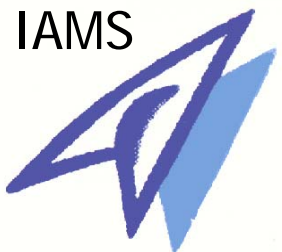


親愛的，我把光變慢了 —漫談量子光學

陳應誠

中央研究院原子與分子科學研究所
2013年5月26日，“科學家在玩什麼”

IAMS



大綱

- 第一小時：
 - 漫談個人教學與指導學生的感想
- 第二小時：
 - 漫談量子光學與個人研究經驗

學習、研究與人生
一個探險、探索與欣賞的過程





Carl Weimann, 2001 諾貝爾物理獎得主
(因實現原子氣體的 波色-愛因斯坦凝結)

從科學研究到科學教育

實驗室研究2-3年
為什麼會這樣？為甚麼不那麼做？
如何才能...？有沒有更好的做法？
如果這樣做會怎樣？....





東華大學

達人學苑

21世紀教育三個關鍵字：永續、創意、跨界力

二十一世紀是一個典範不斷改變，動態的世紀。這個改變的動力，來自科技的快速發展、政治與經濟結構瞬息萬變、人文思維也不斷推陳出新。「永續」在典範不斷改變、動態的21世紀，成為重要的一個議題。這些改變，在傳統的學術與產業領域之間提供了更寬廣的跨領域空間，創造出更多新型態的產業。影響二十一世紀的關鍵性思想應該是：追求永續、提昇創意、跨界創新，這也是引領世代交替變革的最重要概念。

本計畫希望透過「達人學苑」的成立，以「**做中學**」為主軸理念，在每年夏季為期一週的研習營，藉由師生對於相關議題的實際操作與成果展現，以及與產業人士的對話，培養學生學習跨界的思維和創新的能力。今年度我們將以永續、創意與跨界三個關鍵字的思辯，回顧宏大的歷史軌跡，比較國內外的教育體制，激盪出新的創意，開拓出新的可能。

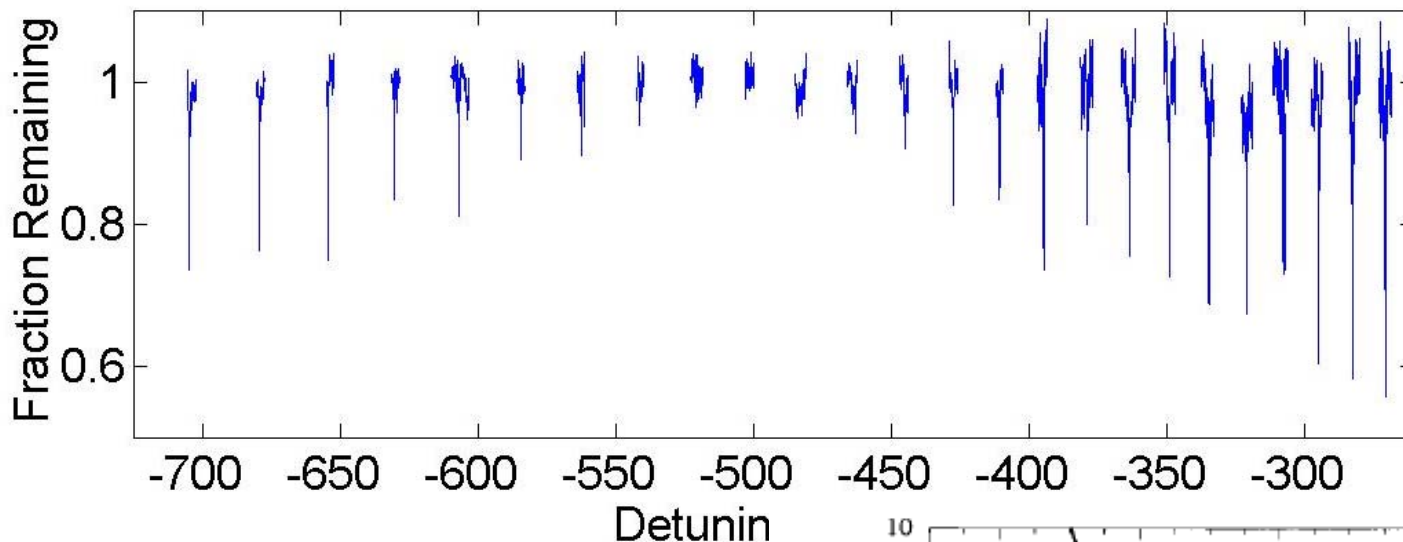
- 教育是當你忘掉所有的細節,所剩下來的東西就是教育!
- 研究(或解習題)是你必須知道所有細節,不然你就做不下去!
- 演講是讓聽眾知道一點點細節,但其實比較像教育的東西!

最需要教的並不是科學，而是如何培養自己的能力！

- 有好奇心、健康的人生觀，要對某些事有**熱情**。
- 要**問問題**，要問別人更要問自己，嘗試獨力去尋找答案，有自我學習能力。
- 要有**邏輯**思辯、分析判斷能力，保持批判性**思考**，不要太輕易相信任何事。
- 有好的**工作習慣**，想清楚流程、記錄有用資訊、讓工作環境方便舒服、防呆、模組化、做的東西要可靠、作數量級估計。
- 有**解決問題能力**，分段除錯、各個擊破。
- 勇敢解釋你已懂的也讓別人懂，培養**表達能力**並教學相長。
- 有**面對壓力與挫折的勇氣**(研究中失敗是常態!)。
 - **相信自己**，你可以辦的到，有志者事竟成！
- 擁有這些能力，跟著你一輩子，面對不同主題(學界、業界)一樣適用！

- 對某些事物的熱情是最終支持我們繼續走下去的動力也是幸福感的來源!

“看見” 微觀世界-波函數的零交叉! 我個人的感動時刻

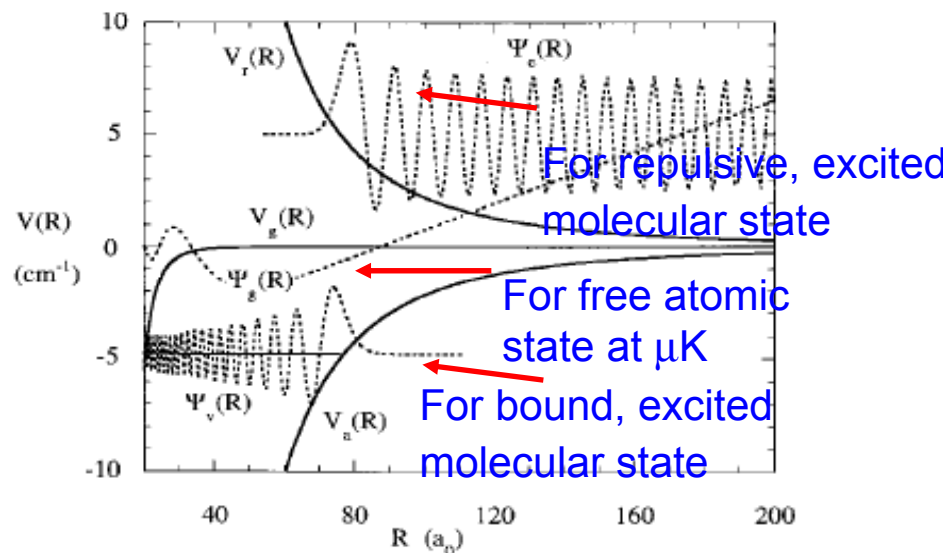


Frank-Condon factor

$$P_{ge} = |\Omega_{eg}(R_C)|^2 \left| \langle \Psi_e(R) | \Psi_g(E, R) \rangle \right|^2$$

$$\cong |\Omega_{eg}(R_C)|^2 \frac{h\nu}{D_C} |\Psi_g(E, R_C)|^2$$

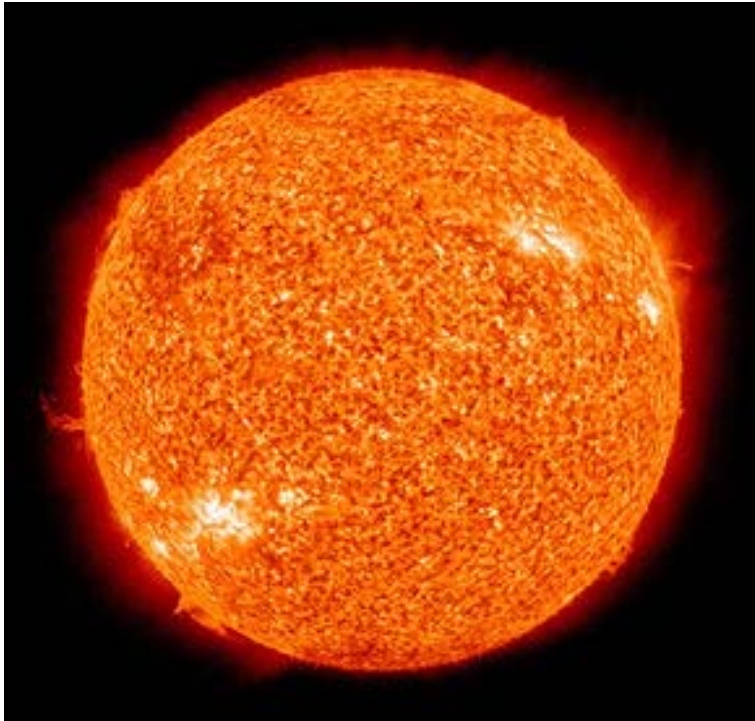
Ground-state wavefunction



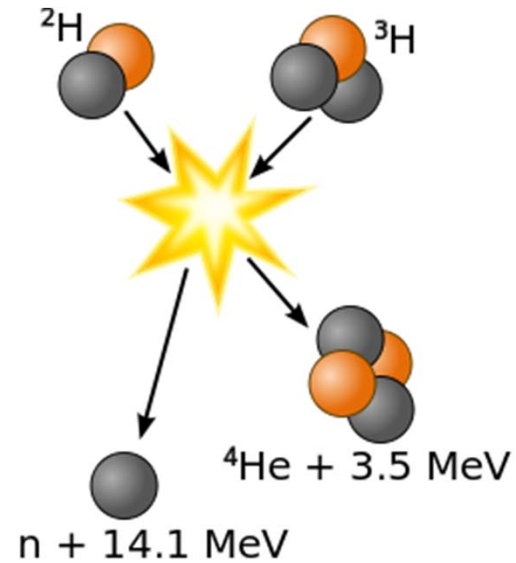
找出屬於你自己的熱情所在
並樂於其中！

太陽在燒什麼？

- 為什麼可以燒出這麼多能量？還燒這麼久？
一個每日高掛在我們頭上的科學問題！
- 原子核融合反應



From Wiki:



批判性思考

- 不要盲目接受未經自己思考過的論點
- 要弄清楚別人的假設與前提是什麼
- 不要假設已經存在的都是對的
- 有時要跳脫原架構去質疑架構本身是否有問題

工作習慣與“莫非定律”

- 流程--你唯一未想清楚的地方也多半是出問題的地方!
- 記錄--你最需要知道的資訊卻也是常未記錄之處!
- 將工作環境變舒服--為何不讓自己的日子好過一些?
- 防呆--只要有機會出錯之處就一定會出錯!
- 模組化--事情已經夠複雜了!
- 數量級估計—對數字要有感覺!
- 東西要可靠--每一個東西比別人好1.1倍，100個東西比別人可靠 $1.1^{100}=13781$ 倍!

解決問題、Trouble Shooting、Debugging

- 就只有一招：分段除錯、各個擊破；Divide and conquer
 - 對程式設計、電路除錯、真空測漏等等…都適用



表達能力

- 教學相長
- 假如你沒辦法講得讓別人懂多半表示你不懂
- 要說服別人懂時, 先說服你自己
- 要清楚知道自己甚麼懂甚麼還不懂
(孔子: 知之為之知, 不知為不知)
- 懂有很多層次, 經歷越多懂得層次會提升

面對挫折

- 最近看功野的「有」些事，這些年我人才懂「另」一書，關於失
敗是一部分在學間部一何文深有同感，其實生們每天個功課，失
敗是根本不然就態會如面對台儀器。其掉、多壞。感，我、一、會、那、做、研、究、出、狀、如
況、在、不、系、統、出、期、時、參、考、文、獻、請、教、別、人、再、戰。其、實、經、過、事、實、上、反、如
何、果、不、如、預、或、調、適、心、情、恢、復、鬥、志、拔、劍、再、戰。其、實、經、過、事、實、上、反、如
繭、萃、煉、多、半、越、挫、越、勇、越、能、平、常、心、面、對、各、種、哪、一、天、早、點、失、敗、學、會
未、經、失、敗、當、初、會、為、何、會、成、功、多、半、體、認、並、不、願、所、有、年、輕、子、，
而、不、知、當、初、會、為、何、會、成、功、多、半、體、認、並、不、願、所、有、年、輕、子、，
何、面、對、挫、折、，
勇、敢、面、對、人、生、的、重、重、關、卡、！

- 彰化縣溪湖鎮東溪國小40週年校慶, 陳應誠

- 愛因斯坦：

在已獲得知識的啟發下取得愉快的成就，幾乎是一件理所當然的事，任何一個夠聰明的學生都可以不太費勁的取得它。但是長期在黑暗中焦急的探索、強烈的渴望、信心的變化、及精力的消耗，最後終於進入光明，這一切只有那些有過這種經驗的人才能體會！

來自以前研究助理的話

…其實寫這封信給老師最主要是要感謝老師給我一年半的實驗訓練。對我來說，這實在是太重要了。出國以來，我常常有這種感想。上週做了Fabry-Perot干涉儀的實驗，我在非常短的時間內就調出了穿透訊號，（在德國人還在step by step的時候），雖然我非常認同他們實事求是，並且按照規定和計劃來的原則，但是他們在看到摸一摸就調出來的瞬間還是相當驚訝。在老師實驗室那時候訓練出一套邏輯思考，並且可以快速地抓住重點理解問題，因此fabry-perot對我來說真的輕而易舉。

我心裡實在有無限的感慨。並且想起當時老師你是怎麼教我們不要讓自己困在local maximum，要先破壞才能建設，要用腦判斷的種種。我真的是從一無所知到可以說服自己「我可以獨立完成一件事」。還有老師你的background真的很強，作實驗時一邊講出來的道理，我現在真的都用上了。於是在想念台灣的同時，就也非常非常地想念實驗室的一切。

很認真的覺得我很幸運能在老師你的實驗室被啓蒙，被開發，還有被教導。這真的真的真的是很難得的經驗。

我真的好感謝老師！而且有過實驗的基礎，頭腦變很清楚。…

歸納屬於你自己的人生智慧(哲學)

所有我真正需要知道的 . . .

最近我在家裏偶然看到一本平裝書——所有我真正需要知道的在幼稚園時就學到了〔譯註〕——是Robert Fulghum的短文集。多年前它列名暢銷書單榜首時，不知怎麼漏過我的注意（但我妻子沒漏，書一定是她帶回家的）。

書中這一篇短文說明Fulghum的個人信條——他真正需要知道的，他宣稱在幼稚園已學到了。

物理學家的信條是什麼呢？那些事是物理學家需要知道的？我仔細想過後整理了一張清單在這裡。您的優先順序可能不同——這是一張關心研究的理論學家所開列的單子。所列項目沒有一條是在幼稚園學到的，而事實上，沒有一項在我大學或研究所課程內。所有我真正需要知道關於物理的事情我必須靠自己發掘。

一個物理學家的信條

※保存想法、上課及工作的筆記。記憶會衰退但寫下來的一直跟著你。年輕時你可能低空閃過，但當你到四、五十歲時，你的筆記——編了號，記了日期，附有索引並收集在夾子中——是在混日子和仍作有用工作間的重大區別。

※粗略的筆記只是漸漸隱去的影像。謄寫下來，不要等待。校訂你生產的東西，以例證說明，工整的書寫，最好能用文字處理工具。材料本身已夠艱深，任何使找回它們較順利的的方法都有大幫助。

※如果值得記憶的，寫下來。在電話機旁擺本筆記簿，將每一項記錄編號並寫上日期

※翻閱文獻並讀與你相關的（你不是Feynman）。收集參考資料。清晰的甚至教學式的寫你自己的論文。

※花時間選擇你要學習的書籍。不好的書會令你沮喪，而好的則讓你高飛。搜索那能提供你直覺洞察力的並用你自己的文字寫下重要的章節及計算過程。解習題。

※決不停止學習。學習過程中組織你自己的練習。它們將為更嚴肅的問題開道。

※不要給拉進大計畫除非你對其最終產品有一清楚的概念。

※去找大問題。沒人會在乎可以發表的瑣碎結果。

※花時間準備一個計畫——否則你會花太多時間做不需要做的事。

※展望未來。規畫你打算做的事——下個月、明年、長遠的未來。當你學到更多時再

作修正。

- ※學著嗅出好問題。尋找它們的技巧比解決它們更重要（雖然兩者均算數）。如果你能將令人困惑的數據轉換成適切的問題時你就搞定了。將半解的難題收起來留待後日。
- ※不懂時決不告訴自己懂了（你如何能知道 $F=ma$ 的意義除非你能清楚的定義 F 和 m ？）。如果你不懂，想辦法弄懂。請教朋友，查書還有訴諸常識。記筆記。
- ※如果到最後還是不懂，寫下你已有的。將來你有可能再繼續下去。
- ※花時間整理你心中和筆記裏的想法：趨勢與實質材料是一樣重要的。對歷史的認知將有助於識別趨勢。
- ※不要怕單調辛苦的工作。沒有痛苦，沒有收穫。
- ※但若計算過程越來越繁雜，可能大自然並沒打算要你用那個方法。尋找不同的路。
- ※一旦你了解一種推導，設法猜出它直觀的意義。理想狀況下，你只需記得觀念；數學可等以後再加進去。
- ※檢查單位(dimensions)和數量級。
- ※準備每一次的上課或演講。用文字。
- ※預演會議中十分鐘的報告。分發抽印本(preprints)。

※回信。

- ※如果你召集一個委員會，花時間想清楚應該有什麼樣的結果。每次開會前寫下你自己的會議事項。控制自己的發言時間，兩次會議之間設法使委員會活下去。
 - ※從寫評論性（回顧性）論文中你會學到很多。不管該評論談的是什麼，徹底的工作使你成為最前面的專家。同時，在此過程中你非常有可能再發現一兩個值得追擊的研究題目。
 - ※公平的給予別人該得的(credit)。
 - ※如果可能找位良師或益友，若找不到也別驚訝。良師益友不多，而且每個人都忙。或許你能為別人扮演這個角色。
 - ※招募聰明的年輕人。
 - ※與同仁溝通。珍惜少數對你的工作真正關心的。
 - ※花時間請教專家。他們不會在意而且可能很高興展現他們的博學。
 - 尋找意氣相投的人。他們很稀少又離的很遠。再沒比這更可貴的。
 - ※能作為一個物理學家是極大的恩典。要配得上它。大多數人一生在作無聊繁複的事。
- 譯自 1993年五月號“今日物理”(Physics Today) 63頁。

第20屆國際原子物理大會, Innsbruck, Austria, July 2006,
Norman Ramsey (1989年諾貝爾物理獎得主)

“I wish I were 29 instead of 92 years old such that I could participate in the exciting advancement of atomic physics”.

能作為一個科學家是極大的恩典，要配得上它，大多數人一生在作無聊繁複的事！

第二小時

- 漫談量子光學與個人研究經驗
 - 光是什麼？
 - 光與物質的交互作用
 - 單光子源與光子量測
 - 電磁誘發透明效應(Electromagnetically induced Transparency, EIT)
 - 慢光、靜止光與量子記憶體
 - 以慢光或靜止光加強對光的操控

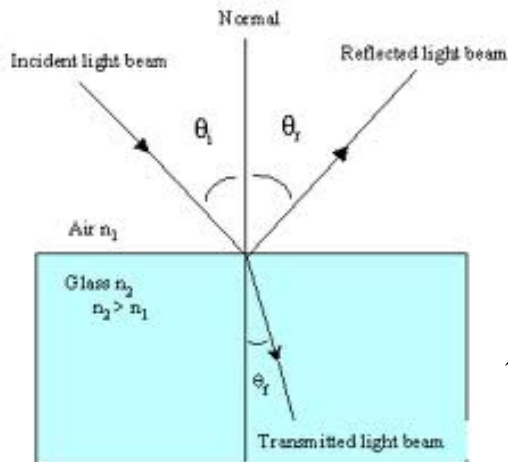
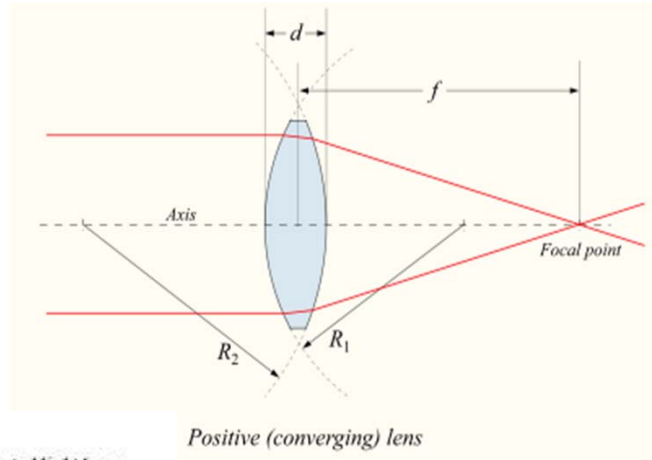
光是什麼？

- 它是光束—幾何光學，真空中沿直線前進，有反射折射現象等
- 它是一種電磁波！波動光學

(波是什麼？能量在兩種不同形式轉換傳播出去)

- 有疊加、干涉、繞射、穿隧、共振等現象

幾何光學



反射與折射

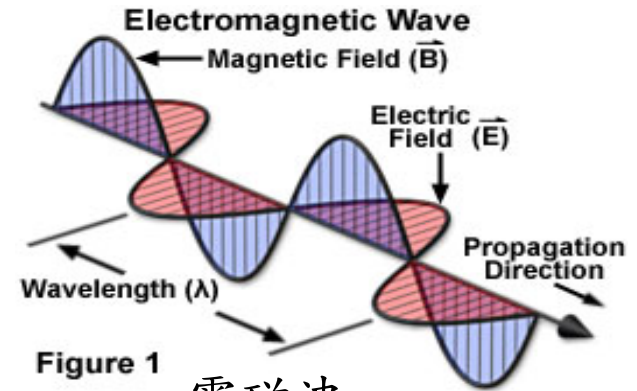


Figure 1

電磁波



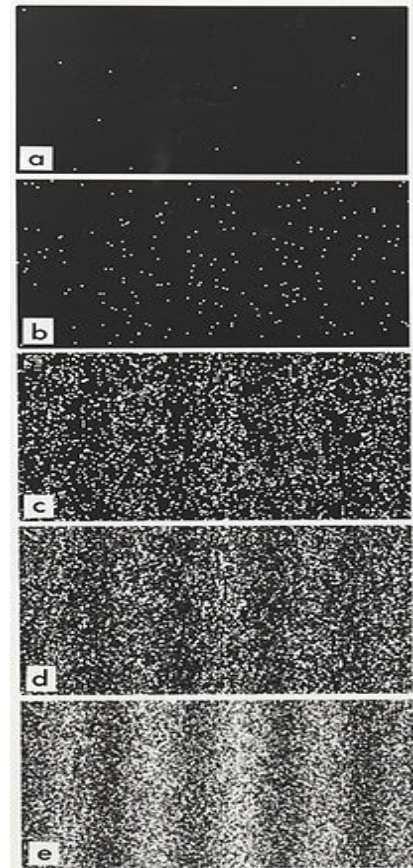
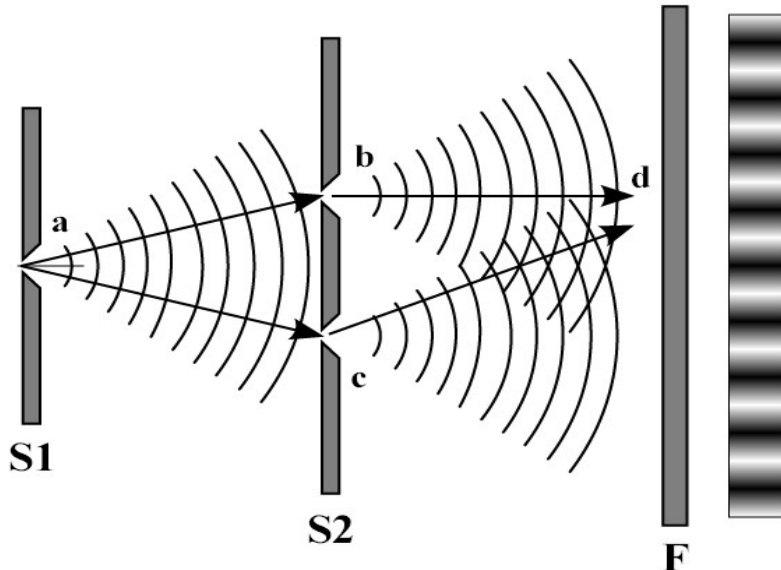
波的干涉

光的量子理論：量子光學

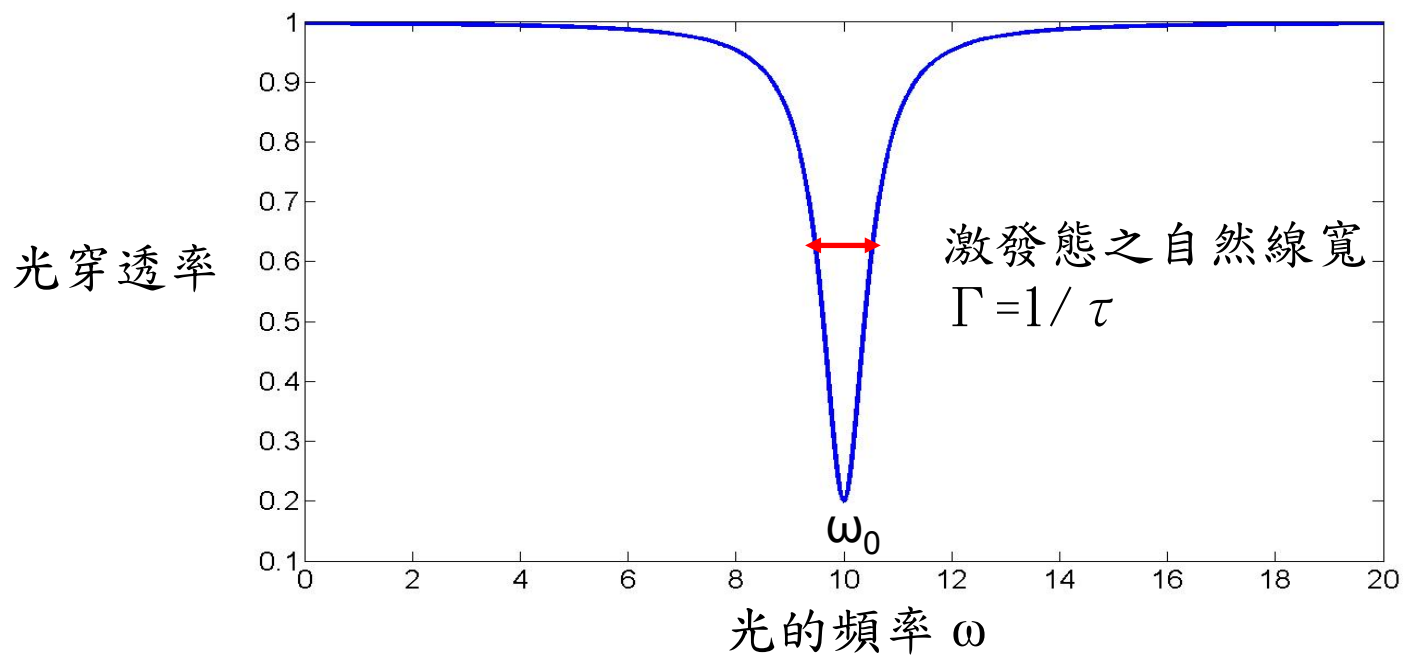
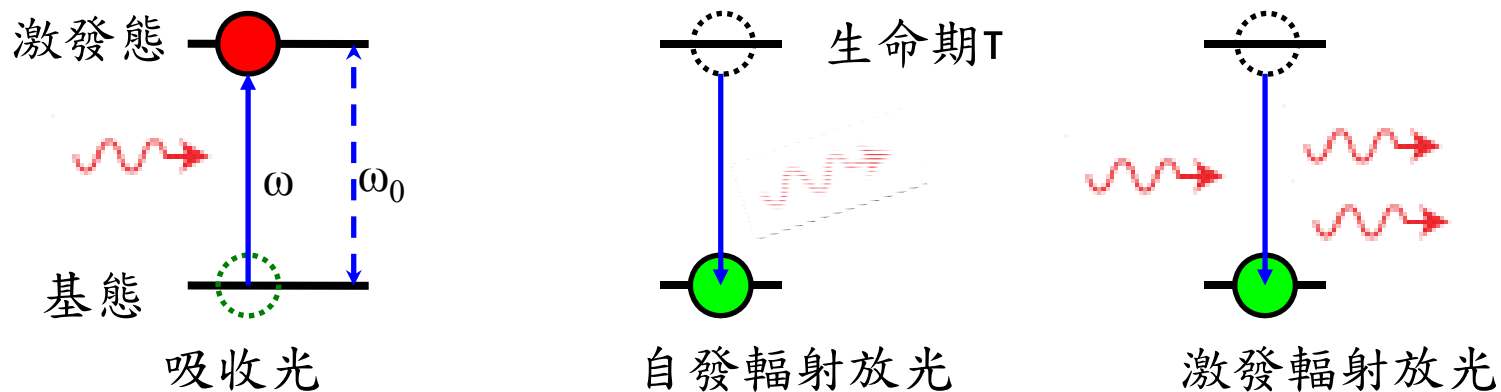
- 它是一種粒子--最早是因光電效應由愛因斯坦提出的概念
 - 它擁有明確的動量($p=h/\lambda$)、能量($E=h\nu$)、與角動量($h/2\pi$)!
 - 不管在時間或空間中量到它時都可感受到十足的“顆粒性”
- 電磁場的量子化理論—光子是電磁場的一種激發粒子
- 但是它又反應出波動性
- Loudon "Quantum theory of light":

We all know what light is but it is difficult to tell what it is.

我們都知道光是什麼，但很難說清楚它到底是什麼

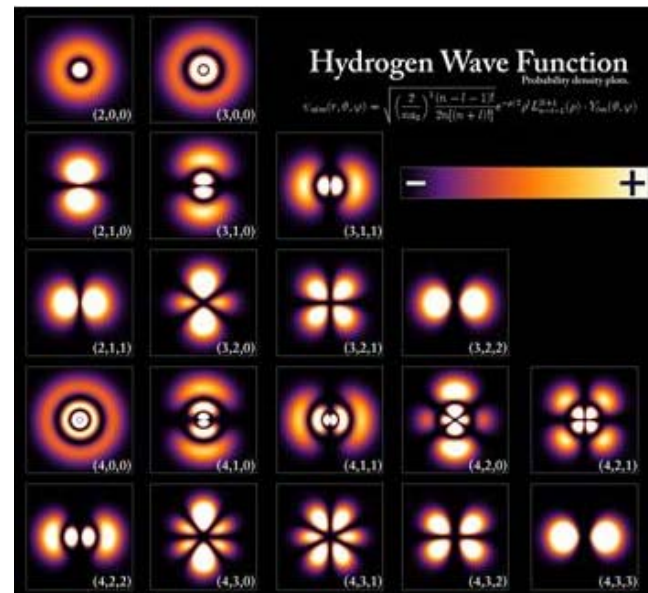
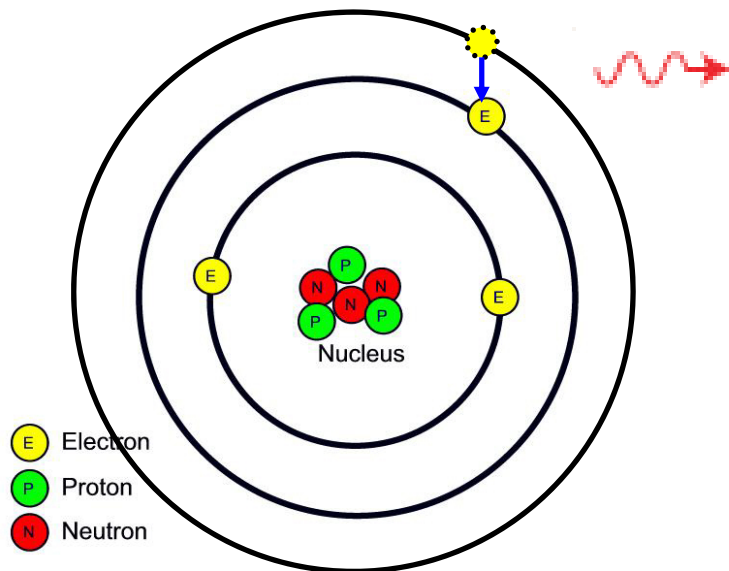


光與原子的交互作用



原子的結構

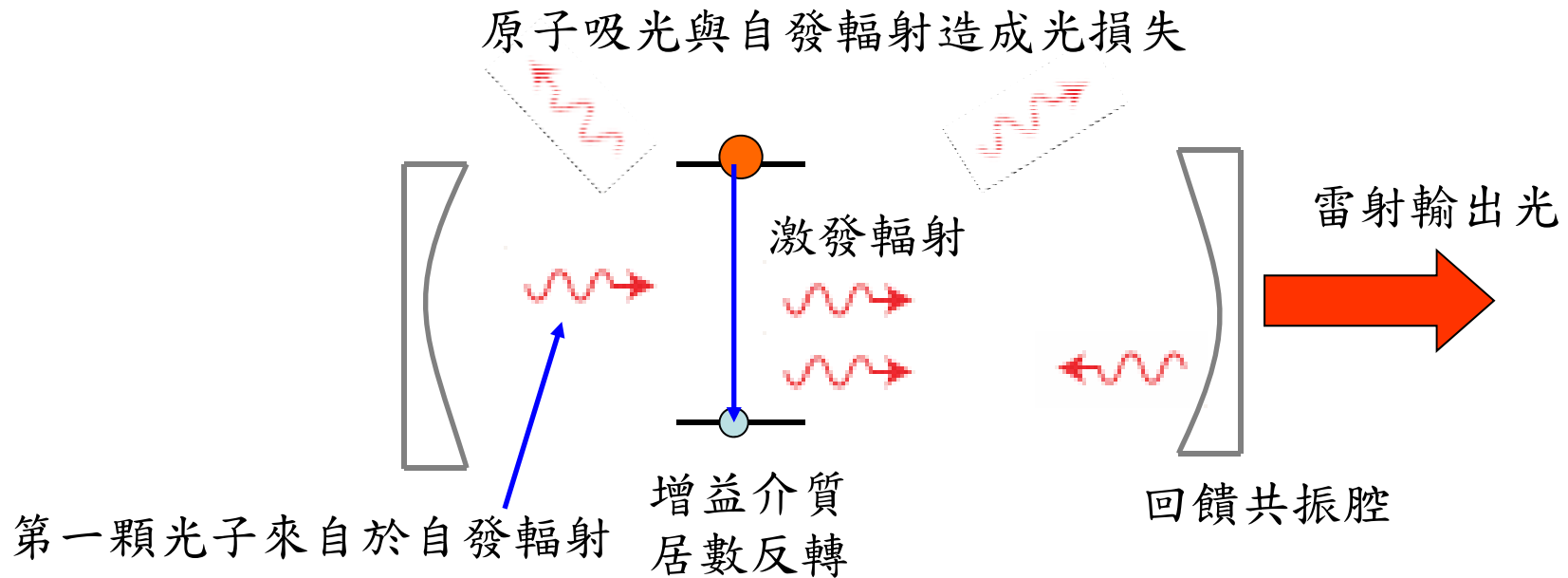
- 原子由帶正電質量較重的原子核(內含質子與中子)與帶負電的電子藉由電磁力結合成一中性的粒子。
- 電子的能階呈量子化，即只有特定的狀態允許存在，電子的分佈並不是一特定軌道，而是呈一定雲狀機率分佈，稱之為波函數。
- 電子由較高能階態(激發態)至較低能階態會放出光，反之會吸收光。



氫原子的電子波函數 <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/wp-content/uploads/2010/06>

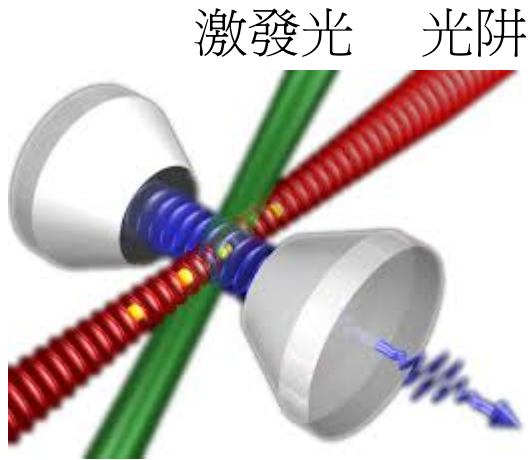
雷射光

- LASER, **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- 雷射和一般光源的最大差別在於其單頻性（同調性）

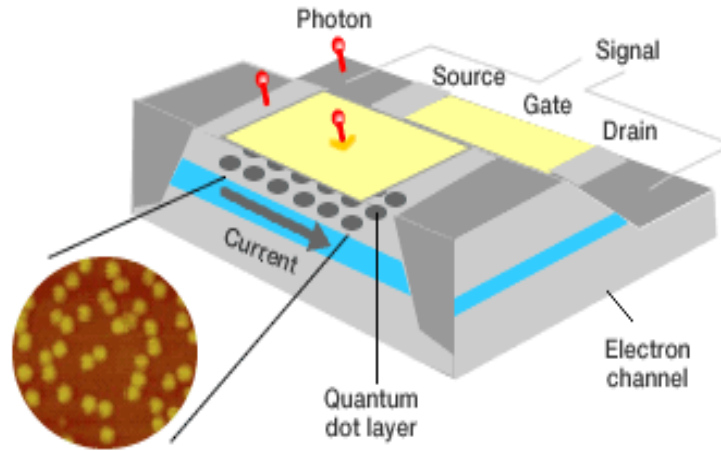


單光子源

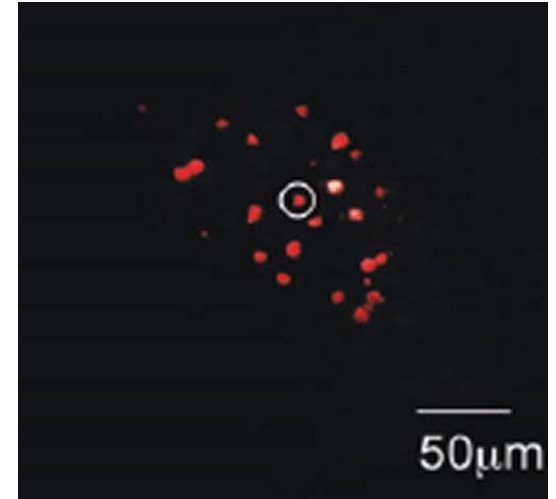
- 一個基本單一的輻射源(如單原子)就是一單光子源!



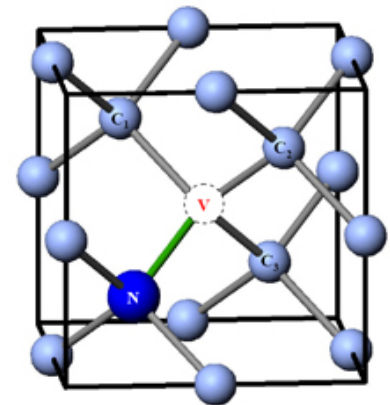
被陷阱捕捉的單一原子
(或離子)



量子點

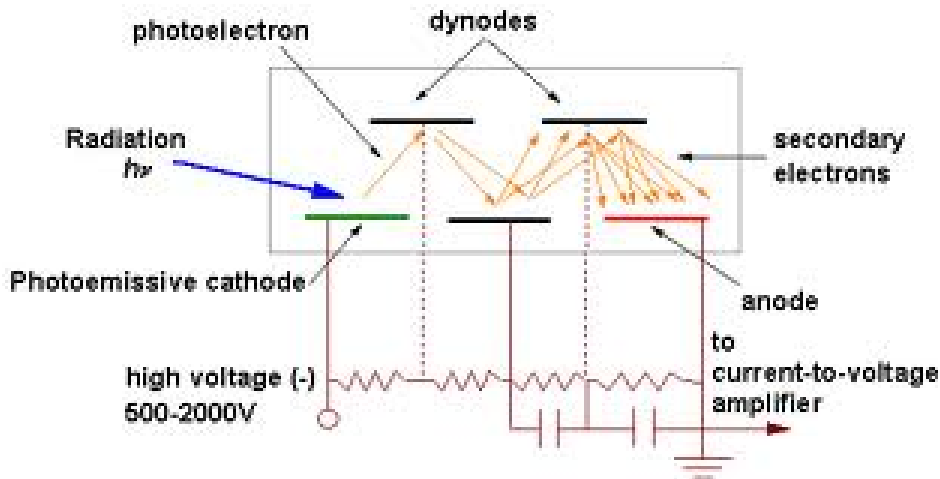


奈米鑽石:氮空缺中心



單光子量測

光電倍增管



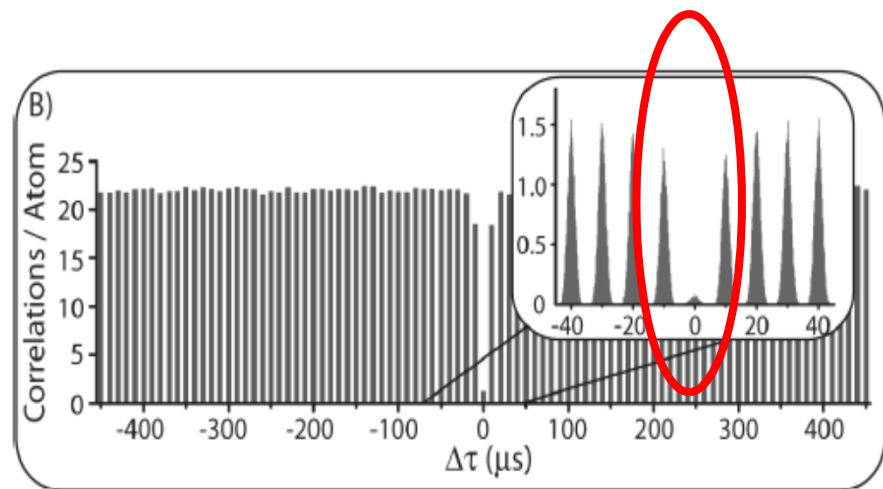
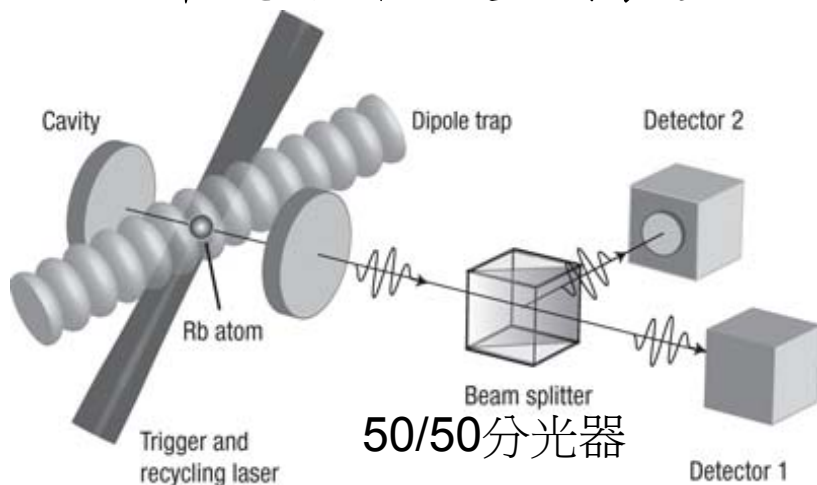
二階關聯函數 $g^2(\tau)$

$$g^2(\tau) = \frac{\langle E^*(t)E^*(t+\tau)E(t+\tau)E(t) \rangle}{\langle E^*(t)E(t) \rangle \langle E^*(t+\tau)E(t+\tau) \rangle}$$

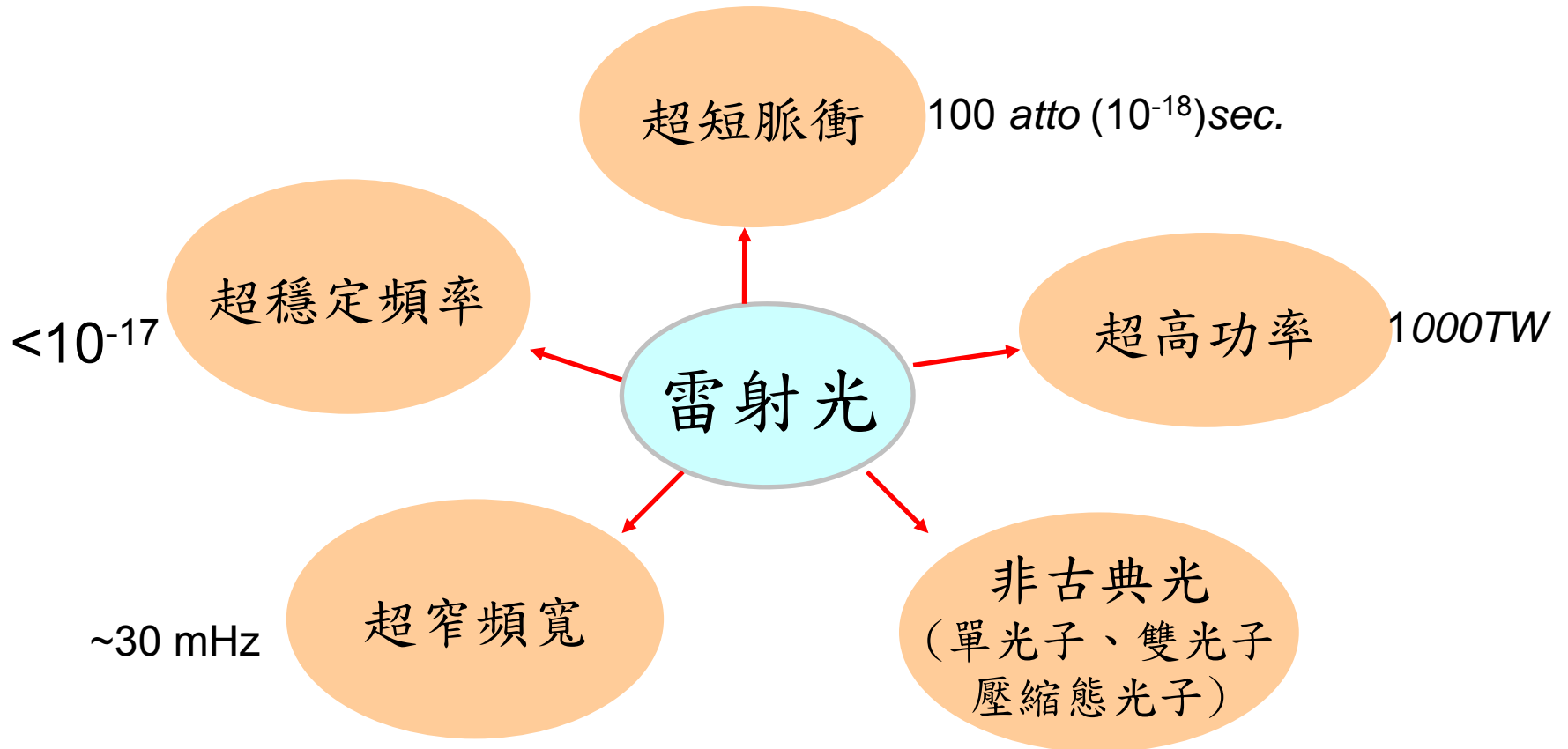
$$= \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$$

$g^2(0) = 0$, for single photon source

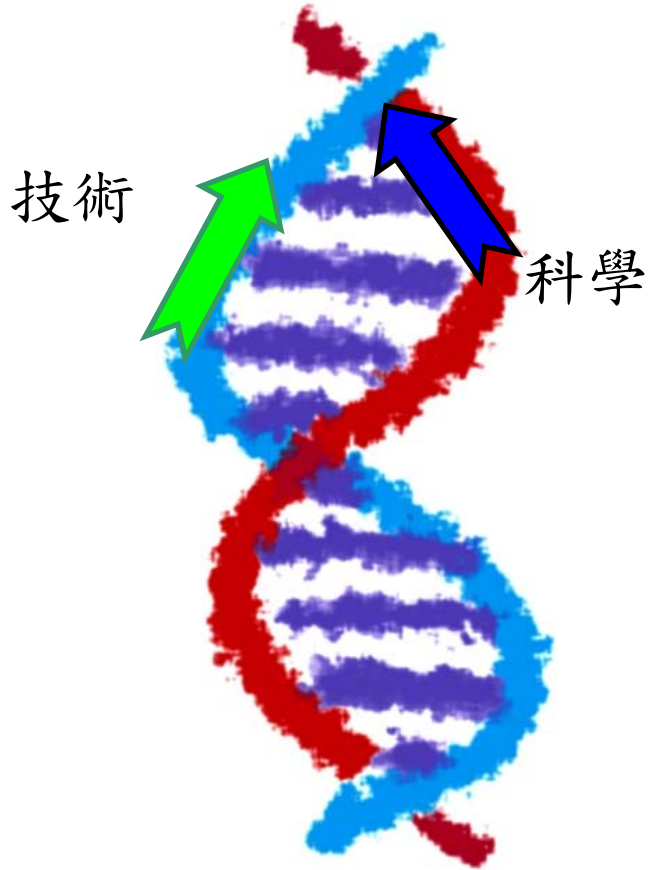
單光子確認量測裝置



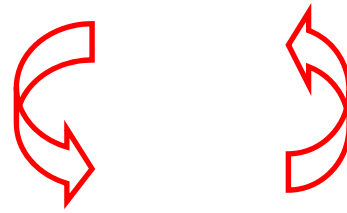
光子的操控技術



科學與技術的雙螺旋



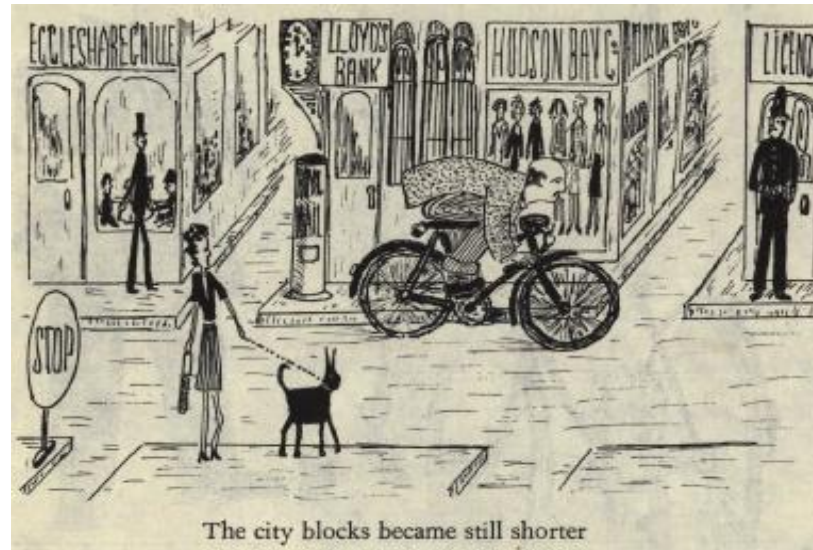
對科學的更加瞭解幫助技術的發展



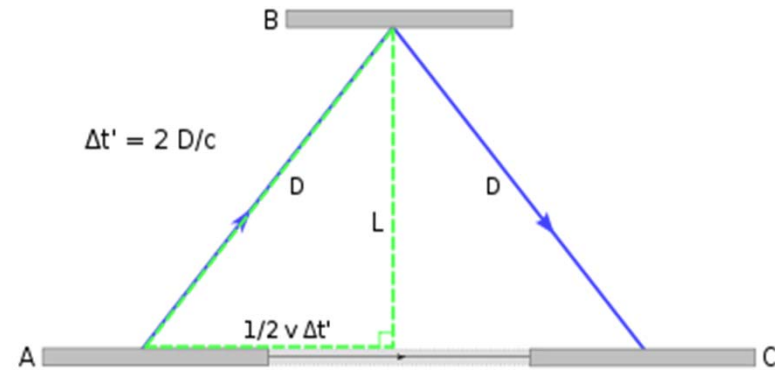
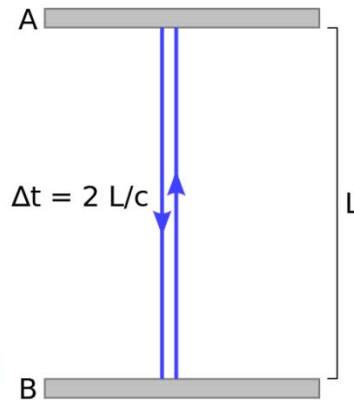
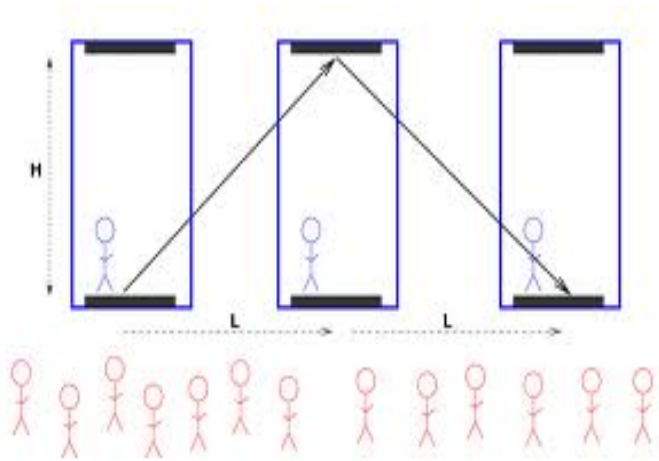
技術的發展幫助科學的進展

光速不變原理

- 愛因斯坦狹義相對論基礎：**光速不變性原理**-在所有慣性（等速）座標系，真空中光速均相同($C=299792458\text{m/s}$).
 - 物體（相對於觀察者）在相對於運動方向的長度會縮短.
 - 時間相對於觀察者運動的座標中，會經歷的較慢.
 - 不同地點，絕對同時的觀念不再存在.
 - 真空中的光速是物體速度的上限.
- Gorge Gamow “湯普金夢遊記”：**如果速度的極限--光速只有 10 m/s ?**



時間延長 (Time dilation) 效應



$$\text{MovingFrame} : \Delta t = \frac{2L}{c}$$

$$\text{LabFrame} : \Delta t' = \frac{2D}{c} = \frac{2\sqrt{\left(\frac{1}{2}v\Delta t'\right)^2 + L^2}}{c} \Rightarrow \Delta t' = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

波的相速度

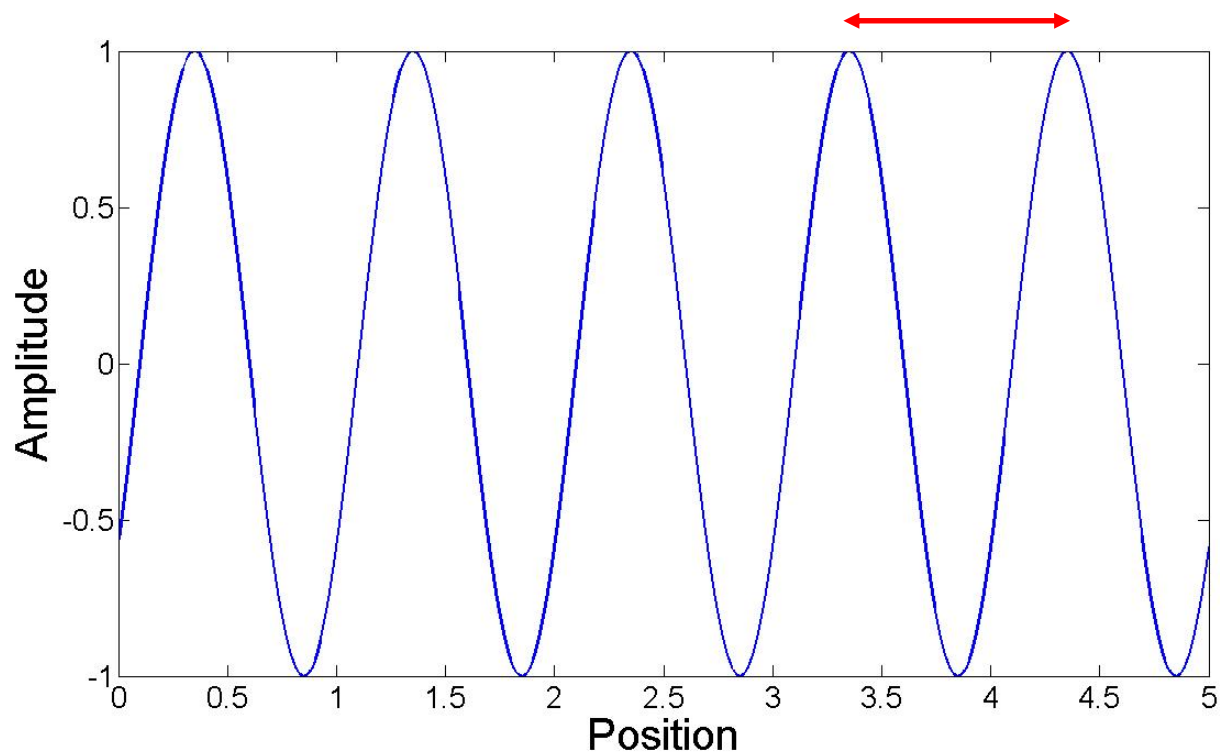
- 相速度: 一個行進的正弦波之波前的移動速度

$$E(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \varphi_0)$$

$$\varphi(x, t) = kx - \omega t + \varphi_0 = \text{const} \Rightarrow k \frac{dx}{dt} - \omega = 0$$

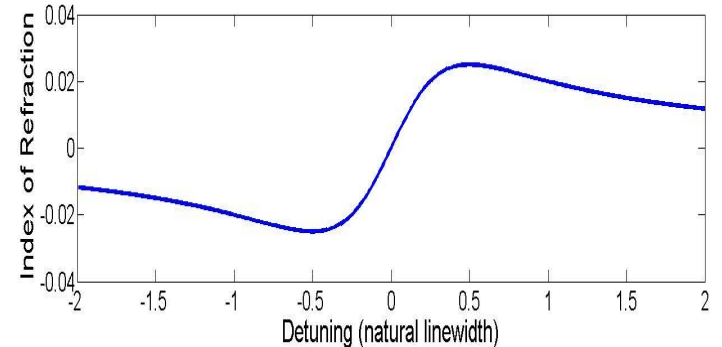
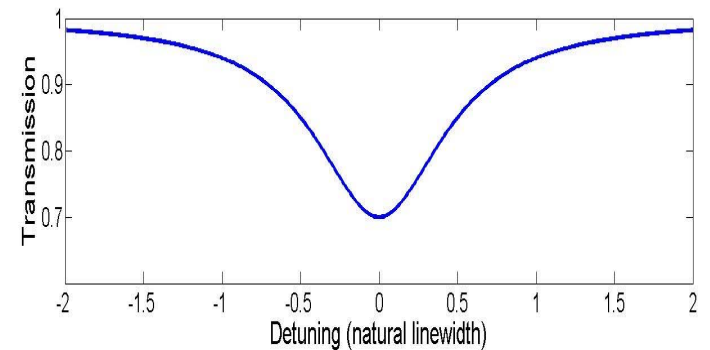
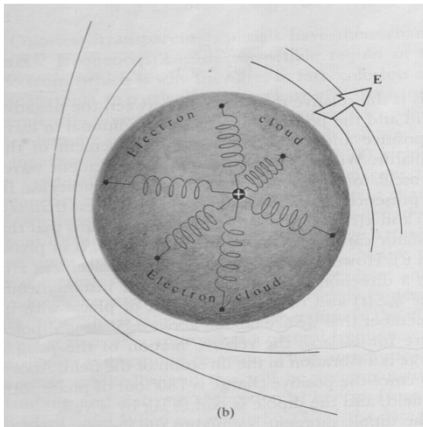
$$V_{\text{phase}} = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}$$

波長 $\lambda = 2\pi/k$



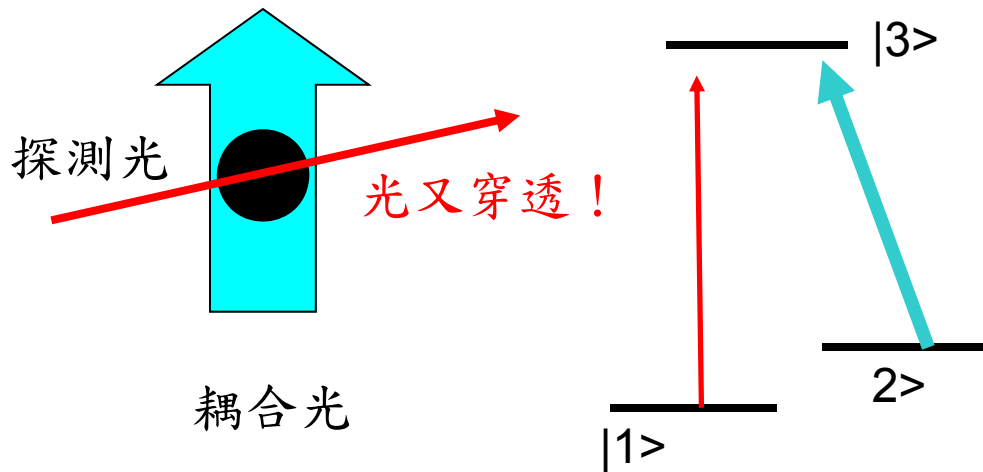
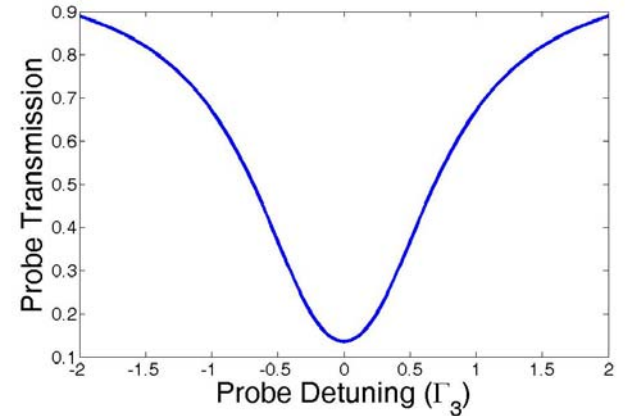
介質的色散關係

- 在電磁場作用下，物質內原子的電子雲會振盪變形，產生新的電磁場和原入射場疊加，總電磁場和真空中的電磁場行進之相速度不同(c/n , n 是折射率).
- 由於電子的慣性(質量)，電子雲的反應和入射場有一相位差，並且決定於入射場的頻率，故相速度決定於頻率，此即色散關係 $\omega(k)$.

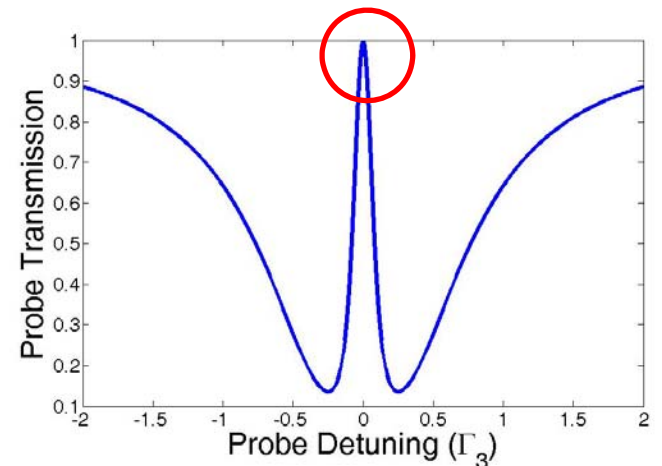


電磁導致透明效應

(EIT, electromagnetically induced transparency)

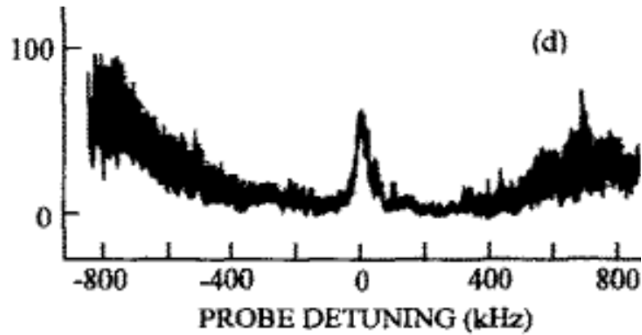


吸收最強變穿透

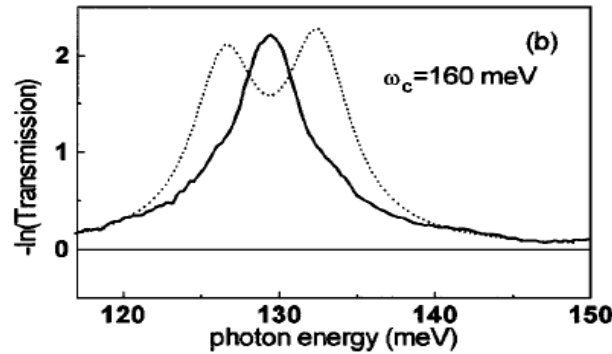


探測光頻率

其它物理系统的EIT



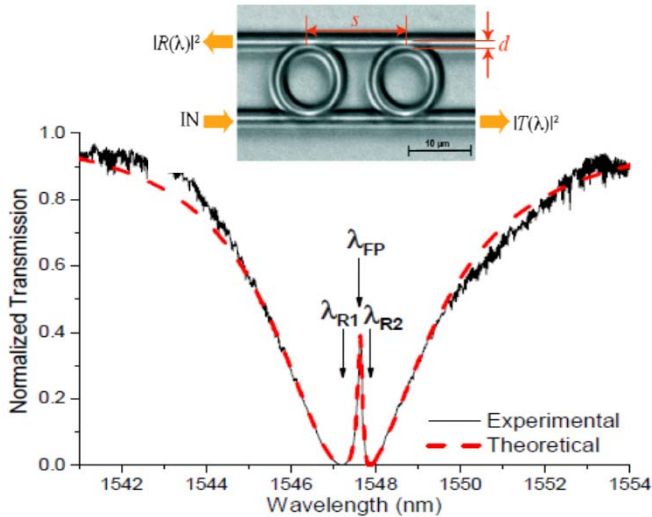
$\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal
(Opt. Comm. 144,227, 1997)



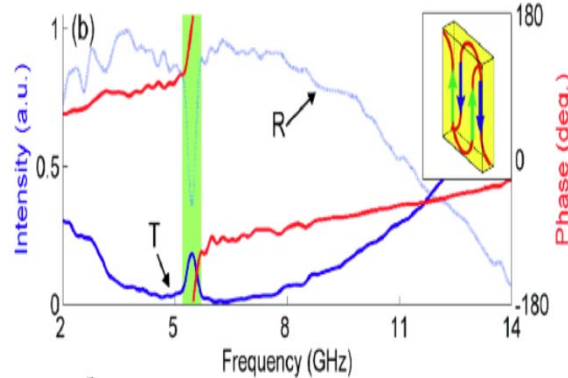
InGaAs Quantum well
(PRL, 84, 1019, 2000)



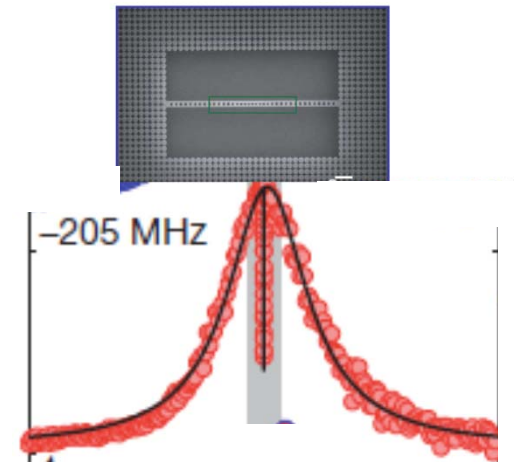
Diamond Nitrogen vacancy Center
(PRA, 60, 2540, 1999)



Silicon optical resonator
(PRL 96, 123901, 2006)



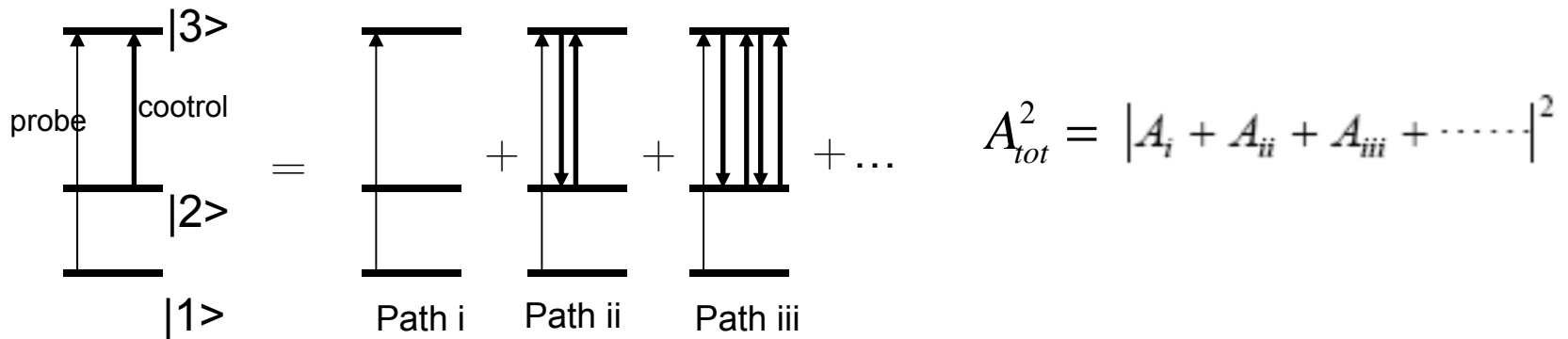
Microwave Meta-material
(PRL 101, 253903, 2008)



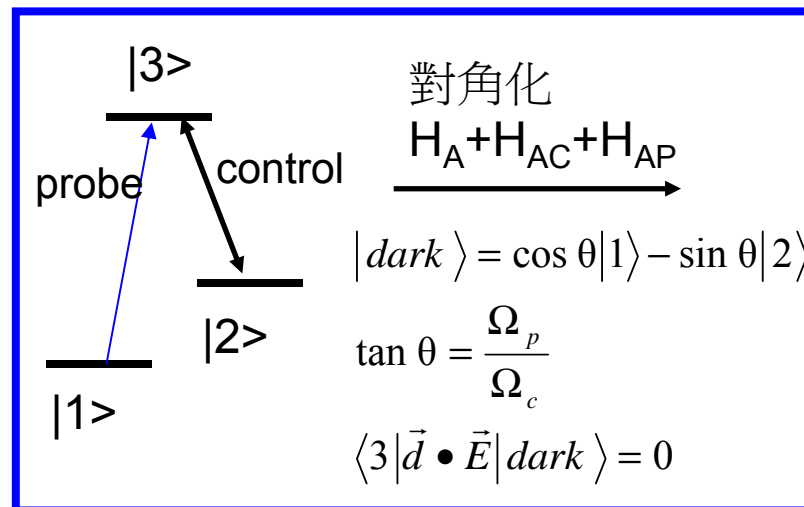
Opto-mechanical system
(Nature 472, 69, 2011)

電磁誘發透明效應之物理解釋

- 不同多光子躍遷機率幅之破壞性量子干涉

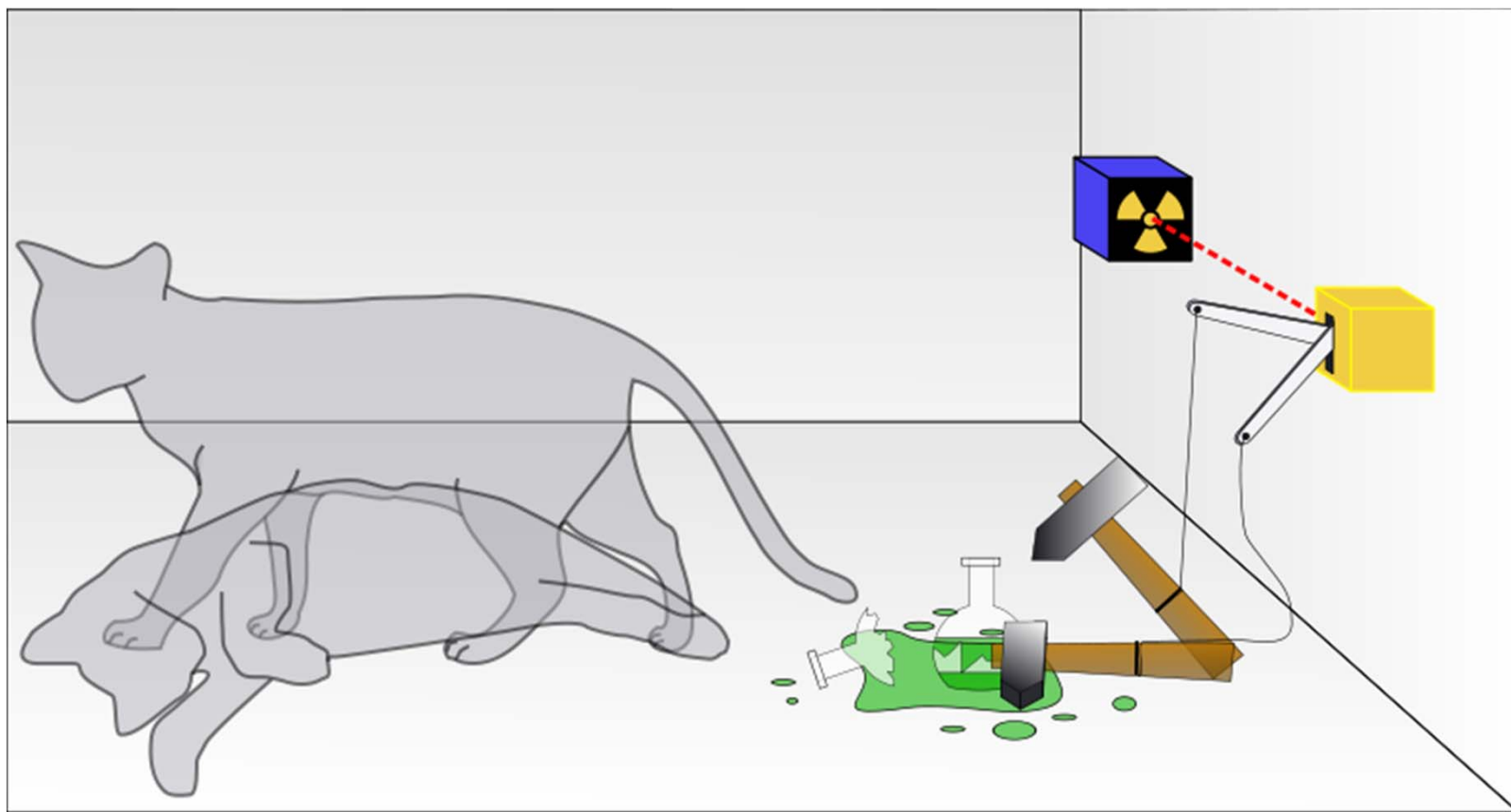


- 另一解釋:原子形成兩個基態的線性疊加態並且不和光作用(暗態)



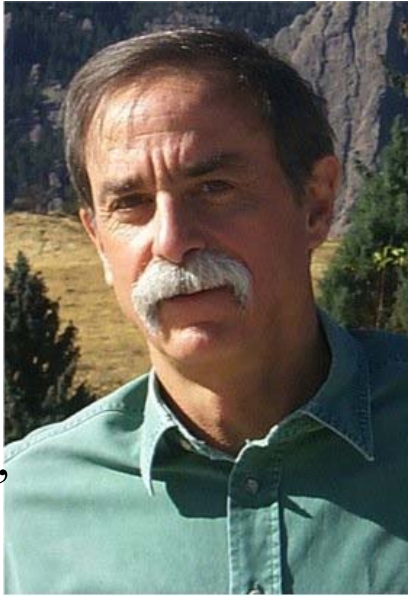
線性疊加態：量子世界奇幻之處

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{生}\rangle - |\text{死}\rangle) \Rightarrow P_{\text{生}} = |\langle\text{生}|\Psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} = P_{\text{死}} = |\langle\text{死}|\Psi\rangle|^2$$



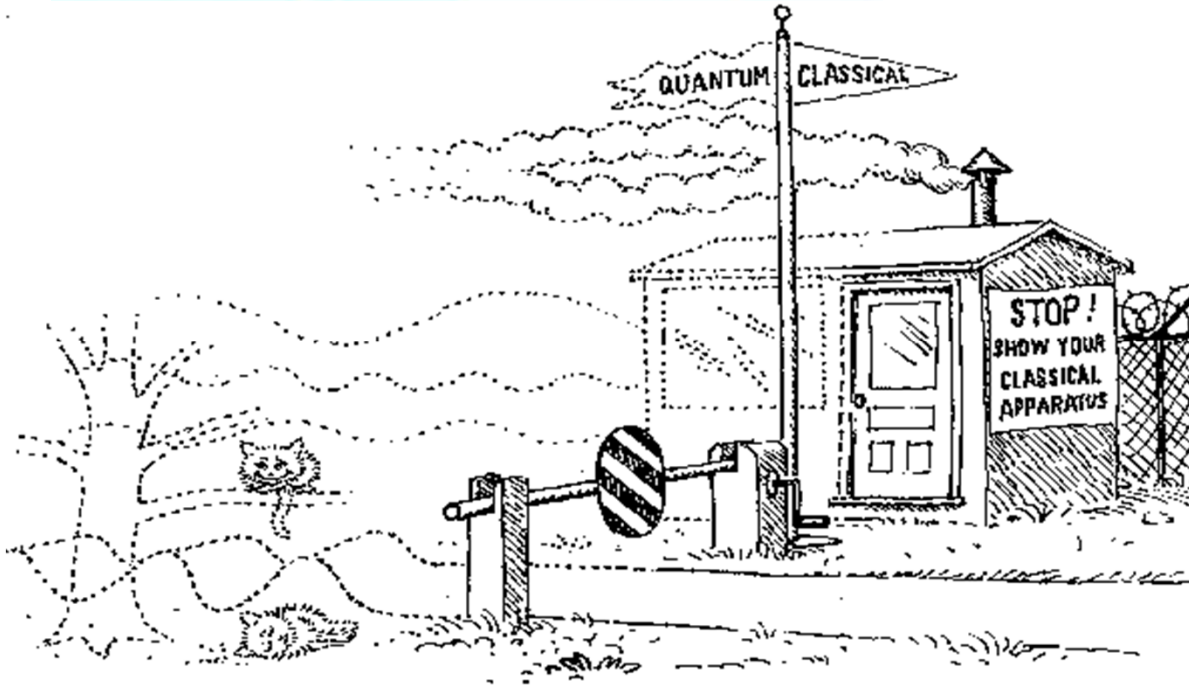
2012 諾貝爾物理獎得主, 原子與光子的量子物理

Left:
David J.
Wineland
NIST, USA



" for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

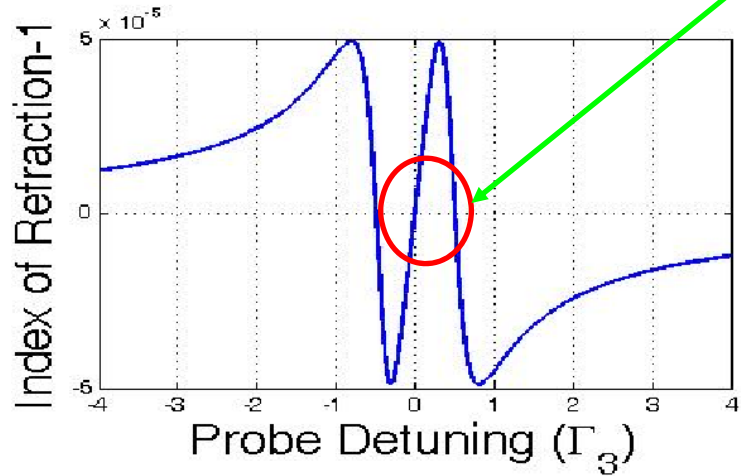
Right:
Serge Haroche,
CNRS, France



慢光

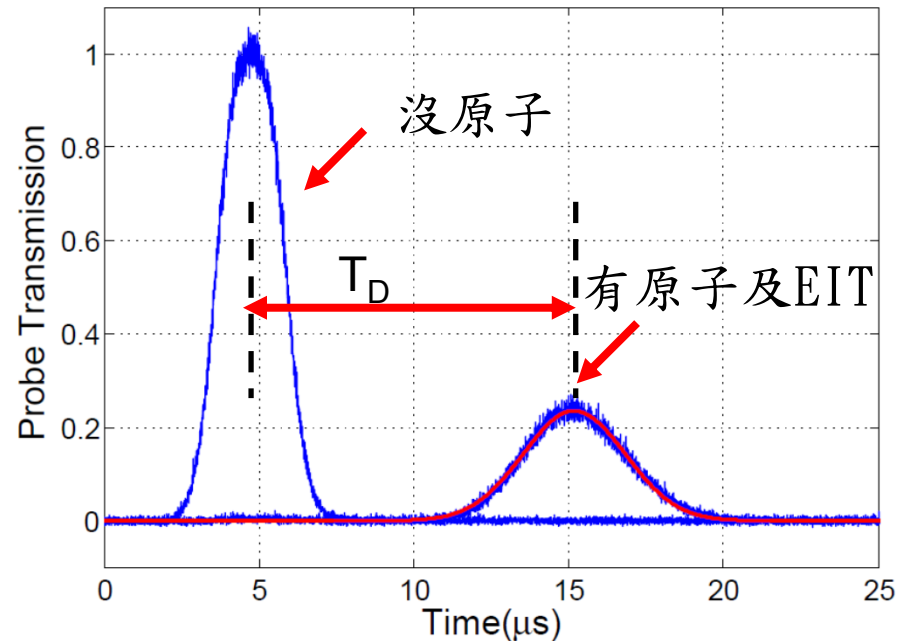
$$\omega_p(k_p) = ck_p / n(\omega_p)$$

$$v_g = \left. \frac{d\omega_p}{dk_p} \right|_{\delta_p=0} = \frac{1}{\left. \frac{dk_p}{d\omega_p} \right|_{\delta_p=0}} = \frac{c}{n + \omega_p (dn/d\omega_p) \big|_{\delta_p=0}}$$



原子團長 $\sim 1\text{cm}$, 光延遲 $\sim 10\ \mu\text{s}$
 \rightarrow 光群速度 = $1000\ \text{m/s}$

Lene Hau, 17cm/s , 1997



光脈衝的群速度

- 傅利葉分析：訊號可從時域或頻域上看，任何一個時域波形可分解成很多單頻正弦波的疊加。(看演示軟體:Fourier Analyzer!)

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi i t \nu} dt \Leftrightarrow f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu)e^{2\pi i t \nu} d\nu$$

$$G(k) \Leftrightarrow g(x) \dots$$

- 一個空間中傳播的電磁脈衝(看Matlab 模擬程式)

$$A(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, t=0)e^{-ikx} dx; E(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(k)e^{i[kx - \omega(k)t]} dk$$

色散關係

$$\omega(k) = \omega(k_0) + \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k=k_0} (k - k_0) + \dots$$

$$E(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(k)e^{ik[x - \frac{d\omega}{dk}|_0 t]} e^{i(k_0 \frac{d\omega}{dk}|_0 - \omega_0)t} dk \propto E(x - \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_0 t, 0)$$

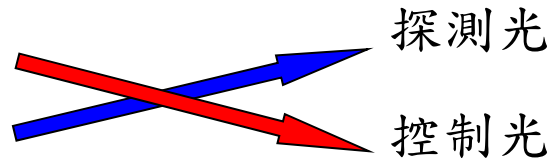
$$\Rightarrow V_g = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_0$$

Note

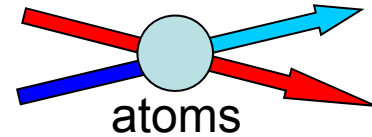
- 光在真空中，群速度也是光速 c !

$$\omega = ck \Rightarrow \frac{d\omega}{dk} = c$$

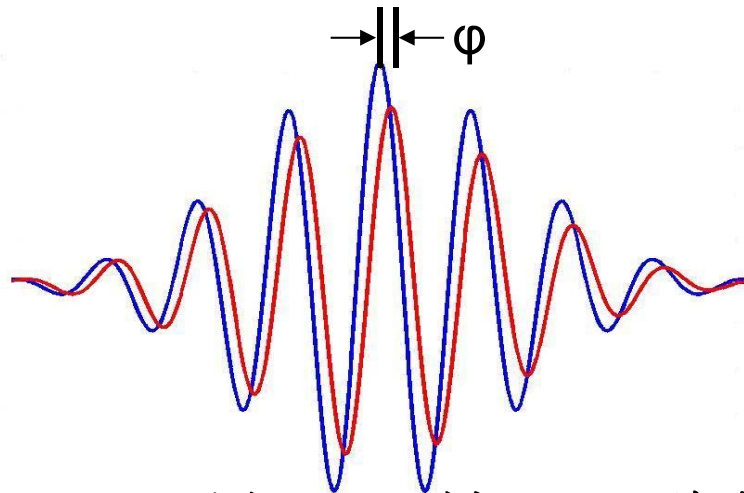
以光控制光的相位



真空中光和光無交互作用！



光和光可透過物質產生交互作用



— 無控制光
— 有控制光

Kerr effect: $n=n_0+n_2I$

交錯相位調制：以一道光控制另一道光之相位

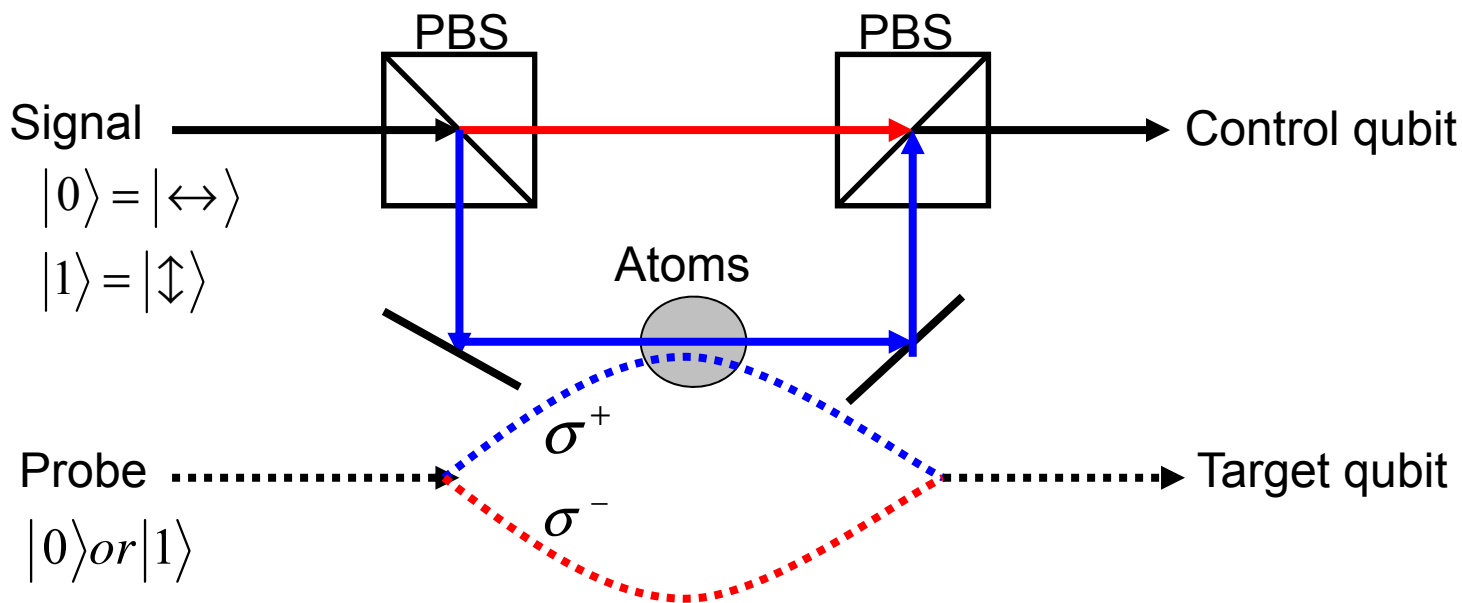
- 非線性光學之一聖杯是達成以一顆光子造成另一顆光子產生相位 π 的變化！
- 有一個聖杯可供追尋其實是一種福氣！

可能的應用

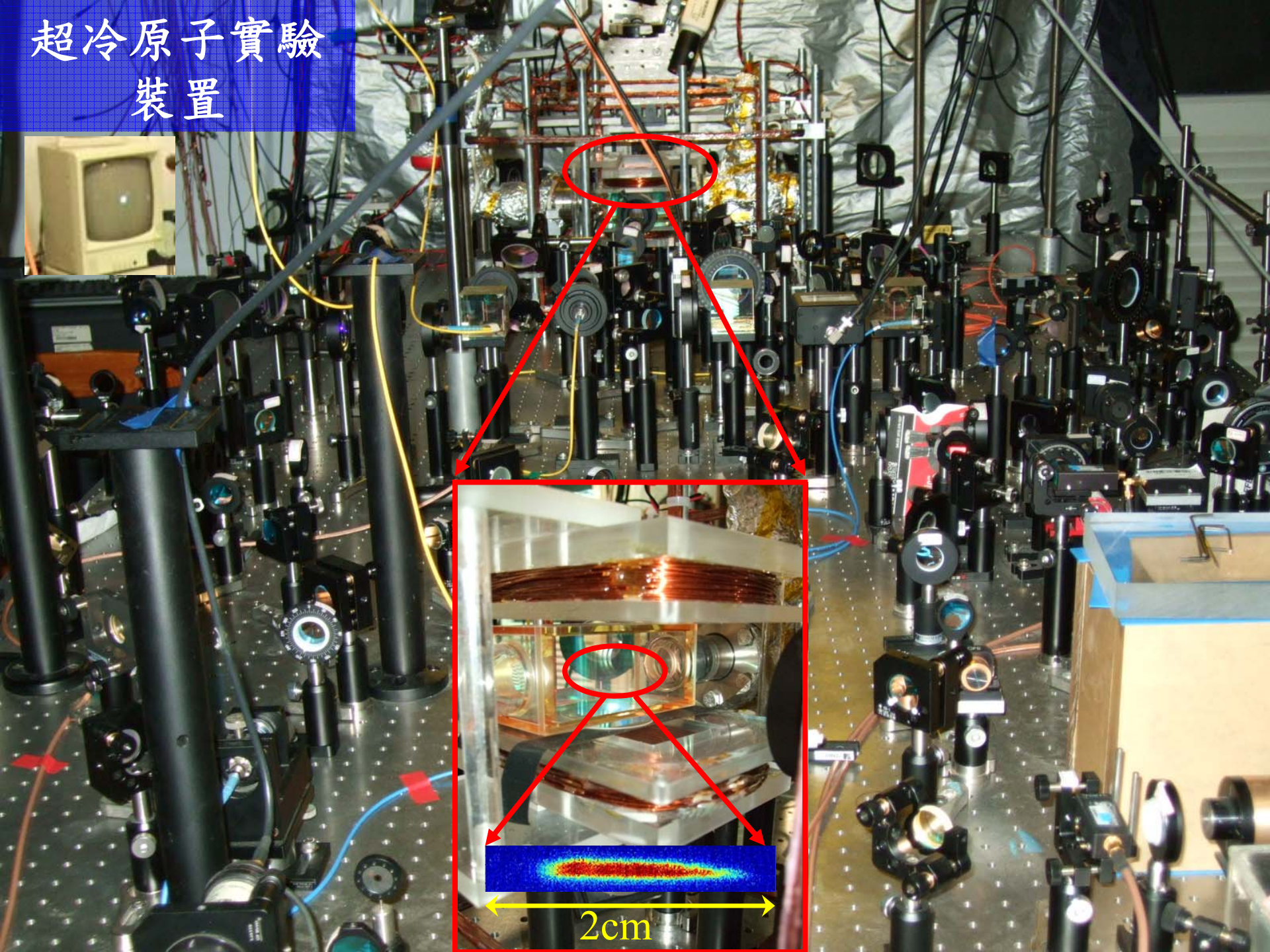
- 實現量子計算所須之量子閘
- 實現非破壞性量測
- 產生糾纏態光子對

Truth table for CNOT gate

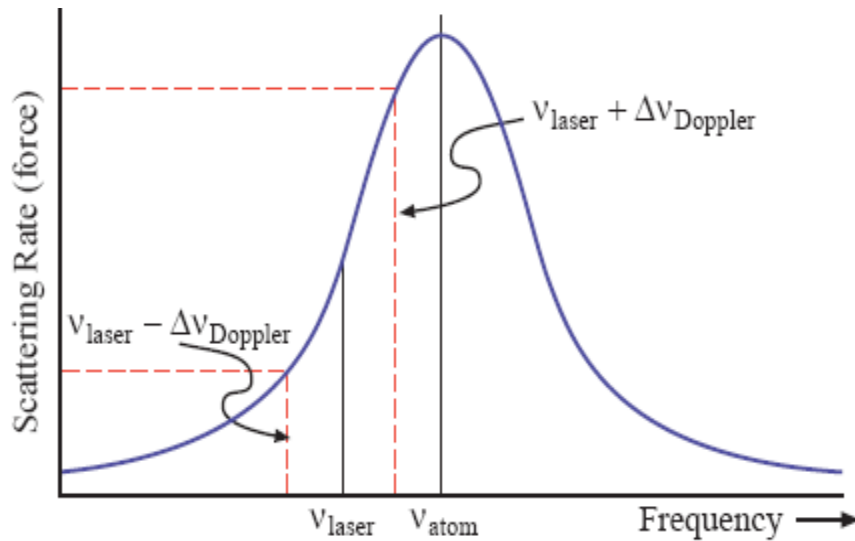
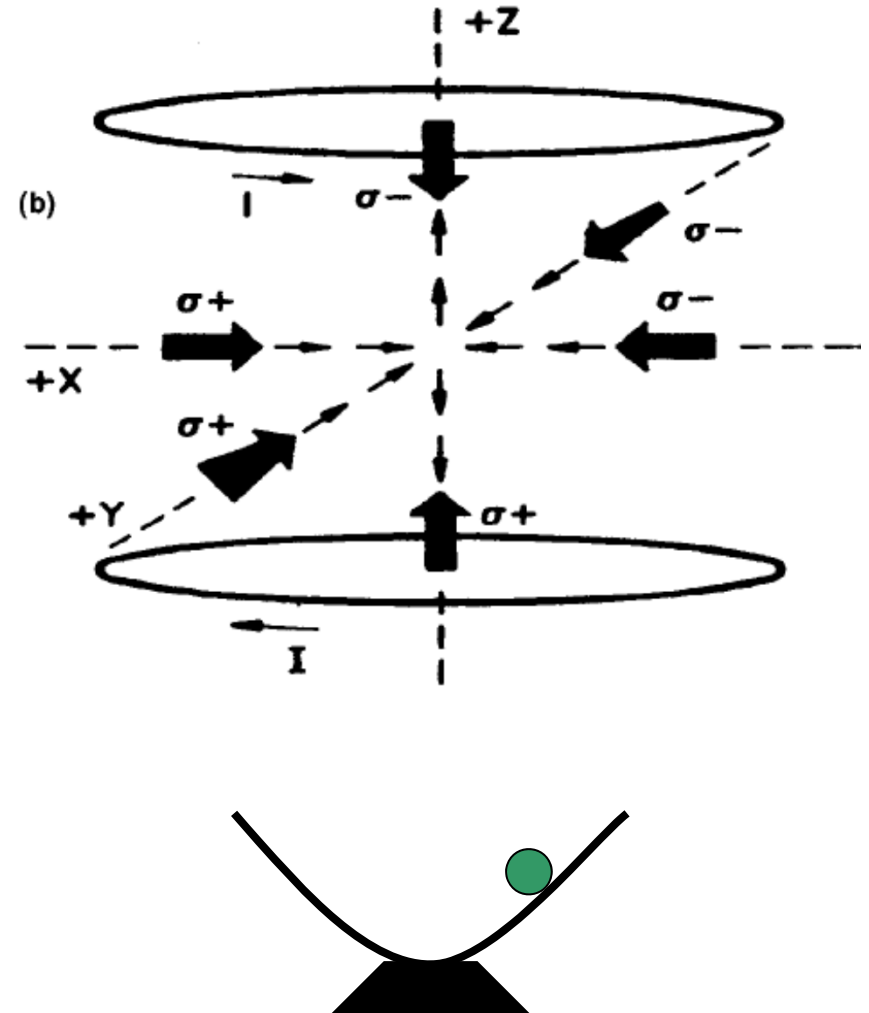
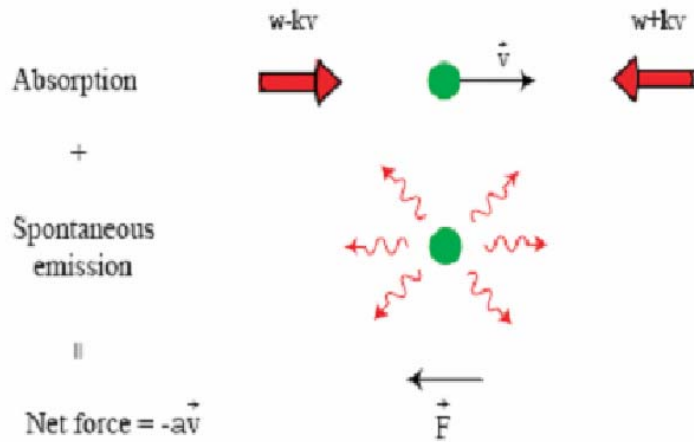
$ 0_C 0_T\rangle$	\rightarrow	$ 0_C 0_T\rangle$
$ 0_C 1_T\rangle$	\rightarrow	$ 0_C 1_T\rangle$
$ 1_C 0_T\rangle$	\rightarrow	$ 1_C 1_T\rangle$
$ 1_C 1_T\rangle$	\rightarrow	$ 1_C 0_T\rangle$



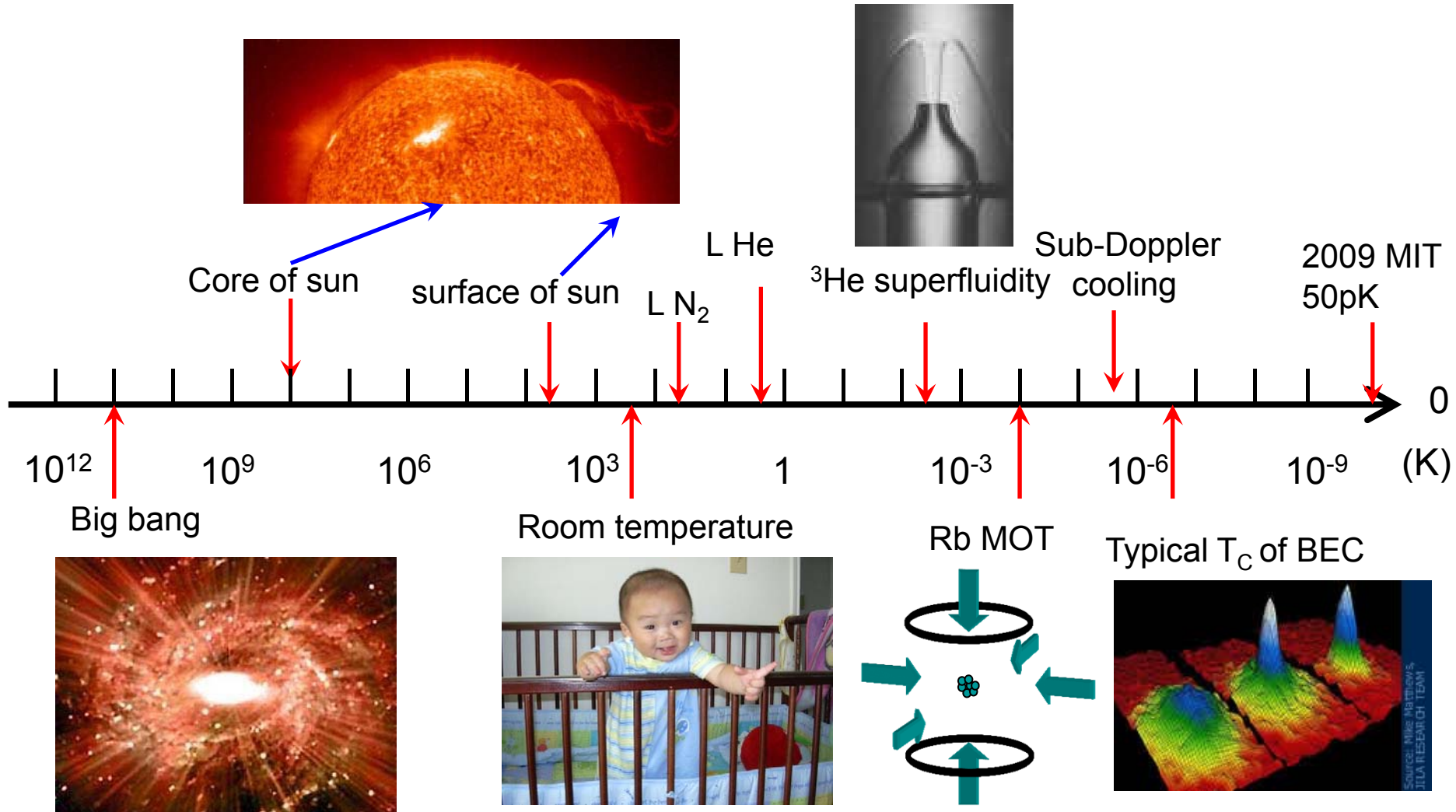
超冷原子實驗 裝置



雷射冷卻與捕捉原子



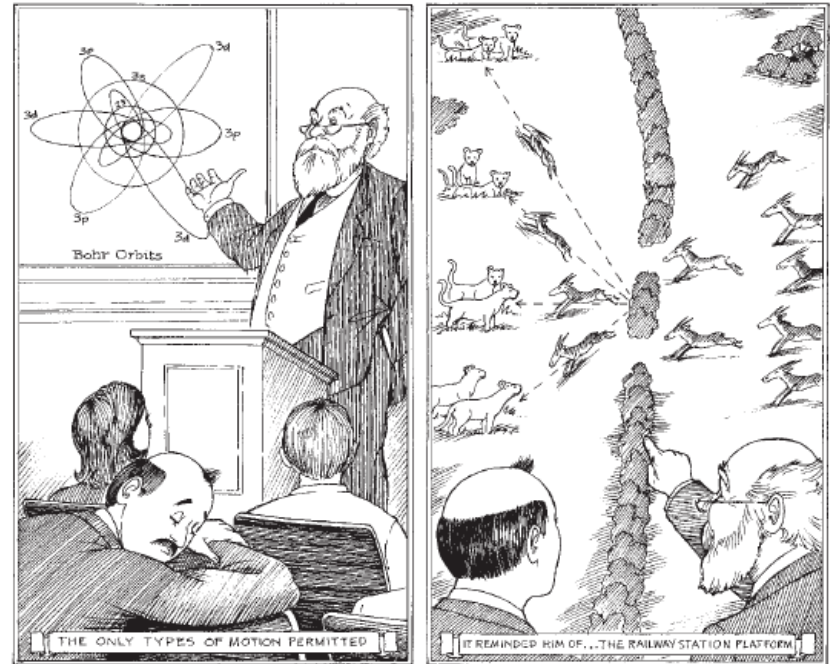
溫度地標



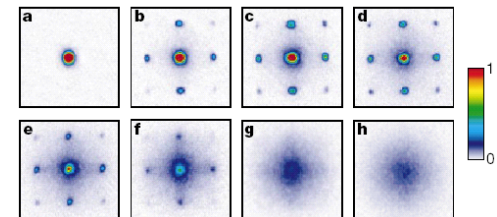
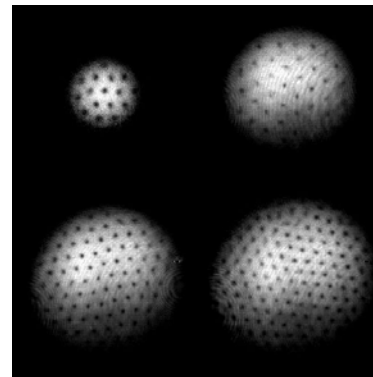
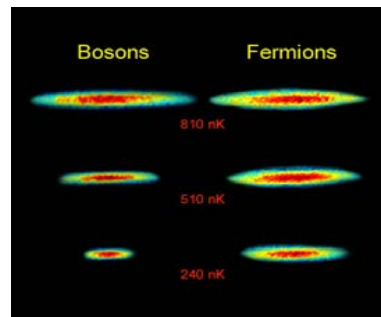
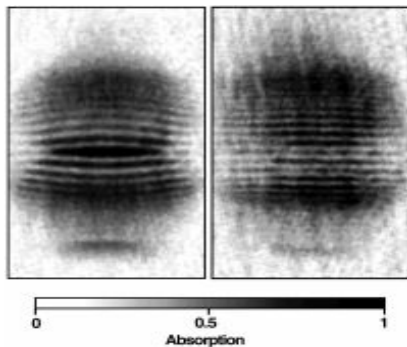
能懂得欣賞某些事物是想去瞭解該事物的一個很好動機！

奇妙的超低溫世界-量子叢林

- 量子力學統治下的奇妙世界
 - 物質的波特性
 - 量子統計
 - 測不準關係、零場能
 - 熱力學第三定律有序態
 - 量子相變

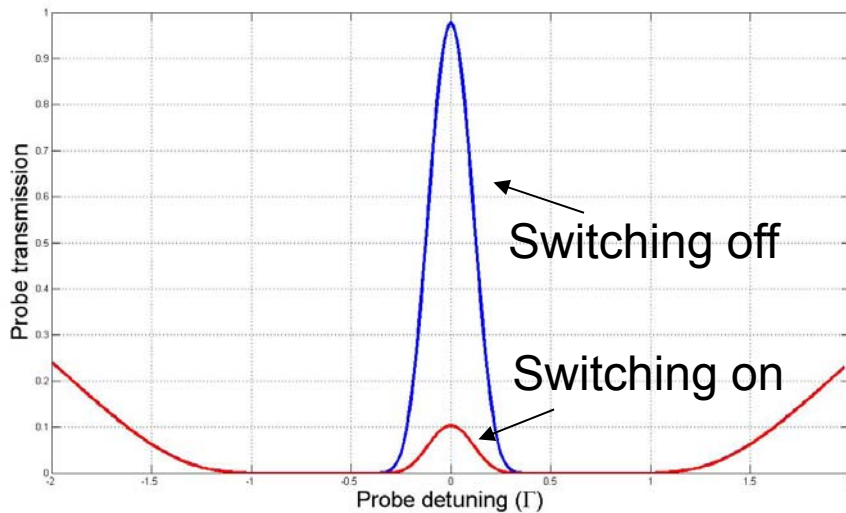
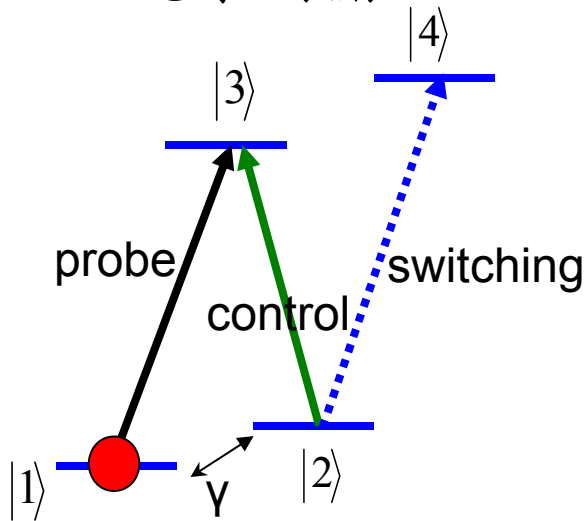


Quantum dreaming: Mr Tompkins' short attention span delivered him to a strange other world.

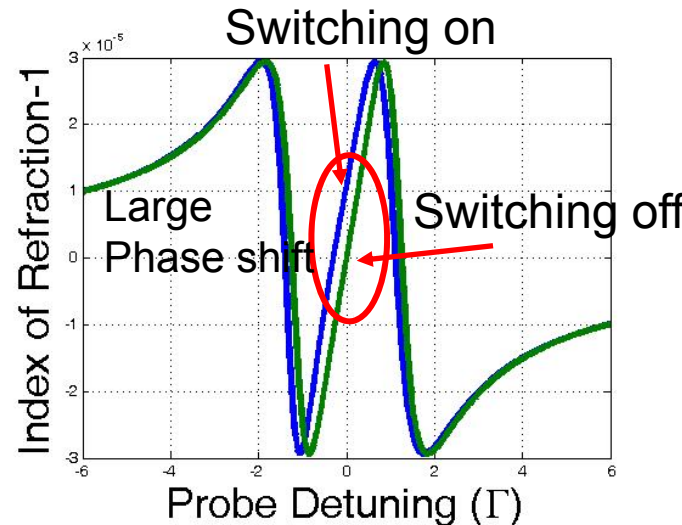
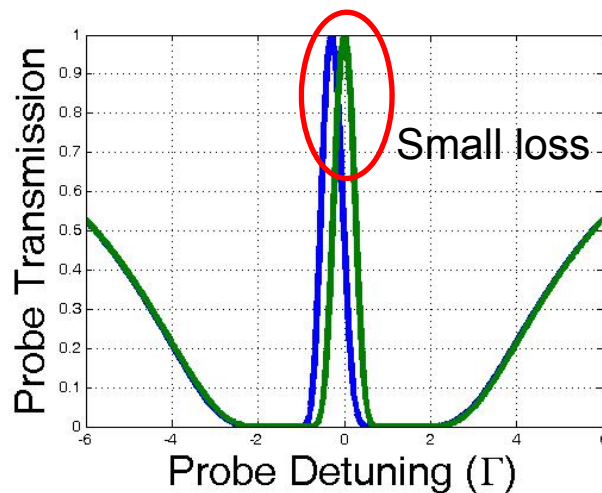
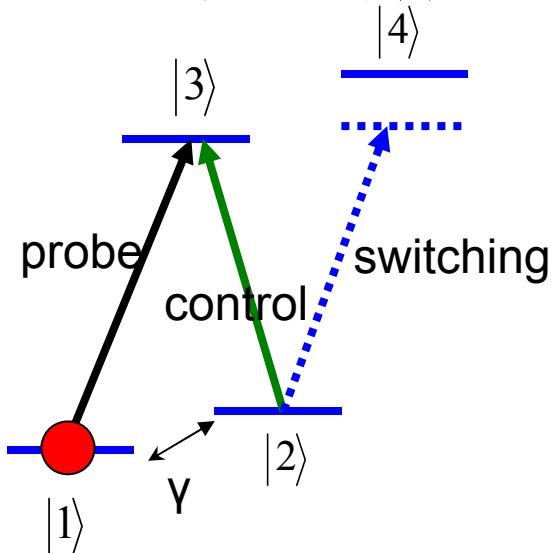


以EIT進行光之強度或相位調制

全光學開關

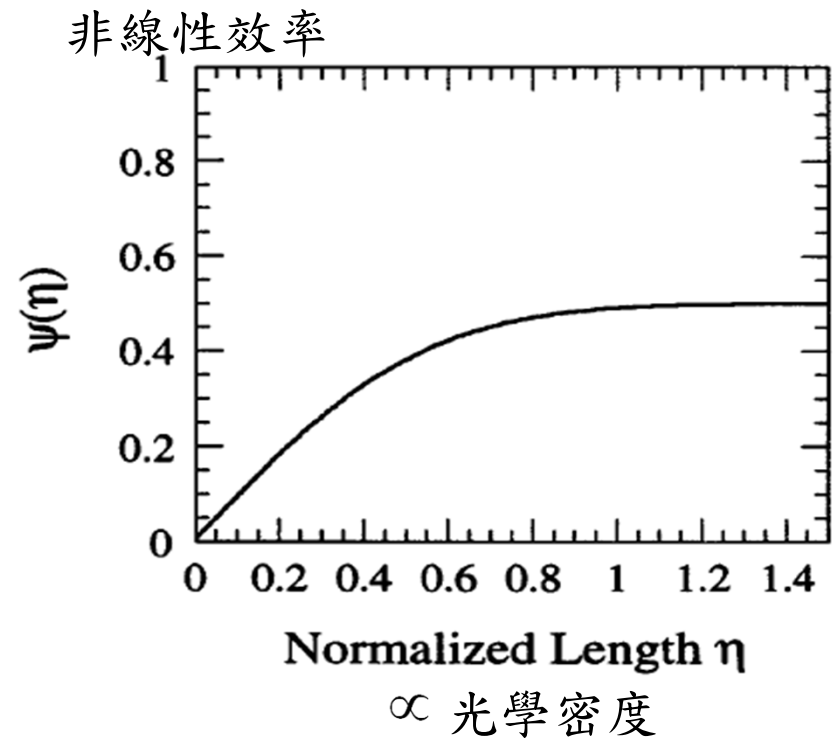
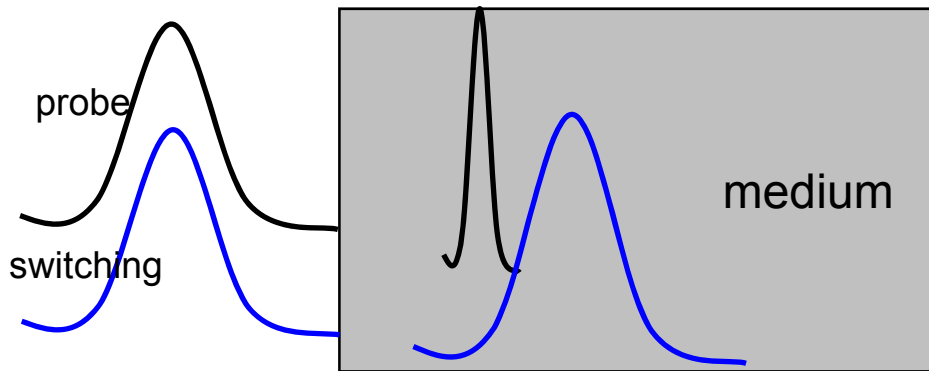


交錯相位調制



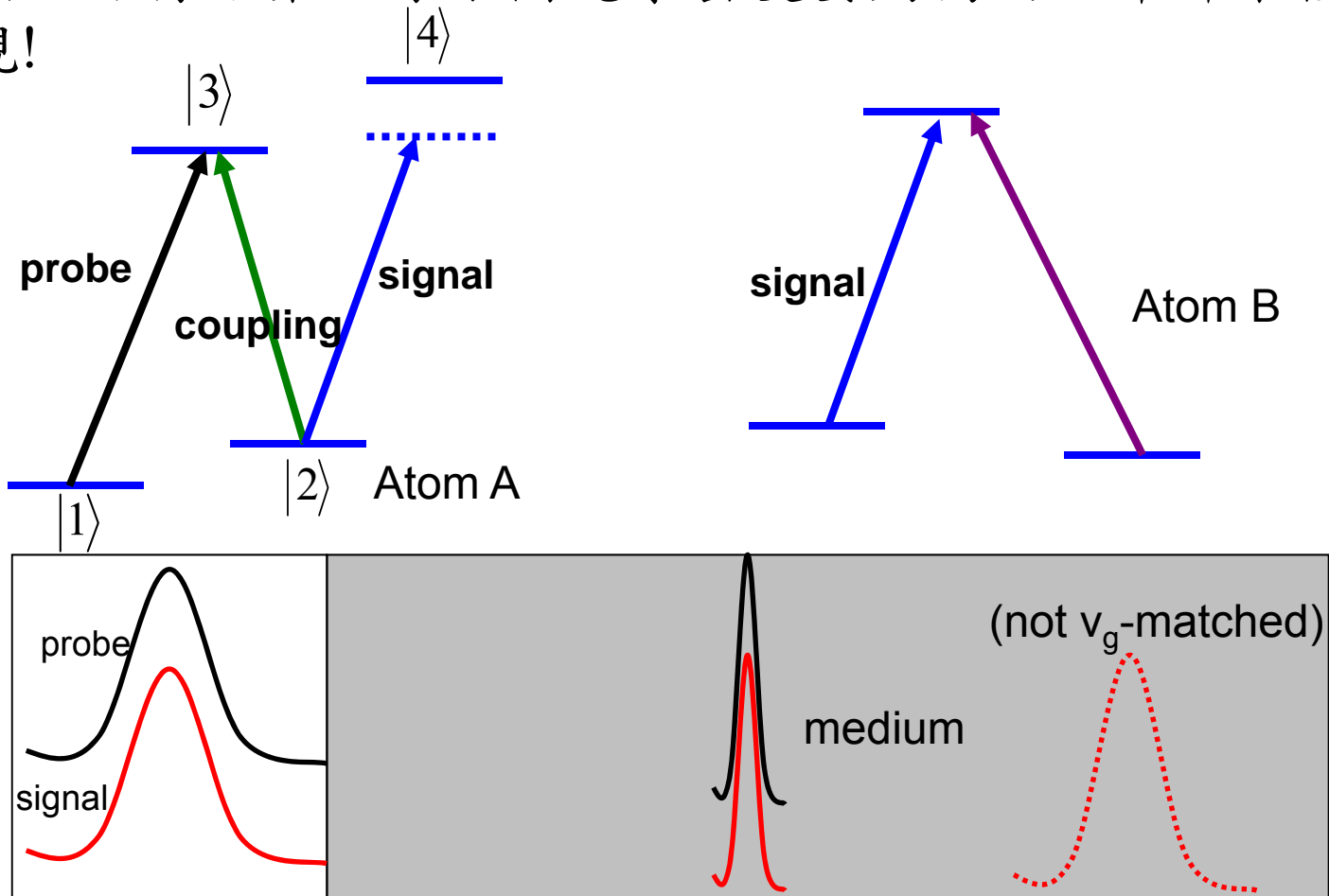
N-形系統的限制

- 探測光是慢光但是開關光不是，受限於交互作用時間，非線性開關效率有一上限！



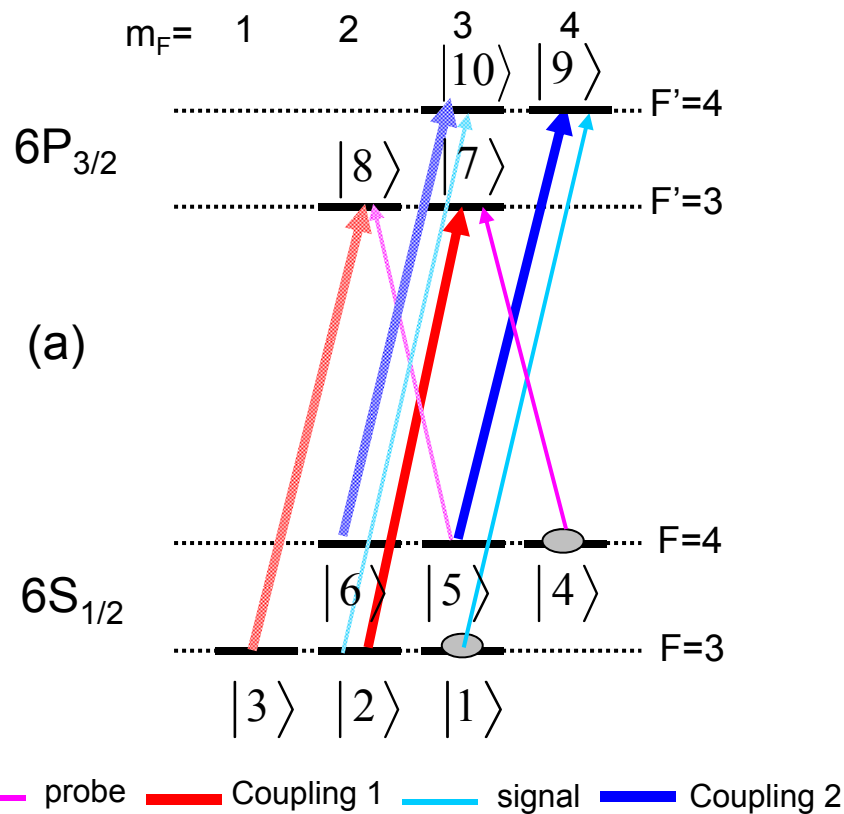
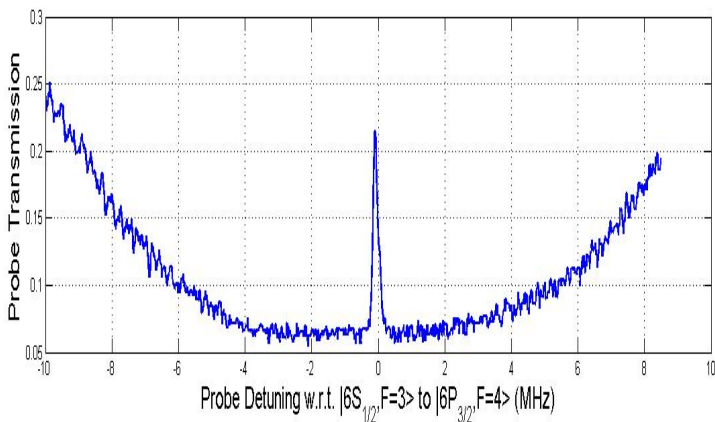
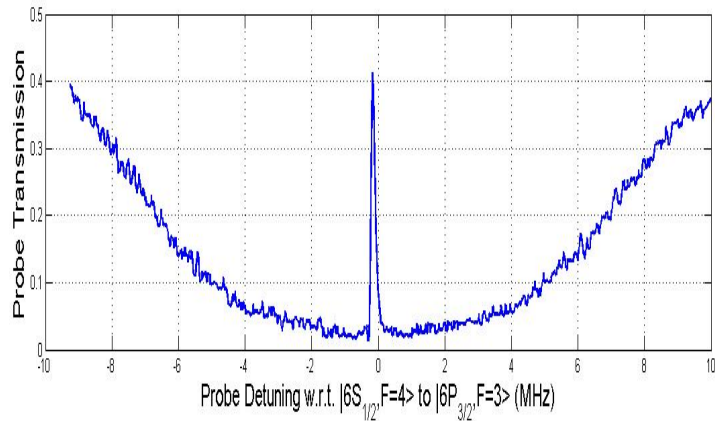
以雙慢光增強交錯相位調制

- M. Lukin Phys. Rev. Lett. 84, 1419 (2000).
- 因無一可行方案且原子團光學密度要夠高約10年都未被實現!



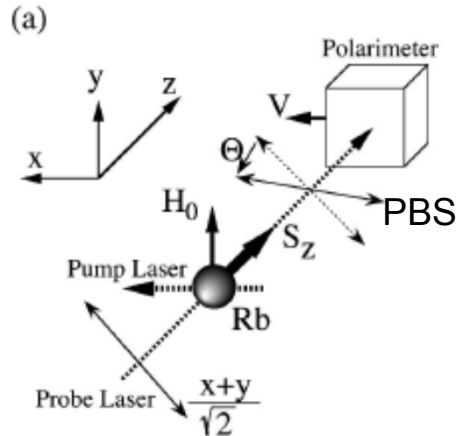
點子常來自於改善現有方案的問題!

這主意真的行得通!



- 2009 年5月的一個星期六早晨4點!
- 急於知道想法是否能成功的意念是可讓人廢寢忘食!
- “英雄” 所見略同!

消滅殘餘磁場



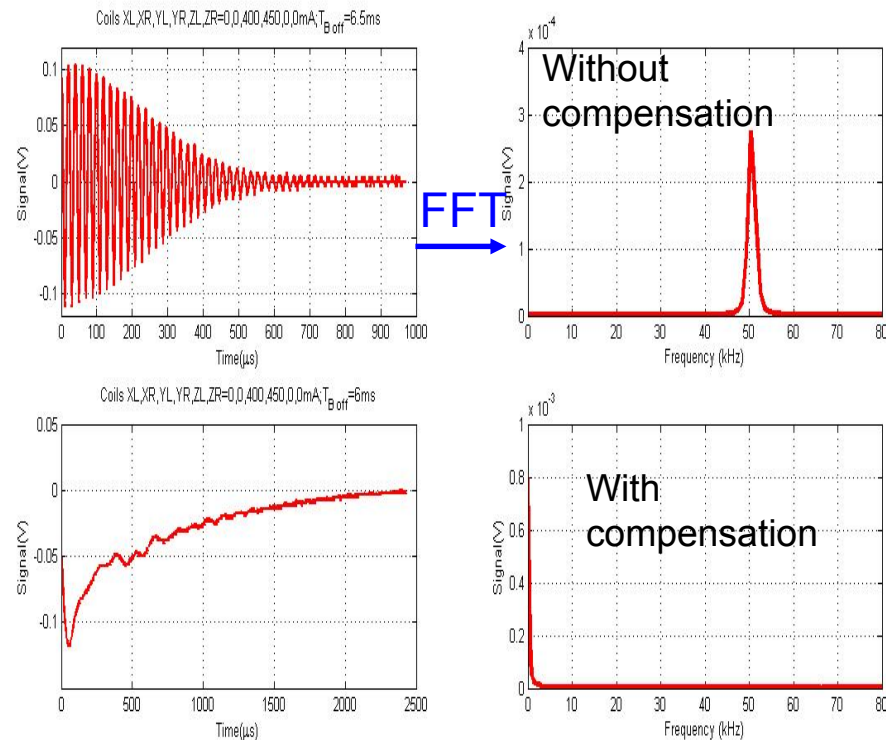
Faraday rotation
as diagnosis tool.
Three pairs of coils
for compensation.

$$\omega_L = \gamma B$$

350kHz/Gauss for Cs

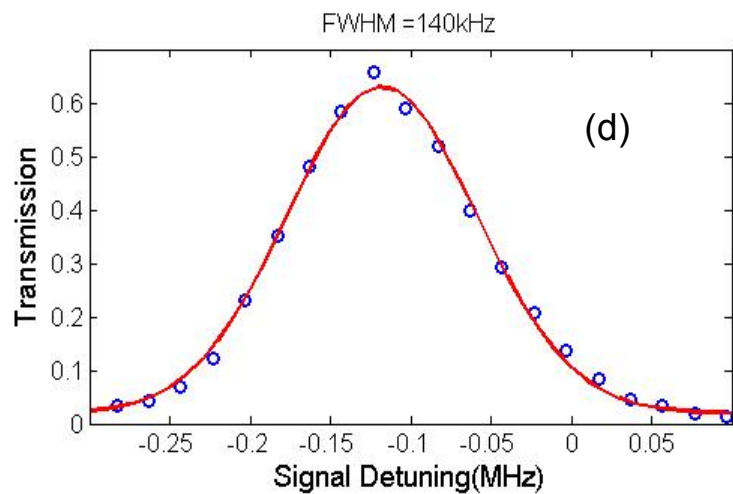
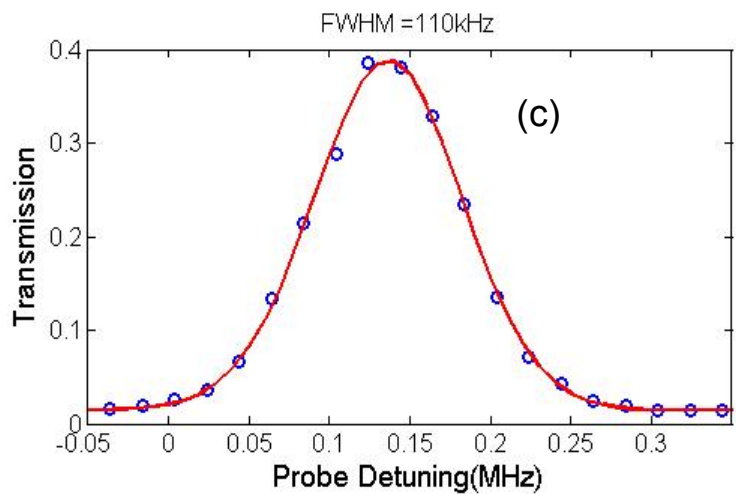
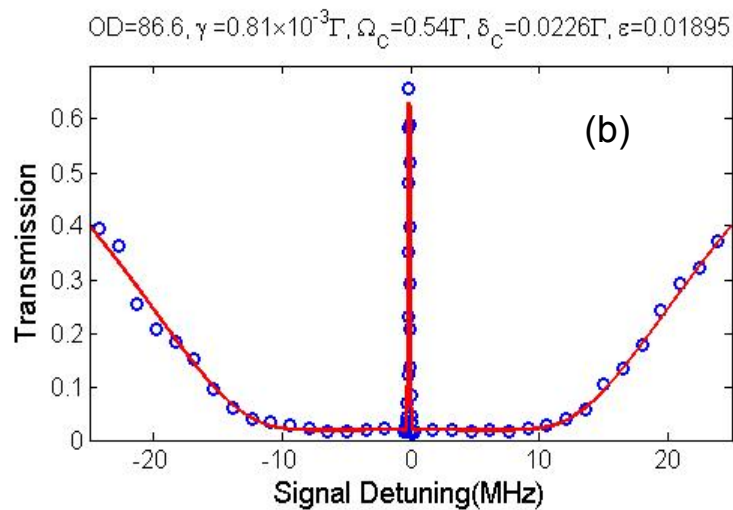
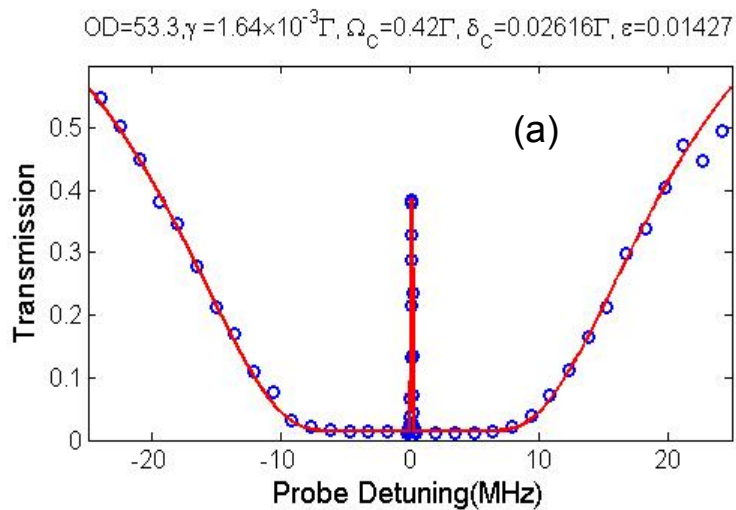
$\delta B < 3\text{mG}$ limited by 60Hz AC magnetic field!

- Minimize the usage of metallic components near the MOT regions.
- Quickly damp the current by MOSFETs and resistor.
- The γ is kept to $< 1 \times 10^{-3} \Gamma$ level.



- 除了有好想法外，有些硬功夫還是要下的，才能確保優勢。
- 魔鬼藏在細節裡！

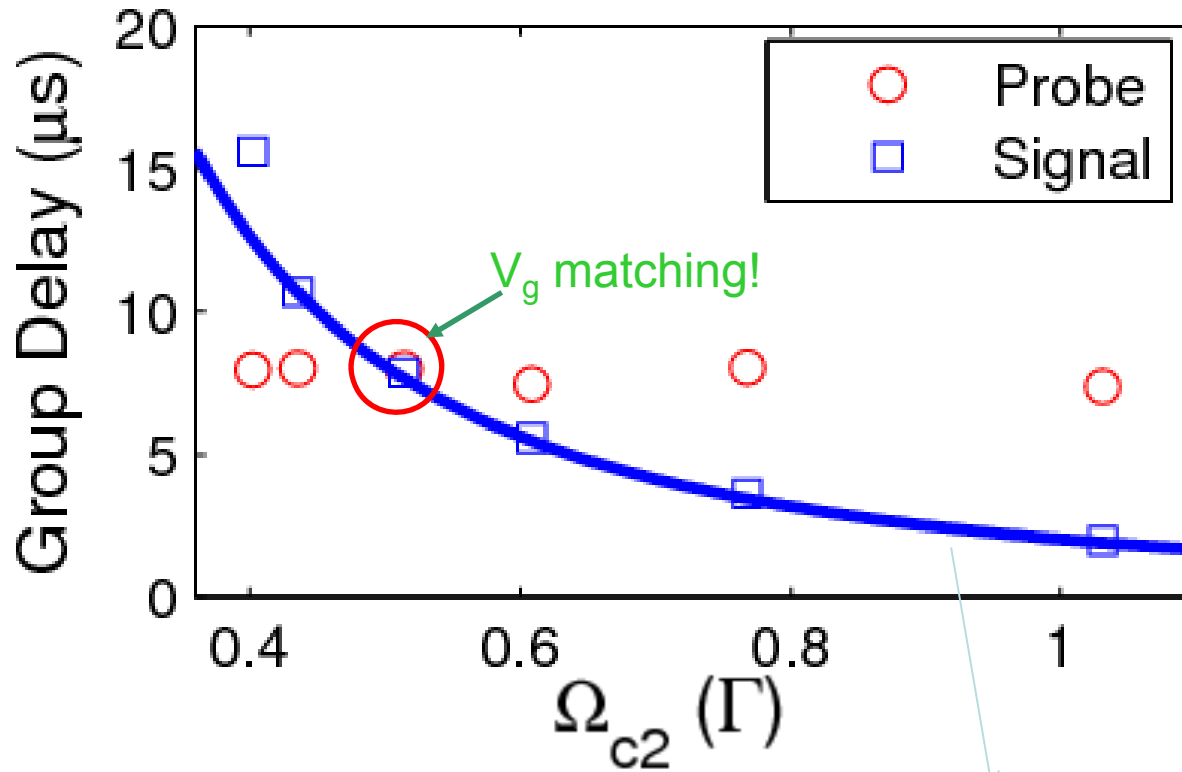
經過很多苦工...



- 漂亮的數據總是讓人很有成就感的!成就感來自於”我們可以做得這麼好”

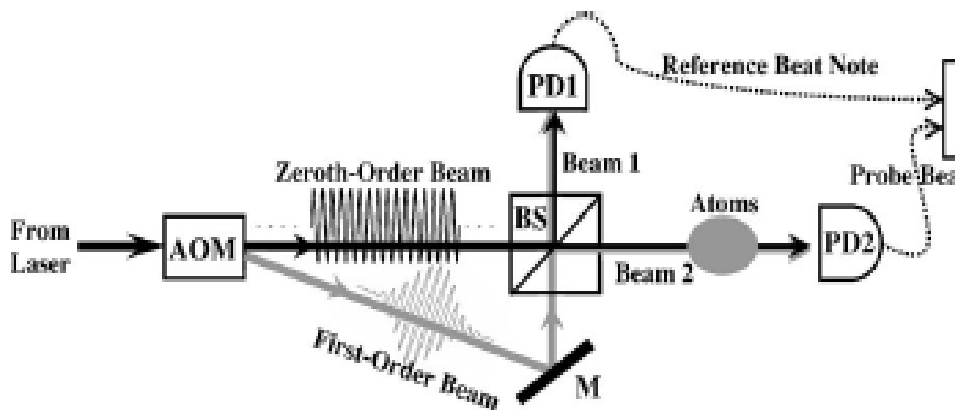
Group Velocity Matching

- To achieve the group-velocity-matching by varying the intensity of one of the coupling field.
- Very flexible, infinite sets of matching conditions

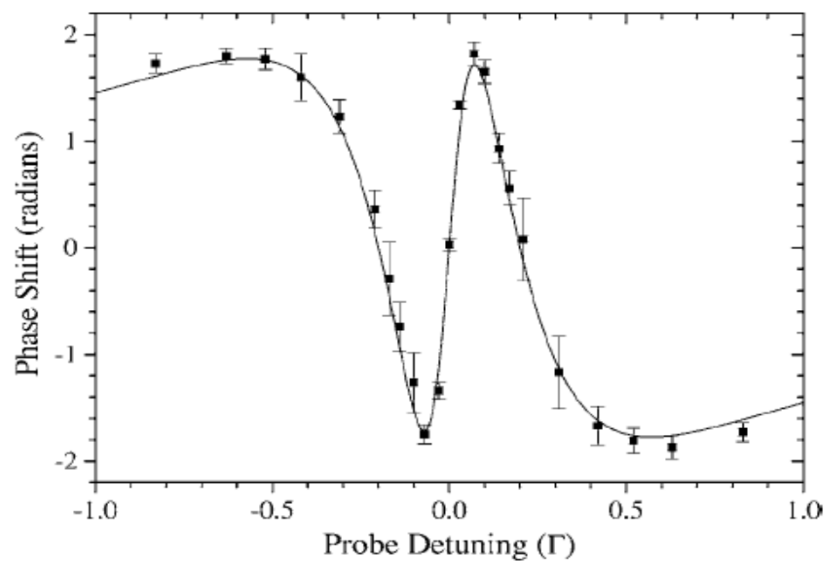
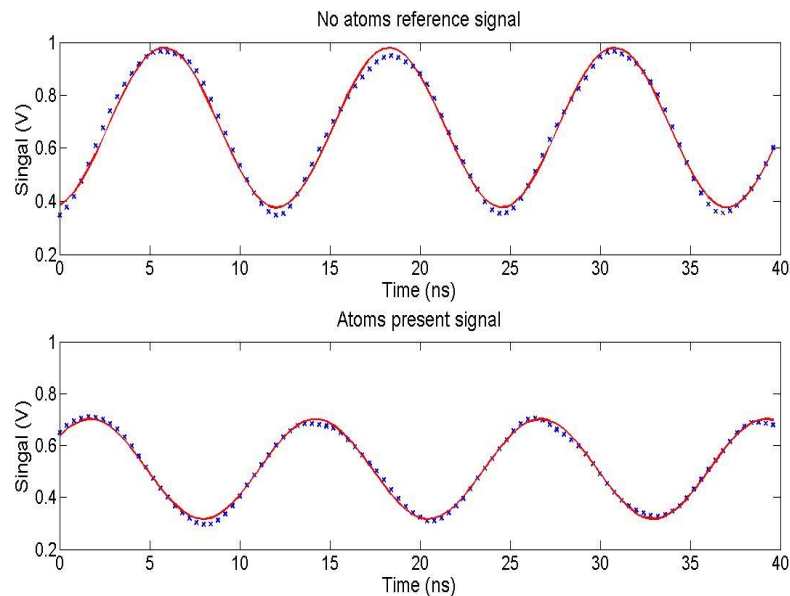
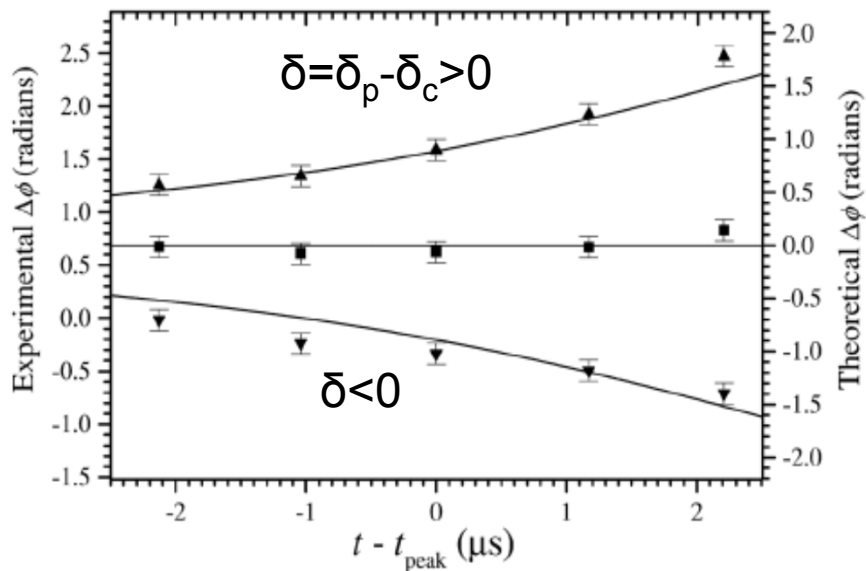


$$T_{D,S} = \alpha_S \Gamma / \Omega_{C2}^2 \text{ if } \gamma \Gamma \ll \Omega_{C2}^2$$

Beat-note Interferometer



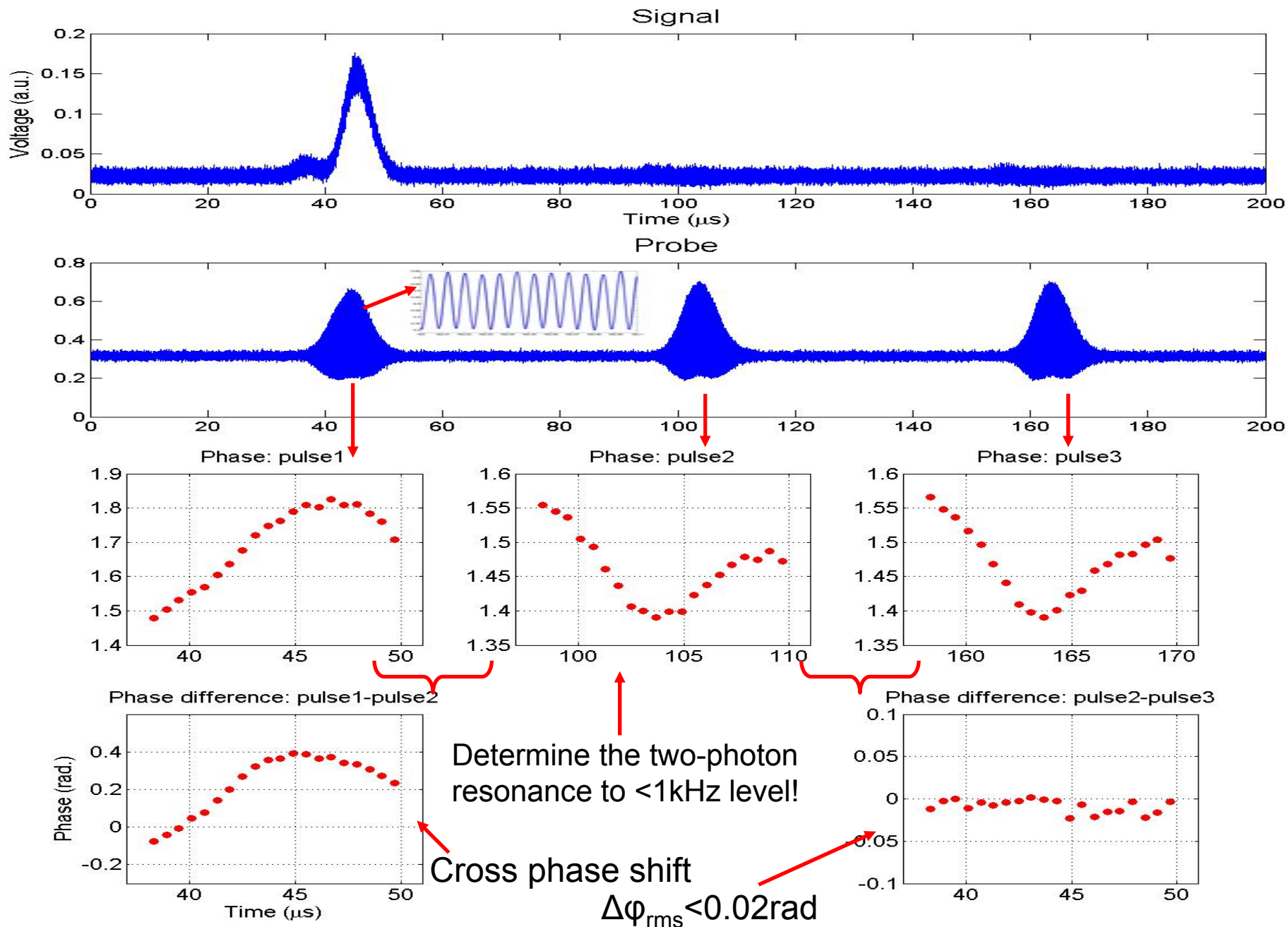
For a Gaussian pulse



YF Chen et.al. PRA, 72, 033812(2005) & 74, 063807(2006)

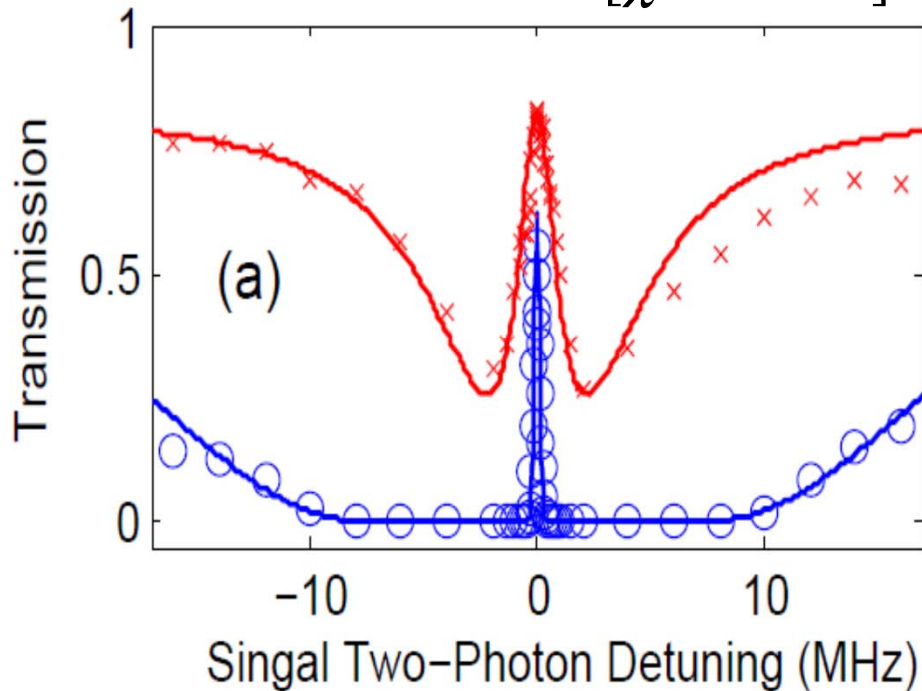
發明好的實驗技術會讓你走得更高更遠!

Cross Phase Shift Measurement

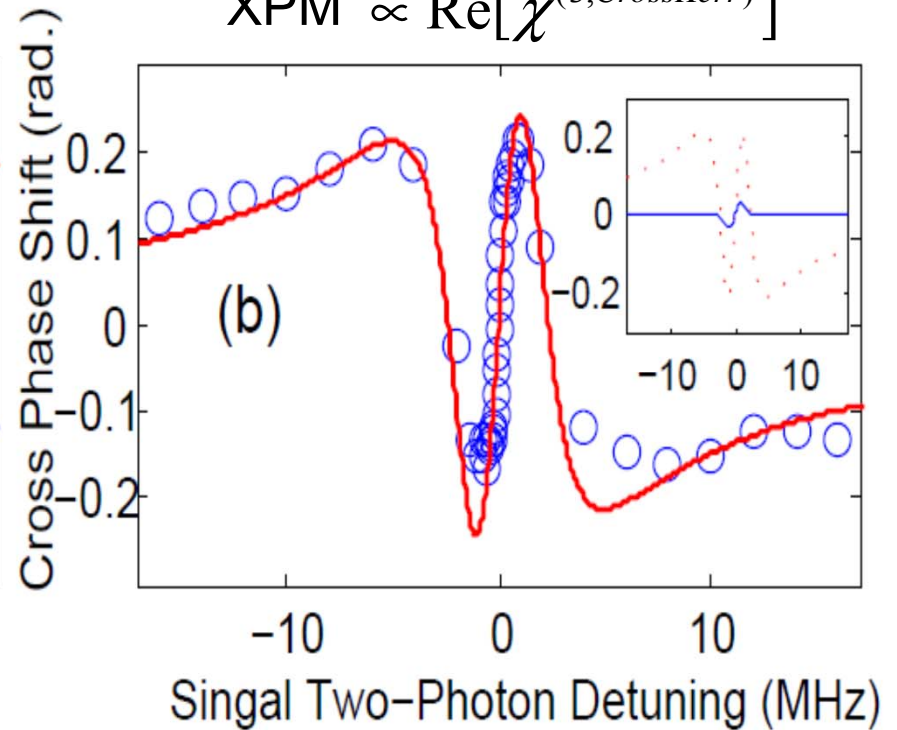


Cross-Phase Modulation and All-Optical Switching

$$\text{AOS} \propto \text{Im}[\chi^{(3, \text{CrossKerr})}]$$



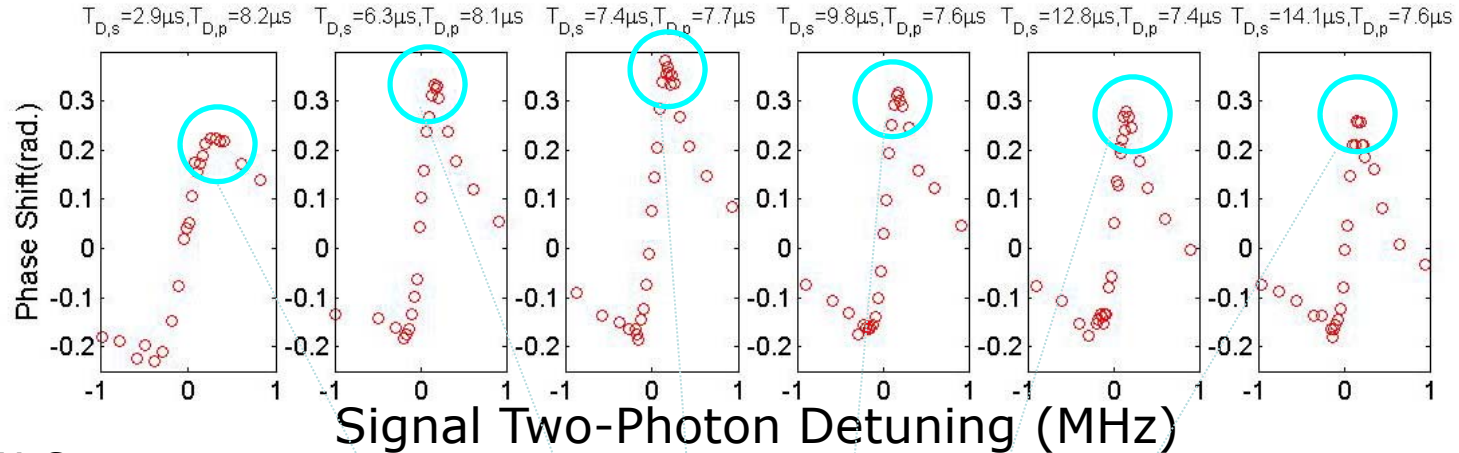
$$\text{XPM} \propto \text{Re}[\chi^{(3, \text{CrossKerr})}]$$



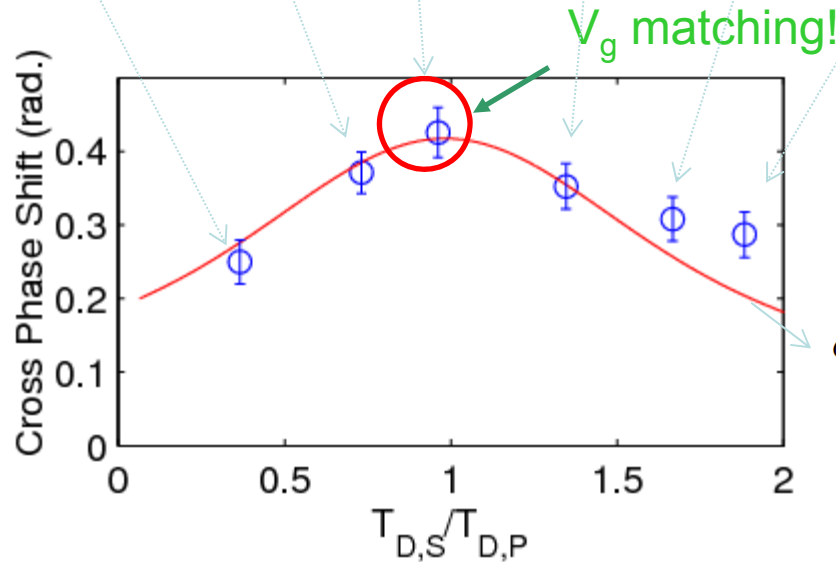
- switching
- probe

Observation of enhancement due to group-velocity matching

Increasing the group delay of signal pulse



$T_{D,p}: 8 \mu s$
 $\Omega_{C1}: 0.50 \Gamma$
 $\Omega_S: 0.11 \Gamma$
 OD for probe: 45
 OD for signal: 60



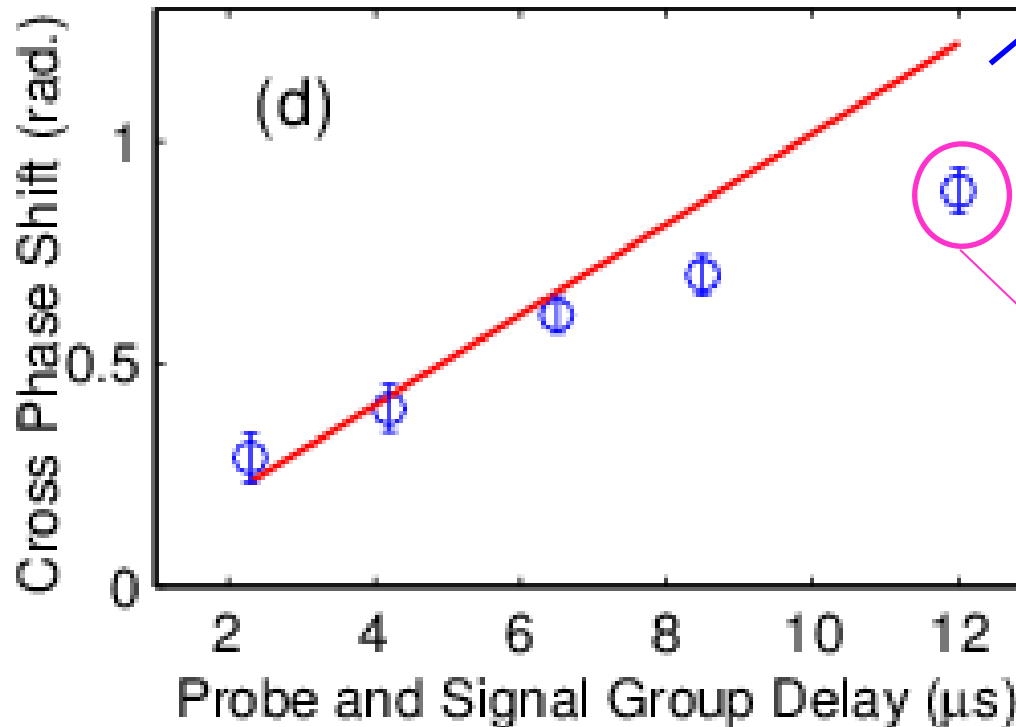
degree of overlapping

$$\phi_{P,max}^{xpm} = \frac{\sqrt{\pi}\alpha_P}{8} \frac{\text{erf}(\zeta_P)}{\zeta_P} \frac{\Omega_S^2}{\Omega_{C1}^2}$$

if $\gamma\Gamma \ll \Omega_{C2}^2$

Cross-Phase Shift for Single Photon

$$\phi_{P,max}^{xpm} = \frac{\Omega_S^2}{4\Gamma} T_{D,P}$$



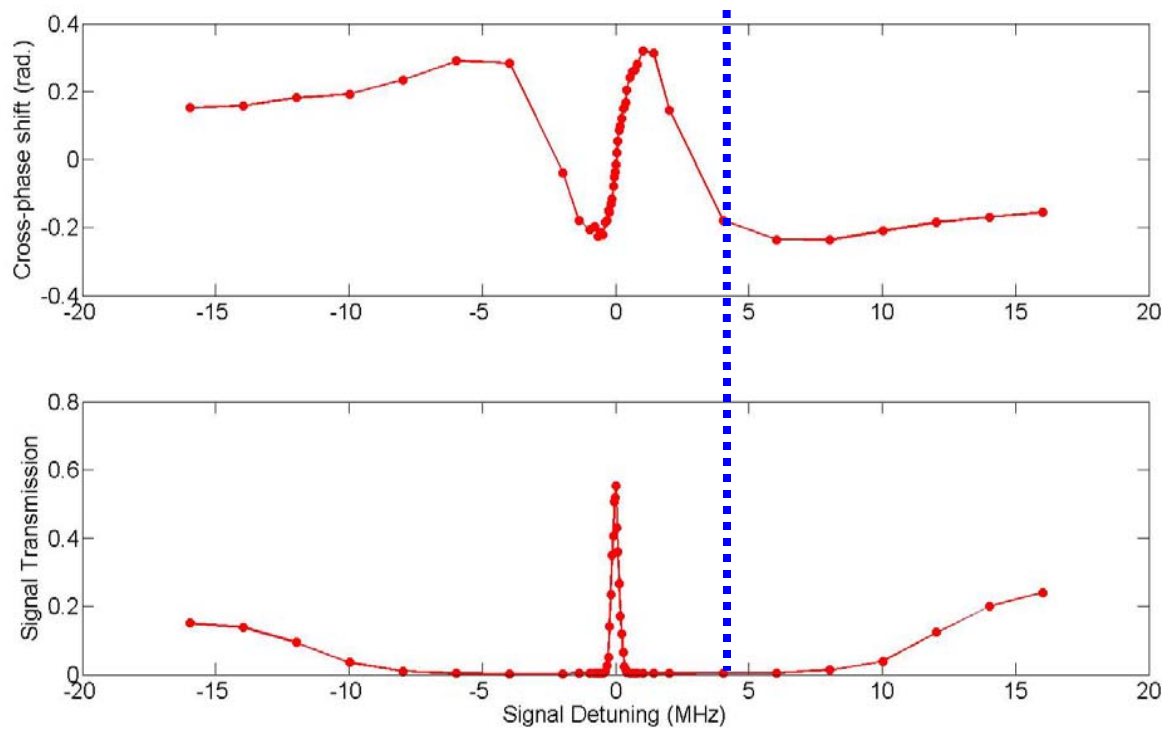
Ω_S : 0.11 Γ
OD for probe: 60
OD for signal: 121

The best obtained XPS is 10^{-6} radian per signal photon. Only 1/3 of the N-type limit !

- B.-W. Shiau et.al. Phys. Rev. Lett. 106,193006(2011)
- Reported by Nature Photonics, News & Views 5, 580(2011)

為什麼還是比N-型極限差？

- The signal decay by its own $\chi^{(1)}$ due a the two-photon detuning of the signal for the XPM.
- Can one keep both EIT on their two-photon resonances ($\chi^{(1)} \sim 0$) but still obtain the non-zero $\chi^{(3, \text{xpm})}$?



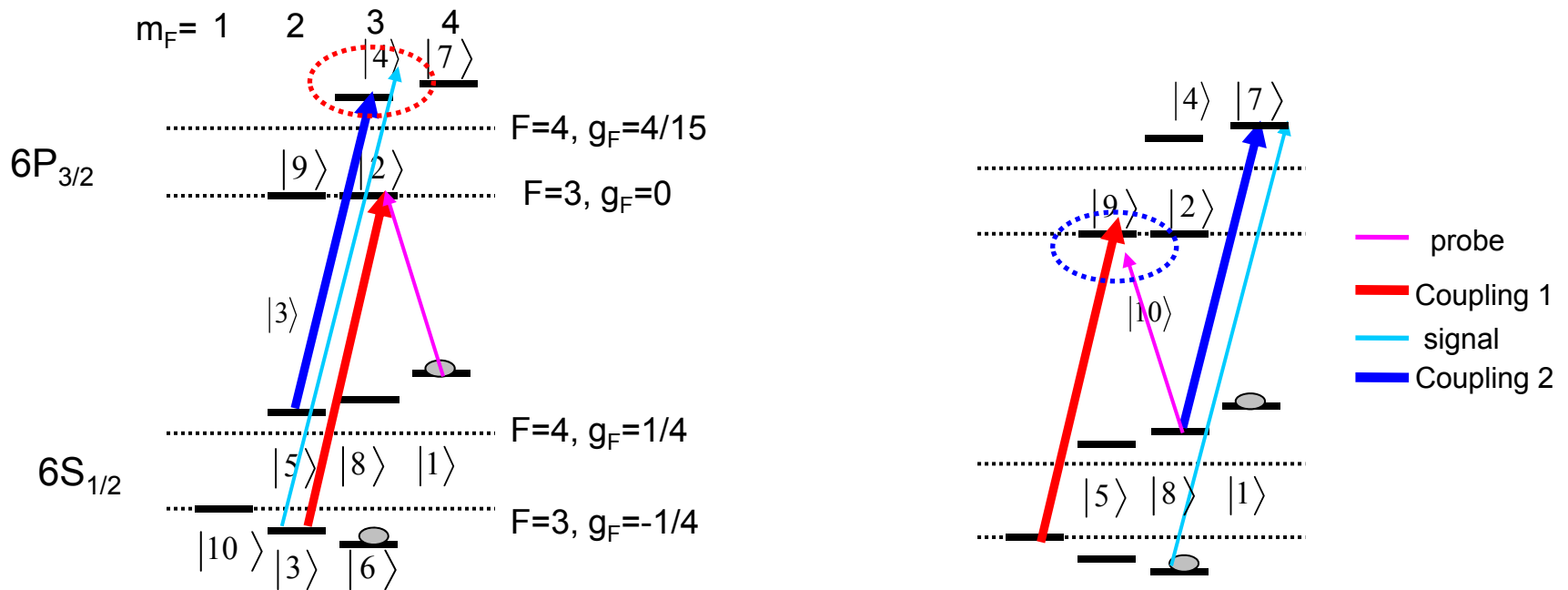
- 問出對的問題很重要！解決現有方案的問題是創意的來源！

New Double Slow Light and All-Optical Switching Scheme

- By applying a small magnetic field to lift the Zeeman degeneracies and to maintain all lasers on one-photon resonances w.r.t. the rightmost Zeeman transitions, we are able to obtain non-zero cross-Kerr nonlinearity with both probe and switching fields on EIT resonances !

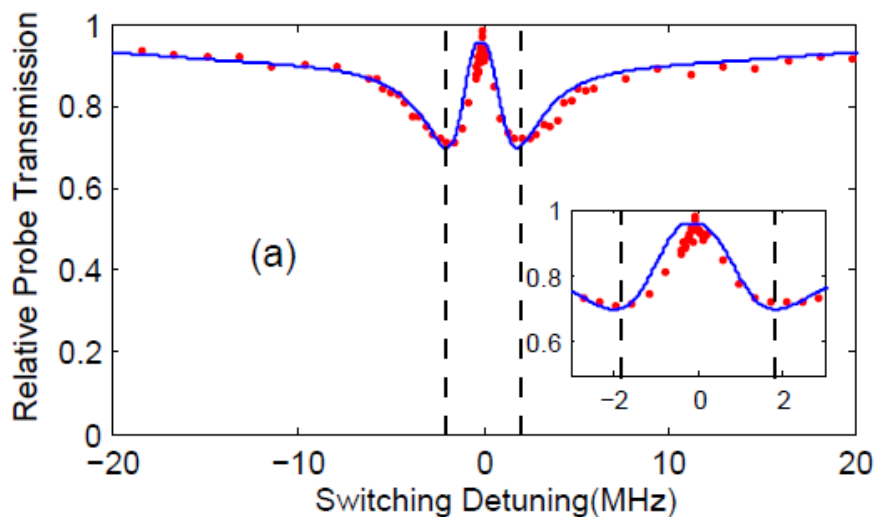
$$\chi_p^{(1)} = 0; \chi_s^{(1)} = 0$$

$$\chi_p^{(3,xpm)} \neq 0; \chi_s^{(3,xpm)} \neq 0 \quad \text{點子常來自於改善現有方案的問題!}$$

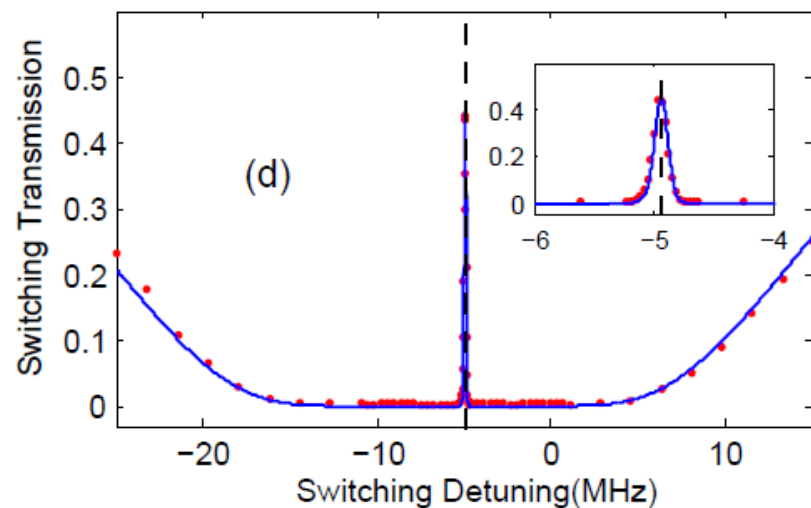
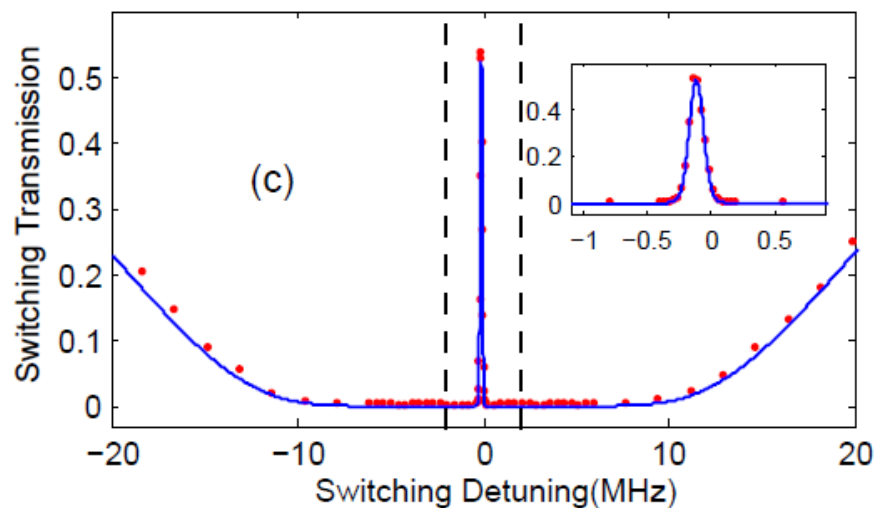
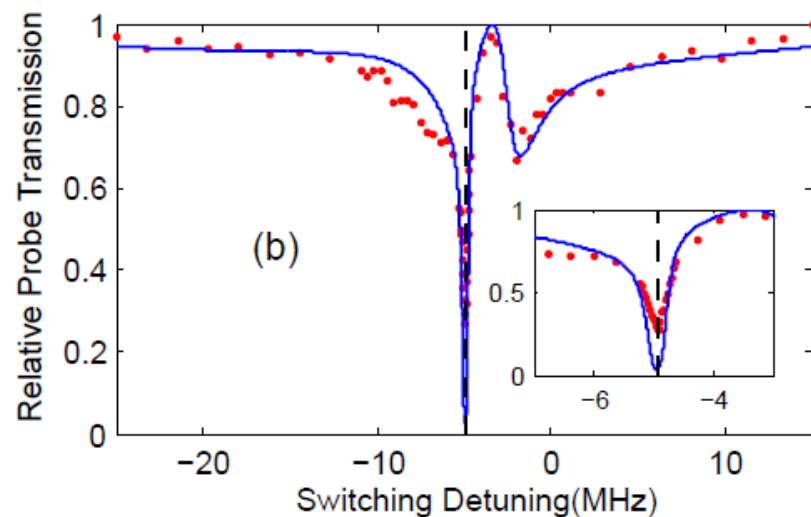


Enhanced All-Optical Switching

Old Scheme



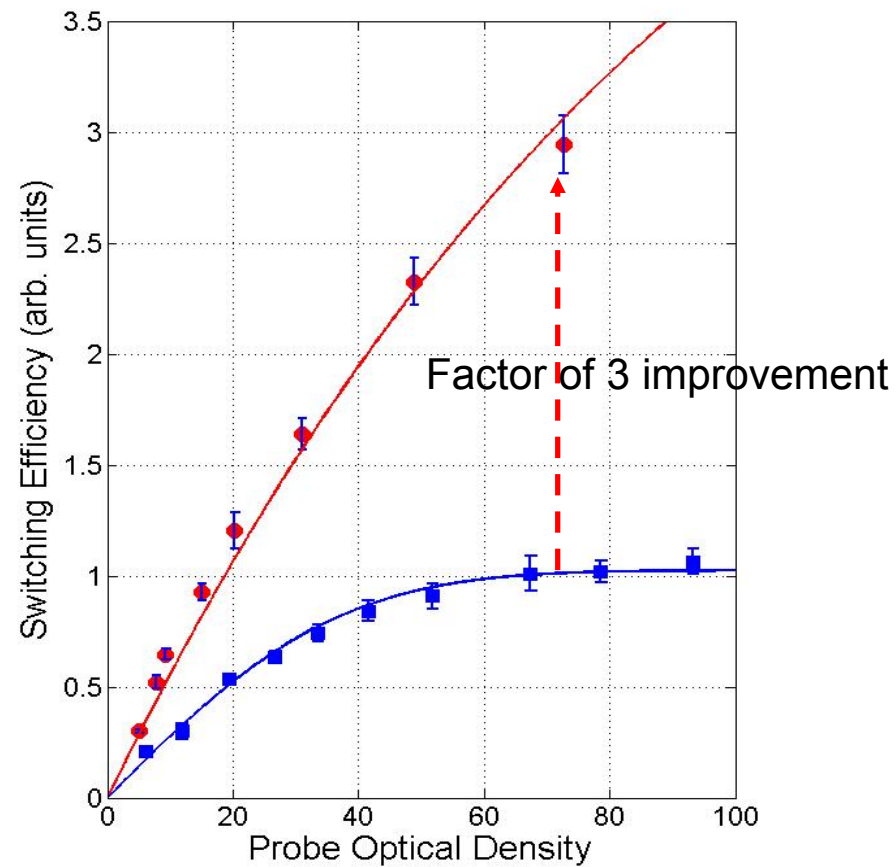
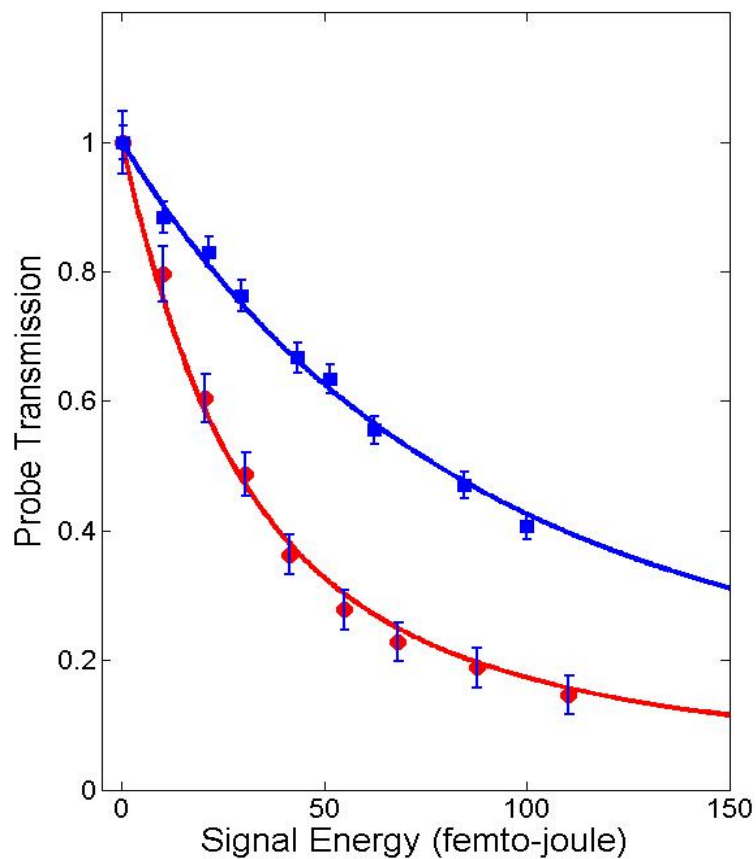
New Scheme



終於突破N-型系統的極限!

— Double slow light scheme

— N-type scheme



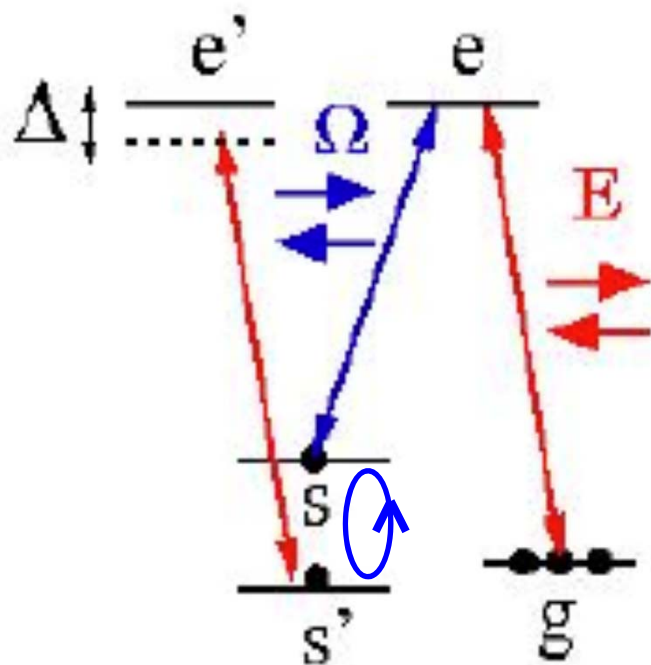
Nonlinear Optics with Stationary Pulses of Light

A. André, M. Bajcsy, A. S. Zibrov, and M. D. Lukin

Physics Department, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA

(Received 19 October 2004; published 15 February 2005)

We show that the recently demonstrated technique for generating stationary pulses of light [M. Bajcsy, A. S. Zibrov, and M. D. Lukin, *Nature (London)* **426**, 638 (2003)] can be extended to localize optical pulses in all three spatial dimensions in a resonant atomic medium. This method can be used to dramatically enhance the nonlinear interaction between weak optical pulses. In particular, we show that an efficient Kerr-like interaction between two pulses can be implemented as a sequence of several purely linear optical processes. The resulting process may enable coherent interactions between single photon pulses.

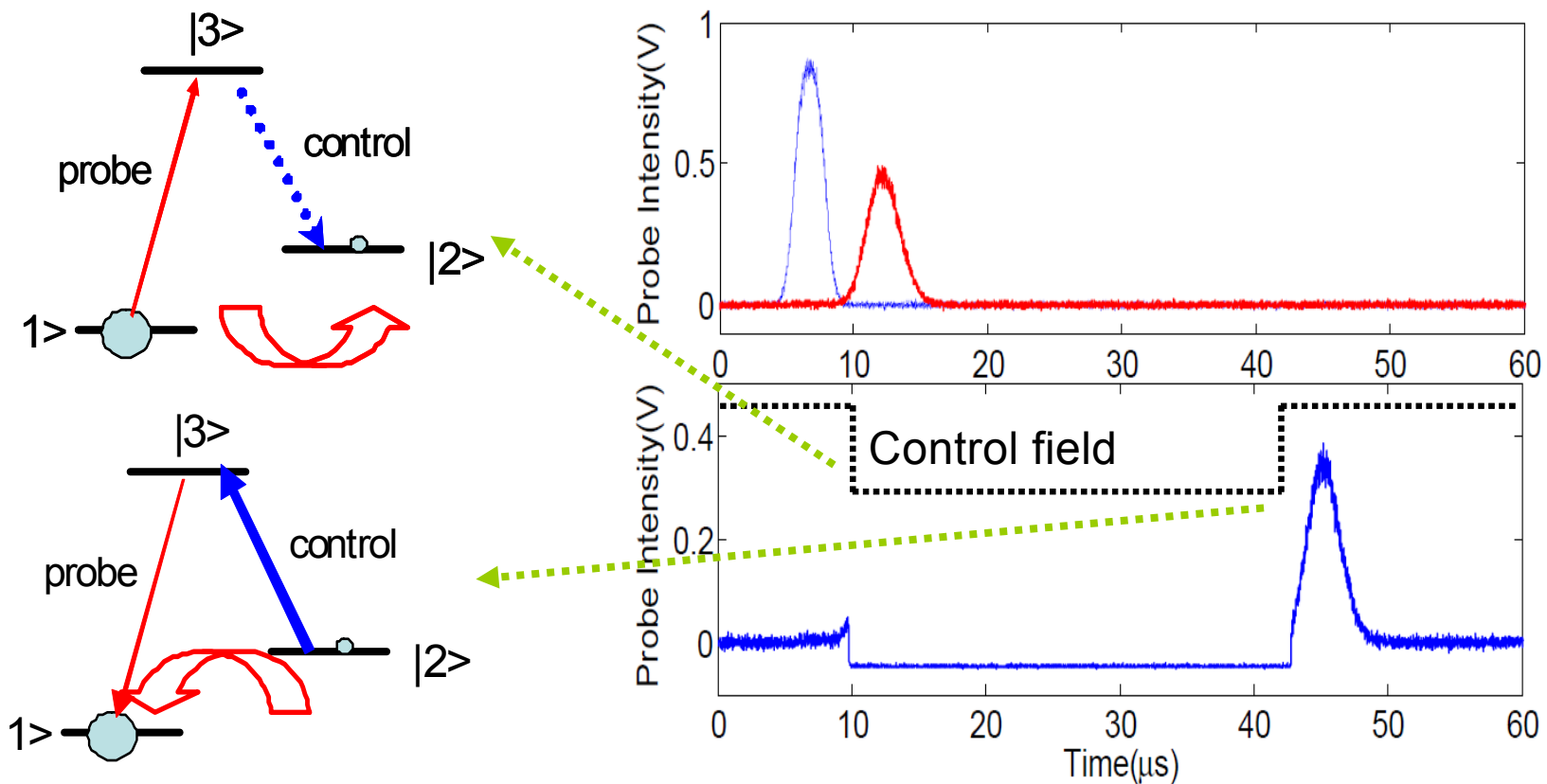


- Prepare atomic Raman coherence among states S and S' .
- Form stationary light for E and interact with the Raman coherence.
- Turn on the control field to convert the Raman coherence into light and gained a phase shift!

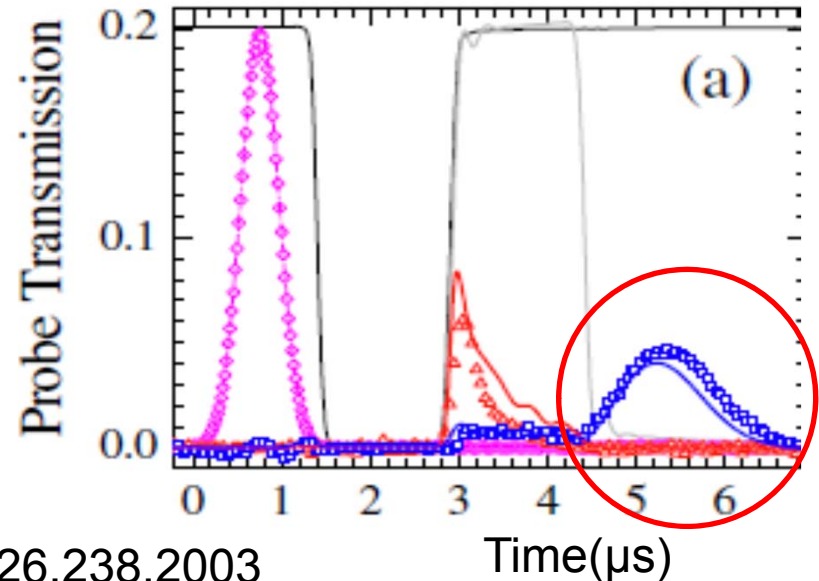
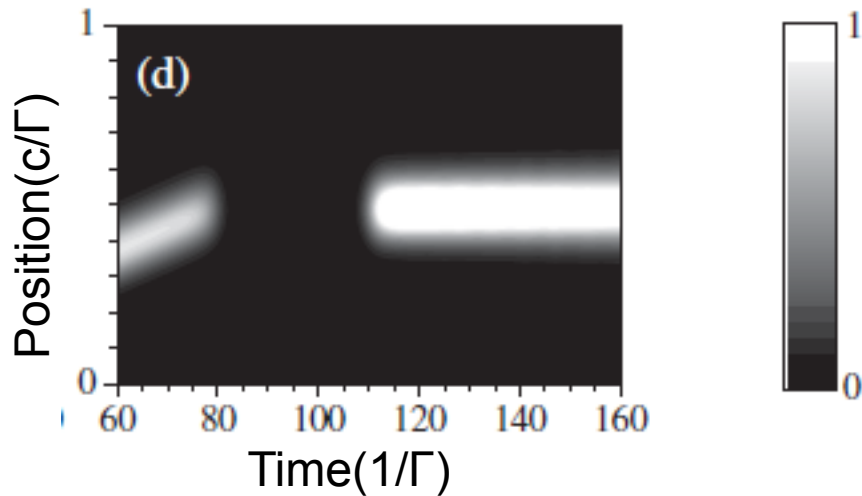
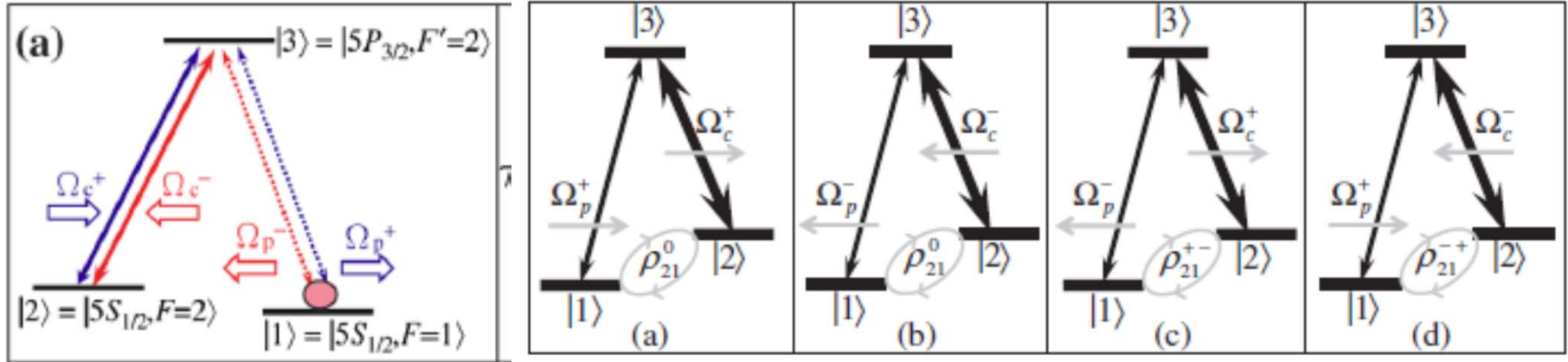
光的儲存與量子記憶體

- Dynamically varying the intensity of control field allows coherent conversion between light field and the atomic Raman coherence.
- This can be used as the quantum memory which is important in quantum communication and quantum computation.
- The storage time can be longer than 1 sec (BEC), or even 1 minute (solid crystal).

(M. Lukin & M. Fleischhauer, PRL 84,5094,2000)



EIT 及靜止光

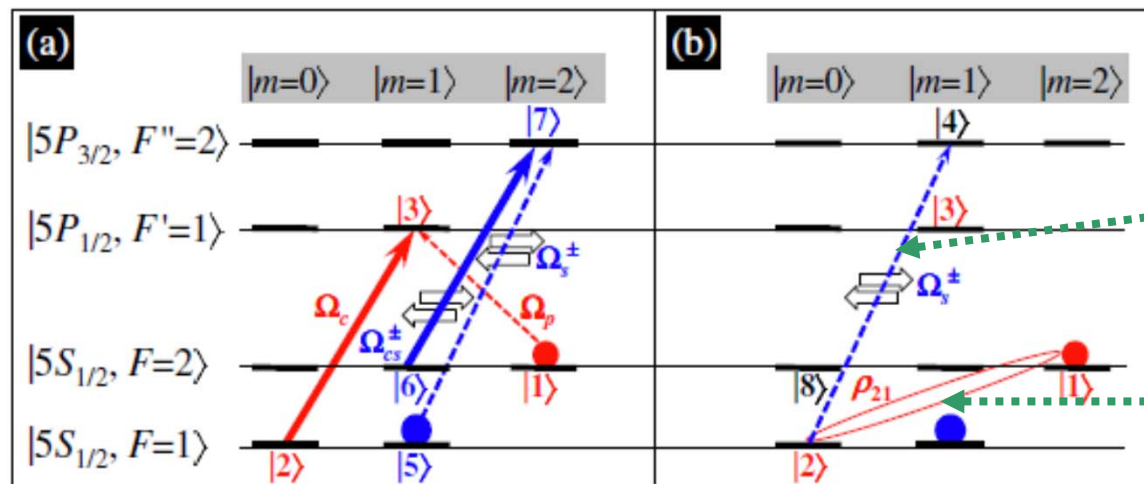


M. Bajcsy et al. Nature, 426,238,2003

Y.-W. Lin et al. PRL 102, 213,601,2009

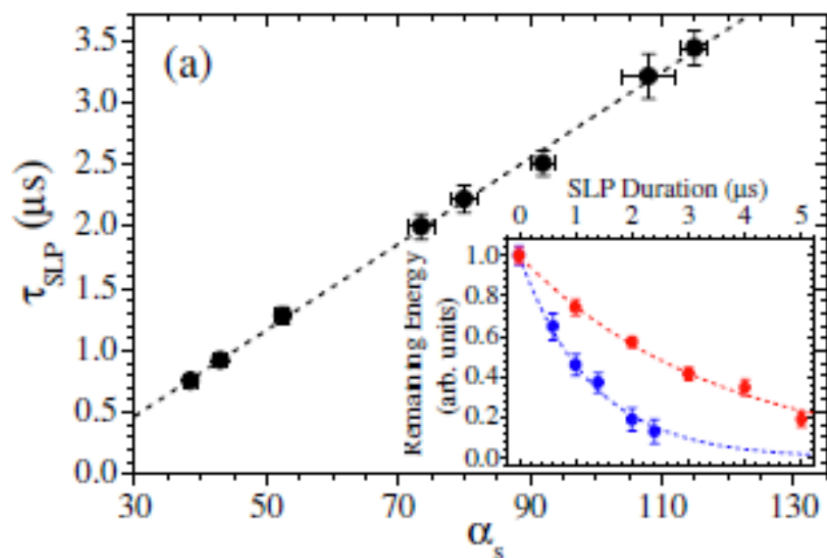
以靜止光對“儲存光”得全光學開關

- Lifetime of stationary light is proportional to OD \rightarrow Nonlinear efficiency \propto OD

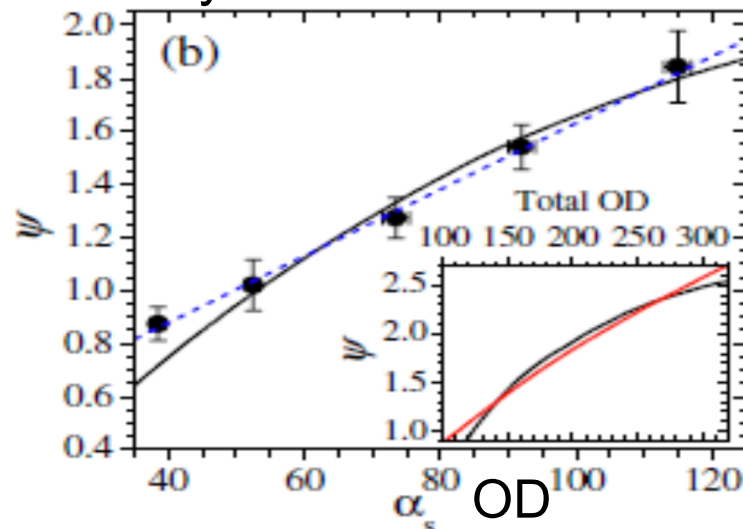


Stationary light

Stored light
(atomic Raman coherence)



efficiency



- Achieved a 3.6 times enhancement over the N-type limit.
- Yi-Hsin Chen et. al. “Demonstration of interaction between two stopped light pulses”, Phys. Rev. Lett., 108, 173603(2012).
- Reported by Nature Physics Research Highlight “*Frozen light switch*” ,8, 252(2012) & Physics.org
- Reported by Physics.org, “*Two stopped light pulses interact with each other*”

Read more

at: <http://phys.org/news/2012-05-pulses-interact.html#jCp>

Frozen light switch

Phys. Rev. Lett. (in the press); preprint at <http://arxiv.org/abs/1111.2110> (2011)

Enhancing the efficiency of optical switching or other nonlinear optical processes usually requires high-intensity light. However, it is also possible to maximize efficiency with very-low-intensity light if the interaction time is long. Stopping light pulses and making them interact in a medium is a way to get more for less.

Yi-Hsin Chen and co-workers made two light pulses motionless by slowing them down and trapping them in an atomic vapour. The frozen light pulses could then interact for almost seven microseconds. This long interaction allowed the very-low-intensity light pulse to trigger another light pulse — thus realizing an all-optical switch. The mechanism behind this scheme is a quantum interference effect known as electromagnetically induced transparency, which makes the atomic medium transparent to resonant light.

The results predict that switching could be activated for even-lower-intensity light if the optical density of the atomic medium is increased by cooling the atoms — a promising perspective for low-light-level nonlinear optics and quantum information processing. *IG*

未來改進方向

- 強聚焦
- 需有足夠原子密度
- 增長交互作用時間（更大光學密度或用共振腔加強）

$$\text{原子與光之交互作用} \propto \int dt (\vec{d} \cdot \vec{E}) \propto \int dt (\vec{d} \cdot n_{\text{photon}} \left(\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0 V} \right)^{1/2} \hat{\varepsilon})$$

增長交互作用時間

選擇有較大耦極矩的原子躍遷

強聚焦使只有少數幾顆光子
電場仍足夠強

光速減慢至每秒 600 公尺

— 原子的電磁波引發透明效應

陳應誠 余怡德
國立清華大學物理系

■ 572 ■

物理雙月刊（廿三卷五期）2001 年 10 月

“大自然似乎還存在很多驚奇等待我們去發掘!”

科學的探索：永無止盡
歡迎加入我們的行列！

