

02/22

週六 15:00-17:00

逃避雖然可恥，但卻有用 量子糾纏 與薛丁格的貓

量子力學是真實微觀世界的物理規則，例如生活中無所不在的電子就必須遵守。它所預測的有些現象比科幻情節還奇特，更驚悚的是，量子力學似乎有時與我們從經驗歸納出來的科學原則相違背。因此，兩位量子革命的先驅愛因斯坦與薛丁格，後期反過來表達了非常尖銳的少數反對意見，提出了實在離譜的量子力學現象，這就是量子糾纏與薛丁格的貓。

面對如此尖銳又無法解決的質疑，絕大多數的物理學家採取了逃避的態度，說好聽是把問題放在括號內、存而不論，其實是置之不理，但他們務實地就已知的部分繼續前行，竟然成功發展出了如繁花般的近代物理。現在從基本粒子以至半導體，我們已能對微觀世界、精確掌握並開發利用，令人嘆為觀止，逃避真是有用的，但問題還在括號內，沒有解決。

經過了半個世紀，當初的反對意見，並未被全然忽視，有一小群物理學家慢慢的就其意義仔細琢磨。近幾年的實驗證實了，愛因斯坦覺得不可能的量子糾纏，竟然真的發生了。因此，反對意見並沒有推翻量子力學，反而指出了它比較幽微、難以想像、扭曲卻強大的特性。由此製造出的糾纏狀態可能會成為未來量子電腦的基礎。

這樣的結果肯定不是愛因斯坦與薛丁格當初想像得到的。至於現在他們是否願意接納量子力學，那就不可知了。



主講人 | 張嘉泓

國立臺灣師範大學物理學系副教授



主持人 | 黃宗慧

國科會外文學門（文學二）召集人
國立臺灣大學外國語文學系教授



| 參與方式 | Webex 視訊會議

| 報名連結 | bit.ly/FLNSTC-20250222 (2/19 23:59 止)

| 聯絡助理 | 陳信彰 jessechen0110@gmail.com

林嘉瑩 kelly.cy.lin@gmail.com

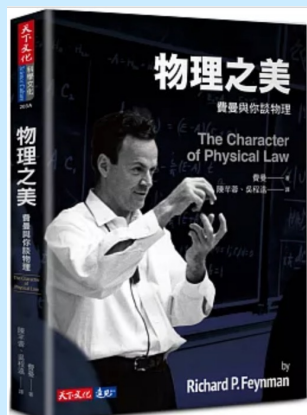
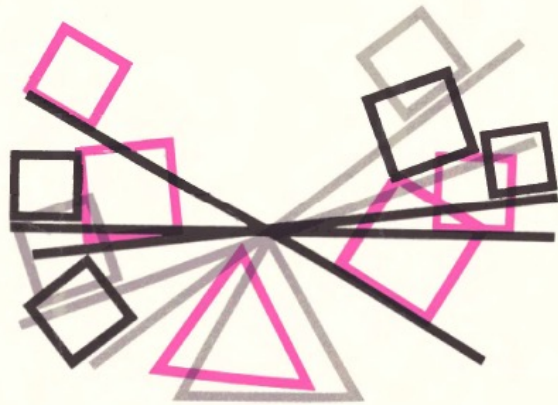
| 主辦單位 | 國科會人文處外文學門

逃避雖然可恥，但卻有用：量子糾纏與薛丁格的貓

原是匈牙利文的諺語（ Szégyen a futás, de hasznos ）



The Character of Physical Law
Richard Feynman



I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.

So do not take the lecture too seriously, feeling that you really have to understand () what I am going to describe, but just relax and enjoy it.

沒有人真正理解量子力學。

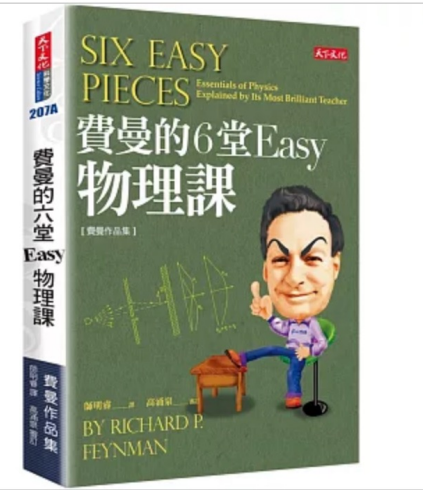
這句其實是為下一句玩笑話撲墊的玩笑話。

所以對這演講別太認真，感覺非得了解我在說什麼。放輕鬆、就盡量享受吧！





TAMIKO THIEL/WIKICOMMONS



費曼的6堂Easy物理課(改版)

Six Easy Pieces: Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher

可購買版本(2)：

電子書
優惠價285元

平裝
優惠價342元

作者：理查·費曼 [追蹤作者](#)

原文作者：Richard P. Feynman

譯者：師明睿, 高涌泉

出版社：天下文化 [訂閱出版社新書快訊](#)

出版日期：2024/05/17

語言：繁體中文

定價：380元

優惠價：9折 342元

本商品單次購買10本85折 323元



費曼物理學講義I+訣竅 (共7冊, 平裝版)

作者：理查·費曼, 羅伯·雷頓, 馬修·山德士, 麥可·高利伯, 拉夫·雷頓 [追蹤作者](#)

原文作者：Richard Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, Michael A. Gottlieb, Ralph Leighton

譯者：師明睿, 田靜如, 高涌泉

出版社：天下文化 [訂閱出版社新書快訊](#)

出版日期：2019/12/26

語言：繁體中文

定價：2790元

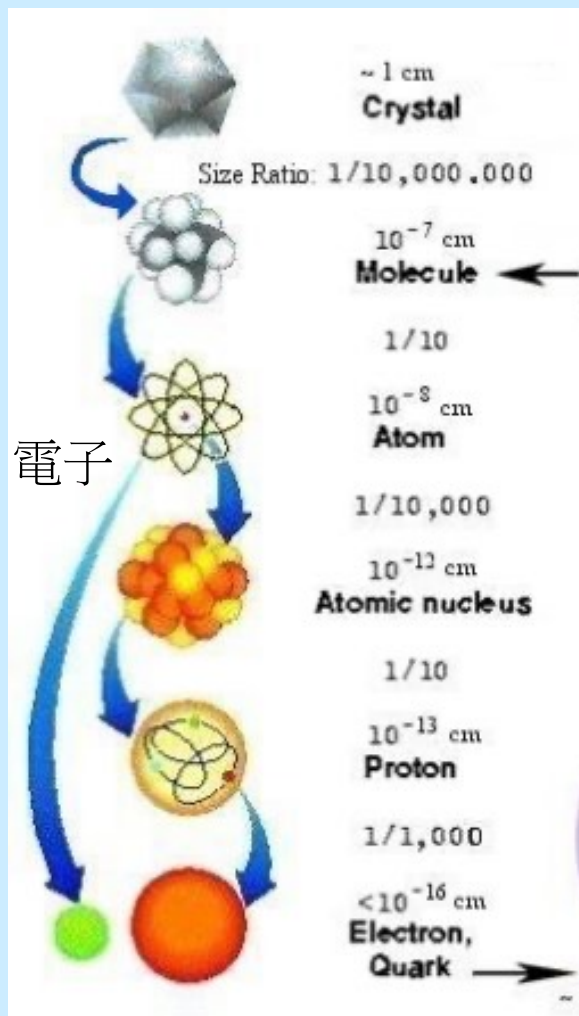
優惠價：9折 2430元

本商品單次購買10本85折 2295元

分期價：(除不盡餘數於第一期收取) [分期說明](#)

3期0利率 每期 810

一直不斷分割下去，我們的確發現了一層又一層的物质組成結構



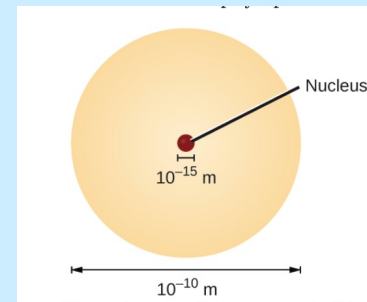
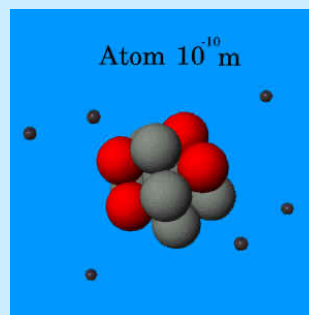
分子

原子

原子核

質子、中子

夸克



原子是由電子與原子核組成。

從原子、電子以下的微觀世界遵守的物理規則，稱為量子力學。

沒有人真正理解量子力學。

沒有人真正理解量子力學，可能還有點粉飾太平understatement。

量子力學似乎有時與我們從經驗歸納出來的科學原則相違背。

因此有非常偉大的物理學家表達了非常尖銳的反對意見，



發現 節目 有聲書 課程 節目主持人/有聲書主播 訂閱說明 APP下載



登入 / 註冊

節目 知識好好玩

EP07 | 電子的劈腿問題，它是一種波嗎？

電子是粒子也是波！

主持人 | 張嘉泓

單曲長度 | 00:17:54 發布時間 | 2021-07-06

#張嘉泓

#物理好好玩

#波

#撞球

#粒子性

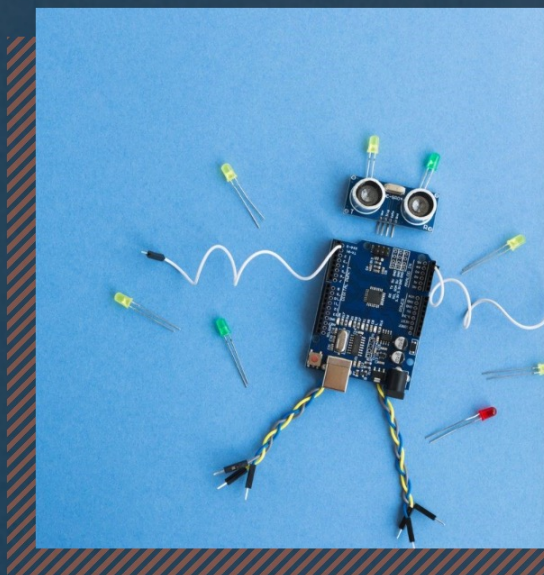
#薛丁格

#波動力學

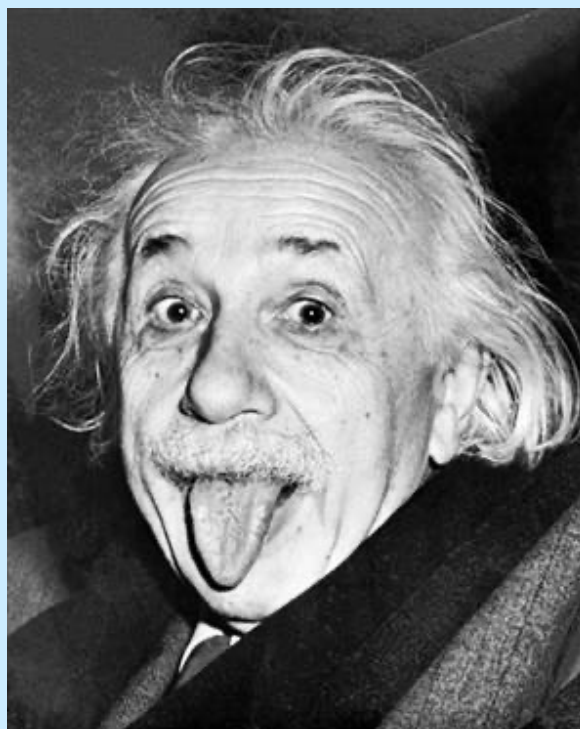


查看節目資訊

開始播放

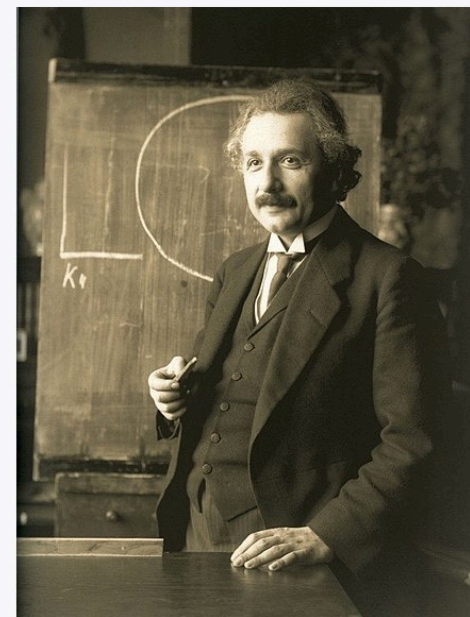


這包括了兩位量子革命的先驅：愛因斯坦與薛丁格！



史上最佳代言人

Albert Einstein



Albert Einstein in 1921

Born	14 March 1879 Ulm, Kingdom of Württemberg, German Empire
Died	18 April 1955 (aged 76) Princeton, New Jersey, US
Residence	Germany, Italy, Switzerland, Austria (present-day Czech Republic), Belgium, United States
Citizenship	Subject of the Kingdom of Württemberg during the German Empire (1879– 1896) ^[note 1] Stateless (1896–1901) Citizen of Switzerland (1901– 1955)

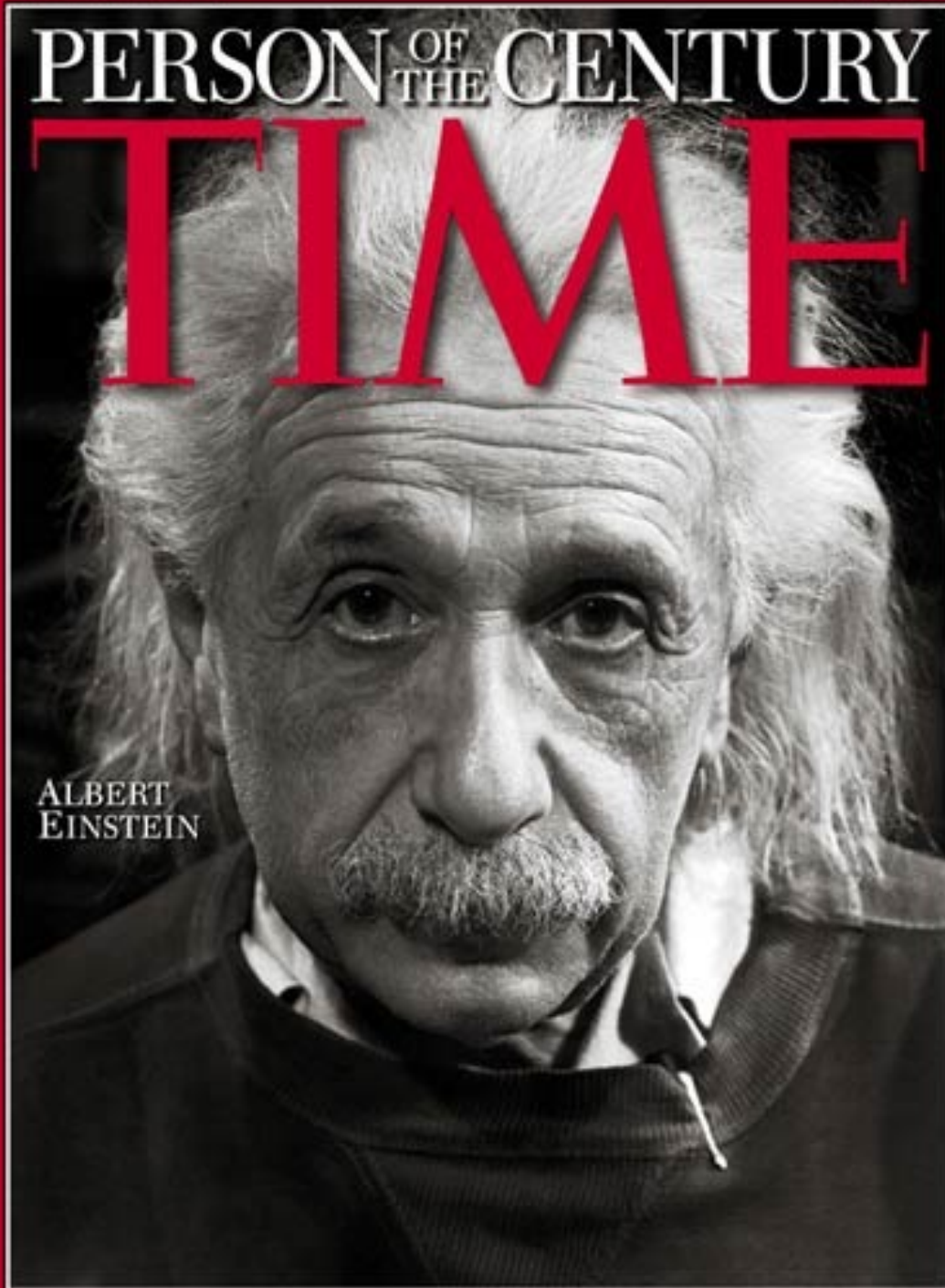
DECEMBER 31, 1999 \$4.00

www.time.com

PERSON OF THE CENTURY

TIME

ALBERT
EINSTEIN



電子是粒子也是波！



鏡好聽 MIRROR VOICE 發現 節目 有聲書 課程 節目主持人/有聲書主播 訂閱說明 APP下載

節目 知識好好玩

EP07 | 電子的劈腿問題，它是一種波嗎？

主持人 | 張嘉泓

單曲長度 | 00:17:54 發布時間 | 2021-07-06

#張嘉泓 #物理好好玩 #波 #撞球 #粒子性 #薛丁格 #波動力學

查看節目資訊 開始播放

要研究一個波，就要先得到它的波方程式！

要寫波方程式，得先有一個波函數。

假設電子波有一個波函數： Ψ

這是甚麼東西？

薛丁格假設我們可以先不管它的意義是甚麼！先算再說！



Erwin Schrödinger

ForMemRS



Schrödinger in 1933

Born	Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger 12 August 1887 Vienna, Austria-Hungary
Died	4 January 1961 (aged 73) Vienna, Austria
Citizenship	Austria Ireland (1948–1961)
Alma mater	University of Vienna (PhD, Dr. habil.)
Known for	<i>See list</i> [show]
Spouse	Annemarie Bertel (m. 1920)
Father	Rudolf Schrödinger

Downloads



在Villa Herwig, Arosa Switzerland 1925，有一位不知名的女子陪伴下：
薛丁格在聖誕假期中從無到有猜出一個波方程式： Schrodinger Wave Equation

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x)\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$



Schrödinger spent the Christmas break of 1925–1926 at the Villa Herwig at Arosa where he intended to relax and enjoy the skiing. His mind was, however, consumed by his recent researches at the expense of what should have been a period of relaxation. As he noted in a letter to Willy Wien of 27 December 1925,

‘At the moment I am plagued by a new atomic theory . . . I believe I can write down a vibrating system – constructed in a comparatively natural manner and not by *ad hoc* assumptions – which has as its eigenfrequencies the term frequencies of the hydrogen atom.’

Arosa, am 27. Dezember 1925.
 Villa Jarosig
 (bis 8. Januar)

Sehr verehrter Herr Professor!

Es tut mir sehr leid, dass Fock Ihnen gegenüber die Dinge so dargestellt hat, als wäre ich auf dem Gebiete der Atomphysik verstorben. Es würde mich sehr freuen, wenn Sie mir, wenn Sie – wie gewohnt – schreiben könnten – dass Sie nicht nur mich, sondern auch die Sache selbst, die ich Ihnen schreiben möchte, nicht den Vorzügen weihen würde.

Die Dinge verhalten sich so. Fock hat mir, auf dem er ^{bei} Ihnen gewesen war, und

Screenshot

$$\nu_n = \frac{mc^2}{h} - \frac{R}{n^2}, \quad \nu_m = \frac{mc^2}{h} - \frac{R}{m^2}$$

also dann

$$\nu_n - \nu_m = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

ein wichtige Spektrallinie Frequenz. Damit ist ein wichtiger Bestandteil der Spektrallinie Frequenz gegeben – es ist wichtig die Spektrallinie = (bzw. ein Spektrallinie Frequenz) der, welcher mit derjenigen Frequenz entspricht, die wir im Spektrallinie beobachten.

Ich hoffe, ich kann bald ein wenig mit Ihnen und verständlicher über die Dinge berichten. Vielleicht muss ich auf Spektrallinie kommen, um das Spektrallinie, welches ganz zu übersehen – ein kleiner Unterschied, gleichmäßig, der Bessel'schen ist, aber weniger bekannt und mit merkwürdigen Randbedingungen, welche sie „in tiefen“ nicht von Ihnen vorzugeben bekannt. –

Nun auf zum Spektrallinie mania Spektrallinie und lassen

Screenshot

回到維也納太太的身邊後，一口氣發表了A total of four papers in 1926。

1926. № 6.

ANNALEN DER PHYSIK.
VIERTE FOLGE. BAND 79.

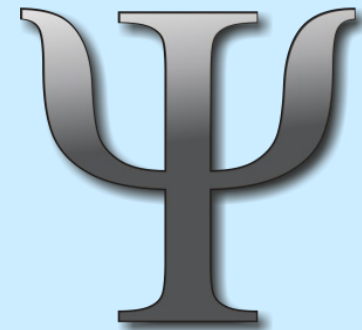
1. Quantisierung als Eigenwertproblem;
von E. Schrödinger.

(Zweite Mitteilung.)¹⁾

§ 1. Die Hamiltonsche Analogie zwischen Mechanik und Optik.
Bevor wir daran gehen, das Eigenwertproblem der Quantentheorie für weitere spezielle Systeme zu behandeln, wollen wir den *allgemeinen* Zusammenhang näher beleuchten, welcher zwischen der Hamiltonschen partiellen Differentialgleichung (H.P.) eines mechanischen Problems und der „zugehörigen“ *Wellengleichung*, d. i. im Falle des Keplerproblems der Gleichung (5) der ersten Mitteilung, besteht. Wir hatten diesen Zusammenhang vorläufig nur kurz seiner äußeren analytischen Struktur nach beschrieben durch die an sich unverständliche Transformation (2) und den ebenso unverständlichen Übergang von der *Nullsetzung* eines Ausdrucks zu der Forderung, daß das *Raumintegral* des nämlichen Ausdruckes *stationär* sein soll.²⁾

Der *innere* Zusammenhang der Hamiltonschen Theorie mit dem Vorgang der Wellenausbreitung ist nichts weniger als neu. Er war Hamilton selbst nicht nur wohlbekannt, sondern bildete für ihn den Ausgangspunkt seiner Theorie der Mechanik, die aus seiner *Optik inhomogener Medien* hervorgewachsen ist.³⁾ Das Hamiltonsche Variationsprinzip kann

1) Siehe diese Annalen 79. S. 361. 1926. Es ist zum Verständnis nicht unbedingt nötig, die erste Mitteilung vor der zweiten zu lesen.



§ 2. Die Bedingung (15) ergibt

$$(19) \quad -E_l = \frac{m e^4}{2 K^2 l^2}.$$

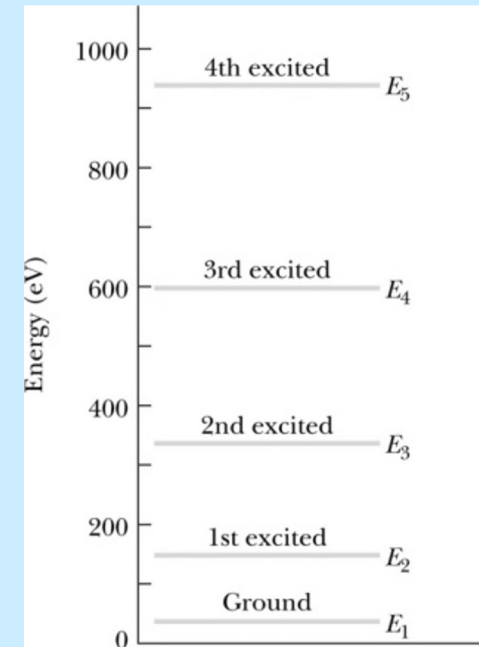
Es ergeben sich also die wohlbekanntenen Bohrschen Energieniveaus, die den Balmertermen entsprechen, wenn man der Konstante K , die wir in (2) aus dimensionellen Gründen einführen mußten, den Wert erteilt

$$(20) \quad K = \frac{h}{2\pi}.$$

Dann wird ja

$$(19') \quad -E_l = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 l^2}.$$

Unser l ist die Hauptquantenzahl. $n + 1$ hat Analogie mit der Azimutalquantenzahl, die weitere Aufspaltung dieser Zahl bei der näheren Bestimmung der Kugelflächenfunktionen kann mit der Aufspaltung des Azimutalquants in ein „äquatoriales“ und ein „polares“ Quant in Analogie gesetzt werden. Diese Zahlen bestimmen *hier* das System der Knotenlinien auf der Kugel. Auch die „radiale Quantenzahl“, $l - n - 1$ bestimmt genau die Zahl der „Knotenkugeln“, denn man kann sich leicht überzeugen, daß die Funktion $f(x)$ in (18) genau $l - n - 1$



氫原子能階

薛丁格能嚴格地得到正確的氫原子能階是天大的成就！

而且完全只用大家所熟悉的波的概念！

這個方法到現在都是解氫原子能階最簡單的方法。





Heisenberg's mother, Schrodinger's wife, Dirac's mother, Dirac, Werner Heisenberg, Erwin Schrodinger at Stockholm train station, Nobel prize award ceremony, 1933

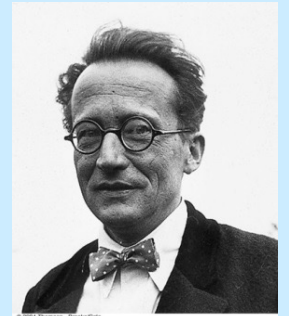
Credit Line: Max-Planck Institute, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives

儘管是量子力學的先驅，薛丁格對量子力學後來的哥本哈根解釋極度不滿！

Schrodinger, sick, on bed side said to Bohr, 1926

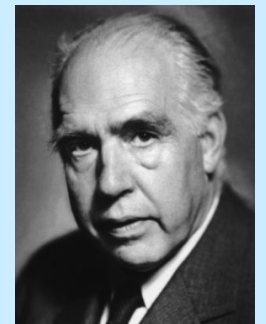
There is no hope. The whole idea of quantum jumps leads to nonsense. If we are going to have to put up with these damn quantum jumps, I am sorry that I ever had anything to do with quantum theory.

量子躍遷這整個概念就是無稽之談，假如我非得忍受這樣的概念，我很後悔我跟量子理論有任何關係。



The rest of us are very thankful for wave mechanics for its clarity and simplicity.

我們大家都非常感激你所發明的波動力學，因為它的清晰與簡單的特性。



Bohr returned, 1926

愛因斯坦也是如此！

Quantum Mechanics is very imposing. But an inner voice tells me that it is not real thing. The theory delivers a lot but hardly brings us closer to the secrets of the **Old One**. I for one am convinced that He does not **throw dice**.

Einstein to Born 1926

量子力學很令人印象深刻，但我內心有一個聲音告訴我，這不是真實的東西。這個理論可以產生很多預測，但並沒有使我們更接近上帝的秘密。我個人深信上帝是不玩骰子的。

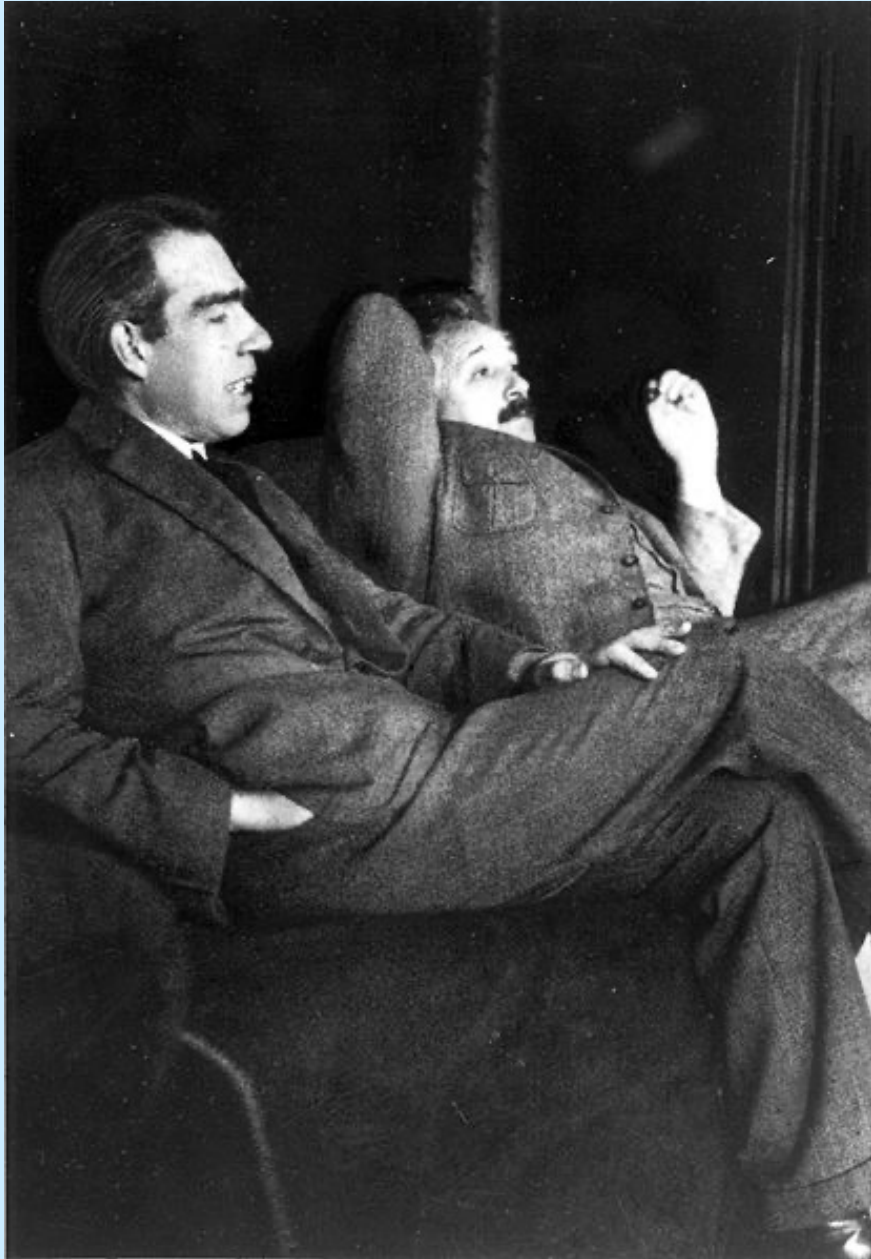


歷史性的對決！1927索爾未會議。



A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J. E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin;
P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr;
I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch.-E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson

Fifth conference participants, 1927. Institut International de Physique Solvay in Leopold Park.



討論極度激烈！



ACTORS PLAYING EINSTEIN AND BOHR ADD A BIT OF DRAMA TO THE GALA...

GOTT SPIELT NICHT
WÜRFEL MIT DEM
UNIVERSUM!



Paul Diugokenky

©2005 Paul Diugokenky (aDailyCartoon.com) for APS News

以波爾為首的哥本哈根解釋大勝



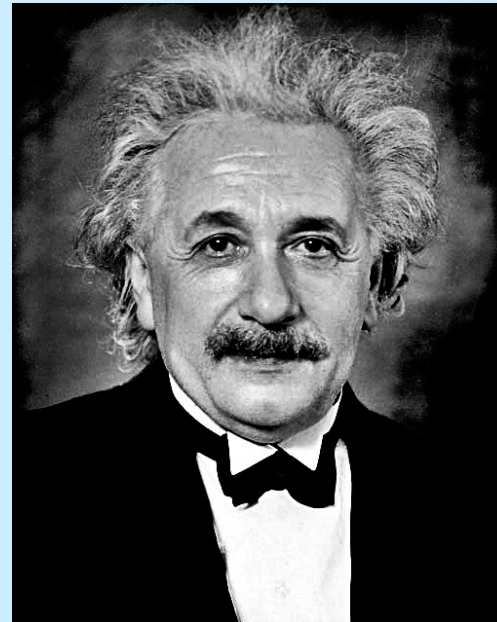
The soothing Heisenberg-Bohr philosophy-or religion?-is so nicely made that for now it offers the true believer a soft pillow from which it's not easily roused. **So let him lie.** Einstein

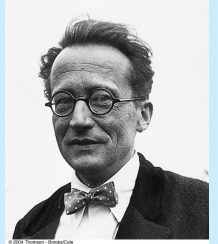
舒服的海森堡、波爾哲學，還是宗教？

是如此精工打造，暫時提供信仰者一個柔軟的枕頭，躺上去就很難叫醒。

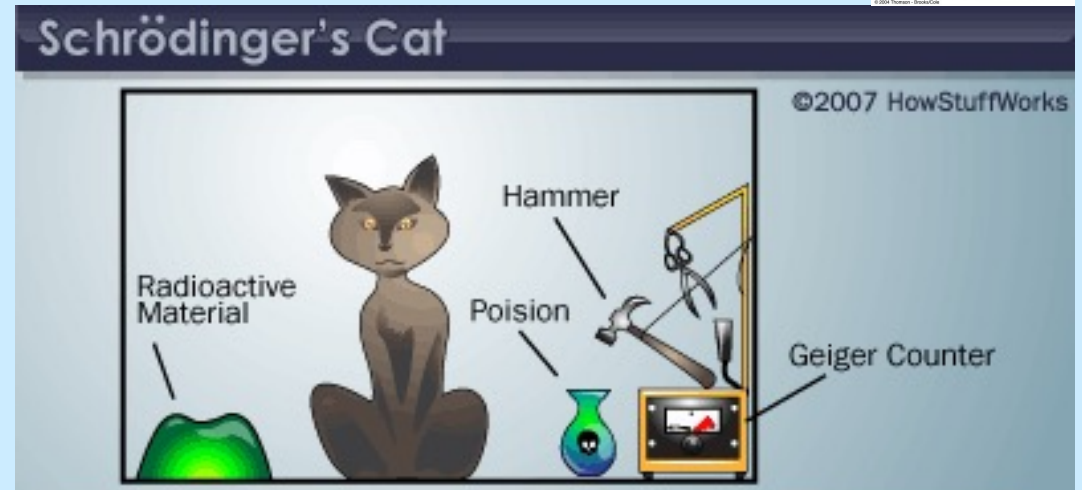
就讓他們睡吧！

但兩人並不就此罷手！



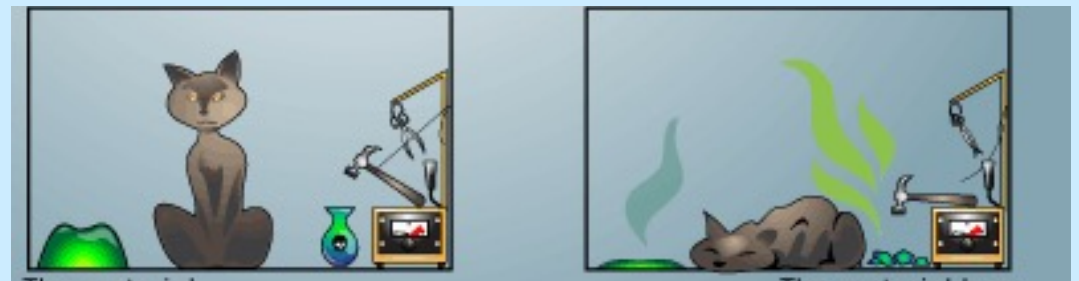


「讓我們安排一個非常可笑的情況。將一隻貓放進一鐵箱，再放入一個啟動裝置，但要小心防止貓咪破壞它。在這裝置中有一測放射性的蓋格計數器，並放入微量放射性元素。」

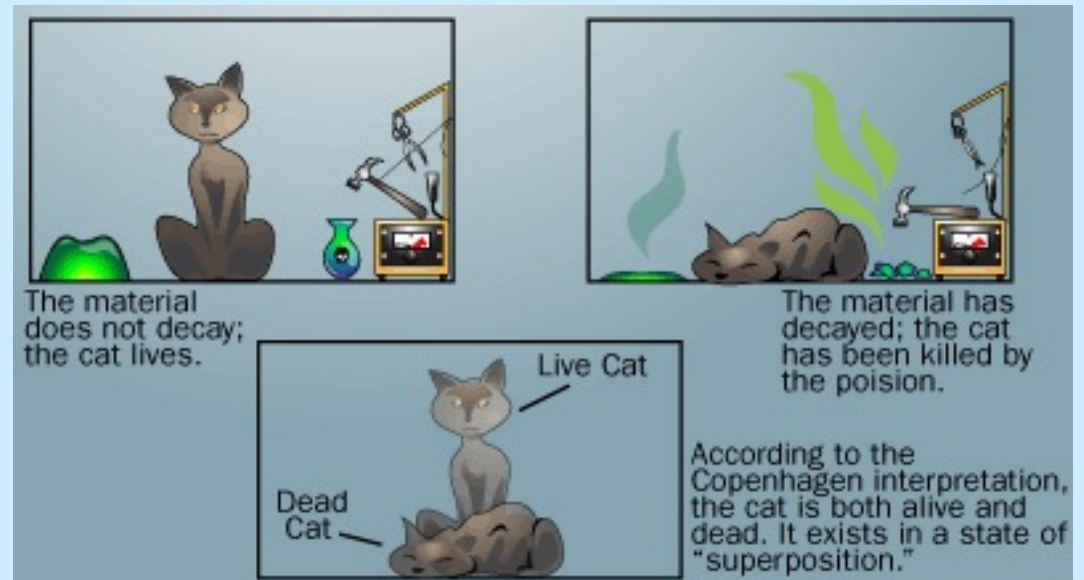


「假如這放射性原子核衰變了，蓋格計數器會偵測到，它帶動一個錘子，恰好打破一罐密封的劇毒氣體，導致貓中毒死亡。右圖。

但如果原子核沒有衰變，上述的聯動就沒有運作，貓就沒事。左圖」

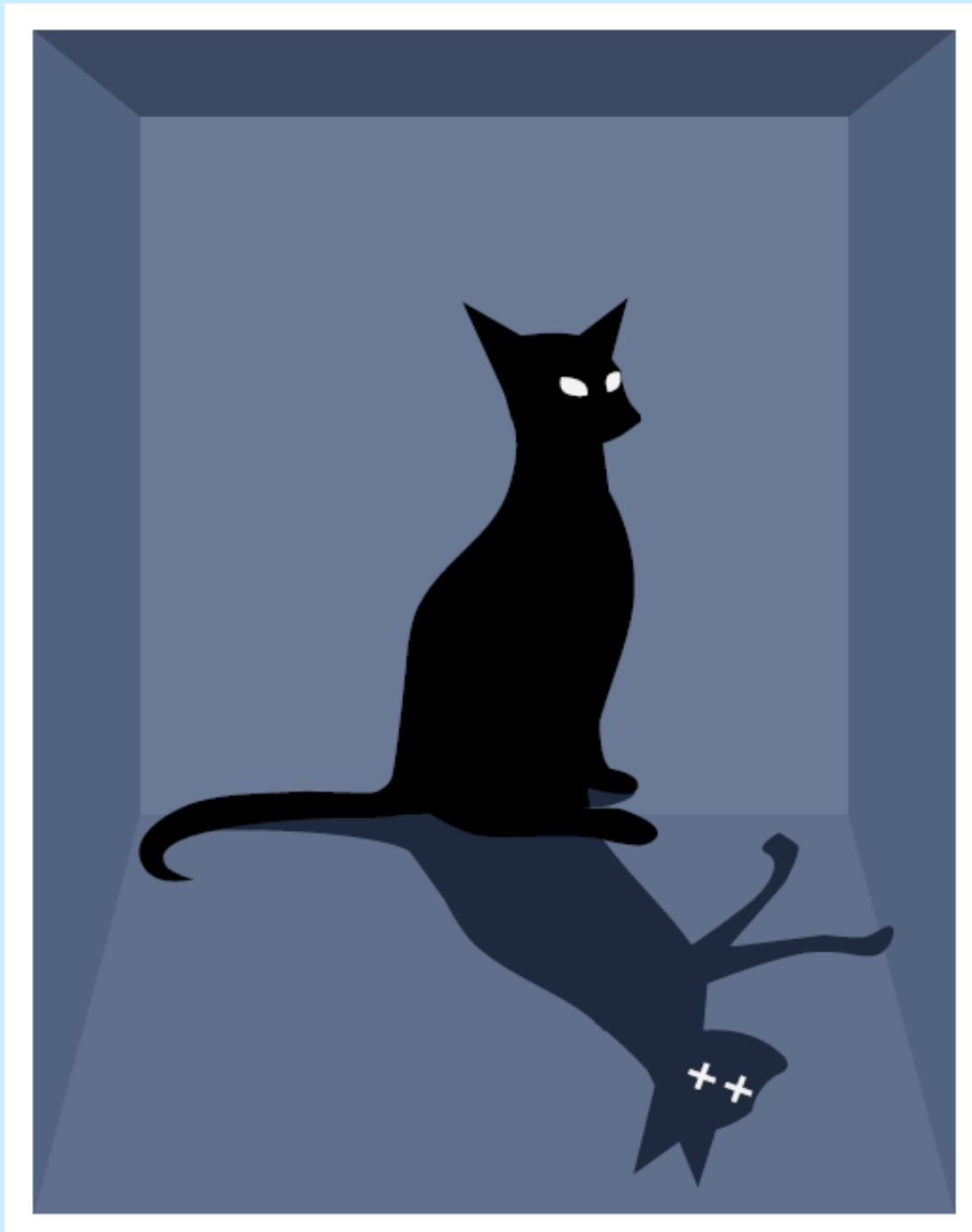


「我們密封鐵箱一個小時後，根據量子力學，整個系統的狀態，就會是放射性原子核未衰變而貓活，同時也可能是原子核已衰變而貓死。」



但**如果我們不打開鐵箱**，貓的波函數 Ψ 就會包含既是死、又是活的貓。
貓的主人一定很著急，千萬不要真的做這實驗。





SCHRÖDINGER

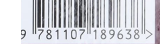


IS DEAD.

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

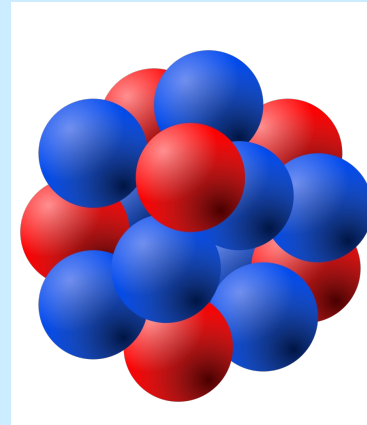
www.cambridge.org

ISBN 978-1-107-18963-8

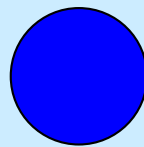


9 781107 189638 >

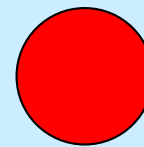
現在來一點技術性的背景介紹，以了解薛丁格的貓這個故事。
Atomic nucleus 原子核由核子組成。



A nucleon 核子 is either a proton or a neutron.



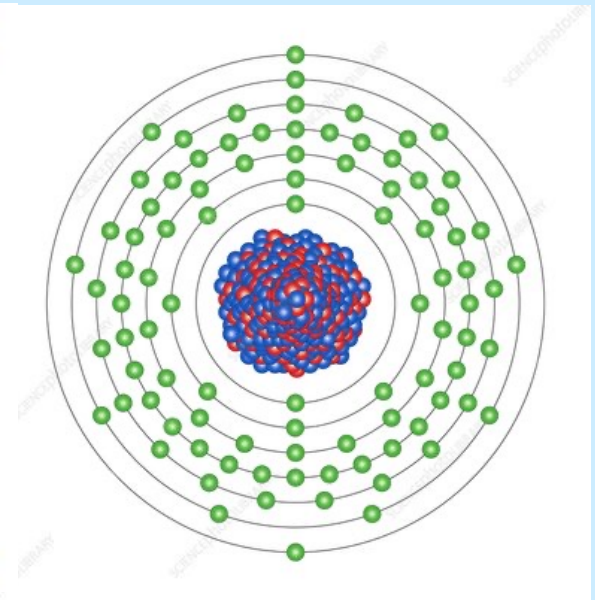
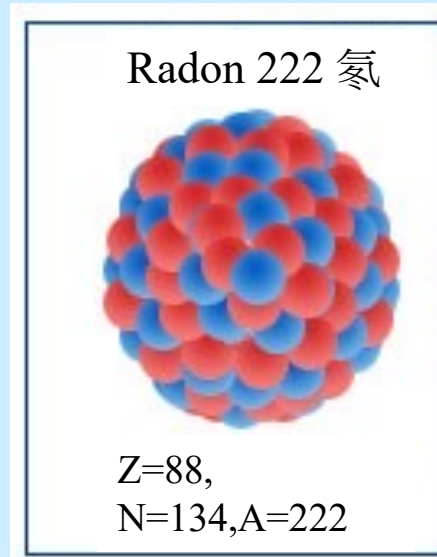
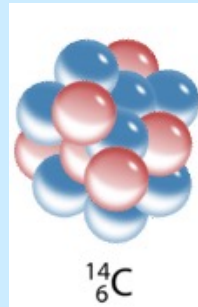
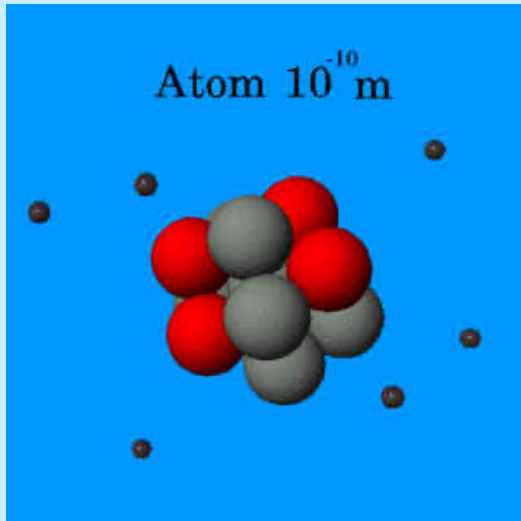
Neutron



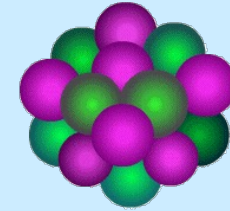
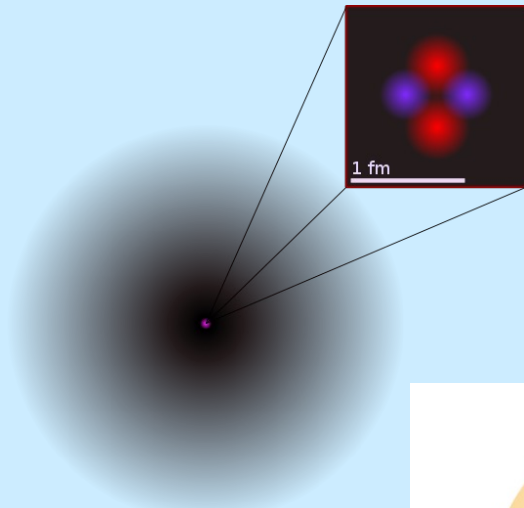
Proton



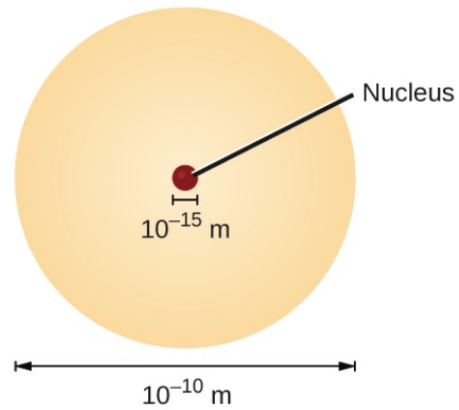
與質子等數目的電子圍繞著原子核就形成原子。



原子內的正電與大部分的質量集中於極小的**原子核 Nucleus**



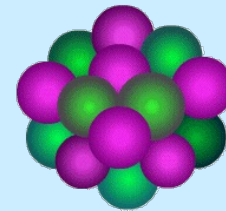
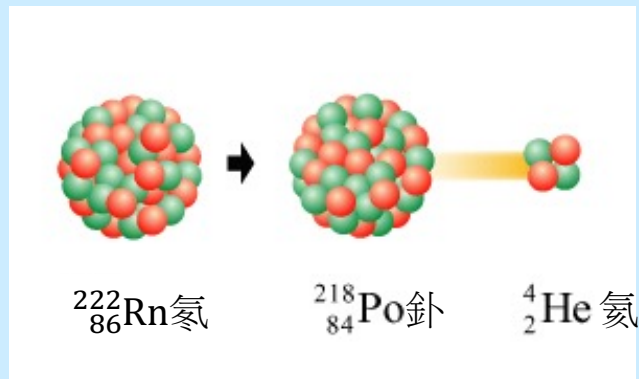
1 Ångström (=100,000 fm)



If an atom could be expanded to the size of a football stadium, the nucleus would be the size of a single blueberry. (credit middle: modification of work by "babyknight"/Wikimedia Commons; credit right: modification of work by Paxson Woelber)

Radioactive decay 放射性原子核衰變

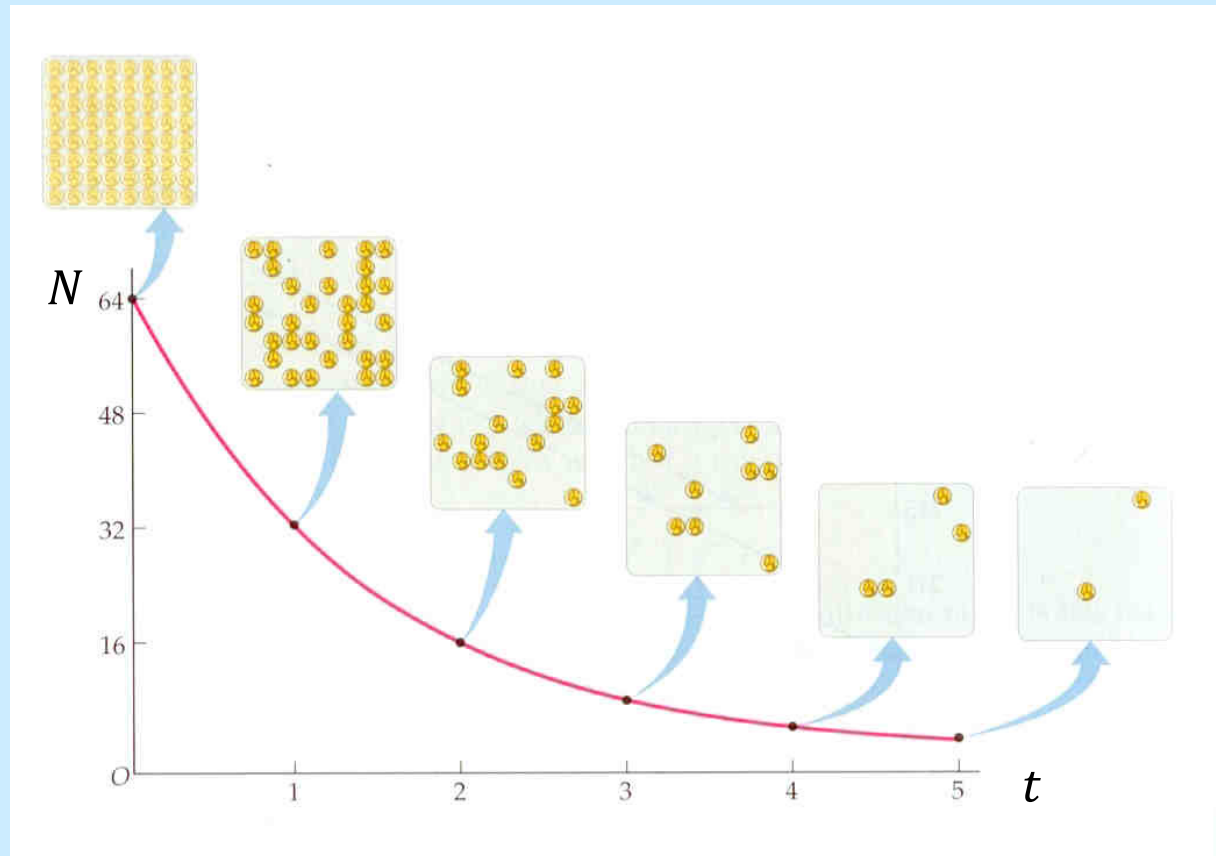
原子核若含大量核子，常會不穩定，會衰變decay(解體?)為較穩定的原子核。
衰變時會放射出高能量的粒子，具有殺傷力，就稱為放射性原子核！



例如放射性的氡(カメム)原子核，衰變時分裂為較小的釷(カチ)原子核、
加上更小的氦原子核。

高能量的氦原子核就具有殺傷力。





實驗發現：一大群氫原子核，
經過一段稱為半衰期的時間(四天)，數量會減半，
意思是有一半的氫原子核衰變成鈾，一半的氫原子核沒有衰變。

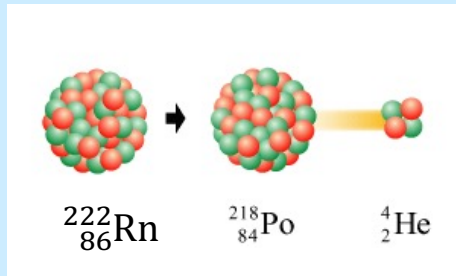


福島放流水中含氫的放射性同位素氚，
氚衰變所放出的能量只有典型衰變的百分之一，根本無法穿透人的皮膚。
半衰期則是12年。

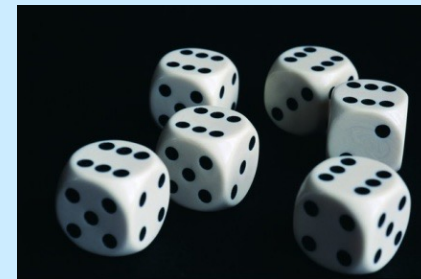
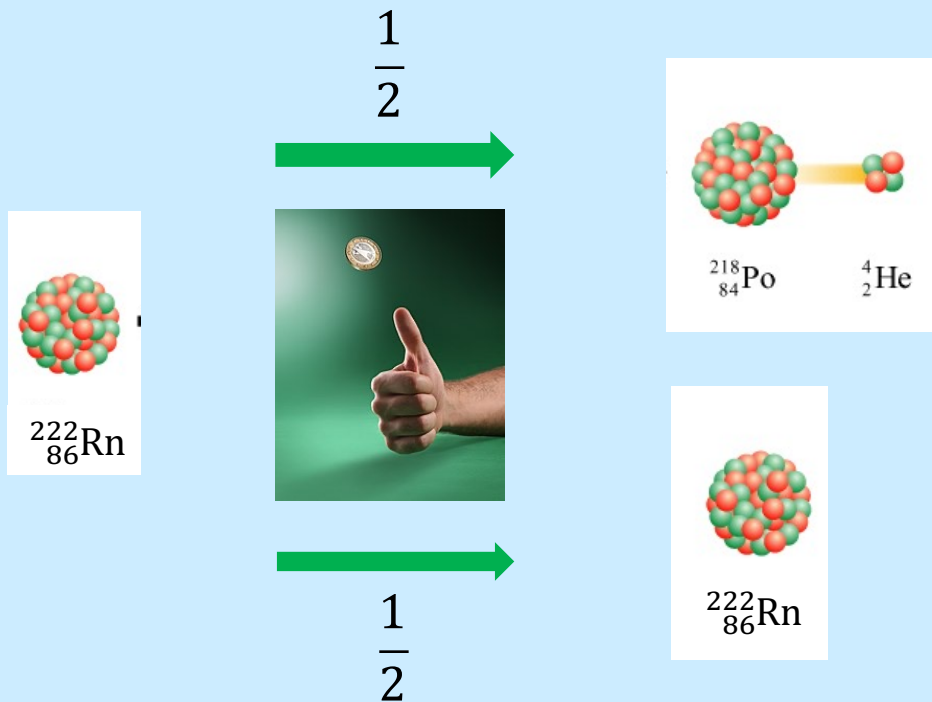
麻煩的是每一顆氡原子核都完全相同。

所以沒有任何條件，讓我們能憑藉來預測單一一顆氡原子核是否衰變，
換句話說，即使完全相同的氡原子核，它的命運，都不相同。

可以說是每一顆氡原子核擲一次兩面的硬幣，決定自己的命運，是死是活！



機率對每一顆相同的原子核是公平的，
一個半衰期後衰變發生的機率就是 $\frac{1}{2}$ 。





注意這與種菜不一樣！種同一種菜的確也有一定的機率長不出來。
但這是因為農場的每一株菜本來就不同，一樣品種還是有先天與後天的差異。
機率使用於科學，反映了我們的**無知**、或說**缺乏全知**。但全知似乎存在。
但每一個放射性原子核都是一模一樣的，無從分辨，環境也控制相同。
根據科學的確定性原則，照理講應該有一樣的測量結果。
但事實就是：完全相同的原子核，它的命運：何時及是否衰變，卻不相同。
全知並不存在！

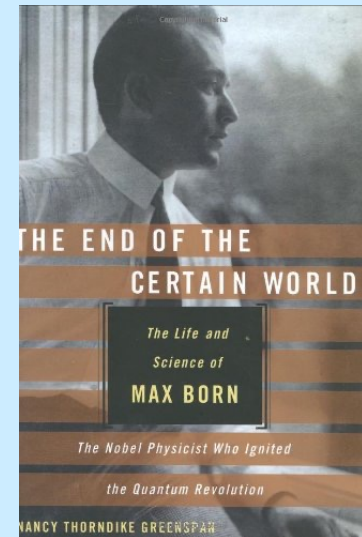
同樣的因，卻不見得得到同樣的果！這是量子力學第一個極詭異之處。

不確定性開始登陸了！

In Quantum Mechanics, there exists no quantity which in an **individual case** can determine the result of a collision. I myself is inclined to give up **determinism** in atomic world.

在量子力學之中，不存在任何量可以讓我們決定單一一次散射的結果。
我個人傾向在原子世界中放棄因果決定論！

Max Born 波恩1926

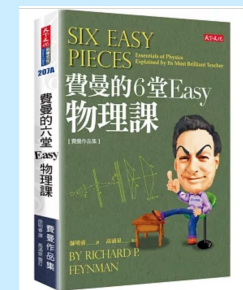


不確定性 Uncertainty

We would like to emphasize a very important difference between classical and quantum mechanics. We have been talking about the probability that an electron will arrive in a given circumstance. We have implied that in our experimental arrangement (or even in the best possible one) it would be impossible to predict exactly what would happen. We can only predict the odds! This would mean, if it were true, that physics has given up on the problem of trying to predict exactly what will happen in a definite circumstance. Yes! physics has given up. We do not know how to predict what would happen in a given circumstance, and we believe now that it is impossible, that the only thing that can be predicted is the probability of different events. It must be recognized that this is a retrenchment in our earlier ideal of understanding nature. It may be a backward step, but no one has seen a way to avoid it.

在一個特定情況下，我們無法預測會發生什麼事，是的，物理放棄了！

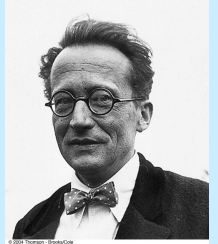
我們只能預測發生各種可能的事(衰變、不衰變)的機率！



這就是愛因斯坦的玩骰子的上帝！

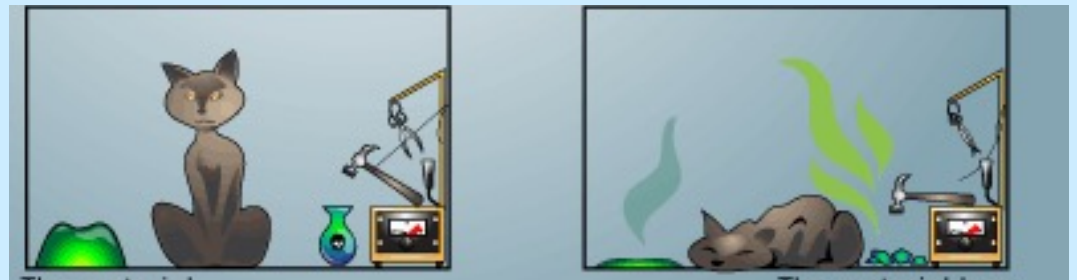
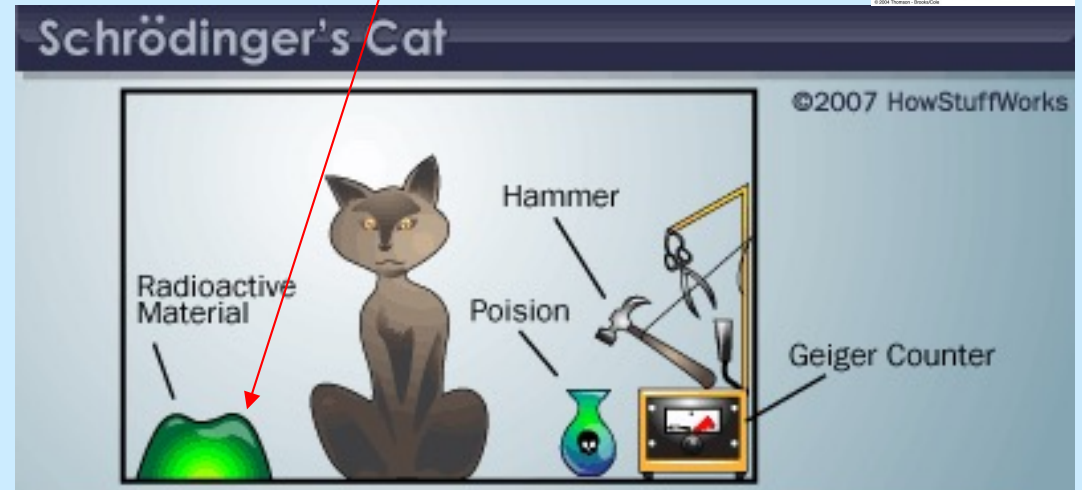
量子力學很令人印象深刻，但我內心有一個聲音告訴我，這不是真實的東西。這個理論可以產生很多預測，但並沒有使我們更接近上帝的秘密。我個人深信上帝是不玩骰子的。





讓我們回到薛丁格的貓故事中，想一下封閉於鐵箱內的原子核，

「讓我們安排一個非常可笑的情況。將一隻貓放進一鐵箱，再放入一個啟動裝置，但要小心防止貓咪破壞它。在這裝置中有一測放射性的蓋格計數器，並放入微量放射性元素。」



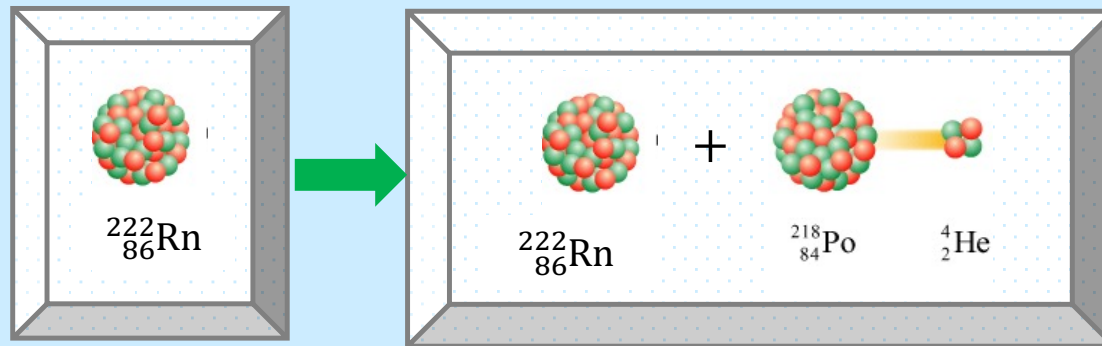
接下來比較技術性一點！

封閉於鐵箱內的原子核，事實上是處於一個非常奇特的狀態！

若不打開鐵箱看，一個半衰期時間後，原子核可能未衰變，同時也可能已衰變。

這一個特別的狀態，專業術語稱為**疊加 Superposition**。

此狀態是未衰變時氡原子核狀態，與衰變後釷原子核狀態，兩個狀態的疊加。

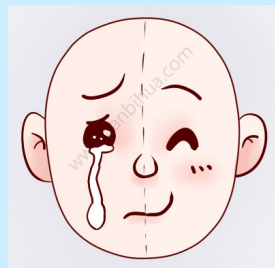


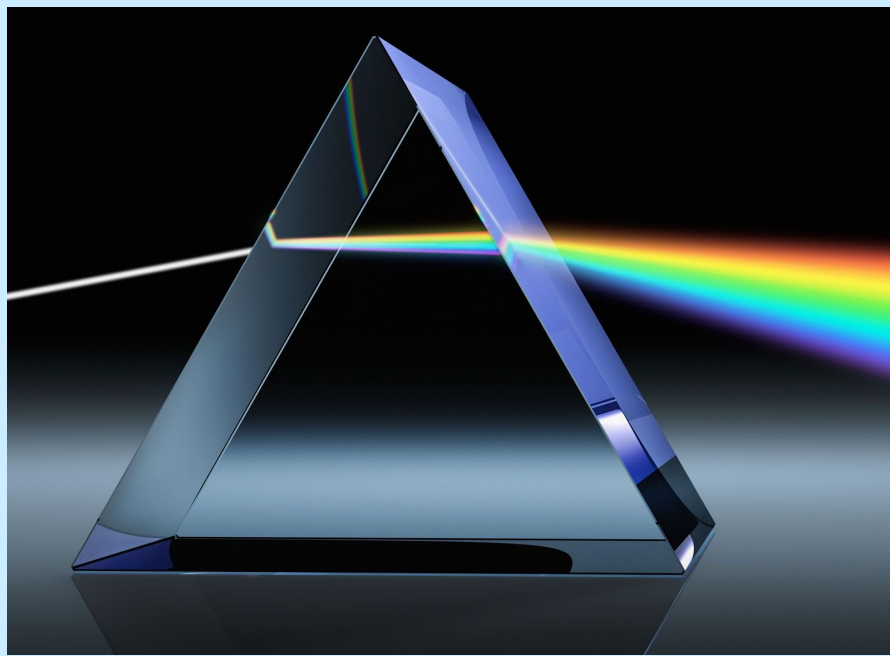
注意：此圖並不是一顆原子核
變成了三顆！

是一顆與兩顆的疊加。

疊加在某些時候非常自然，我們會說一個人的心情悲喜交加，

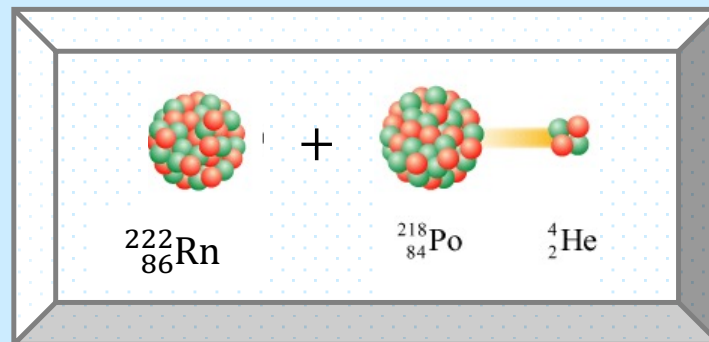
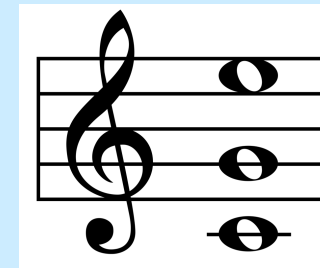
悲與喜是相反不相容的心情，但我們並不覺得悲喜交加很奇怪。





白光是七色光波的疊加，但又不同於任一單色光線。這也是非常自然的。

合聲也是一樣的道理，我們聽到的是四個個別發出的音波的疊加。

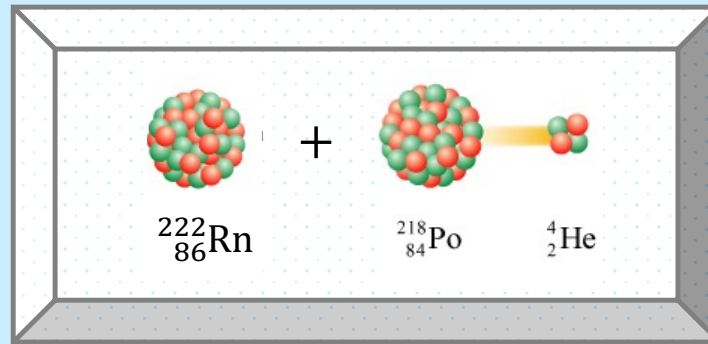


但注意：此圖並不是一顆原子核變成了三顆！是一顆與兩顆的疊加。
正確類比是四個人的疊加合聲，錄音後將音量調整回一個人的音量。
好像這是一個人發出的一樣，這大概太為難這人了，但原則上是可行的。

但如果我們說一個人的眼珠既是黑的，也是藍的，
是黑與藍的疊加，就有點怪了。

眼珠是藍就不會是黑，是黑就不會是藍。一看就知道。

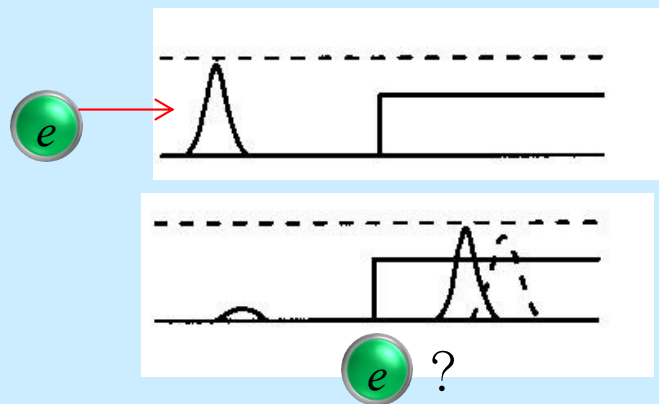




是氦原子核就不會是釷原子核，是釷原子核就不會是氦原子核。
 怎麼同時存在、像合聲一樣疊加？很奇怪？的確，但就是如此！

量子世界特性：量子的狀態可以是兩個古典情況下彼此**互不相容**的狀態的疊加！

這種微觀粒子的疊加性已經在實驗上完整驗證了。



鏡好聽 MIRROR VOICE 發現 節目 有聲書 課程 節目主持人/有聲書主播 訂閱說明 APP下載 登入/註冊

節目 知識好好玩
 EP07 | 電子的劈腿問題，它是一種波嗎？

主持人 | 張嘉泓
 單曲長度 | 00:17:54 發布時間 | 2021-07-06

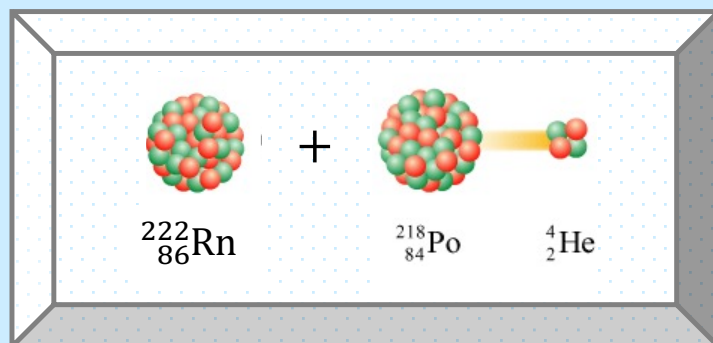
#張嘉泓 #物理好好玩 #波 #撞球 #量子性 #薛丁格 #波動力學

查看節目資訊 開始播放

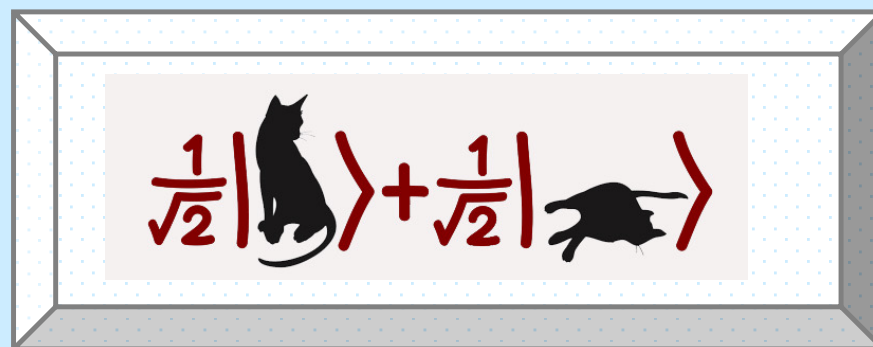
這顆散射後的電子，未觀察之前，同時在右邊、也在左邊。

疊加或劈腿對波很自然，電子是波，最重要的結果就是電子的可疊加、會劈腿。

原子核的狀態是，未衰變氡原子核狀態，與衰變後釷原子核狀態，的疊加。



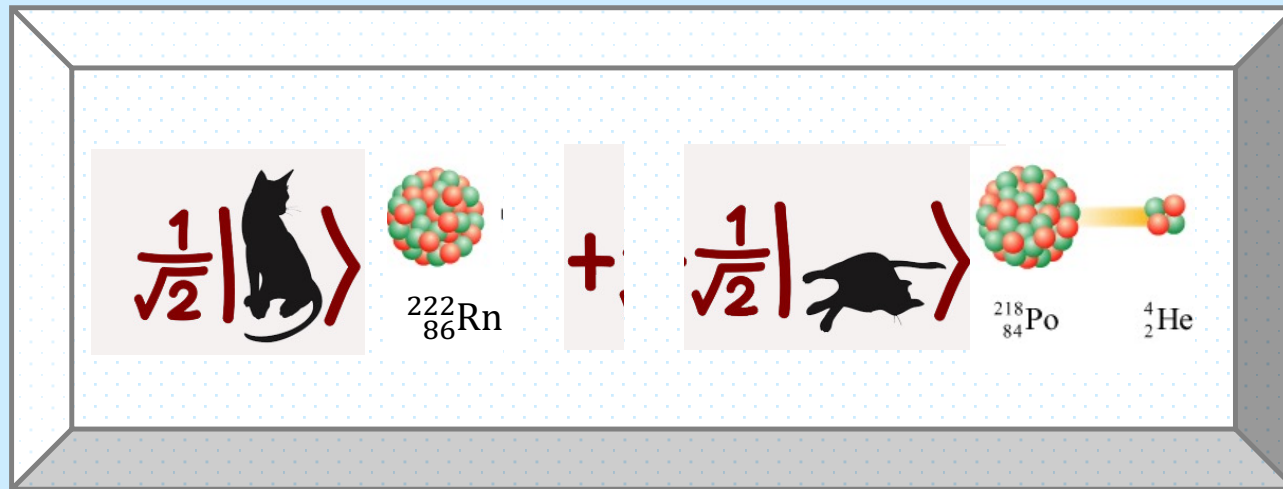
所以貓的狀態就會是生與死兩個狀態的疊加。



Mother Jones Daily



兩個圖可以合起來，就更清楚了。



薛丁格的貓這個故事的癥結就是貓與原子核的命運是糾葛的！

糾葛 **Entanglement** 的命運就是原子核不衰變則貓活、原子核核衰變則貓死！

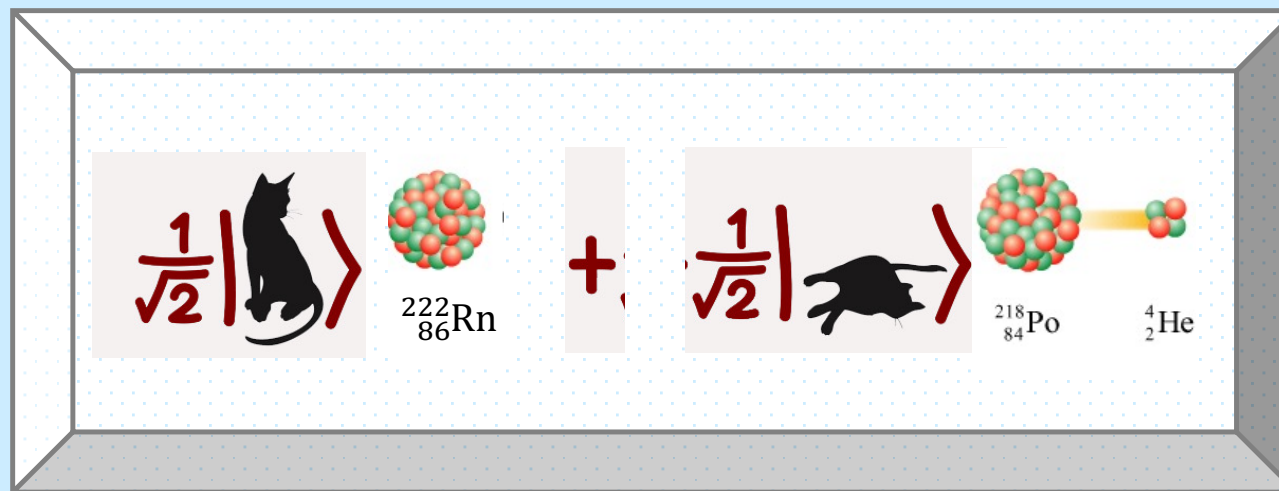
當初薛丁格很隨性的說：

「我們密封鐵箱一個小時後，整個系統的狀態波函數，就會是放射性原子核未衰變而貓活，同時也可能是已衰變而貓死。」



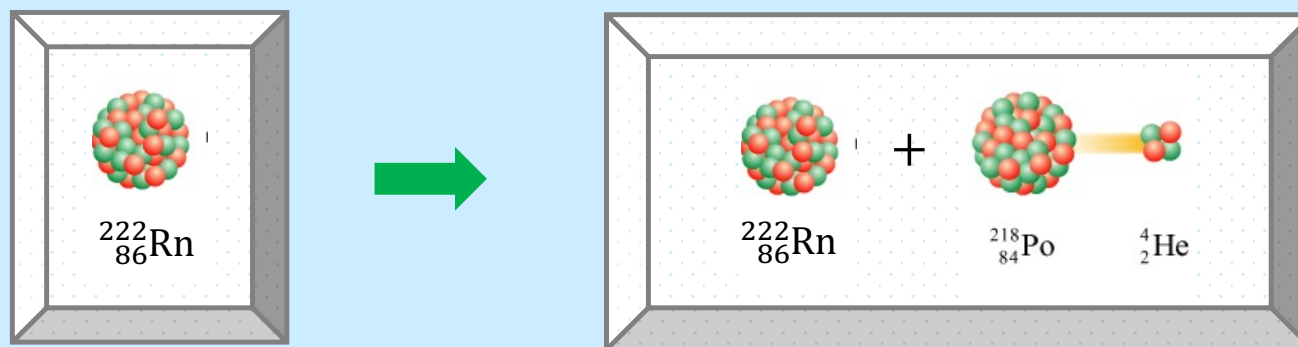
現代術語就會說是這時的整個鐵箱，是兩個狀態的疊加

“還活著的貓配未衰變的原子核”，加，“已死去的貓配已衰變的原子核”。



量子力學還預測如果不去打開來看，鐵箱會繼續維持此狀態。

這真的很奇怪，放在封閉鐵箱中不去觀察，狀態會演化為兩個不相容狀態的疊加。



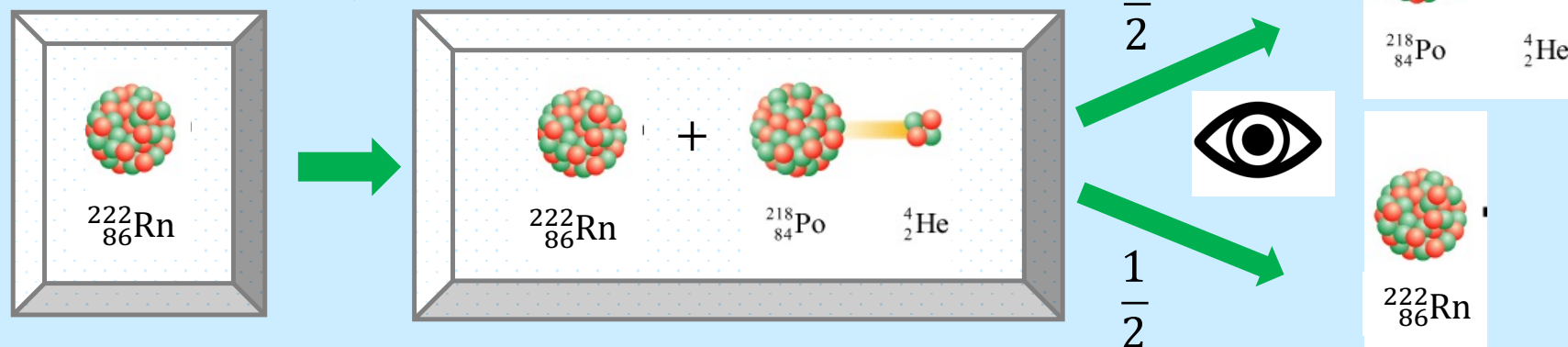
但若是我硬要去觀察它呢？

是氦原子核就不會是鈾原子核，反之亦然。一番兩瞪眼。

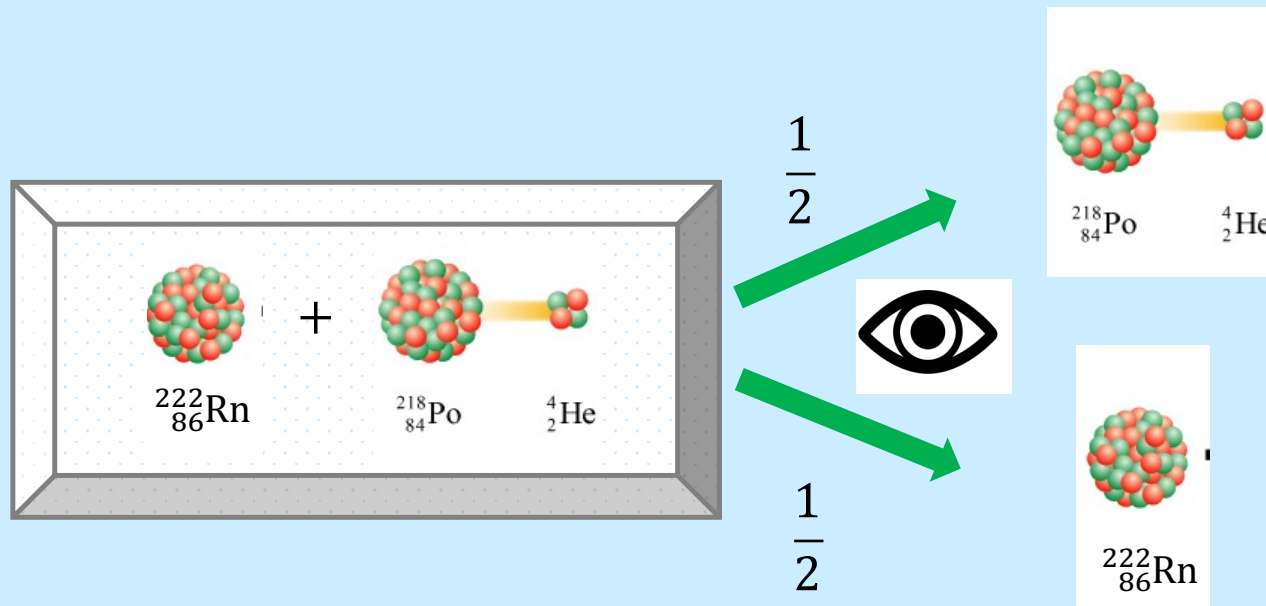
實驗結果的確如此，果然看到的是氦、一半機率，或看到的是鈾、一半機率。

不會同時，當然，

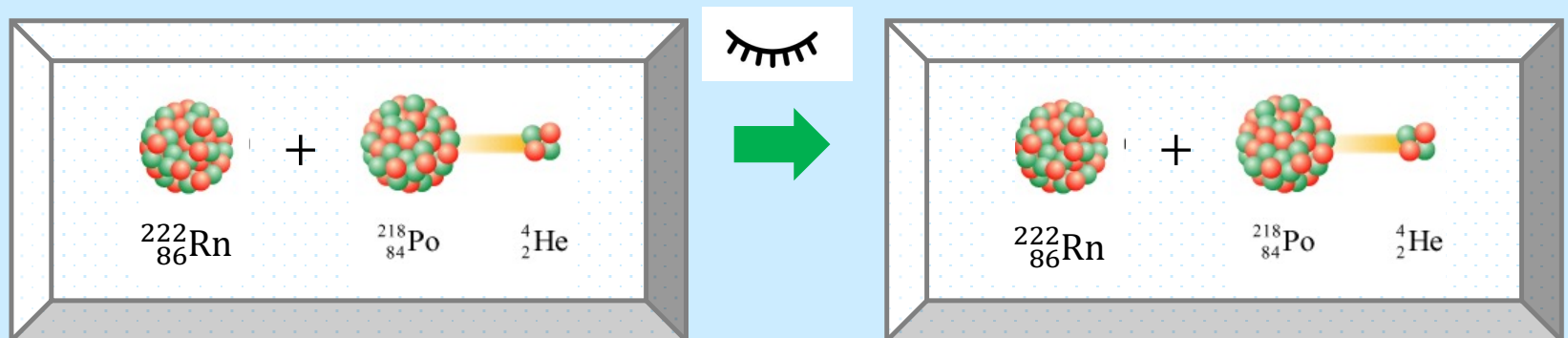
因此物理的預測是不確定的！

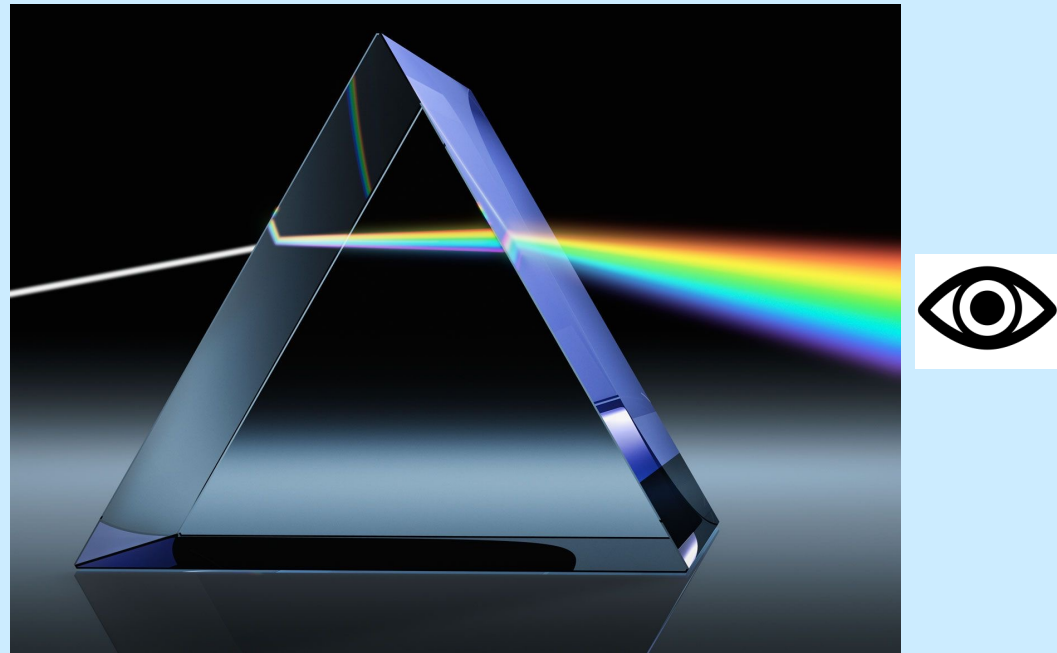


而且機率 $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ ，全了，沒有其他介於兩者之間的結果的可能性了。



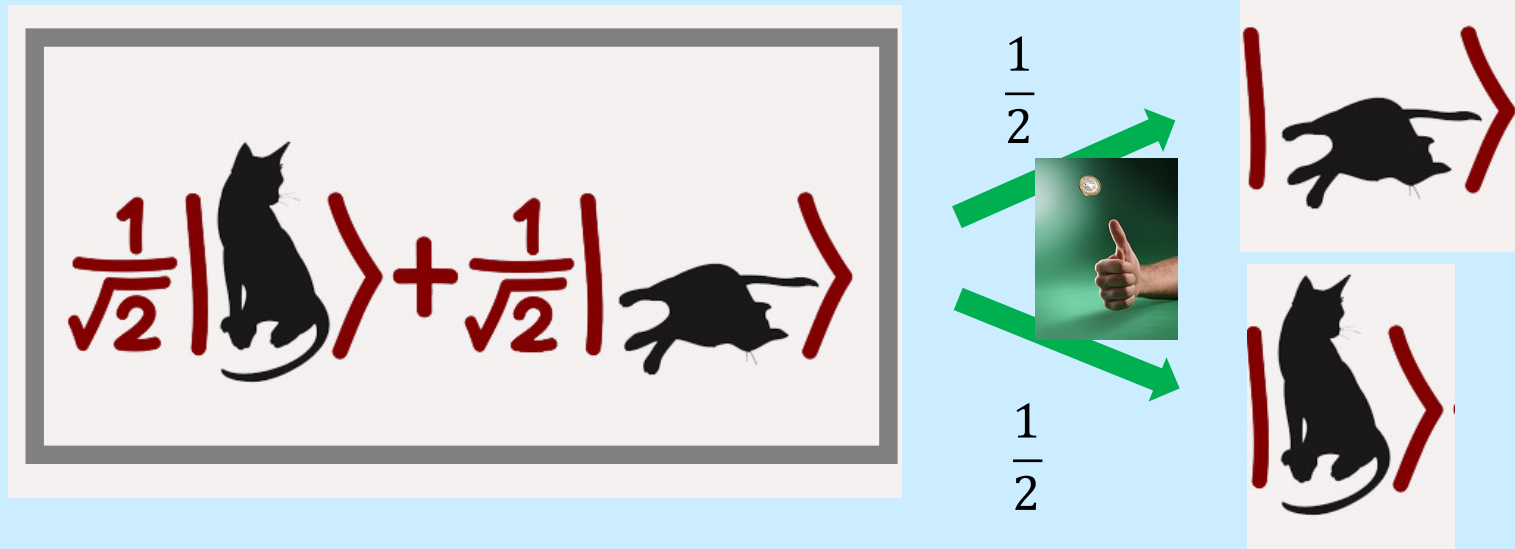
但注意：你的觀測，事實上改變了原子核的狀態。
 看的這個動作，事實上以無法控制的方式、
 改變了被看的物體的狀態。(意思是你無法決定如何改變！)
 由奇特的疊加狀態**崩潰 collapse** 成了片面的、確定的狀態。
 反之，不觀測，左方的奇特疊加性就能繼續維持。





這有點像白光被三菱鏡分解成七種顏色的光。
只是每一次測量都只有一種色光會出現。
但每一個色光出現機率一樣！

沒打開鐵箱前，貓的狀態是生與死兩個狀態的疊加。



打開鐵箱後，貓的狀態就崩潰為生或死。不會同時，但兩者發生機率相等！
這好像看的那一瞬間，有人擲了一次銅板來決定情節。這不是上帝、是誰？

量子力學的原則完整版

某瞬間時刻的狀態 \longrightarrow 狀態函數 $\psi(x)$ 可疊加，組成一無限維向量空間！
可測量的物理量 \longrightarrow 運算子 \hat{A} 滿足歸一化條件。

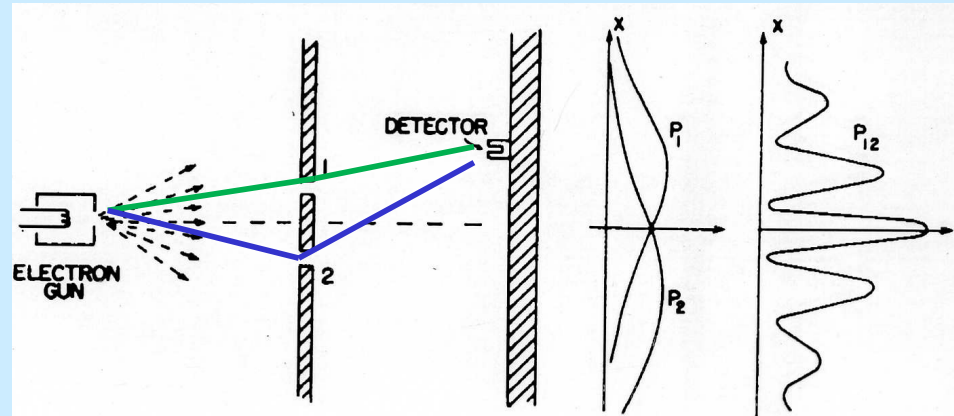
兩個古典情況下彼此互不相容的狀態 $\psi_{1,2}(x)$ 的疊加就是兩個狀態函數的和！

$$\psi_{12}(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$$

這是再自然不過的事了！

電子狀態是可以疊加的！

一個波函數可以由兩個古典情況下彼此互不相容的波函數疊加而成

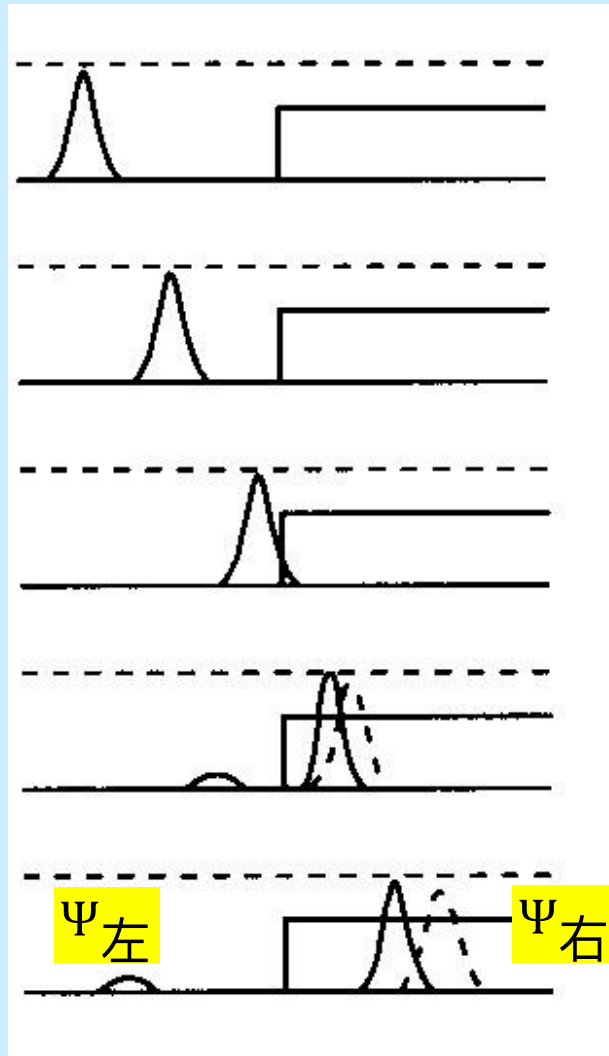


對於古典牛頓粒子而言，通過狹縫1及通過狹縫2是不相容的。

到達屏幕的一顆電子的狀態，就是通過狹縫1及狹縫2的電子狀態的疊加！

$$\psi_{12}(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$$

電子的波性，就只在於電子的狀態滿足”波”也滿足的疊加定律。



一個波包在撞擊位階後會分裂為一個透射的波包與一個反射的波包。
 這個散射後的電子態可以視為一個向右的波包與向左的波包的疊加。

$$\Psi = a\Psi_{\text{左}} + b\Psi_{\text{右}}$$

向左走與向右走顯然是不相容的。

如果封閉的鐵箱，是一個如夢境般、無法理解的量子現實，

觀察observation這個舉動，把我們拉回現實！其中機率扮演關鍵的角色。

要接受有**疊加**狀態的事實，物理學家必須付出**不確定性**的代價。

這是愛因斯坦無法吞下去的！

量子力學很令人印象深刻，但我內心有一個聲音告訴我，這不是真實的東西。這個理論可以產生很多預測，但並沒有使我們更接近上帝的秘密。我個人深信上帝是不玩骰子的。 Einstein to Born 1926



愛因斯坦、薛丁格無法接受的，正就是哥本哈根解釋的核心。



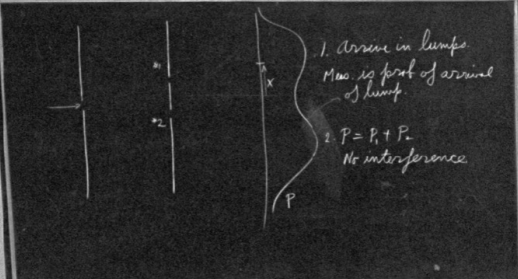
The soothing Heisenberg-Bohr philosophy-or religion?-is so nicely made that for now it offers the true believer a soft pillow from which it's not easily roused. **So let him lie.** Einstein

舒服的海森堡、波爾哲學，還是宗教？

是如此精工打造，暫時提供信仰者一個柔軟的枕頭，躺上去就很難叫醒。

就讓他們睡吧！

儘管愛因斯坦無法苟同，大部分物理學家選擇繼續睡！

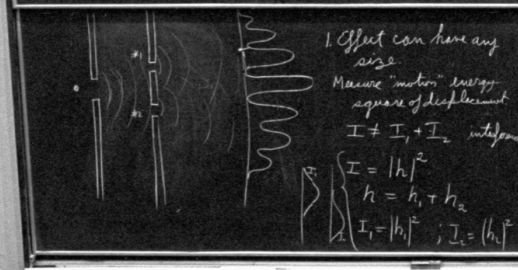


1. Arrive in lumps
 Max. is prob. of arrival
 of lump.
 2. $P = P_1 + P_2$
 No interference.

Proposition A: The electron either goes thru hole #1 or it goes thru hole #2.

SUMMARY ELECT. RADIATION (LKRAT)
 APRIL 3, 1962
 LECTURE 37
 QUANTUM BEHAVIOUR

Action of fields on a charge: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$
 Fields \vec{E}, \vec{B} produced by many charges = sum of field \vec{E}, \vec{B} produced by each one.
 (At large distances) \vec{E} field produced by one (non-relativistic) = $-\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{R^2}$
 \vec{E}, \vec{B} are \perp to direction of source. $\vec{B} \perp \vec{E}$; $|\vec{B}| = \frac{1}{c} |\vec{E}|$
 Intensity = Energy/m²sec = $\epsilon_0 c |\vec{E}|^2$
 Fields from sources drive charges in matter to oscillate creating new fields which produce effects such as reflection, refraction, absorption (by interference with original source field), etc.



1. Effect can have any size
 Max. "moton" energy = square of displacement
 $I \neq I_1 + I_2$ interference
 $I = |h_1 + h_2|^2$
 $I_1 = |h_1|^2$; $I_2 = |h_2|^2$

Summary 1. The probability of an event (in ideal experiment - no question about distribution) is absolute square of complex quantity called probability amplitude.
 2. When event can occur in several alternative ways, the prob. amp. is the sum of a prob. amp. for each way considered separately.
 3. If an experiment, capable of determining which alternative is actually taken, is performed, the interference is lost & the prob. is the sum of the prob. for each alternative.

Prob. Amp. of:
 1. Prob = $|P|^2$
 2. 2 alternatives $P = P_1 + P_2$ or $P = |P_1 + P_2|^2$
 3. 2 alternatives, dist. $P = |P_1|^2 + |P_2|^2 = P_1 + P_2$



new fields which produce effects such as reflection, refraction, absorption (by interference with original source field), etc.

Summary of Lecture (Quantum Behaviour)

1. The probability of an event (in ideal experiment - no uncertain external disturbances) is absolute square of complex quantity called probability amplitude.
2. When event can occur in several alternative ways, the prob. amp. is the sum of a prob. amp. for each way considered separately.
3. If an experiment, capable of determining which alternative is actually taken, is performed, the interference is lost & the prob. becomes the sum of the prob. for each alternative.

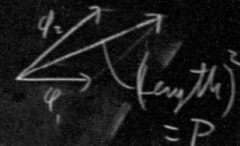
Call Prob. Amp. ϕ :

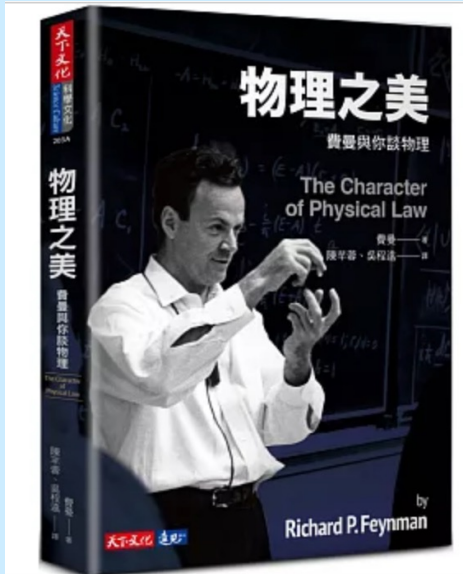
1. Prob = $|\phi|^2$

Call Prob. P :

2. If two alternatives $\phi = \phi_1 + \phi_2$ so $P = |\phi_1 + \phi_2|^2$

3. In the case 3. above: $P = |\phi_1|^2 + |\phi_2|^2 = P_1 + P_2$





I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. So do not take the lecture too seriously, feeling that you really have to understand in terms of some model what I am going to describe, but just relax and enjoy it.

I am going to tell you what nature behaves like. If you will simply admit that maybe she does behave like this, you will find her a delightful, entrancing thing. Do not keep saying to yourself, if you can possible avoid it, "But how can it be like that?" because you will get 'down the drain', into a blind alley from which nobody has escaped. Nobody knows how it can be like that.

我將描述給你聽自然是如何運作的。你如果乾脆承認自然就是如此運作的，你會覺得它是蠻可愛的，但如果你一直問這怎麼可能呢？我可以告訴這將是一條死胡同，因為，沒有人知道這為什麼會是可能的。

Because atomic behavior is so unlike ordinary experience, it is very difficult to get used to and it appears peculiar and mysterious to everyone, both to the novice and to the experienced physicist. Even the experts do not understand it the way they would like to, and it is perfectly reasonable that they should not, because all of direct, human experience and of human intuition applies to large objects. We know how large objects will act, but things on a small scale just do not act that way. So we have to learn about them in a sort of abstract or imaginative fashion and not by connection with our direct experience.

In this chapter we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the *only* mystery.

We cannot explain the mystery in the sense of “explaining” how it works. We will *tell* you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics.

We can not explain the mystery in the sense of “explaining” how it works.

We will tell you how it works.

這樣的務實態度竟然有一句話可以形容：



Physicists Edward Bowen (left), Lee DuBridge (centre) and I. I. Rabi work on a cavity magnetron in the 1940s.

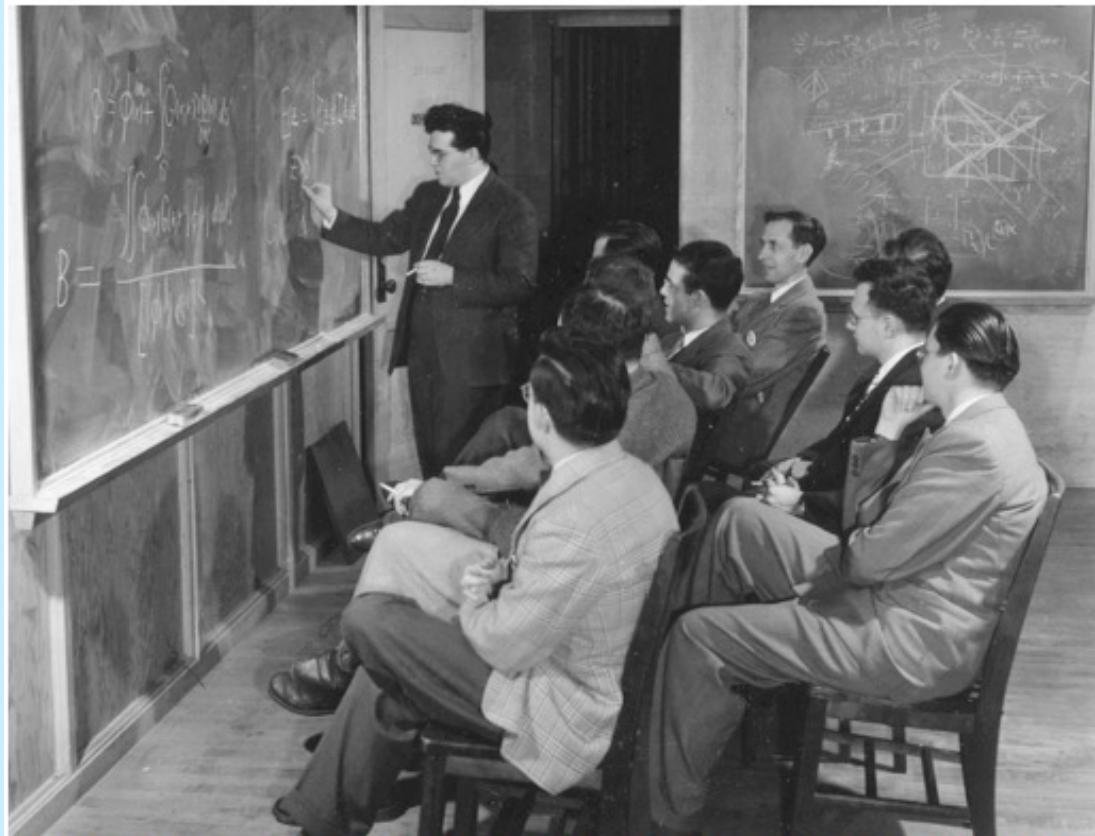
Shut up and calculate!

Practical, interdisciplinary ways of working forged during the Second World War had a lasting impact on a generation of physicists and their findings, says David Kaiser.

閉嘴！算就是了！

9 JANUARY 2014 | VOL 505 | NATURE | 155

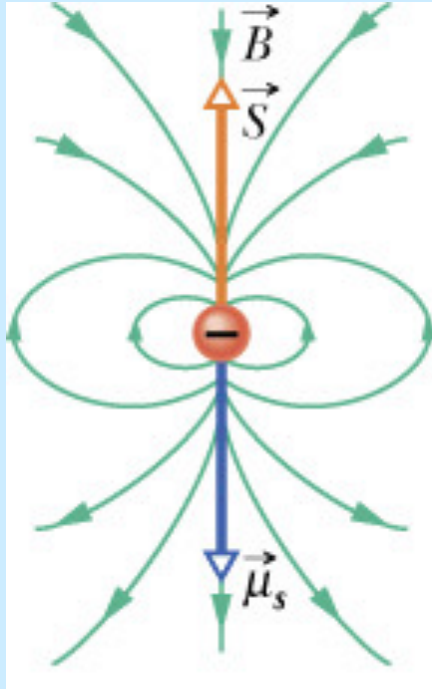
逃避雖然可恥，但卻有用。



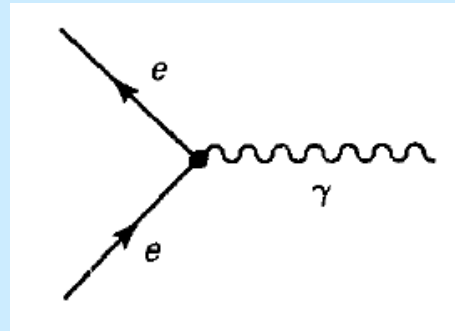
MIT MUSEUM

Julian Schwinger (standing) with colleagues at MIT's Radiation Laboratory during the Second World War.

量子電動力學對電子的磁偶極的計算驚人地極度準確！



$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{s} = -g \frac{e}{2m} \vec{s}$$

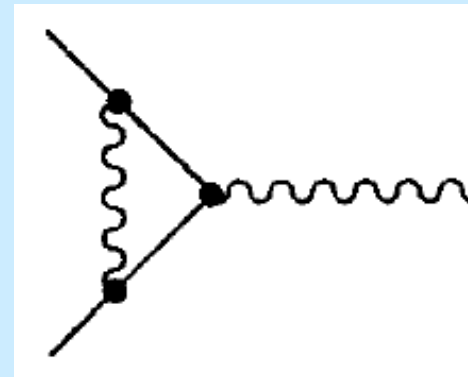


This first order diagram predict $g = 2$.

The following diagram gives the leading correction.

$$\frac{1}{2} g_{\text{theory}} = 1 + (1159652187.9 \pm 8.8) \times 10^{-12}$$

$$\frac{1}{2} g_{\text{experi}} = 1 + (1159652188.4 \pm 4.3) \times 10^{-12}$$



量子電動力學極度正確！



The Nobel Prize in Physics 1965

Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard P. Feynman

The Nobel Prize in Physics 1965

Sin-Itiro Tomonaga

Julian Schwinger

Richard P. Feynman



Sin-Itiro Tomonaga



Julian Schwinger



Richard P. Feynman

The Nobel Prize in Physics 1965 was awarded jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman *"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"*.



FAST FACTS

PROTON VELOCITY:
99.9999991% of light speed

PROTONS PER BUNCH:
up to 100 billion

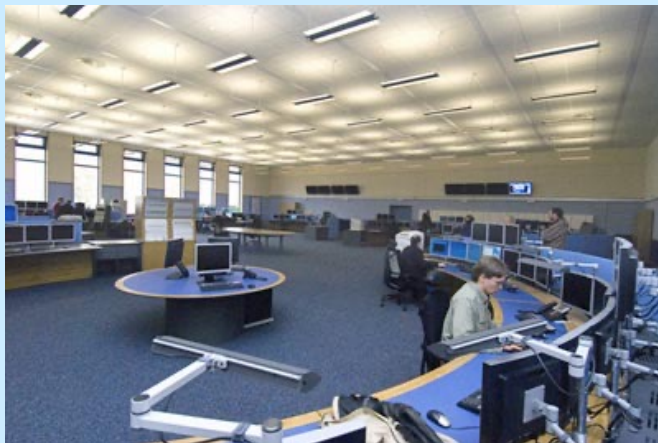
NUMBER OF BUNCHES:
up to 2,808

**BUNCH CROSSINGS
PER SECOND:**
up to 31 million, at 4 locations

**COLLISIONS PER BUNCH
CROSSING:**
up to 20

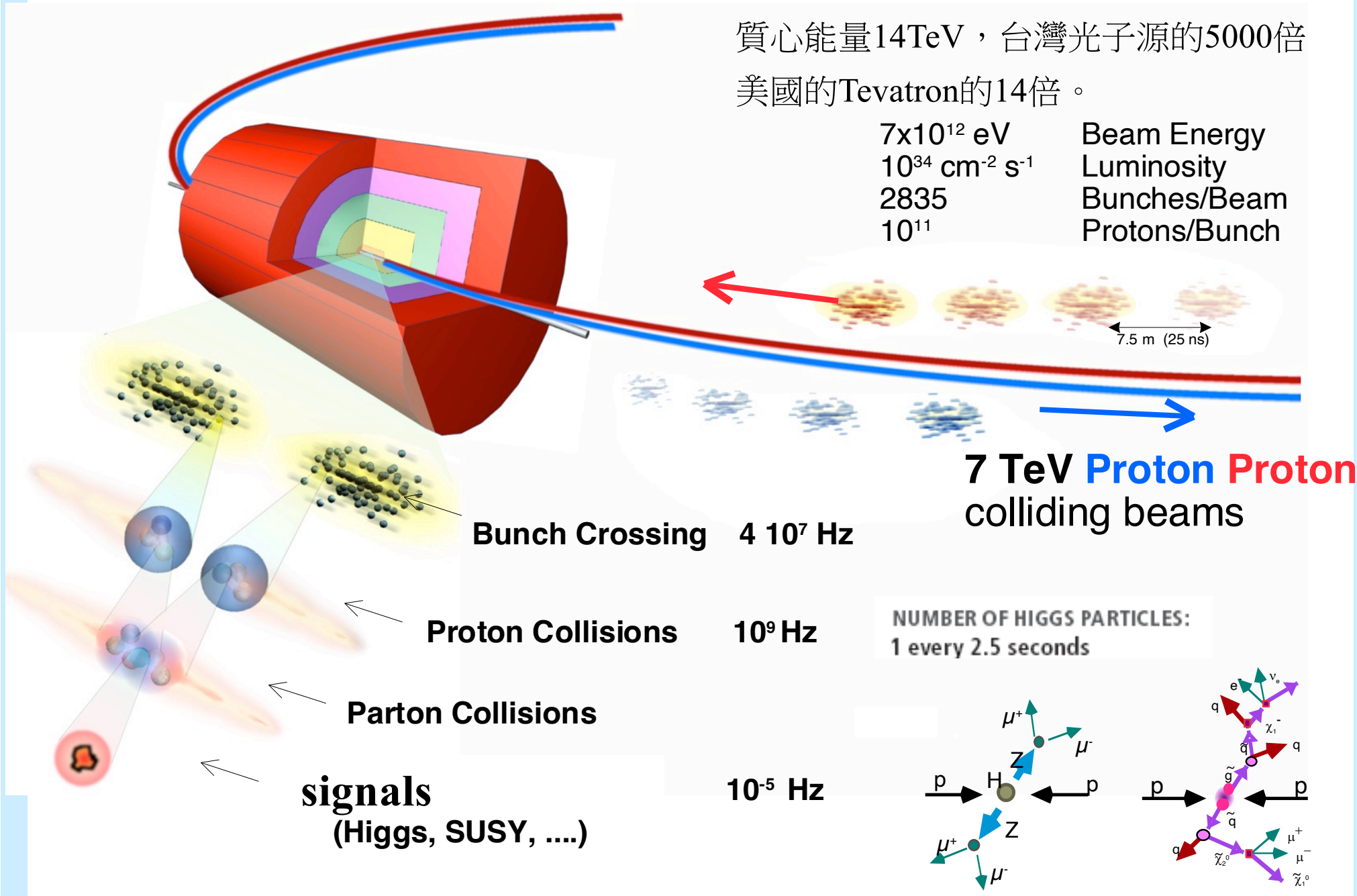
DATA PER COLLISION:
about 1.5 megabytes

NUMBER OF HIGGS PARTICLES:
1 every 2.5 seconds (at full
beam luminosity and under
certain assumptions about
the Higgs)



質心能量14TeV，台灣光子源的5000倍
美國的Tevatron的14倍。

7×10^{12} eV Beam Energy
 10^{34} cm⁻² s⁻¹ Luminosity
 2835 Bunches/Beam
 10^{11} Protons/Bunch



7 TeV Proton Proton
colliding beams

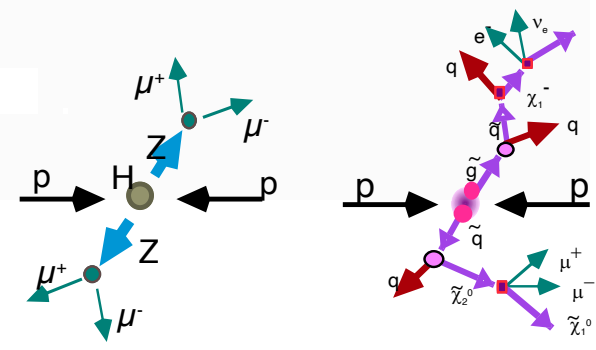
Bunch Crossing $4 \cdot 10^7$ Hz

Proton Collisions 10^9 Hz

Parton Collisions

signals
(Higgs, SUSY,) 10^{-5} Hz

NUMBER OF HIGGS PARTICLES:
1 every 2.5 seconds



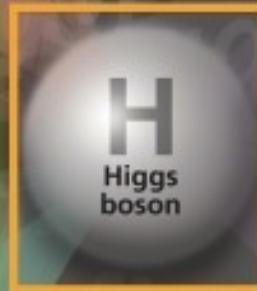
Selection of 1 event in 10,000,000,000,000

Fermions: spin = 1/2 particles

Quarks



Leptons



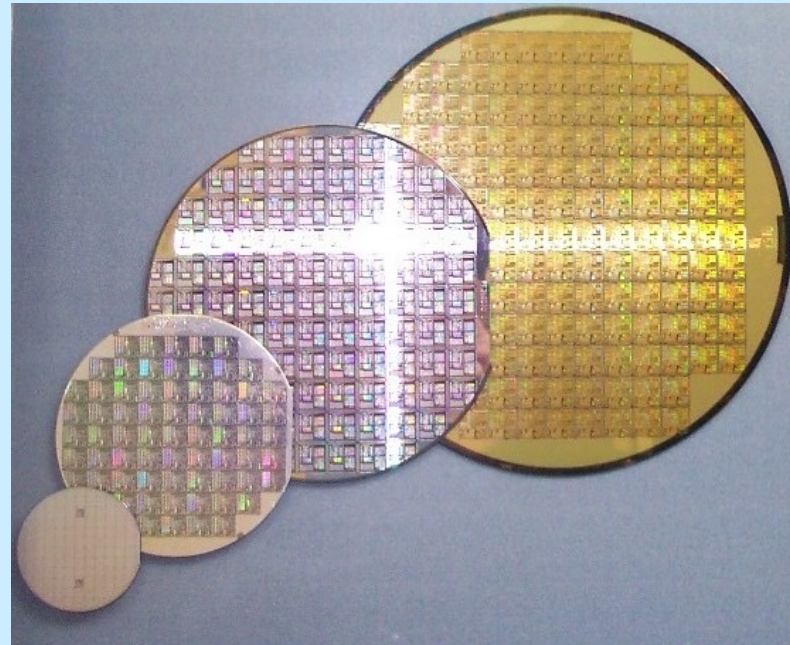
Higgs Boson:
spin = 0
fundamental
scalar particle

Vector Bosons: spin = 1 particles

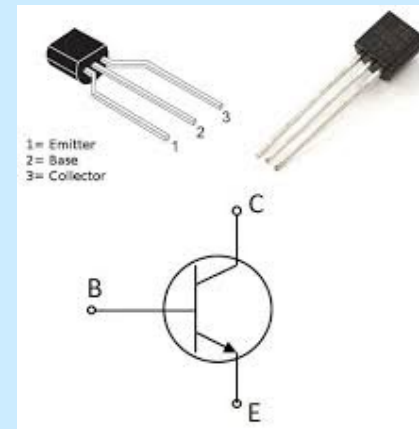
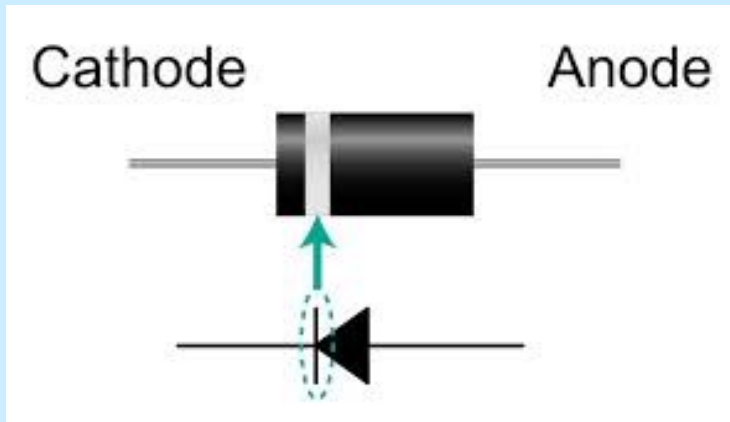
Forces



半導體 Semiconductor



利用雜質滲入的技術，在一塊半導體晶體內，可以自由製成兩種類似導體的材料
將不同型的半導體組合在一起，可以製造出各式半導體元件，來控制電路中的電流：

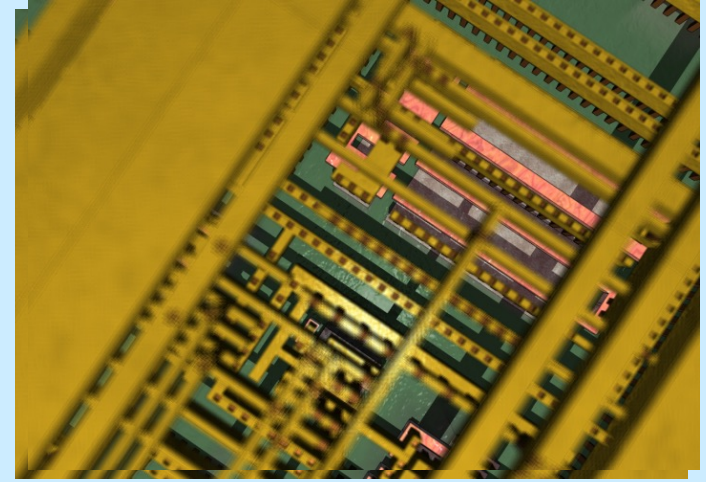
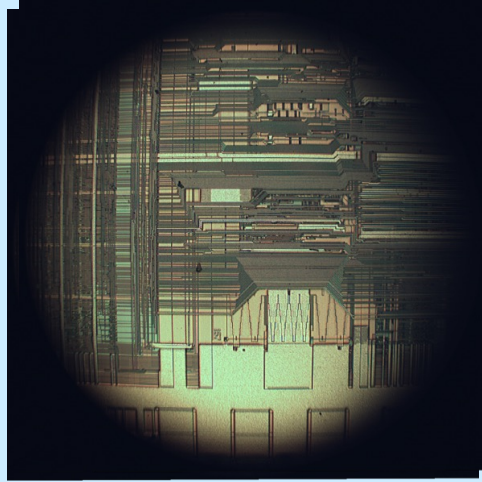
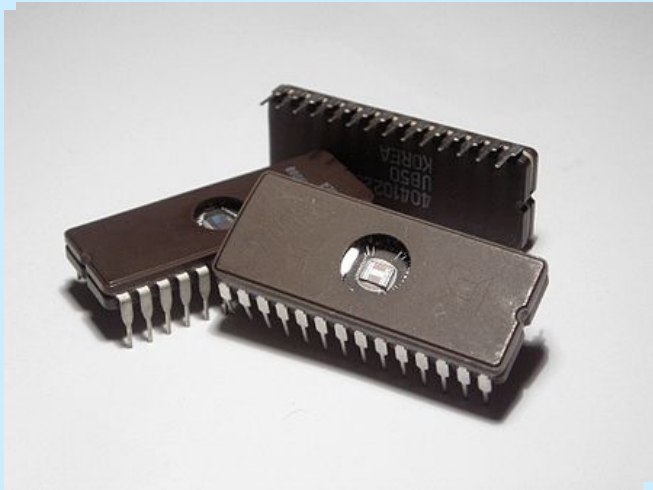


半導體元件非常不自然、完全人工，這是一個工程問題！

It is all about control. 控制！

control freak





把元件與彼此的連接製作於一塊半導體板內，就稱Integrated Circuit IC 積體電路
這是一個建築問題！元件就如微觀世界的歌德教堂！





Physicists Edward Bowen (left), Lee DuBridge (centre) and I. I. Rabi work on a cavity magnetron in the 1940s.

Shut up and calculate!

Practical, interdisciplinary ways of working forged during the Second World War had a lasting impact on a generation of physicists and their findings, says **David Kaiser**.

閉嘴！算就是了！

逃避雖然可恥，但卻有用。

但不是所有物理學家都採取這樣耍賴的態度！

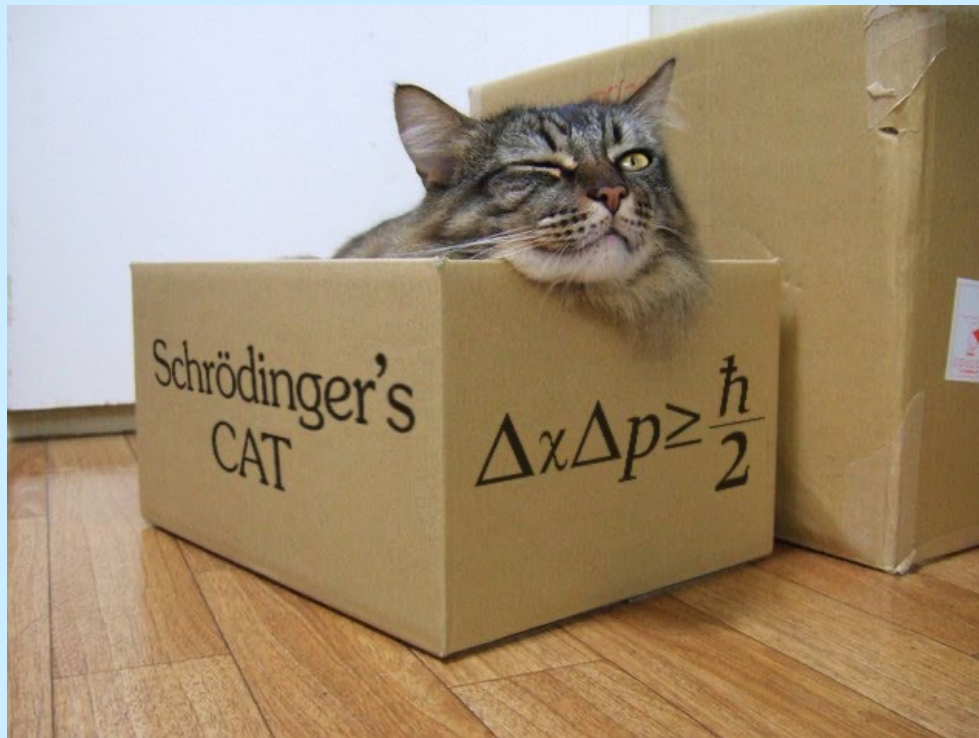
也有物理學家仔細在想：貓真的可以處於既死又活的純粹疊加狀態嗎？



在微觀下疊加態已經有實驗證實，但巨觀的物件疊加卻很難想像：
因此或許微觀與巨觀的分別很重要。

或許微觀物件可以處於疊加狀態，巨觀物件就是不可以。

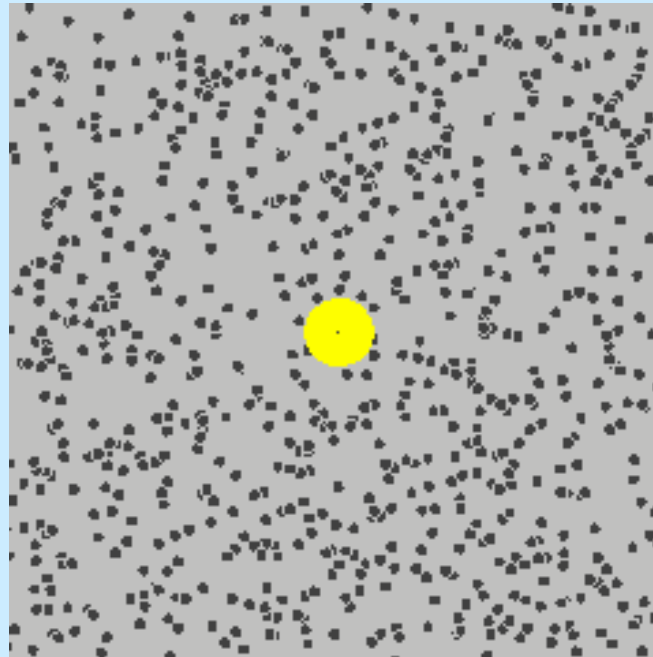
微觀與巨觀物件的差別在哪裏？



巨觀世界的現象總是一次涉及極度大量的微觀粒子！

周圍會圍繞一個很複雜的環境！

疊加狀態的純粹性或許會因為與環境的混亂作用漸漸消失！



資訊

聽眾可能會追根究底的問：那為什麼貓，不能如電子一樣疊加呢？最近的進展指出，電子的疊加特性，也只有隔離之下才可以繼續維持，只要有干擾，也會消失。而貓在自然的環境中，會不斷受到外在環境大量無法控制的隨機擾動。物理學家研究發現，這樣的干擾會把疊加性抹去，回到魚與熊掌無法兼得的世界。簡言之，糾纏把原子核的疊加性傳染給了貓，但勇敢的貓咪，在環境支持下，堅強的戰勝矛盾，回歸一隻貓該有的樣子。這個過程還真的可以被實驗驗證，2012年諾貝爾物理獎得主外恩倫德David Jeffrey Wineland的得獎工作，就是以雷射光來操弄鈹離子，製造出與薛丁格的貓一樣的糾纏狀態。薛丁格的貓原來不過只是一個想像，現在可以真的在實驗室內實現了。這個在2000年完成的實驗，的確驗證了離子的疊加特性，會隨著時間而漸漸消失，而且許多定量結果都與理論預期相符。

科學家發展出這麼精細的工具，下一次就真的不需要讓貓咪冒險了。外恩倫德的工作告訴我們，如果薛丁格貓的實驗真的作了，實驗開始後，貓的確有非常非常短的時間是處於生死疊加的狀態，但很快的、環境的干擾就迫使貓離開這個狀態。這個時間短到連貓自己都沒有感覺，生死疊加這樣的概念，意義已經不大了。

薛丁格的貓如果是一隻非常微小的貓，疊加就會是真實的。
微小的貓就是一顆原子。但周圍環境干擾可能讓它不再微小。



節目

物理好好玩【第二季】

★★★★★

5 (2)

同專輯的其他音檔

【EP00】科學不是保存於象牙塔內

【EP01】為微中子寫的一首詩

為什麼貓不能如電子一樣疊加呢？最近的進展指出，電子的量子疊加特性，也只有在隔離之下才可以繼續維持，只要有干擾，也會消失。所以小貓在自然的環境中，會不斷受到外在環境大量無法控制的隨機擾動。物理學家研究發現，這樣的干擾會把疊加性抹去，回到魚與熊掌無法兼得的世界。簡言之，糾纏把原子核的疊加性傳染給了貓，但勇敢的貓咪，在環境支持下，堅強的戰勝矛盾，回歸一隻貓該有的樣子。

這個過程還真的可以被實驗驗證，**2012年諾貝爾獎得主外恩倫德的得獎工作**，就是以雷射光來操弄鈹離子，讓它扮演微小的薛丁格貓，製造出與薛丁格所描述一樣的疊加狀態。薛丁格的貓原來不過只是一個想像，現在可以真的在實驗室內實現了。





The Nobel Prize in Physics 2012

Serge Haroche, David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012

Serge Haroche

David J. Wineland



Photo: © CNRS
Photothèque/Christophe Lebedinsky

Serge Haroche

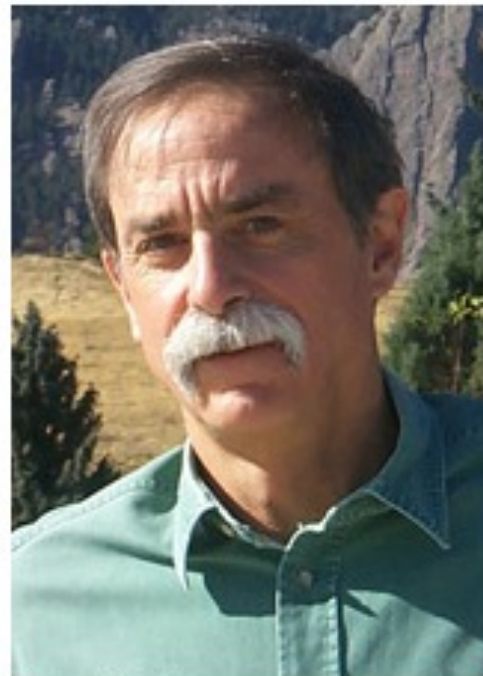


Photo: © NIST

David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"*

A “Schrödinger Cat” Superposition State of an Atom

C. Monroe,* D. M. Meekhof, B. E. King, D. J. Wineland

A “Schrödinger cat”-like state of matter was generated at the single atom level. A trapped ${}^9\text{Be}^+$ ion was laser-cooled to the zero-point energy and then prepared in a superposition of spatially separated coherent harmonic oscillator states. This state was created by application of a sequence of laser pulses, which entangles internal (electronic) and external (motional) states of the ion. The Schrödinger cat superposition was verified by detection of the quantum mechanical interference between the localized wave packets. This mesoscopic system may provide insight into the fuzzy boundary between the classical and quantum worlds by allowing controlled studies of quantum measurement and quantum decoherence.

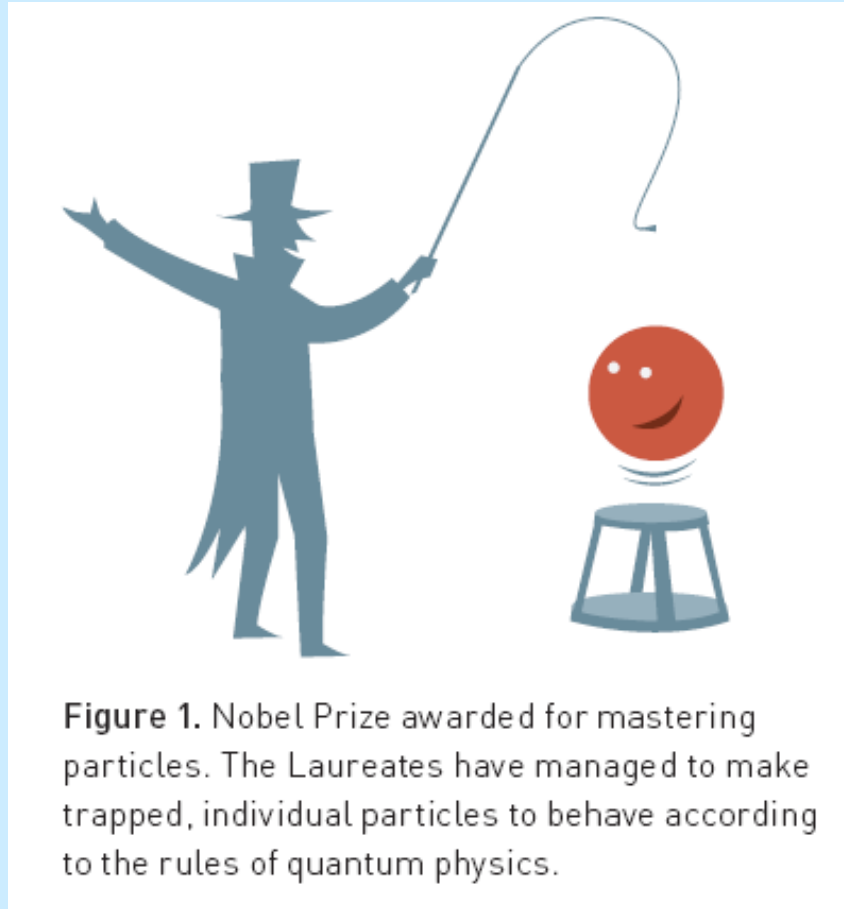
Quantum mechanics allows the preparation of physical systems in superposition states, or states that are “smeared” between two or more distinct values. This curious principle of quantum mechanics (1) has been extremely successful at describing physical behavior in the microscopic world—from interactions of atoms with photons to interactions at the subnuclear level. But what happens when we extend the quantum superposition principle to

state of the system can be represented by the entangled quantum mechanical wave function,

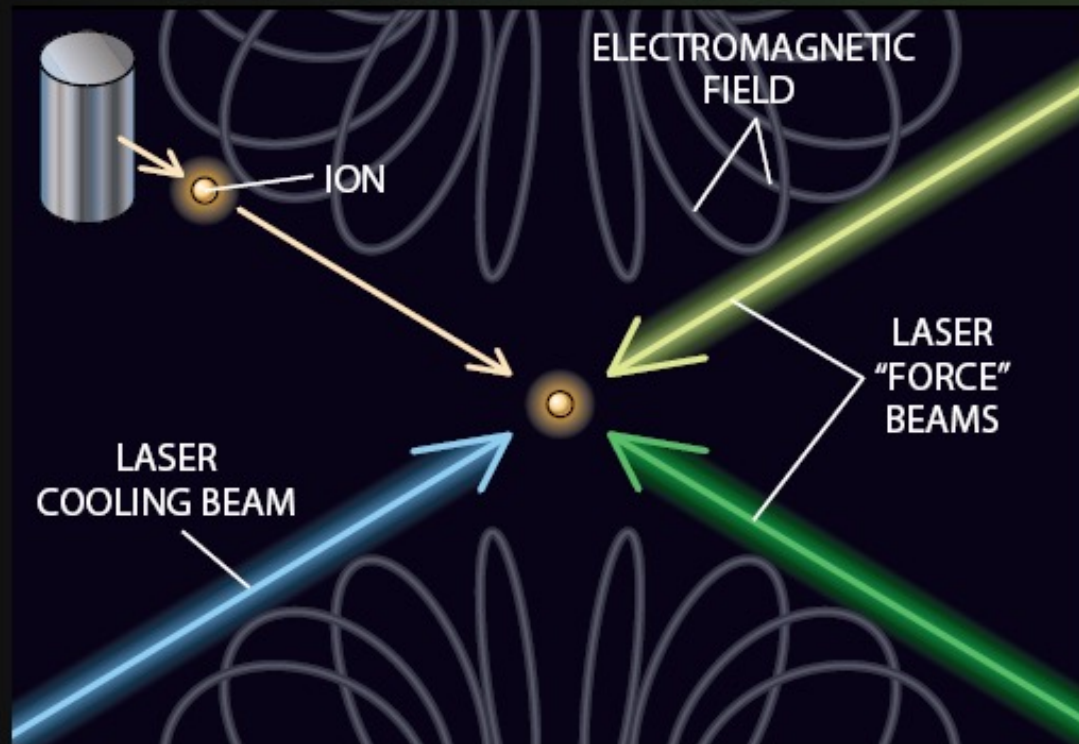
$$\psi = \frac{|\odot\rangle|\uparrow\rangle + |\ominus\rangle|\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

where $|\odot\rangle$ and $|\ominus\rangle$ refer to the states of a live and dead cat, and $|\downarrow\rangle$ and $|\uparrow\rangle$ refer to the internal states of an atom that has and

Controlling individual quantum systems



首先必須捕抓它！



SCHRÖDINGER'S CAT made from a beryllium ion is first trapped by an electromagnetic field and then cooled with a laser. Laser "force" beams prepare the ion in a superposition of two spin states. These states are then eased apart so that the ion resides in two places at once.

這個在2000年完成的實驗，還模擬了讓扮演微小貓的鈹離子受到周圍環境的干擾，的確驗證了既死又活的疊加特性，會隨著時間而漸漸消失。而變成一般的貓。

科學家發展出這麼精細的工具，下一次就真的不需要讓貓咪冒險了。外恩倫德的工作告訴我們，如果薛丁格貓的實驗真的作了，實驗開始後，貓的確有非常非常短的時間是處於生死疊加的狀態，但很快的、環境的干擾就迫使貓離開這個狀態。這個時間短到連貓自己都沒有感覺，如此生死疊加這樣的概念，意義已經不大了。



但故事還未終了。

資訊

你甚至還可以想像一個額外的設計，在鐵箱實驗開始一個小時後，不做任何觀測，就讓貓與原子核移動分開。因為還未觀察，此時貓的生死兩個狀態都還存在，疊加在一起。等到分隔老遠，原子核與貓的命運糾纏還會維持。這時再觀察原子核，如果發現還未衰變，我們就知道遠處的貓還活著，如果已衰變，遠處的貓必定已死。這是我們跨入戀情時最害怕的，分手了之後竟然還藕斷絲連、有遠距的糾纏。此處原子核的觀察，似乎如心電感應，隔空竟然能改變遠方貓的命運，這樣的情節在日常生活中應該不太可能吧。

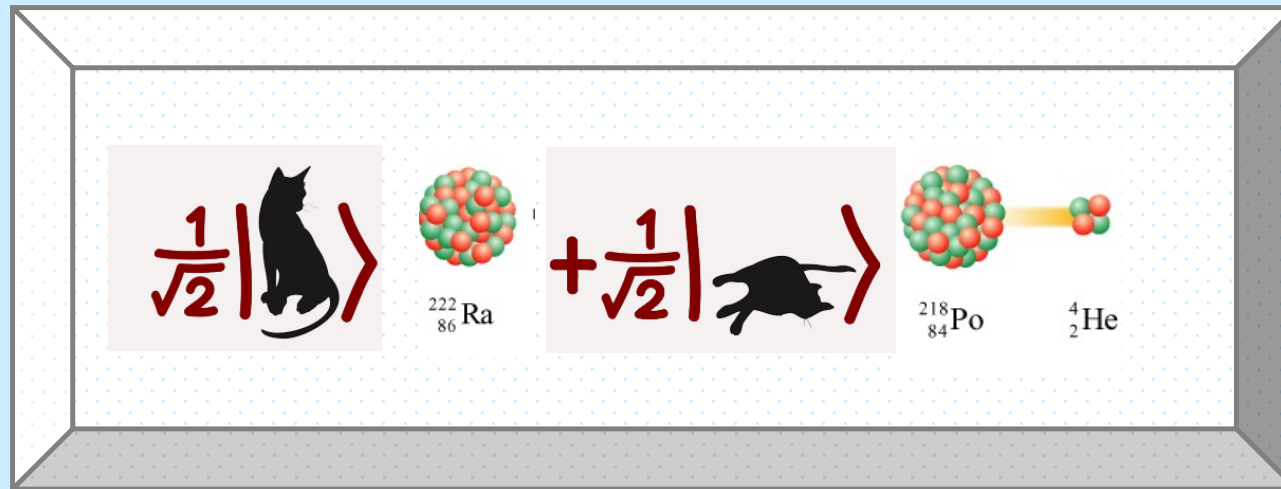


節目

物理好好玩【第二季】

★★★★★

5 (2)

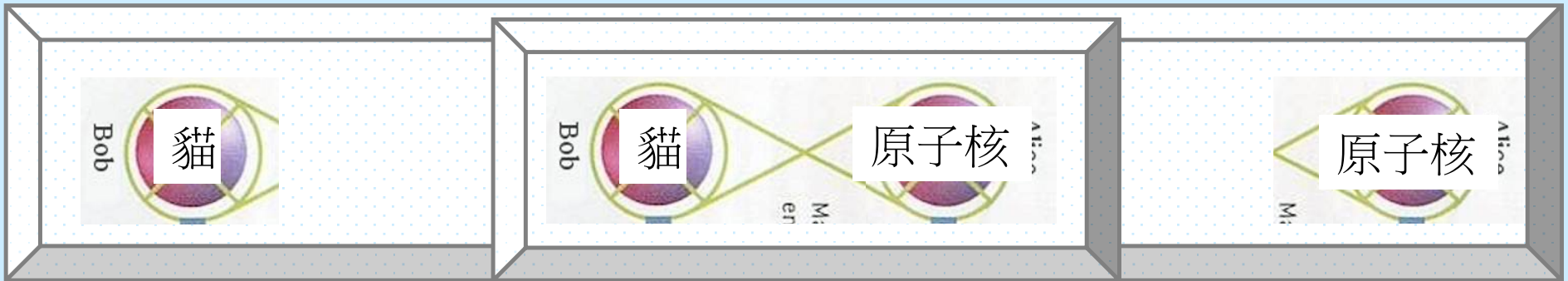
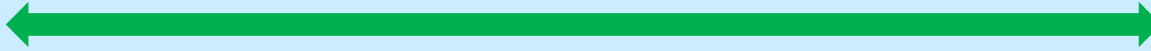
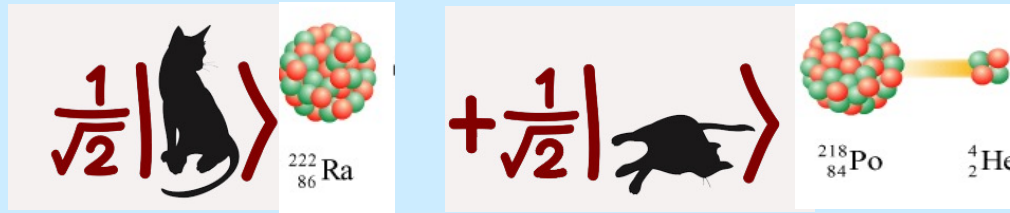


如果保持在這個疊加狀態下，不做測量，把貓與原子核分開呢？

分開了，兩者糾葛的命運還是繼續糾葛呀！

糾葛的命運就是原子核不衰變則貓活、原子核核衰變則貓死！

就算相距極遠，還是如此！



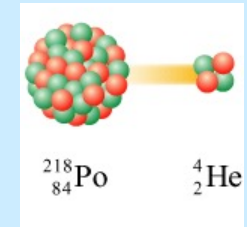
在這個狀態下，我把貓與原子核分開很遠，原子核的狀態依舊不確定！
 注意我用一個拉長的盒子來表示我沒有觀察！



現在打開左邊看貓，若活：
 確定右邊遠處原子核未衰變。



若死：
 確定右邊遠處原子核衰變。



測量的動作似乎會影響到遙遠物體的狀態！ **Quantum Non-Locality**

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

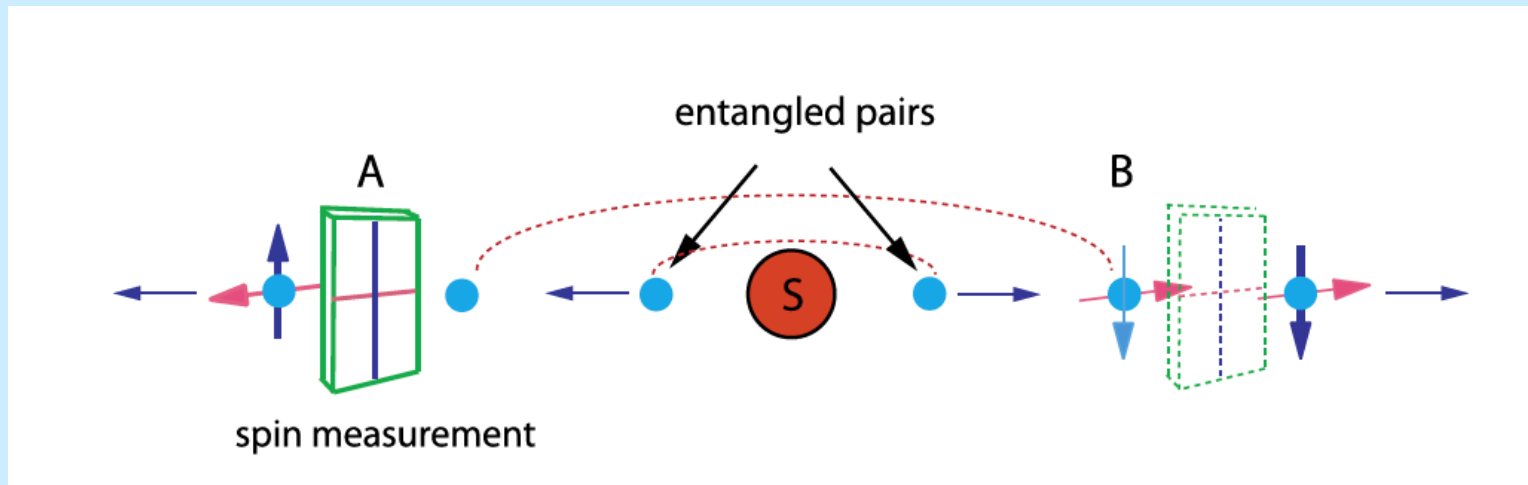
In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

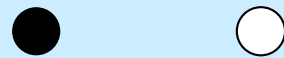
把巨觀的貓用微觀粒子取代！

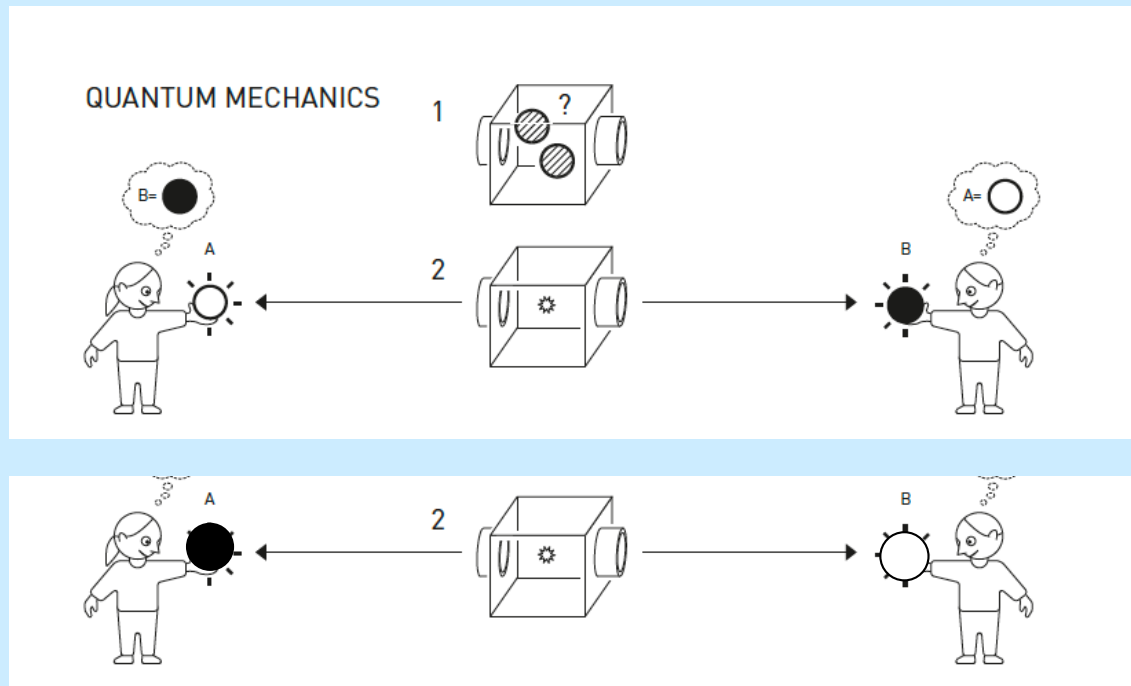
這就形成著名的 **Entangled State 糾葛態**，薛丁格稱之為量子力學核心中的核心。

愛因斯坦指出了糾葛若是可能，會有非常不合理的結果。



一般討論用電子自旋狀態，我們用一對有黑白顏色的球來比喻，但不是真的有顏色。





假設中間的機器會產生左右兩個顏色可為黑或白的球。

機器厲害到可以形塑這兩個球，精確地處於左黑右白，與左白右黑兩個狀態的疊加。如同貓與原子核。

現在將兩球保持孤立分別向右送給Bob及向左送給Alice。

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|BW\rangle + |WB\rangle)$$

此時Bob拿到的球依舊與遠方的球，糾葛於以上黑白不確定的疊加態。

現在Alice測量收到的球的顏色，

若發現是白球W，她立刻知道遠方Bob的球是黑色，遠方球立刻崩潰為純黑色。

|B⟩

同理，若Alice發現她的球是黑色B，遠方Bob的球狀態立刻崩潰為純白色。

|W⟩

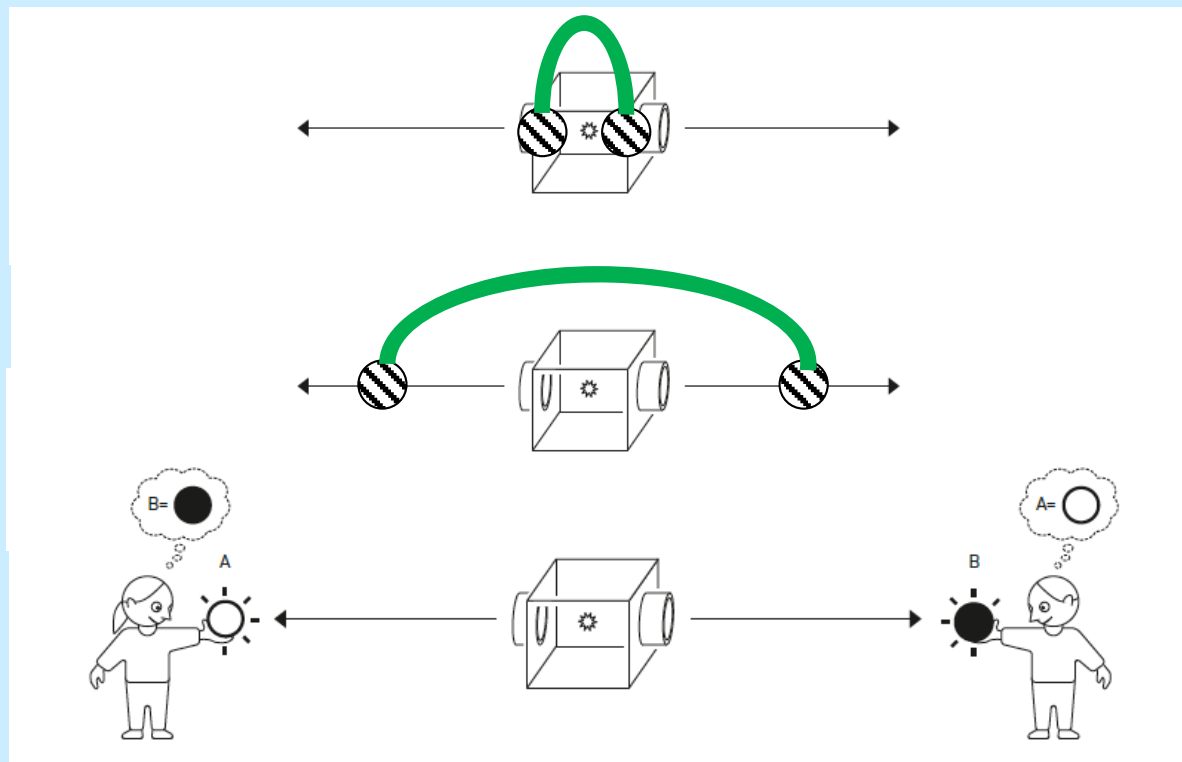
Alice的測量竟然可以影響極遠處Bob的測量結果。

這個現象對量子力學來說其實非常自然， $|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|BW\rangle + |WB\rangle)$

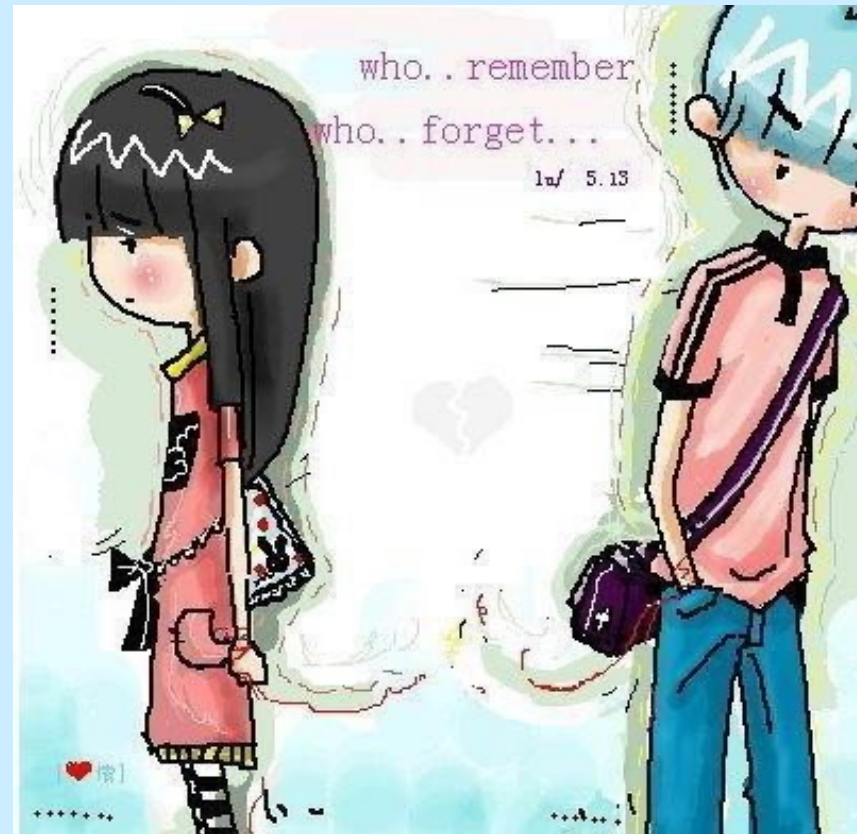
即使相距極度遙遠，這兩個球就是一個無法切割對待的整體。

即使相距光年外，他們就是處在一個單純的、疊加的、糾葛態！

所以Alice作了測量，等同對極遠處Bob的球也作了測量。

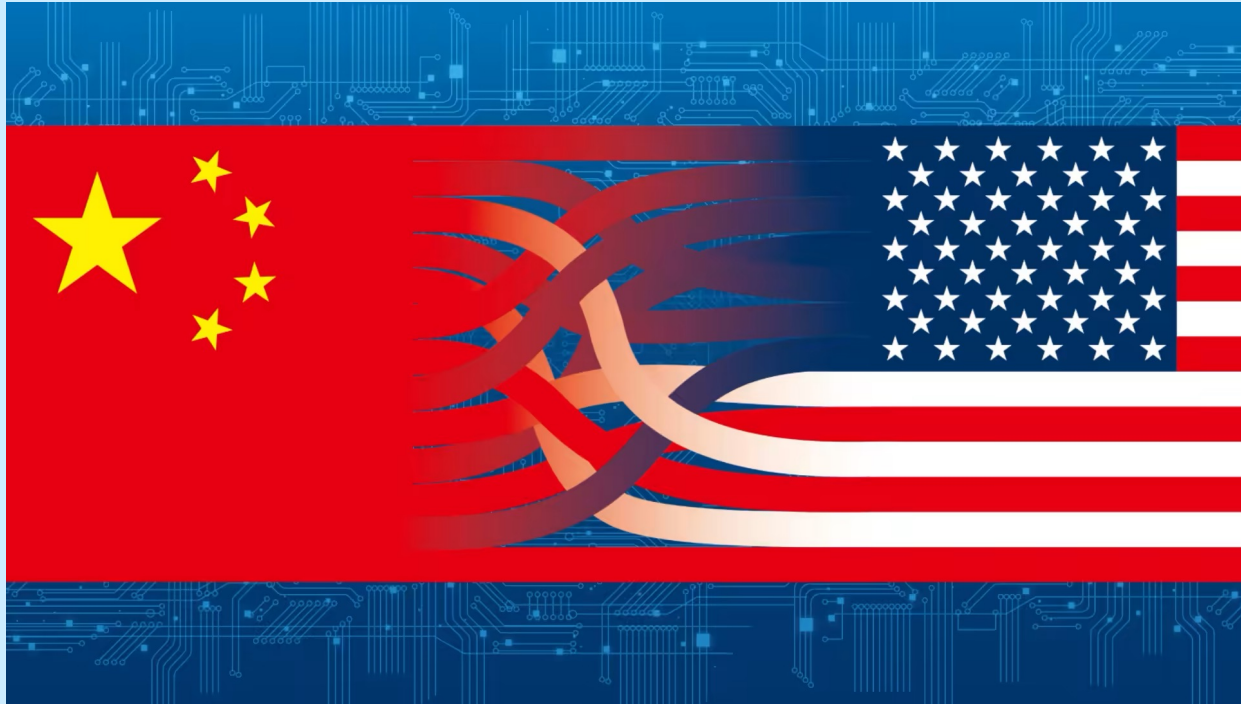


這就是遠距糾葛！如此糾葛，分手十年後，還有心電感應！



The impossible decoupling of US China Commerce relations

The relation is in **entanglement**.



Yoshiko, Nikkei



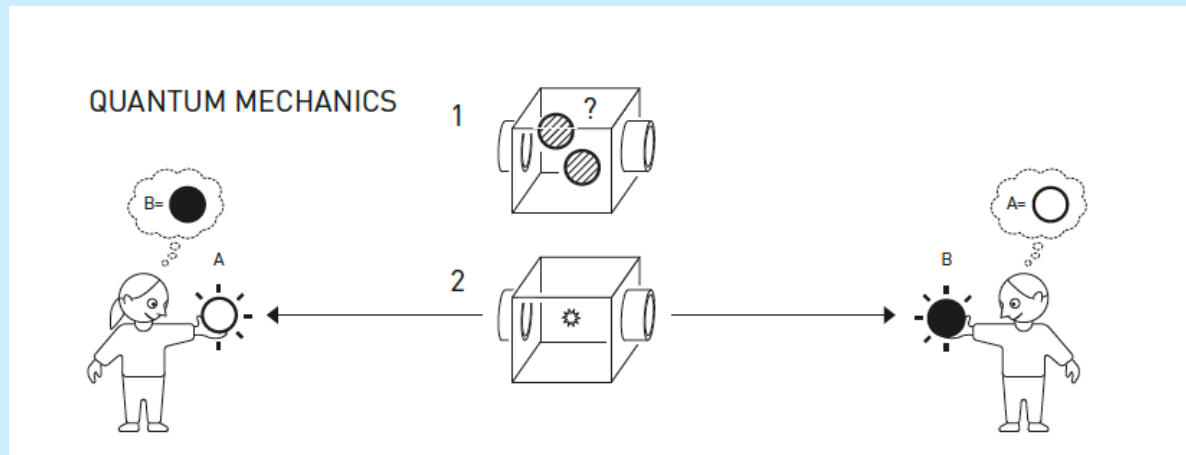
Michael Hirshon, NYT

但愛因斯坦指出這違反兩個我們從日常經驗歸納出來、習以為常的科學原則。

Locality在地主義：一個地方發生的事物，在當時只會影響它附近的事物。

Alice的測量不應該可以影響極遠處Bob的測量結果。

愛因斯坦相信：可見Bob後來看到的顏色(黑、白)是早於Alice測量就存在的。



Realism現實主義：物理量都有客觀的實體對應。

Bob手上球的顏色應該是客觀存在的、一分開就已經確定了的。

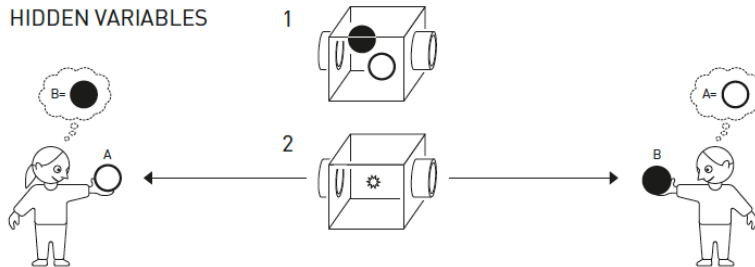
並沒有什麼疊加混淆的可能！

愛因斯坦這個想像實驗被稱為**EPR paradox**。

這是對量子力學最強力的攻擊了！當然大部分物理學家還是繼續睡著。

Does colour exist when no one is watching?

Quantum mechanics' entangled pairs can be compared to a machine that throws out balls of opposite colours in opposite directions. When Bob catches a ball and sees that it is black, he immediately knows that Alice has caught a white one. In a theory that uses hidden variables, the balls had always contained hidden information about what colour to show. However, quantum mechanics says that the balls were grey until someone looked at them, when one randomly turned white and the other black. Bell inequalities show that there are experiments that can differentiate between these cases. Such experiments have proven that quantum mechanics' description is correct.



MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

基於以上：愛因斯坦主張遠距糾葛違反物理原則。

他主張量子力學不是完整的理論。糾葛只是幻象，反應我們的知識不足。

他認為機器並不能每一次都產生完全一模一樣的雙球組。

有隱藏的因素-術語稱為隱藏參數，會決定球是一黑一白，還是一白一黑！

而球的顏色應該如現實、是客觀存在的、一產生就已經確定了的。

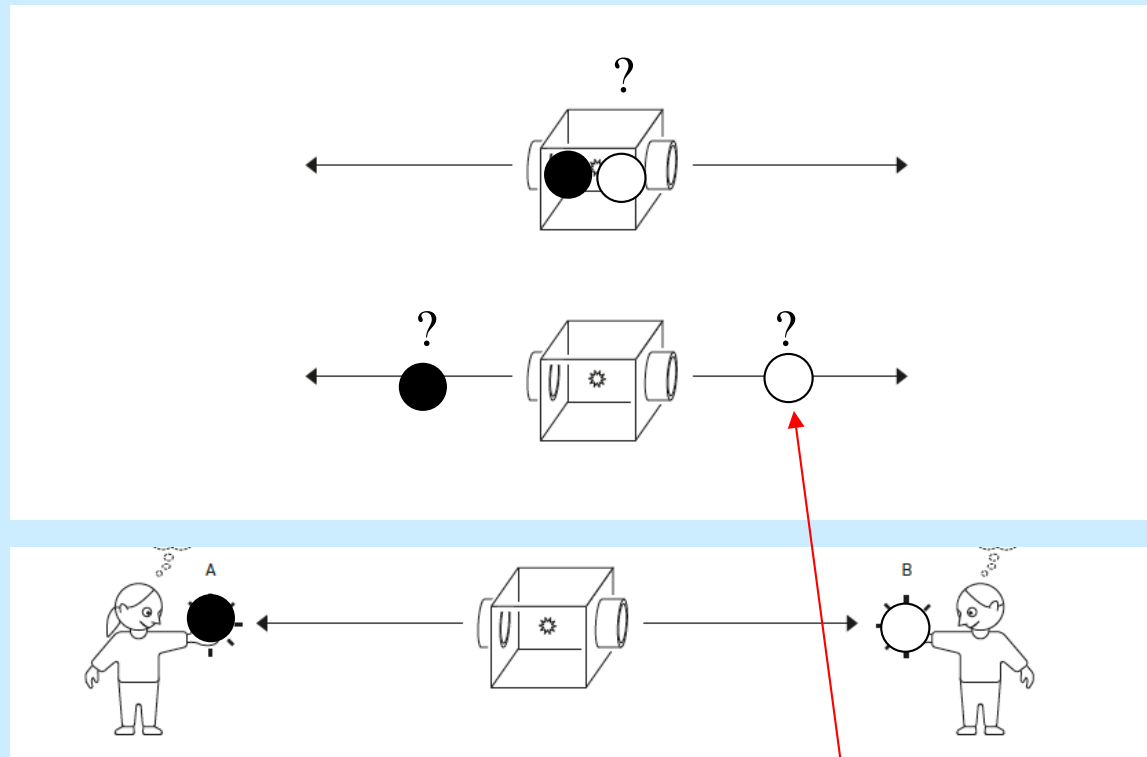


隱藏參數理論粗略地說有一點回到了種菜的情況。

每一顆菜其實都有隱藏的細節、也就是參數。

每一個不同結局都對應特定的細節，只是我們還沒有細緻到能分辨、預測。

一旦將來我們更加聰明，說不定AI就能幫我們分辨與預測了。



愛因斯坦的版本

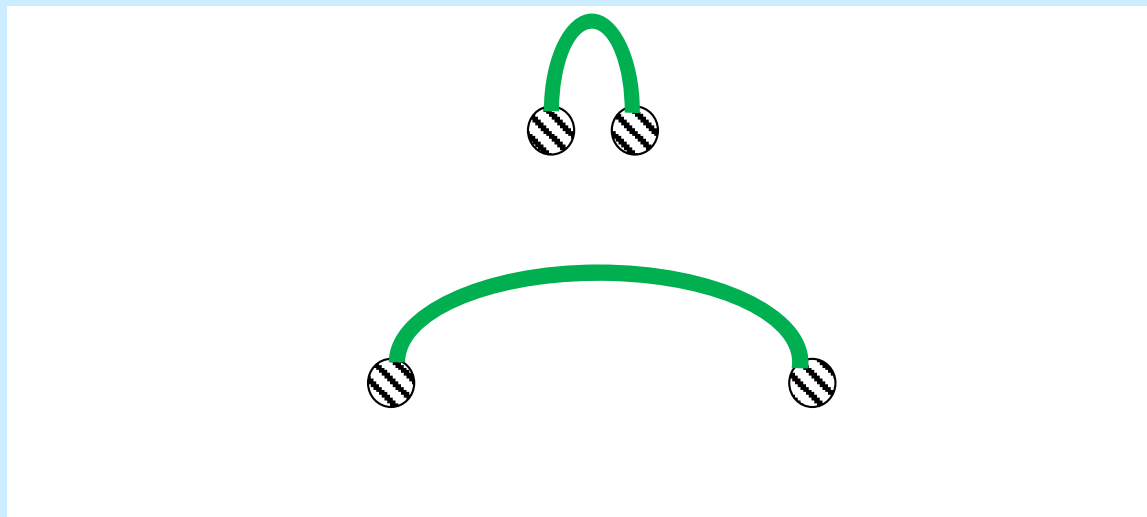
假設中間的機器有我們不了解的隱藏機制，決定了左黑右白，但不讓我們知道。沒有什麼疊加可言。但知道是黑白各一。

現在將兩球分別向右送給**Bob**及向左送給**Alice**。

一旦**Alice**發現拿到是黑色，自然知道遠方**Bob**的球是白色。

但注意：這個版本中，如愛因斯坦所願，**Alice**的測量並不影響**Bob**的測量結果。

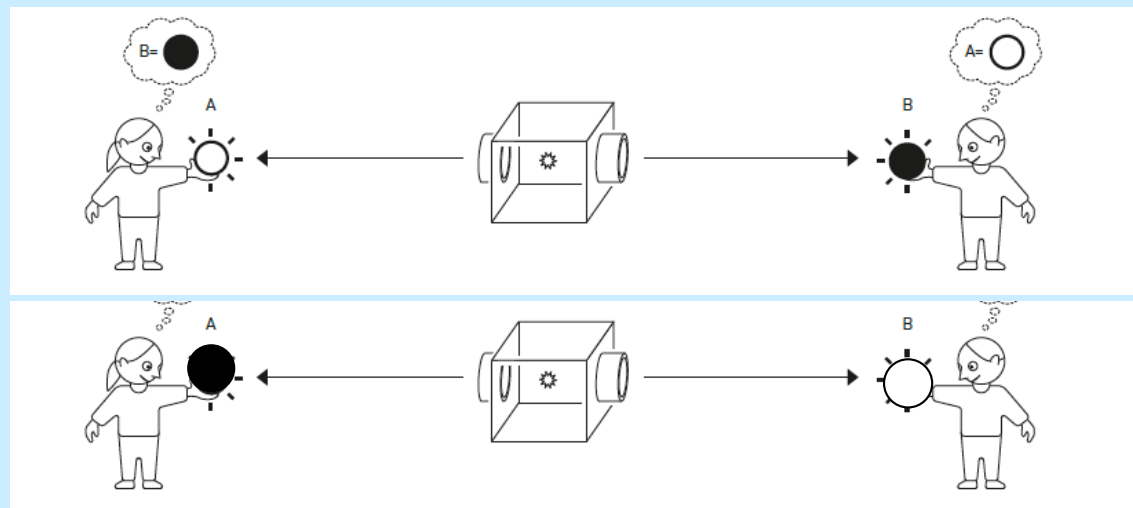
Alice沒看之前，向右朝**Bob**去的球已是白色的了。圖二。只是我們不知道而已。



量子力學的版本

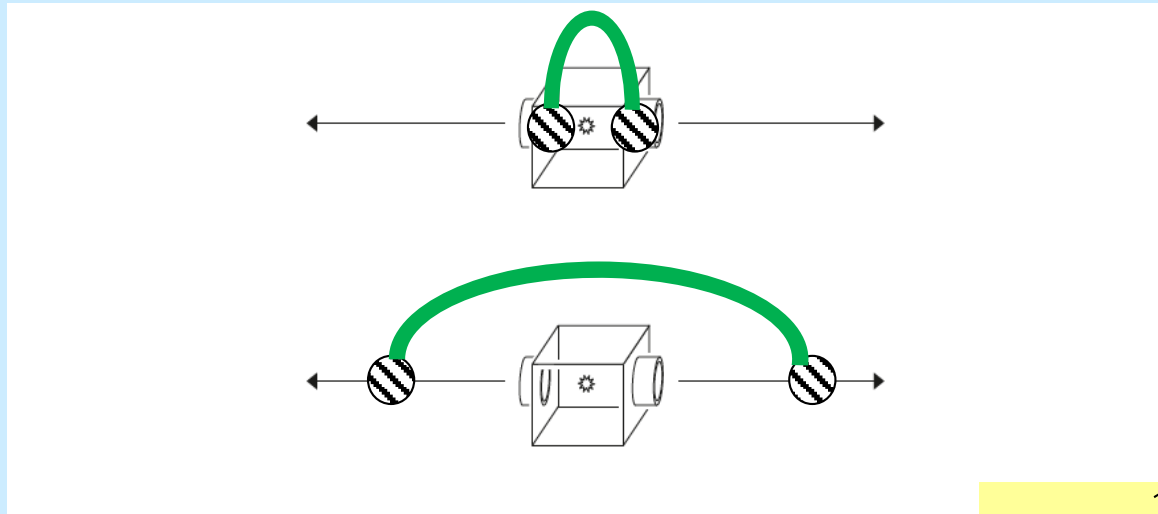
球輸送途中，兩球依舊糾葛於以上有白有黑的疊加態。

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|BW\rangle + |WB\rangle)$$



要等到Alice測量收到的球的顏色，遠方Bob的球狀態才**崩潰**為純色。

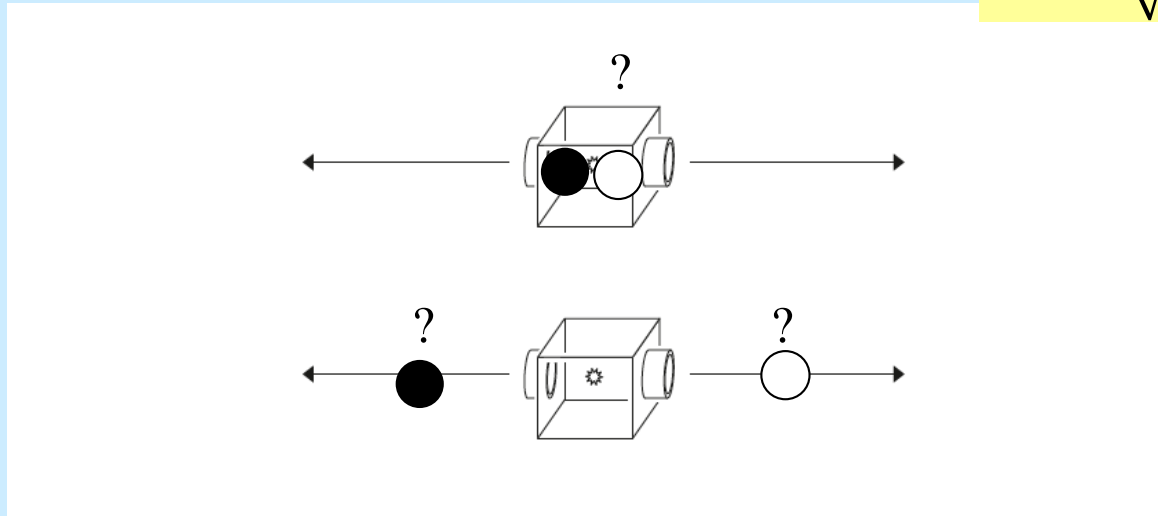
Alice的測量決定了極遠處Bob的球有確定的顏色。Bob的測量只是再次確認而已。



量子力學的版本

球輸送途中，兩球依舊糾葛於以上有白有黑的疊加態。

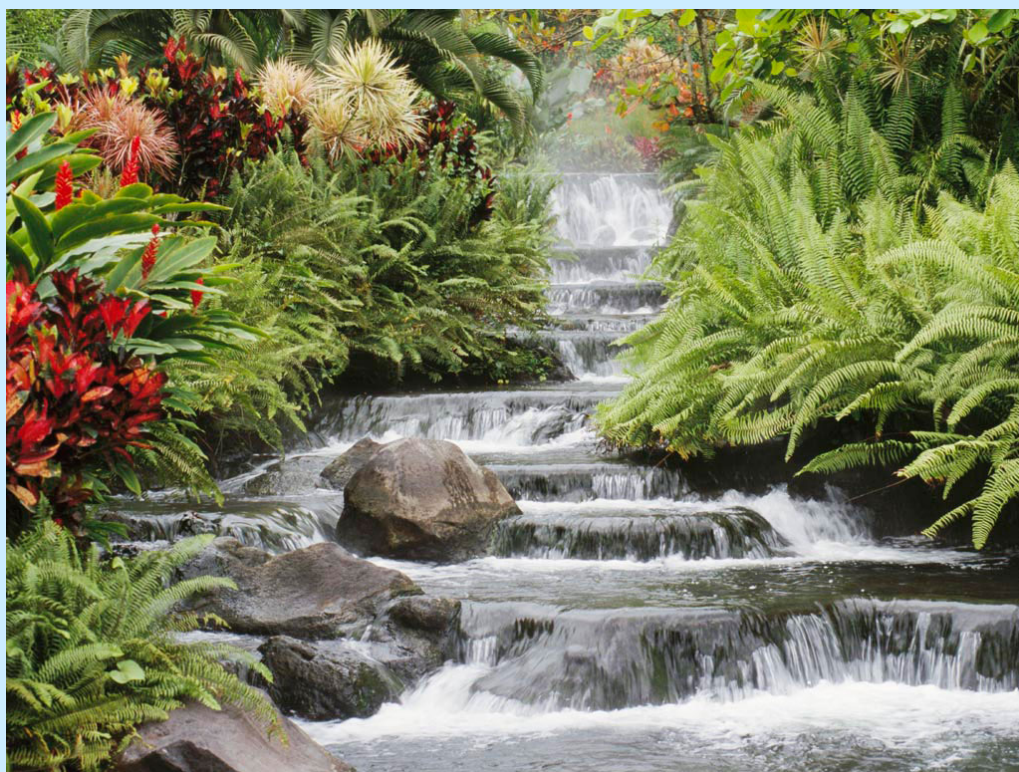
$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|BW\rangle + |WB\rangle)$$



愛因斯坦的版本

Alice沒看之前，Bob的球已是白色的了。

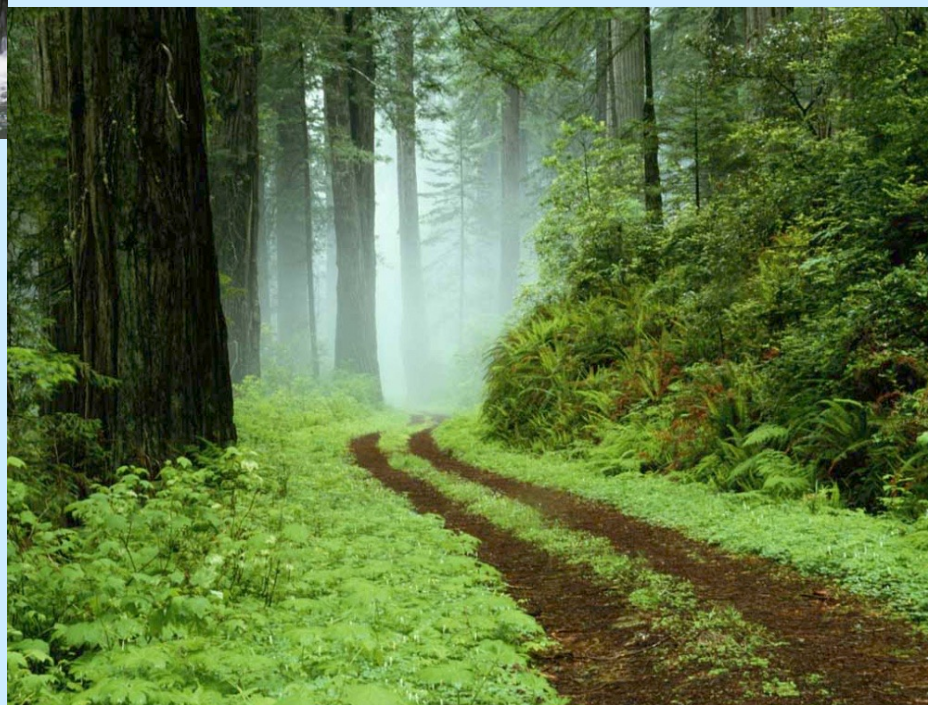
可見兩個版本的關鍵差異在輸送途中，但要記得你一看就無法控制影響了被看者。所以不能看。



Faced with spooky actions at a distance, Einstein preferred to believe that things one cannot know anything about (such as the momentum of a particle with a definite position) do exist all the same. In April 1948 he wrote to Born:

雖然無人在觀賞享受美景
美景依舊存在！

空山不見人，
但聞人語響，
返影入深林，
復照青苔上。



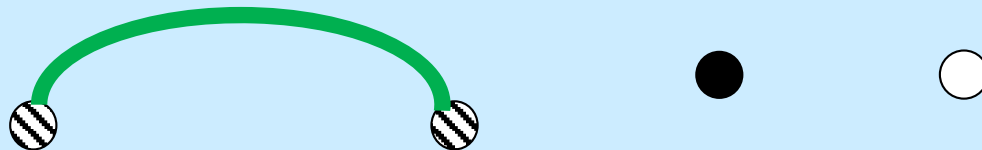
Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory

Einstein maintained that quantum metaphysics entails spooky actions at a distance; experiments have now shown that what bothered Einstein is not a debatable point but the observed behavior of the real world.

N. David Mermin

Quantum mechanics is magic¹

沒有人看時，月亮在那裡嗎？沒有人看時，球的顏色存在嗎？
沒有人看時，這兩顆球形糾葛態，必須看成一個整體。
單獨一顆球、它的確定顏色並不存在。

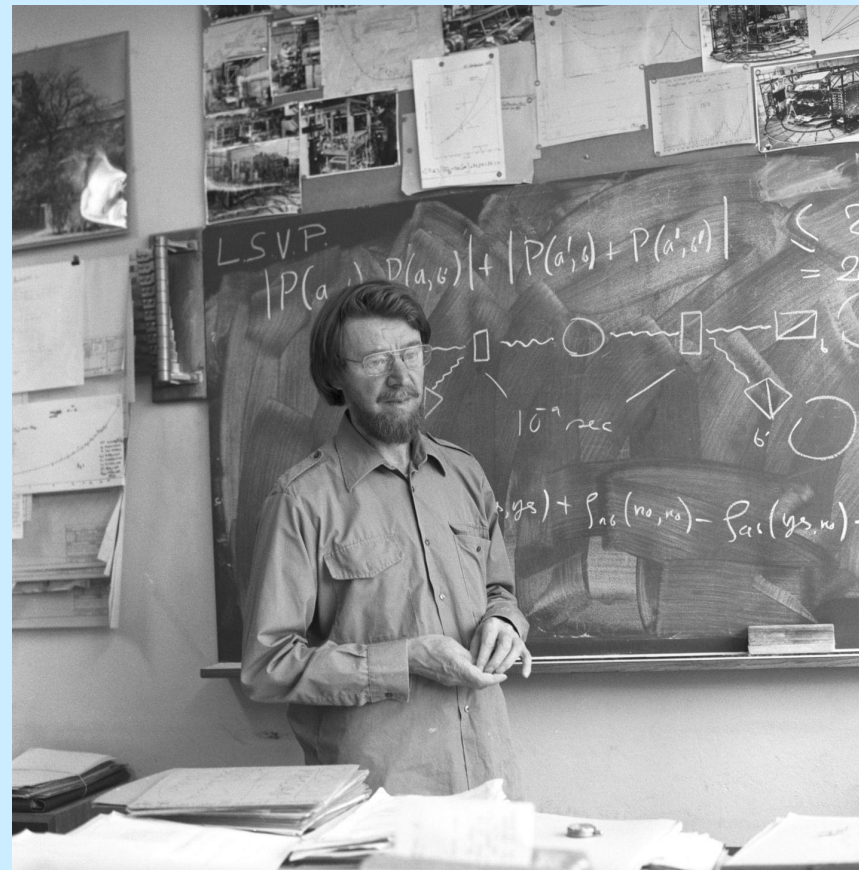
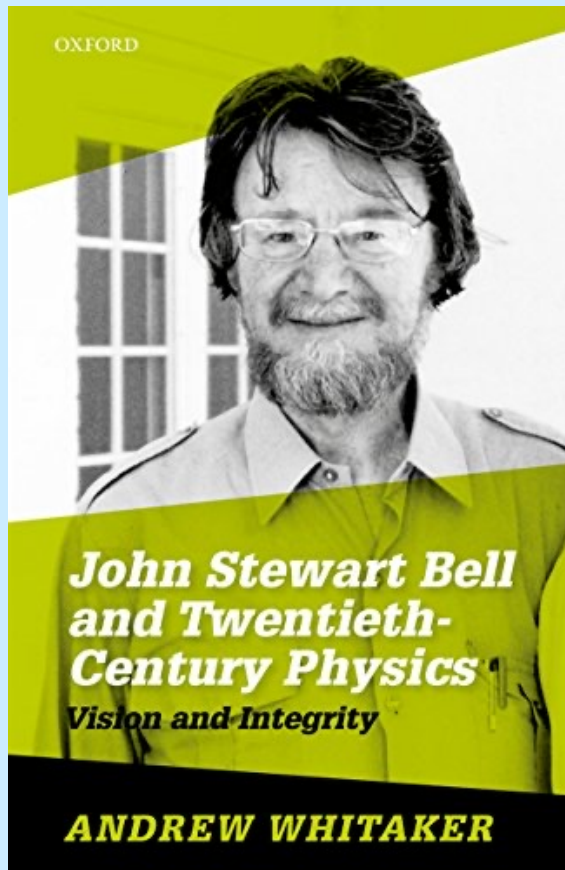


現在量子力學有一個一樣可以解釋實驗結果的競爭對手了：隱藏參數理論。
它的好處：不違反在地主義與現實主義原則。

但有很長時間沒有人覺得量子力學與隱藏參數理論有什麼可以測量的差異。
若無差異，幹嘛在意！閉嘴！Shut up and caculate. EPR幾乎被遺忘。

直到1965年，Bell提出Bell Inequality 。

這個不等式可以在實驗上分辨量子力學與隱藏參數兩種理論！



最簡單的實驗用的是糾葛的兩顆光子。

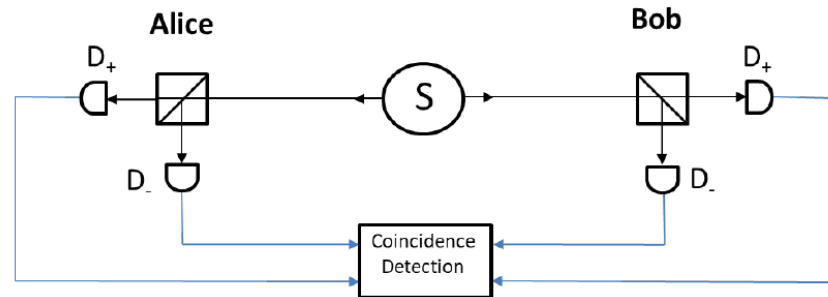


Figure 2. The source S produces pairs of entangled photons, sent in opposite directions. Each photon encounters a two-channel polarizer whose orientation can be set by the Alice and Bob. Emerging signals from each channel are detected by single photon detector D_+ and D_- and coincidences counted by the coincidence unit. The correlation $E(a, b) = (N_{++} - N_{+-} - N_{-+} + N_{--}) / (N_{++} + N_{+-} + N_{-+} + N_{--})$ where N_{++} , N_{+-} , N_{-+} , and N_{--} are the number of coincidence events recorded corresponding to the simultaneous detection at Alice's and Bob's detectors D_+ and D_+ , D_+ and D_- , D_- and D_+ , and D_- and D_- , respectively.

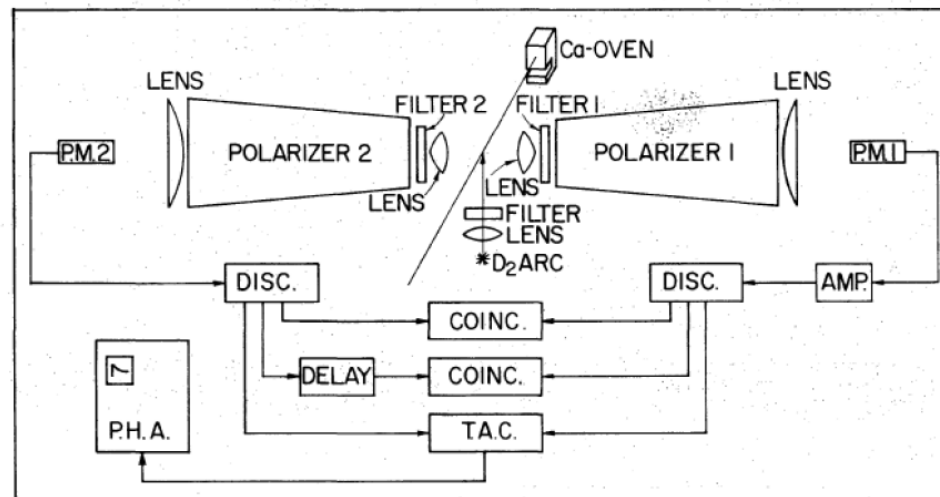


Figure 4. Schematic diagram of the apparatus and associated electronics used by Freedman and Clauser [11]. The distance between the detectors was 5 metres (m).

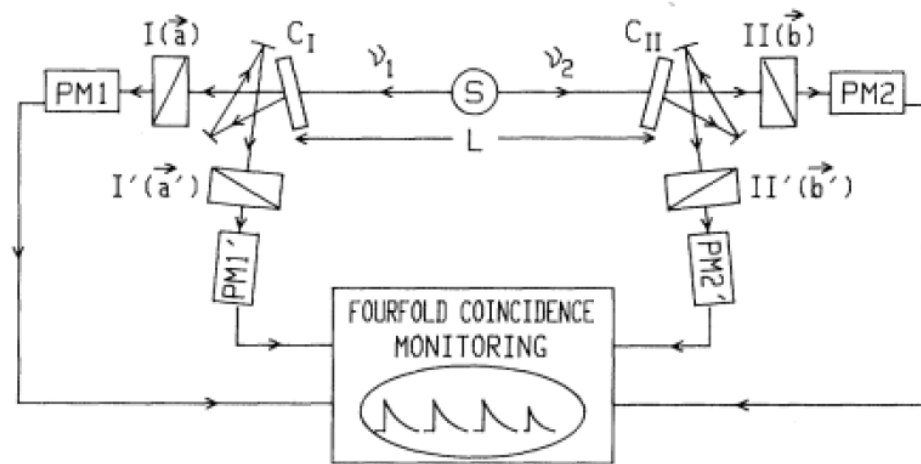


Figure 6. Schematic of the experiment proposed by Aspect in 1976 [15] and performed with collaborators in 1982 [14]. The photons emitted by the calcium cascade source first meet the optical switches C_I and C_{II} , where they can either be transmitted to polarizers and detectors PM_1 and PM_2 , or be reflected to another set of polarizers and detectors PM_1' and PM_2' . Switching between the two channels occurs approximately every 10 ns. The distance between the polarizers was 12 m. The optical switches are ultrasonic standing waves resulting from interference between counter-propagating acoustic waves produced by two electro-acoustical transducers.



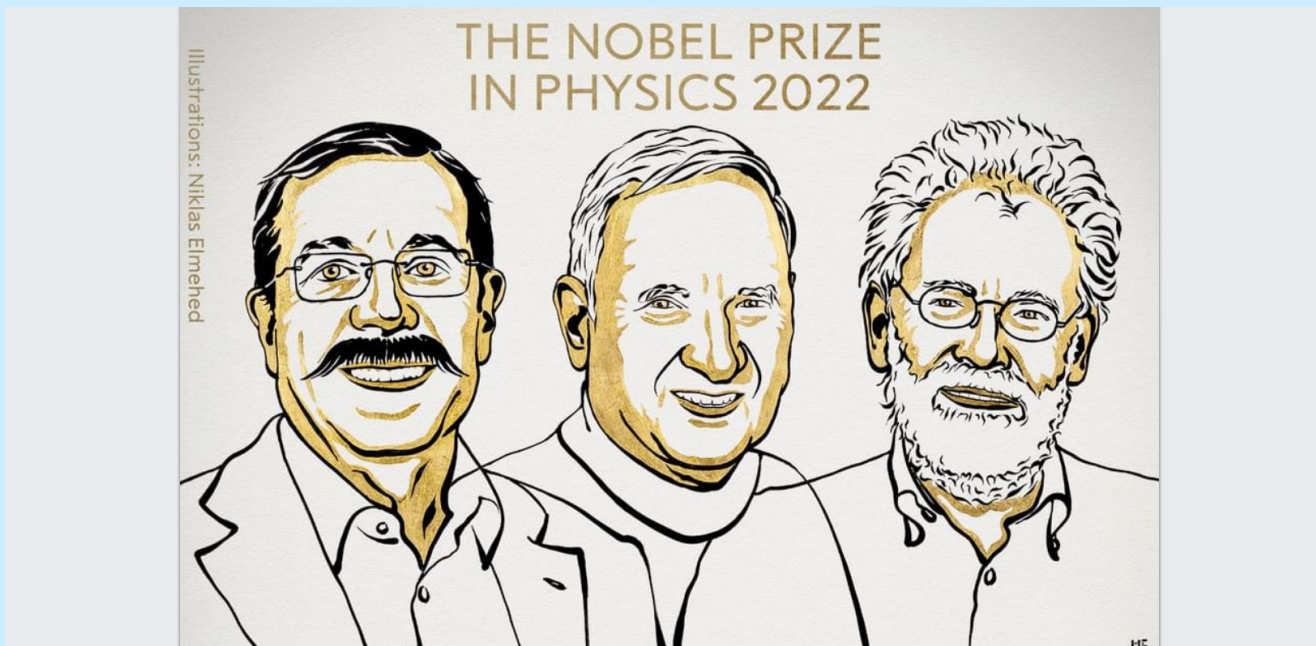
Alain Aspect

1982年的實驗證實確認隱藏參數理論是錯的！

愛因斯坦是錯的！量子力學是正確的。

在地主義與現實主義原則，在量子力學中都不成立！

難以想像但就是如此！



Alain Aspect

Université Paris-Saclay and
École Polytechnique, Palaiseau, France

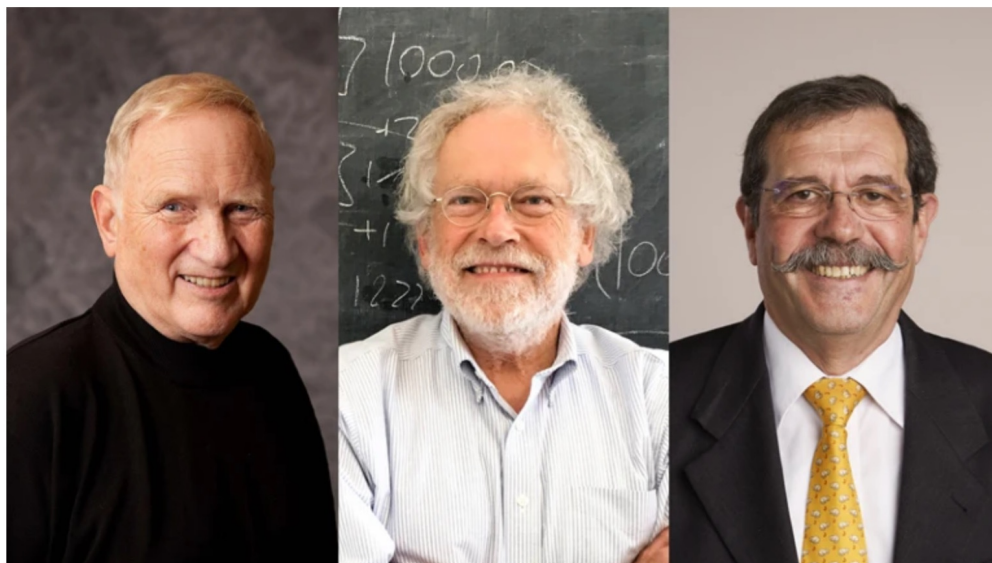
John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
Walnut Creek, CA, USA

Anton Zeilinger

University of Vienna, Austria

“for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”



NCES

Zeilinger在實驗上確定了：
微觀下遠距的確會糾葛。
微觀下若不干擾，疊加性可以維持。

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|BW\rangle + |WB\rangle)$$

Alain Aspect

Université Paris-Saclay and
École Polytechnique, Palaiseau, France

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
Walnut Creek, CA, USA

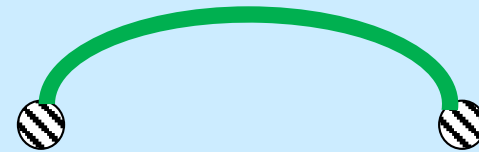
Anton Zeilinger

University of Vienna, Austria

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

他們的工作關了一扇門，但同時開了一個大大的窗。

糾葛的光子態是一個超級有用的資源。



這個研究結果顯示，如果不是貓，而是微小的粒子，且與環境隔離，薛丁格的劇本所描述的故事就會成真，矛盾狀態的疊加、遠距的糾纏都可以維持相當長的時間。科學家現在以兩個光子，或兩個電子來進行觀察，確認遠距糾纏真的會發生。現在的實驗已經驗證光子態的糾纏、可以維持到兩者距離1200公里，預期這個紀錄很快就會被刷新。

Here are some recent quantum entanglement distance records:

Optical fiber

In December 2022, physicists from the Austrian Academy of Sciences set a new record by sending entangled photons over 248 kilometers of optical fiber. This more than doubled the previous record of almost 100 kilometers. [🔗](#)

Fiber optics between atoms

In July 2022, researchers from Ludwig-Maximilians-University Munich (LMU) and Saarland University set a record by entangling two rubidium atoms across 33 kilometers of fiber optics. [🔗](#)

Space to Earth

In 2017, Chinese scientists transmitted entangled photon pairs from space to Earth over a distance of 1,203 kilometers. This broke the previous record for entanglement distribution. [🔗](#)

Optical cavities

In May 2023, researchers from the University of Innsbruck, Austria, entangled two calcium ions trapped in optical cavities 230 meters apart. [🔗](#)



Conclusion:

機率使用於科學，反映了我們的無知、或說缺乏全知。但通常假設全知似乎存在。

It is a fundamental quantum doctrine that a measurement does not, in general, reveal a pre-existing value of the measured property. On the contrary, the outcome of a measurement is brought into being by the act of measurement itself, a joint manifestation of the state of the probed system and the probing apparatus. Precisely how the particular result of an individual measurement is brought into being—Heisenberg’s “transition from the possible to the actual”—is inherently unknowable. Only the statistical distribution of many such encounters is a proper matter for scientific inquiry.

但一個量子力學的測量、並不一定揭露一個物理量、原本就存在的數值。

相反的，測量的結果是由測量本身這個動作、所引發、實現 brought into being。

這是被偵測系統的狀態、與偵測儀器之共同表現。

至於這個測到的特定結果，如何由可能、到被實現，原則是無法知道的。

只有測得結果的統計分佈，才是科學探討的對象。

全知在量子力學中似乎並不存在。



D. Mermin

我個人深信上帝是不玩骰子的。

骰子的機率只是反應人類不是全知的。愛因斯坦的上帝還是全知的。



上帝果然是不玩骰子的，這是一個全新、更加奧秘的上帝。