

微中子的提出

- 1930年代， β -decay 的能源危機
-德國杜賓根會議，討論放射線的一些問題



- ?? 能量守恆有問題！
另外角動量守恆也出了問題！
- 丹麥大物理學家波耳 (N. Bohr)
 - 提出了在 β 衰變中能量不守恆的觀念！

微中子的提出- Pauli

- 「各位親愛的放射性先生女士……請你聽我道來……關於…… β 衰變的連續能譜，我在絕望之餘撞了一個解決的辦法……
 - 接著他開始形容，假設在 β 衰變中同時釋放出一種實驗看不到的中性粒子，這個粒子會將能量帶走，因此就可以解釋為什麼實驗看到能量不守恆的現象。
- 「我對這個觀念仍然不太放心，因此我尚未發表，而先在此向各位私下表達……不幸我不能親自前來開會，因為
- 我在這裡還有一個舞會跑不開……」
- --這個包立在絕望之餘大膽提出來的中性粒子，就是現在赫赫有名的微中子。

微中子的提出

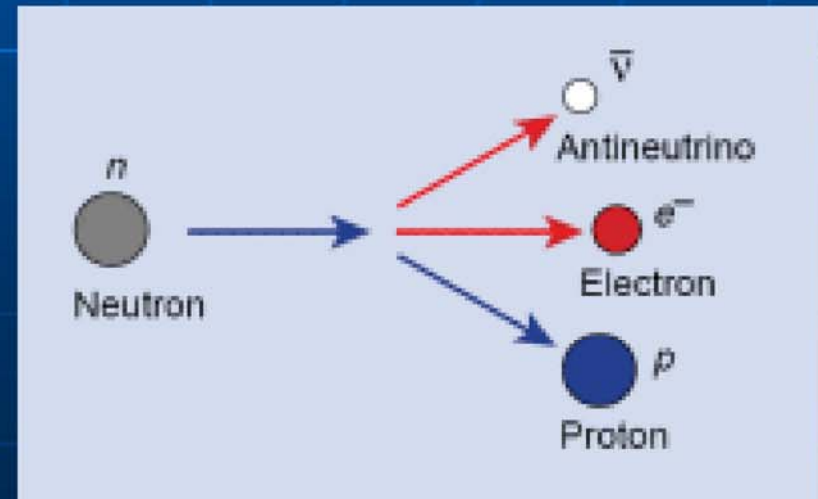
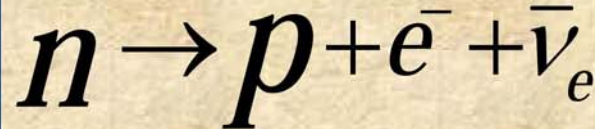
- 1931，Pauli：



- 微中子 ν 的特性
 - 電中性 - 符合電性守恆
 - 自旋1/2 - 符合角動量守恆
 - 質量幾近於0 - 符合能量守恆
 - 幾乎不與其他物質作用 - 因此難以觀測

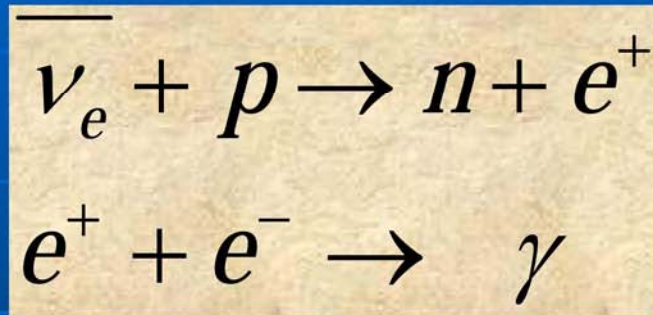
弱作用力的提出

- 1933，費米，提出弱作用力
- β 衰變
 - 核內一個中子通過弱作用衰變成一個電子、一個質子和一個反微中子。
 - β 衰變定量理論



微中子的尋找

- 1956，美，F. Reines & C. L. Cowan



- 利用在很深的地底下的核反應堆，產生極強的微中子束撞擊質子，證實了上述實驗，
- 直接證實了電子微中子 ν_e 的存在。
 - 一小時不到 3 個！！

1995年物理諾貝爾獎

- F. Reines 1956 $\nu_{\bar{\mu}}$ (Cowan已過世)
 - 微中子存在的第一個直接證據
- M. Perl 1976 ν_{τ}
 - 發現濤子-第三代輕子
 - 預測第三代微中子-濤子微中子的存在
 - 使得粒子物理中的標準模型有所依據。

粒子物理中的標準模型

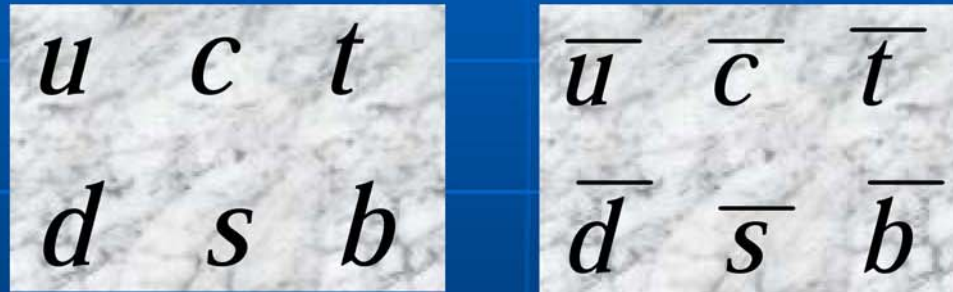
Standard Model

粒子物理中的標準模型

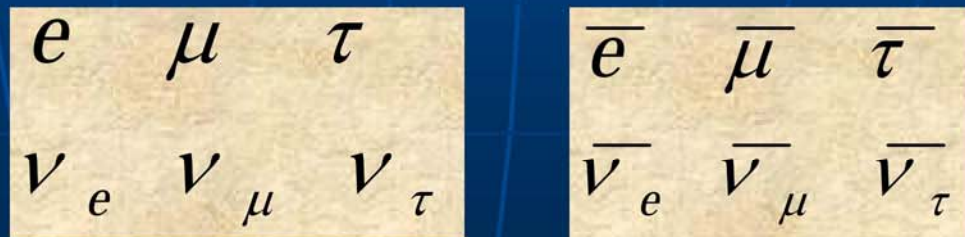
- 粒子物理學的標準模型是一套描述強力、弱力及電磁力這三種基本力及組成所有物質的基本粒子的理論
- 但不包含重力！

粒子物理中的標準模型

- 物質的組成-基本粒子(沒有結構!)
- 夸克家族(參與強作用)有三代及他們的反物質：



- 輕子家族(不參與強作用)有三代及他們的反物質：



粒子物理中的標準模型

- 基本交互作用
- 強作用(力)
 - -質子、中子得以束縛在原子核內，穩定存在
- 電磁作用(力)
 - -電子可以繞著原子核轉，形成原子
- 弱作用(力)
 - -控制著太陽核熔合反應的速率，使得太陽不至於太快燃燒殆盡，人類得以生存！！
- (重力)
 - -宇宙、星系的形成

粒子物理中的標準模型

- 傳遞交互作用的粒子
- 強作用力：膠子 (gluon)
- 電磁作用力：光子
- 弱作用力： W^+ ， W^- ， Z^0
- (重力：引力子)

不同味道的微中子(ν_{μ})發現

- 1962 年，美國科學家萊德曼、舒瓦茨和斯坦伯格
- 美國布魯克海文國家實驗室的加速器上用質子束打擊鈹靶的實驗中發現微中子有“味道”(風味flavor)的屬性，
- 證實與 μ 子(渺子)相伴的 μ 子微中子 ν_{μ} 和與電子相伴的 電子微中子 ν_e 是不同的微中子！

1988年物理諾貝爾獎

- L. Lederman 萊德曼
M. Schwartz 舒瓦茨
J. Steinberger 斯坦伯格
- 微中子束方法及通過發現 μ 子微中子 ν_{μ} ，驗證輕子的二重態結構
 - 微中子有“味道”（風味 flavor）的屬性
 - 證實與 μ 子（渺子）相伴的 μ 子微中子 ν_{μ} 和與電子相伴的 電子微中子 ν_e 是不同的微中子！

微中子天文學

太陽微中子問題
超新星與微中子

超新星與微中子

超新星爆炸

- 核融合反應
- 放出大量的光與微中子
- 光：光在內部暴震波傳到星球表面後（約需三小時）射出
- 微中子：產生後直接透出
- 微中子偵測到的時間，比光波偵測到的時間早了約三小時！

超級神岡-微中子探測器

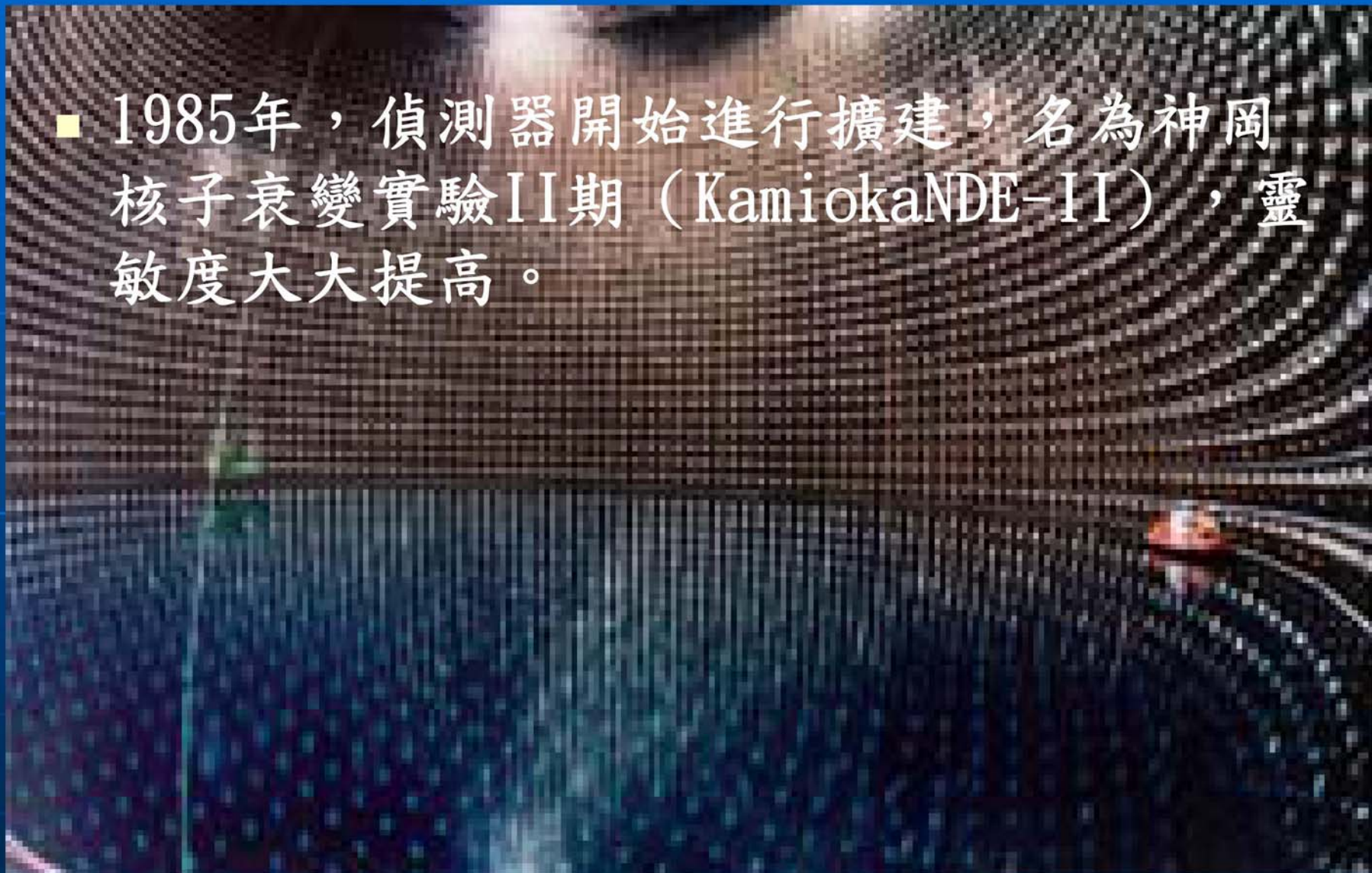


前身-神岡實驗室

- 神岡核子衰變實驗 (KamiokaNDE)
- 日本岐阜縣飛驒市神岡町神岡礦山的一個深達1000米的廢棄砷礦中。
- 1982年建造，1983年完工，
- 圓柱形容器高16米，直徑15.6米，裝有3000噸水和大約1000隻光電倍增管，
- 目的是偵測粒子物理學中的一個基本問題——質子衰變。

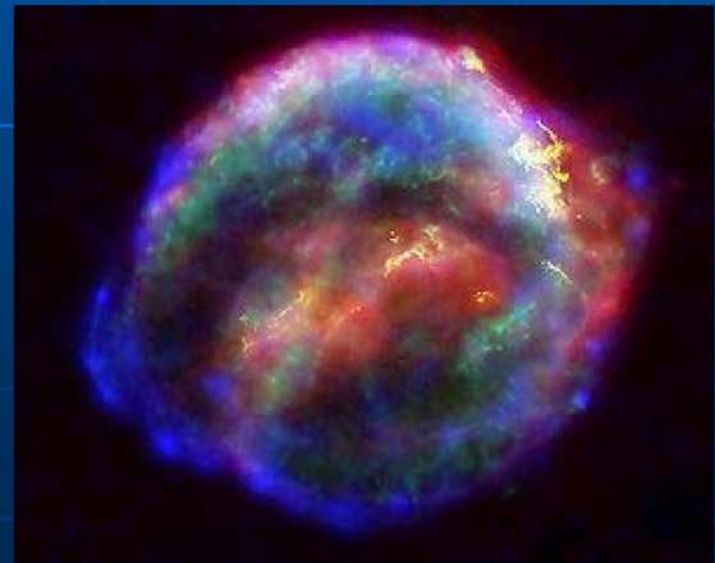
擴建-神岡II代

- 1985年，偵測器開始進行擴建，名為神岡核子衰變實驗II期（KamiokaNDE-II），靈敏度大大提高。



SN1987A與微中子天文學

- 南半球的天文台
 - 1987年2月24日，SN1987A出現在大麥哲倫星雲
 - 1604年後第一顆肉眼可見
- 注意：SN1987A微中子的偵測

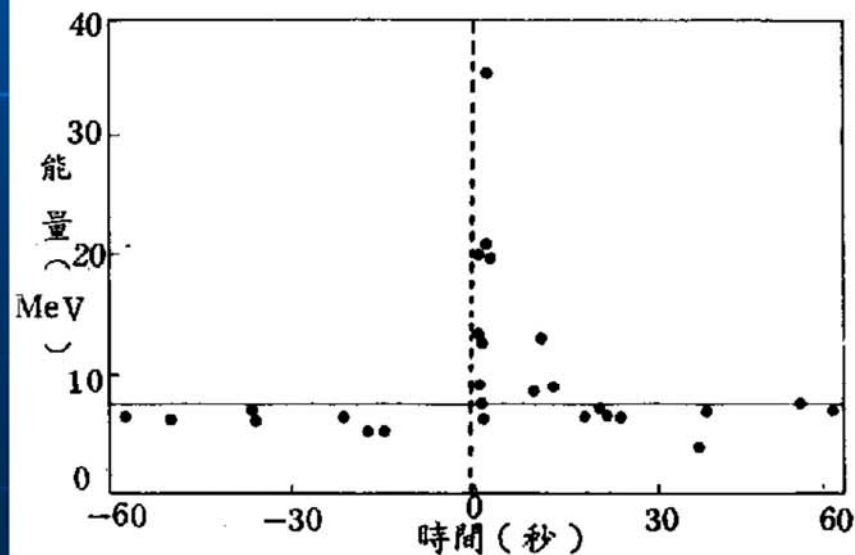


神岡II代實驗室

- 1987年2月23日，神岡偵測器發現了大麥哲倫雲中超新星1987A爆發時產生的微中子

- 測到了約11個左右的微中子事件
(背景約1、2個)

- 這是人類首次偵測到太陽系以外的天體產生的微中子。

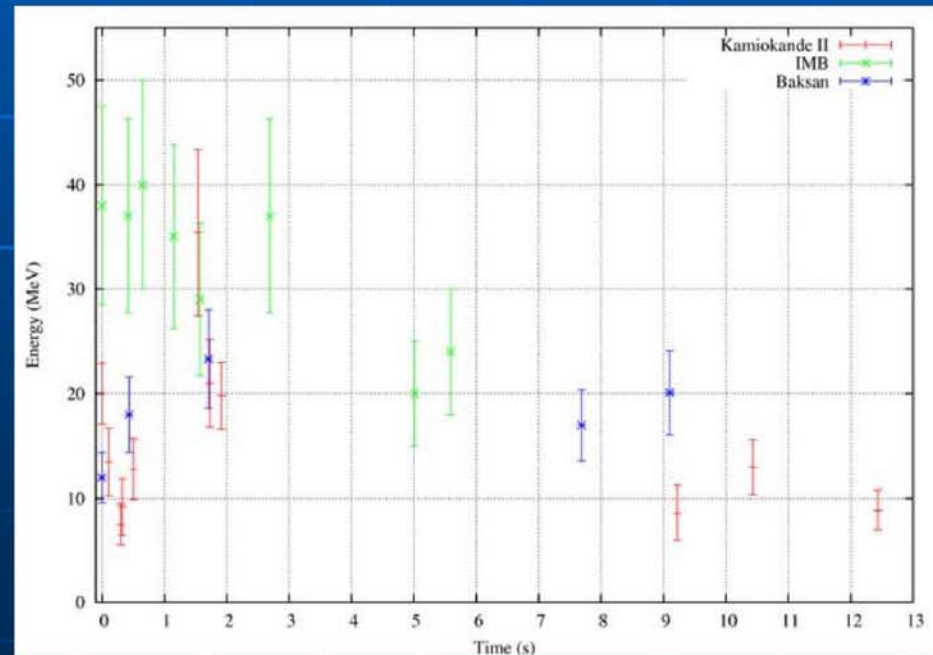


神岡II代實驗室

- 「kamiokande II偵測器在二月二十三日，世界標準時7：35：35（±1分鐘）測得一短束微中子猝發事件。
- 此微中子束約持續13秒。
- 微中子訊號由11個能量為7.5~36MeV（百萬電子伏特）之電子事件所構成。
- 其中兩個電子事件可溯源至大麥哲倫星雲，其和大麥哲倫星雲之角度差為 $18^{\circ} \pm 18^{\circ}$ 和 $15^{\circ} \pm 27^{\circ}$ 。」

IMB 天文台

- 美國伊利湖濱地底的厄文—密西根—布魯克海汶，簡稱IMB
- 23日7:35:41.37 (±10毫秒)
- 偵測到8個能量在20~40 MeV 中間之微中子
- 微中子束持續約6秒。



超新星爆炸-微中子偵測

- 第一個IMB事件比神岡的信號晚六秒，絕對在後者的時間準確度內。
- 此兩結果之吻合，提供了有力的證據，證明於超新星核心崩潰的一刻所形成的微中子，的確是來自這個星球！
- 1987年2月23日清早，每數萬人中就有一人因為超新星1987A的爆炸，而在體內有微中子反應！！
 - 與此相較，我們身體每平方公分在每秒有100億個太陽微中子通過，但是能量太低，不足引起任何作用。

太陽微中子問題

我們身體每平方公分在每秒有
100億個太陽微中子通過！！

太陽微中子

■ 透過太陽光

- 只能看到太陽的表面！

■ 透過太陽微中子

- 可以直接看見太陽中心的核融合引擎
- 太陽內部溫度最高的區域，佔太陽體積的1%
- 微中子在此被製造出來
- 之後便視(太陽)若無物地穿透太陽的外層！！
- 2 秒鐘！

太陽微中子問題

- 太陽標準模型-太陽能量的來源，可以預測太陽製造出來的微中子能譜以及數量。
- 1964年起，美國賓州大學的戴維斯（R. Davis, Jr.）開始與巴寇合作設計一個以化學反應來度量太陽微中子的方法。
- 意外的是，戴維斯偵測到的微中子數目只有太陽模型預測的三分之一！！
- 這就是困擾物理學家30年的「太陽微中子問題」！

2002年物理諾貝爾獎

- 小柴昌俊
 - 發現SN1987A爆發所釋放出來的微中子
- 戴維斯(Ray Davis)
 - 直接觀測太陽微中子的第一人

太陽微中子失蹤問題-為什麼？

- 其他的微中子跑哪去了？
 - 是消失了？
 - 是偵測技術不夠好？
 - 還是天文學家根本就推算錯誤？
- 你覺得呢？

太陽微中子問題的解決-SNO

- 美國、加拿大以及歐洲的科學家在加拿大的安大略省共同建造了 Sudbury 微中子天文台(Sudbury Neutrino Observatory-SNO)
 - 為了研究太陽，在地底兩公里建造一座10層樓高的偵測器！
 - 有能力同時偵測所有種類的微中子。
 - 2002年，發現原來是這些太陽微中子在中途變身，才躲過了這30年來的偵測！
- 太陽的微中子的震盪！
- 成功地解決了困擾物理學家30年的”太陽微中子問題”

太陽的微中子的震盪

- 太陽中心的核熔合反應只能產生電子微中子 - 戴維斯及其他類似的實驗只設計來尋找這種微中子；
- 從太陽發出的電子微中子可能轉變成另兩種微中子，因此就躲過偵測。
- 因此若只偵測電子微中子，當然會造成短缺！！
- 而SNO可同時偵測三種微中子！！

太陽的微中子震盪的重要意義

- SNO直接證明了一件事，就是微中子並不遵循標準模型對於微中子的簡單分類，
- 它們並不是三類無質量的微中子而已。
- 微中子必須要有質量，才能發生震盪！
- 粒子物理的標準模型必須修正！！
 - 是標準模型30年來的最大修正，但是修正的方向還有待進行中的微中子實驗來闡明。
- 如果微中子帶質量，即便是很小的質量，對於宇宙都有重大的影響。
 - 暗物質的熱門人選！！

2015諾貝爾物理獎

- 日本物理學家
梶田隆章
Takaaki Kajita

加拿大物理學家
阿瑟·麥克唐納
Arthur B.
McDonald

- 發現微中子震盪，
證明了微中子具有
質量。

The Nobel Prize in Physics 2015



Photo © Takaaki Kajita

Takaaki Kajita

Prize share: 1/2



Photo: K. MacFarlane,
Queen's University
/SNOLAB

Arthur B. McDonald

Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"