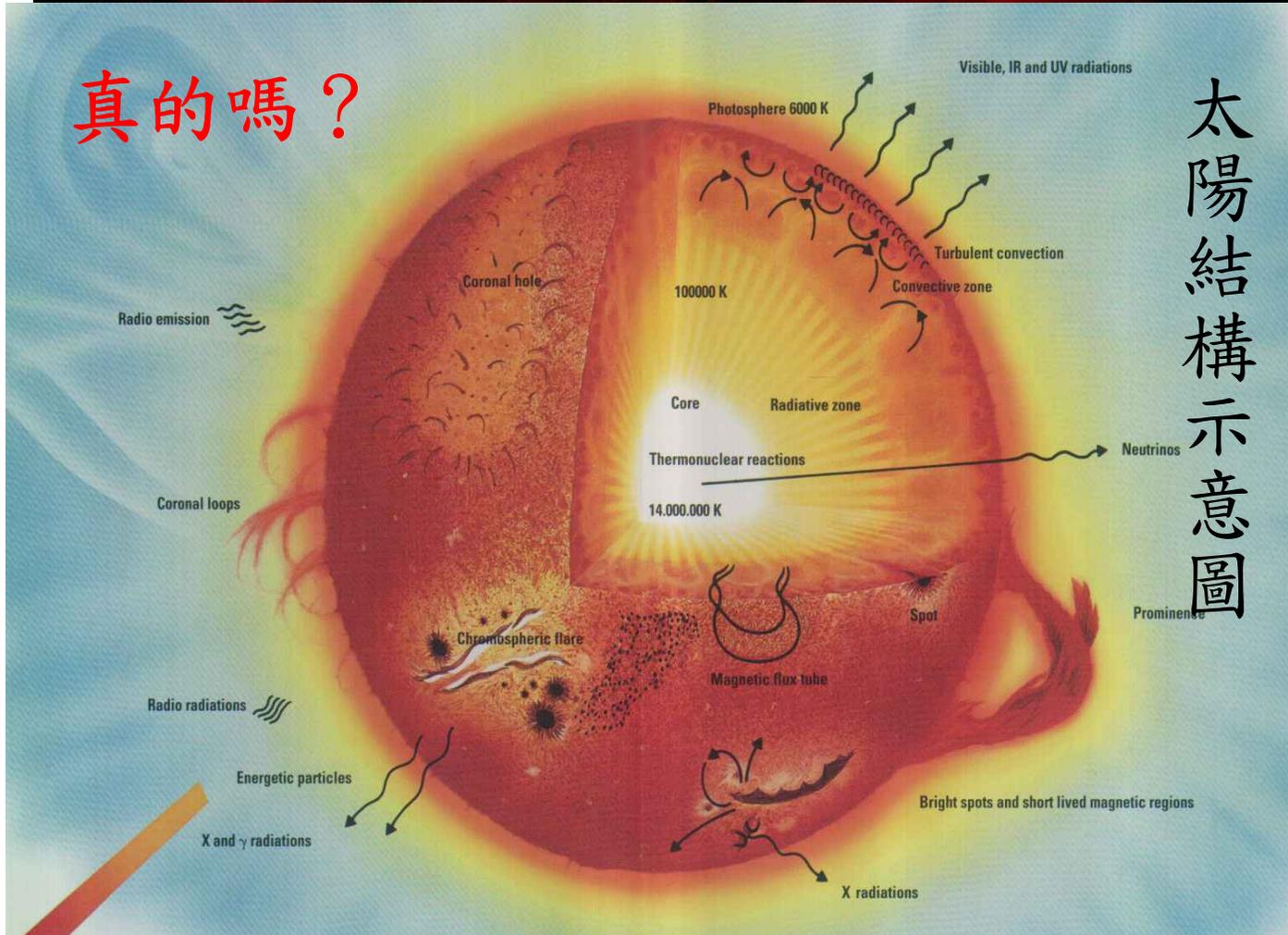




Twinkle twinkle little stars,
how I wonder what you are ...

太陽X光照

真的嗎？



怎樣可以看穿星星？

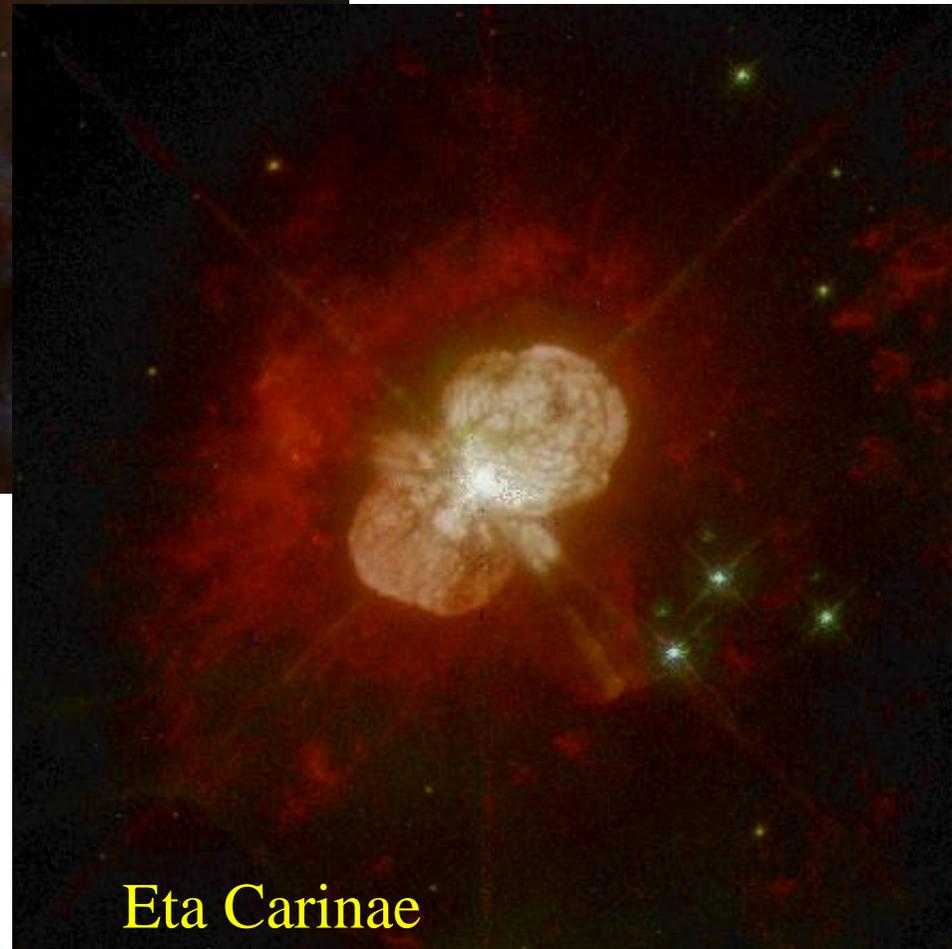
Courtesy GOES Solar X-ray imager, NOAO

恆星爆炸

內部發生甚
麼事？



超新星 SN N63



Eta Carinae

Photo courtesy NASA/STScI

中微子天文學

- 中微子物理(neutrino physics)簡介
- 甚麼是中微子天文學?
- 怎樣建做中微子望遠鏡?
- 近年有甚麼新發現?
- 香港有甚麼相關研究?

朱明中



香港中文大學物理系

中微子(neutrinos)物理簡介

中微子

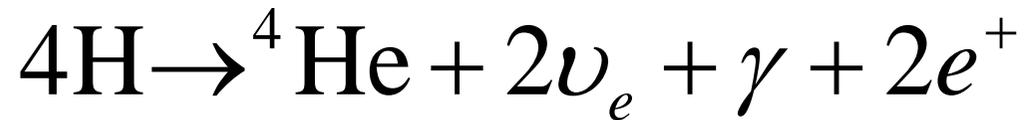
- 基本粒子之一(如電子、光子、夸克子等)
- 有三種： ν_e ν_μ ν_τ
- 不帶電荷
- 只有弱作用(weak force)及重力(gravity)，
沒有強作用(strong force)及電磁力(EM)
- 穿透力極高(平均每一百萬粒穿越地球只有一粒有撞擊)
- 質量極小 $m_{\nu_e} < 1 \text{ eV} \approx 10^{-6} m_e$

<http://www.ps.uci.edu/~superk/neutrino.html>

<http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos>

中微子

- 核融合反應中製造, 如太陽核心:



每秒發出約 2×10^{38} 中微子!

地球每秒每平方公分接收約四百億粒

其中約三百粒為宇宙初開大爆炸所製

每人每天約發出三億粒 (體內放射性元素)

每人每天接收核電廠發出約百億粒

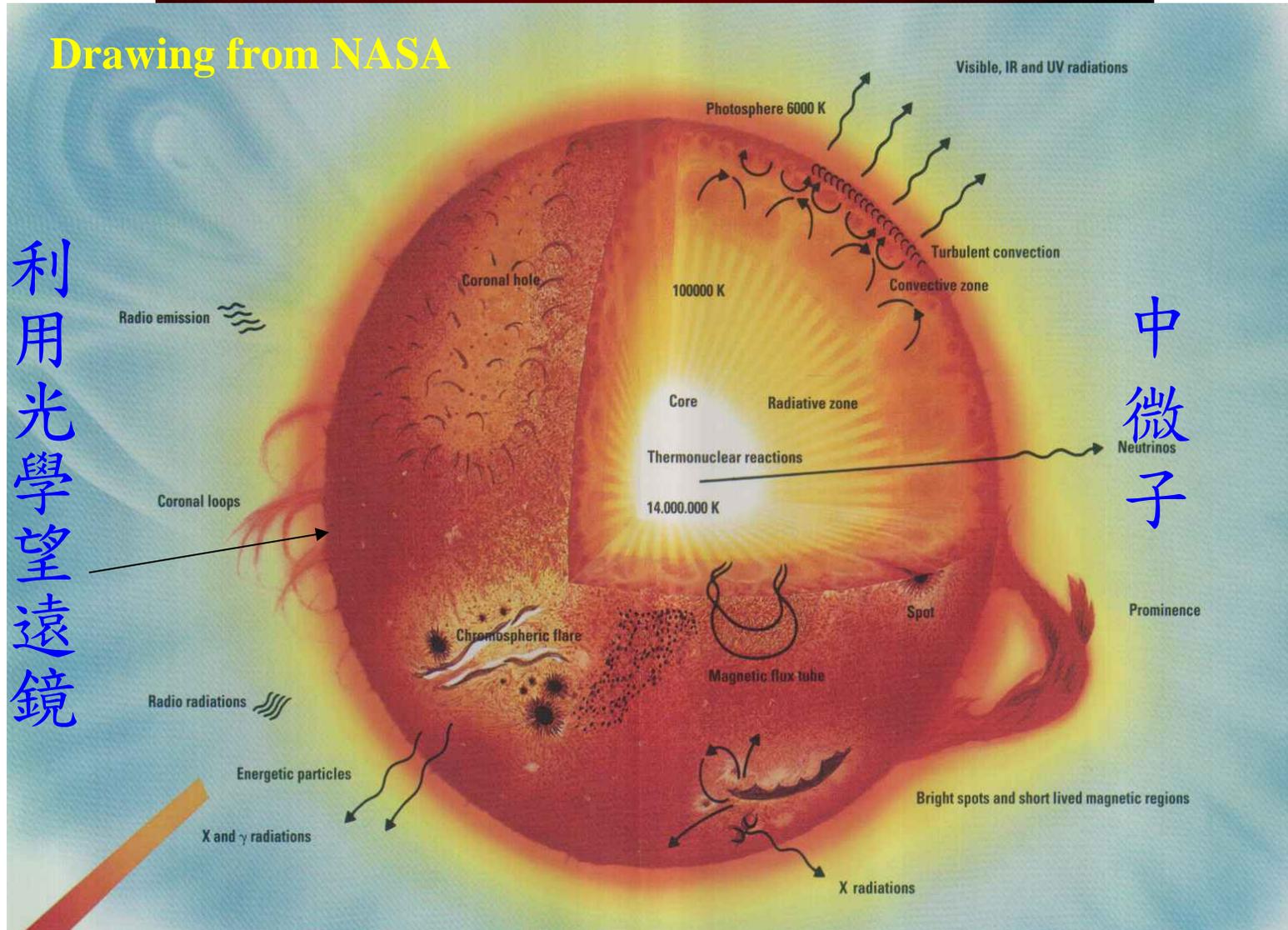
甚麼是中微子天文學？

中微子天文學

- 高溫、高密度星體放射大量中微子
- 中微子穿透性強
- 接收中微子=接收星體內部資訊
- 如：恆星核心
- 星球爆炸：超新星(**supernova**)
- 超新星遺留致密星(**compact star**)
- 大爆炸 (**Big Bang**)→宇宙中微子背景
- ...

<http://cupp oulu.fi/neutrino/>

恆星核心



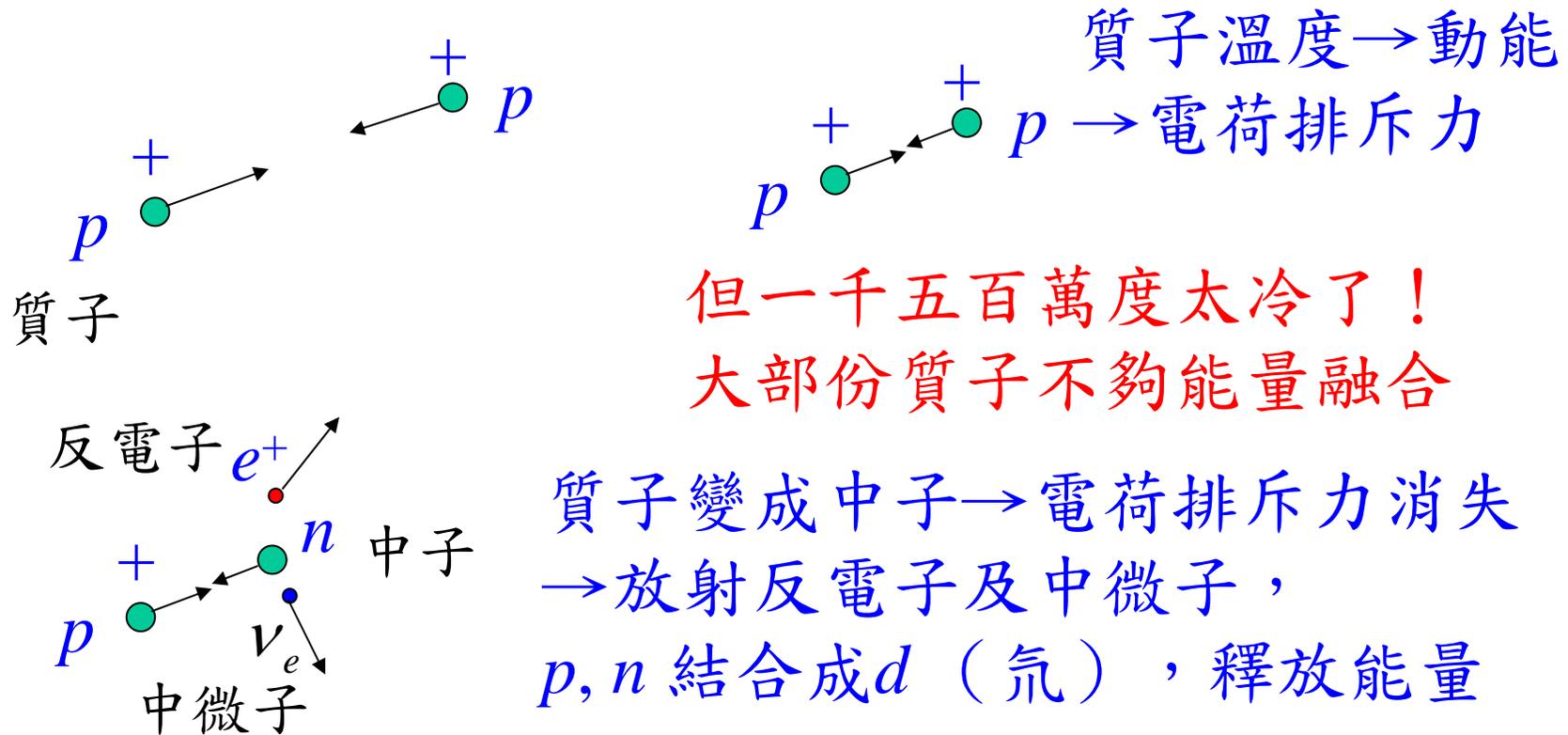
利用光學望遠鏡
只看見表面

中微子

太陽：典型恆星

Photo from SOHO, <http://sohowww.nascom.nasa.gov/explore/>

熱核融合反應(fusion)

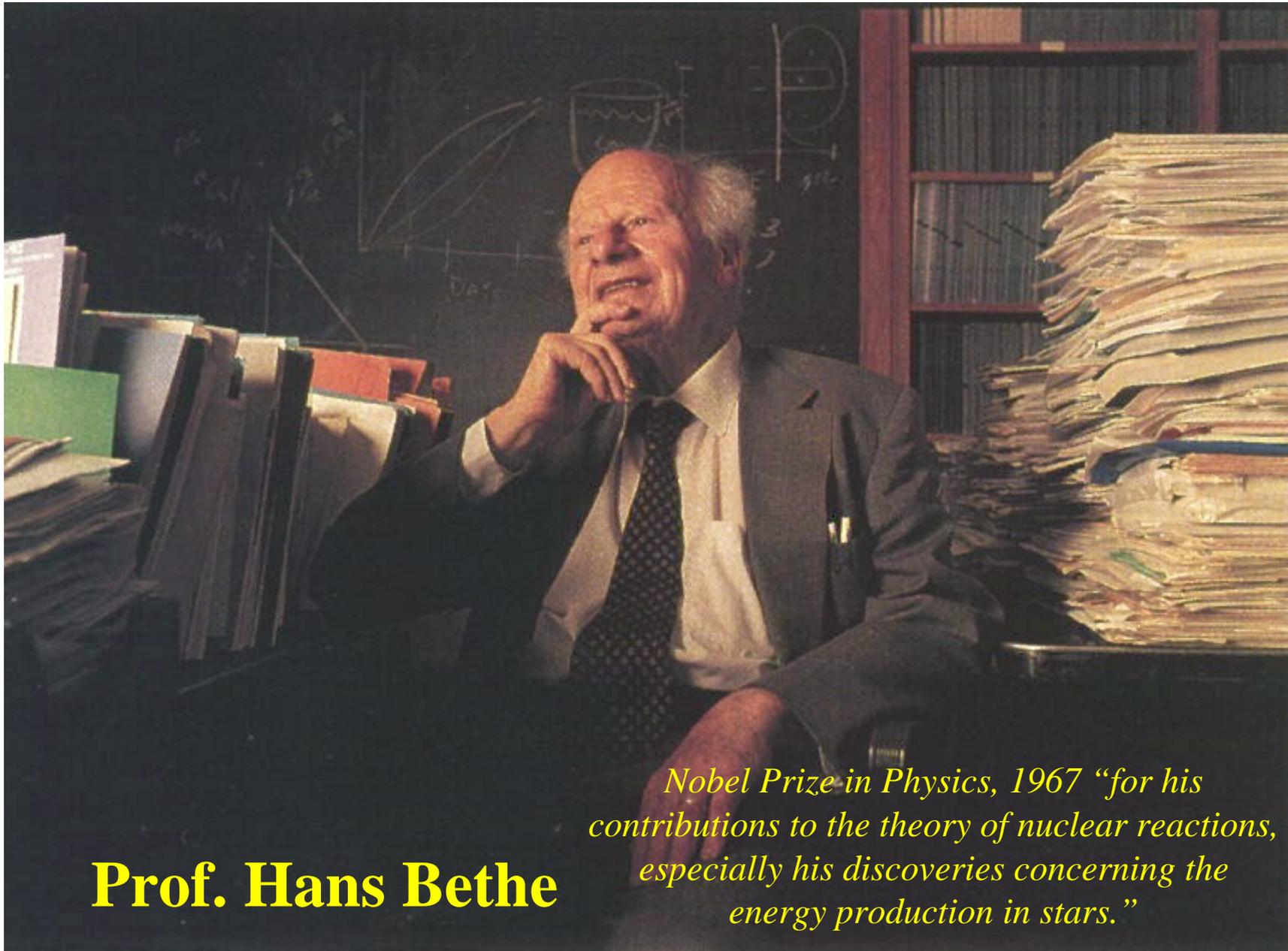


但中子質量大於質子→量子效應！ $(+E = mc^2)$

→ 氫燃燒慢 (平均每粒子 10^{10} 年有一反應)

但密度高，粒子數高 (每秒燃燒 10^{38} 質子)

→ 太陽穩定，壽命 $\sim 10^{10}$ 年

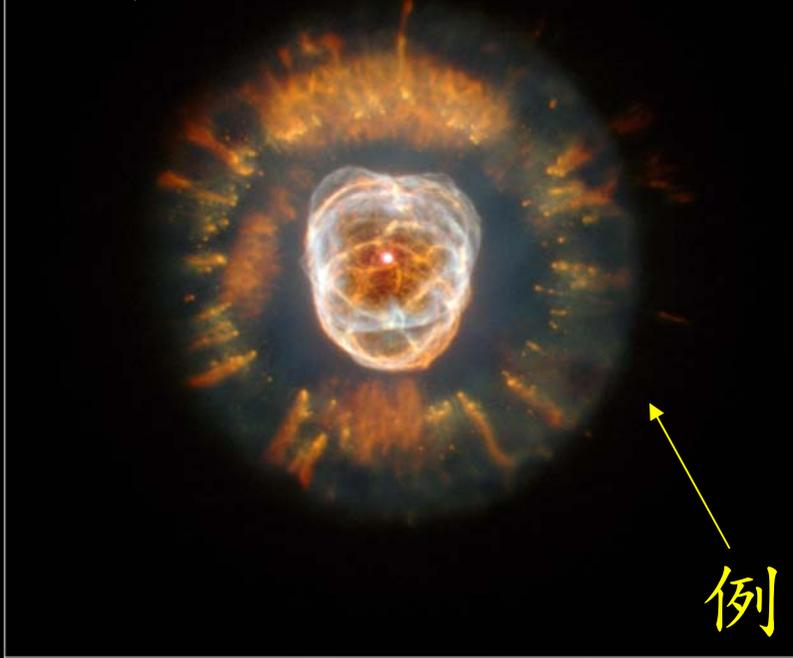


Prof. Hans Bethe

Nobel Prize in Physics, 1967 “for his contributions to the theory of nuclear reactions, especially his discoveries concerning the energy production in stars.”

超新星 (Supernova)

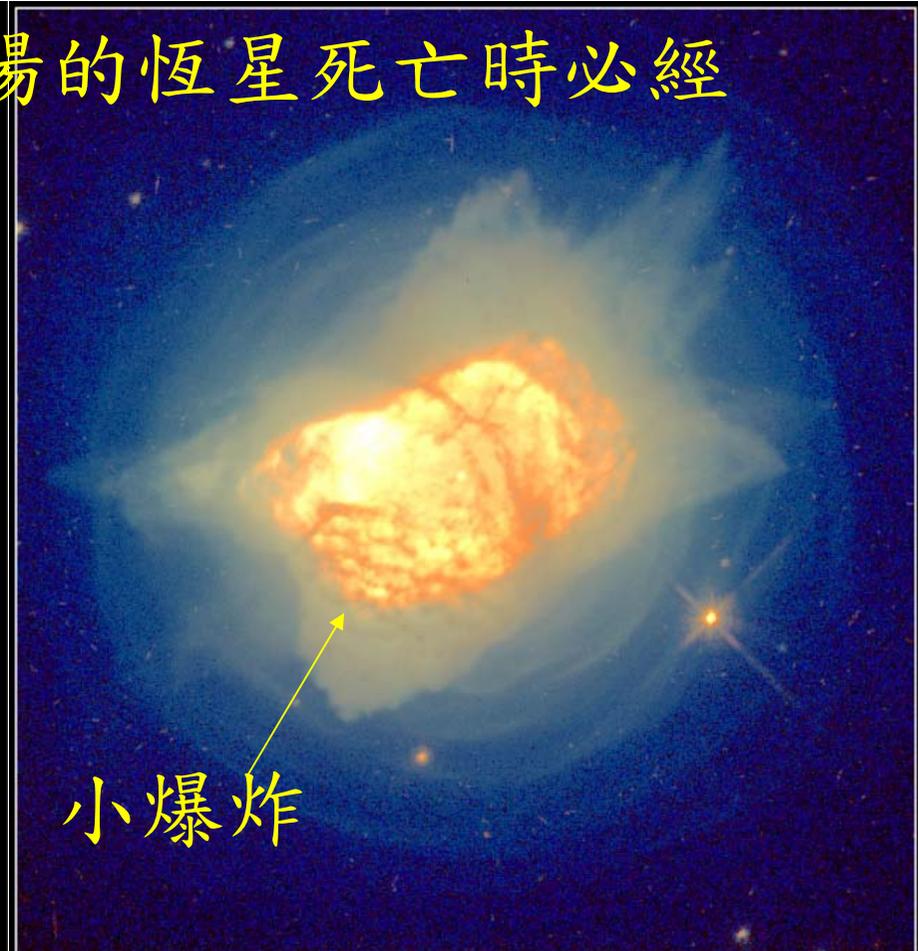
質量大於二至三倍太陽的恆星死亡時必經
爆炸階段



NGC 2392 • "Eskimo" Nebula
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-07

Photos courtesy HST/NASA



例：小爆炸

Planetary Nebula NGC 7027 HST • WFPC2
PRC96-05 • ST ScI OPO • January 16, 1996 • H. Bond (ST ScI) and NASA

超新星 1987A



lian Observatory

© Anglo-Austra

Photo credit: Anglo-Australian
Observatory

星球大爆炸

<http://www.aao.gov.au/images/captions/aat050.html>

超新星中微子



- 超新星: 高溫高壓物質
- 超新星必經極密極熱階段:
產生大量($\sim 10^{57}$)中微子
- 中微子被困短時間，之後帶走大部份能量
- 原則上帶有超新星內部資料

超新星爆炸遺留致密星

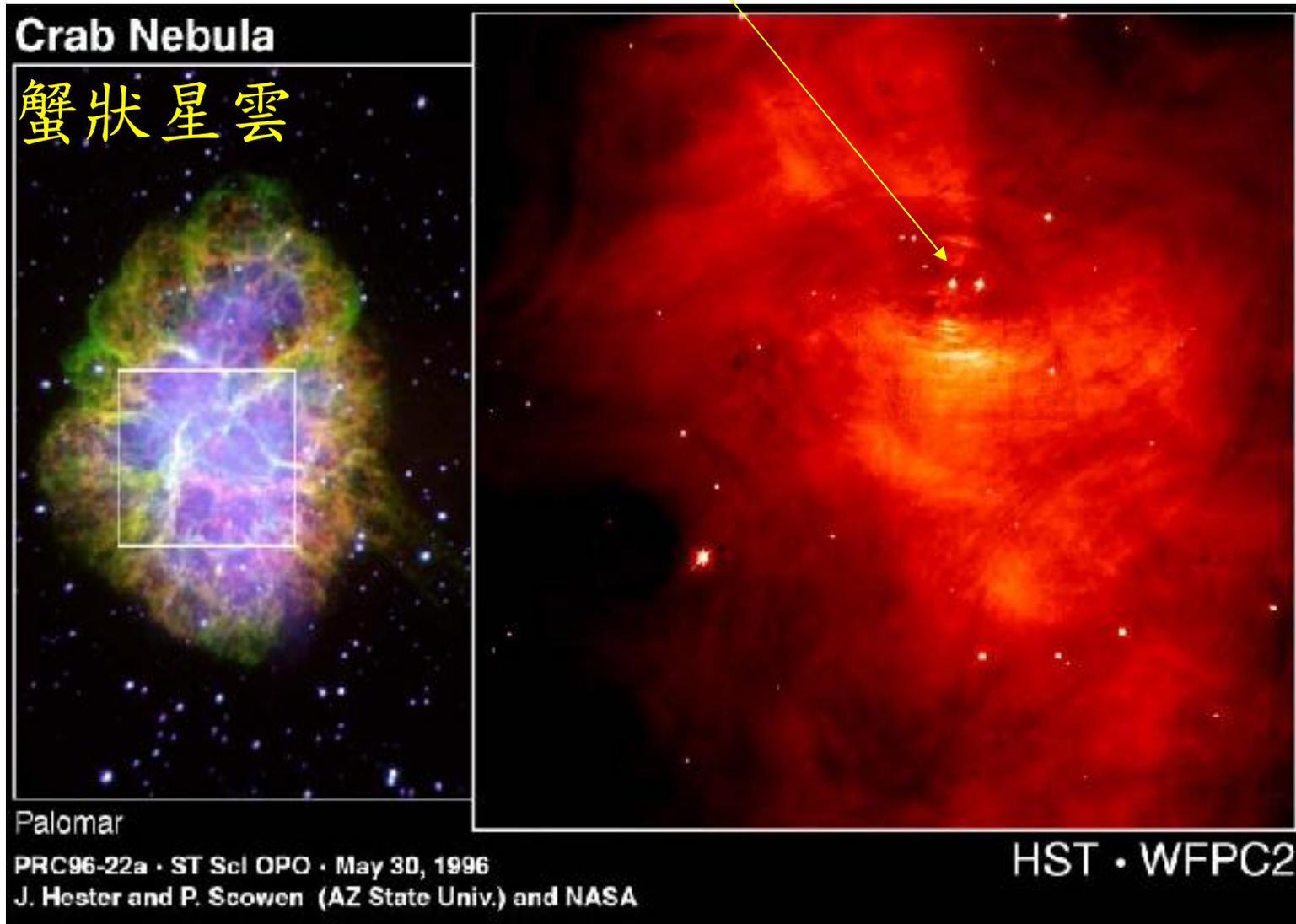


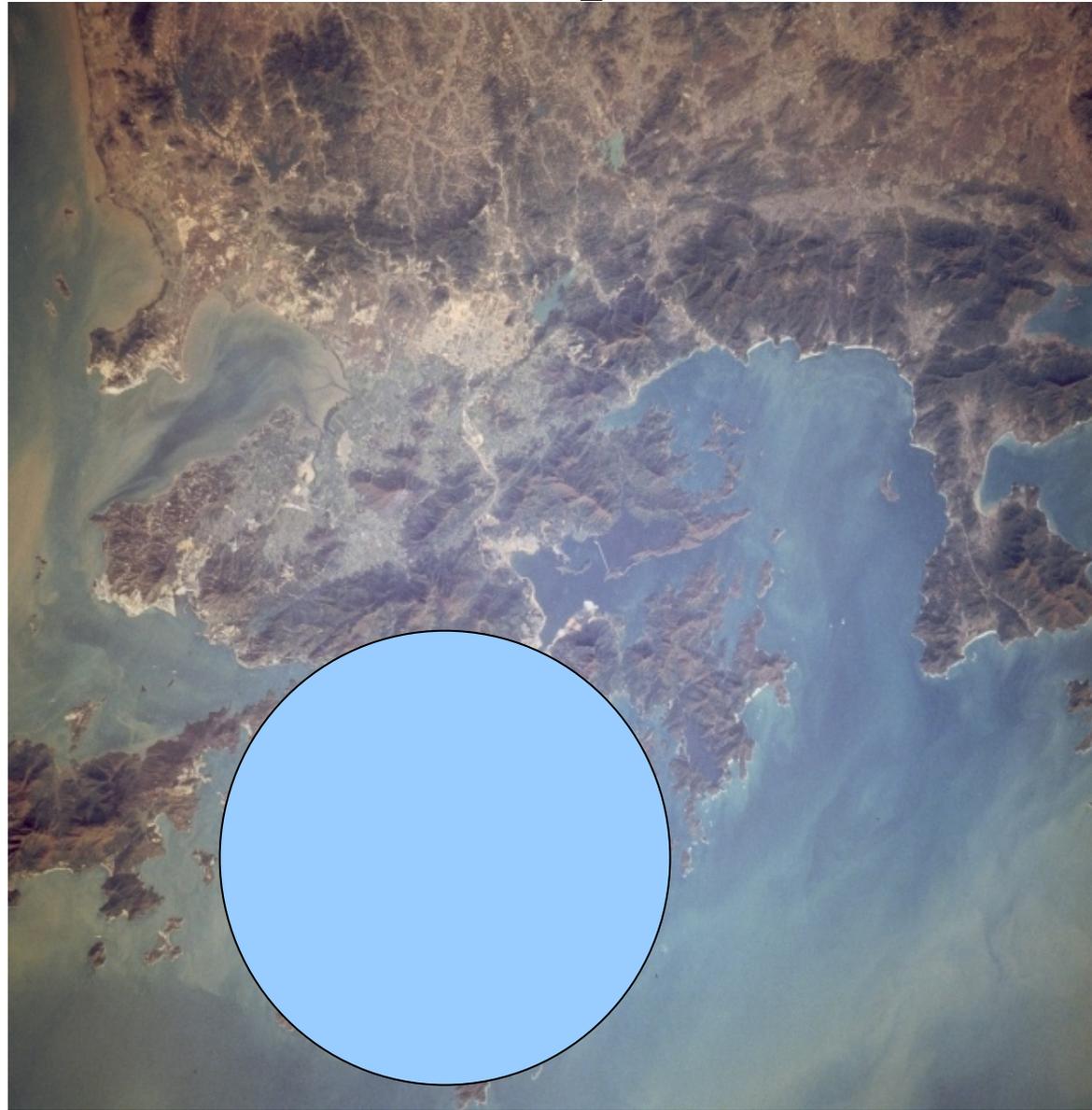
Photo courtesy NASA/STScI

致密星 (compact star)

約太陽質
量壓縮至
香港大小
 $\sim 10^{15}$ g/cc

已發現超
過一千顆

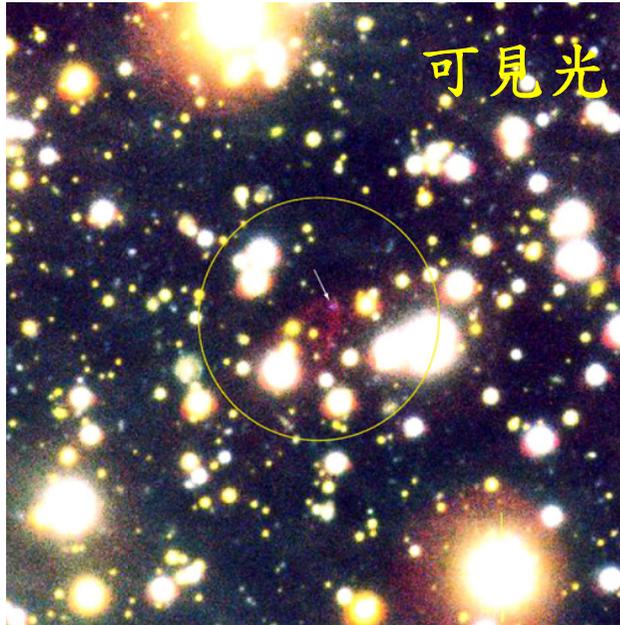
怎樣構造?
甚麼物質?
中子? 夸克
(奇異星)?



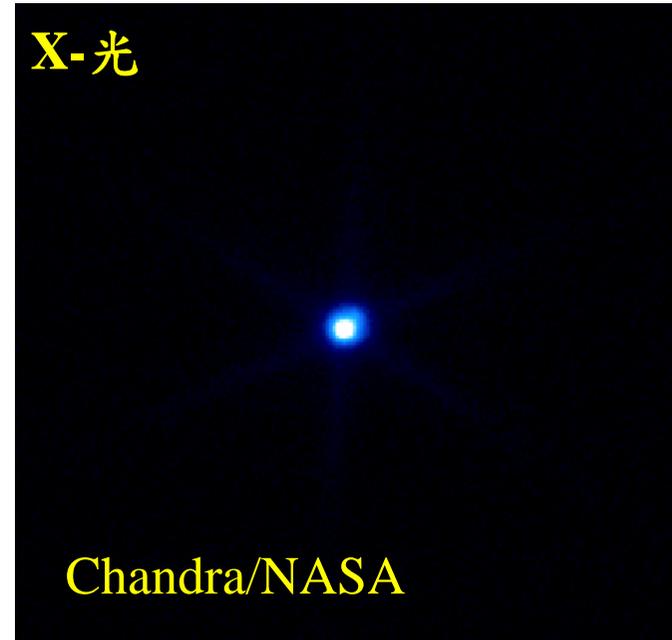
~ 50 km Photo credit: NASA

<http://www.fourmilab.ch/earthview/vplanet.html>

RXJ 1856.5-3754



Credit: European Southern Observatory
Very Large Telescope



直徑 ~ 11.3 km ，比中子星小! 夸克星(奇異星)?

中子星或夸克星皆放射大量中微子（但速率不同），且大部份中微子能穿越整顆致密星!

Photos courtesy NASA/CXC/SAO downloaded from

<http://chandra.harvard.edu/press/kits/strangematter/index.html>

奇異星 研究 在中大

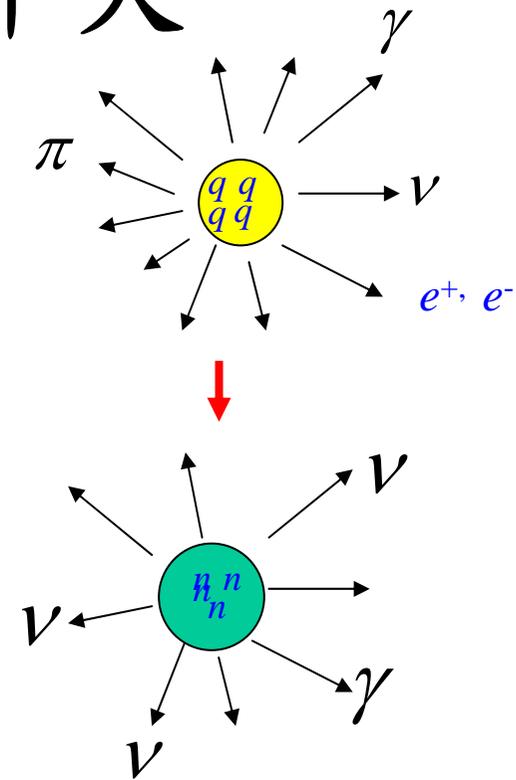
初步結論:

1. 超新星可以製造奇異星

2. 奇異星急速冷卻變回中子星

3. 相變釋放大量能量(潛熱) $\sim 10^{53}$ ergs

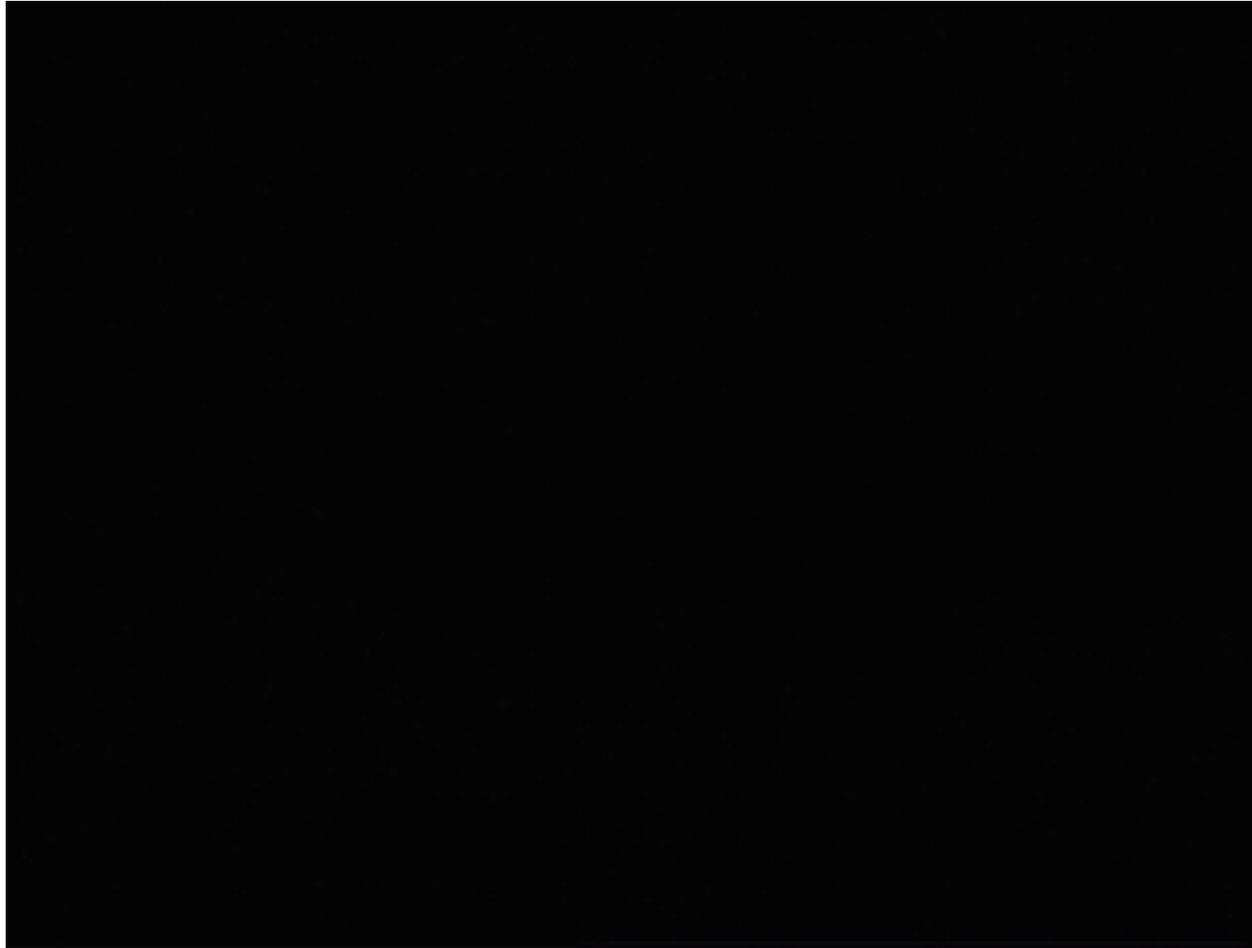
4. 兩次中微子爆發



伽瑪線爆發GRB源?

中微子望遠鏡觀測

大爆炸 Big Bang



大爆炸製造大量中微子，至今天仍平均每立方公分有三百粒！

中微子宇宙學 Neutrino Cosmology

- 大爆炸製造大量中微子→觀測宇宙中微子可驗證大爆炸理論，及得知宇宙最早期狀況資料: 理論上可「看」到的最遠景像
- 中微子數量及質量影響宇宙結構（星系、星系團等）之演化
- 中微子CP不守恆可能解釋宇宙物質-反物質的不對稱

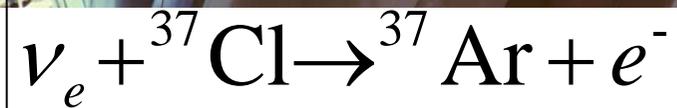
怎樣建做中微子望遠鏡？

中微子望遠鏡

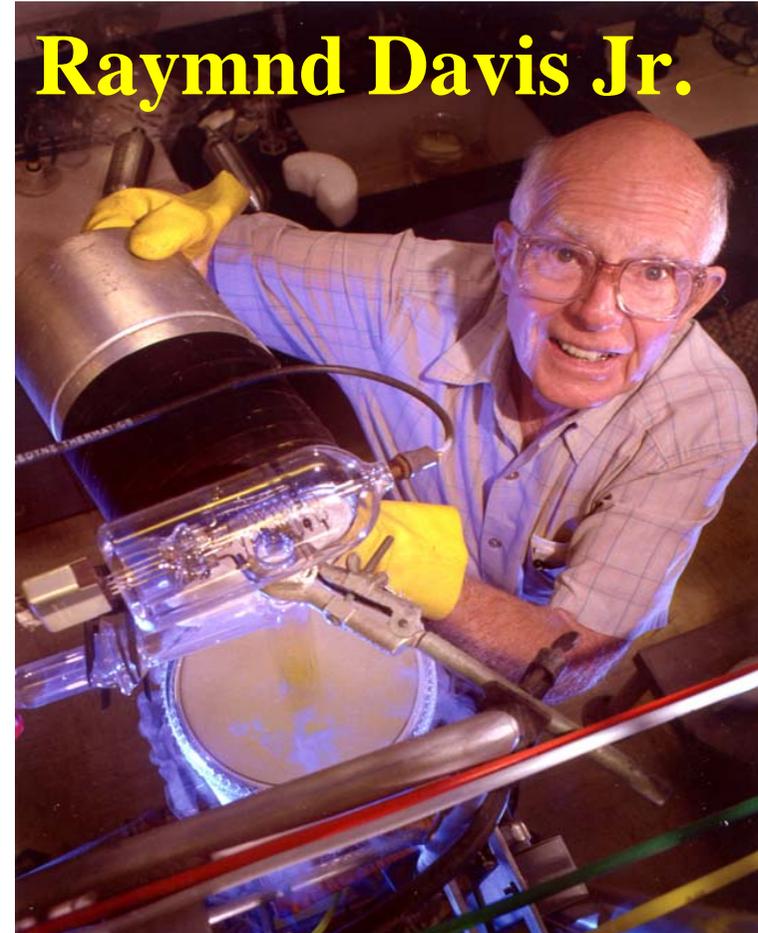
- 望遠鏡: 大面積收集遠方訊號
- 紀錄訊號→利用中微子與質子或中子的相互作用如 $\nu + p \rightarrow n + e^+$, $\nu + n \rightarrow p + e^-$
可量度
- 中微子與物質相互作用弱: 每噸物質每日平均只有數個反應
- 用大量物質

Homestake mine
1970-1995

100,000 gallon
of cleaning
chemical



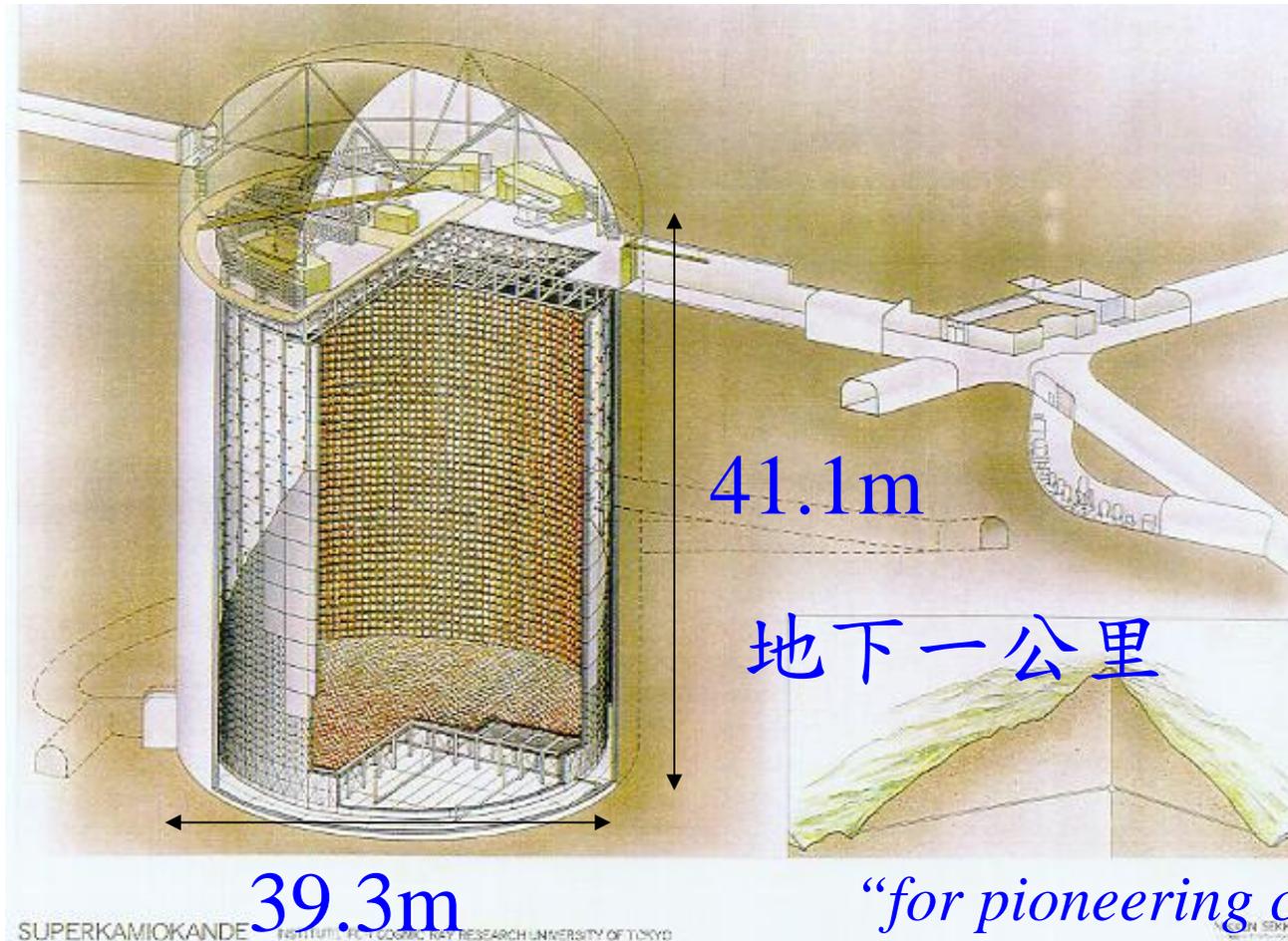
Raymond Davis Jr.



“for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos”

Photos from Brookhaven National Lab <http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/>

Kamiokande 神岡宇宙素粒子研究中心



Masatoshi
Koshiba

39.3m

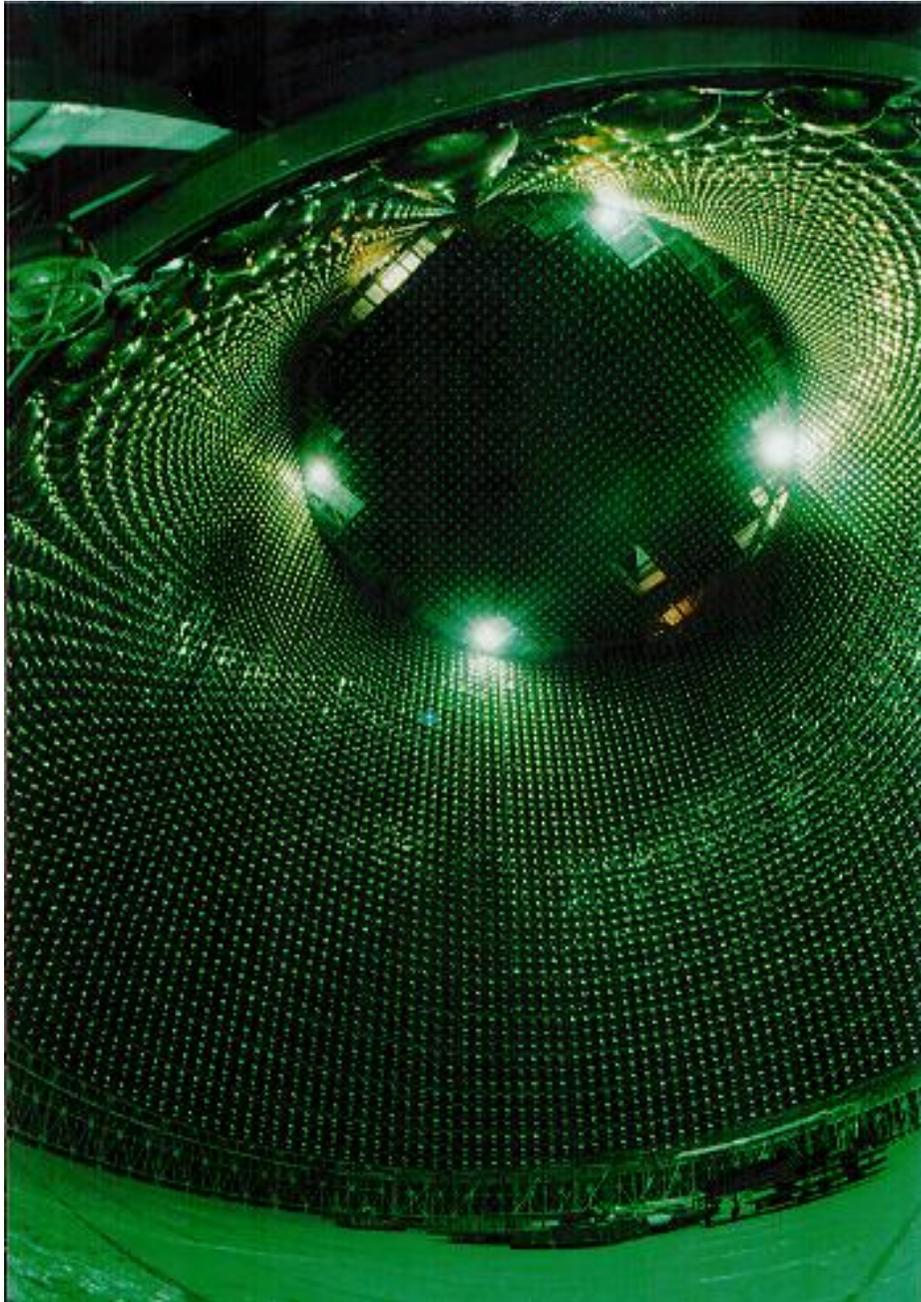
五萬噸純水

41.1m

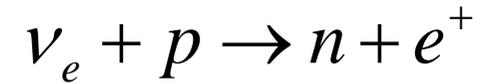
地下一公里

“for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos”

Drawing from Superkamiokande <http://dumand.phys.washington.edu/~superk/>

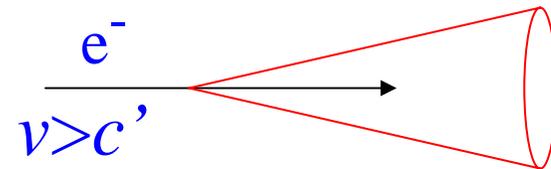


SuperKamiokande



穿行水中發光

以一萬一千枝
光電管探測



Cerenkov radiation

SuperKamiokande 光電管

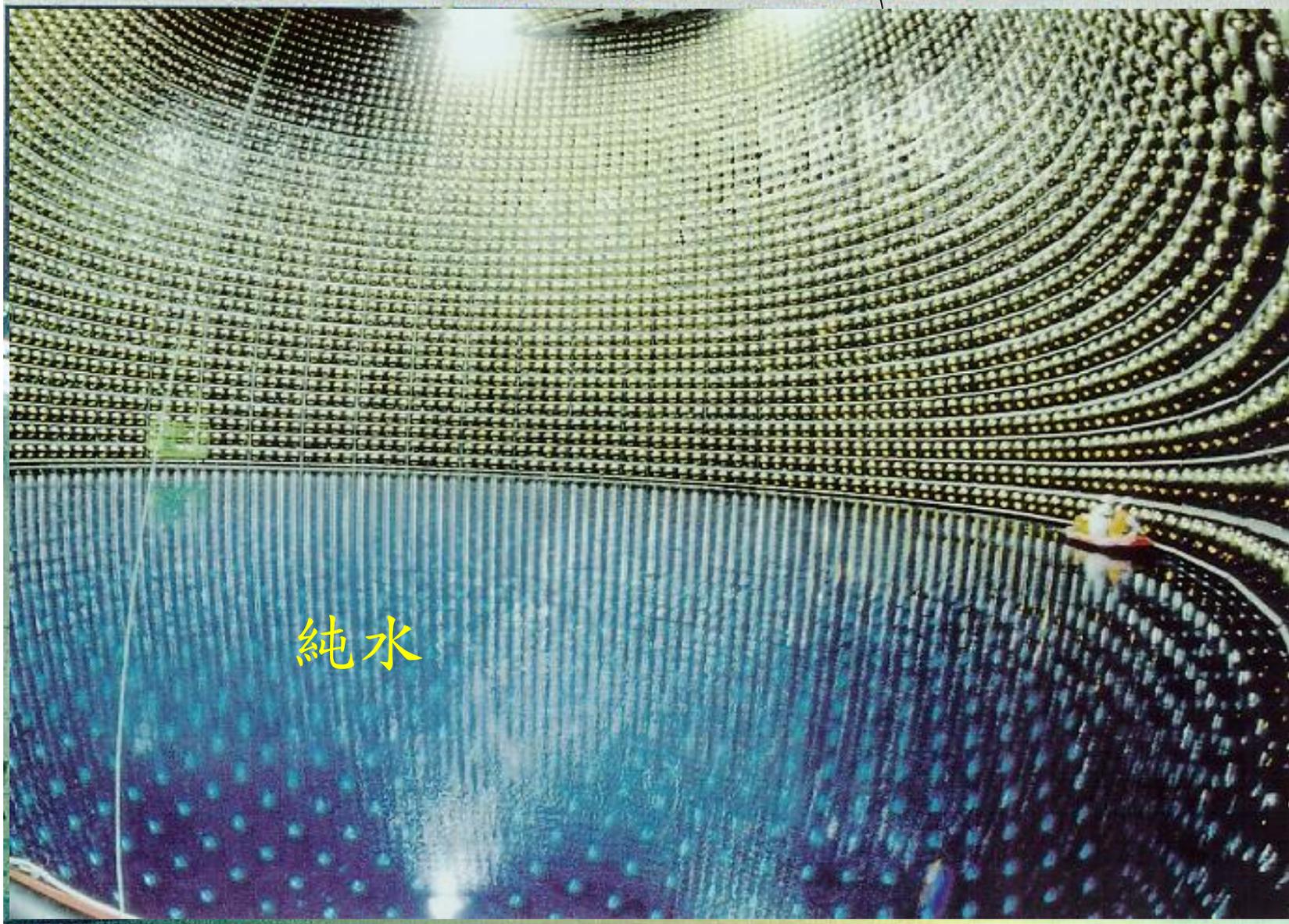


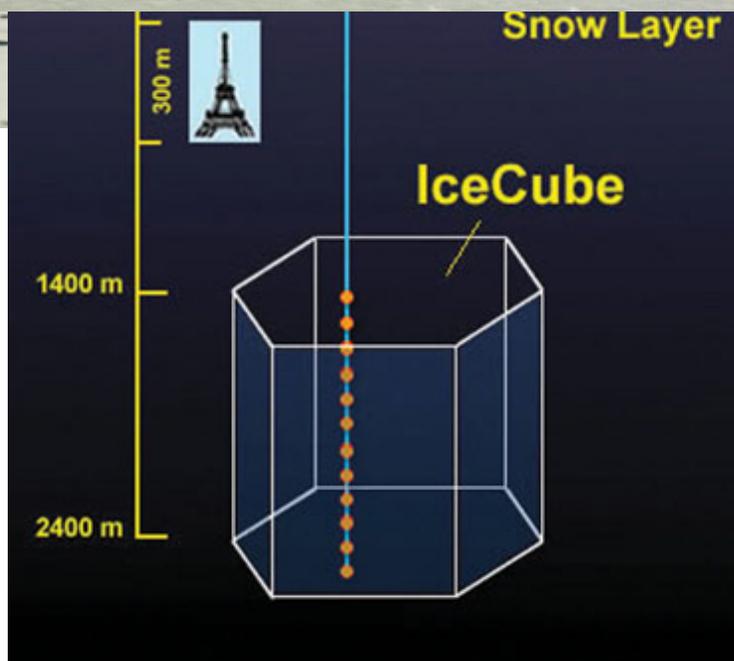
Photo from Superkamiokande <http://dumand.phys.washington.edu/~superk>

Ice Cube



南極

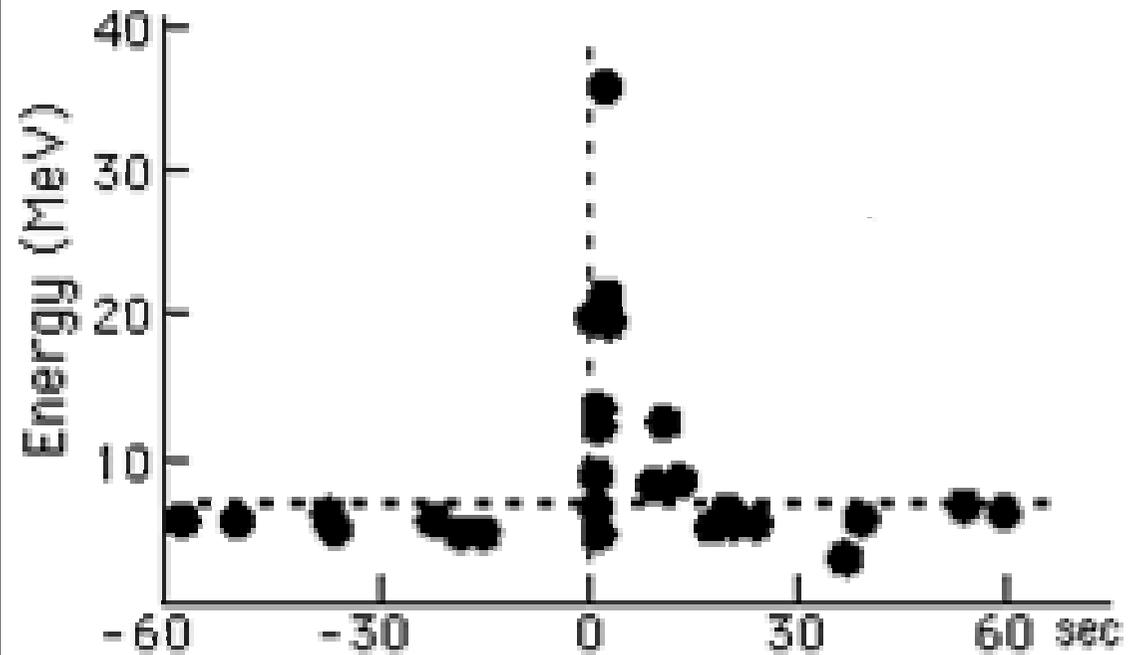
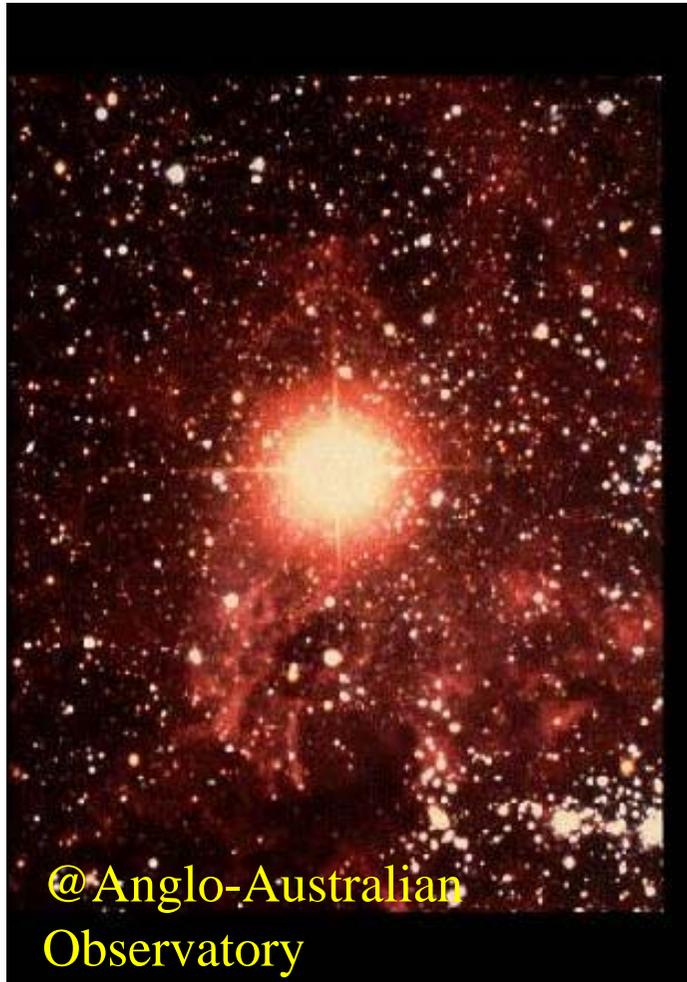
以南極地下
一立方公里
冰作探測器



Photos from Icecube homepage <http://icecube.wisc.edu/>

近年有甚麼新發現？

- 超新星中微子: Superkamiokande 及IMB 測得SN1987A之中微子



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>

<http://cupp oulu.fi/neutrino/nd-sn.html>

太陽中微子問題: 觀測 ν_e 數量比理論 $\sim 1/2-1/3$

可能原因: 太陽理論錯 ×

SNO 量中微子
總數符合理論
LSND 實驗

實 驗 錯 ×

→ 中微子振蕩如 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ ✓

→ 中微子有質量!

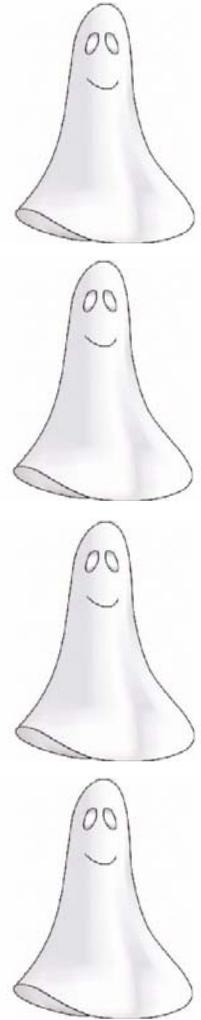
→ 基本粒子理論需要修正!

<http://www.sno.phy.queensu.ca/sno/>

<http://www.neutrino.lanl.gov/LSND/>

中微子振蕩 (Neutrino Oscillation)

中微子自由傳播時會由一種變成另一種! (eg. $\nu_e \rightarrow \nu_\mu \rightarrow \nu_e$)



香港有甚麼相關研究？

中微子天文物理

中微子振蕩研究

大亞灣中微子振蕩實驗

準確量度中微子振蕩的其中一個參數 θ_{13} !

中國科學院高能物理所，加州大學柏克萊分校、香港中文大學、香港大學、等約二十中美俄院校合作

大亞灣 Daya Bay

2+2(+2) 反應堆: 11.6 (17.4) GW_{th}

高功率，高山 = 中微子實驗理想地點

每秒產生 10^{21} 反中微子! 阻隔大部份宇宙射線



大亞灣核電廠



嶺澳核電廠



Option 1

遠端:
 D_{DB} : ~2200 m
 D_{LA} : ~1800 m

嶺奧近端:
D: 500 m

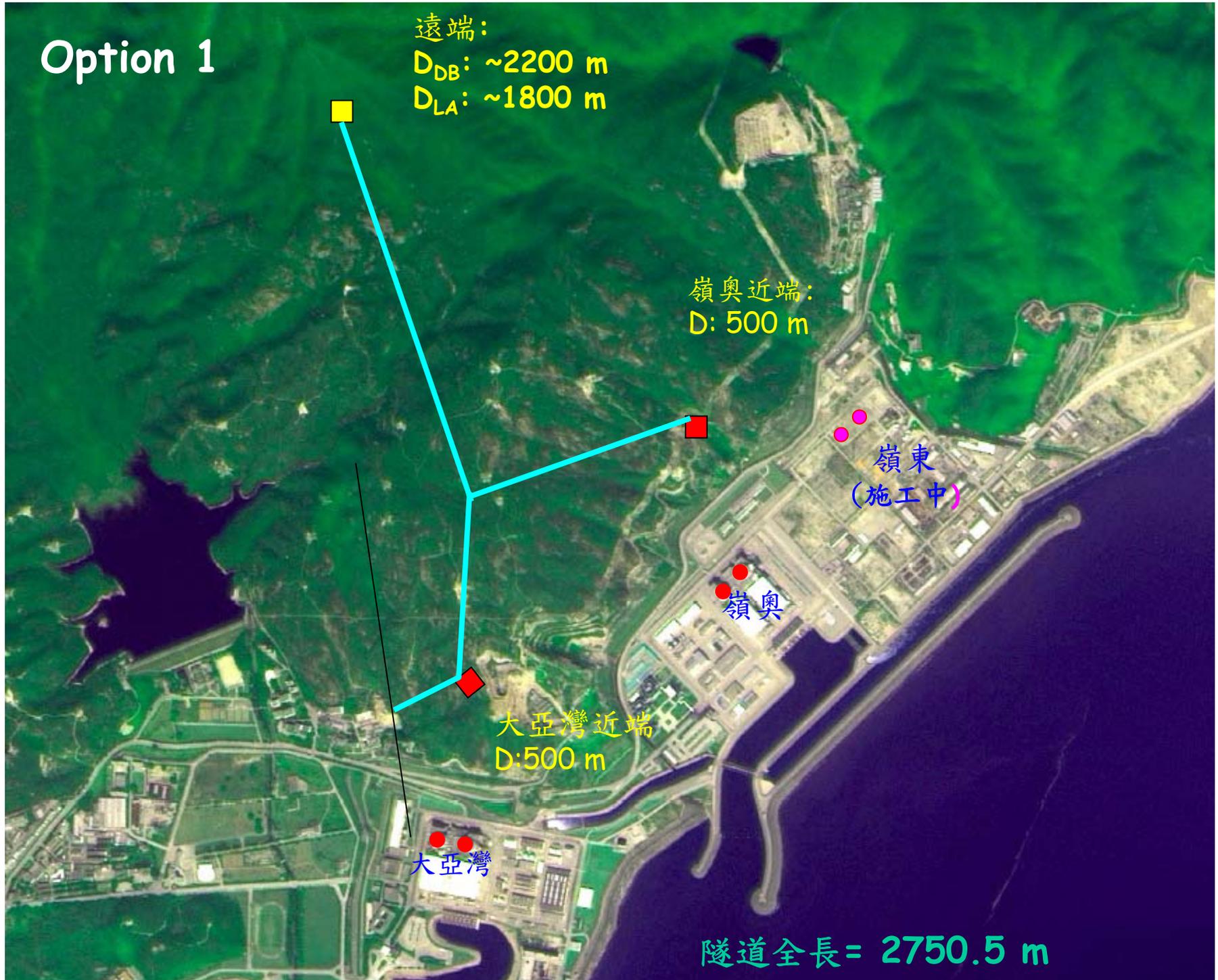
嶺東
(施工中)

嶺奧

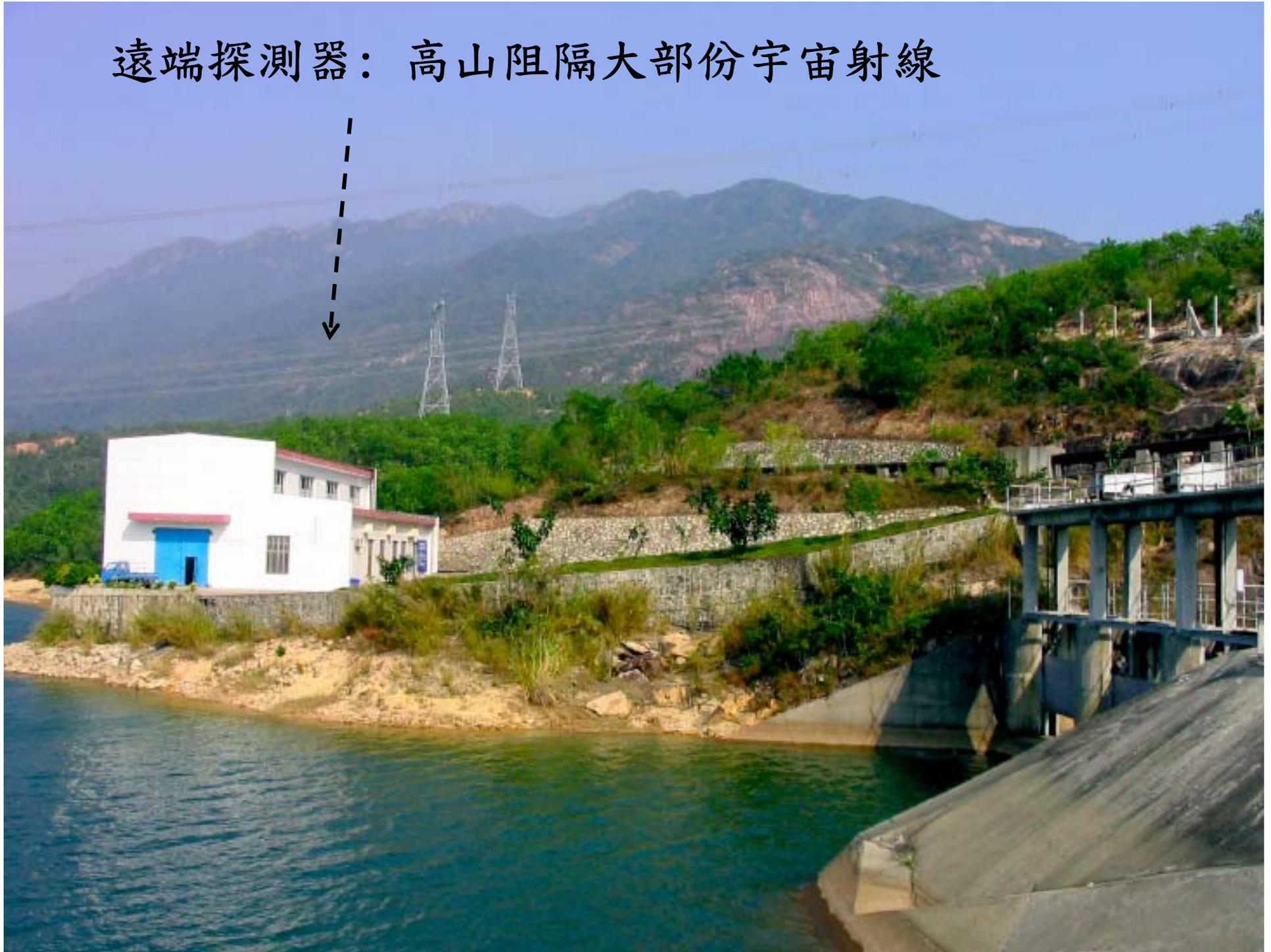
大亞灣近端
D: 500 m

大亞灣

隧道全長 = 2750.5 m



遠端探測器：高山阻隔大部份宇宙射線



香港仔隧道實驗室

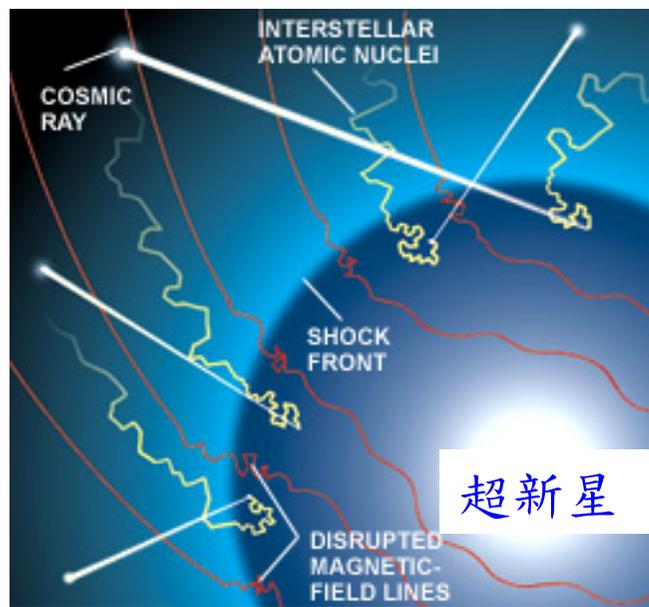
加州大學柏克萊分校、中國科學院高能物理所、
香港大學、香港中文大學

<http://theta13.phy.cuhk.edu.hk/>

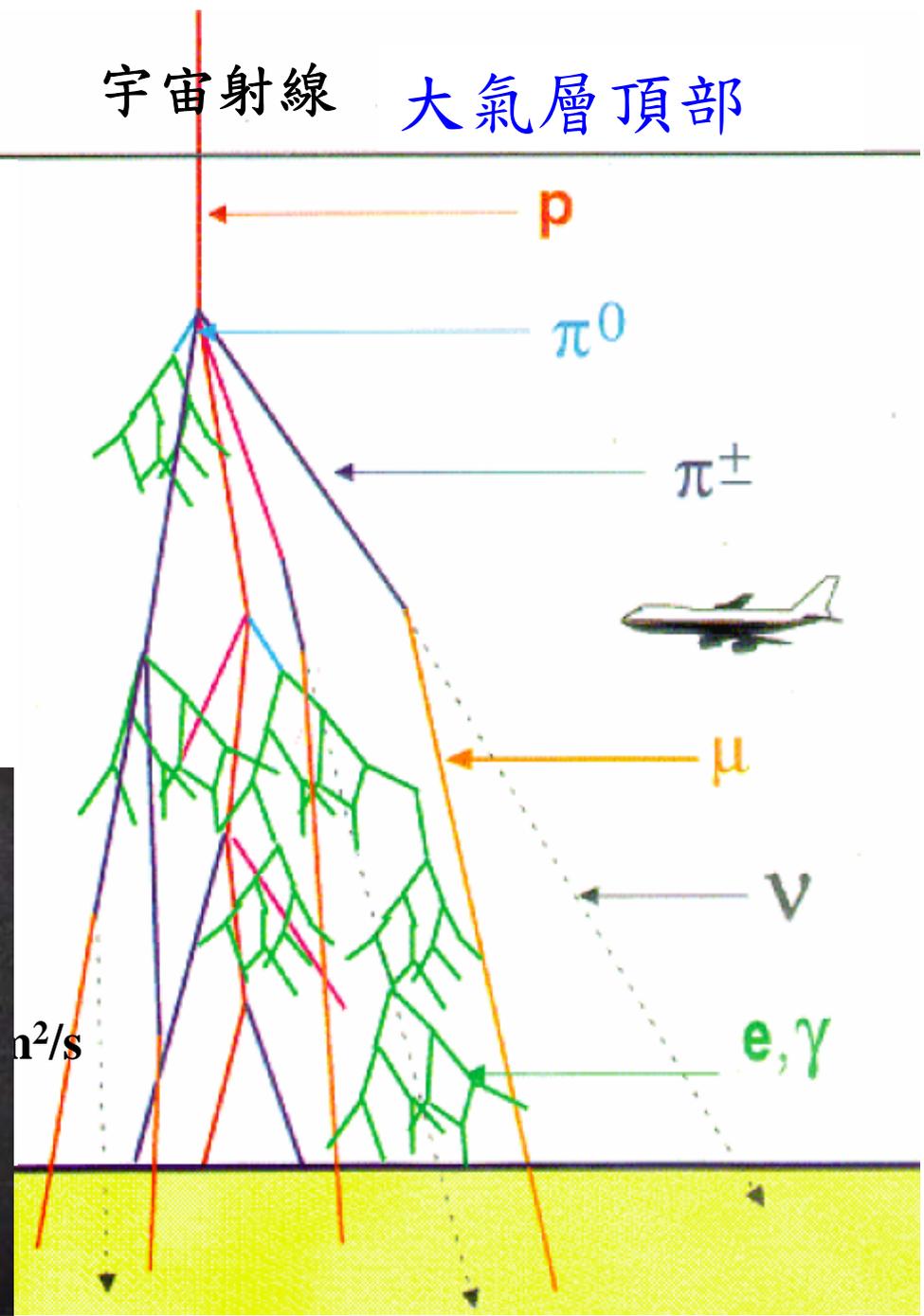
目標

- 量度山洞內之宇宙射線（大部份為 μ 子）
通量及角度分佈
- 以量度數據調校宇宙射線計算
- 量度及計算中子及其他核子本底，以支援
大亞灣以至其他地下實驗
- 培訓粒子物理科研人才

宇宙射線 大氣層頂部



超新星



香港仔隧道

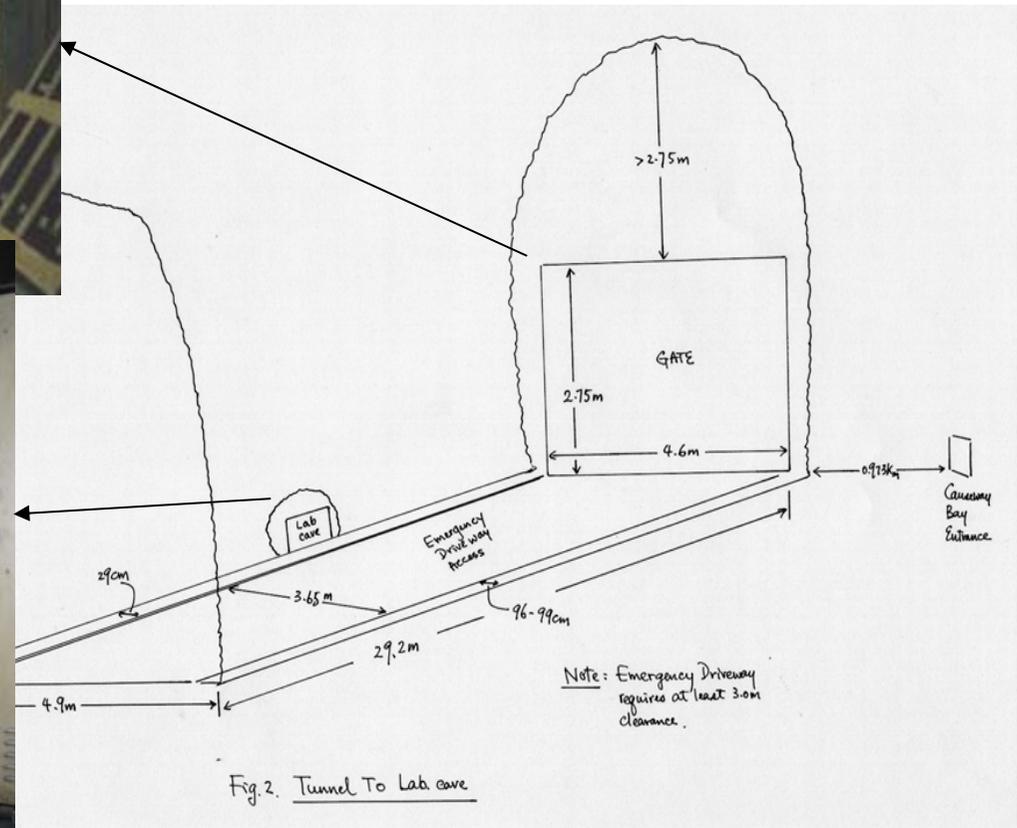


(c) Survey and Mapping Office, Lands Department. Copyright reserved - reproduction by permission only.

香港仔隧道實驗室

香港仔隧道連接處

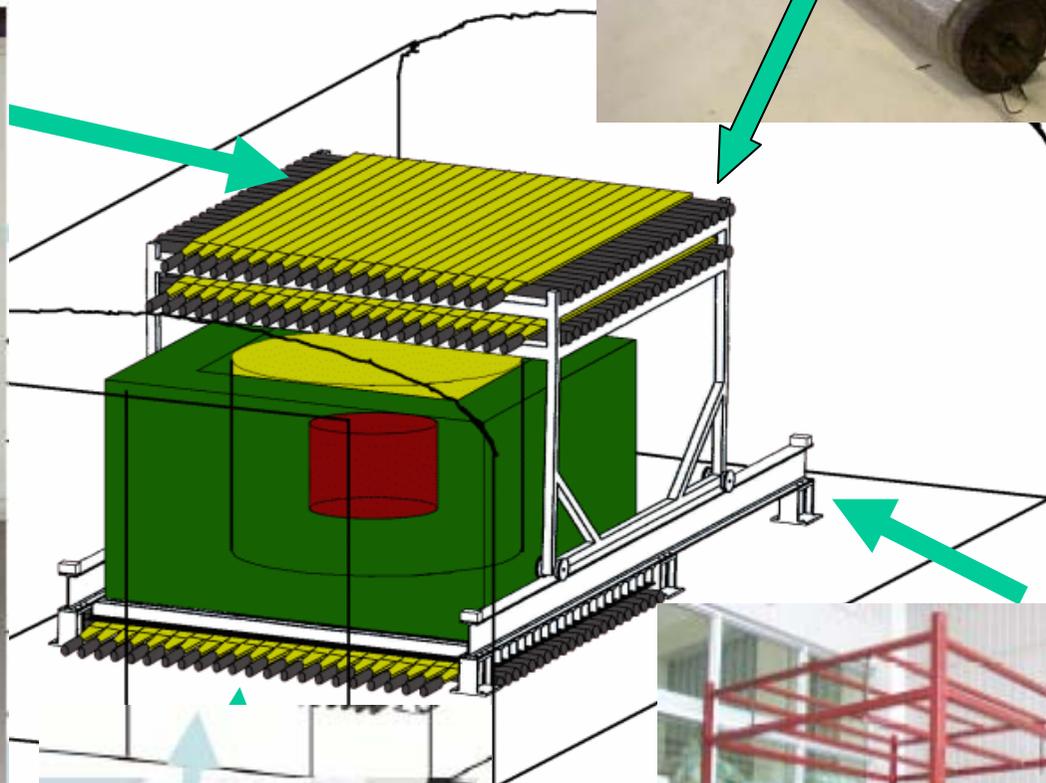
覆土: 250m



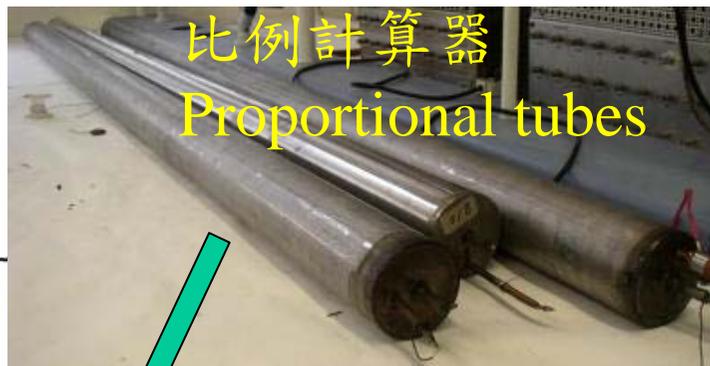
光電倍增管
(PMT's)



塑膠閃爍器



比例計算器
Proportional tubes



固態光電管 PMT's



鋼架



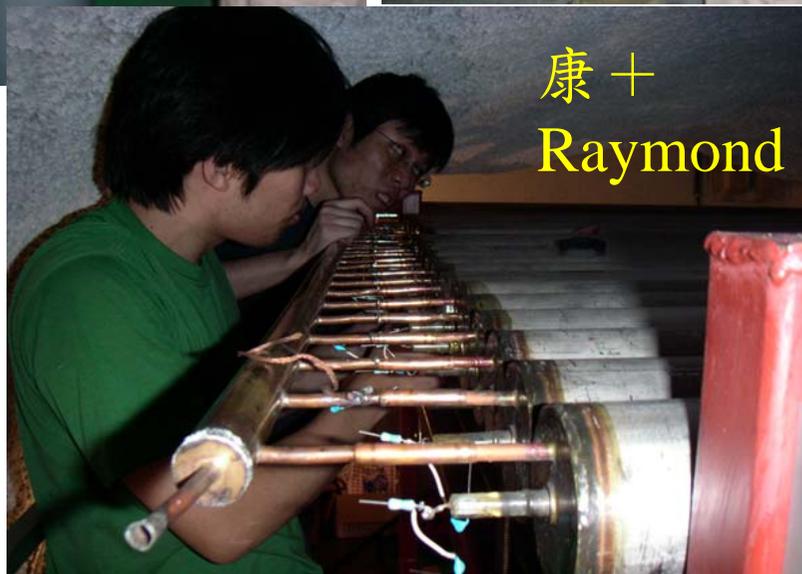
傻
鏗



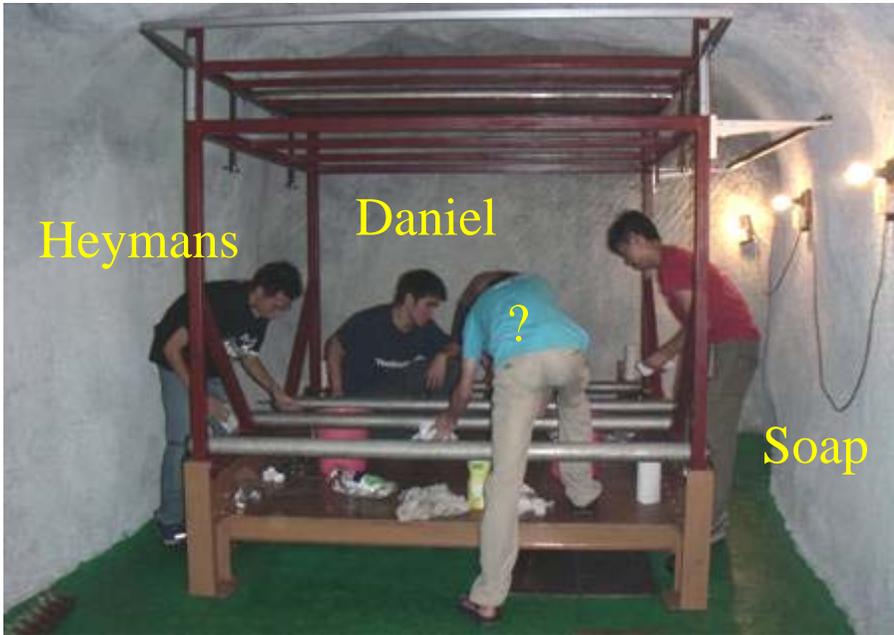
Kevin 姚熙



傻 Soap



康 +
Raymond



宇宙射線 μ 子計算

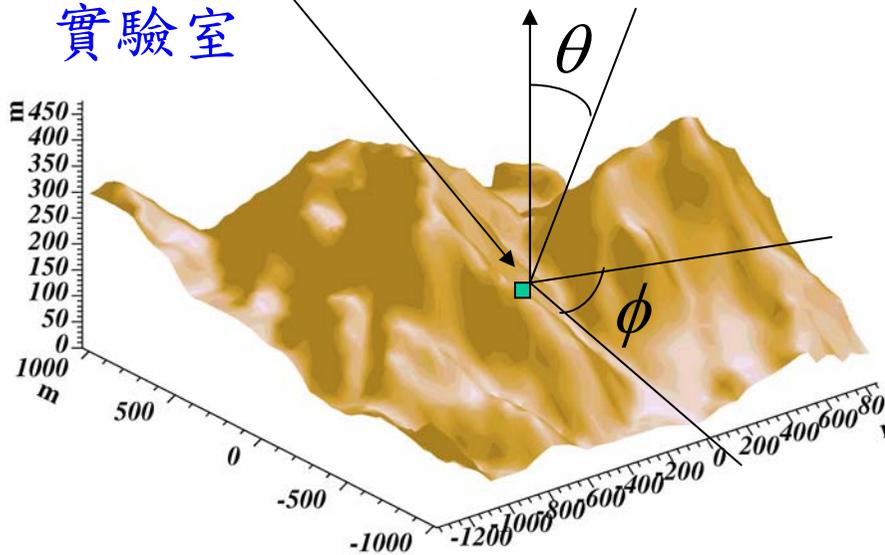


理論預測: 平均能量 = 110 GeV

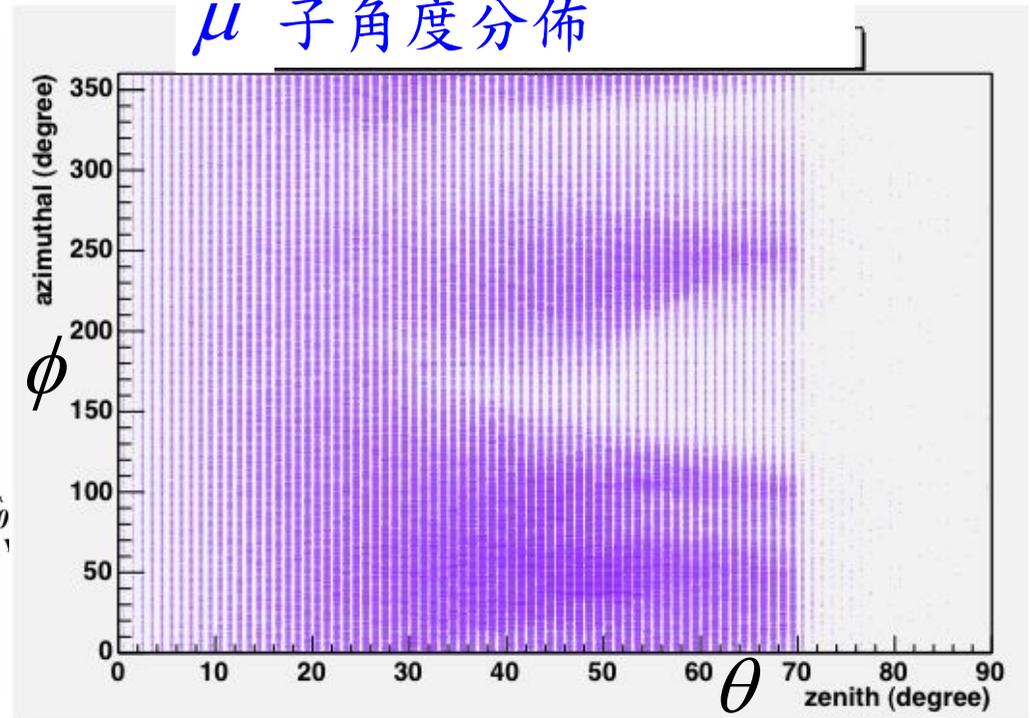
通量 = $9.15 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

平均每三秒有一粒高能 (10^{11} eV) μ 子穿過探測器，且完全免費！

香港仔隧道
實驗室



μ 子角度分佈





- 學生參予研究
- 跨院校合作
- 地下天文臺？

中微子天文學

- 中微子物理(neutrino physics)簡介
- 甚麼是中微子天文學?
- 怎樣建做中微子望遠鏡?
- 近年有甚麼新發現?
- 香港有甚麼相關研究?

朱明中



香港中文大學物理系

太空館生日快樂！

