

# 期末報告：超對稱粒子

彭書涵 (111022163)

## 1. 超對稱理論

如同老師在課堂上提到的，標準模型是當前已被驗證的最成功的理論。它幫助我們解釋許多現象，包括物質、能量、時空等等。然而，標準模型還不是一個完美的理論，現今仍存在許多標準模型無法解釋的問題，如重力，暗物質，級列問題等等。因此，科學家們不斷推出新的理論，試著解決這些問題。而超對稱理論就是其中一個重要的理論。

超對稱理論是一種理論框架，主要概念為**力和物質遵循相同的方程式**，任何擁有這種性質的理論，都被稱作超對稱理論。

## 2. 超對稱粒子

在超對稱理論中，每個標準模型粒子都有一個對應的超對稱夥伴 (supersymmetric partner)，他們除了自旋相差  $1/2$ ，其他所有性質都與基本粒子相同。例如，夸克 (自選  $1/2$ ) 有一個超夸克 (自旋  $0$ ) 超伴子，而光子 (自選  $1$ ) 有一個超光子 (自旋  $1/2$ ) 超伴子。費米子的超對稱夥伴通過在費米子名稱前加上前綴“s”來命名，而玻色子的超對稱夥伴則加上後綴“ino”來命名。表 1 中列出了各種粒子以及對應的超對稱夥伴，以及他們的自旋。

Particle	Symbol	Spin	Superparticle	Symbol	Spin
Quark	$q$	$\frac{1}{2}$	Squark	$\tilde{q}$	0
Electron	$e$	$\frac{1}{2}$	Selectron	$\tilde{e}$	0
Muon	$\mu$	$\frac{1}{2}$	Smuon	$\tilde{\mu}$	0
Tauon	$\tau$	$\frac{1}{2}$	Stauon	$\tilde{\tau}$	0
Neutrino	$\nu$	$\frac{1}{2}$	Neutralino	$\tilde{\nu}$	0
W	$W^\pm$	1	Wino	$\tilde{W}^\pm$	$\frac{1}{2}$
Z	$Z^0$	1	Zino	$\tilde{Z}^0$	$\frac{1}{2}$
Photon	$\gamma$	1	Photino	$\tilde{\gamma}$	$\frac{1}{2}$
Gluon	$g$	1	Gluino	$\tilde{g}$	$\frac{1}{2}$
Higgs	$H$	0	Higgsino	$\tilde{H}$	$\frac{1}{2}$

表 1: 基本粒子與它們的超對稱夥伴 (圖表為自行繪製)

## 3. 超對稱理論的動機

標準模型雖然在描述基本粒子和相互作用方面取得了巨大的成功，但仍然存在一些尚未解決的基本問題。而超對稱理論可以幫助我們解決許多這些問題。

### 1. 級列問題

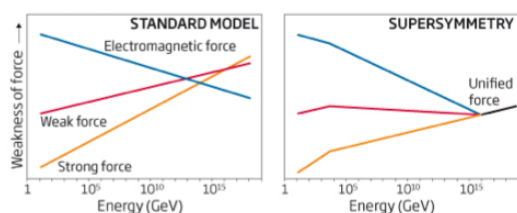
標準模型中的希格斯玻色子的質量約為  $125 \text{ GeV}/c^2$ ，而普朗克尺度則約為  $10^{19} \text{ GeV}/c^2$ ，二者之間存在著巨大的差距。這個問題被稱為“級列問題”。在量子力學中，希格斯玻色子的質量受到高能粒子的量子修正，理論上，這些修正會使希格斯質量變得非常大。然而，在實際觀測中，希格斯質量卻相對較小。超對稱通過引入超對稱夥伴粒子，可以抵消這些量子修正，從而穩定希格斯質量。例如，頂夸克的超對稱夥伴粒子 (純量頂夸克) 的量子效應可以抵消頂夸克本身的量子效應，保持希格斯質量在可觀測範圍內。

### 2. 力的統一

標準模型包含三種基本相互作用：電磁力、弱力和強力。在低能尺度下，這些力的耦合常數是不同的。然而，理論物理學家們發現，在非常高的能量尺度上 (大約  $10^{16} \text{ GeV}$ )，這些耦合常數似乎趨於匯合，這暗示了某種形式的力的統一。超對稱理論可以自然地促進這種匯合。在超對稱框架下，新增的超對稱粒子會對耦合常數的演化產生影響，使其在高能尺度上更加自然地趨於統一。這種現象被認為是大統一理論 (GUT) 的重要預言。

### 3. 暗物質

暗物質是宇宙中不可見但有引力作用的物質，它佔據了宇宙總質量-能量的約 26%。標準模型無法解釋暗物質的存在和性質。超對稱理論提供了一個天然的暗物質候選者：最輕的超對稱粒子 (LSP)。LSP 通常是中性的、穩定的，並且僅通過弱相互作用與普通物質發生作用，這正是暗物質所需的特性。具體來說，超中性子 (Neutralino) 是一個常見的 LSP 候選者。通過實



1: 在超對稱理論中，電磁力、弱力和強力的強度在某個能量下統一

圖源：<https://dulwichscience.wordpress.com/2014/01/09/what-is-supersymmetry/>

驗和天文觀測，物理學家們試圖尋找 LSP 的存在跡象，從而解釋暗物質的本質。

## 4. 實驗搜索

### 1. 對撞機實驗

主要的超對稱粒子搜索集中在大型強子對撞機（LHC）上。ATLAS 和 CMS 探測器通過各種渠道尋找超對稱粒子的跡象，例如缺失橫向能量和特定的衰變鏈。

### 2. 間接探測

超對稱粒子的影響可能通過稀有過程或偏離標準模型預測的異常測量結果間接探測到，如粒子的反常磁矩或味變中性流。

### 3. 暗物質搜索

由於 LSP 是暗物質的候選者，XENON 和 LUX-ZEPLIN 等實驗旨在通過其與普通物質的相互作用直接探測暗物質粒子。天體物理來源的觀測也提供了間接證據，尋找暗物質湮滅或衰變的跡象。

### 4. 探測結果

超對稱理論能幫我們解決許多物理難題，科學家們也從各個角度著手尋找超對稱粒子。然而，至今仍然沒有觀測到任何的超對稱粒子，這也讓科學家們開始尋找新的物理出路。

## 5. 理論進展與擴展

### 1. 超對稱破缺

為了解釋為何尚未觀測到超對稱粒子，我們必須假設在低能態下超對稱已經被破壞。常見的破壞機制包括透過重力傳遞、規範傳遞以及反常傳遞等方式。

### 2. 最小超對稱標準模型（MSSM）

MSSM 是包含超對稱的最簡單標準模型擴展，它預測

了豐富的超對稱粒子譜，並在現象學上進行了廣泛研究。

### 3. MSSM 以外的模型

為了解決 MSSM 的局限性和微調問題，學界提出了多種擴展模型：

#### (a) 次最小超對稱標準模型（NMSSM）

透過引入額外的單態希格斯場來解決  $\mu$  問題。

#### (b) 分裂超對稱

假設只有部分超對稱夥伴粒子較輕，從而解釋為何尚未發現超對稱粒子。

## 6. 結論與未來前景

超對稱理論為標準模型提供了一種有力的拓展，幫助我們解決了一些關鍵的理論問題並提出了暗物質的候選者。儘管尚未找到直接的實驗證據，科學家們仍在努力尋找超對稱粒子。隨著未來對撞機的升級，以及暗物質探測技術的進步，將有助我們針對超對稱例子進行更深入的探索。除此之外，理論上的發展也沒有停下腳步，針對尚未解決的問題，科學家們持續提出新的理論，包括新的超對稱破缺機制和替代超對稱模型，持續激發這一領域的研究。若有一天發現了超對稱粒子，我們對基本物理的理解將有重大的轉變，可能揭示關於宇宙本質的一些最深刻問題的答案。

## 7. 動機與心得

由於物理系的學生很容易被酷酷的名字所吸引，所以在選擇報告主題時，我很快決定要報告超對稱粒子。在查找資料的過程中，我發現超對稱理論是一個想要一次性解決所有問題的宏大理論，這點也與我的興趣非常契合。

在制作這份報告的過程中，我學到了許多新的知識，包括了解當前標準模型所面臨的問題，並且覆習了許多老師在課堂上提到的理論知識。雖然這些知識對我來說還太過深奧，但看到在理論力學中學到的 Hamiltonian、對稱性、狹義相對論等內容在粒子物理中都有實際應用，讓我更有好好學習的動力。同時，這也讓我對物理學習的整體過程有了更清晰的認識。

通過這次這次的報告的準備，我對粒子物理有了更多的瞭解，也體會到理論物理有趣的地方。希望未來能夠繼續學習，增加自己的知識。

## 8. 參考資料

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Supersymmetry>
2. <https://www.home.cern/science/physics/supersymmetry>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=0CeLRrBAI60>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=09VbAe9JZ8Y>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=5ESFGYkkbEI&t=69s>
6. <https://pansci.asia/archives/tag/%E8%B6%85%E5%B0%8D%E7%A8%B1%E7%B2%92%E5%AD%90>
7. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/supersymmetry>
8. <https://dulwichscience.wordpress.com/2014/01/09/what-is-supersymmetry/>