



鬼粒子 - 神秘的中微子

朱明中 明白中微子
香港中文大學物理系
09/03/2012

大亞灣中微子實驗合作組

38院校, ~ 230中港台、美國、捷克、及俄國的科研人員
以八年辛勞(及\$\$), 換來...

http://news.sciencemag.org/sciencenow/2012/03/physicists-in-china-nail-a-key.html?ref=em#.T11irabX_wA.email

<http://www.nature.com/news/neutrino-oscillations-measured-with-record-precision-1.10202>

<http://paper.wenweipo.com/2012/03/09/ED1203090001.htm>

<http://www.takungpao.com.hk/news/12/03/09/ZM-1459631.htm>



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \pm 0.005$$

0 excluded at 5.2σ !

零的機率是千萬分之一

鬼粒子 - 神秘的中微子

- 中微子何方神聖? 有甚麼重要?
- 中微子變臉的把戲
- 捉鬼: 如何測量中微子?
- 香港捉鬼敢死隊

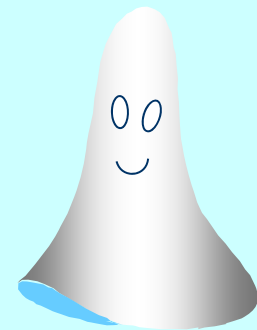
<http://paper.wenweipo.com/2012/03/09/ED1203090001.htm>

<http://www.takungpao.com.hk/news/12/03/09/ZM-1459631.htm>

<http://news.mingpao.com/20120309/gfc1.htm>

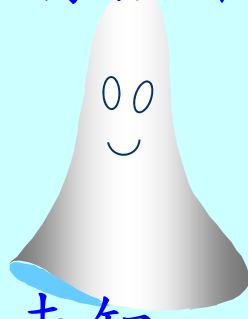
中微子何方神聖?有甚麼重要?

<http://www.youtube.com/watch?v=Mu2sja4lYMQ>



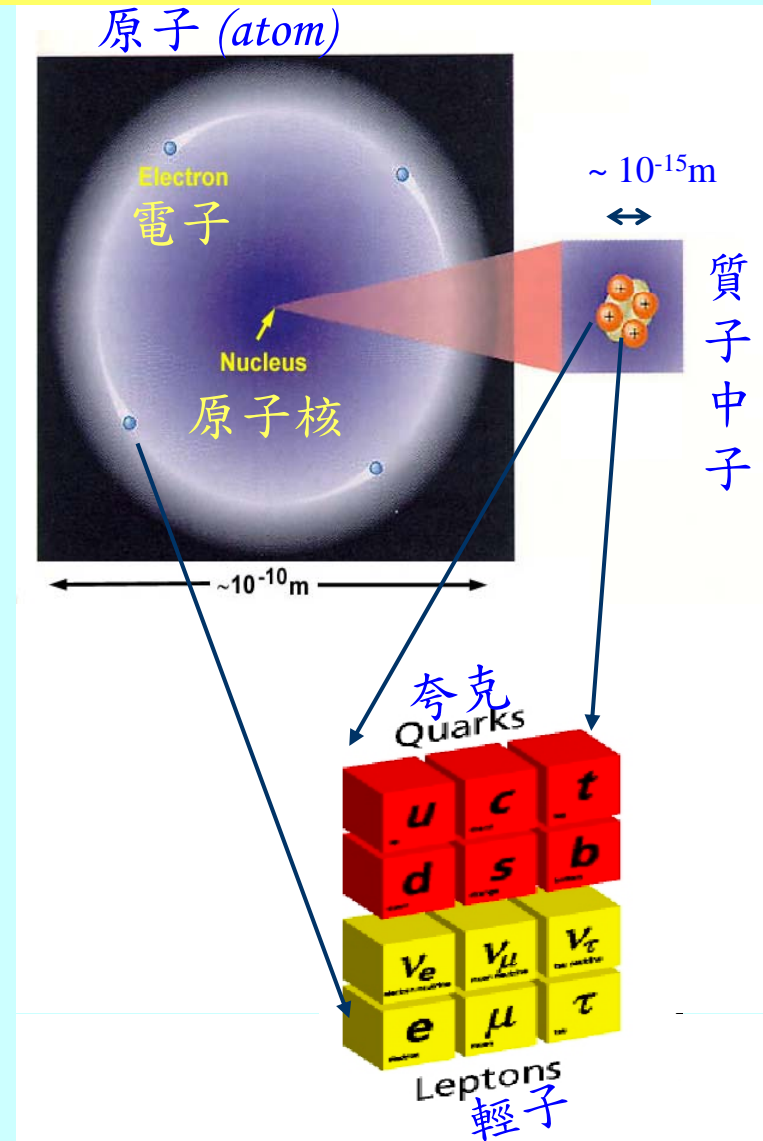
中微子 Neutrino

- 基本粒子之一(如電子)
- 有三種: ν_e ν_μ ν_τ
- 不帶電荷
- 只有弱作用及重力，沒有強作用及電磁力
- 穿透力極高: 幽靈粒子
- 帶有質量，但極小 (<<電子質量)，但確數未知



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

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



中微子 *Neutrino*

- 核融合反應中製造, 如太陽核心:

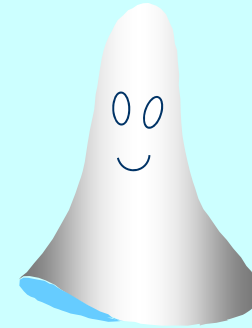
每秒發出約 2×10^{38} 中微子!

地球每秒每平方公分接收約四百億粒

每秒每平方公分接收核電廠發出約一億粒

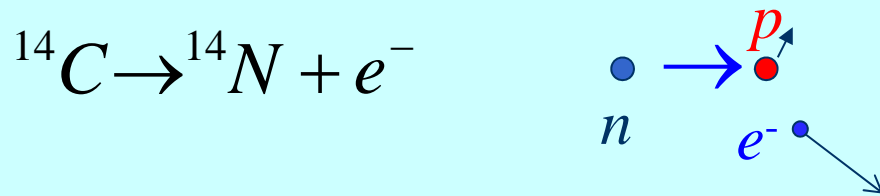
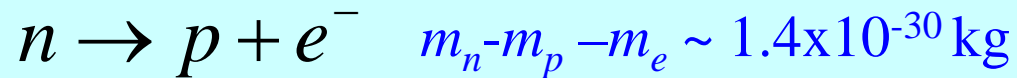
每人每天約發出三億粒 (體內放射性元素)

全宇宙每立方公分約有三百粒為宇宙初開
大爆炸所製

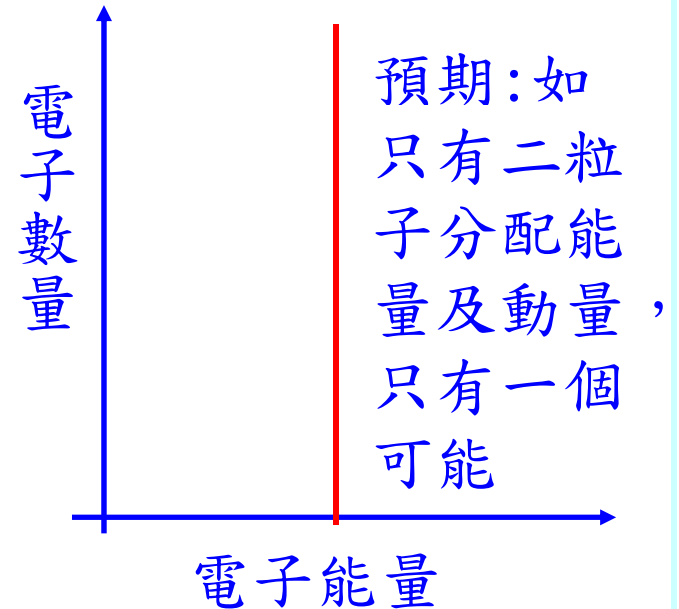


中微子的發現

- 在 β -衰變中放射, 如:

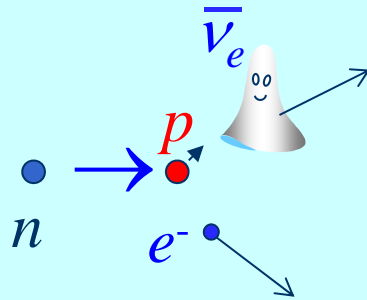
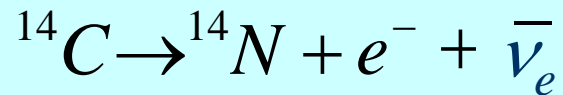
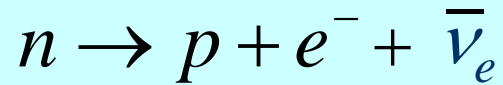


- 電子能量有大有小:
能量/動量不守恆?
- 泡利 (*W. Pauli*): 有另一不帶電荷粒子 (1930)
- 費米 (*E. Fermi*): **中微子 (*neutrino*)**
- *F. Reines, C. Cowan* 實驗發現 (1953)



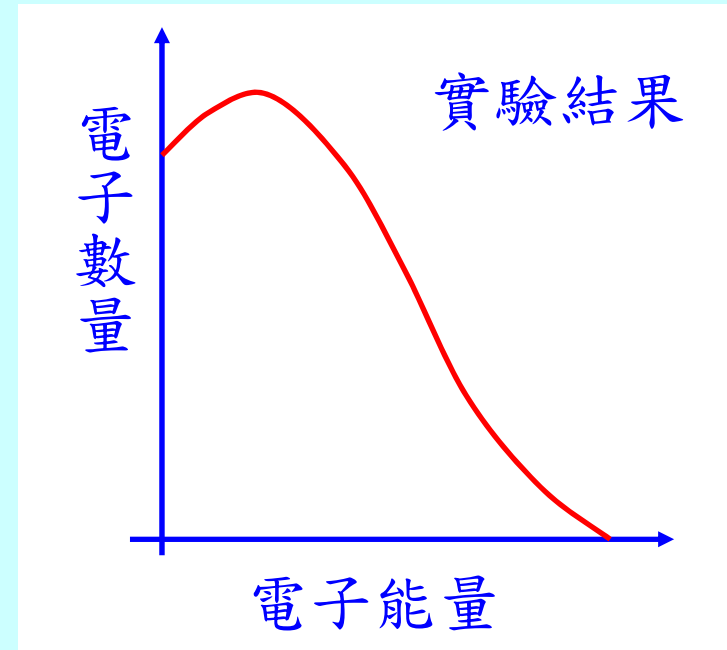
中微子的發現

- 在 β -衰變中放射, 如:



- 電子能量有大有小:
能量/動量不守恆?

- 泡利 (*W. Pauli*): 有另一不帶電荷粒子 (1930)
- 費米 (*E. Fermi*): **中微子 (*neutrino*)**
- *F. Reines, C. Cowan* 實驗發現 (1953)

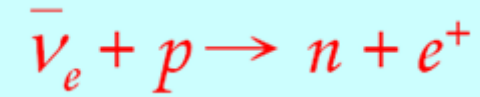


哇鬼計劃 *Project Poltergeist*

Hanford
1953

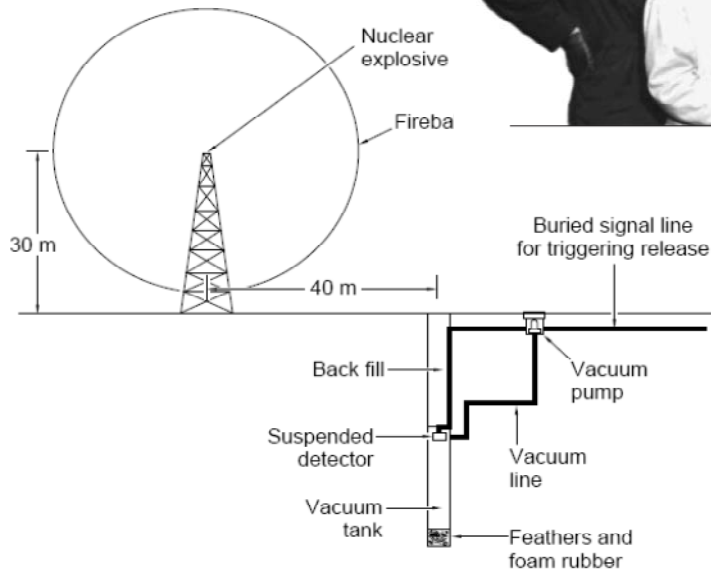


反 β -衰變:



大量中微子、
大型探射器(p)

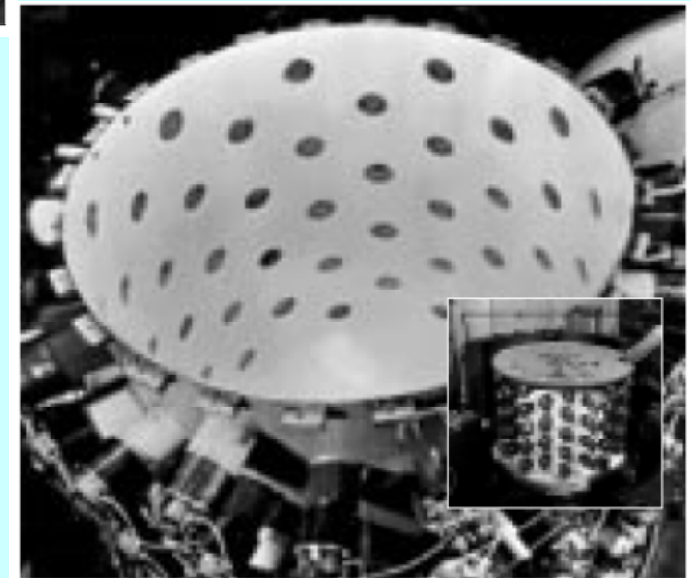
- 液閃體 *Liquid Scintillator*
- 雙重重合
- 大量屏蔽



最後計劃:改用
核反應堆

原計劃:探測原子彈放射的中
微子(2s)

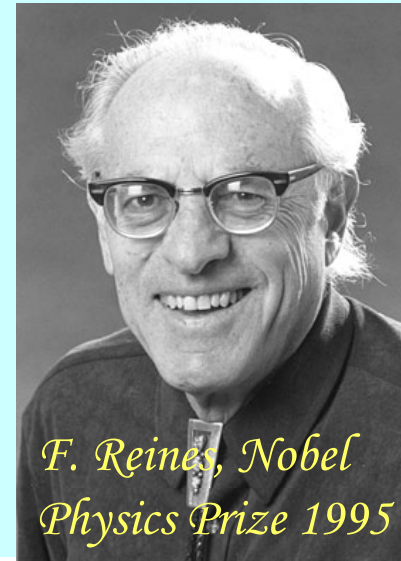
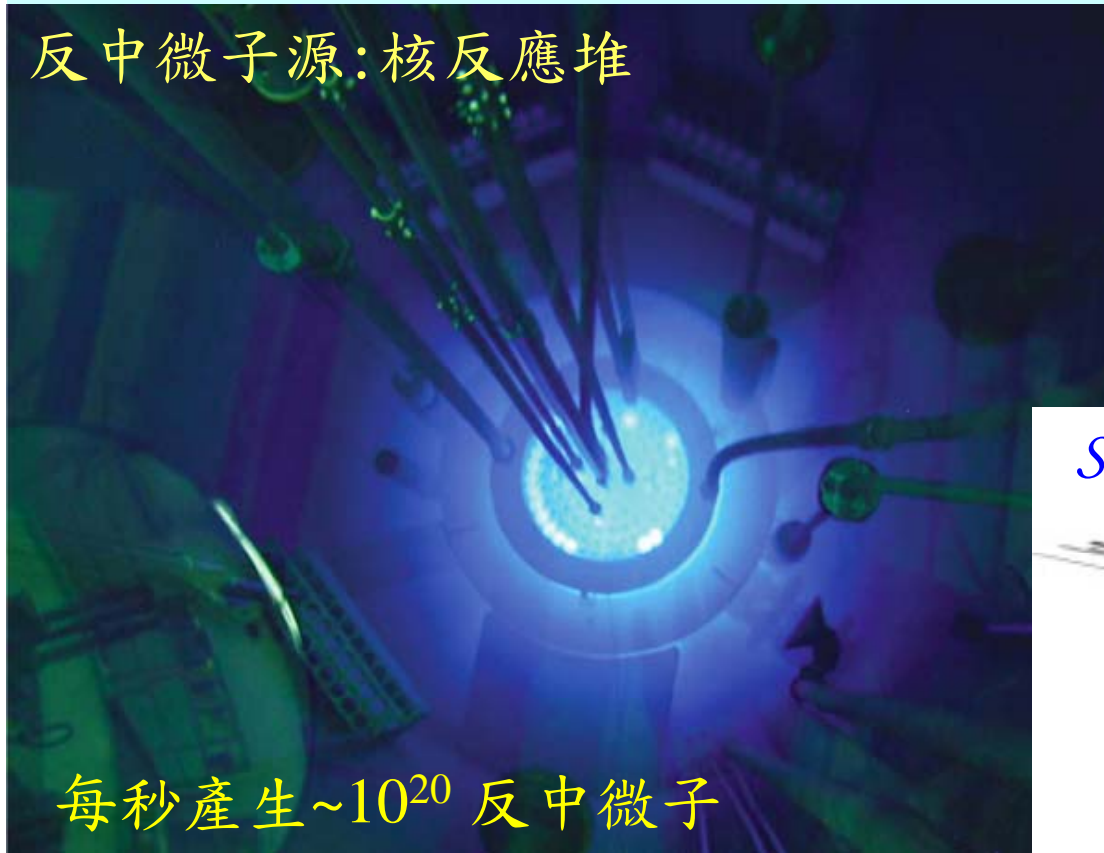
'*The Reines-Cowan Experiment*', *Los Alamos Science* 25 (1997).



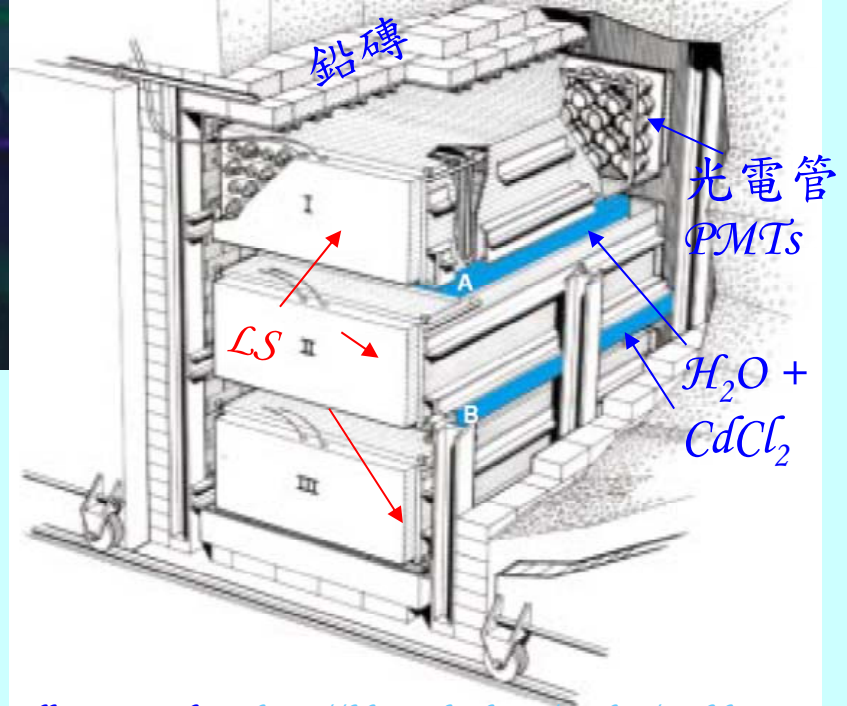
Hanford Neutrino Detector 'Herr Auge':
300l CdLS + 90 2" PMTs

發現中微子

反中微子源:核反應堆



Savannah River neutrino detector



C. L. Cowan and F. Reines, *Phys. Rev.* 117, 160 (1960).

Illustration from <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?25-02.pdf>

中微子有甚麼重要？

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，帶有星體內部資訊
- 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
- ...

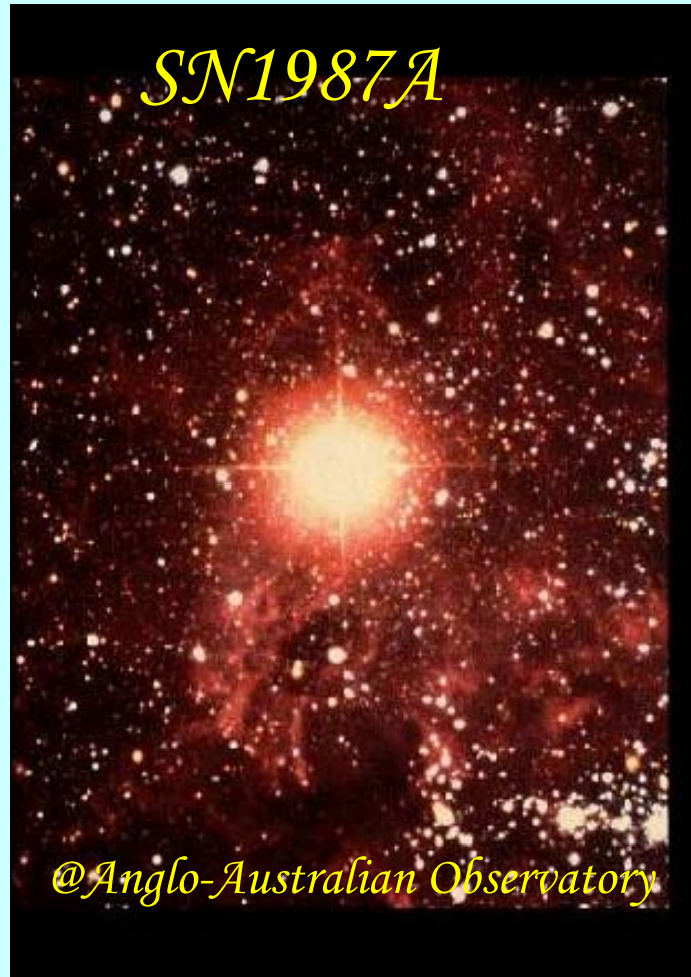
<http://cupp oulu.fi/neutrino/>

超新星中微子

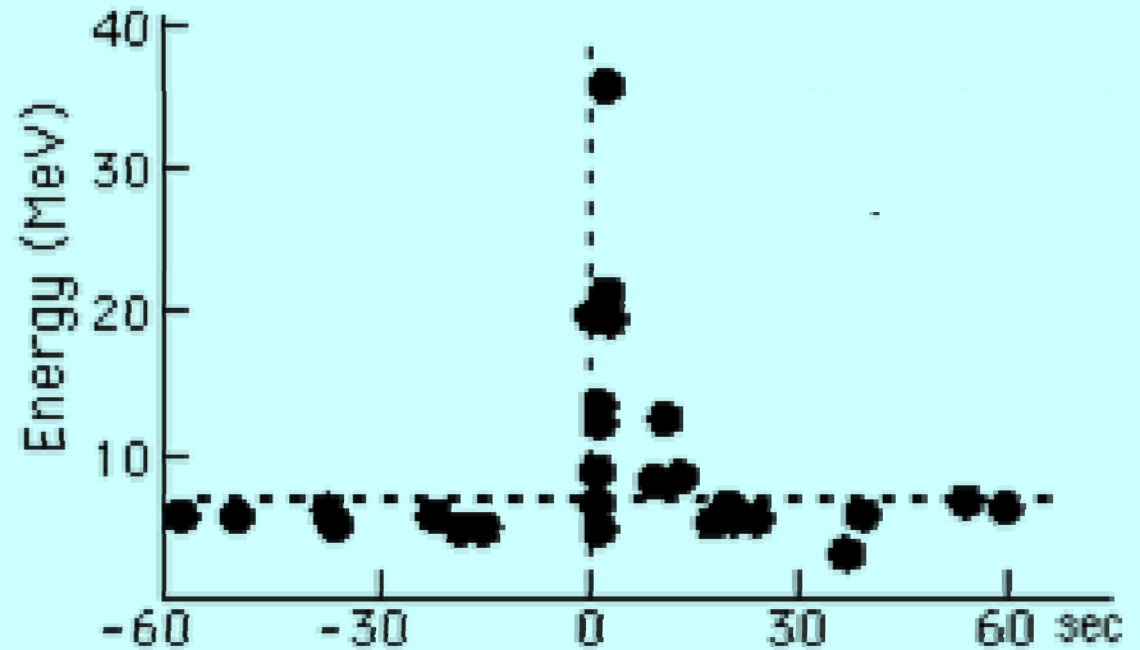


- 超新星: 高溫高壓物質
- 超新星必經極密極熱階段:
產生大量(幾秒內 $\sim 10^{58}$)中微子
- 中微子被困短時間，之後帶走大部份能量
- 帶有超新星內部資料: 超新星爆炸機制?

超新星中微子



Superkamiokande 及 IMB 測得
SN1987A 之中微子



中微子與光子經過十六萬
年在幾小時之間到達地球

$$\rightarrow |v-c|/c < 2 \times 10^{-9}$$

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

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

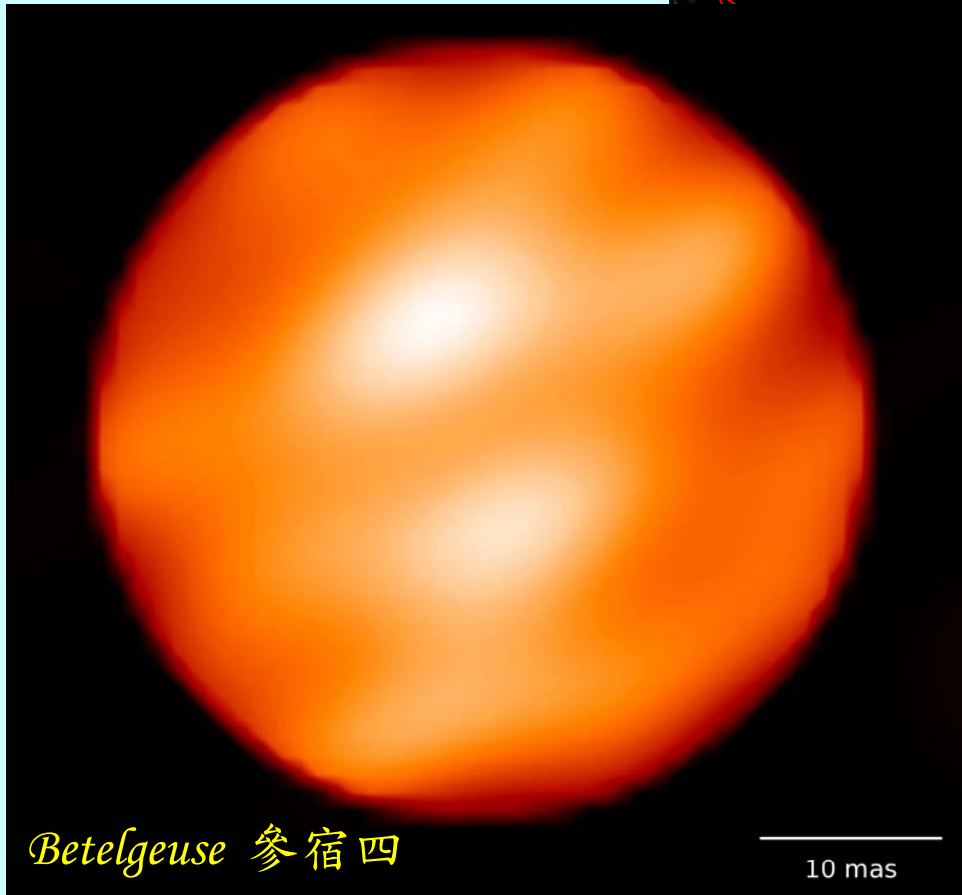
2012年出現兩個太陽？

http://hk.apple.nextmedia.com/template/apple/art_main.php?iss_id=20110124&sec_id=15335&art_id=14900470



銀河系內下 一超新星?

http://hk.apple.nextmedia.com/template/apple/art_main.php?iss_id=20110124&sec_id=15335&art_id=14900470



Betelgeuse 參宿四

10 mas



UT
200 15s x 3 frames fl=60mm (35mm equiv.)

紅巨星, 距離 430 ± 100 (643 ± 147) 光年
變星: 光度變化 0.2 – 1.2 等, 5.7 年周期
12-17 倍太陽質量, 半徑 ~550-920 倍
表面溫度 ~ 3600 ± 66 K

Credit: *Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.*

<http://www.solstation.com/x-objects/betelgeuse.htm>

宇宙簡史

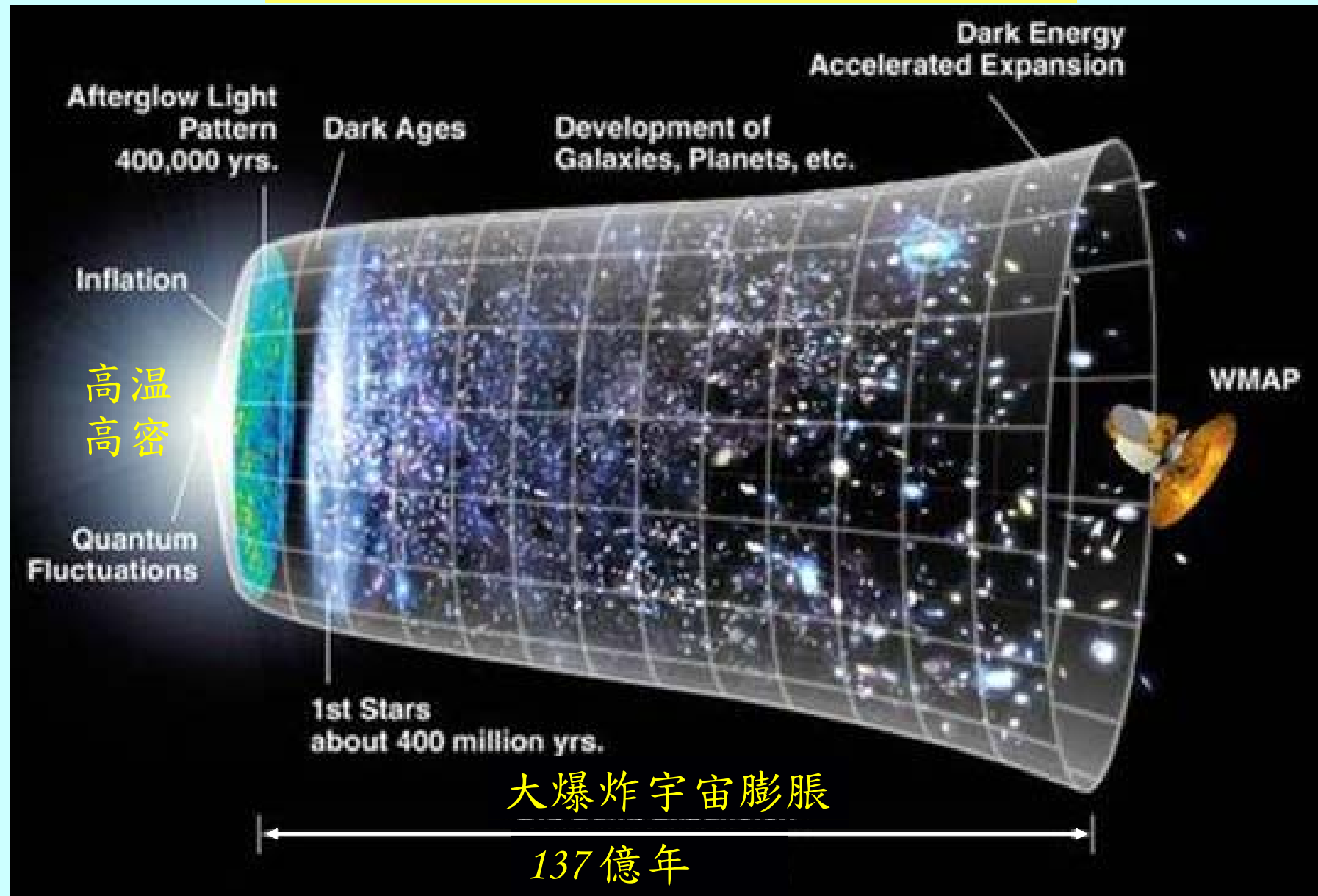
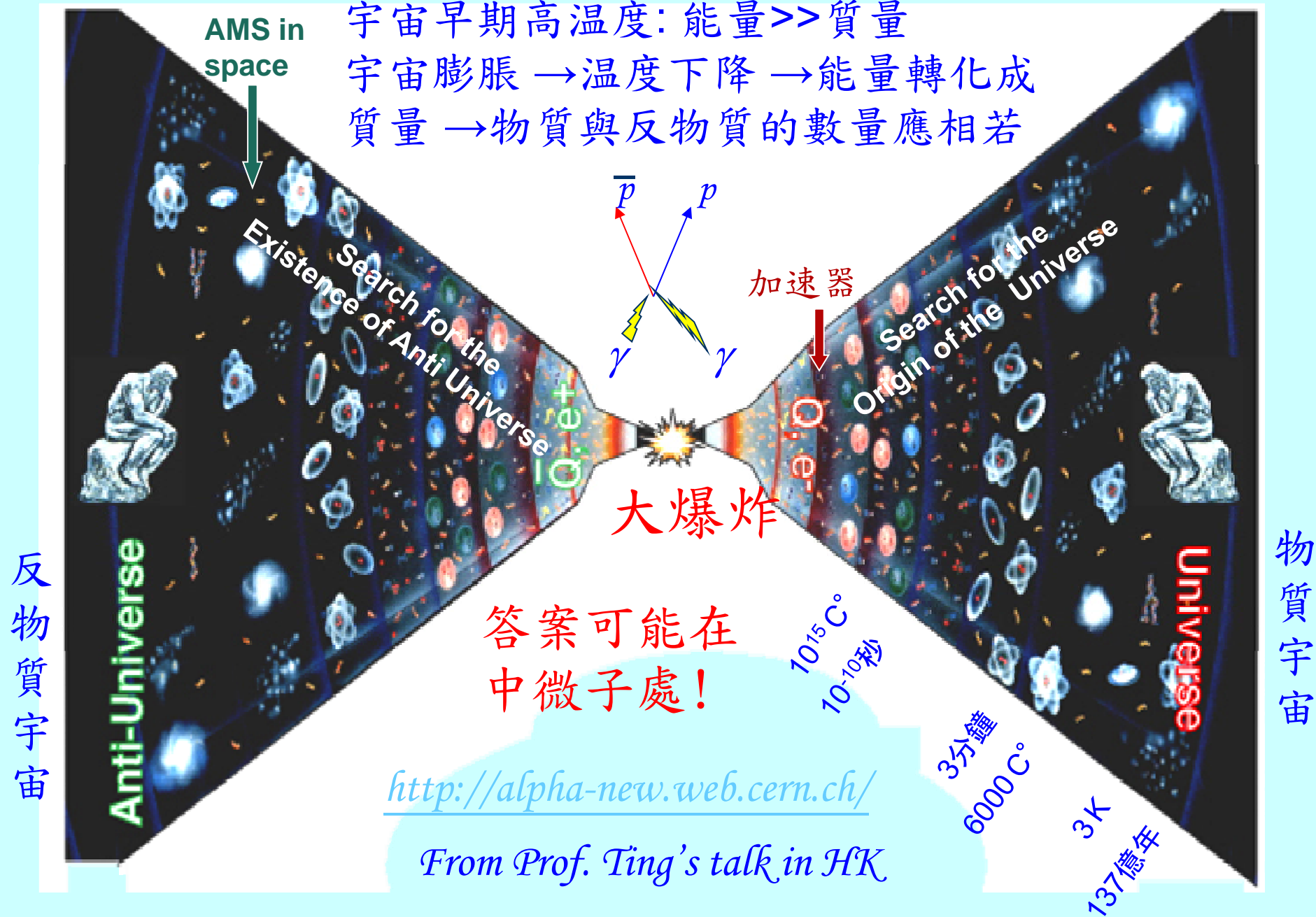


Figure courtesy NASA/WMAP

大件事：反物質失踪了！

宇宙早期高溫度：能量 \gg 質量

宇宙膨脹 \rightarrow 溫度下降 \rightarrow 能量轉化成
質量 \rightarrow 物質與反物質的數量應相若



大爆炸

答案可能在
中微子處！

<http://alpha-new.web.cern.ch/>

From Prof. Ting's talk in HK

3分鐘
6000 C°

3K
137億年

反物質宇宙

物質宇宙

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
- 中微子反應可能解釋宇宙物質-反物質的不對稱:
- 例如 $S \rightarrow \nu_e \neq \bar{S} \rightarrow \bar{\nu}_e$, (S 為假設存在的大質量粒子) 再影響其他粒子 (p, n, \dots). 參數: δ_{CP}
- δ_{CP} 是否足夠大?先要知道 θ_{13}
- 中微子數量及質量影響宇宙結構 (星系、星系團等) 之演化

中微子變臉的把戲

中微子振盪

$$\text{eg.: } \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



核反應堆: $4 \bar{\nu}_e$

距離

$4 \bar{\nu}_e$

中微子振盪

$$\text{eg.: } \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



核反應堆: $4 \bar{\nu}_e$

距離

$3 \bar{\nu}_e$

中微子振盪

$$\text{eg.: } \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



核反應堆: $4 \bar{\nu}_e$

距離



$2 \bar{\nu}_e$

中微子振盪

$$\text{eg.: } \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



核反應堆: $4 \bar{\nu}_e$

距離



$3 \bar{\nu}_e$

中微子振盪

$$\text{eg.: } \bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



$4 \bar{\nu}_e$

變臉機率以混合角表達 $\sim \sin^2 2\theta$
三種中微子 \rightarrow 三個混合角 $\theta_{12}, \theta_{23},$
 θ_{13}



核反應堆: $4 \bar{\nu}_e$

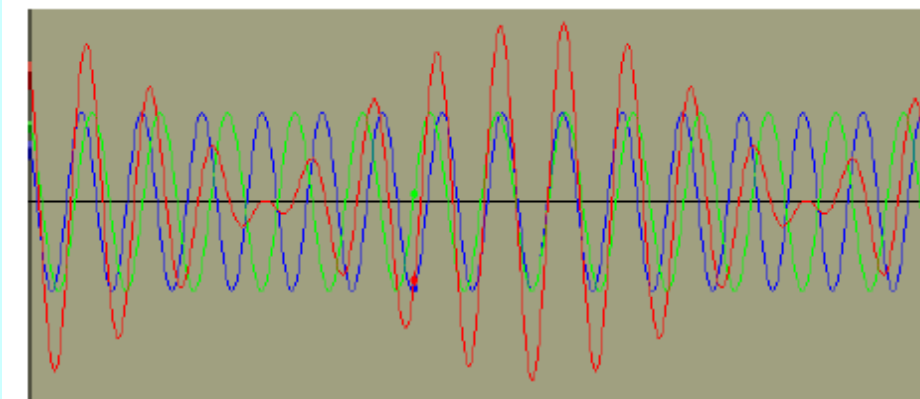
25

距離



中微子振盪 (*Neutrino Oscillation*)

- 經典力學粒子: $(x, p=mv, E, m, \dots)$, 同一時間各只有一個數值
- 量子力學: 可同時有多個數值(狀態)
- 例如: $|x\rangle = a|x_1\rangle + b|x_2\rangle + c|x_3\rangle + \dots$
- 量子粒子可同時有多個質量
- $|v_e\rangle = a|v_1\rangle + b|v_2\rangle + c|v_3\rangle$, 質量 $m_1 \neq m_2 \neq m_3$
- 量子粒子亦有波動性質: 波長 $\lambda = h/p$
- 單一能量中微子同時有3個動量 p 's \rightarrow 3個波長 λ 's
- 波動的干涉現象 \rightarrow 搏動 (*beats*) = 機率振盪



例如: 兩個波長干涉

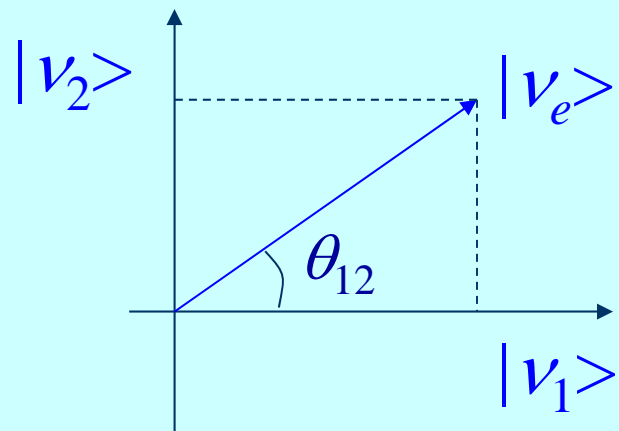
— v_1
— v_2
— v_e

中微子混合角 (*mixing angles*)

$$t = 0: |\nu_e\rangle = a |\nu_1\rangle + b |\nu_2\rangle$$

$$\text{單一粒子: } |a|^2 + |b|^2 = 1$$

$$\text{可以用 } a = \cos\theta_{12}, b = \sin\theta_{12}$$



混合角

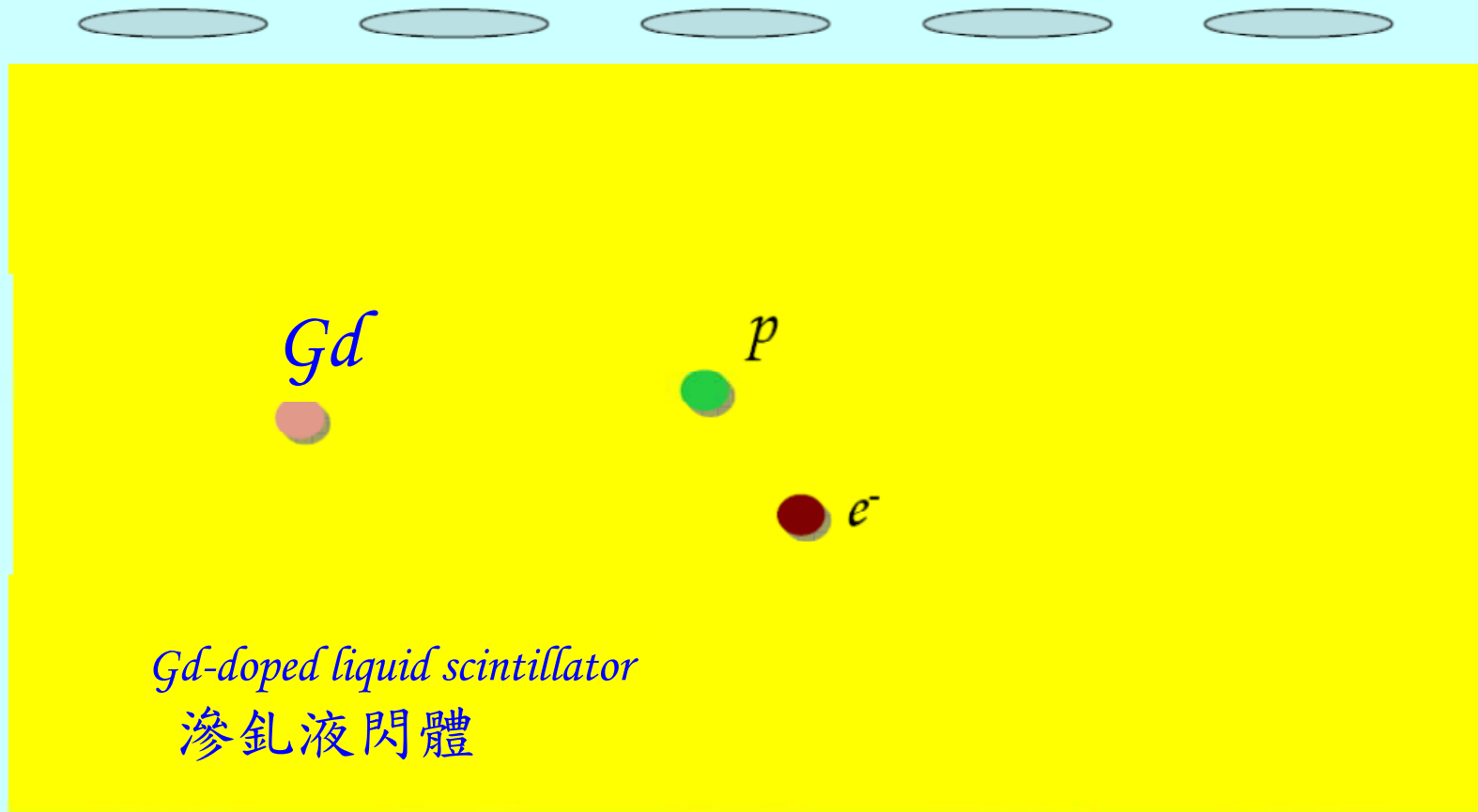
$$\begin{Bmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{Bmatrix}$$

Mixing matrix

捉鬼：如何測量中微子？

如何測量中微子

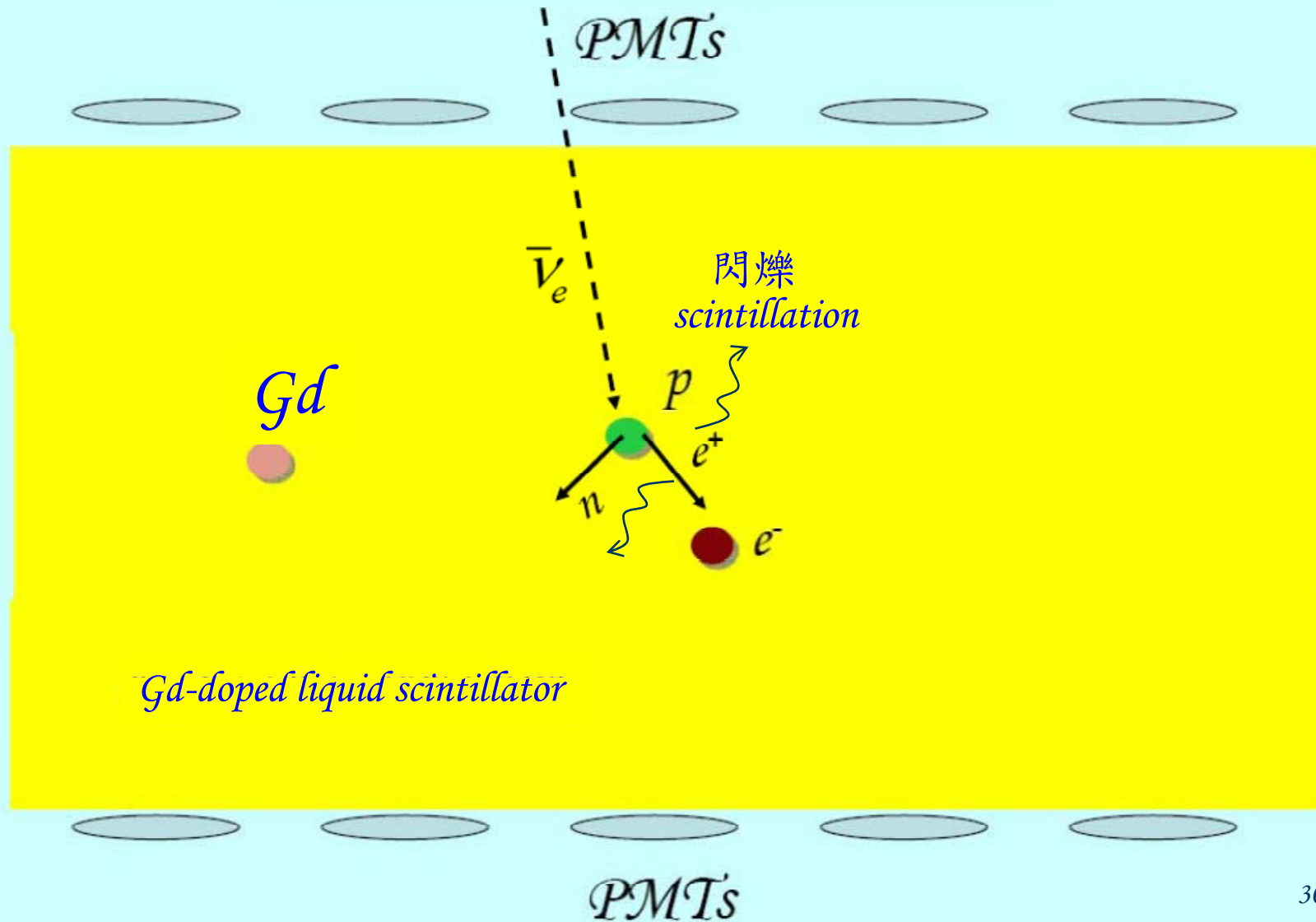
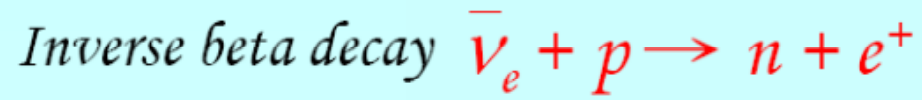
PMTs 光電管



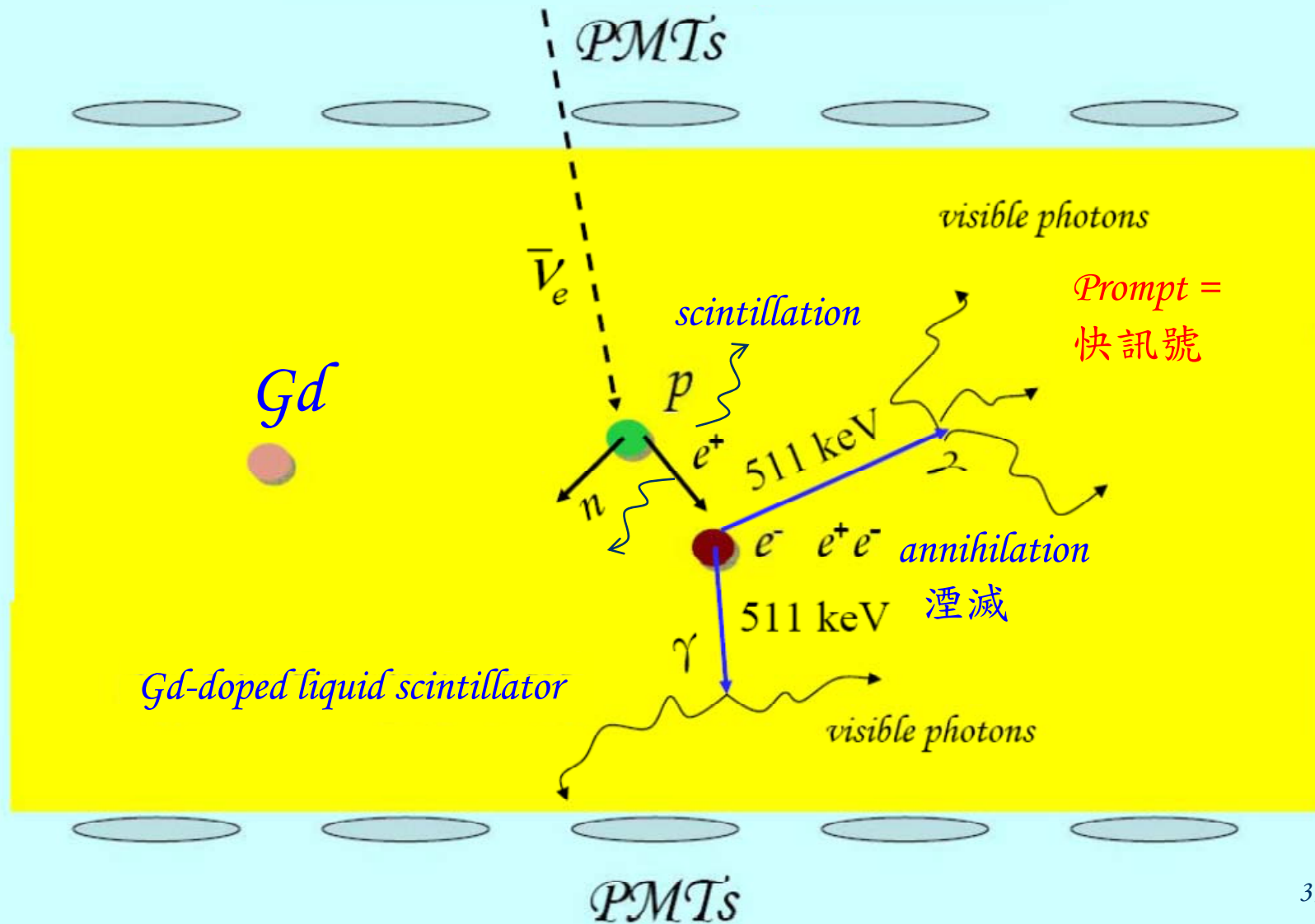
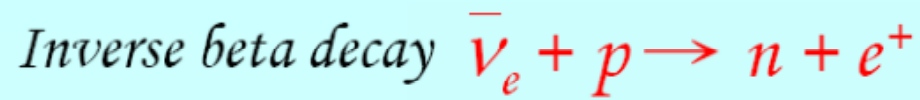
Gd-doped liquid scintillator
滲釷液閃體

PMTs 光電管

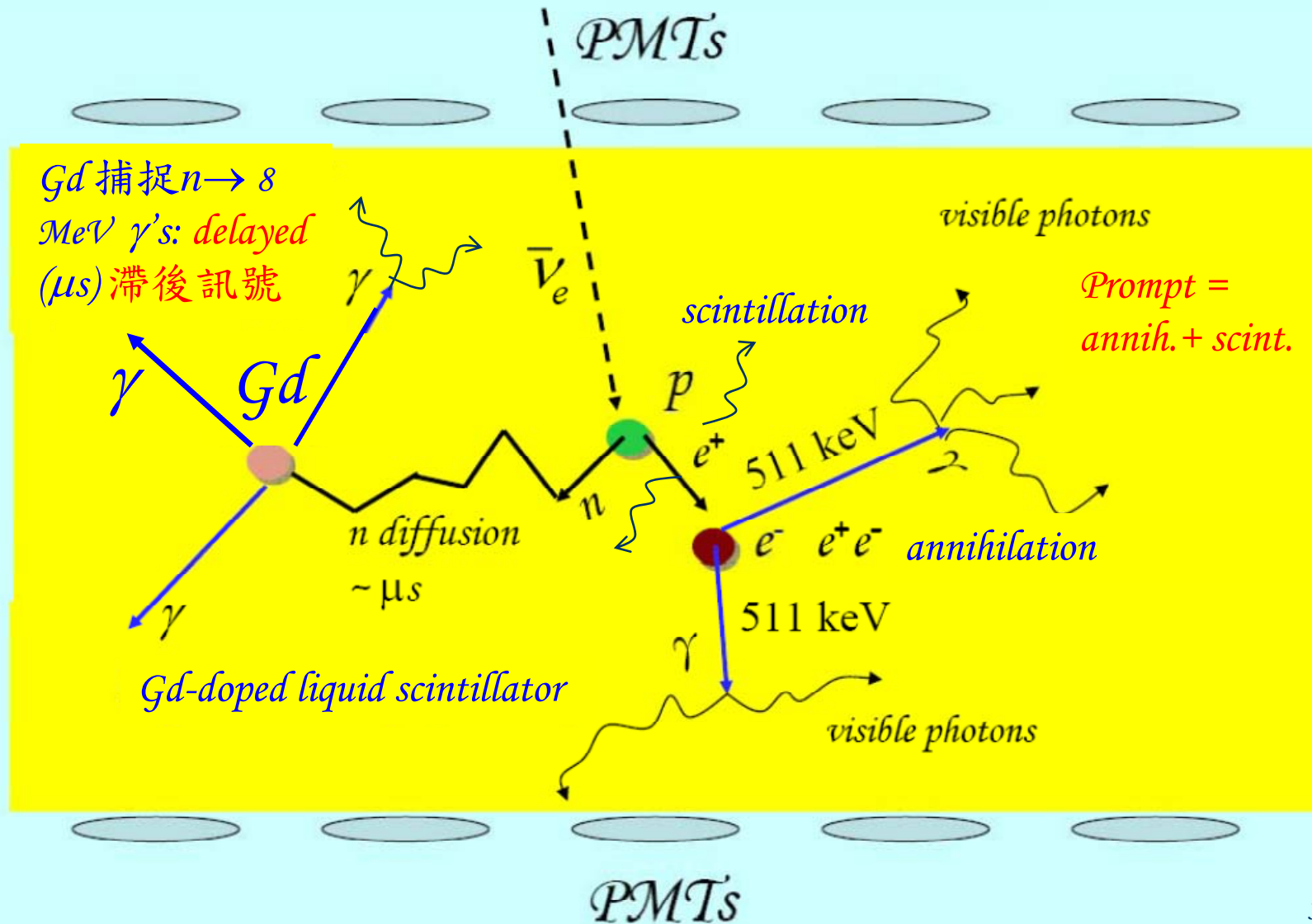
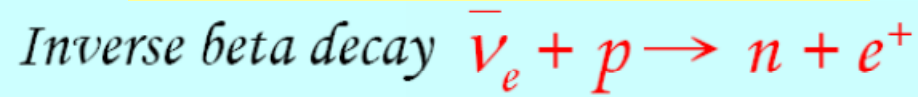
如何測量中微子



如何測量中微子



如何測量中微子



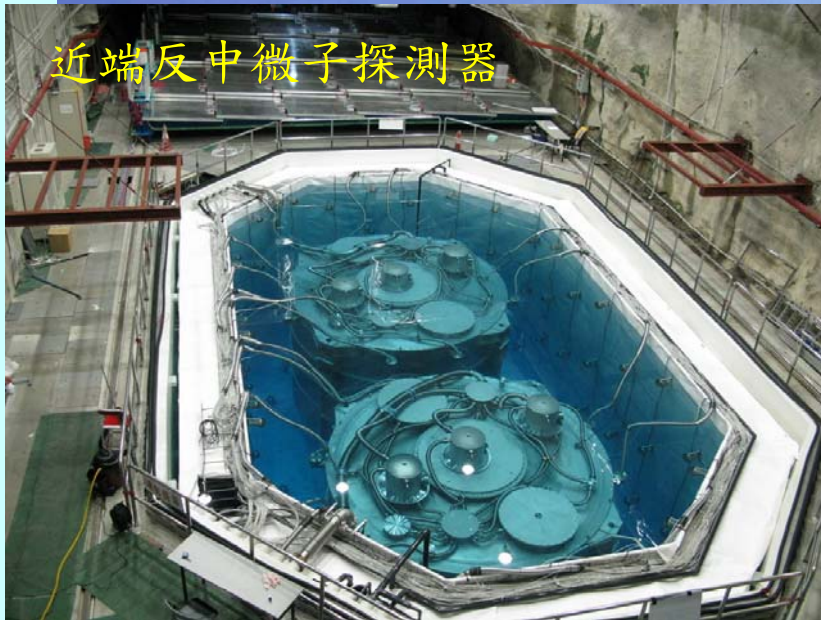
大亞灣 *Daya Bay*



大亞灣中微子振盪實驗

準確量度中微子的一個重要參數 θ_{13} 。
有助解答反物質失蹤之謎!

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



大亞灣中微子振盪實驗



Powerful reactors by mountains

大亞灣遠端實驗室

RPCs

3 x 20 tons target mass at far site

Far site (Hall 3)

1544 m from Ling Ao
1912 m from Daya
Overburden: 860 m.w.e.

Ling Ao Near site (Hall 2)

480 m from Ling Ao
528 m from Ling Ao II
Overburden: 265 m.w.e.

Ling Ao-II NPP
2x2.9 GW

Ling Ao
NPP, 2x2.9 GW

Daya Bay Near site (Hall 1)

364 m from Daya Bay
Overburden: 250 m.w.e.

Daya Bay
NPP, 2x2.9 GW

Water hall

Liquid Scintillator hall

entrance

SAB

Construction tunnel

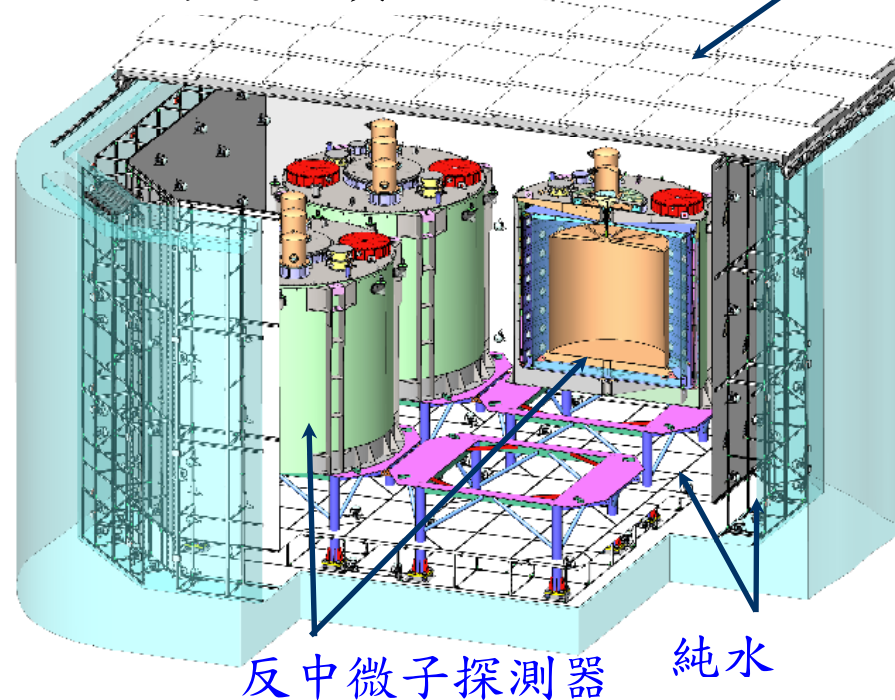
1006 m

465 m

810 m

295 m

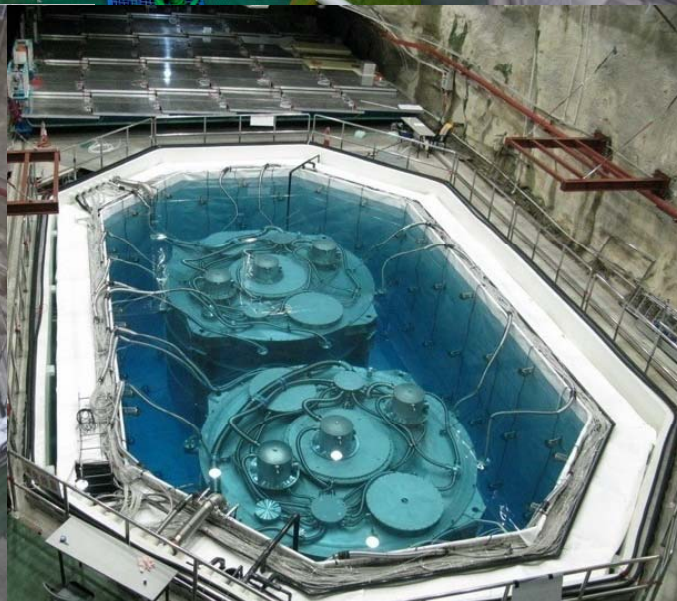
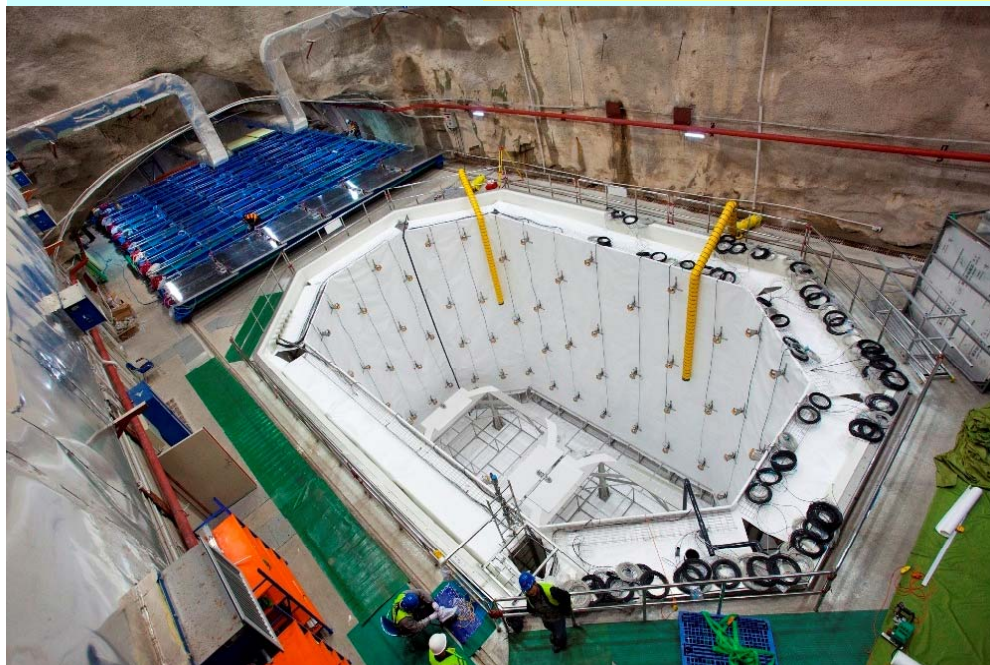
Total Tunnel length
~ 3000 m



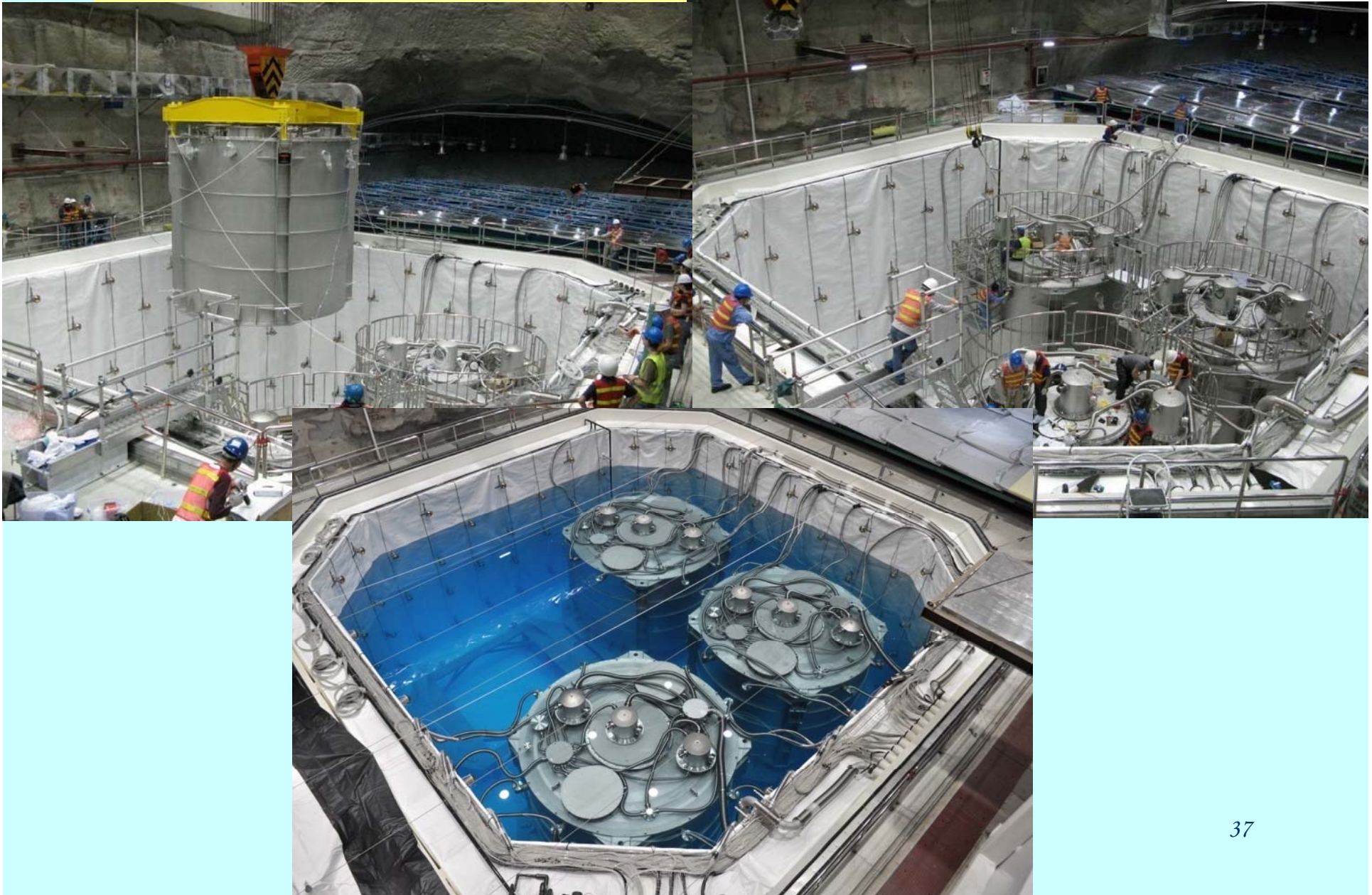
反中微子探測器

純水

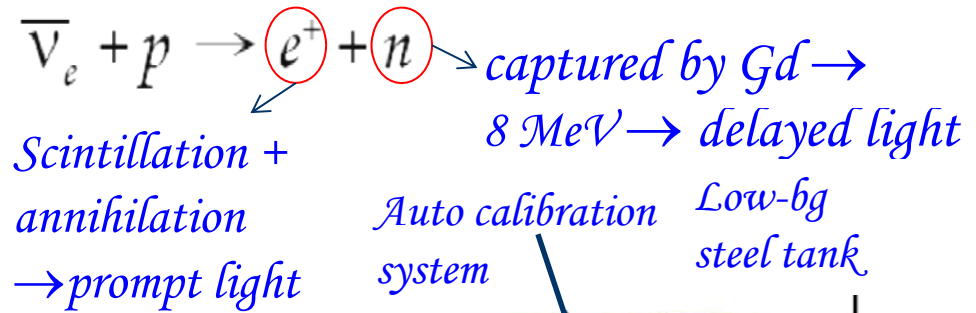
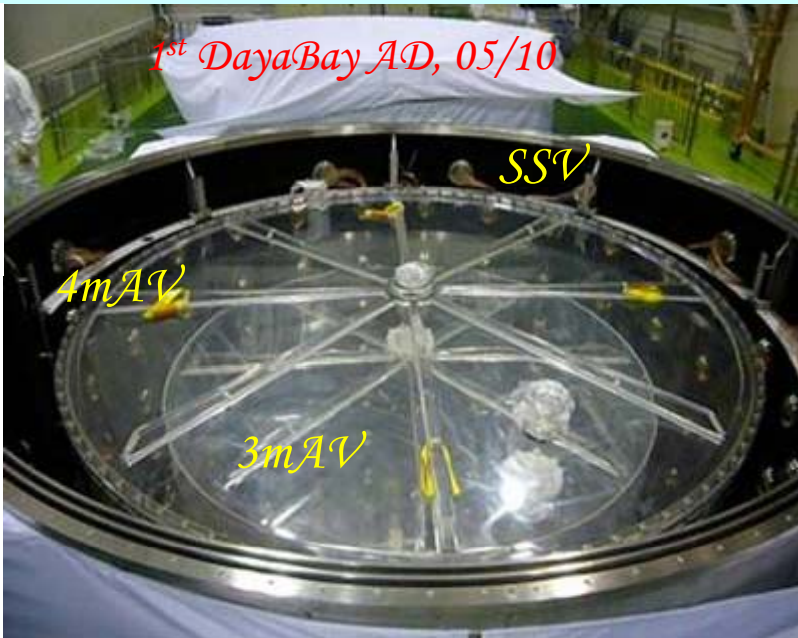
大亞灣近端實驗室



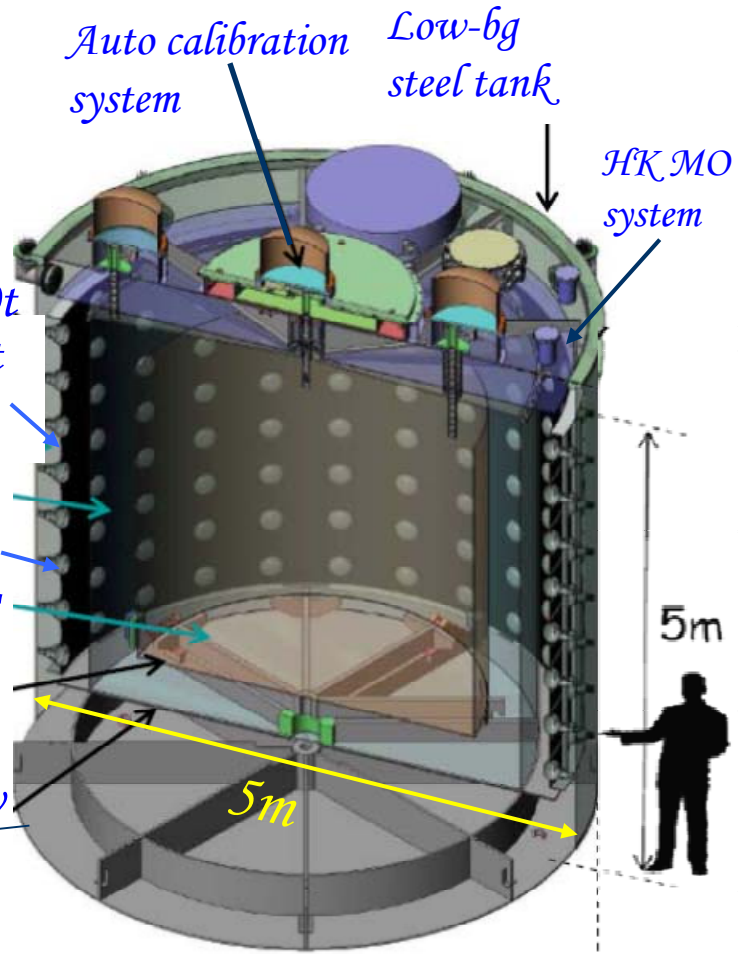
大亞灣遠端實驗室



The Daya Bay Anti-neutrino Detector (AD)



Total mass: ~110t
Buffer: 40t mineral oil



~ 100-355 m of rocks above

gamma-catcher: 20t LS
192 8" low-bg PMTs
Target: 20t Gd-LS

RPC muon veto

3m Acrylic Vessel

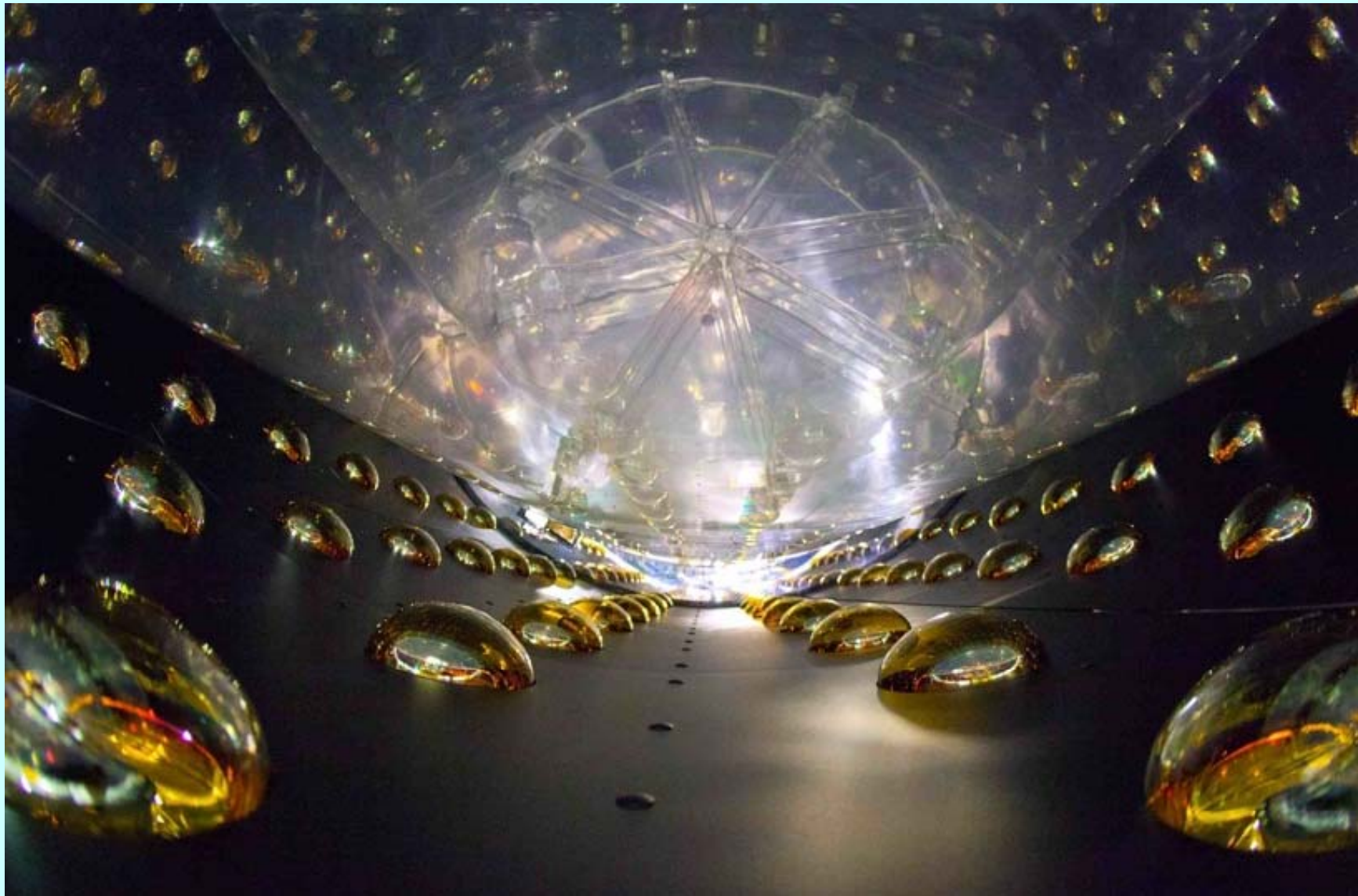
4m AV

8" PMT

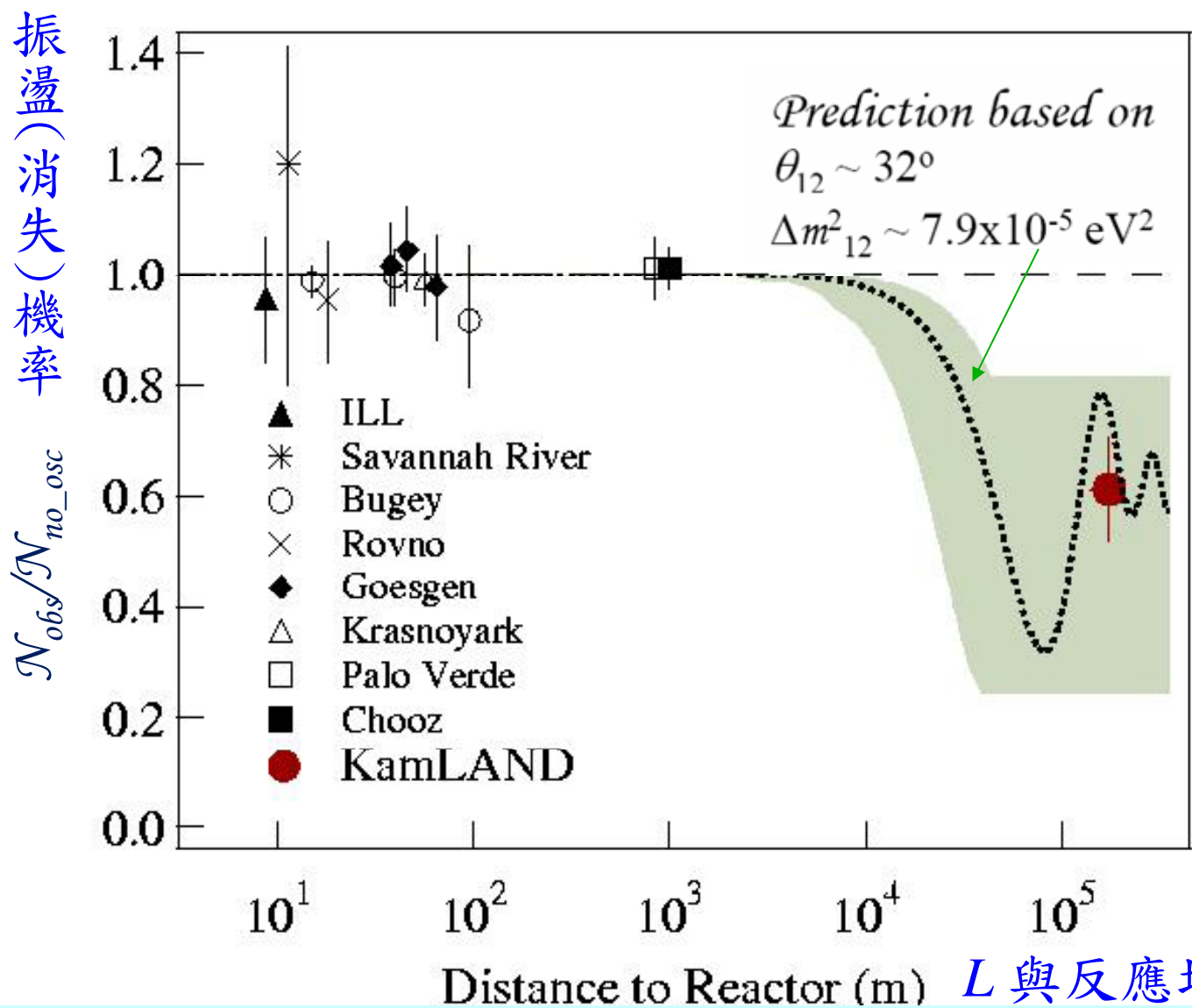
Water shielding and Cerenkov muon veto

energy resolution: $(7.5\% \sqrt{E} + 0.9\%)$

Interior of Antineutrino Detector



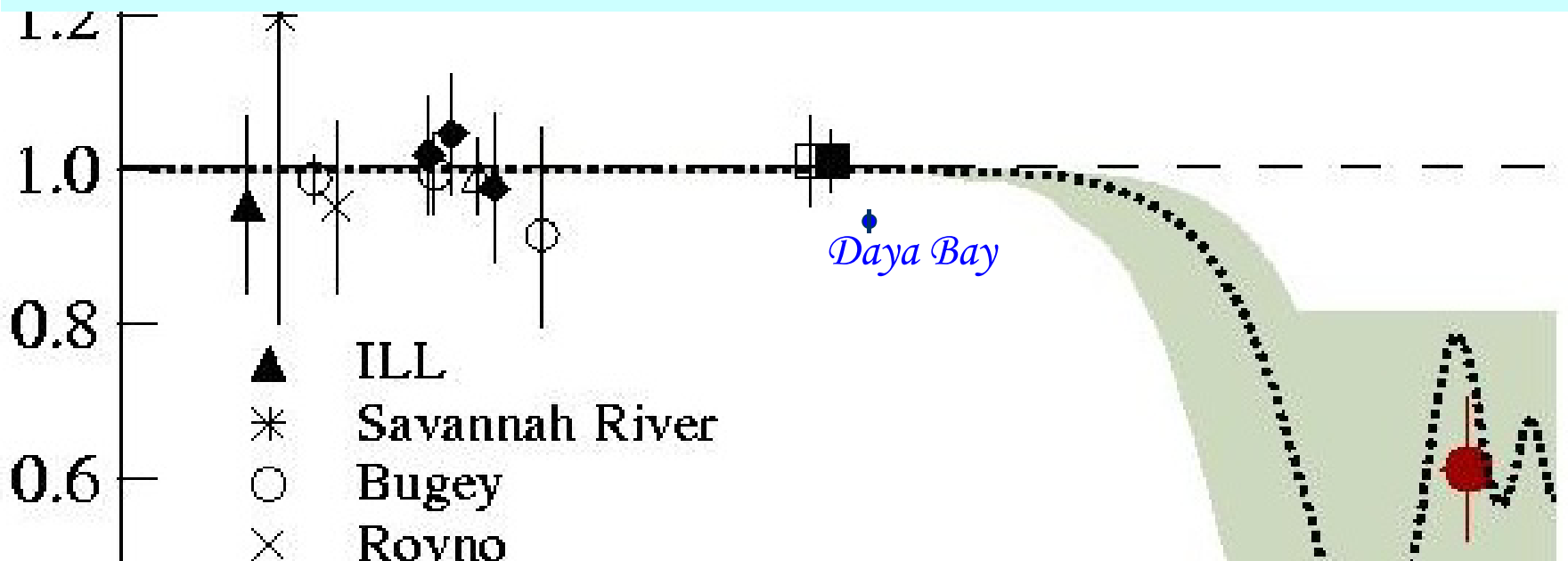
Precisely Measuring θ_{13}



Precisely Measuring θ_{13}

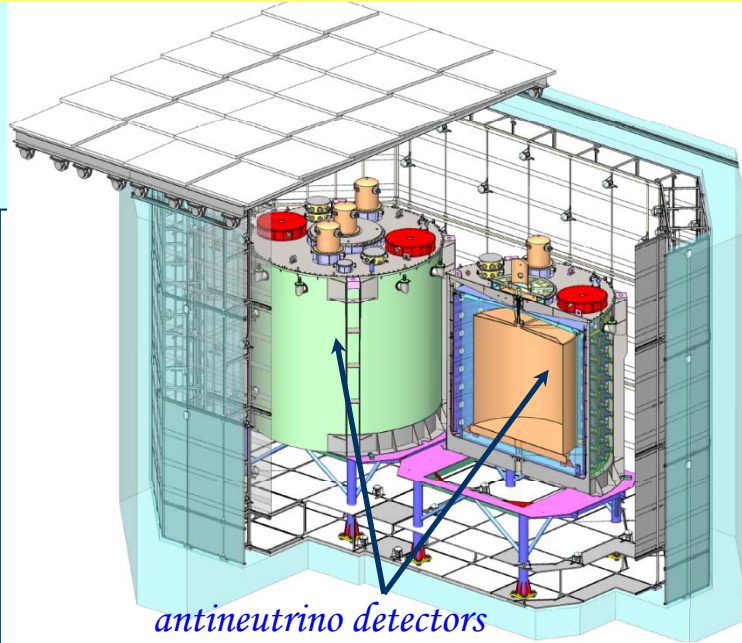
振盪(消失)機率

N_{obs}/N_{no_osc}



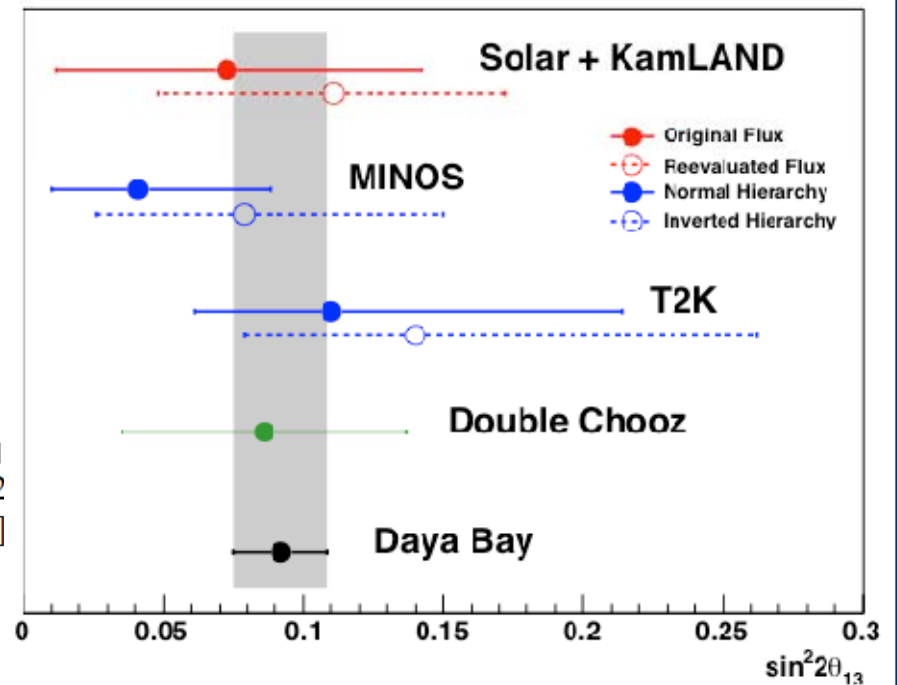
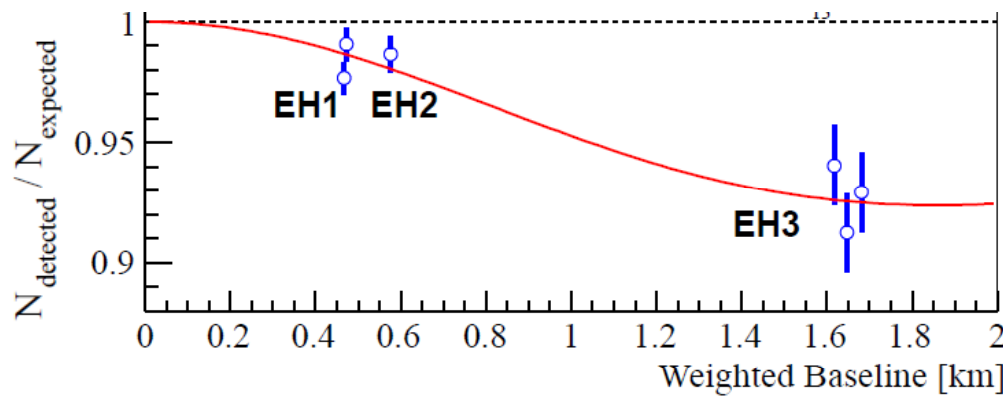
新一代中微子精確實驗

發現 θ_{13}



- 觀測到電子類中微子消失
- 遠端消失 $\sim 6\%$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$



香港捉鬼敢死隊





瀟聰安裝探射器



瀟聰, MC^2 值班



Yanchang measuring Radon level in Daya Bay



HK members involved in AD filling



Jianyi and Xiacong testing MO system



*Raymond and Xiacong installing
MO Clarity Box*



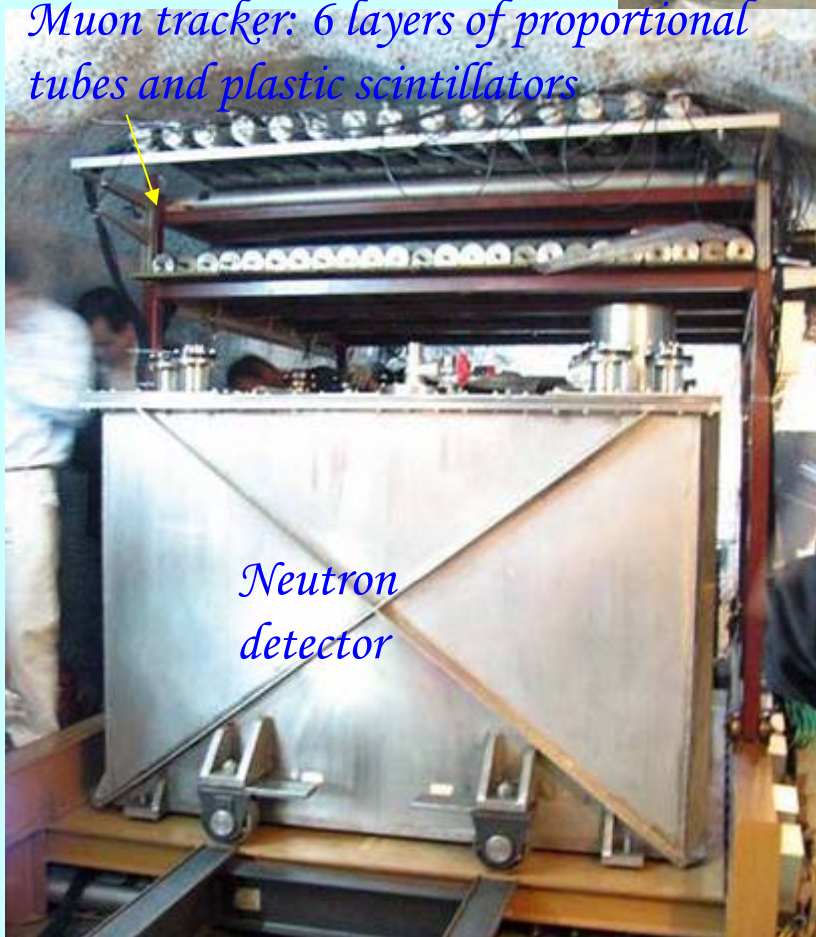
Kai and Soap working in an experimental hall

Aberdeen Tunnel Laboratory

Over 40 students from CUHK and HKU have been involved!



Muon tracker: 6 layers of proportional tubes and plastic scintillators



Neutron detector

Easy access to tunnel, but can only from 1am – 5am, 2-4 nights/week,

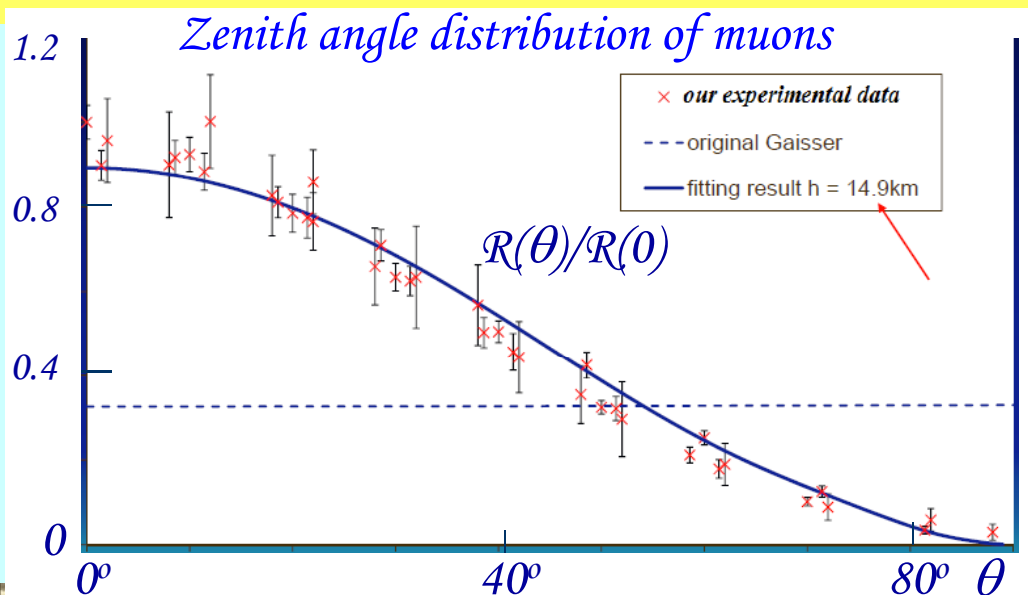
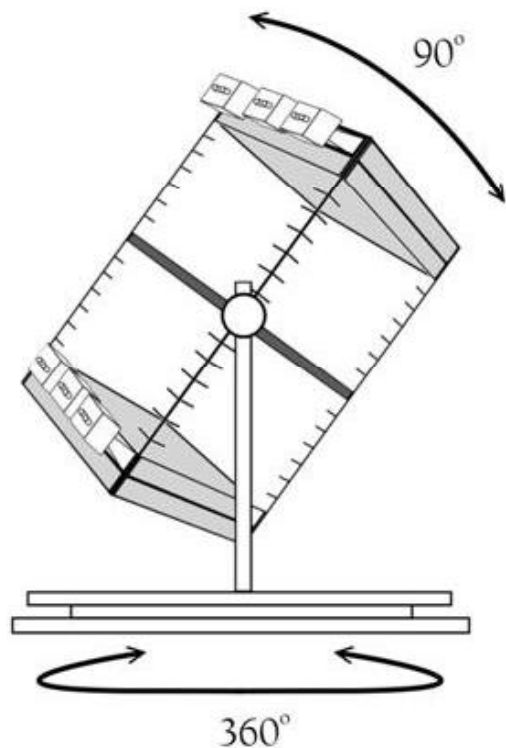
~ 250m of rocks,

~ Daya Bay environment

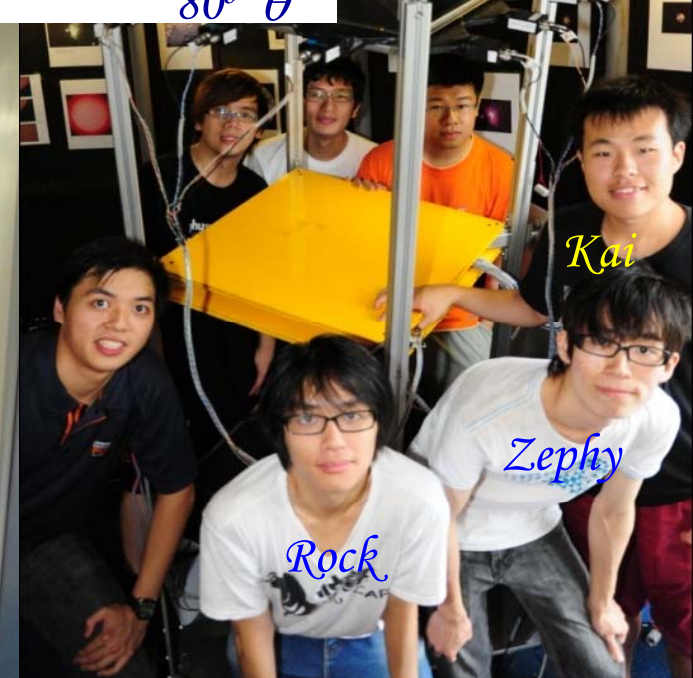
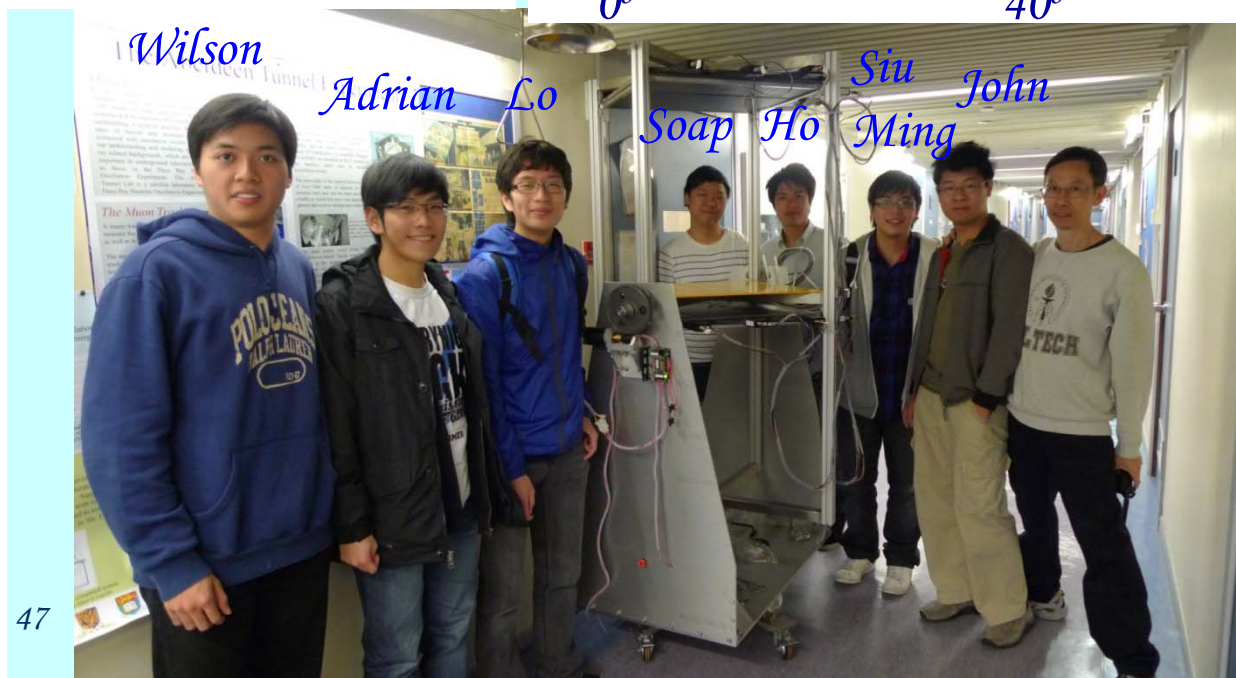
A satellite lab of Daya Bay

Allows study of underground cosmic rays

The CUHK Cosmic Muon Telescope



Surface muon rate measured; simulation input verified.



鬼粒子 - 神秘的中微子

- 中微子何方神聖? 有甚麼重要?
- 中微子變臉的把戲
- 捉鬼: 如何測量中微子?
- 香港捉鬼敢死隊

<http://paper.wenweipo.com/2012/03/09/ED1203090001.htm>

<http://www.takungpao.com.hk/news/12/03/09/ZM-1459631.htm>

<http://news.mingpao.com/20120309/gfc1.htm>



鬼粒子 - 神秘的中微子

朱明中 明白中微子
香港中文大學物理系
09/03/2012