

一、研究動機

起先，我是希望不要選到上課有提到過的粒子，但因為我還是很不懂粒子物理，所以我就想說去跟 AI 聊聊天，請它提供一個有趣的新發現粒子。結果 Anthropic 的 Claude AI 提供了我一個稱作“Zephyr boson”的粒子，經過我查證之後發現這東西根本不存在，被我臭罵一頓。後來它跟我說可以試試看討論 Ξ_b^{*0} 重子，所以就開啟了我一連串翻找資料、讀 paper 的過程。

二、發現歷史與理論預測

重子(baryon)分為核子(nucleon)與超子(hyperon)，由三個夸克或反夸克組成，屬於強相互作用的費米子，遵守費米-狄拉克統計(Fermi-Dirac Statistics)。核子存在於普通原子核當中，也就是中子與質子，由上下夸克組成。超子則是由奇夸克以及其他兩個夸克組成，具有半奇數的自旋，分為 Δ 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 和 Ω ，通常壽命很短，會快速衰變為其他粒子的共軛態。超子當中， Ξ 家族重子的三個夸克中必有至少一個奇夸克，剩下兩個夸克為一個較輕的第一代夸克（上、下）與另一個較重的第二代、第三代（魅、奇、頂、底）夸克。 Ξ 家族重子的表示法當中，上標處表示粒子帶電荷以及是否處於激態（激態粒子以上標“*”表示），下標處則表示除了上、下、奇夸克以外的夸克（電量由上下夸克平衡，除非有另外標示出其他夸克的存在）。比如 Ξ^0 ，因為屬於 Ξ 家族，至少有一個奇夸克(s)，所以可以先寫下一個奇夸克，且因為帶電荷為零，扣除一個奇夸克帶的電荷(-1/3)，剩下必須配合一個上夸克(1/3)以及再加一個奇夸克(-1/3)才可達到總電量為零，故 Ξ^0 由一個上夸克以及兩個奇夸克組成，記為(uss)。再比如這個報告當中的 Ξ_b^{*0} 由下、奇、底夸克組成，為 Ξ_b^0 的激態(excited state)，記為(dsb)。

夸克模型將重子依據自旋-宇稱(spin-parity, J^P)分成兩類排列， $J^P = +1/2$ 的重子依據八重道(the Eightfold way, or the octet)排列， $J^P = +3/2$ 的重子則依據十重態(the decuplet)排列， Ξ_b^{*0} 就位在十重態的 $q=0, s=-2$ (See Appendix 1.) 位置上。

Ξ_b^{*0} 是由歐洲核子研究組織(CERN)的大強子對撞機(Large Hadron Collider, LHC)中的 Compact Muon Solenoid (CMS, 位在 LHC 的四個對撞點其中之一)發現。在此之前，與 Ξ_b^{*0} 同樣具有一個底夸克的 Ξ_b^- 已經在 2007 年被發現，完成質量量測與發表； Ξ_b^0 則是在 2011 年被發現，而此家族的激態粒子在 2012 年以前都未曾被發現過。

三、探測實驗

1. 重子的產生、組成與重建(reconstruction)

這個粒子的形成來自於 2011 年 LHC 中質心能量(Center-of-mass energy, \sqrt{s})達到 7 TeV 的質子-質子對撞事件（編號 Run/Event 為 178421/533709680），其所對應的積分光度(integrated luminosity, L)為 5.3 fb^{-1} 。

Ξ_b^{*0} 的發現主要是觀測它經過的強交互作用衰變產生 Ξ_b^- 的正電荷共軛對(plus charge conjugates)，當中的 Ξ_b^- 又被稱作”Cascade B”，得名自其快速衰變的特質。

$$\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+ \rightarrow J/\psi \Xi^- \pi^+ \quad (1)$$

當中的 J/ψ 會再衰變為 $\mu^+ \mu^-$ 、 Ξ^- 則變為 $\Lambda^0 \pi^-$ ，當中的 Λ^0 又會變為 $p^+ \pi^-$ 。若已知這個衰變過程，就可以依據沿途測得的這些衰變粒子回推原先重子的組成(See Appendix 2.)。

2. 質量差異的統計與峰值

除組成之外，CMS 還觀察、計算這個重子的質量差異分佈。他們利用了第一式中的衰變現象，使用全部質量減去共軛對中兩項分別的質量並計算其分佈。所計算的質量差異記為”Q”，定義如下

$$Q \equiv M(J/\psi \Xi^- \pi^+) - M(J/\psi \Xi^-) - M(\pi^+)$$

四、實驗結果與結論

質量差異分佈圖中有一個位在約 15 MeV 的峰值(See Appendix 3.)，並且統計標準差皆有超過一般粒子物理實驗的統計門檻 5σ （在 $0 < Q < 50$ MeV 時，標準差為 5.7σ ；在範圍提升到 $0 < Q < 400$ MeV 時，標準差則為 5.3σ ），故具有統計學上的顯著差異，計算所得到的 $Q = 14.84 \pm 0.74(\text{stat.}) \pm 0.28(\text{syst.})$ MeV，可以確認出這個帶有一個底夸克的重子確實為 Ξ_b^{*0} ，且因為可以從先前的其他實驗數據得知 $M(J/\psi \Xi^-)$ 以及 $M(\pi^+)$ ，故可以計算出 Ξ_b^{*0} 具有的質量為 5945.0 ± 2.8 MeV，並且具有自旋-宇稱 $J^P = +\frac{3}{2}$ 。

五、心得

這次期末報告對我來說挑戰性還滿高的，因為平常材料系雖然會討論量子現象，但並不太會接觸到諸如夸克、超子等粒子，更不會去測量其衰變現象，最接近的大概只有量測半導體當中電子-電洞對的壽命。又因為中文的資料相當有限，所以就必須看很多原文的資料，但我又不是很懂專有名詞和一些表示法，比如上標、下標的意思，所以又特別花很多時間去校正和對比資料，這些困難點尤其在兩個查到的資料有出入的時候，會特別令人痛苦。此外，雖然是和 AI 聊天得到的發想，但我可以保證我沒有用 AI 來撰寫內文（不過我好像也沒辦法證明☹）。當中我得到的一個很大的體悟就是真的必須仔細校對 AI 給出的資訊，否則對於自己不熟悉的領域真的是「盡信 AI 不如無 AI」。

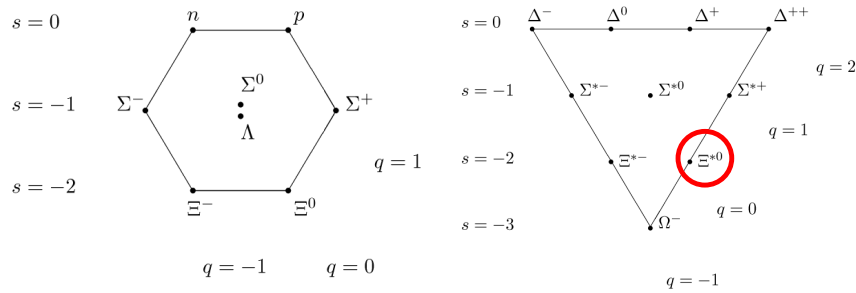
六、參考資料

1. Observation of a New Ξ_b^{*0} Beauty Particle, The CMS Experiment at CERN, <https://cms.cern/news/observation-new-xib0-beauty-particle>.
2. S. Chatrchyan, *et al.*, ”Observation of a new Ξ_b baryon”, *Phys. Rev. Lett.*, CMS-BPH-12-001; CERN-PH-EP-2012-118, arXiv:1204.5955, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1204.5955>.
3. Baryon, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Baryon>.
4. Detector, The CMS Experiment at CERN, <https://cms.cern/detector>.

七、附錄

1. 夸克模型預測的重子系統

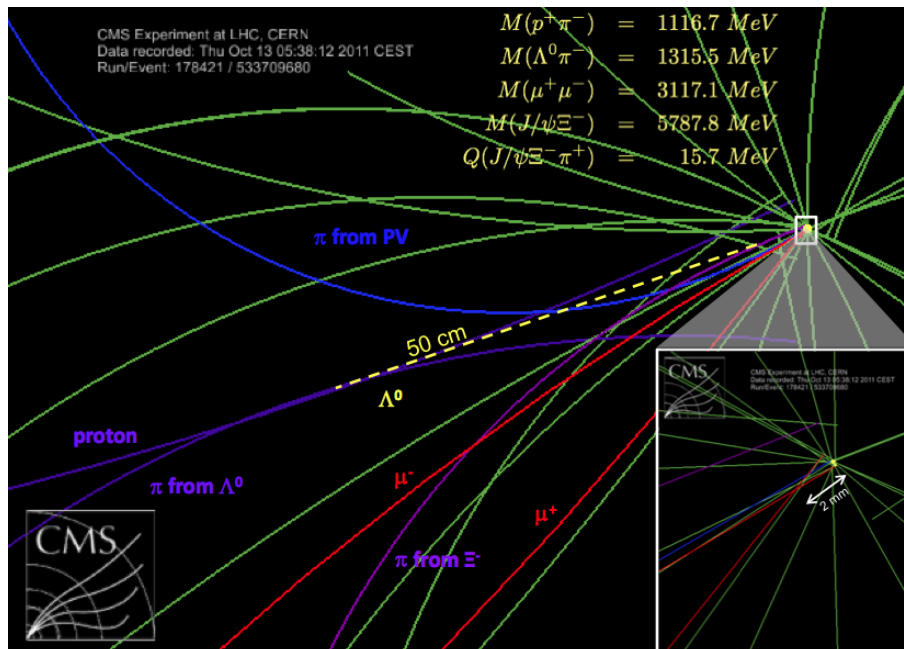
左圖為八重道 ($J^P = +1/2$)，右圖為十重態 ($J^P = +3/2$)。不過八重道其實不只描述重子 (由三個夸克組成) 的理論預測模型，也有用來排列、預測介子 (由兩個夸克組成) 的版本。紅圈處即為此報告所討論的 Ξ_b^{*0} ，位在十重態的 $q=0, s=-2$ 處。



(Photo source: Eightfold way (physics), Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Eightfold_way_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eightfold_way_(physics)))

2. Ξ_b^{*0} 的衰變途徑

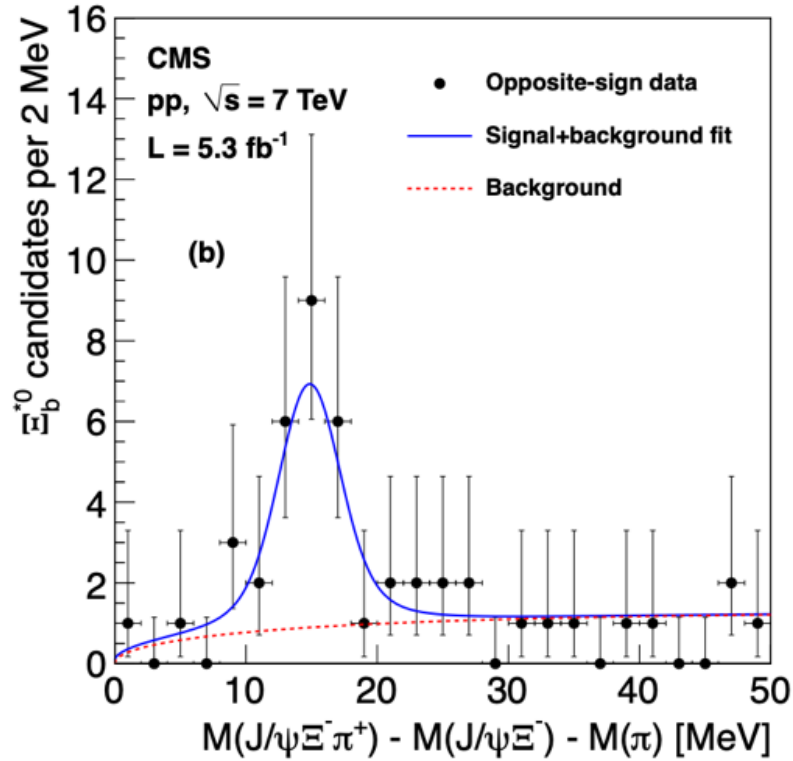
中間白色方框處有圖示出 Ξ_b^{*0} 開始衰變的点，可以看到幾乎所有後續產生粒子的弧形軌跡幾乎都是從此處輻射出，表示其實很大一部分的衰變行為幾乎在幾 mm 內就結束，產生出其他較輕的粒子並不再衰變。值得注意的是紫色的衰變路徑 $\Lambda^0 \rightarrow p^+\pi^-$ 相較於其他衰變發生的距離較遠 (50 cm 處)，表示 Λ^0 可能相較其他粒子有更長的壽命 (lifetime)。此外，此圖左上角有寫上實驗的相關資料，包含單位、實驗時間、事件編號等等。右上方則羅列出了這次實驗所分析出的各共軛粒子對的質量。



(Photo Source: <https://cms.cern/news/observation-new-xib0-beauty-particle>)

3. 質量差異分佈圖 ($0 < Q < 50$ MeV)

下圖是幾次重複實驗所計算出粒子的能量（縱軸）與 Q 值（橫軸）分佈關係，左上所羅列的實驗參數在內文中有提到。在約 15 MeV 處可以觀察到一個峰值，經過統計計算後可以推算得到 Ξ_b^{*0} 的質量，並且計算出的值有相當高的信效度，亦符合理論預測。



(Photo source: S. Chatrchyan, *et al.*, "Observation of a new Ξ_b baryon", *Phys. Rev. Lett.*, CMS-BPH-12-001; CERN-PH-EP-2012-118, CMS-BPH-12-001; CERN-PH-EP-2012-118, arXiv:1204.5955, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1204.5955>.)