AST310 GÜNEŞ FİZİĞİ

2016 - 2017 Bahar Dönemi (Z, UK:3, AKTS:5)

5. Kısım

Doç. Dr. Kutluay YÜCE

Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi

Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü

Bir Yıldız Olarak GÜNEŞ'in Enerji Kaynağı / Kaynakları

Güneş’in enerji kaynağı ya da kaynaklarının irdelenmesi

Giriş:

Güneş’in atmosfer katmanlarında meydana gelen süreçler doğrudan gözlenerek incelenebilmektedir. İç yapı durumunda ise atmosferler kadar şanslı değiliz; doğrudan gözlenmesi mümkün değildir.

Yıldızın iç yapısını betimleyen parametreler ortaya konulduğunda, söz konusu iç yapı bölgesinin katmanlarına ilişkin özellikler ayrıntılı olarak anlaşılmaktadır.

‘Yıldız yapı denklemleri’ merkezden yüzeye kadar oluşturulur, bazı varsayımlar altında başlangıç değerleri ile çözülme yoluna gidilir. Elde edilen yüzey değerleri, gözlem sonuçları ile uyumlu çıkarsa iç yapı modeli anlamlı oluşturulmuştur.

Güneş'in enerji kaynağı ya da kaynaklarının irdelenmesi (devam)

Kısa Tarihçe:

Lord Kelvin ve Hermann von Helmholtz gibi fizikçiler 1800'lü yılların ortalarında Güneş için bir enerj kaynağı önerdiler: Kütle çekim (gravitasyonel potansiyel) enerji. Fakat buradan yapılan söz konusu hesaplar Güneş'in ömrünü birkaç on milyon yıl olarak verdi.

Radyoaktif parçacıkların 1890'lı yıllarda keşfedilmesinin ardından Güneş enerjisinin Güneş'teki radyoaktif parçacıkların ışınımı yoluyla üretildiği fikri uyandı. Ne var ki Güneş'te bol miktarda radyoaktif parçacığa rastlanmamıştı. Ancak Güneş'te bol miktarda hidrojen elementi var.

Güneş'in enerji kaynağı ya da kaynaklarının irdelenmesi (devam)

Kısa Tarihçe (devam):

1905'te Einstein'in özel Görelilik Kuramı'nı geliştirirken bulduğu $E=mc^2$ ifadesi kütle (m) ve enerji (E) arasındaki ilintiyi gösteriyordu. Bunun Güneş'in enerji kaynağı olup olmadığını açıklamak için 1920'leri beklemek gerekti: F. W. Aston dört hidrojen atomunun bir helyum atomundan binde yedi oranında daha hafif olduğunu belirledi.

A.Eddington hidrojen çekirdekleri birleşerek helyum çekirdeğine dönüşmesi sırasında (kaybolan) aradaki kütle farkının Güneş'in enerjini açıklayabileceğini ortaya koydu.

Güneş’in enerji kaynağı ya da kaynaklarının irdelenmesi (devam)

- ✓ ‘Gravitational’ büzülme/çökme ile açığa çıkan enerji
- ✓ Isısal Enerji
- ✓ Kimyasal reaksiyonlar

Güneş'in temel enerji kaynağı 'Gravitasyonel' büzülme (çökme) midir?

Gökbilim açısından bakıldığında, oldukça uzun yıllar mertebesindeki bir zaman süreci içerisinde enerji verebilecek bir başka mekanizma "büzülme" dir. (Sonsuz'dan Güneş'in $R_\odot$ yarıçapına kadar büzülmesi durumunda.)

Yıldız evrim modellerine göre; Güneş'in, kendi kütle çekimi altında büzülmeyi başlatacak kadar yoğun yıldızlararası gaz ve bulutundan oluştuğu varsayılır. Bulutun radyal simetriye sahip olduğu ve başlangıç kütlesinin $M_r = M(r)$ olduğunu (r ; merkezden bakış doğrultusu boyunca dikkate alınan mesafe) kabul edelim.

Bunun için sonsuz küçük bir $\Delta m = \rho \times 4\pi\, r^2\, \Delta r$ (ρ = kütle yoğunluğu olmak üzere) kütle elementi dikkate alalım. Gravitasyonel enerji salınması; sonsuzdan M_r kütlesine büzülünceye kadar salınan enerji miktarı:

$$\Delta E_G = \int_\infty^r g(s)\Delta m ds = \int_\infty^r \frac{GM_r}{s^2}(\rho 4\pi\, r^2 \Delta r) ds$$

$$\Delta E_G = \left[\frac{-GM_r}{s}\right]_\infty^r \rho 4\pi\, r^2 \Delta r = -\frac{GM_r}{r}\rho 4\pi\, r^2 \Delta r$$

Şimdi bütün kütle elementleri üzerinden şuan ki $R_\odot$ yarıçapına kadar integralini alalım :

$$E_G = -\int_0^{R_\Theta} \frac{GM_r}{r} \boldsymbol{\rho 4\pi}\, r^2 dr$$

Kelvin-Helmholtz zaman ölçeği

Yıldızlararası gaz ve tozdan oluşan Güneş'in sıkışması/büzülmesi sonucu açığa çıkan enerji gravitasyonel potansiyel enerji (hesaplanan) E_G'ye bakacak olursak:

(Şekle göre) Yoğunluğu sabit kabul edelim: $\rho_r = \rho_0$. $M_r = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0$

$$E_G = -\int_0^{R_\Theta} \rho_0^2 \frac{16}{3}\pi^2 G r^4 dr = -\rho_0^2 G \frac{16}{15}\pi^2 R_\Theta^5$$

Fakat ve

$$M_\Theta = M_R = \frac{4}{3}\pi R_\Theta^3 \rho_0 \qquad M_\Theta^2 = \frac{16}{9}\pi^2 R_\Theta^6 \rho_0^2$$

Burada; $R_\odot$ = Güneş yarıçapı ve $M_\odot$ = Güneş kütlesi olmak üzere;

$$E_G = -\frac{3}{5}\frac{GM_\Theta^2}{R_\Theta}$$

Yıldız çökerken gravitasyonel potansiyel enerjinin yarısı ısısal enerjiye, diğer yarısı ışınıma dönüşür (Virial Teoremi).

Eğer ömrü boyunca bugünkü parlaklığında olduğu kabul edilirse, Güneş'in bugüne kadar yaydığı enerji : $L_\odot t$ kadardır.

Öyleyse gravitasyonel büzülme olarak sağlanacak enerji karşılığı:

$$t = \frac{3GM_\Theta^2}{10R_\Theta L_\Theta}$$

Kelvin-Helmholtz zaman ölçeği (devam)

T; Kelvin-Helmholtz zamanı olarak biliniyor. Güneş için bu “zaman”; bütün gravitasyonel enerjisini salması için gerekli olan süredir.

Sayısal değerleri yerine yazılırsa: $M_{\odot} = 2.10^{30}$ kg , $R_{\odot} = 7.10^{8}$ m, $L_{\odot} = 4 \times 10^{23}$ kW , $G = 6.7 \times 10^{-11}$ SI units, aşağıdaki ifadeye sahip oluruz:

$$t_{KH} = \frac{3GM_{\Theta}^{2}}{10R_{\Theta}L_{\Theta}} \cong 3\times10^{14}\ \mathrm{sn} = 10^{7}\ \mathrm{y}$$

Kelvin-Helmholtz Zaman ölçeği

Bu yüzden, gravitasyonel potansiyel enerjinin ışınıma dönüştürüldüğü varsayıldığında, Güneş 10 milyon yıl parlayacaktı (10 milyon yıl). (Bu hesaplama oldukça kabaca bir tahmin verir).

Bu değer, Güneş’in gerçek yaşının yalnızca % 0.4 kadarıdır (göktaşı yaşlarından elde edilen).

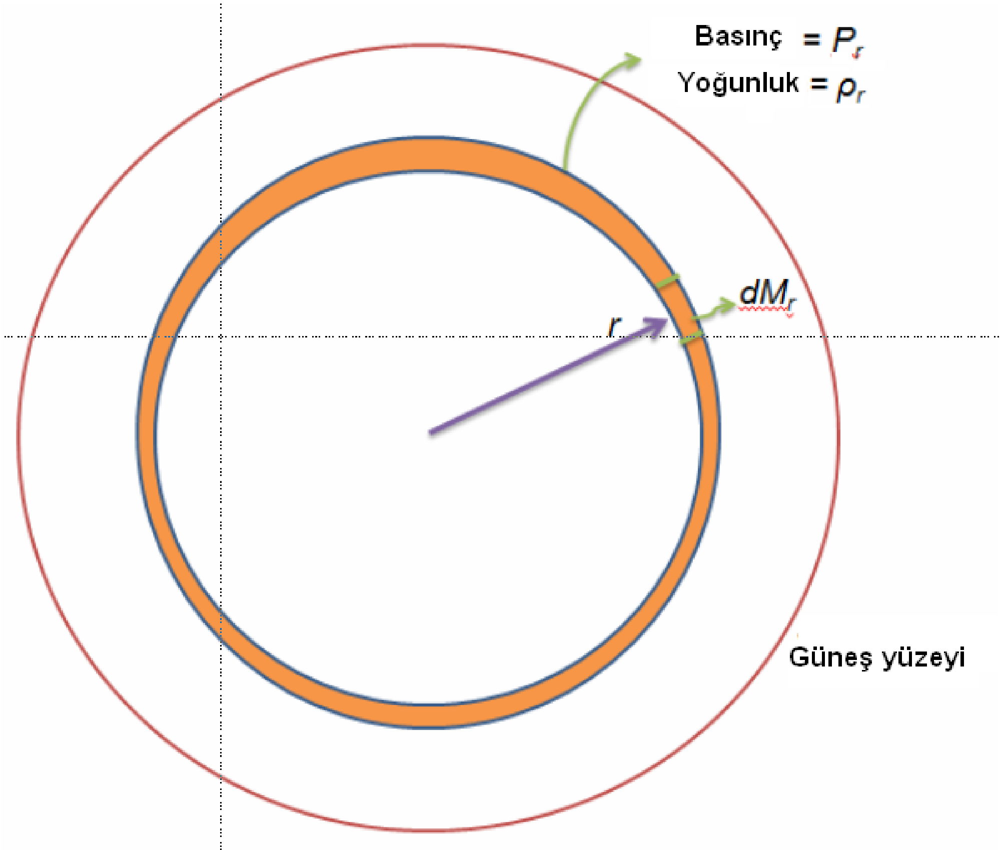
Hidrostatik Denge Denklemi

Kabullerimiz:

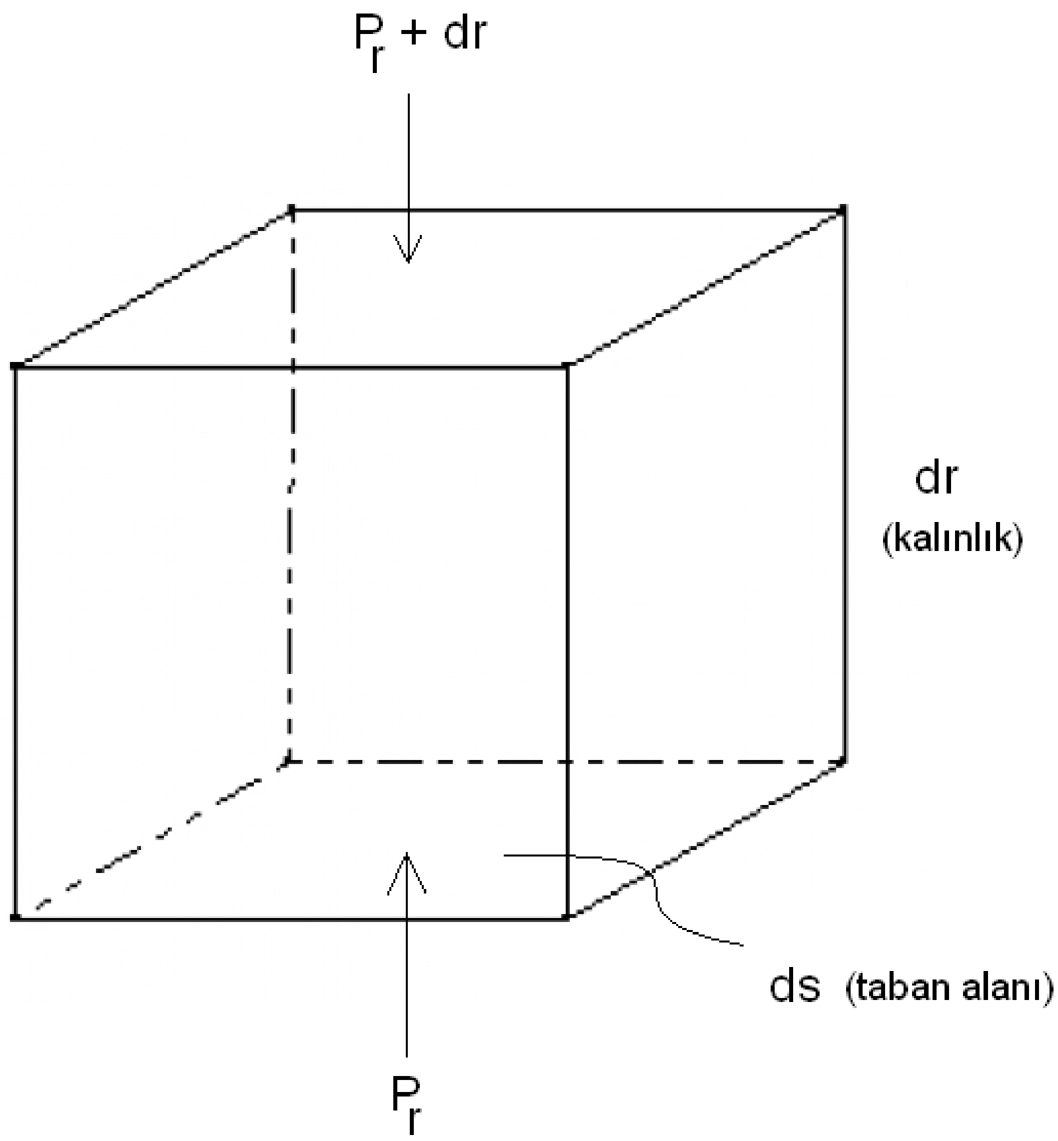
1) Küresel simetriye haiz olmalı,
2) Yıldızı gözlemlediğimiz süre içerisinde özellikleri değişmemeli,
3) Enerji üretimi ve salınımı (tüketimi) dengede olmalı.

Teorik Güneş içinde r yarıçaplı bir küre göz önüne alalım. Buna göre yıldızın merkezinden 'r' kadar uzaklıkta bir yerde sonsuz küçük hacim elementi dikkate almış olduk.

Bu hacim elementini o şekilde alıyorum ki; hacim elementinin alt ve üst tabanlarının merkezlerini yıldızın merkezine birleştiren doğru tabana dik olsun. Küresel simetriden dolayı yan yüzeylere etkileyen basınç kuvvetleri birbirini dengeleyecektir.



Küresel kabuk üzerinde sonsuz küçük hacim elementine yakından bakalım:



Hacim elementi dengede olmalı.

1) Merkeze doğru çeken "Gravitasyon Kuvveti"
2) Merkezden dışa doğru iten "Gaz Basıncı"

Hidrostatik Denge Denklemi

Varsayımlarımız hatırlayalım:
1) Küresel simetriye haiz olmalı.
2) Yıldızı gözlemlediğimiz süre içerisinde özellikleri değişmemeli.
3) Enerji üretimi ve salınımı (tüketimi) dengede olmalı.

Teorik Güneş içinde ‘r’ yarıçaplı bir küre gözönüne alalım. Buna göre yıldızın merkezinden r kadar uzaklıkta bir yerde sonsuz küçük bir hacim elementi dikkate almış olduk.

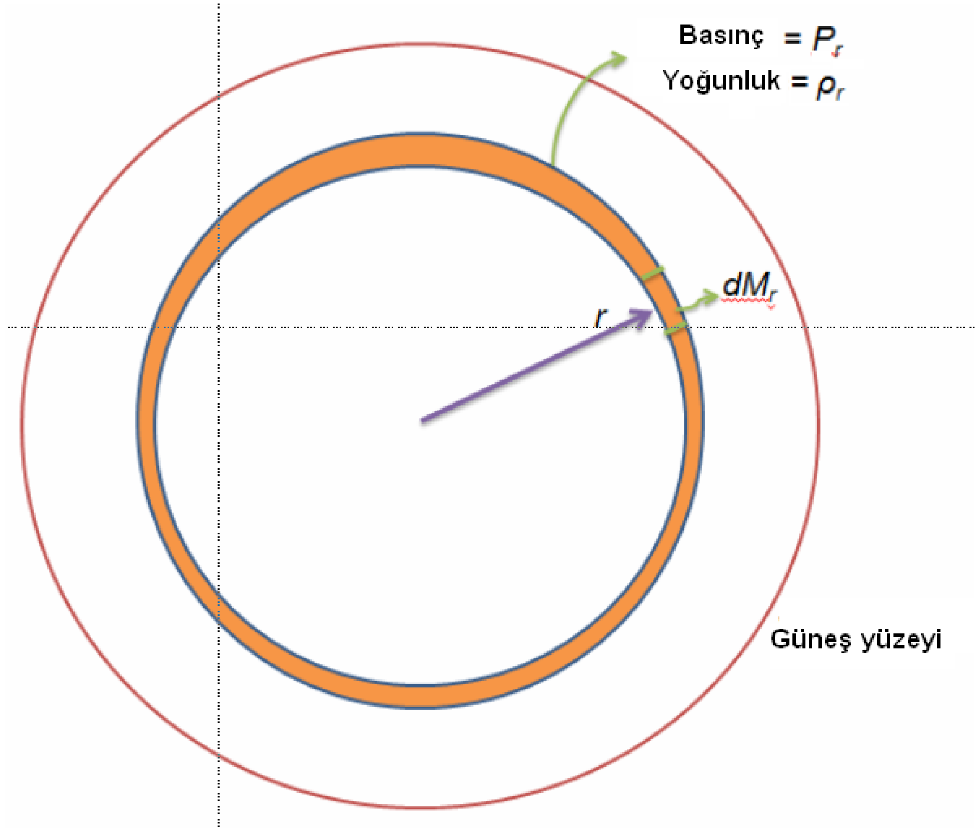
Bu hacim elementini o şekilde alıyorum ki; alt ve üst tabanın merkezlerini yıldızın merkezine birleştiren doğru tabana dik olsun. Küresel simetriden dolayıo yan yüzeylere etkileyen basınç kuvvetleri birbirini dengeleyecek.

kalınlık; dr

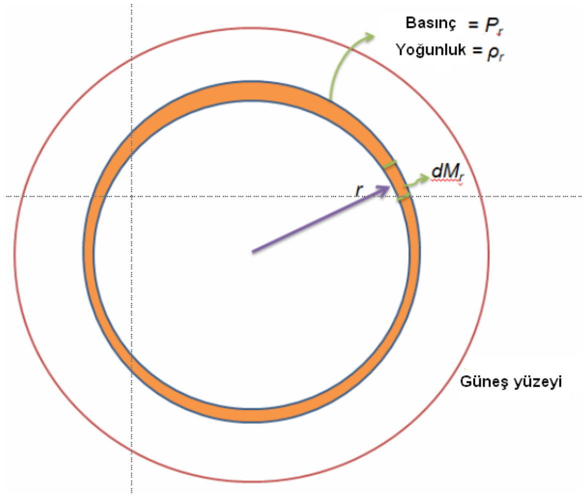
kütle; dM_r

silindirin her iki yüzeyi üzerinde basınç farkı; dP

yoğunluk farkı; dρ



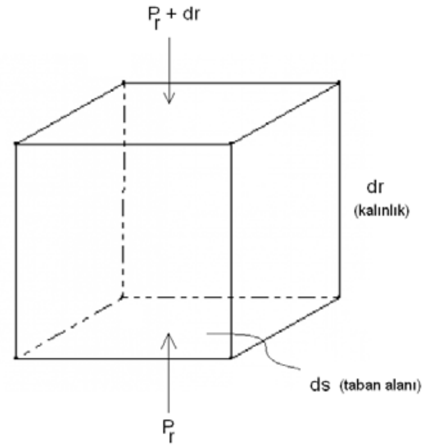
Hidrostatik Denge Denklemi



Alınan hacim elementi için:

- Alt tabana uygulanan gaz basıncı = P_r
- Üst tabana uygulanan gaz basıncı = P_{r+dr}
- Sonsuz küçük hacim elementinin kütlesi = m_1
- R yarıçaplı küre içindeki kütle = M_r

$$m_1 = \underbrace{ds \,.\, dr}_{\text{hacim}} \,.\, \rho_r$$



Hacim elementi üzerindeki net kuvvet : Dengede olma koşulu

$$P_{r+dr} \,.\, ds - P_r \,.\, ds + G \frac{M_r \, ds \, dr \, \rho_r}{r^2} = 0$$

$$\frac{dP_r}{dr} = -G \frac{M_r \, \rho_r}{r^2}$$

$$P_{r+dr} - P_r = \frac{dP_r}{P_r} \, dr$$ yazılabilir.

Hidrostatik Denge Denklemi (devam)

Hacim elementi için,

$$dP_r = - g_r \, dM_r$$

(burada g_r is gravitasyonel çekim kuvveti; r noktasında).

Ya da: $$dP_r = - g_r \rho_r \, dr \qquad (1)$$

Newton'un çekim yasasına göre,

$$g_r = G \, M_r / r^2 \qquad (2)$$

(burada G = genel çekim sabiti olmak üzere).

Böylece $$dP_r /dr = - G \, M_r \rho_r / r^2 \qquad (3)$$

Elde edilir. (Not: M(r) ρ(r) P(r) yerine M_r ρ_r P_r)

Bu eşitliğe 'Hidrostatik Denge Denklemi' de denir.

Bir başka ifade ile; "(Gaz) basınç", "Gravitation" ile dengelenir.

(Basınç Değişim Denklemi denir.)

Şimdi, M_r , ρ_r ve r are bağımsız değildir, çünkü r içinde bulunan kütle r içindeki madde yoğunluğu ile belirlenir.

r ve r + δr arasındaki küresel kabuğun kütlesini dikkate alalım. Kabuğun kütlesi, 4 π r^2 ρ_r δr ifadesi ile verilir (δr ; sonsuz ince kabuk olduğundan yoğunluk sabit alınabilir).

Aynı zamanda ince bir $M_{r+\delta r}$ ve M_r arasındaki fark; aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$M_{r+\delta r} - M_r = \left(\frac{dM}{dr}\right)\delta r$$

$4\pi\, r^2$	= r yarıçaplı kürenin alanı
$4\pi\, r^2\, \delta r$	= küresel kabuğun hacmi
$4\pi\, r^2\, \delta r\, \rho_r$	= küresel kabuğun kütlesi

Bu bize aşağıdaki eşitliği verir:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi\, r^2 \rho_r \qquad \text{‘Kütle Değişim Denklemi’} \qquad (4)$$

ya da

$$M_r = \int_0^r 4\,\pi\, r'^2 \rho_{r'}\, dr' \qquad (5)$$

3 ve 4 no'lu denklemleri birlikte ele alarak ve $4\pi\ r^3$ 'e bölümünden aşağıdaki ifadeyi elde ederiz;

$$4\pi\ r^3 dP_r = -4\pi\ r\ GM_r \rho_r dr = -\frac{GM_r}{r} dM_r$$

Güneş üzerinden integre edilmesi aşağıdaki ifadeyi verir.

$$3\int_{P_c}^{P_s} V_r dP = -\int_0^{M_\Theta} \frac{GM_r}{r} dM_r \qquad (6)$$

Burada V_r; r yarıçapı içerisindeki hacim;
($V_r = 4\ \pi\ r^3 / 3$), P_c ve P_s çekirdek ve yüzey basınçları,
$M_\odot$ toplam Güneş kütlesi.
(s;yüzey ve c; merkez bölgeleri belirtmek üzere).

$$3[P_r V_r]_c^s - 3\int_0^{V_\Theta} P_r dV_r = -\int_0^{M_\Theta} (GM_r / r) dM_r$$

$$3[P_r V_r]_c^s - 3\int_0^{V_\Theta} P_r dV_r = -\int_0^{M_\Theta} (GM_r / r) dM_r$$

Alt limit değerinde $V(r = 0) = V_c = 0$ ve üst limitte $P_s = 0$.

Güneş'in gravitasyonel potansiyel enerjisi PE = + Ω, örneğin; sonsuza dağılmış parçalardan Güneş'in oluşumu sırasında salınan enerji.

Not: Aynı zamanda $dM_r = \rho_r dV_r$ dir. Böylece:

$$3\int_0^{M_\Theta} (P_r / \rho_r) dM_r + \Omega = 0$$

'Virial Teoremi' nin bir ifadesi elde edilir.

İdeal bir gazın birim hacmi için,

yoğunluk sayısı n, toplam enerji = $n \times$ serbestlik derecesi sayısı $N_f \times k_B T / 2$ (k_B is Boltzmann sabiti) dir.

Böylece birim hacim başına ısı enerji :

$$\frac{nN_f k_B T}{2}$$

ve N_f ; maddenin aşağıdaki ifadelerle tanımlanan özgül ısılar oranı "γ" ile ilgilidir: $\gamma = (N_f + 2) / N_f$ ya da $\gamma = 1 + 2 / N_f$

Burada $\gamma = C_p/C_v$ olup, $N_f = 2 / (\gamma - 1)$ dir.

İdeal gaz basıncı; $P_r = n_r k_B T_r$.

Birim kütle başına termal enerji u_r olsun. Buradan:

$$u_r = \frac{1}{2} n_r k_B T_r N_f \frac{1}{\rho_r} = \frac{P_r}{(\gamma - 1)\rho_r}$$

ya da:

$$(\gamma - 1) u_r = \frac{P_r}{\rho_r}$$

dM_r ile çarpıp, integrali alınırsa:

$$\int_0^{M_\Theta} \frac{P_r}{\rho_r} dM_r = (\gamma - 1) \int_0^{M_\Theta} u_r dM_r \ \text{ or } (\gamma - 1)\, U$$

burada U Güneş'in toplam termal enerjisidir.
Virial Teoremi'nde (7 no'lu eşitlik) yerine yazılırsa:

$$3(\gamma - 1)U + \Omega = 0$$

Güneş içerisindeki yıldız maddesinin tamamen iyonize olduğu dikkate alınırsa, $\gamma = 5/3$ dir:

$$2U + \Omega = 0$$

Örneğin; (negatif Gravitasyonel Enerji) = 2 x (Isısal enerji)

Hatırlayalım; Kelvin-Helmholtz zamanı (örn.; gravitasyonel çekimsel çökme) Güneş enerjisinin tamamını karşılayamayacak kadar kısa bir zaman ölçeğini önermekte. Termal enerji süresi Kelvin-Helmholtz zamanı ile aynı mertebededir.. Dolayısıyla ne 'ısısal' ne de 'gravitasyonel çökme' Güneş'in yaklaşık 4.6×10^9 yıl boyunca tamemen ışınım enerjisini verebilir.

Şimdi Güneş'in toplam enerjisine, E, bakalım: $$E = U + \Omega$$

Burada $\Omega = -2U$ olduğundan $$E = -U = \frac{\Omega}{2}$$

"Ω" da azalma, "U" da artışa neden olur. Gravitasyonel enerji Güneş büzülürken (a) ışınım ve (b) gazın ısıtılmasında eşit miktarlarda salındı.

Böylece, özet olarak, Virial Teoremi aşağıdaki sonuçları sağlar:

1. Güneş'in enerji kaynağı ne ısısal ne de tamamı gravitasyonel çekimsel çökmedir;

2. Güneş büzülürken ısınır: Güneş çökerken Gravitasyonel enerjinin yarısı ısı enerjisine dönüşür, diğer yarısı ışınıma dönüşür.

Olası diğer enerji kaynakları

Fosil yakıtların yakılmasında olduğu gibi “Kimyasal Reaksiyonlar”. Fakat onlar nükleer reaktörlerde olduğu gibi durgun kütle enerjisinin $5x10^{-10}$ miktarına karşılık gelir. Oysa Güneş yaşamı boyunca durgun kütlesinin $3x10^{-4}$ miktarını kullanmıştır. Bu türden kimyasal reaksiyonlar ancak birkaç bin yıl boyunca Güneş’e enerji verebilir, bu yüzden Güneş için enerji kaynağı olamazlar.

Fisyon - fission (örneğin; Fe ve Ni gibi ağır elementlerin parçalanması reaksiyonu) “exothermic (örneğin; serbest enerji salması)” olarak mümkündür. Fakat Fe demir bolluğu Güneş enerjisini açıklamakta oldukça küçük bir miktardır (tipik olarak 10^{-4} H).

Güneş’in Temel Enerji Kaynağı

Güneş'in evrimi, yıldızlararası moleküler bir bulutun çökmesini takiben Güneş'in çekirdeğinde hafif elementlerin nükleer füzyon başlaması ile modellenmiştir. Küçük bir miktar kütle kaybı ile; temel füzyon reaksiyonu:
4p $\rightarrow$ He çekirdeği

“Füzyon” gerçekten Güneş’in (ve yıldızların) enerji kaynağı mıdır?

Güneş’ten yayılan toplam ışınım gücü = 4×10^{26} Watt
$E=mc^2$ den; bunun karşılığı kütle kaybı = 4×10^9 kg sn^{-1}
Güneş’in yaşı (en eski meteorların yaşından) = 4.6×10^9 yıl (4.6 milyar yıl)
[radyoaktif bozunmadan; 87Rb den 87Sr e: yarı ömrü = 46 milyar yıl]
Güneş’in ömrü boyunca toplam kütle kaybı = 5×10^{26} kg

Bu değer, Güneş’in şuan ki sahip olduğu kütlenin (2×10^{30} kg) yalnızca küçük bir kesri kadardır (%0.025).

“Nükleer füzyon” anakol ömrü boyunca Güneş'in enerji çıkışını kesinlikle açıklayabilir.

Güneş'in enerji kaynağı olarak : 'Çekirdek birleşme tepkimeleri'nin incelenmesi

Hafif elementlerin birleşmesi "Fusion" durgun kütle enerjisinin %1'ini salabilir – hafif elementler (H, He) çok bol miktardadır.

Yani, "fusion" Güneş enerjisinin en olası kaynağıdır.

Nükleer zaman ölçeği:

$$t_{\text{nuclear}} \cong \frac{0.1\,\varepsilon\, M_{\Theta} c^2}{L_{\Theta}} \cong 10^{10}\,\text{years}$$

Yıldız anakoldan ayrılmadan önce kullandığı kütle olaranı 0.1 ve kütlenin $\varepsilon \approx \%0.7$ miktarını enerjiye çevirir (He çekirdeği içerisine birleşen protonlar tarafından; α parçacıkları). Böylece:

$$t_{\text{thermal}}\ \text{ya da}\ \ t_{\text{grav}} << \textit{Güneş}'\text{in yaş}\ 4.6\times 10^9\,\text{y} < t_{\text{nuclear}}$$

Bazı İç Yapı Eşitlikleri (denklemler)

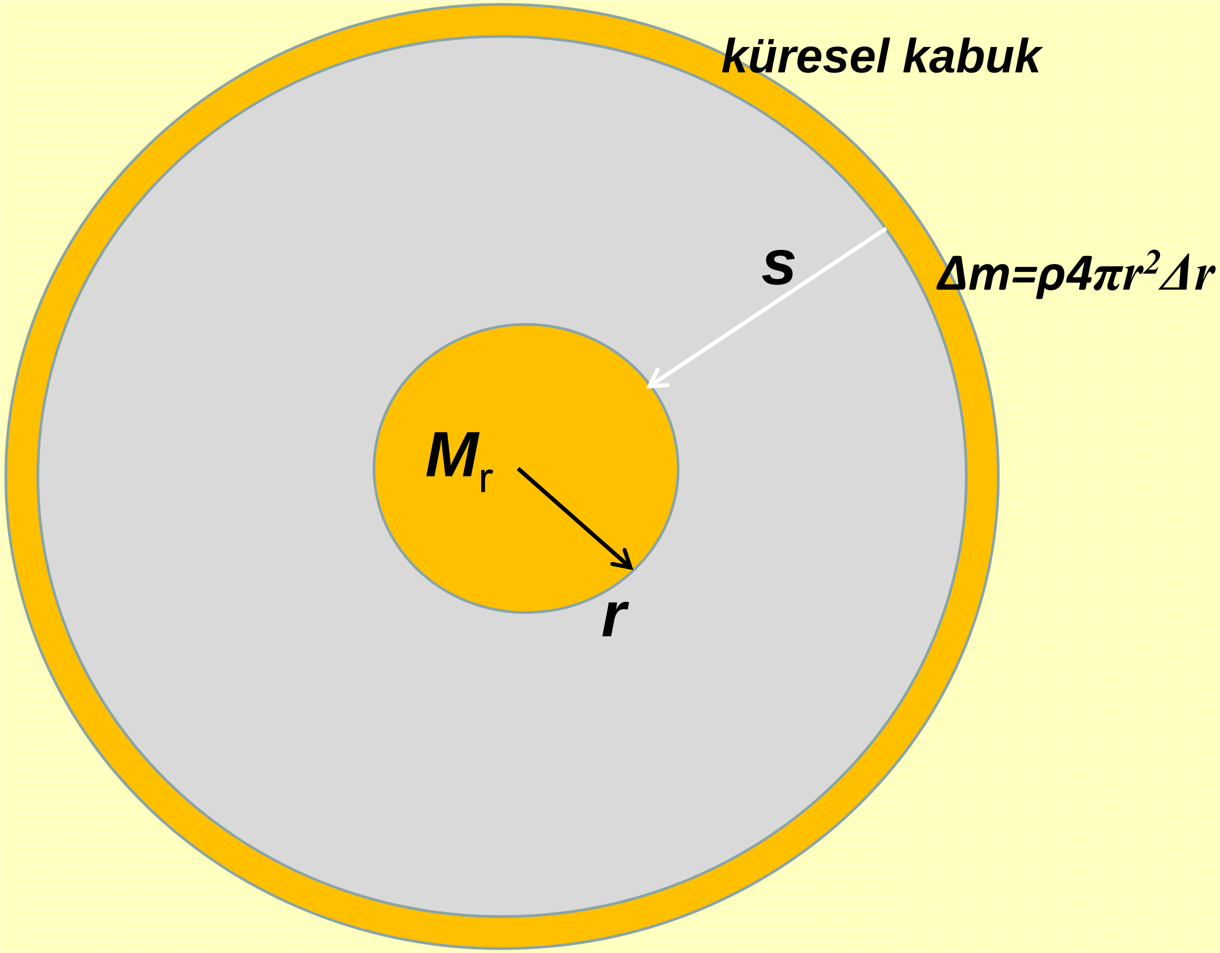
1. Hidrostatik Denge:

$$\frac{dP_r}{dr} = -\frac{GM_r \rho_r}{r^2}$$

2. Güneş'in içerisindeki Basınç – İdeal gaz yasası ile verilen:

$P_r = n_r\, k_B\, T_r$ ya da $P_r = \dfrac{\rho_r k_B T_r}{\mu\, m_p}$

burada μ; molekül ağırlık ve yoğunluk sayısı $n = \rho / (\mu\, m_p)$ dir.
Not: P_r ; $P(r)$ anlamındadır.
Bu eşitlik "Durum Denklemi" dir.


küresel kabuk
s
$\Delta m=\rho 4\pi r^2 \Delta r$
M_r
r

3. Yarıçapın fonksiyonu olarak Kütle:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi\, r^2 \rho_r$$

Aynı zamanda, Güneş'in iç yapısı boyunca enerji taşınma oranı ve salınan enerjiye ilişkin bir eşitlik oluşturabiliriz.
R yarıçap boyunca akan enerji miktarı L_r ile tanımlansın.

Küresel kabuktaki enerji miktarı; "r" yarıçaplı küre ve "$r + \delta r$" yarıçaplı küre arasındaki farka eşittir.

Sonuç olarak:

4. Yarıçapın fonksiyonu olarak ışınım gücü:

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi\, r^2 \rho_r \varepsilon_r$$

burada ε_r; r yarıçapında birim kütle başına nükleer enerji üretim miktarı(oranı) : (W kg^{-1})