

Astrophysics

宇宙加速膨胀 \rightarrow Dark Energy

Extra Dimension?

高能宇宙线 300 GeV

天体极论.

HR graph Hertzsprung - Russell.

明亮程度 (视亮度, 流量 F)

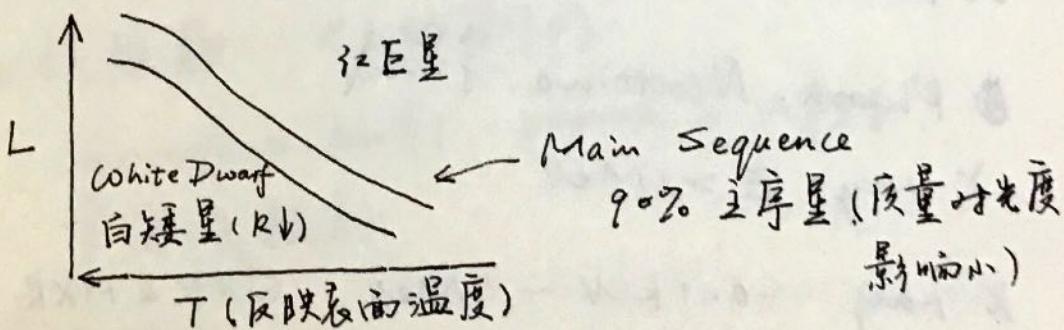
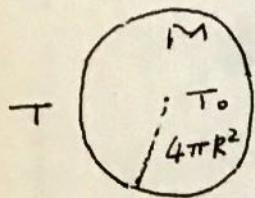
{ 颜色 (光谱特性).

光度, 绝对星等 (内部属性)

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

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

↓
视星等, 流量.



银河系, 银盘, 银核, 银晕

Disk Nucleus Halo.

↓
恒星金属丰度高

星族 I

Population I

星族 II

星族 III

b, He H5

He 退成

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 宇宙

椭圆 \Rightarrow {
 飞碟旋涡
 棒状

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

γ ray $E > 1 \text{ MeV}$.

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

紫外

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

红外

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

热辐射 —— 热力学概念，热平衡 → 辐射

{ 非热辐射 → 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.

} 弯曲辐射 (B 大，相对论).

e^-
⊕
 γ

Compton Scattering

& Inverse Compton Scattering

↑
高能天体物理.

胶子 → 强相互作用，0 质量，带电荷

韧致辐射 (电子的冷却)

Cherenkov 辐射，proton & α 粒子.

宇宙线辐射.

大元辐射窗口.

光子 $300\text{ nm} \sim 900\text{ nm}$

紫外波 N, O, O₃, N₂, O₂ 放电.

红外，由若干 μm 波长的窄波段 $350\text{ }\mu\text{m} \sim 850\text{ }\mu\text{m}$.

射电 $\sim 1\text{ mm}$ 至 30 m ($\sim 10\text{ MHz} \sim 300\text{ GHz}$)
分子转动、振动能级 (H₂O, CO₂)

黑体辐射

$$\text{Kirchhoff} \quad \varphi_e(v, T) = \alpha(v, T) \cdot B(v, T)$$

黑体 $\alpha(v, T) = 1$. 辐射效率最高.

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

Stefan - Boltzmann 定律

$$B(T) = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} P_V(T) dv = \sigma T^4$$

Wien 位移定律

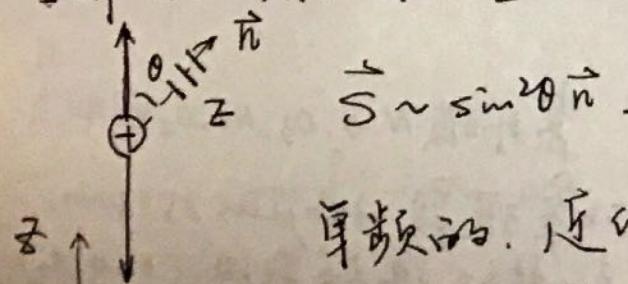
$$\lambda_{\max} T = 0.29 \text{ cm} \cdot K$$

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.

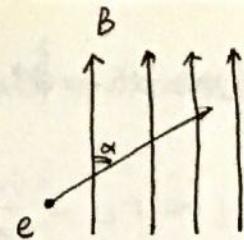
分解成两个相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 的偶极辐射.



单频的. 近似于各向同性
(2:1).

速度面球偏振. 互方向圆偏振.
其他方向椭圆偏振. 速度角分布 $\sim (1 + \cos^2 \theta)$

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



各向同性平均功率 $1.6 \times 10^{-15} \beta^2 B^2$

Larmor半径 $r_L = \frac{mcv}{eB}$ 根叶论 γr_L .

$$\omega = \frac{eB}{mc}$$

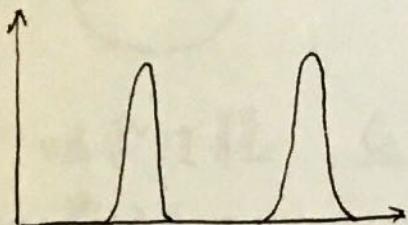
$$\omega/\gamma$$

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

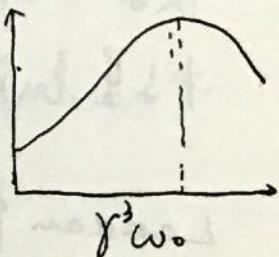
同步辐射. extremely relativistic.

辐射主要集中在 $1/\gamma$

峰宽度 $\propto \frac{1}{\gamma^3 \omega_0}$



Fourier Transformation



Radio主要是 Synchrotron Radiation.

Landau 能级与速率辐射.

$$l \sim r_L = \frac{mc^2}{eB} \propto \frac{1}{B} \quad \lambda \sim \pi \sim \frac{\hbar}{mc}$$

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

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

QED calculations.

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

辐射场与速率.

$$E_n = pc mc^2 + nh\omega_L$$

利用 Landau 能级测量天体磁场.

电子 $\Delta E_e = 1.6 B_{12} \text{ keV. (HXR band)}$.

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

中子星表面磁场强度.

Landau 能级激发态时标

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

故基本束缚于磁力线运动. (垂直于磁场而平行于速度辐射速率越小辐射越强. 射掉).

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

Compton Scattering & Inverse Compton Scattering

Thomson Scattering.

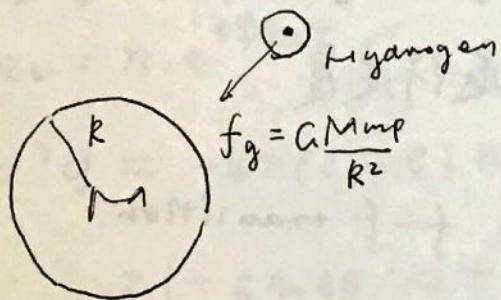
↓
低能光子的 Compton Scattering.

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

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

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

Zaddington 光度：球对称吸收和辐射最大光度.



$$f_g = G \frac{M m_p}{R^2}$$

吸积过程 $\underbrace{\frac{GM}{R} \cdot \frac{1}{4\pi R^2}}_{\text{能量全部转化}} = \sigma T^4$

能量全部转化
为辐射. F

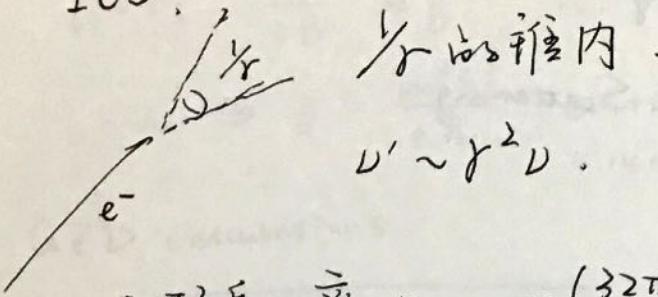
如果辐射压 = 万有引力，就无法继续吸积.

$$G \frac{M m_p}{R^2} = \rho c \sigma_T / (h\nu) \cdot h\nu / c \Rightarrow M_{\text{Zadd}} = \frac{4\pi m_p c k}{\sigma T}$$

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

$S_{\text{un}} \sim 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. 该光度.

ICS.



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

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

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

Sunyaev-Zeldovich Effect.

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

Galaxy Cluster. 退行速度.

韧致辐射. 热电冷却. f-f transition.

Cherenkov.

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

$\rho \uparrow \quad \theta \uparrow$.

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.

强弱的偶极磁场，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.

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

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

$$= (-e n_0 e \varphi / k_B T + q \delta(r)) \cdot (-4\pi)$$

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

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

$$\Rightarrow \varphi = \frac{q}{r} e^{-\frac{e\varphi}{k_B T} r / \lambda_D}.$$

QED: 屏蔽 $\propto e_m$, 精细结构常数变化. $SU(1)$

QCD: 反屏蔽 \propto_s 强相互作用耦合常数 $SU(3)$

Plasma Oscillation

$$\vec{E} = 4\pi e n_0 \vec{x}$$

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

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

波动理论论 Vlasov 方程

磁流体运动

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).

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

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

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

Diffusion.

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

$$ii) \sigma \rightarrow \infty, \eta_m \rightarrow 0 \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}), \text{ 磁冻结}$$

$$\text{磁导数 Reynolds 数} . \quad Rm = \frac{U}{\eta_m} \sim \frac{\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})}{\eta_m \nabla^2 B}$$

若 $Rm \gg 1$, 则前者占主导 \rightarrow 理想 MHD.

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

↓
磁扩散律.

ii) $\sigma \rightarrow \infty$.

外力克服磁张力做功? 使磁场增强.

↓
dynamo?

天体磁场起源.

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

Ohm耗散
Poynting flux

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

↓
Lorentz 力做功. (克服做功转化为磁场)

kinematic dynamo.

假设已给定.

角速度.

极性反转.



Ω 效应. - 磁源项. - 伸缩磁场)

α 效应 \rightarrow 平均电动势 $\varepsilon = \alpha B_0$ 电流 \rightarrow 极向磁场

Main Sequence.

重元素形成的熔炉.

H I 区 原子云. 10^2 K

H II 区 高温区 离子云 10^4 K.

分子云.

$\leftarrow 10$ K. H₂. 混有 CO, H₂O, NH₃ ...

(温度低, 热压小, 引力弱)

引力弱

原恒星 protostar (氢聚变此时已经贡献一部分能量)

正在H聚变 (不是²H).

AGB.

$4p \rightarrow \alpha$

主序星 $\xrightarrow[\text{therman}]{\text{热脉动}} \text{行星状星云.}$

重元素核心引 $> 8 M_{\odot}$ 直燃烧.

聚倍. 超新星 到 Fe, Fe核 \rightarrow 物质核心.

$1.5 M_{\odot}$

电子简并压极限.

电子简并

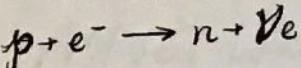
物质核心.

黑洞

中子星 白矮星 Cooling 致密核心 (大部分被回去).
 $1.44 M_{\odot}$ Chandraseka limit.

原核被挤压起.

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



都变成中子了.

$\alpha = em \ll 1$, $\alpha s \sim 1$, 对中子星极

限质量估计不准.

超过之后变成黑洞.

恒星的形成.

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

Jeans 不稳定性与恒星形成.

若只有引力, 密度渐下降 \rightarrow 坍缩.

但热压克服了密度渐降.

密度梯度足够高.

$$\text{引力} \sim G \frac{M^2}{R^2} \quad (\text{由行星运动引力推算}) \quad M \sim R^3 \rho.$$

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

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

介电尺度大于 $R \Rightarrow$ 引力不稳定性.

Jeans 长度

无穷大介电 引力不稳定发生临界长度.

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

声波波长长 \rightarrow 产生密度集中 \rightarrow 喷宿.

Jeans 密度

Jeans 质量

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

$$M_J \sim L^3 \rho$$

喷宿时标 Free Fall

假设引力占主导作用.

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

$$v = \sqrt{G \frac{M \alpha}{r}}$$

$$\tau = \frac{r}{v} = \sqrt{\frac{r}{GM}} \propto M^{-1/2} \quad \begin{matrix} \text{质量越大} \\ \downarrow \\ \text{喷宿越快} \end{matrix}$$

周光关系

平衡态附近，振荡行为

假设富高过程绝热

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

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

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

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

$$\text{at equilibrium. } R = \frac{k_1}{k_2 M^{1/3}}$$

以 $\delta \equiv R - R_0$ 做小量展开

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

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

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

观测数据统计结果 $p \propto M^{-1}$ (温度高)

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

质量关系 ($M \uparrow \leftarrow \uparrow$)

\Rightarrow 周光关系

Cepheid variable

Lane-Emden 方程与“标准模型”

$$\text{流体静力学平衡方程} \quad m = \int_0^r 4\pi x^2 \rho dx$$



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

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

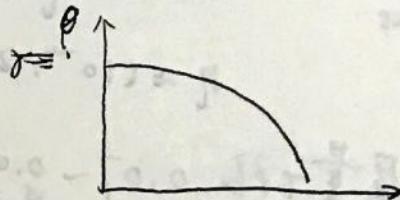
$$\exists \lambda p = k r^\lambda$$

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

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

$$\Rightarrow \theta'' + \frac{2}{\xi} \theta' + \theta'' = 0. \quad r > r_c$$

边界条件 $\begin{cases} \theta(0) = 1 \\ \theta'(0) = 0 \end{cases}$



恒星内部辐射压不可忽略

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

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

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

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

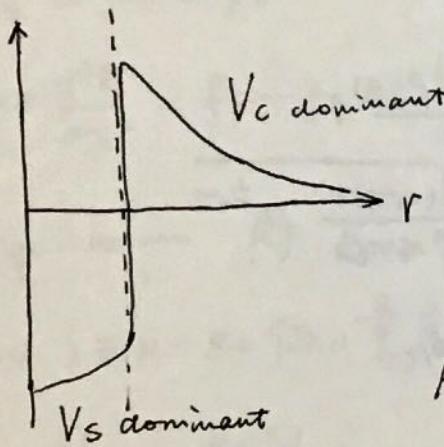
恒星质量↑ 中心T↑ 密度↓.

核燃烧条件

Main Sequences. ~ Hydrogen

$$T_0 \sim 1 \text{ keV} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{1/3}$$

$$V_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{N_1} + r_{N_2}} \approx 1.2 \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \text{ MeV} \gg T_0$$



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

考质量隧穿效应.

使得 ~~kev~~ keV 原子能发生核聚变

$$k_B T \sim \eta V_C$$

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

→ 主序星质量下限 $0.07 \sim 0.08 M_\odot$

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

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

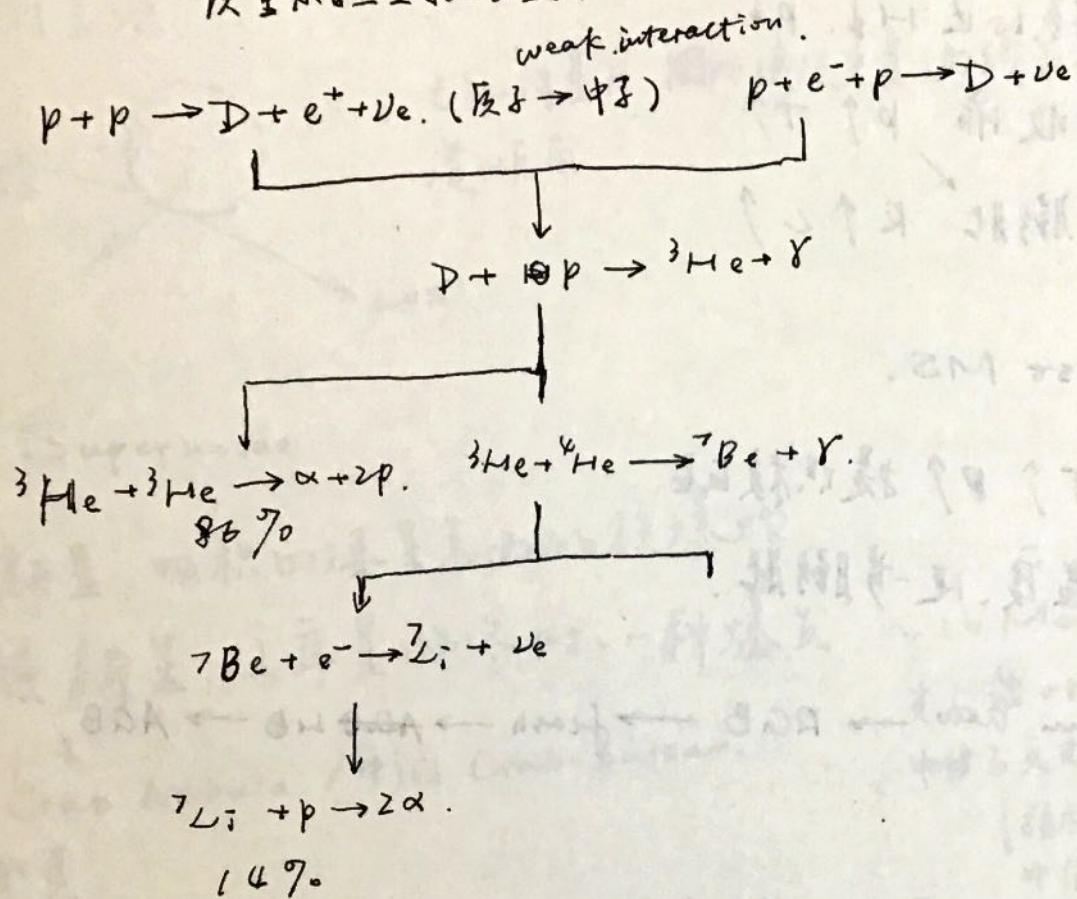
P大, T低, 时间并电子壳层强明显.

刚刚燃烧, P不随T变化, 反应一直加快.

核合成过程

和
氢燃烧 pp 键 (CNO 循环)

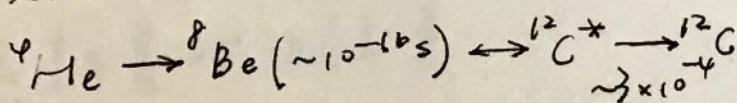
质量小恒星较明显.



弱相互作用，作用时间长

高激发态

强相互作用 3α



比铁重元素合成

(slow) (rapid)

中子俘获抑制又俘获新中子 U, Co.

中子俘获 S, R 过程

Supernova.
超巨星

质子俘获 p 过程 (有 Coulomb 势垒)

$\geq A M S$

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 RGB \rightarrow flash \rightarrow ~~AGB~~ LB \rightarrow AGB.

旋转恒星的平衡位形.

$$E = E_0 + \frac{L^2}{2I} + A\varepsilon^2 + B(\varepsilon - \varepsilon_0)^2$$

恒星质量-测定.

~ 双星系统.

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

轨道倾角.

$\sin i$

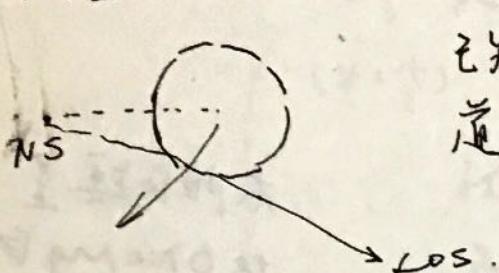
实际测到的...

\Rightarrow 测得 $\left(\frac{M_2 \sin i}{M_1 + M_2} \right)^3$ 质量比数.

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. 通过光变曲线反推取道倾角.

Supernovae

新星: 吸积向矮星表面的核爆炸.

超新星: 主序星临终时一种爆发. $\sim 10 \text{ MeV}$

Crab Nebula. / 中间 Crab pulsar.

光子辐射产生

中微子负电子对.

弱相互作用

中微子对.

引力能都破坏了.

微子带走了.

新星

核能: Ia

{ 引力能: cc. (比核能更有效).

超新星观测分类.

光谱

光变

无 H \rightarrow I 型

有 H \rightarrow II 型

有 Si Ia. (亮). 核能.

无 Si He Ib } 引力能.

有 He Ic }

无 He II } 引力能.

光变线性 II L

光变非线性(有平台) II P.

Ia 为补充 H, ~~没有~~ 有 Si;

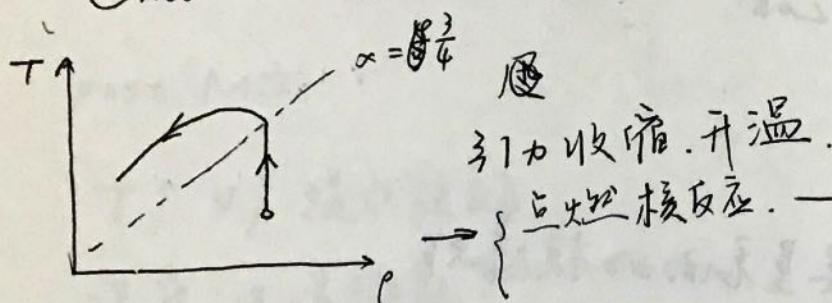
是太阳白矮星核聚变产物.

Ib, Ic 把质量大强大的星风把 H, He 包层都吹跑;

Ic 型 Supernova 崩缩, CRB?

核燃烧导致的超新星爆发.

Chandrasekhar 质量.



太阳白矮星

to O Ne Mg 白矮
星放能能量
 $\sim 10^{52}$ erg.

Ia 超新星 $T_{dynamic} \rightarrow T_{nuclear}$.

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

\rightarrow 不膨胀做功 \rightarrow 爆炸.

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

$\rho_{Willips}$ ~~关系~~ (标准烛光)

测量绝对星等 ($\Rightarrow d_L$) .

宇宙加速膨胀.

核燃烧过程 \rightarrow 燃烧激波 刻画.

爆轰 $> v_c$, 爆燃 $< v_c$.

激波面參數

$$\begin{array}{c}
 \xleftarrow{\substack{D-v_2 \\ P_2, P_2, U_2}} \quad \xleftarrow{\substack{D \\ P_2, P_2, U_1}}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \text{質量方程} \quad \rho_1 D = \rho_2 (D - v_2) \\
 \text{動量方程} \quad P_1 + \rho_1 D^2 = P_2 + \rho_2 (D - v_2)^2 \\
 \text{能量方程} \quad P_1 V_1 + \frac{D^2}{2} = P_2 V_2 + \frac{(D - v_2)^2}{2} + U_2
 \end{array}
 \right.$$

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

就算有狀態方程，整個方程組也是不閉合。

Rayleigh 異常

Hugoniot 方程

$$\frac{D^2}{V_1^2} = - \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1}$$

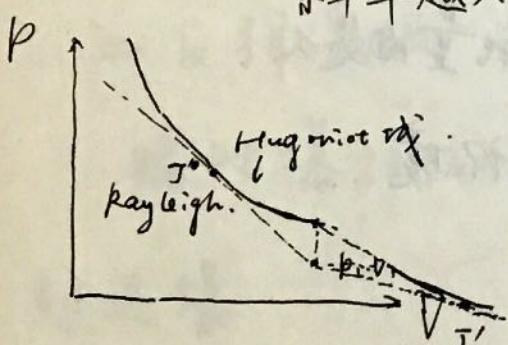
$$q + U_1 - U_2 + (P_1 + P_2)(V_1 - V_2)/2$$

燃燒前 後 P, V 的 $\frac{dP}{dV}$

求燃燒波前速度

RHS \rightarrow P, V 圖上切末志連線的斜率

斜率越大，燃燒越激烈。



C-J 理論

Rayleigh 直線與 Hugoniot 曲相切

J: 斜率大，高速燃燒波。

detonation.

一般超音速。

J': 斜率小，低速燃燒波

deflagration

一般亞音速。

引力塌缩型超新星爆发 Core Collapse.

铁核塌缩, $M > 10 M_{\odot}$

ρ 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 佔合称最高).

$$^{56}Fe = 13 \times \alpha + 4n.$$

可能塌缩形成中子星, 并提供 r 过程 (快速俘获中子) 的元素
核合成场所.

来自光致裂变.

$$T \approx \gamma + \gamma \rightarrow e^{\pm} \rightarrow \bar{\nu}\nu$$

$$\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

原中子星星风中 反应中微子能量更大.

⇒ 容易与质子反应, 造成高中子环境.

~~proto~~^{neutron} star.

把周围物质用中微子吹出去.

铁核塌缩过程中 $T \sim MeV$.

① 光致裂变 \Rightarrow 质子、中子, 降低铁核压.

② 电子俘获 $e^- + {}_z^A X \rightarrow {}_{z-1}^A Y + \bar{\nu}_e$, 降低电子简并压.

③ 中微子产生

④ 广义相对论效应 使引力效应更强.

塌缩铁核 $P \uparrow$ 中微子不再透明.

同时中微子与重原&核之间发生相干散射.

$$\sigma_0 = 10^{-45} \left(\frac{Z_\nu}{mc^2} \right)^2 A^2$$

截面而很大.

$$l_D \sim 10^2 \text{ km}$$

反弹激波与瞬时爆.

以声速为界，内核~~而~~亚声速，外核超声速，过压缩。

\Rightarrow 反弹激波 (高温高密度，光致蜕变吸能)

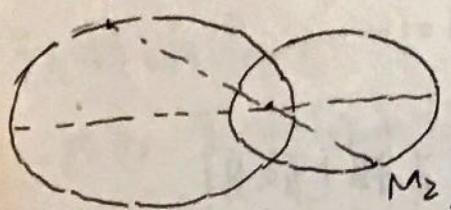
瞬时爆往往不能成功.

延迟爆.

中微子俘获高，塌缩速度 $>$ 扩散速度，中微子暂时无法扩散。

引力能被中微子携带。 \rightarrow 相干散射 \rightarrow 周围物被吹跑了。

Roche 分离与双星演化.



质量分离

$$\phi(r) = -\frac{GM_1}{(r_0 - r_1)} + -\frac{GM_2}{(r - r_0)} - \frac{1}{2}(\vec{R} \times \vec{r})^2$$

在 M_1, M_2 附近球对称.

远离 M_1, M_2 .

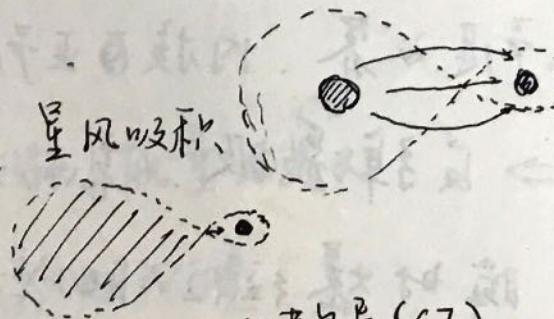
临界 Roche 面. 一颗变成巨星. 表面达到 L_1 .

双星系统分离.

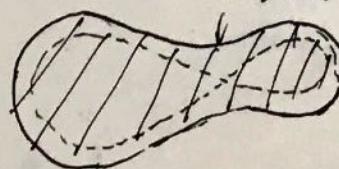
不相接双星. 靠近 Roche 面. 星风吸积.

半相接双星. 强度交流.

相接双星. 两流满 Roche 面.



公共包层 (CL)



非球对称超新星爆发. \rightarrow kick velocity.

星风吸积. 强 X 射线双星.

双中子星绕转并合. γ -burst.

Optical \rightarrow kilonova

吸积产能量与光子能量

$$\eta = \begin{cases} 1\% & \text{white dwarf} \\ 15\% & \text{neutron star} \\ 6\% & \text{Schwarzschild BH} \\ 40\% & \text{Kerr BH} \end{cases}$$

一个质子引力能转化为一个光子 \rightarrow 完全不热化 $\sim 100 \text{ keV}$.

引力能转化成黑体谱 \rightarrow 完全热化.

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

~~球对称~~ 用 不完全热化 $\epsilon_2 < h\nu < \epsilon_1$.

求吸积 (零用动量吸积)

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

$$\dot{m} = \sim \pi R_a^2 c s \rho.$$

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

如果是暗物质? 吸积?

↓ 中子星

由于暗物质不与其他物质作用，更不知道是抛物线或圆锥.

如果是运动介质的吸积

$$\text{吸积半径 } R_a \approx \frac{GM}{c_s^2 + V^2}$$

$$\text{运动} \cdot \text{此时吸积率 } \dot{M} \sim \pi R_a^2 (c_s^2 + V^2)^{1/2} \rho.$$

盘吸积，在 Roche 球半径 L_1 处吸积。

如果吸和流能量耗散率远高于角动量损失率。
 \rightarrow 是角动量能量最低态，比角动量 $\ell = rv$.

$$m \frac{v^2}{R_{\text{circ}}} = G \frac{mM}{R_{\text{circ}}^2} \Rightarrow R_{\text{circ}} = \frac{\ell^2}{GM}.$$

若 $R_{\text{circ}} > R_s$ ，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，则不会有吸积了。

\Rightarrow 需要喷反机刹车耗散能量

耗散能量功率 = 力矩 · 角速度。

单位质量直接角动量差。自由程。

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

作用力矩。

$$G(r) = 2\pi r H v + \rho \cdot r^2 \int^r \lambda \quad (\rightarrow H \rho \text{ (面密度)})$$

$$\approx 2\pi r^3 v \sum \lambda' \times v \sum r'^{-1/2}.$$

$\lambda v \rightarrow$ 动粘滞系数

内外层作用的净力矩.

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

单位时间净力矩做功.

粘滞作用释放能量

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

单位

相互作用传递，转动动能.

盘面积辐射能量

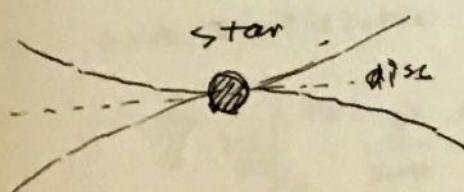
$$D(r) = \frac{2\pi r^3 G \cdot \Omega \cdot dr}{2 \cdot 2\pi r dr} = \frac{1}{2} \nu \left(\sum (r\Omega')^2 \right) \propto \nu \sum r^{-3}$$

(r 越小，亮度越高，光子能量高).

ν , \sum 如何确定?

标准吸积盘模型 \propto 模型 Shakura, Sunyaev.

假设 $\nu = \alpha H c s$. 对 $H \ll R$. 近似星体辐射 (光厚)
(几十分薄)



完备的初力学模型.

描述白矮星 \vee 黑洞 \times 中子星 \times

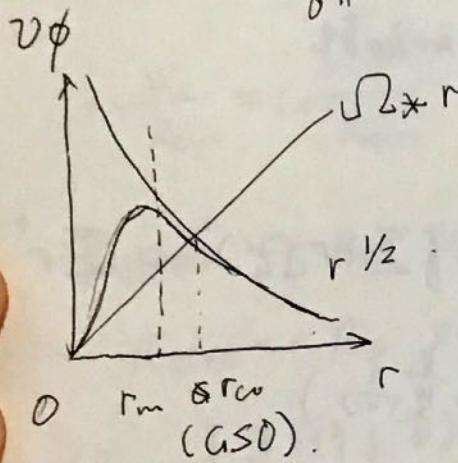
内部热压大，几十分薄
和光厚不成立。

磁中子星吸积.

接近中子星丁) 磁源后, 被吸积磁流体与星体共转的远高中子星. Kepler运动.

磁层半径 ($\rho_B \sim \rho_{\text{critic}}$)

$$\frac{B^2}{8\pi}$$



吸积流能否落到磁中子星表面.

若 $r_m > r_{\text{co}}$, 则落不回表面且吸积减速.

若 $r_m = r_{\text{co}}$, 则吸积加速

定义速度 $w_s = \frac{\sqrt{2}*}{\sqrt{2}_K(r=r_m)}$.

若 $w_s > 1$, 则会减速.

若 $w_s < 1$, 则会加速

White Dwarf

Main Sequences.

$$\left\{ \begin{array}{l} P = n k_B T \\ P = \frac{1}{3} \rho \rightarrow \propto T^4 \end{array} \right.$$

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)

$$\left\{ \begin{array}{l} e \rightarrow WD \\ n \rightarrow NS \\ ? \rightarrow BH \end{array} \right.$$

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

$\alpha = 0$. 近独立粒子.

$$E_F = (p_F^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}.$$

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

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

nonrelativistic approximation.

$$\overline{E} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} p_F \frac{p^2}{2m} \cdot \frac{2 \cdot 4\pi p^2 dp}{h^3} = \frac{3}{5} E_{kF}.$$

$$p^{NR} \propto n^{5/3}$$

Extremely relativistic

$$p_{ZR} \propto n^{4/3}.$$

$\otimes p \sim n^r$ γ 越大 \rightarrow Hard. (no WD limit)
 γ 越小 \rightarrow Soft

Chandrasekhar 极限.

半定量考虑. NR:

$$Z_g \approx -k_1 \frac{GM^2}{R}$$

$$Z_K \approx Z_F \cdot N \sim \left(\frac{N}{V}\right)^{\frac{2}{3}} N \sim \frac{M^{\frac{5}{3}}}{R^2}$$

$$\Rightarrow Z_g + Z_K = k_2 \frac{M^{\frac{5}{3}}}{R^2} - k_1 \frac{GM^2}{R}$$

ZR .

$$Z_K \sim \frac{N^{\frac{2}{3}}}{V^{\frac{2}{3}}} \cdot N \sim \frac{M^{\frac{4}{3}}}{R}$$

$$\Rightarrow Z_g + Z_K = \frac{k(M)}{R}$$

若 $k > 0$. 稳定.

若 $k = 0$. 暂时平衡.

若 $k < 0$. 无法平衡 \rightarrow 崩溃.

$$K \text{ 与质量有关 } k = (k_3 - k_1 M^{\frac{2}{3}})$$

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).

四种机制相互作用.

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

脉冲星类天体观测系统.

rotation powered pulsar.

$E_{\text{rot}} \sim 10^{51} \text{ erg}$. ($m_\odot, 10 \text{ km}, 1 \text{ s}$), { radio pulsar
X-ray pulsar
 γ -ray pulsar

accretion powered (Binary System).

strong magnetic field

magnetic

X-ray burst.

hot spot

nonisotropic radiation.

$p - \dot{p}$ diagram.

X-ray pulsar.

~~soft~~ soft X-ray repeater

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

magnetic field? (magnetar?)

Central Compact Object. 中央致密天体. $\sim 10^2$ m
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 - 冷却.

爆发时引力能 $Zg \sim 10^{53}$ erg.

Fermi $\frac{E}{2}$ cPF - 400 MeV.

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

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

$$(vT - Z_{th}) \sim 10^{53}.$$

↓

$$C_V \sim \frac{k\varepsilon M}{m\mu} \quad \varepsilon = \frac{kT}{E_F - mc^2}.$$

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

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

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

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

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

$$\begin{array}{c} \overrightarrow{p_F(p)} \\ \swarrow \quad \searrow \\ \overrightarrow{p_F(e^-)} \\ \downarrow \\ \overrightarrow{p_F(n)} \end{array}$$

$$p_F(p) + p_F(e^-) = p_F(n)$$

$$\geq n_p^{1/3} > n_n^{1/3}$$

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

结构:

潮汐压力被放宽 \rightarrow 重力加速度, $g(M/R^2)$.

$\exists (M/R)$.

CR 飘飞.

TOV 方程.

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{G m(r) \rho}{r^2} \left(1 + \frac{P}{P_{c0}} \right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{m(r) c^2} \right) \frac{1 - 2 \frac{G m(r)}{r c^2}}{1 - 2 \frac{G m(r)}{r c^2}}$$

小质量中子星: $M \propto R^{-3}$ (引力束缚流).

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

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).

$s s u d$ 质量相近.

six flavors, three colors.

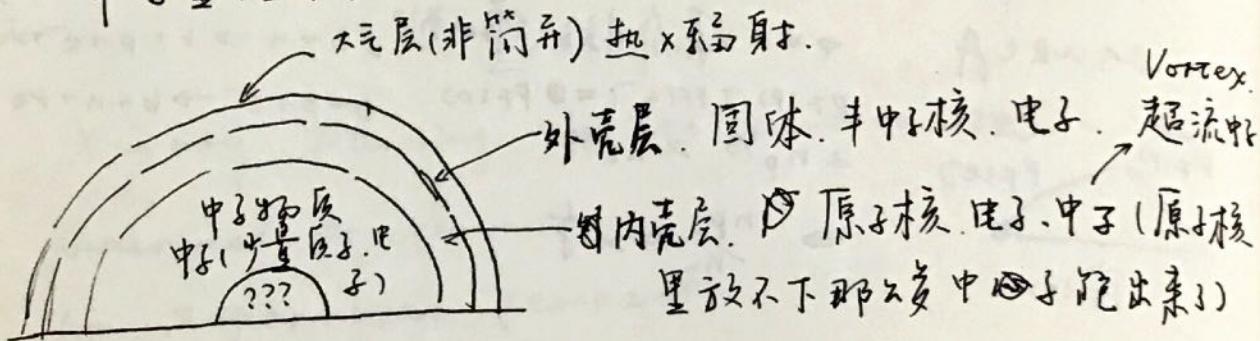
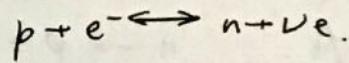
u	c	t	r	g	b
d	s	b	heavy flavor		
			light flavor		

(脉冲星上几乎没有).

若 u, d, s 都是自由的，可开 quark 星

若 u, d, s 不是自由的，而是束缚在 strangeon 中。

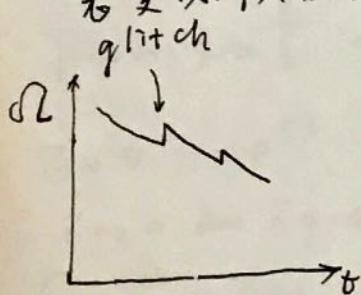
中子星结构。



丰中子核易发生 p 衰变。

但是如果泡在简并电子气里面。

衰变必须放出比 Fermi 能高一电子才能进行。



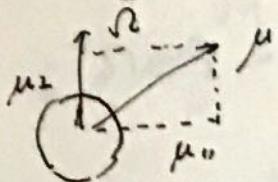
奇异星。

Witten 猜想：大块的奇异物质最稳定（比 ^{56}Fe 还稳定？）

Strangeon matter? 5 nucleon 美妙。也是束缚的。

1 + Strangeon $\sim 10 \mu\text{m}$. $\Delta M ??$

转动只能脉冲星.



$$\mu_1 \text{ 定义: } \vec{\omega} = -\frac{2}{3c^2} \mu_1^2 R^4 \rightarrow I \propto R^2$$

$$\mu_1 = BR^3 \sin \frac{\alpha}{2} \Rightarrow \text{星体表面磁场}$$

$$\text{制动指数 } \gamma = -kR^n. \quad \mu_1 \text{ 定义 } n=3.$$

μ_0 相当于切割磁感应.

光束圆柱，内部可以说为真空.

黑洞.

Laplace black star

带有奇性的时空区域.

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

$$g_{\mu\nu} \rightarrow R_\mu^\nu \Gamma_{\mu\nu}^\sigma \rightarrow R_{\mu\nu\rho\sigma}^\nu \rightarrow \frac{R_{\mu\nu\rho\sigma}^\nu}{\delta_\mu^\rho \delta_\nu^\sigma} = R_{\mu\rho} \rightarrow g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} = R.$$

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

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

AGF.

Cosmic censorship principle.

$r > 3R_s$ 时才会有稳定的圆轨道 ISCO.

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

Innermost stable circular orbit.

引力红移.

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 - rs/r'}{1 - rs/r}} \quad \text{无穷远观察者, } r' \rightarrow \infty.$$

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

=

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

$$\Rightarrow z \approx = 1 + \frac{1}{2} \frac{rs}{r} + \dots$$

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

↓

测 M.

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

光或偏折 deflection.

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

为 Newton 势

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

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 $r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 - Q^2}$ $a = \sqrt{L/M}$.

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

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

外视界之外无限仁移面: ~~Energy phase~~ 能层.

→ 质能轨道 (逆向旋转)

→ 无穷远处飞过某一物体, 排出一部分质能.

→ 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

(黑洞)

黑洞的量子效应

粒子与黑洞？

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar \\ \downarrow \quad \hookrightarrow 10^{41} \text{ GeV} ? \\ r \sim 10^{-55} \text{ cm}$$

量子引力？ $T_{\mu\nu}$ 在本质上应该是量子化的。

$$G_{\mu\nu} \cancel{Ricci} ?$$

广义相对论在小尺度下？

时空涨落？

Planck 尺度

$$r_s \sim \lambda$$

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

Schwarzschild 半径 \rightarrow 量子波包。

$$\text{利用 } \Delta E \Delta t \sim \hbar \quad \Delta t \sim 10^{-44} \text{ s.}$$

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar. \quad \Delta x \sim 10^{-33} \text{ cm.}$$

Hawking 辐射.

真空中虚粒子对消落.

→ 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 $10M_\odot$ 双星塌缩.

超大质量黑洞 $10^6 - 10^8 M_\odot$ AGN.

天体

γ ray Burst GRB. 瞬变源.

宇宙学尺度上发生的恒星级天体爆发现象.

$> 10^{50}$ erg?

探测率 1~2 天.

多峰轮廓.

持续时间分布: 多暴与巨暴

T_{90}

硬度 Hardness.

$S_{100-300\text{keV}} / S_{50-100\text{keV}}$. \rightarrow 核塌缩超新星?

大多数 GRB. Soft and long 巨暴

其他

Hard and short.

各向同性均匀分布.

非.

10 keV ~ 10 MeV.

能谱特征. power-law.

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

1 MeV 以上无明显截断. (光子容易变成电子时)

其他波段余辉.

XR. Optical. Radio.

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

宿主星系 \rightarrow 12 级.

各向同性 \rightarrow 总能量.

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

火球模型.

光度时标 $\sim ms$. 角度 $\angle \sim c\delta t \sim 300 \text{ km}$.

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

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

$$T \left(\frac{\text{总辐射强度}}{\text{自由程}} \right) \sim 10^{13}.$$

光深大 \rightarrow 平衡态 \rightarrow 黑体谱.

静态火球 X.

故端相对论性动力学的膨胀火球

可能是光薄的.

大量能量

爆发机制.

“重子污染”? 重子数 $\sim 10^0$ 左右，能量爆发.

① 内激波 X-ray $\xrightarrow{\text{blue shift}}$ γ ray.
 外激波 \rightarrow 余辉. Hypernova?
 (包括与星际介质相互作用). 长暴.

② 双致密星并合. BM & ~~BM~~ NS. NS & NS.
 短暴?

星系

退行.

拥挤 $D \sim 1 \text{ Mpc}$ $a \sim 10 \text{ kpc}$. $\frac{d}{D} \sim 10^{-2}$.
 活动性. $\left\{ \begin{array}{l} \text{正常星系} \\ \text{活动星系 - 高吸积率.} \end{array} \right.$

Hubble's Law

$$v = H_0 D$$

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

Strong gravitational lensing. 星系级.

Micro gravitational lensing.

银河系晕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 \rightarrow 电场与吸收 - 星系物质作用
放区与赤道存在电势差 \rightarrow 提取转动动能。

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

microquasar. (恒星级黑洞) .

X-ray binary.

acceleration BH.

Fe K α 例。 \rightarrow 与黑洞质量、自旋有关。

旋转 \rightarrow Doppler shift.

引力透镜。

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.

旋转 \hookrightarrow pulsar?

Cosmology.

大尺度上均匀性

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

$$\eta_{Br} = \rho_v / m_p \approx 10^{-7} \text{ cm}^{-3}.$$

$$\eta_v = \eta_B / \eta_B \sim 10^{-10}.$$

重子对称性破缺度。

宇宙学原理：

均匀且各向同性。

RW Metric.

三维空间线元

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

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

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

RW Metric + EFE + Ideal Fluid.

Friedmann Eq.

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

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

宇宙膨胀与热力学.

膨胀 \rightarrow 真空对称性改变.

QGP 强相互作用耦合系统

QCD 相变. Quark-Hadron transition.

\hookrightarrow proton & neutron.

$D, {}^3He, {}^4He$.

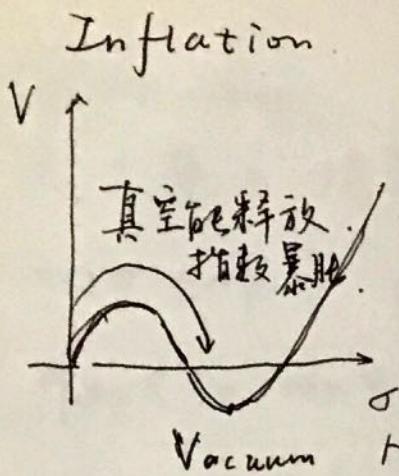
$t < t_p \approx 10^{-43}s$. 时空量子涨落明显. 极高温.

超流-相互作用 \rightarrow 真空相变. 真空对称性自发破缺.

$10^{-43}s \sim 10^{-36}s$. GUT. \hookrightarrow Higgs 场

\downarrow
GUT transition.

electron Weak & ~~Strong~~ Strong force.



真空能释放
指数暴胀
非质量 \rightarrow 存在
 ϕ 强 \rightarrow 相互作用 有质量
Higgs场强.

quark 主要质量 强相互作用.

Higgs场强不为0. \rightarrow
解决平坦性疑难.

$$\xi = |1 - \frac{1}{\sqrt{2}}| = \left| \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2} - 1} \right| = \left| \frac{\sqrt{2} K}{\sqrt{2} + 1} \right| \approx \sim \cancel{R}^{\alpha} \quad \alpha \in [1, 2]$$

暴胀尺度减小 \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 破坏
偏高热平衡

弱射主尋尋尋.

$n, \sigma, cm^{-1} < 1 \rightarrow$ 脫耦.

CGB $\sim 10^{-40} s.$

CNB $\sim 1 s.$

CMB $\sim 10^{12} s.$

BBN. $\beta = \text{Bremann's 布}$

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

中微子脫耦. $t \sim 1 s.$

此 $\rightarrow \frac{n_n}{n_p} \sim \exp(-1.3).$

溫度太高. D 不形成
 $-100 s$ 突變.