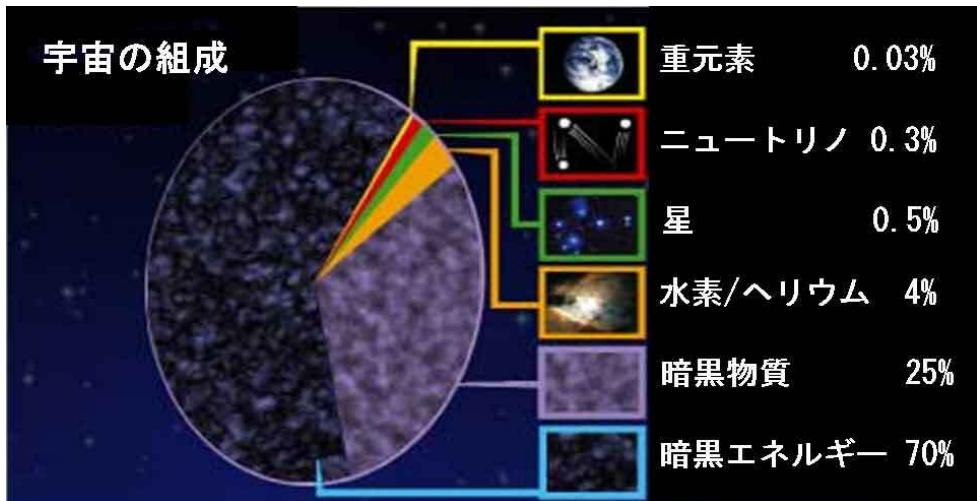


図 8.12:

8.5 暗黒物質の種類

暗黒物質であるための条件

- 電気的に中性。

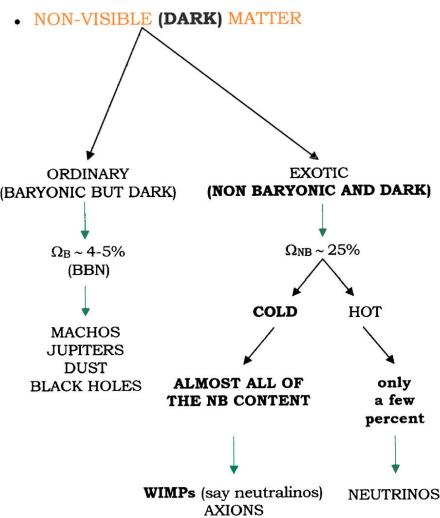


図 8.13:

2) カラーを持たない。 1) + 2) → 相互作用が弱い

3) 質量を持つ。

4) 正しい宇宙残存量 $\Omega_{DM} \simeq 0.24$

を充たす候補はいろいろある。

候補としては、光らない星（木星型褐色矮星、ブラックホール、星間ガス（ダスト）、ニュートリノ、アクシオン、WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) などがあげられる。物質輻射均衡時点で相対論的 ($v >> c$) もしくは非相対論的 ($v << c$) であったかにより、熱い暗黒物質と冷たい暗黒物質に分類される。熱い暗黒物質の代表例はニュートリノで、その他の暗黒物質はほとんど冷たい暗黒物質である。

MACHO: 光らない星には褐色矮星、中性子星、ブラックホールなどがある。これらを総称して MACHO (MAssive Compact Halo Objects) と呼ぶ。銀河内ハローにあり、地球近傍の MACHO が星への視線を横切ると、星の光が MACHO の重力レンズ効果によって増光する。MACHO 実験では、大マゼラン星雲の 8.5 億個の星の時間曲線を観測し、8 個の候補を見つけた。この数は、観測装置の雑音レベルを越えてはいるが、数が少ない。小マゼラン星雲観測を含む EROS グループ観測結果をも総合すると、MACHO は銀河の暗黒物質の主成分にはなり得ない（図 8.14）。

元素合成の議論からも、バリオン成分は暗黒物質の主成分ではあり得ないとは予想されたことであった。従って、暗黒物質はバリオンでないと結論して良いであろう。

ニュートリノ: もしニュートリノ質量が $\gtrsim 20\text{eV}$ の範囲にあるならば、暗黒物質の主要成分になり得るが、ニュートリノは熱い暗黒物質であり、銀河構造形成のシミュレーションとは一致が良くないことは以前から指摘されていた。スーパー神岡実験などによるニュートリノ振動効果発見により、ニュートリノ質量は小さく暗黒物質の主要成分にはなり得ないことが分かり、候補から除外された。

アクシオン: アクシオンは非常に軽いが、熱的でないわゆる傾斜 (misaligned) アクシオンは、極低温でボーズ・AINSHUTAIN縮退状態にあるので冷たい暗黒物質に分類される。アクシオンの存在は強い相互作用が CP を保存することの解決策として提案されたが、数々の実験や観測で存在可能範囲が非常に狭まっており、現在開いている窓は、ほぼ質量が $10^{-6} \sim 10^{-3}\text{eV}$ 程度に限られる。アクシオンは 2 個のフォトンに崩壊できるので、強い電磁場に通せば、アクシオン質量に等しいエネルギーを持つフォトンが放出される。マイクロ波技術を使った実験が進行中である。

WIMPS: 現在暗黒物質の最有力候補と目されているのは、素粒子論で予言される超対称性 (SUSY) に伴う粒子である。超対称性は、既知の粒子と同じ相互作用をするが、スピンが $1/2$ 異なりかつ質量の大きい（典型的に数百

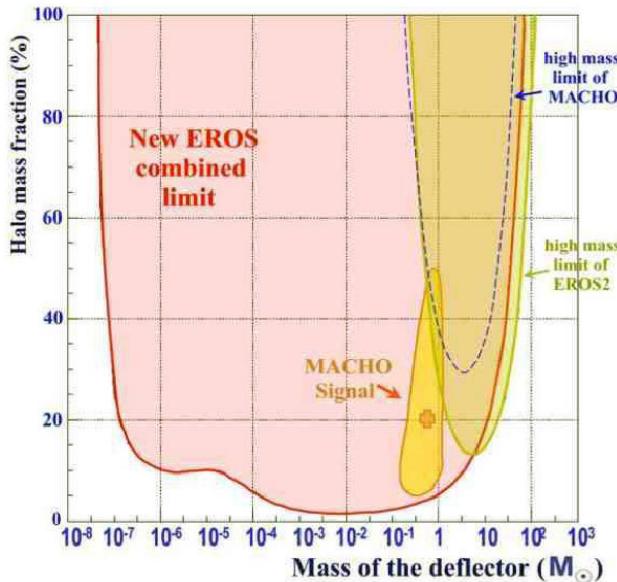


図 8.14: 銀河内ハロー MACHO 存在の 95%CL 除外領域。ドット線は質量の大きい領域の MACHO 実験除外領域。矢印で囲んだ領域は、MACHO 観測による存在許容領域であるがその後 EROS 実験により除外された。太線は総合。EROS 実験は、MACHO 質量が $10^{-6} < M < 3M_{\odot}$ の範囲で銀河ハローに対する寄与は 10%以下と結論した。(Astron. Astrophys. **400** (2003) 951; astro-ph/0212176)

GeV)SUSY 粒子が全ての既知の粒子のパートナーとして存在することを予言する。R パリティ(SUSY 粒子が持つ固有の量子数)が保存すれば、最も軽い SUSY 粒子は安定である。SUSY 粒子と通常粒子との相互作用は、結合力の強さは通常粒子と同じであるが、質量の大きい中間状態を通すので実質的に弱くなり、おおむね「弱い力」程度の強さであり、WIMPS(Weakly Interacting Massive Particles)と総称する。電気的に中性のニュートラリーノ(χ と書くことにする)は暗黒物質としての望ましい性質を全て備えている。ニュートラリーノとは、フォトン、Z ボソン、中性ヒッグス粒子の超対称性パートナーの混合状態でスピン 1/2 を持つマヨラナ粒子である。

$$\chi \equiv a_1 \tilde{\gamma} + a_2 \tilde{Z} + a_3 \tilde{H}_1^0 + a_4 \tilde{H}_2^0 \quad (8.8a)$$

$$P > 0.9 \rightarrow \text{gaugino}, \quad P < 0.1 \rightarrow \text{higgsino}, \quad P = a_1^2 + a_2^2 \quad (8.8b)$$

実験的には LEP や TECVATRON で探したが見つからず、質量下限値 $m_{\chi} > 35\text{GeV}$ (MSSM を仮定^{*5}) が得られている。

8.6 暗黒物質発見法

- 1) 加速器で SUSY WIMPS(ニュートラリーノ)を作る。LEP/TEVATRON で探したが見つからなかったので、 $m_{\chi} > 37\text{GeV}$ がわかっている。
- 2) 間接検出 1 : 地上もしくは衛星搭乗の検出器で観測する。観測対象は銀河内ハローに存在する WIMP の対消滅による生成物

$$\chi\chi \rightarrow t\bar{t}, b\bar{b}, WW, ZZ, \gamma\gamma \rightarrow e^-, p, d^-, \gamma, \nu, \dots \quad (8.9)$$

の粒子のスペクトルを観測して、通常とは違う異常な振る舞いを探す。BESS, GLAST, AMS, ISS 等。

- 3) 間接検出 2 : スーパーカミオカンデ、AMANDA などの地下検出器を使う。銀河中心、太陽、地球などに捕

^{*5} Minimum Super-symmetric extension of Standard Model

捉貯藏された WIMPS の対消滅による最終生成物としての高エネルギー・ニュートリノ探索。

4) 直接検出： 地球は銀河ハローの中を運行しているので、常に WIMPS の風にさらされている。WIMPS と検出器内原子核との弾性散乱による反跳原子核を検出する。次章での主題である。

銀河ハローの密度分布と速度分布 銀河内に存在する暗黒物質は銀河ハローと呼ばれる。

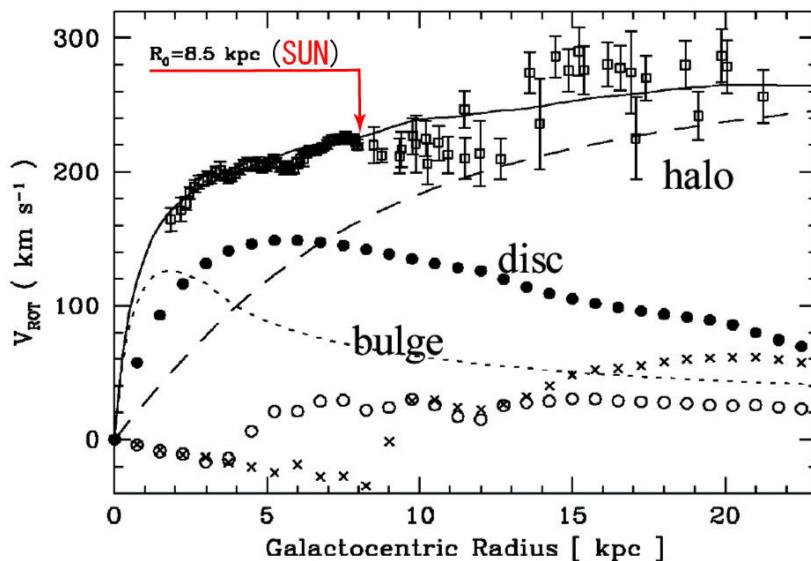


図 8.15: 天の川銀河の回転曲線

暗黒物質は、通常物質とは電磁相互作用も強い相互作用もせず、従って通常物質による分散効果を受けないので、銀河ハローにある DM は通常、球状分布で熱的(isothermal)なマクスウェル分布 $f(\mathbf{v}) \sim e^{-\mathbf{v}^2/v_0^2}$ を仮定する。 r 依存性については、中心付近での振る舞いが平坦なモデルとカスプ($r \propto r^{-\alpha}$)を持つモデルがある。

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_0}{1+r^2/r_0^2} \quad \text{or} \quad \frac{\rho_s}{(r/r_s)^\alpha(1+r/r_s)^{3-\alpha}} \quad \alpha \sim 0-1 \quad (8.10a)$$

$$f(\mathbf{v}) = \frac{1}{(\pi v_0^2)^{3/2}} e^{-\mathbf{v}^2/v_0^2} \rightarrow f(v) = \frac{4\pi v^2}{(\pi v_0^2)^{3/2}} e^{-v^2/v_0^2}, \quad (v = |\mathbf{v}|) \quad (8.10b)$$

$$\rho_0 \simeq 0.3 \text{ GeV/cm}^3, \quad v_0 \simeq 220 \text{ km/s} \rightarrow v_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_0 = 270 \text{ km/s} \quad (8.10c)$$

地球が居るあたりのエネルギー密度は約 0.3 GeV/cm^3 と推定されている。従って仮に WIMPS 質量が $\sim 100 \text{ GeV}$ 程度であるとするならば、 1 m^3 当たり約 3000 個存在し、毎秒、 1 cm^2 あたり約 6×10^4 個の WIMPS が我々の体を突き抜けている。

8.7 補遺： ヴィリアル定理

ヴィリアル定理は、空間的に孤立した系で、構成要素間に働く力が座標の同次関数である保存力の時、全系の運動エネルギー K とポテンシャルエネルギー U の時間的平均に関する関係式を与える。今、 N 個の質点(質量 m_k)からなる系を考える。各粒子の位置を \mathbf{r}_k として、次式で定義される慣性モーメントから出発する。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N m_k |\mathbf{r}_k|^2 \quad (8.11)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sum m_k \mathbf{r}_k \cdot \dot{\mathbf{r}}_k = \sum \mathbf{r}_k \cdot \mathbf{p}_k \quad (8.12a)$$

$$\frac{d^2I}{dt^2} = \sum \left[\mathbf{r}_k \cdot \mathbf{p}_k + \mathbf{r}_k \cdot \frac{d\mathbf{p}_k}{dt} \right] = 2K + \sum \mathbf{r}_k \cdot \mathbf{F}_k = 2K - \sum \mathbf{r}_k \cdot \nabla_k U \quad (8.12b)$$

n次の同次ポテンシャルの場合

$$U(a\mathbf{r}_1, a\mathbf{r}_2, \dots) = a^n U \Rightarrow \sum \mathbf{r}_k \cdot \nabla_k U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots) = nU \quad (8.13)$$

が成り立つから、この式を (8.12b) に入れれば

$$\frac{d^2I}{dt^2} = 2K - nU \quad (8.14)$$

ここで長時間平均を取れば、左辺は

$$\left\langle \frac{d^2I}{dt^2} \right\rangle = \frac{1}{t} \left\langle \frac{dI}{dt} \right\rangle_t - \left. \frac{dI}{dt} \right|_0, \quad \text{注: } \langle \dots \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t dt (\dots) \quad (8.15)$$

周期関数であればこれはゼロとなる量であり、周期関数でなくとも十分時間が経てば、乱雑系で第1項と第2項は打ち消し合うと考えられる。あるいは、質点多体系の持つ慣性モーメントが、長時間経てば安定して一定の値を持つと考えても良い。これをヴィリアル化した状態という。従って

$$\langle K \rangle = \frac{1}{2} n \langle U \rangle \quad (8.16)$$

エネルギー保存則

$$E = K + U \quad (8.17)$$

と合わせると

$$\langle K \rangle = \frac{n}{n+2} E, \quad \langle U \rangle = \frac{2}{n+2} E \quad (8.18)$$

Nが十分大きく、かつ十分に時間が経っていれば、熱力学的平衡状態にあると考えられるから、温度をTとすると

$$\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} \langle m_k v_k^2 \rangle = \frac{\langle K \rangle}{N} = \frac{n \langle U \rangle}{2N} = \frac{n}{2} \langle u \rangle \quad (8.19)$$

式(8.19)で定義される温度をヴィリアル温度といい、完全な熱力学的平衡状態と言えない系にも適用する。

ポテンシャルが重力の場合は $n = -1$ であるので、

$$\langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle = -E \quad (8.20)$$

例1：星の持つエネルギー： 星の持つ全エネルギーは、負で全ポテンシャルエネルギーの1/2、星を構成する粒子の運動エネルギーは全エネルギーの絶対値に等しい。分子雲ガスが星になる場合、元々の重力エネルギーはほぼゼロであるが、星になると負の重力ポテンシャルを持つ。星の全エネルギーは、この1/2であるから、残りのエネルギーは電磁波や光という形で解放されることになる。

例2：銀河団の質量： 系の全質量がMで半径がRの球状に一様に拡がった銀河団を考えると、熱力学的平衡条件が成立するという条件で

$$\langle u \rangle = -\frac{3}{5} G \frac{mM}{R} = \frac{1}{2} \langle mv^2 \rangle \quad (8.21a)$$

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_r^2 \rangle + \langle v_\theta^2 \rangle + \langle v_\phi^2 \rangle = 3 \langle v_r^2 \rangle \quad (8.21b)$$

$$\therefore M = M_{virial} \equiv \frac{5R \langle v_r^2 \rangle}{G} \quad (8.21c)$$

$\langle v_r^2 \rangle$ は視線方向の速度分散で観測量である。従って、銀河団の平均速度分散 $\langle v^2 \rangle$ 、平均距離 R を測ることにより、銀河団全体の質量を計算できる。上の定義による質量をヴィリアル質量という。

演習問題 8.2.1 の解答

$$G = (M_{Pl})^{-2} = (1.22 \times 10^{19} GeV)^{-2}, \quad \frac{1}{2}m_p v^2 = 1 KeV, \quad m_p = 0.938 GeV, \quad \hbar c = 0.2 GeV \times 10^{-15} m \quad (8.22)$$

を使い、次元を合わせるため $\hbar c$ を入れれば

$$M = \frac{1}{2}m_p v^2 \times \frac{R}{G m_p} = \frac{1}{2}m_p v^2 \times \frac{R}{\hbar c} \frac{M_{Pl}^2}{m_p} = (1 KeV) \times \frac{3 Mpc(m)}{0.2 GeV \times 10^{-15} m} \times \frac{(1.22 \times 10^{19} GeV)^2}{0.938 GeV} \quad (8.23)$$

$$1 Mpc = 3.1 \times 10^{16} m, \quad M_\odot = 1.99 \times 10^{30} kg, \quad 1 kg = 6.02 \times 10^{26} \times 0.938 GeV \quad (8.24)$$

を入れて計算すれば、 $M = 6.6 \times 10^{14} M_\odot$ を得る。