

*Astrophysics*

宇宙加速膨胀  $\rightarrow$  Dark Energy

Extra Dimension?

高能宇宙线 300 EeV

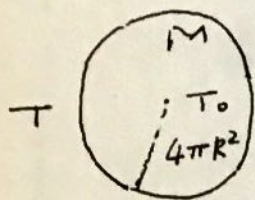
天体概论.

HR graph Hertzsprung - Russell.

明亮程度 (视亮度 流量  $F$ )

颜色 (光谱特性).

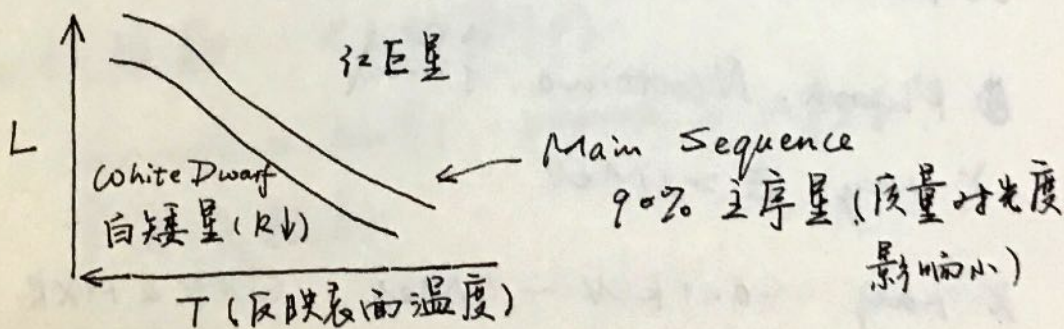
$\rightarrow$  光度. 绝对星等 (内禀属性)



$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 \quad \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$F = \frac{L}{4\pi D^2} \quad \text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$\downarrow$  视星等. 流量.



银河系. 银盘. 银核. 银晕

Disk Nucleus Halo.

$\downarrow$  恒星金属丰度高

星族 I

星族 II

星族 III

只由 H & He 组成

Population I

first star

重金属来自于恒星内部核反应.

观测到的金属丰度是恒星形成时的环境丰度.

星系的 Hubble 分类

椭圆  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{正常漩涡} \\ \text{棒状} \end{array} \right.$

星系旋转曲线  $\rightarrow$  Dark Matter

$$\rho_0 = 0.3 \text{ GeV/cm}^3. ?$$

Direct detection.

长程相互作用. 光子.

⊗ Photon, Neutrino, 宇宙线

$\gamma$  ray  $E > 1 \text{ MeV}$ .

X ray  $\sim 0.1 \text{ keV} \sim 1 \text{ MeV}$ , SXR & HXR

紫外

可见光  $3000 \text{ \AA} \sim 7000 \text{ \AA}$

红外

Radio  $> 1 \text{ mm}$ . 光子能量  $\downarrow$  波动性越强.

热辐射  $\rightarrow$  热力学概念. 热平衡  $\rightarrow$  辐射

非热辐射  $\rightarrow$  带电粒子加速运动.

回旋辐射. 非相对论.

$e^- (+) B$

同步辐射. 相对论.

曲率辐射 ( $B$ 大. 相对论).

Compton Scattering

& Inverse Compton Scattering

$\uparrow$   
高能天体物理.

胶子  $\rightarrow$  强相互作用. 0质量. 带色荷

韧致辐射 (电子的冷却)

Cherenkov. 辐射. proton &  $\alpha$  粒子.

宇宙线辐射.

大气辐射窗口.

可见光 300 nm ~ 900 nm 紫外被 N, O, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 吸收.

红外. 由若干  $\mu$ m 波长 的窄波段 350  $\mu$ m 850  $\mu$ m. 分子转动. 振动能级 (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>).

射电 ~ 1 mm 至 30 m (~ 10 MHz 至 ~ 300 GHz)

# 黑体辐射

Kirchhoff  $\psi_e(\nu, T) = \alpha(\nu, T) \cdot B(\nu, T)$

黑体  $\alpha(\nu, T) = 1$ . 辐射效率最高.

Planck 公式  $\rho_\nu(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$

Stefan - Boltzmann 定律

$$B(T) = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} \rho_\nu(T) d\nu = \sigma T^4$$

Wien 位移定律

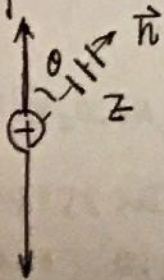
$$\lambda_{\max} T = 0.29 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

辐射场状态方程  $p(T) = \frac{p(T)}{3}$

(包括极端相对论性粒子).

# 回旋辐射

分解成两个相位差为  $\frac{\pi}{2}$  的圆偏振辐射.



$$\vec{S} \sim \sin^2 \theta \vec{n}$$

单频的. 近似于各向同性

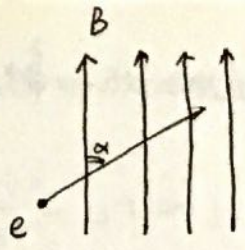
(2:1).

赤道面线偏振. 正方向的圆偏振.

其他方向椭圆偏振. 速度分布  $\sim (1 + \cos^2 \theta)$



电子  $P = 1.6 \times 10^{-15} \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha$  (erg/s)



各向同性平均功率  $1.01 \times 10^{-15} \beta^2 B^2$

Larmor半径  $r_L = \frac{m c v}{e B}$  相对论  $\gamma r_L$

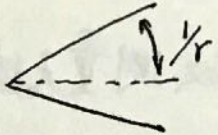
$\omega = \frac{e B}{m c}$

$\omega / \gamma$

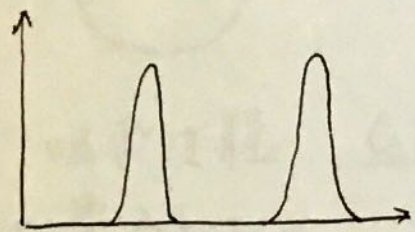
辐射角频率为  $\omega_e$ .  $P_{s+1} / P_s \sim \beta^2 \ll 1$

同步辐射. extremely relativistic.

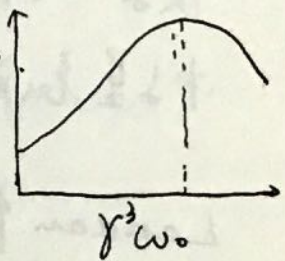
辐射主要集中在  $1/\gamma$



峰宽度  $\propto \frac{1}{\gamma \rightarrow \omega_0}$



Fourier Transformation



Radio 主要是 Synchrotron Radiation.

Landau 能级与曲率辐射.

$$l \sim r_L \sim \frac{mc^2}{eB} \propto \frac{1}{B} \quad \lambda \sim \tau \sim \frac{h}{mc}$$

$$l \sim \lambda \Rightarrow B = \frac{m^2 c^3}{e \hbar} \quad \text{critical magnetic field.}$$

$4.14 \times 10^{13} \text{ G.}$

QED Calculations.

$$E_n = \sqrt{c^2 p_{\parallel}^2 + m^2 c^4 \left(1 + \frac{2B}{B_0} n\right)}$$

弱磁场近似.

$$E_n = mc^2 + n \hbar \omega_c$$

利用 Landau 能级测量天体磁场.

$$\text{电子 } \Delta E_e = 11.6 B_{12} \text{ keV. (X-R band).}$$

$$\text{质子 } \Delta E_p = 6.3 B_{12} \text{ GeV.}$$

中子星表面的磁场强度.

Landau 能级激发态时标

$$\tau \sim 10^9 \gamma^{-1} B^{-2} \sim 10^{-18} \gamma_3^{-1} B_{12}^{-2} \ll L/c \sim 10^{-4}.$$

故基本束电子磁力线运动. (垂直于磁场. 能量很快辐射  
曲率越小. 辐射越强. 射掉).

$$v_m \sim \frac{3}{2} \gamma^3 \left( \frac{c}{2\pi \rho} \right)$$

# Compton Scattering & Inverse Compton Scattering

## Thomson Scattering.

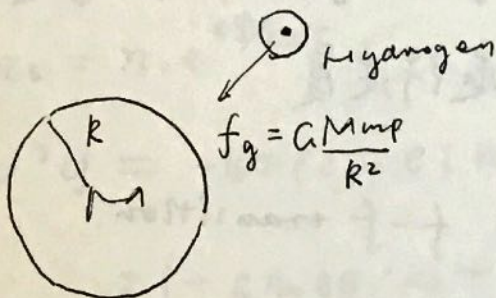
↓ 低能光子的 Compton Scattering.

$$E < 511 \text{ keV}.$$

$$\sigma_T = \left(\frac{8\pi}{3}\right) r_e^2$$

$$r_e = \frac{e^2}{mc^2} \quad \text{光子的动量传递给电子.}$$

Eddington 光度: 球对称吸收和释放最大光度.



吸收过程  
能量全部转化  
为辐射.

$$\frac{GM\dot{M}}{R} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} = \sigma T^4$$

$F$

如果辐射压 = 万有引力, 就无法继续吸收.

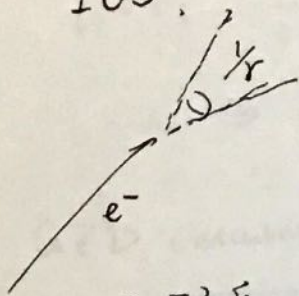
$$\frac{GM\dot{M}}{R^2} = \rho c \sigma_T / (h\nu) \cdot \frac{h\nu}{c} \Rightarrow \dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi m_p c R}{\sigma_T}$$

$$L_{\text{Edding}} \sim 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\text{sun}}}\right) \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$$



$S_{\text{sun}} \ 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$  恒光度.

ICS.



$\frac{1}{2}r$  的锥内.

$$v' \sim \gamma^2 v.$$

总辐射功率  $P_{\text{comp}} = \left(\frac{32\pi}{9}\right) r_e^2 c \rho \gamma^2 \sim 2.6 \times 10^{-14} \rho \gamma^2$

$$P_{\text{syn}} \sim 1.1 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2 \sim 2.5 \times 10^{-14} \beta B \gamma^2$$

Sunyaev-Zeldovich Effect.

高温热电子 ( $\sim \text{keV}$ ) 与 CMB ( $2.7 \text{ K}$ ) 散射.

Galaxy Cluster. 运行速度.

轫致辐射, 热电子冷却.  $f-f$  transition.

Cherenkov.

$$\theta_c(\omega) = \cos^{-1} \frac{1}{\beta n}.$$

$\beta \uparrow \quad \theta \uparrow$

天体存在磁场.

Magnetohydrodynamics.

Dynamo Theory.

偶极磁场衰减最慢.

地理南北极与磁场南北极: 关系 - Dynamo.

~~太阳~~ Sunspot.

微弱的偶极磁场, 偶极场极性改变.

Interplanetary magnetic field.

Main Sequence  $10^3-4$  G White Dwarf  $10^5-7$  G.

Pulsar  $10^8-12$  G.

Galaxy. magnetic field.  $10^{-5}$  G  $\sim 10^{-6}$  G

Debye Length.

$$n_e = n_0 e^{e\phi/k_B T}$$

$$\nabla^2 \phi = -4\pi \rho_e = e(n_0 - n_e)$$

$$= (-e n_0 e^{e\phi/k_B T} + q \delta(r)) \cdot (-4\pi)$$

$$\Rightarrow \nabla^2 \phi - \frac{1}{\lambda_D^2} \phi = -4\pi q \delta(\vec{r})$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T}{4\pi n_0 e^2}}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{q}{r} e^{-r/\lambda_D}$$

QED: 屏蔽  $\propto e m$ , 精细结构常数变化.  $su(1)$

QCD: 反屏蔽  $\propto g$  强相互作用耦合常数  $su(3)$

# Plasma Oscillation.

$$E = 4\pi e n_0 x.$$

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = -4\pi e^2 n_0 x.$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_0}{m}}.$$

磁流理论 Vlasov 方程

磁流体近似

流体力学方程组. Maxwell 方程组.

Magnetic tension & pressure.

$$p = \frac{B^2}{8\pi} \quad T = \frac{B^2}{4\pi}$$

Alfvén wave

(Sheared Alfvén wave).

$$v_A = \sqrt{\frac{I}{\rho}} = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}.$$

磁感应方程  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta_m \nabla^2 \vec{B}$

$\eta_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$ . 磁粘滞系数.

Diffusion.

i)  $\vec{v} = 0$   $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \eta_m \nabla^2 \vec{B}$

ii)  $\sigma \rightarrow \infty$ .  $\eta_m \rightarrow 0$   $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$ . 磁源场

磁 Reynolds 数  $R_m = \frac{LU}{\eta_m} \sim \frac{\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})}{\eta_m \nabla^2 \vec{B}}$

若  $R_m \gg 1$ , 则前者占主导  $\rightarrow$  理想 MHD:

i)  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \eta_m \nabla^2 \vec{B} \iff$  热传导方程  $\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T$ .

↓  
磁扩散项.

ii)  $\sigma \rightarrow \infty$ .

外力克服磁张力做功? 使磁场增强.

↓  
dynamo?

天体磁场的起源.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \frac{B^2}{8\pi} d^3x = - \frac{c}{4\pi} \oint_S \vec{n} \cdot (\vec{E} \times \vec{B}) d\vec{\sigma} + - \frac{1}{\sigma} \int_{\Omega} J^2 d^3x$$

Poynting flux      Ohm 耗散

$$- \int_{\Omega} \left( \frac{1}{c} \vec{J} \times \vec{B} \right) \cdot \vec{v} d^3x.$$

↓  
Lorentz 力做功. (克服做功转化为磁场).

kinematic dynamo.

假设  $\vec{v}$  给定.

角差自转.

极性反转.



$\Omega$  效应 - 磁源位. 纬向磁场

$\alpha$  效应  $\rightarrow$  平均电动势  $\mathcal{E} = \alpha B \rightarrow$  电流  $\rightarrow$  极向磁场

# Main Sequence.

重元素形成的熔炉.

HI 区 原子云  $10^2 K$

II 区 电离氢区 离子云  $10^4 K$ .

分子云.

←  $10 K$ .  $H_2$ . 混有  $CO, H_2O, NH_3 \dots$

(低温, 热压力小, 引力多引力塌缩)

引力塌缩

原恒星 protostar (氢聚变此时已经贡献大部分能量)

主序星 H 聚变 (不是  $^2H$ ).  
AAB.

$4p \rightarrow \alpha$

主序星

热脉动  
thermal  
pulsation.

行星状星云.

重元素核心引塌  
塌缩. 超新星

$> 8 M_{\odot}$  能一直燃烧  
到 Fe. Fe 核 →  
电子简并反塌缩.

电子简并

物质核心.

黑洞

中子星

白矮星

致密核心 (大部分被  
抛回去了).

Cooling.  $1.44 M_{\odot}$  Chandrasekara limit.

原核都挤到一起了.

$1 \sim 2 M_{\odot}$ .

$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

都变成中子了.

$\alpha_{em} \ll 1$ .  $\alpha_s \sim 1$ . 对 中子星核

估质量估计不准.

超过之后变成黑洞.

恒星的形成.

中心  $T \sim 1 KeV \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{1/3}$ .

Jeans 不稳定与恒星形成.

若只有引力, 密度涨落 → 塌缩.

热压力克服了密度涨落.

密度涨落定得高。

$$\text{引力} \sim G \frac{M^2}{R^2} \quad (\text{由行星引力能推算}) \quad M \sim R^3 \rho.$$

$$\text{热压} \sim p R^2 \quad p = \frac{\rho}{m} k_B T.$$

$$\Rightarrow R > \lambda \sim \sqrt{\frac{k_B T}{G \rho m}}.$$

介质尺度大于  $R \Rightarrow$  ~~可以塌缩~~ 引力不稳定性。

Jeans 长度

无穷大介质引力不稳定发生临界长度。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi k_B T}{G \rho m}}.$$

声波波长长  $\rightarrow$  产生密度集中  $\rightarrow$  塌缩。

Jeans 密度

$$\rho = \frac{\pi k_B T}{G m \lambda^2}$$

Jeans 质量

$$M_J \sim \lambda^3 \rho$$

塌缩时标 Free Fall

假设引力占主导作用。

$$\text{典型动能} \quad \frac{1}{2} m v^2 = \frac{G M m}{2r}$$

$$v \approx \sqrt{\frac{G M}{r}}$$

$$\tau = \frac{r}{v} = \sqrt{\frac{r}{G M}} \propto M^{-1/2}. \quad \text{塌} \quad \text{质量越大塌缩越快}$$

# 周光关系

平衡态附近之振荡行为

假设震荡过程绝热

$$p p^{-\frac{5}{3}} = 0$$

$$f_p \sim R^2 p \sim M^{\frac{5}{3}} R^{-3} \quad f_p = k_1 M^{\frac{5}{3}} R^{-3}$$

$$f_g = k_2 \frac{M^2}{R^2}$$

$$M \frac{d^2 R}{dt^2} = f_p - f_g = \frac{k_1 M^{\frac{5}{3}}}{R^3} - \frac{k_2 M^2}{R^2}$$

Equilibrium.  $R = \frac{k_1}{k_2 M^{\frac{1}{3}}}$

以  $\delta \equiv R - R_0$  做小量展开

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{k_2 M}{R_0^3} \delta = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_2 M}{R_0^3}}$$

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{R_0^3}{k_2 M}} = \sqrt{\frac{3\pi}{k_2}} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad \text{反量大}$$

观测数据统计结果  $p \propto M^{-1}$  (温度高)

$$\Rightarrow T_p \propto M^{\frac{1}{2}}$$

周光关系 ( $M \uparrow \leftarrow \uparrow$ )


}  $\Rightarrow$  周光关系

Cepheid variable

Lane-Emden 方程与“标准模型”

流体静力学平衡方程

$$m = \int_0^r 4\pi x^2 \rho dx$$



$$-dp \cdot ds = G \frac{m(r) \rho \cdot ds dr}{r^2}$$

$$\frac{dp}{dr} = -G \frac{m(r) \rho(r)}{r^2}$$

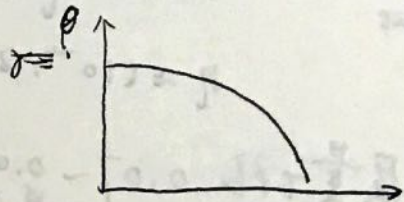
$$\rho \propto p = k \rho^{\gamma}$$

$$\Rightarrow k \rho^{\gamma} \rho^{\gamma-1} \frac{dp}{dr} = -G \frac{m(r) \rho(r)}{r^2}$$

$$\rho = \rho_0 \theta^n; \quad r = a \xi, \quad a = \sqrt{\frac{(n+1)k}{4\pi G}} \rho_0^{\frac{1}{n-1}}$$

$$\Rightarrow \theta'' + \frac{2}{\xi} \theta' + \theta^n = 0, \quad r > 6/5$$

边界条件  $\left\{ \begin{array}{l} \theta(0) = 1 \\ \theta'(0) = 0 \end{array} \right.$



恒星内部辐射压不可忽略

$$p = \left[ \left( \frac{N_A k_B}{\mu} \right)^4 \frac{3}{a} \frac{1-\beta}{\beta^4} \right] \rho^{4/3}$$

认为  $\beta$  不随半径变化，对应  $\gamma = \frac{4}{3}$  多方球模型

$\Rightarrow$  恒星标准模型  $\mu = 0.7, \beta \sim 1$

$$T \approx 1.4 \times 10^7 \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{1/3} \text{ K}$$



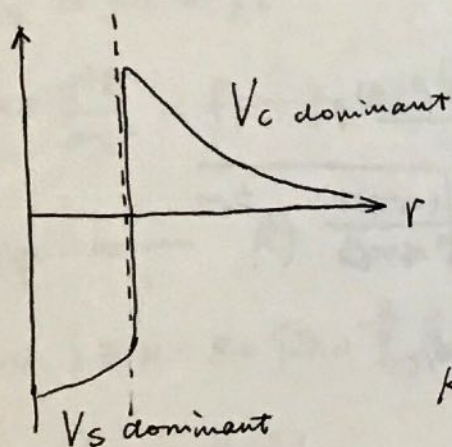
恒星质量  $\uparrow$  中心  $T \uparrow$  密度  $\downarrow$ .

## 核燃烧条件

Main Sequences.  $\sim$  Hydrogen

$$T_c \sim 1 \text{ KeV} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{1/3}.$$

$$V_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{N_1} + r_{N_2}} \approx 1.2 \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \text{ MeV} \gg T_c$$



$$\Delta V \sim \text{MeV}.$$

考虑量子隧穿效应.

使得 ~~10~~ KeV 原子能发生核聚变

$$k_B T \sim \eta V_c.$$

$$\eta \approx (10^{-4}, 2 \times 10^{-4})$$

$\Rightarrow$  主序星质量下限  $0.07 \sim 0.08 M_\odot$

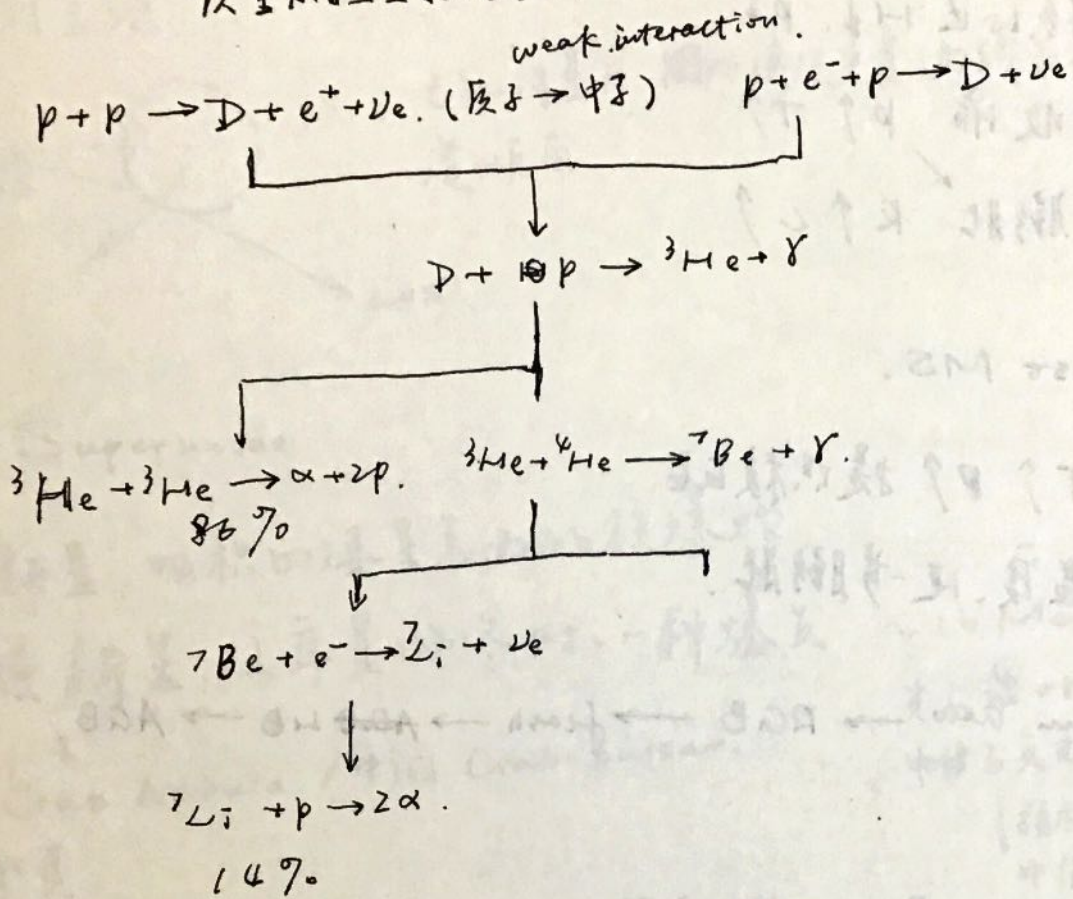
brown-dwarf  $M - M_{\text{min}}$ .

耀星:  $M \sim 0.08 M_\odot$  或略大. 氢闪 flash.

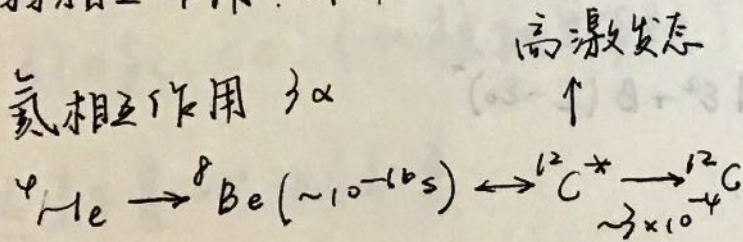
$P$  大,  $T$  低. 电子简并电子气压强明显.

刚刚燃烧,  $P$  不随  $T$  变比. 反应一直加快.

核合成过程 和  
氢燃烧 pp 链 (CNO 循环)  
↑  
质量小恒星较明显.



弱相互作用. 作用时间长



比铁重元素合成  
us (slow) / rapid  $\leftarrow$  中子没衰变就又俘获新中子. U, Co.  
中子俘获. s. r 过程  
质子俘获. p 过程 (有 Coulomb 势垒)  
Supernovae.  
双中子星.

ZAMS.

主序阶段演化.

核心区  $H \downarrow, P \downarrow$

收缩  $P \uparrow, T \uparrow$

膨胀  $R \uparrow, L \uparrow$

post MS.

$T \uparrow, P \uparrow$  提供核反应

温度, 进一步膨胀!

sun now  $\rightarrow$  RAG  $\rightarrow$  flash  $\rightarrow$  ~~AGB~~ LB  $\rightarrow$  AGB.

旋转恒星的平衡位形.

$$E = E_0 + \frac{L^2}{2I} + A\epsilon^2 + B(\epsilon - \epsilon_0)^2$$

恒星度量-测定.

~ 双星系统.

$$\frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^3} = \frac{r_1^3}{a^3} \left( \frac{2\pi}{T_{orb}} \right)^2$$

轨道倾角  $i$ .

$a \sin i$

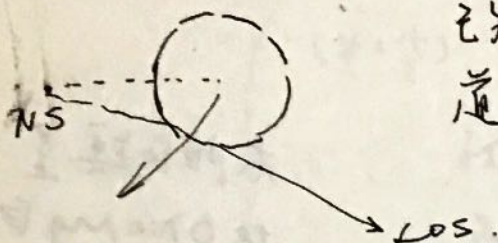
实际测到的...

$\Rightarrow$  测得  $\frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^3}$  度量系数.

一般只能给出质量下限 (不可见伴星、质量下限).

BMC: black hole candidate.

行星法.



已知伴星R. ~~通过~~通过光变曲线反推轨道倾角.

### Supernovae

新星: 吸积白矮星表面的核爆炸.

超新星: 主序星临终时, 一种爆发.

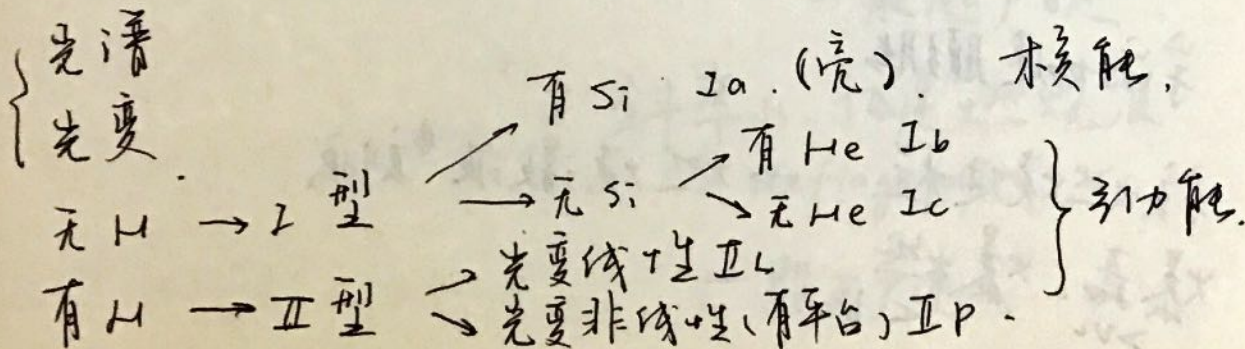
$\sim 10 \text{ MeV}$   
 光子  $\leftrightarrow$  产生  
 中微子-反中微子对.  
 ↓ 弱相互作用  
 中微子对.  
 引力能都被中微子带走了.

Crab Nebula. / 中间 Crab pulsar.

彗核能: Ia

引力能: CC. (比核能更有效).

### 超新星观测分类



Ia 为什么无 H. 有 Si

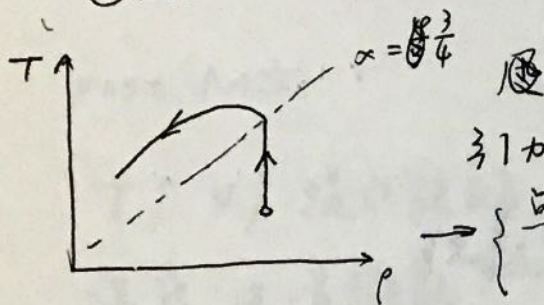
太阳白矮星核聚变产物

Ib, Ic 把质量大强大的星风把 H, He 包层都吹跑了

Ic 型 Supernova 塌缩. CRB?

核燃烧导致的超新星爆发.

Chandrasekhar 质量.



引力收缩. 升温.

点燃核反应. →

瞬间把 He 烧成 Si, Fe.

太阳白矮星

比 O Ne Mg 白矮

星放能量多

$\sim 10^{52}$  erg.

Ia 超新星  $\tau_{dynamic} \gg \tau_{nuclear}$ .

引力收缩  $T \uparrow \rightarrow$  同时  $p$  不变但核反应速率增加.

$\rightarrow$  不膨胀做功  $\rightarrow$  爆炸.

$$M_{max}^B = 0.95 (M_{15} - 1.1) - 19.55$$

Phillips 关系 (标准烛光)

测量绝对星等 ( $\Rightarrow DL$ ).

宇宙加速膨胀.

核燃烧过程.  $\rightarrow$  燃烧激波刻画.

爆子. 爆燃  $< v_c$ .

# 激波面参考系

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \begin{array}{c} D-v_2 \\ \leftarrow \\ \rho_2 \cdot \rho_2 \cdot u_2 \end{array} \\
 \leftarrow D \\
 \begin{array}{c} \rho_2 \cdot \rho_2 \cdot u_1 \end{array}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{质量方程 } \rho_1 D = \rho_2 (D - v_2) \\
 \text{动量方程 } p_1 + \rho_1 D^2 = p_2 + \rho_2 (D - v_2)^2 \\
 \text{能量方程 } p_1 V_1 + \frac{D^2}{2} + u_1 + q \\
 \qquad \qquad \qquad = p_2 V_2 + \frac{(D - v_2)^2}{2} + u_2
 \end{array}
 \end{array}$$

$(V = \frac{1}{\rho})$

就算有状态方程，整个方程组也是不闭合的。

Rayleigh 关系

$$\frac{D^2}{V_1^2} = - \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1}$$

求燃烧波前速度

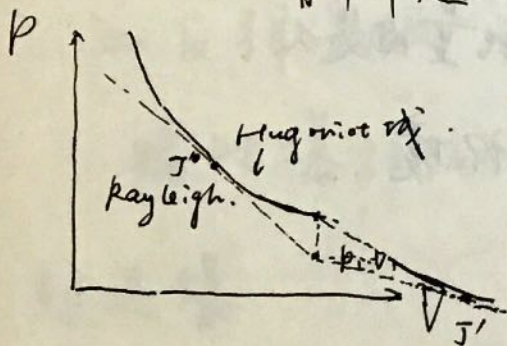
Hugoniot 方程

$$\begin{aligned}
 q + u_1 - u_2 + (p_1 + p_2)(V_1 - V_2)/2 \\
 = 0
 \end{aligned}$$

燃烧前后  $p$  和  $p \cdot V$  的关系

RHS  $\rightarrow$   $p \cdot V$  图上切末态连线的斜率

斜率越大，燃烧越激烈。



C-J 理论

Rayleigh 直线与 Hugoniot 线相切

J: 斜率大，高速燃烧波

detonation.

一般超音速

J' 斜率小，低速燃烧波

deflagration

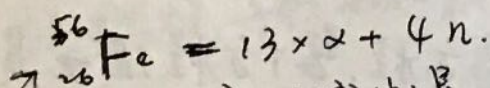
一般亚声速

# 引力塌缩型超新星爆发 Core Collapse.

铁核塌缩.  $M > 10 M_{\odot}$

$\rho$  高. 有一定简并性. (相当一部分压力来源).

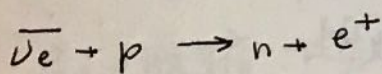
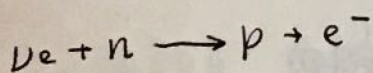
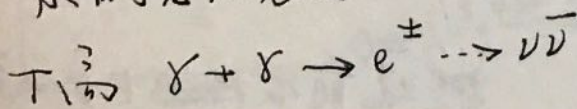
由于无法继续进行核聚变 (Fe 结合能最低).



可能塌缩形成中子星. 并提供  $\nu$  过程 (快速俘获中子) 元素

核合成场所.

来自于光致裂变.



原中子星星风中反电子中微子能量更大.

⇒ 更易与质子反应. 造成高  $n/p$  环境.

neutron.  
proto ~~star~~ star.  
~~star~~

把周围物质中微子吹出去.

铁核塌缩过程中  $T \sim \text{MeV}$ .

① 光致裂变. ⇒ 自由质子. 中子. 降低铁核热压.

② 电子俘获.  $e^{-} + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$ . 降低电子简并压.

③ 中微子产生

④ 广义相对论效应，引力效应更强。

塌缩核  $\rho \uparrow$  中微子不再透明。

同时中微子与重原子核之间发生相干散射。

$$\sigma_{\nu} \approx 10^{-45} \left( \frac{E_{\nu}}{m_e c^2} \right)^2 A^2$$

截面很大。

$$l_{\nu} \sim 10^2 \text{ km}$$

反弹激波与瞬时爆。

以中子星为界，内核由中子星起，外核起中子星，过压缩。

$\Rightarrow$  反弹激波。（表面温度高，光致蜕变吸收）

瞬时爆往往不能成功。

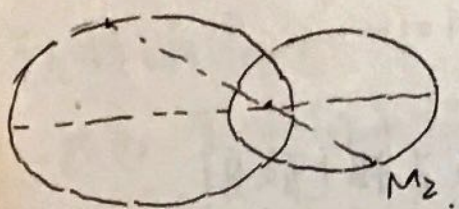
延迟爆。

中微子俘获面：塌缩速度  $>$  扩散速度，中微子暂时无法扩散。

引力能波中微子携带  $\rightarrow$  相干散射  $\rightarrow$  周围物质被吹跑了。



# Roche 瓣与双星演化.



质点系 <sup>轻</sup> 系

$$\phi(r) = -\frac{GM_1}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} - \frac{1}{2}(\vec{\Omega} \times \vec{r})^2$$

在  $M_1, M_2$  附近球对称.

远离  $M_1, M_2$ .

临界 Roche 面. 一颗变成巨星. 表面达到  $L_1$ .

双星系统分类.

不相接双星. 靠近 Roche 瓣. 星风吸收.

半相接双星. 物质交流.

相接双星. 两流满 Roche 瓣.



非球对称超新星爆发.  $\rightarrow$  kick velocity.

星风吸收. 弱 X 射线双星.

双中子星系统合并.  $\gamma$  - burst

Optical  $\rightarrow$  kilonova

# 吸收产率与光子能量

$$\eta = \begin{cases} 17\% & \text{White Dwarf} \\ 15\% & \text{neutron star} \\ 6\% & \text{Schwarzschild BH} \\ 40\% & \text{Kerr BH} \end{cases}$$

光子引力能转化为光子  $\rightarrow$  完全不热化  $\sim \epsilon_1 \sim \text{MeV}$ .

引力能转化为星体谱  $\rightarrow$  完全热化

$$\epsilon_2 \sim k_B T \sim L^{\frac{1}{4}} \sim 1 \text{ keV}$$

~~球体热用~~ 不完全热化  $\epsilon_2 < h\nu < \epsilon_1$

球吸收: (零用能量吸收)

$$k_B T - \frac{GMm}{R_a} = 0 \Rightarrow R_a = G \frac{Mm}{k_B T}$$

$$\dot{M} \sim \pi R_a^2 c_s \rho$$

$$c_s = \left(\frac{p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{k_B T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

如果是暗物质? 吸收?

$\downarrow$  中子星

由于暗物质不与其他物质作用, 其轨迹是抛物线, 如曲线.

如果是运动介质的吸收

$$\text{吸收半径: } R_a \approx \frac{GM}{c_s^2 + v^2}$$

这时吸积率  $\dot{M} \sim \pi R a^2 (c_s^2 + v^2)^{1/2} \rho$

盘吸积. 在 Roche 瓣  $r_1$  处吸积.

如果吸积盘流能量耗散率远大于角动量损失率.

→ 定角动量能量最低态. 比角动量  $l = r v$ .

$$\omega \frac{v^2}{R_{\text{circ}}} = G \frac{m M}{R_{\text{circ}}^2} \Rightarrow R_{\text{circ}} = \frac{l^2}{G M}$$

若  $R_{\text{circ}} \rightarrow R_s$ . 则可以形成吸积盘.

$R_{\text{circ}} \ll R_s$ . 则吸积流直接打到星体表面.

但如果平衡了. 就不会有吸积了.

⇒ 需要物质耗散能量

耗散能量功率 = 力矩 · 角速度.

单位质量交换角动量差. 自由程.

$$r^2 \Delta \Omega = r^2 \frac{d\Omega}{dr} \lambda$$

作用力矩.

$$G(r) = 2\pi r H v_t \rho \cdot r^2 \Omega' \lambda$$

→  $H \rho$  (面密度)

$$\approx 2\pi r^3 v_t \sum \Omega' \propto v_t \sum r^{1/2}$$

$\lambda v_t \rightarrow$  动量粘滞系数

内外层作用的净功。

$$G(r+dr) - G(r) = \left(\frac{\partial G}{\partial r}\right) dr.$$

单位时间净功做功。

$$\Omega \frac{\partial G}{\partial r} dr = \left[ \frac{\partial}{\partial r} (G\Omega) - G\Omega' \right] dr.$$

粘滞作用释放能量。

单位

相互作用传递，耗散功能。

盘面积辐射能量

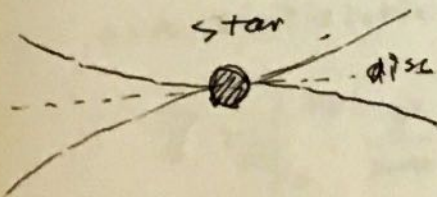
$$D(r) = \frac{2\pi r^3 G \cdot \Omega' \cdot dr}{2 \cdot 2\pi r dr} = \frac{1}{2} \nu \Sigma (r\Omega')^2 \propto \nu \Sigma r^3$$

( $r$  越小，光度越高，光子能量高)。

$\nu \cdot \Sigma$  如何确定？

标准吸积盘模型  $\propto$  模型 Shakura, Sunyaev.

假设  $\nu = \alpha H c_s$ . 对  $H \ll R$ . 近似黑体辐射 (光学厚)  
(几何薄)



完备的动力学模型。

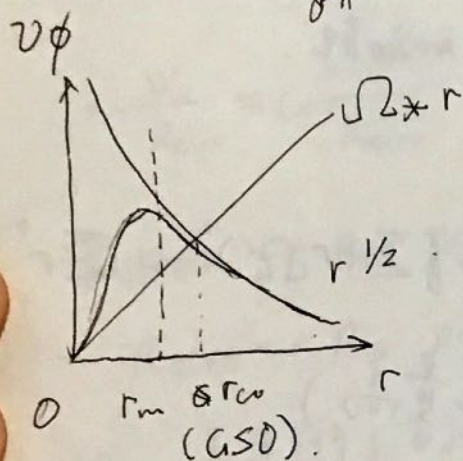
描述白矮星  $\checkmark$  黑洞 中子星  $\times$

内部热压大，几何薄  
和光学厚不成立。

磁中子星吸收

接近中子星  $\uparrow$  磁源后，被吸收。磁流体与星体共转。  
远离中子星，Kepler运动。

磁层半径 ( $r_B \sim r_{particle}$ )  
 $\frac{v_B^2}{\delta\pi}$



吸收流能否落到磁中子星表面。

若  $r_m > r_{co}$ ，则落不到表面，且吸收减速。

若  $r_m = r_{co}$ ，则吸收加速。

定义快度  $w_s = \frac{\Omega_*}{\Omega_K(r=r_m)}$ 。

若  $w_s > 1$ ，则会减速。

若  $w_s < 1$ ，则会加速。

# White Dwarf

Main Sequences.

$$\begin{cases} p = nk_B T \\ p = \frac{1}{3} \rho \rightarrow \propto T^4 \end{cases}$$

经典极限条件  $\lambda \ll d$ .

若  $\frac{\lambda}{d} \propto \frac{n^{1/3}}{T^{1/2}} \gg 1$ . 则不能忽略量子效应 ( $n$  大  $T$  小)

$$\begin{cases} e \rightarrow \text{WD} \\ n \rightarrow \text{NS} \\ ? \rightarrow \text{BH} \end{cases}$$

相对论性简并电子气 Relativistic Degenerate Electron Gas.

$\alpha = 0$ . 近似于粒子.  $E_F = (p_F^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}$ .

体积  $V$  内电子数目  $N = \frac{4}{3} \frac{\pi p_F^3 \cdot V}{h^3} \times 2$ .

$$p_F = (3\pi^2)^{1/3} \hbar n^{1/3}$$

non relativistic approximation.

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \int_0^{p_F} \frac{p^2}{2m} \cdot \frac{2.4\pi p^2 dp}{h^3} = \frac{3}{5} E_{KF}$$

$$p^{NR} \propto n^{1/3}$$

Extremely relativistic

$$p^{ER} \propto n^{2/3}$$

$\rho \sim n^\gamma$   $\gamma$  越大  $\rightarrow$  Hard. (no WD limit)  
 $\gamma$  越小  $\rightarrow$  Soft

Chandrasekhar 极限.

定量考虑. NR:

$$E_g \sim -k_1 \frac{GM^2}{R}$$

$$E_k \sim E_F \cdot N \sim \left(\frac{N}{V}\right)^{2/3} N \sim \frac{M^{5/3}}{R^2}$$

$$\Rightarrow E_g + E_k = k_2 \frac{M^{5/3}}{R^2} - k_1 \frac{GM^2}{R}$$

ER.

$$E_k \sim \frac{N^{4/3}}{V^{1/3}} \cdot N \sim \frac{M^4}{R}$$

$$\Rightarrow E_g + E_k = \frac{k(M)}{R}$$

若  $k > 0$ . 稳定.

若  $k = 0$ . 随遇平衡.

若  $k < 0$ . 无法平衡  $\rightarrow$  塌缩.

$k$  与质量有关  $k = (k_3 - k_1 M^{2/3})$ .

Mass - Radius Relation. 白矮星是引力束缚系统.

$M \uparrow R \downarrow$ . (质量越大.)

~~Escape velocity~~

Pulsar. (Neutron Star).

四种极端相互作用.

强引力场  $M_{\odot}$  的脉冲星. ~ 半径  $3rs$ .

spacetime in strong gravity field. (GR)

强电强磁场  $B \sim 10^{12} G$ .  $E \sim 10^{11} V/cm$ . (QCD/QFT).

超核密度. 弱相互作用.  $\rightarrow$  (Supernova  $p \rightarrow n$ ).  
neutrino couples.

稳定时标

脉冲星真天体观测现象.

rotation powered pulsar.

$E_{rot} \sim 10^{51}$  erg. ( $M_{\odot}$ ,  $10km$ ,  $1s$ ).

radio pulsar  
X-ray pulsar  
 $\gamma$ -ray pulsar

accretion. powered (Binary System).

magnetic

X-ray burst.

strong magnetic field

hot spot

nonisotropic radiation.

X-ray pulsar

$p-\dot{p}$  diagram.

Soft  $\gamma$ -ray repeater

Anomalous X-ray Pulsar. (isolate &  $L_x \gg |\dot{E}|$ )

magnetic field? (magnetar?)



Central Compact Object. 中心致密天体.  $\sim 10^2 \text{ km}$   
Different from Crab.  
Supernova remnant

thermal spectrum / no non-thermal component.

X-ray Dimming Isolate neutron star  $\sim 1-10^5$

thermal spectrum.

no supernovae remnant.

形成  $\sim \frac{1}{2} E_p$ .

爆发时引力能  $E_g \sim 10^{53} \text{ erg}$ .

Fermi  $\dot{N} \sim \frac{P}{2} \text{ cph} - 400 \text{ MeV}$ .

$$Z_d \approx \sim 10^{53}$$

$$Z_{th} = Z_d E_g - E_d \sim 10^{53}$$

$$C_V T - Z_{th} \sim 10^{53}$$

↓

$$C_V \sim \frac{kEM}{m\mu} \quad \varepsilon = \frac{kBT}{E_F - mc^2}$$

$$\Rightarrow T \sim 10^{12} \text{ K} \sim 90 \text{ MeV}$$

冷却机制 (光子自由程很短且无法把热量带出去),  
 $T > \sim 10^9 \text{ K}$  hot neutrino.  $2\gamma \leftrightarrow e^+e^- \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$

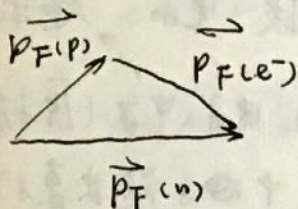
$T < \sim 10^9 \text{ K}$  URCA process.

DURCA:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ,  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ . (中微子带走能量)

MURCA:  $\nu_e$  与  $\bar{\nu}_e$  媒介粒子 (催化剂?)  $b + n \rightarrow b + p + e^- + \bar{\nu}_e$

$P_F(p) + P_F(e^-) = P_F(n)$   $b + p + e^- \rightarrow b + n + \nu_e$   
 $\geq n_p^{1/3} > n_n^{1/3}$

$\Rightarrow \frac{n_p}{n_n} \approx \frac{1}{8}$



结构:  
 流体压强  $\rightarrow$  重力加速度  $g (M/R^2)$ .

$\propto (M/R)$ .

GR 修正.  
 TOV 方程.

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{G m(r) \rho}{r^2} \frac{\left(1 + \frac{p}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 p}{m(r) c^2}\right)}{1 - \frac{2G m(r)}{r c^2}}$$

小质量中子星:  $M \propto R^{-3}$  (引力束缚系统).

小质量奇异星:  $M \propto R^3 \rightarrow$  (强相互作用自束缚).

中子星  $M_{\min} = 0.1 M_{\odot} \leftarrow$  neutron  $2d + u$

奇异星  $M_{\min} = 0$ .

(里面掺了奇异夸克).

$s$  与  $u, d$  质量相近.

six flavors: three colors.

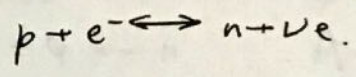
u c t r g b.  
 heavy flavor.

d s b. (中微子星上没有).  
 light flavor

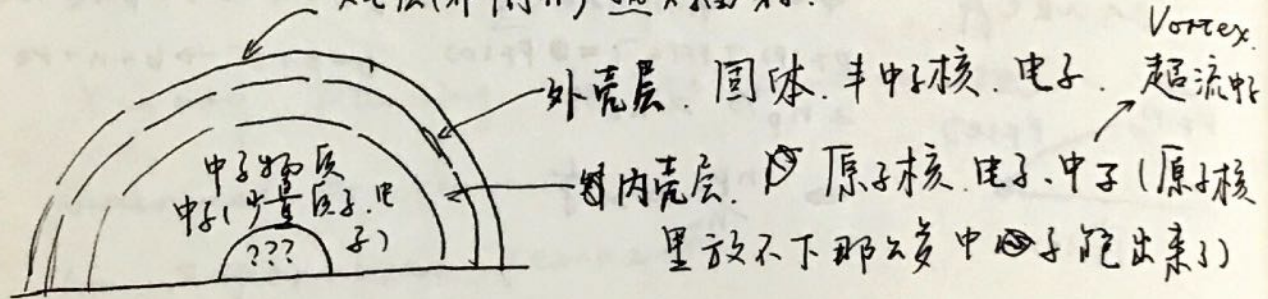
若 u, d, s 都是自由的: 奇异 quark 星.

若 u, d, s 不是自由的, 而是束缚在 strangeon 中.

中子星结构.



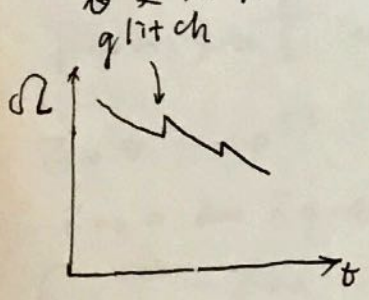
壳层 (非简并) 热辐射.



丰中核易发生  $\beta$  衰变.

但是如果泡在简并电子气里面.

衰变必须放出比 Fermi 能高 - 电子才能进行.



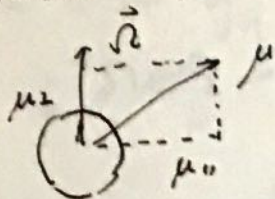
奇异星.

Witten 猜想: 大块的奇异物质最稳定 (比  $^{56}\text{Fe}$  还稳定?)

Strangeon matter? 与 nucleon 类似. 也是自束缚的.

$1 \text{ t Strangeon} \sim 10 \mu\text{m}$ . DM??

转动只能脉冲星.



$$\mu_{\perp} \dot{\varphi} = \dot{\varphi} = -\frac{2}{3c^2} \mu_{\perp}^2 \Omega^{\omega} \rightarrow \Gamma \Omega \dot{\Omega}$$

$$\mu_{\perp} = BR^3 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \Rightarrow \text{星体表面磁场}$$

$$\text{制动指数 } \dot{\Omega} = -k \Omega^n. \quad \mu_{\perp} \dot{\varphi} \quad n=3.$$

$\mu_{\parallel}$  相当于切割磁感线.

光束圆柱. 内部可以视为真空.

黑洞.

Laplace black star

带有奇性的时空区域.

$$r_s = 2GM/c^2 \quad \text{Schwarzschild.}$$

$$g_{\mu\nu} \rightarrow R_{\mu\nu} \rightarrow \Gamma^{\sigma}_{\mu\nu} \rightarrow R^{\nu}_{\mu\sigma\rho} \rightarrow \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^{\sigma} \partial x^{\rho}} = R_{\mu\rho} \rightarrow g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} = R.$$

Einstein field Equation.

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}.$$

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Sch. Spacetime

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2.$$

ATF.

cosmic censorship principle.

$r > 3R_s$  时才会有稳定的圆轨道 ISCO.

↳

$$V(r) = \frac{1}{2} - \frac{GM}{r} + \frac{L^2}{2r^2} - \frac{GM L^2}{r^3}.$$

Innermost stable circular orbit.

引力红移.

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 - r_s/r'}{1 - r_s/r}}.$$

无穷远观测者  $r' \rightarrow \infty$ .

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 - r_s}{1 - r_s/r}}.$$

$$z = \frac{\lambda'}{\lambda} - 1. \quad \text{若 } r \gg r_s.$$

$$\Rightarrow z \frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{1}{2} \frac{r_s}{r} + \dots$$

$$= 1 + \frac{GM}{c^2 R} + \dots$$

↓

观测 M.

$r \rightarrow r_s, z \rightarrow \infty$ . 无穷红移面.

光线偏折 deflection.

$$\bar{\alpha} = \frac{2R_s}{b}$$

仿 Newton 势

$$\phi = -\frac{GM}{r - 2M r_s}$$

Kerr 时空

黑洞的性质由质量  $M$ 、角动量  $L$ 、电荷  $Q$  三量刻画

$M \neq 0, L = Q = 0$  Schwarzschild.

$M \neq 0, L \neq 0, Q = 0$  Kerr.

$M \neq 0, L = 0, Q \neq 0$  Reissner-Nordstrom.

$M \neq 0, L \neq 0, Q \neq 0$  Kerr-Newman

视界  $r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 - Q^2}$

$$a = L/M$$

无限红移面  $r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta - Q^2}$ .

( $a > M$  cosmic censorship principle 失效?)

外视界与外无限红移面间: ~~energy phase~~  
能层.

→ 负能轨道 (逆向旋转)

- 无穷远处外体飞过来-吸收-排出-部分辐射.

→ 提取能量. Penrose 过程.

Hawking 面积定理

黑洞演化过程中事件视界面积不再减小

③ 烟

黑洞的量子效应

点粒子 & 黑洞?

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$$

↓      ↪  $10^{41}$  GeV?

$$r \sim 10^{-55} \text{ cm}$$

量子引力?  $T_{\mu\nu}$  在本质上应该是量子的.

↓

$$G_{\mu\nu} R_{\mu\nu}?$$

广义相对论在小尺度下?

时空涨落?

Planck 尺度

$$r_s \sim \lambda$$

$$\frac{GM}{c^2} = \frac{\hbar}{mc} \quad M \sim 10^{16} \text{ TeV} \quad \text{可能存在黑洞的最小质量}$$

Schwarzschild 半径 = 量子波包.

利用  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$   $\Delta t \sim 10^{-44} \text{ s}$   
 $\Delta p \Delta x \sim \hbar$   $\Delta x \sim 10^{-33} \text{ cm}$

Hawking 辐射.

真空中虚粒子对湮落.

→ 发生在黑洞事件视界附近.

- 一个粒子掉到事件视界附近.

→ 另一个虚粒子逃逸.

弯曲时空中的量子场论.

黑洞自身的热辐射.

估算: 光子波长  $\lambda \sim r_s$ .

$$k_B T \sim \frac{hc}{\lambda} \sim \frac{hc}{r_s}$$

$$\Rightarrow T \sim \frac{hc^3}{2GMk_B}$$

辐射功率  $A = \pi r_s^2$ .

$$\frac{dE}{dt} = A \sigma T^4 \propto M^{-2}$$

$$t_{\text{tot}} \propto M^3$$

恒星质量黑洞  $10 M_{\odot}$  双星塌缩.

超大质量黑洞  $10^6 - 10^8 M_{\odot}$  AGN.



~~天体~~

$\gamma$  ray Burst GRB. 瞬变源.

宇宙学尺度上发生的超星级天体爆发现象.

$> 10^{50}$  erg?

探测率  $1 \sim 2$  天.

多峰轮廓.

持续时间分布: 长暴 短暴

$T_{90}$

硬度 Hardness.

$S_{100-300\text{keV}} / S_{50-100\text{keV}}$ .

大多数 GRB. Soft and long  $\rightarrow$  核塌缩超新星?  
长暴

其他  $\odot$  Hard and short.

各向同性均匀分布.  
非.

$10\text{keV} \sim 10\text{MeV}$ .

能谱特征. power-law.

$$N(E) \propto E^{-\alpha} \quad \alpha = 1.8 \sim 2,$$

$1\text{MeV}$  以上无明显截断. (光子容易变成电子对)

其他波段余辉.

XR, Optical, Radio.

$$F \sim t^{-\beta}$$

宿主星系  $\rightarrow$  红移.

各向同性  $\rightarrow$  总能量.

$$E_r \sim 10^{53} \text{ erg.}$$

火球模型.

光变时标  $\sim$  ms. 尺度  $L \sim ct \sim 300 \text{ km.}$

$$\rho \sim \sigma T^4 \sim \frac{E_r}{L^3} \quad T \sim 10^9 \text{ MeV.} \Rightarrow \text{火球.}$$

初始火球可能是不透明的  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$

$$\tau \left( \frac{\text{总辐射辐射大小}}{\text{自由程}} \right) \sim 10^{13}.$$

光深大  $\rightarrow$  平衡态  $\rightarrow$  黑体谱.

静态火球  $\times$ .

极端相对论性运动的膨胀火球

可能是光薄的.

大量能量



爆发机制.

"重子污染": 重子也以  $\gamma \sim 100$  左右的能量爆发.

① 内激波 X-ray  $\xrightarrow{\text{blue shift}}$   $\gamma$  ray.

外激波  $\rightarrow$  余辉.

Hypernova?  
长暴.

(包括与星际介质相互作用).

② 双致密星并合.  $BM \& \cancel{B}NS$ .  $NS \& NS$ .

短暴?

星系

退行.

拥挤  $D \sim 1 \text{ Mpc}$   $d \sim 10 \text{ kpc}$ .  $d/D \sim 10^{-2}$ .

活动性:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{正常星系} \\ \text{活动星系} \rightarrow \text{高吸积率} \end{array} \right.$

Hubble's law

$$v = H_0 D.$$

$$H = \frac{\dot{R}}{R}.$$

Strong gravitational lensing. 星系级.

Micro gravitational lensing.

银河系中一暗天体作为透镜体.

— 光变.

exoplanet.

活动星系

Seyfert 星系, 类星体, BL Lac 天体, 射电星系, 星爆星系

Jet 带走了角动量, 伴随着吸积过程

旋转黑洞与电磁场与吸收, 星系物质作用

→ 提取转动能.

极区与赤道存在电势差.

Jet 视超光速?  $v_0 = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}$

microquasar. (恒星级黑洞).

X-ray binary.

accretion BH.

Fe K $\alpha$  线. → 与黑洞质量, 自旋有关.

旋转 → Doppler shift.

引力红移.

Doppler boosting.

宁静态黑洞.

TDE. Tidal Disruption Event.

银河系中心  $4 \times 10^6 M_{\odot}$  super massive BH.

绕转与 pulsar?

Cosmology.

大尺度上均匀性.

$$> 100 \text{ Mpc. } \rho_v \approx 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}.$$

$$\eta_{Br} \equiv \rho_v / \rho_{mp} \approx 10^{-7} \text{ cm}^{-3}.$$

$$\eta_v = \eta_{Br} / \eta_p \sim 10^{-10}.$$

量子对称性破缺程度.

宇宙学原理:

均匀且各向同性.

RW Metric.

三维空间线元

$$dl^2 = R^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

$$ds^2 = -dt^2 + dl^2$$

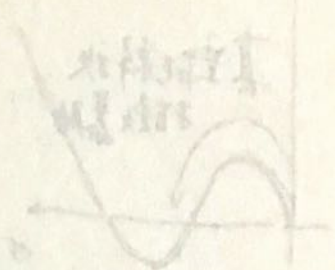
$$= -dt^2 + R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

RW Metric + EFE + Ideal Fluid.

Friedmann Eq.

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{R^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{R} \\ \dot{R} \end{array} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) \right.$$



宇宙膨胀热力学.

暴胀  $\rightarrow$  真空对称性改变.

QGP 强相互作用耦合系统

$\hookrightarrow$  QCD 相变. Quark-Hadron transition.

$\hookrightarrow$  proton & neutron.

D.  ${}^3\text{He}$ .  ${}^4\text{He}$ .

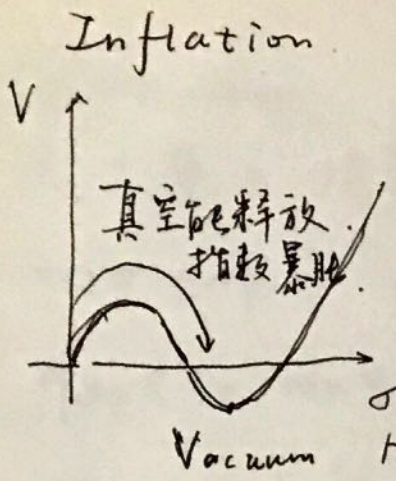
$t < t_p \approx 10^{-43} \text{ s}$ . 时空量子涨落明显. 极高温.

超统一相互作用  $\rightarrow$  真空相变. 真空对称性自发破缺.

$10^{-43} \text{ s} \sim 10^{-36} \text{ s}$ . GUT.  $\hookrightarrow$  Higgs 标量场.

$\downarrow$  GUT transition.

electron Weak & ~~Hadro~~ Strong force.



真空对称性自发破缺  $\rightarrow$  规范 Boson

非0质量  $\rightarrow$  存在.

$\sigma$  强  $\leftrightarrow$  相互作用, 有质量

quark - 主要质量, 强相互作用.

Higgs场强不为0.  $\rightarrow$

解决平坦性疑难.

$$\epsilon \equiv \left| 1 - \frac{1}{n} \right| = \left| \frac{n_{tot} - 1}{n_{tot}} \right| = \left| \frac{n_F}{n_{tot}} \right| \approx \sim \mathcal{O}(R^\alpha)$$

$\alpha \in [1, 2]$

暴胀使  $\epsilon$  减小  $\rightarrow$  平坦.

particle horizon at CMB (1°)

磁单极疑难.

$\downarrow$   
零维拓扑缺陷. 被暴胀稀释.

重子起源  
 { B 不守恒  
 C 和 CP 破缺.  
 偏离热平衡.

辐射主导宇宙.

$$n_b \sigma_b c H^{-1} < 1 \rightarrow \text{脱耦.}$$

$$C A B \sim 10^{-40} \text{ s.}$$

$$C N B \sim 1 \text{ s.}$$

$$C M B \sim 10^{12} \text{ s.}$$

BBN. Boltzmann分布

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp[-\Delta m / k_B T]$$

中微子脱耦.  $t \sim 1 \text{ s.}$

$$\text{此时 } \frac{n_n}{n_p} \sim \exp(-1.3).$$

温度太高.  $D$  不形成  
 $\rightarrow$   $-100 \text{ s}$  显著.