

# بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اولین دوره مدرسه فناوری های کوانتومی: رایانه کوانتومی مبتنی بر مدارات ابررسانایی

دانشگاه خوارزمی

پدیده‌های کوانتومی در مدارات ابررسانایی

محسن اکبری

بهمن ۱۴۰۲

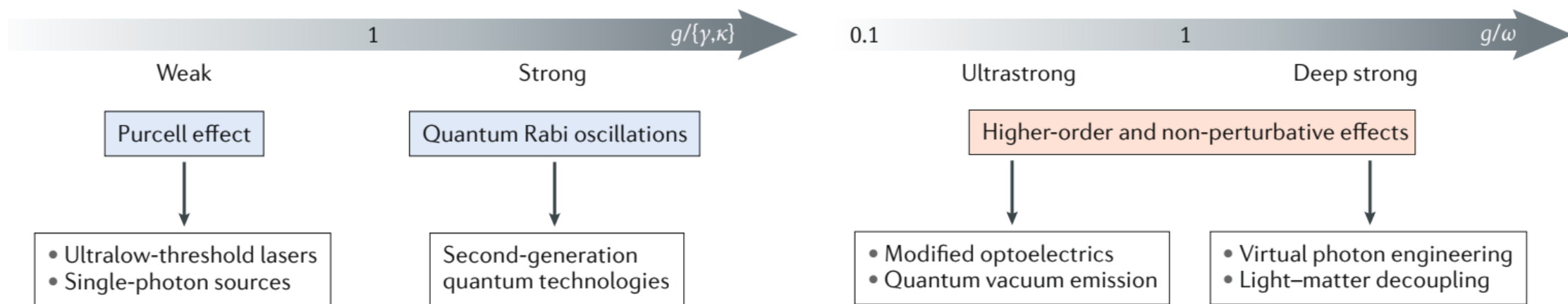
مرکز تحقیقات  
فناوری‌های  
کوانتومی ایران



Kharazmi University

- I. Energy-Level Quantization***
- II. Vacuum Rabi oscillation***
- III. Selection rules***
- IV. Nonlinearity in a cavity QED system***
- V. Mollow triplet***
- VI. Autler-Townes splitting***
- VII. Electromagnetically induced transparency***
- VIII. STIRAP***
- IX. Generating single photons on demand***
- X. Sideband transition***
- XI. Squeezed states***

توصیف شهودی برهمکنش بین نور و ماده به عنوان یک سری فرآیندهای اساسی که در آن یک فوتون توسط توزیع بارها جذب، گسیل یا پراکنده می‌شود، اساساً به مقدار کوچک ثابت ساختار ظریف  $\alpha \approx 1/137$  بستگی دارد. از آنجایی که  $\alpha$  پارامتر بدون بعد طبیعی است که در یک رفتار اختلالی الکترودینامیک کوانتومی پدیدار می‌شود، مقدار کوچک آن اجازه می‌دهد تا بیشتر دینامیک کوانتومی میدان الکترومغناطیسی را تنها با در نظر گرفتن فرآیندهای مرتبه اول (جذب، انتشار) یا مرتبه دوم (پراکندگی) توصیف کنیم. در حالی که مقدار  $\alpha$  توسط طبیعت ثابت است، پورسل در سال ۱۹۴۶ کشف کرد که قدرت برهمکنش یک گسیلنده نور را می‌توان با مهندسی محیط الکترومغناطیسی آن افزایش یا سرکوب کرد.

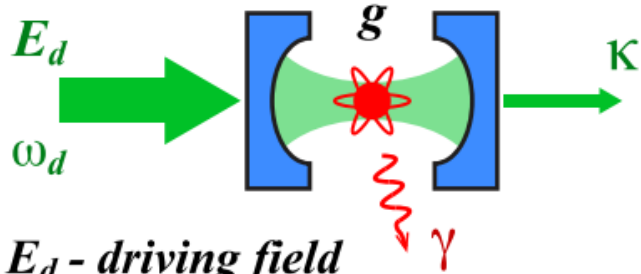


# Cavity QED

Cavity quantum electrodynamics (Cavity QED)

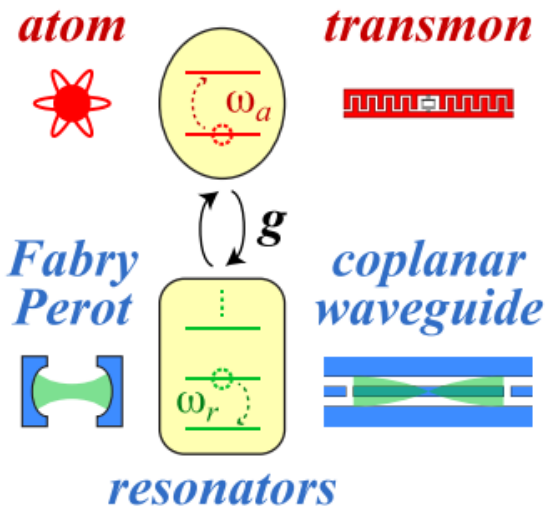
برهم کنش یک اتم با یک میدان الکترومغناطیسی  
کوانتیزه شده در درون یک کاواک موضوع

Traditional form...

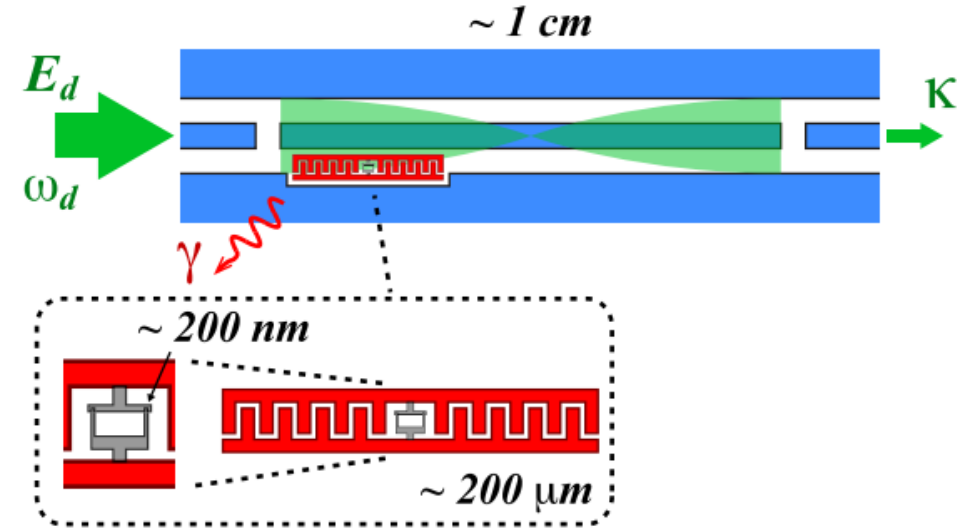


$E_d$  - driving field  
 $\omega_d$  - driving frequency  
 $g$  - coupling  
 $\kappa$  - cavity decay  
 $\gamma$  - spontaneous atomic decay

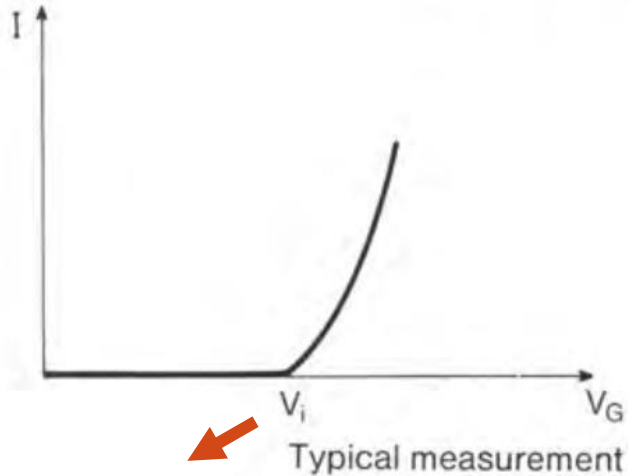
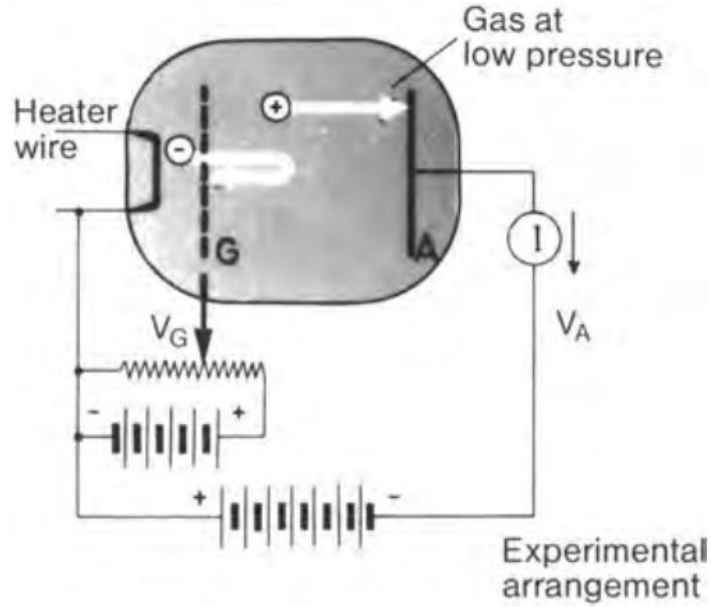
Cavity QED analogy



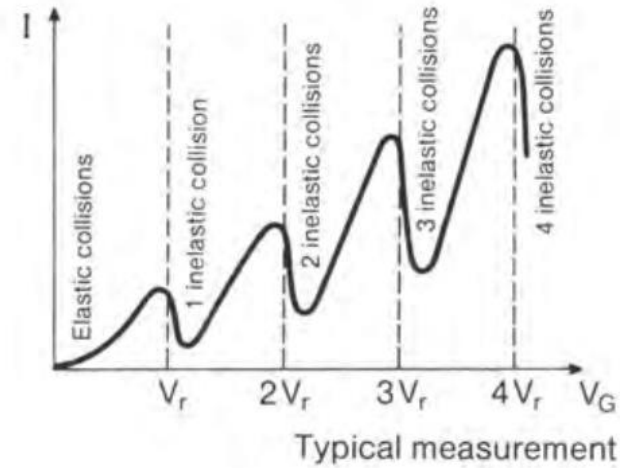
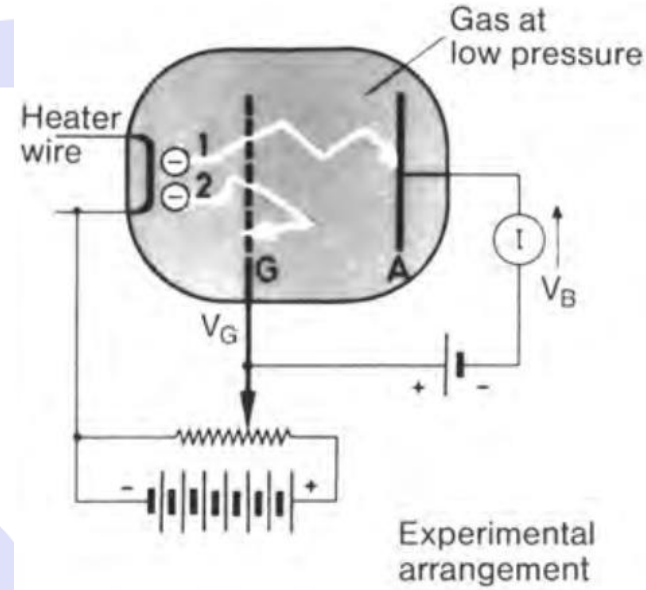
With on-chip superconducting circuits...



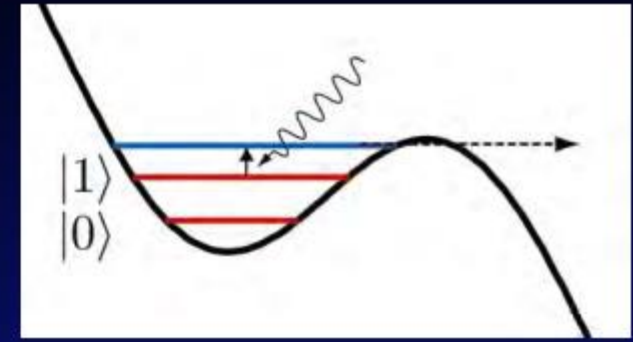
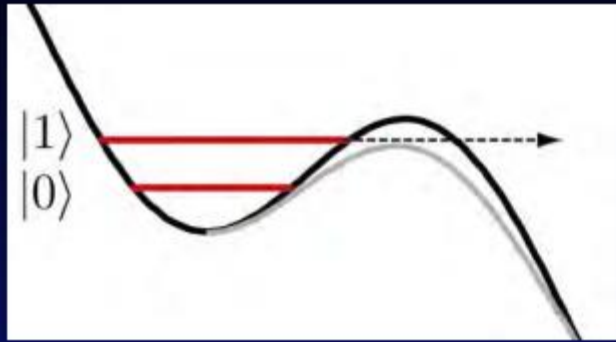
لنارد در سال ۱۹۰۲ یونیزه کردن اتم با استفاده از برخورد دادن اتم با الکترون را نشان داد.



پتانسیل یونیزاسیون

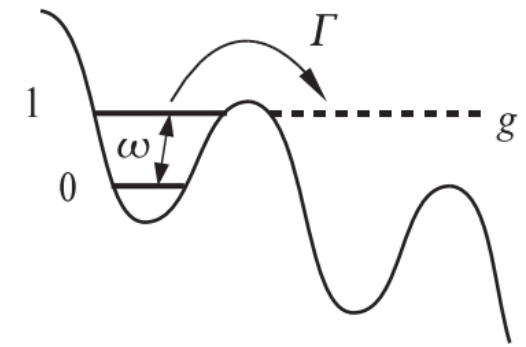
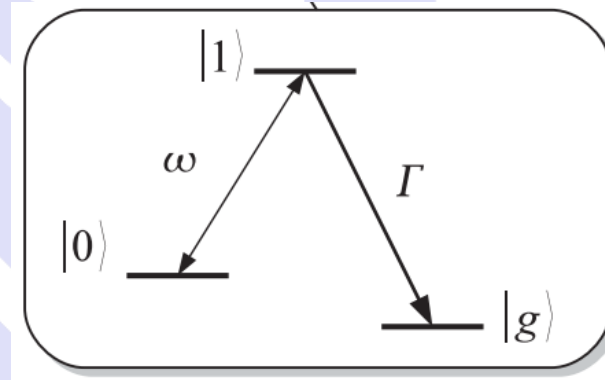
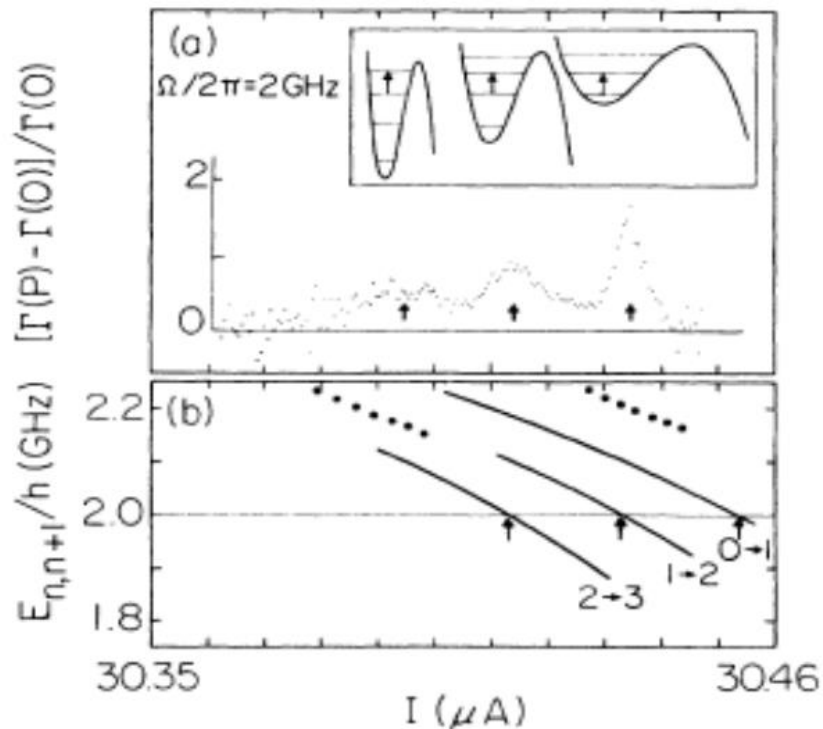


فرانک و هرتز در سال ۱۹۱۳ وجود ترازهای گسسته انرژی اتم را با استفاده از بمباران الکترونی نشان دادند.



Saturation of escape rate

Energy level quantization



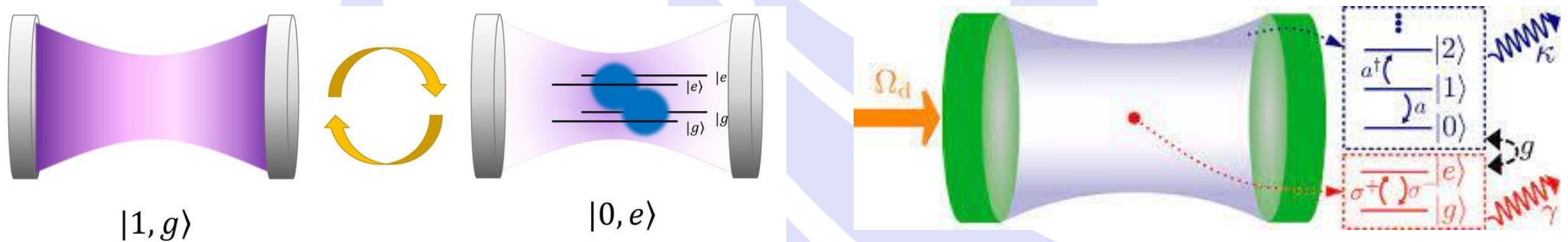
J. M. Martinis, M. H. Devoret, et al. PRB 35, 4682 (1987)





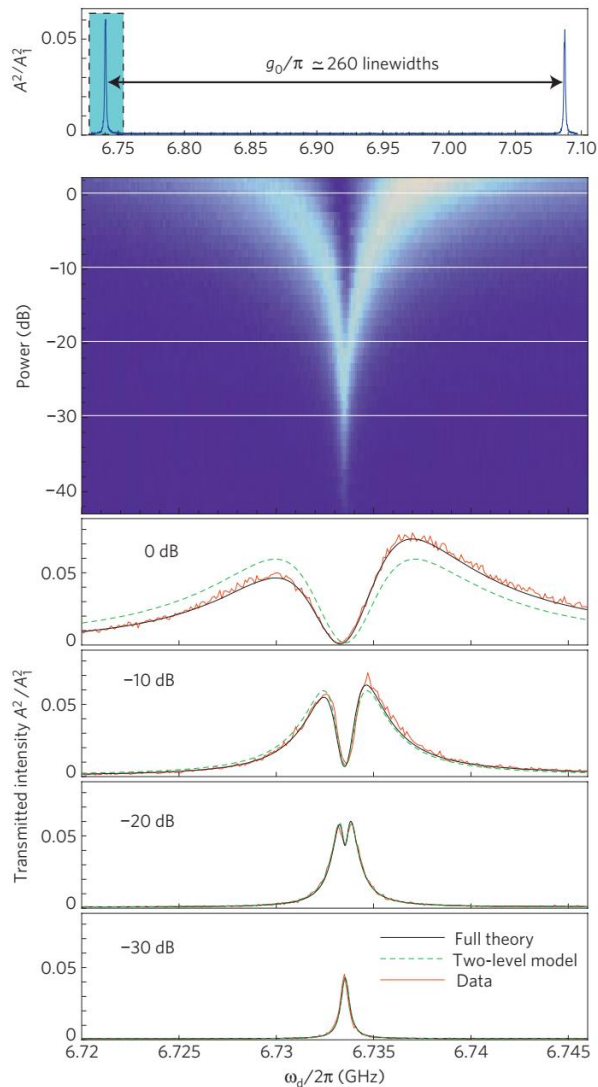
یک میدان الکترومغناطیسی کوانتیزه می تواند در درون یک کاواک ریز، به صورت همدوس با یک سیستم دو ترازی تبادل انرژی داشته باشد. به این فرآیند مبادله، نوسان رابی گفته می شود. به فرکانس تبادل انرژی بین میدان و ماده، فرکانس رابی گفته می شود.

## Cavity Quantum ElectroDynamics



# Nonlinear response of the vacuum Rabi splitting

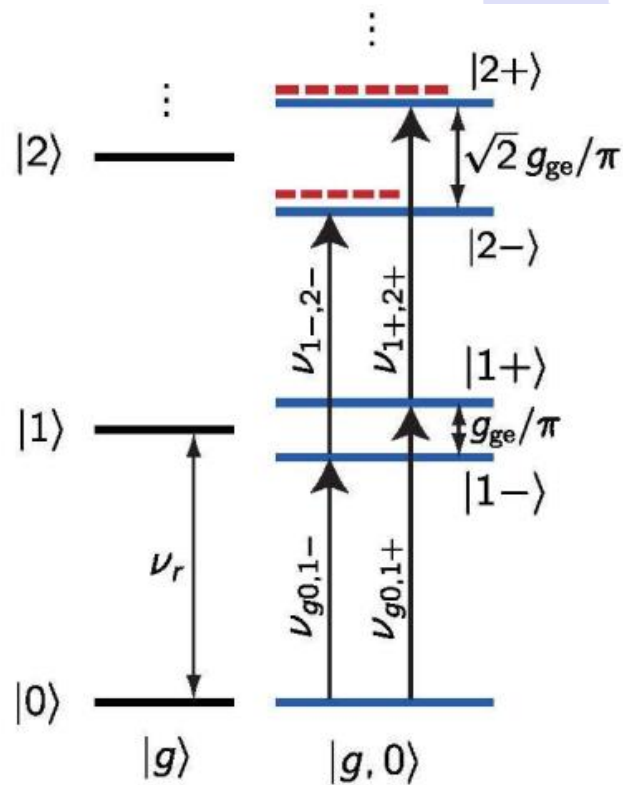
dressing of dressed states



vacuum Rabi splitting برخلاف تصور خیلی ها، یک پدیده ذاتا کوانتومی نیست.

در مقاله ۱۹۹۰ نشان داده شده که یک نظریه کاملا کلاسیک می تواند این اجتناب از برخورد را توجیه کند.

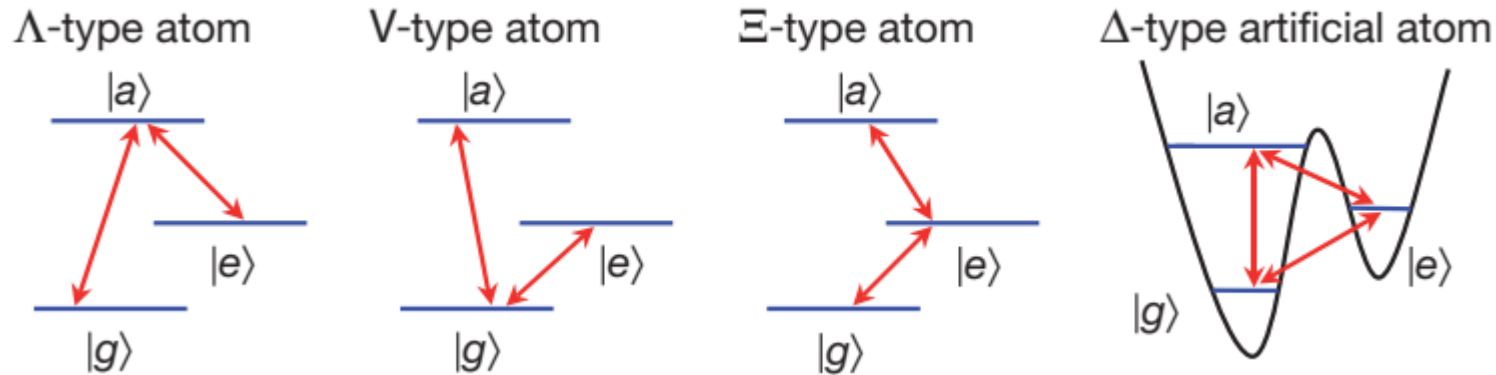
Y. Zhu, et al, *Physical Review Letters* 64, 2499–2502 (1990).





# قوانین کوانتومی انتخاب گذار

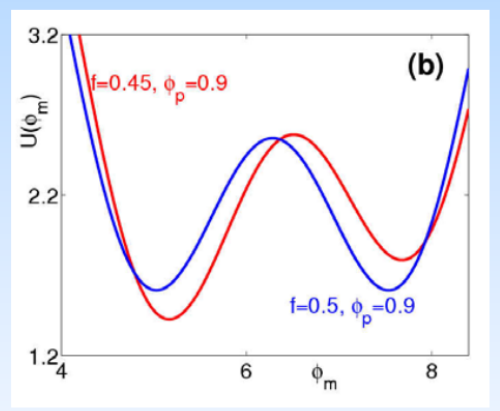
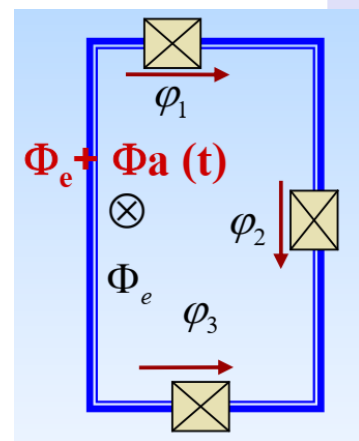
- در اتم های طبیعی، حالت الکترونیکی در هر حالت مداری دارای تقارن پاریته کاملاً تعریف شده، زوج یا فرد است.
- تحت تقریب دوقطبی، برهمکنش همیلتونی بین اتم و میدان الکتریکی وابسته به زمان دارای پاریته فرد است. بنابراین، برای داشتن یک عنصر ماتریس گذار دوقطبی غیر صفر، باید یک تغییر پاریته بین حالت اولیه و نهایی، علاوه بر محدودیت های روی اعداد کوانتومی سمتی و مغناطیسی حالت های الکترونیکی وجود داشته باشد.
- قانون گذار اپتیکی تنها وجود سه نوع سامانه اتمی سه ترازه را مجاز می داند:



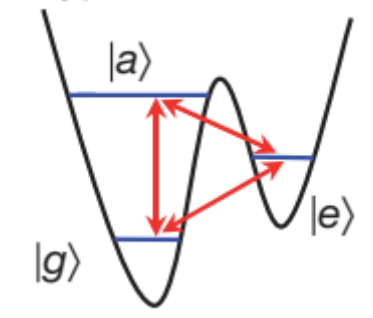
# قوانین کوانتومی انتخاب گذار

هیچ گذار دوقطبی بین حالت های الکترونیکی با پاریته یکسان مجاز نیست. با این حال، قوانین انتخاب برای اتم های مصنوعی ابررسانا متفاوت است. به عنوان مثال، در تقریب دوقطبی، برهمکنش همیلتونی بین یک مدار کیوبیت شار و یک میدان مغناطیسی وابسته به زمان، پاریته مشخصی ندارد، مگر در نقطه های با شار مغناطیسی ساکن، که در آن شار مغناطیسی ساکن اعمال شده به حلقه و  $\Phi_0$  کوانتوم شار مغناطیسی است. در این مقدار شار خاص، برهمکنش همیلتونی دارای پاریته فرد است.

$$f \equiv \Phi / \Phi_0 = \frac{1}{2}$$



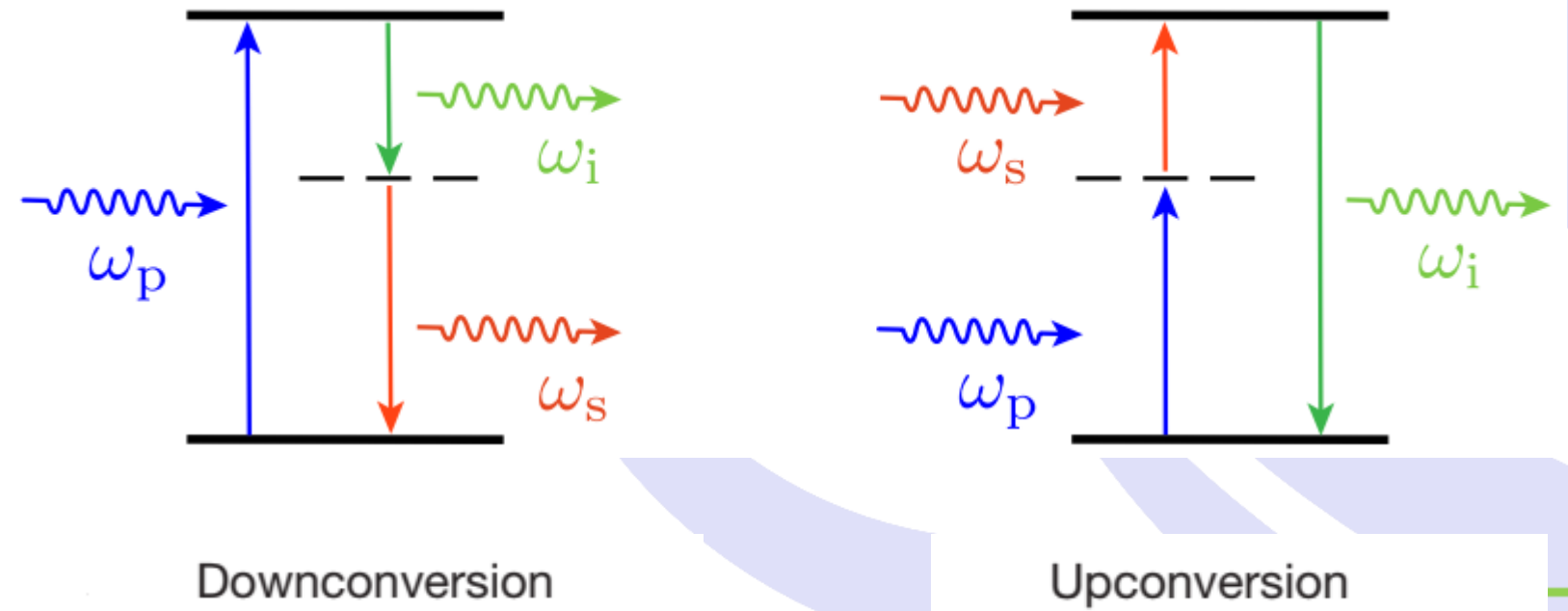
$\Delta$ -type artificial atom



$$f \neq \frac{1}{2}$$

$$H = \frac{q^2}{2C_J} + \frac{\phi^2}{2L} - E_J \cos \left[ \frac{2e}{\hbar} (\phi - \Phi_{\text{ext}}) \right]$$

مدار ابررسانا به عنوان یک اتم مصنوعی حلقوی عمل می کند، جایی که فرآیندهای یک و دو فوتون می توانند همزمان وجود داشته باشند. در این تبدیل های فرکانس، همه انتقال ها فقط شامل فرآیندهای خطی می شوند. این در تضاد شدید با تبدیل فرکانس مرسوم در اپتیک غیرخطی است، جایی که یک محیط غیرخطی استفاده می شود و اثر غیرخطی تبدیل فرکانس فوتون ها را تسهیل می کند.

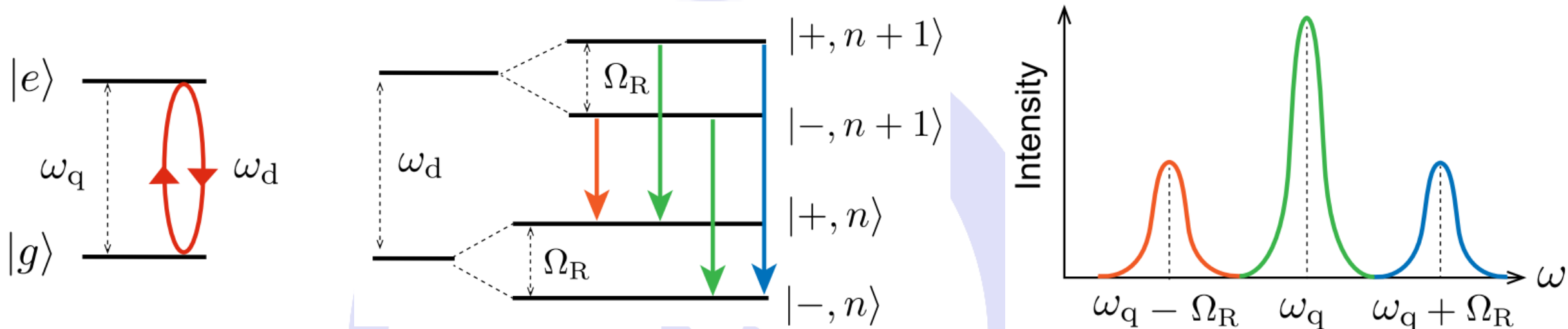


Deppe, F. et al. Two-photon probe of the Jaynes-Cummings model and controlled symmetry breaking in circuit QED. Nature Phys. 4, 686–691 (2008).

de Groot, P. C. et al. Selective darkening of degenerate transitions demonstrated with two superconducting quantum bits. Nature Phys. 6, 763–766 (2010).



# Mollow triplet



در ایو قوی همدوس در حالت تشدید یک سامانه دو حالت در فضای زمان

ایجاد حالت پوشیده

در ایو در حالت تشدید یک سامانه دو حالت در فضای فرکانس

فرکانس رابی

سه گانه مالو

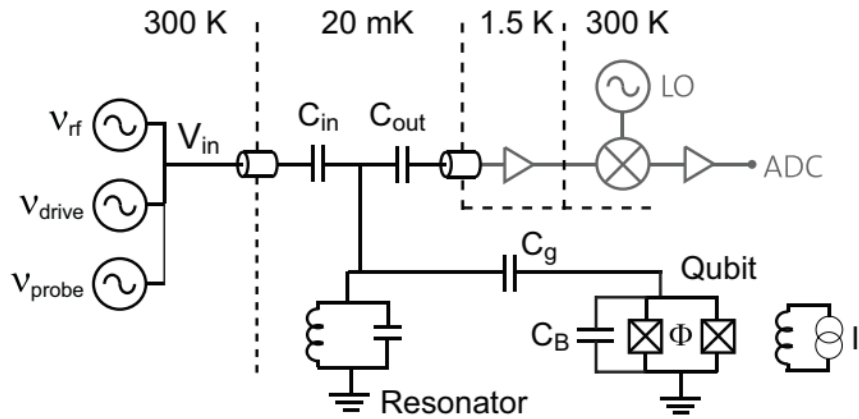
پهنای خطی  $\Omega_R \geq \text{اتم}$

$$\Omega_R = 2g\sqrt{n}$$

قدرت جفت شدگی

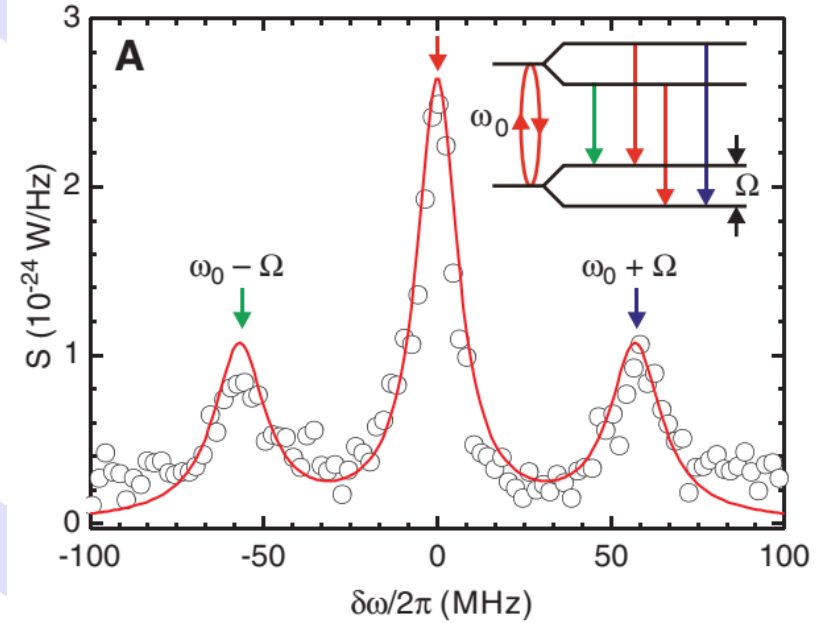
تعداد فوتون های درایو کننده

## کیوبیت شاری



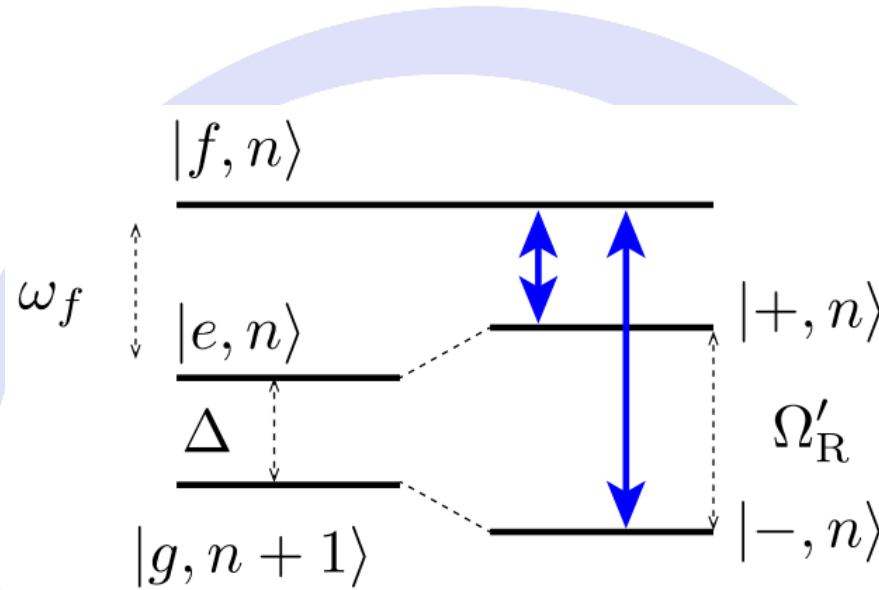
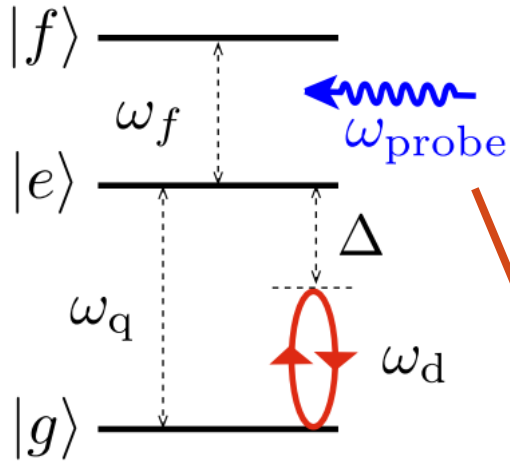
## کیوبیت باری ( ترانسمون )

M. Baur, et al, Measurement of Autler-Townes and Mollow transitions in a strongly driven superconducting qubit, Phys. Rev. Lett. 102 (2009)

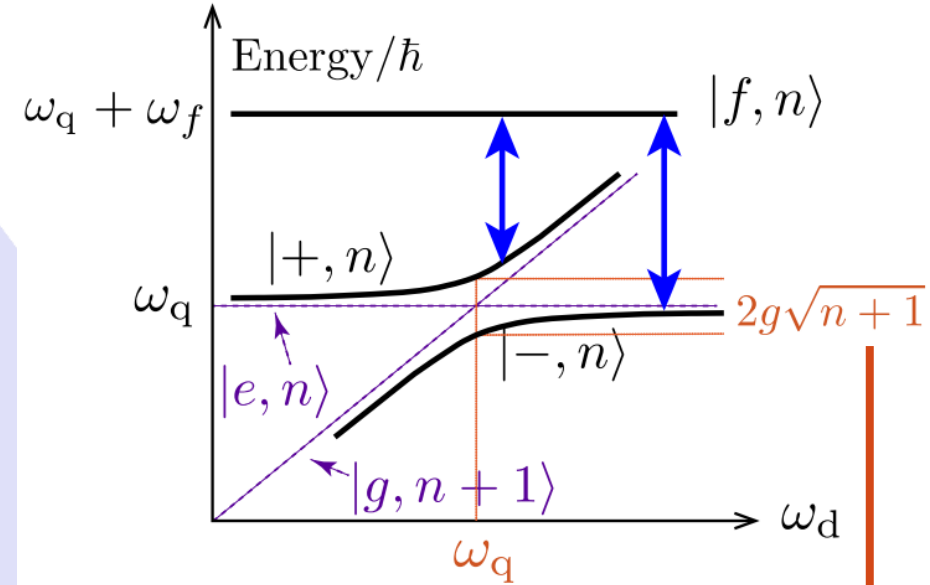


O. Astafiev, et al, Resonance fluorescence of a single artificial atom, Science 327 (2010)

# Autler-Townes doublet or ac Stark effect



تغییر در فرکانس تشدید  
 $\omega_f$  to  $\omega_f \pm \Omega'_R/2$



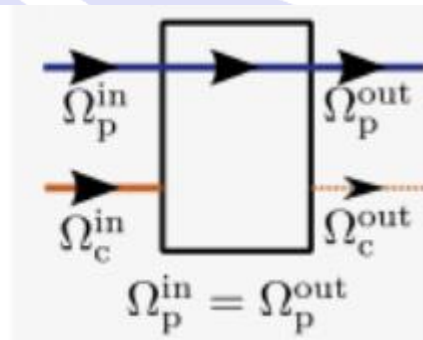
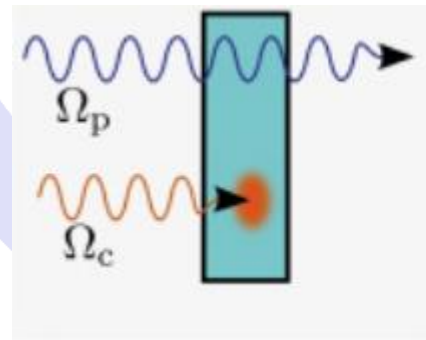
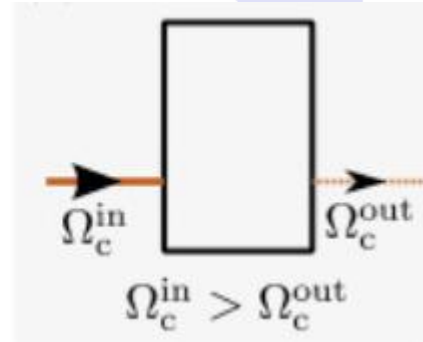
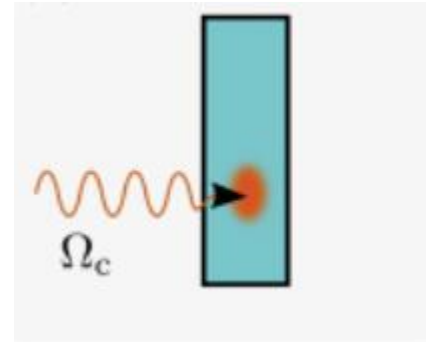
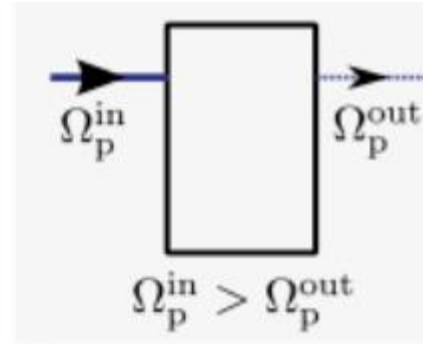
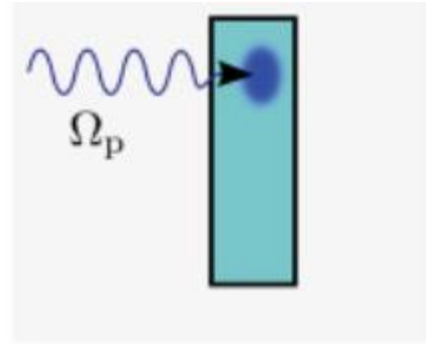
مقدار جدایی، قدرت جفت‌شدگی  
 را نشان می‌دهد

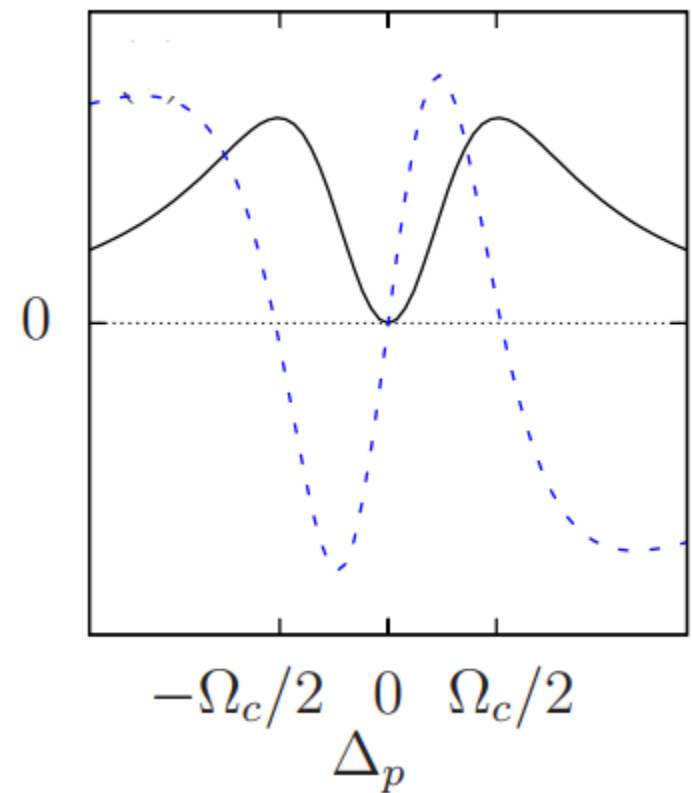
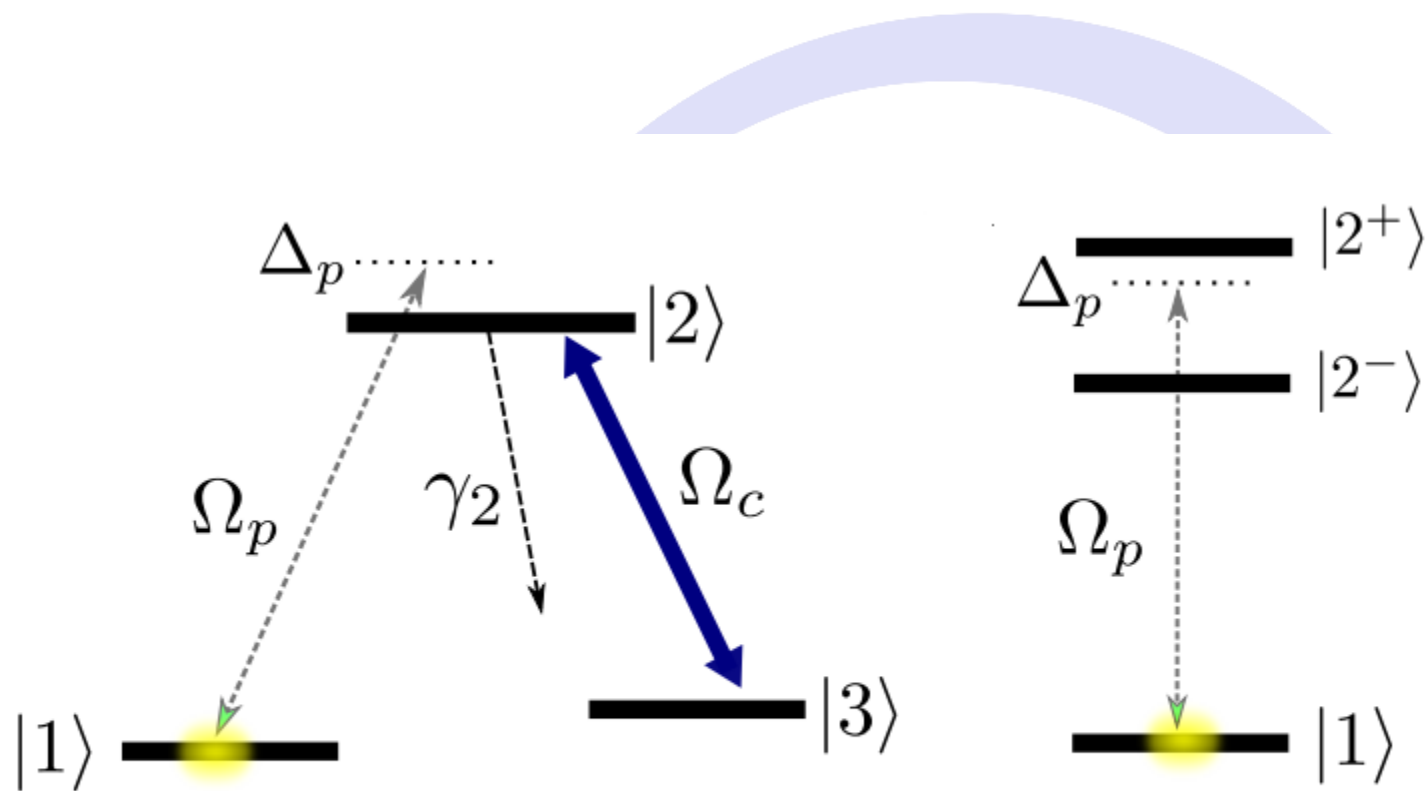
از آنجایی که یک پروب ضعیف با یک گذار اتمی در تشدید است و به شدت توسط اتم جذب می‌شود، ATS با تغییر فرکانس تشدید گذار، چنین جذبی را خاموش کند.

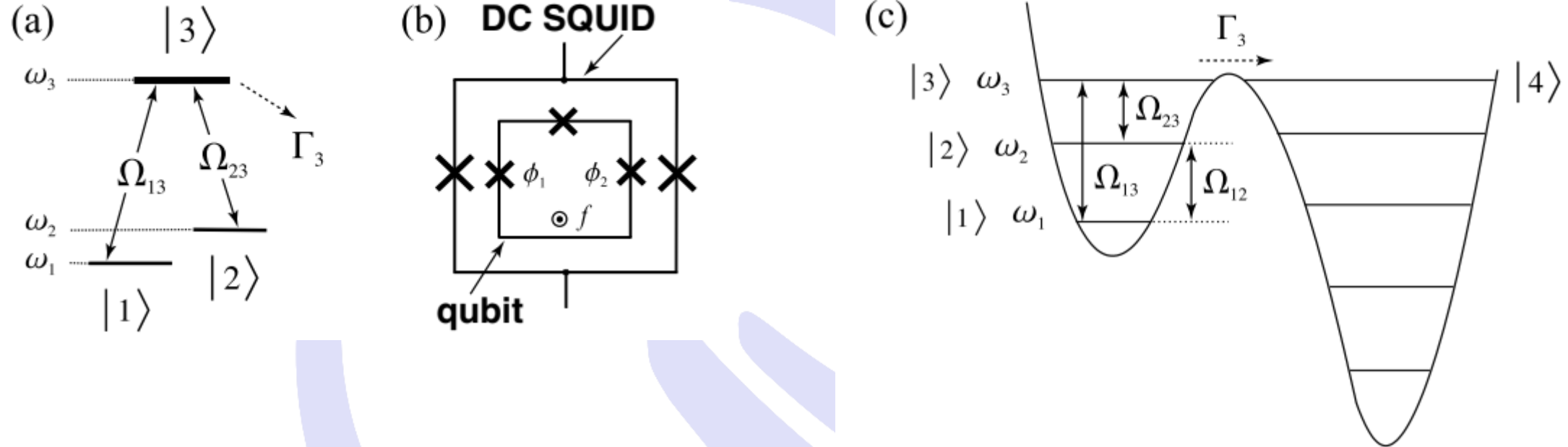


## Optical EIT

## Circuit EIT

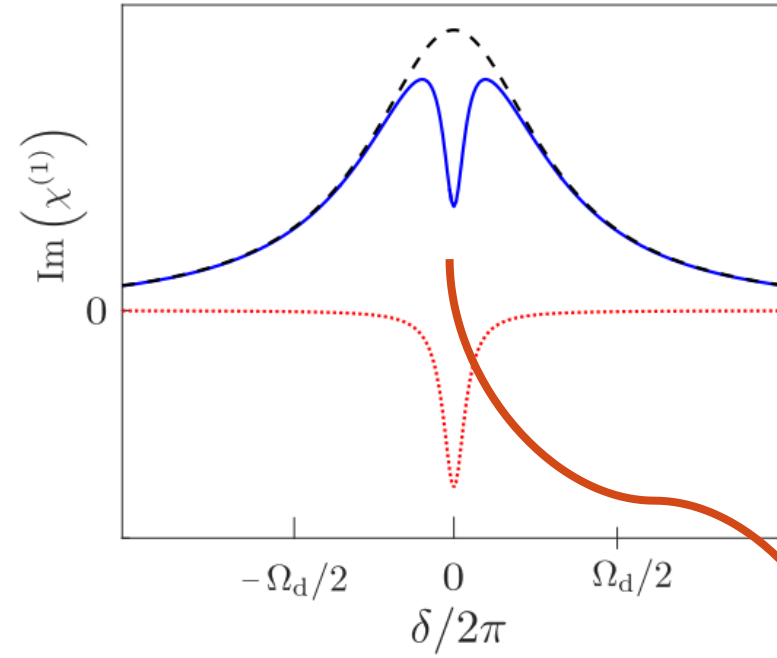
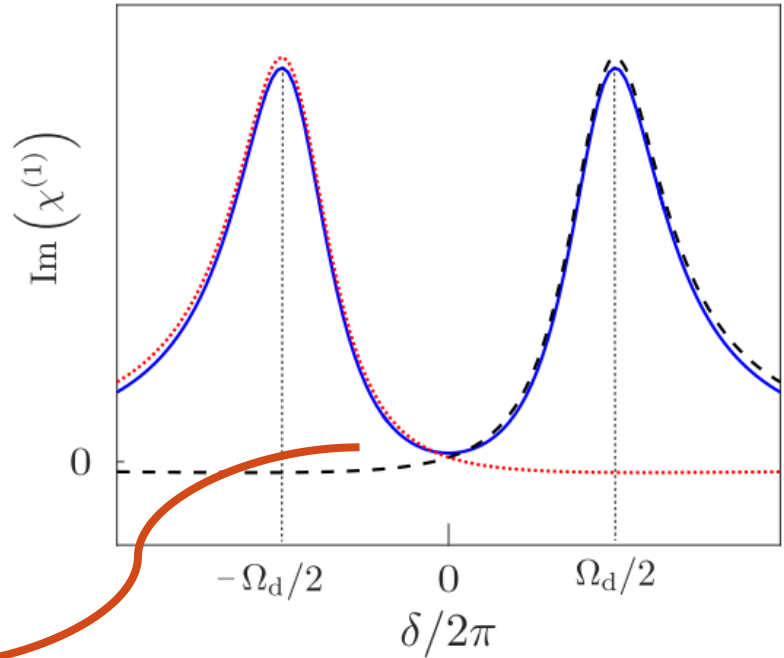






▪ غیر از ساختار لامبدا اتمی، مشاهده پدیده EIT در ساختار مثلثی اتم مصنوعی ابررسانایی نیز مشاهده شده و پنجره شفافیت بین دو باند جذب و تقویت ساندویچ می‌شود.

# Autler-Townes doublet & EIT



در اثر درایو قوی و  
جابه جایی ترازها

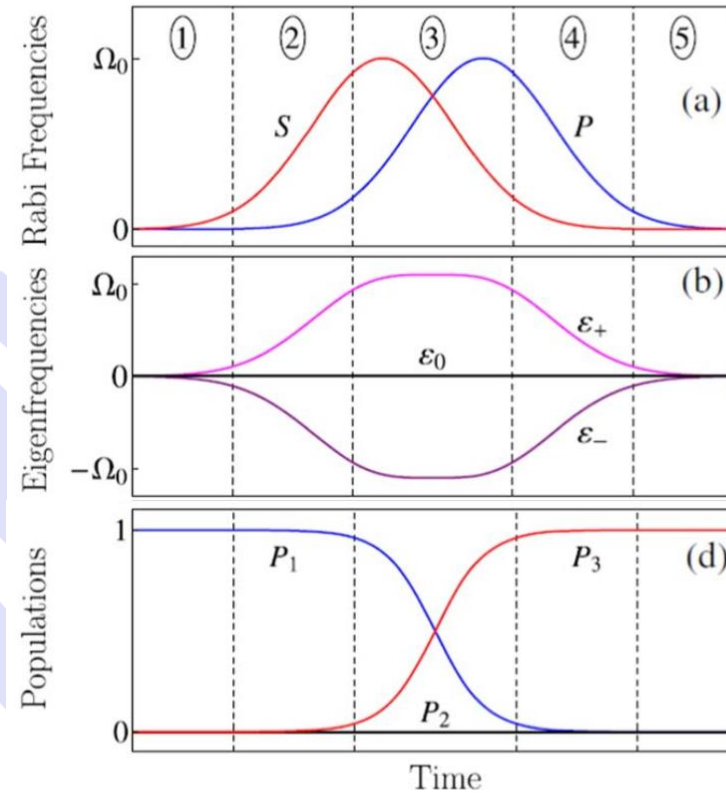
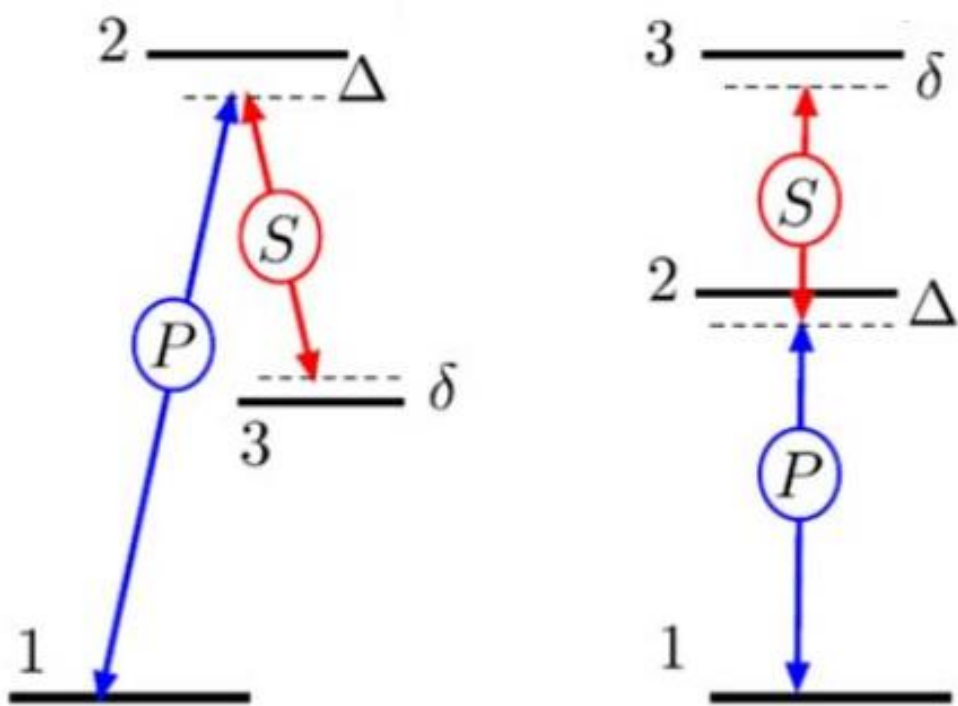
در اثر تداخل فانو: تداخل  
ویرانگر دو مسیر برانگیختگی

▪ قدرت درایو کردن متمایز کننده این دو پدیده است.

Akaike information criterion

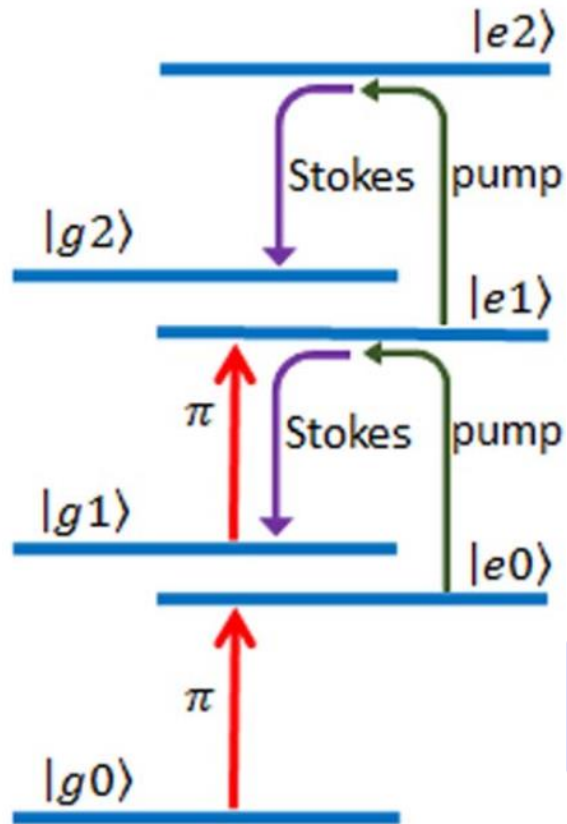
## گذار آدیباتیک رامان شده

گذار آدیباتیک رامان شده (**STIRAP**) یک پروتکل پرکاربرد برای تحقق کنترل کوانتومی با وفاداری بالا و قوی در سیستم های کوانتومی مختلف است، کنترل همدوس انتقال جمعیت از یک حالت اولیه به یک حالت هدف و ایجاد یک برهم نهی همدوس دلخواه بین دو حالت.



K. Bergmann, H. Theuer, and B. W. Shore, Rev. Mod. Phys. **70**, 1003 (1998).  
 N. V. Vitanov, T. Halfmann, B. W. Shore, and K. Bergmann, Annu. Rev. Phys. Chem. **52**, 763 (2001).

گذار آدیباتیک رامان تحریک شده برای کیوبیت ترانسمون و کیوبیت فازی در سال ۲۰۱۶ انجام شد که صداقت ۸۰ و ۹۶ درصدی انتقال بین دو تراز بدست آمد. در این آزمایشات ویژگی‌های: عدم حساسیت نسبت به واکوکی تک-فوتون، شکل پالس و احتمال رخداد فرآیند معکوس، ثابت شده است.



$$|g0\rangle \xrightarrow{\frac{\pi}{2}} (|g0\rangle + |e0\rangle)/\sqrt{2} \xrightarrow{\text{STIRAP}} (|g0\rangle + |g1\rangle)/\sqrt{2}.$$

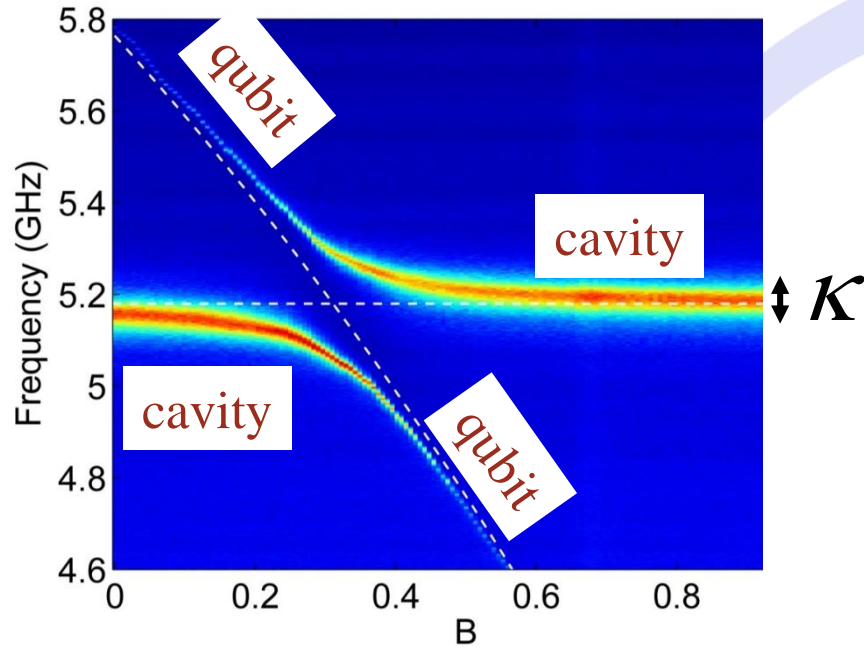
ایجاد حالت برهم نهی حالت فوک

گذار آدیباتیک رامان تحریک شده برای کیوبیت ابررسانایی، طولانی بودن بازه زمانی انجام گذار آدیباتیک است.

A schematic of the pulse sequence for creating Fock states using STIRAP



# Single photon generation



$$|IN\rangle = [\alpha|\downarrow\rangle + \beta|\uparrow\rangle]|0\rangle$$

$$|OUT\rangle = |\downarrow\rangle[\alpha + \beta a^\dagger]|0\rangle$$

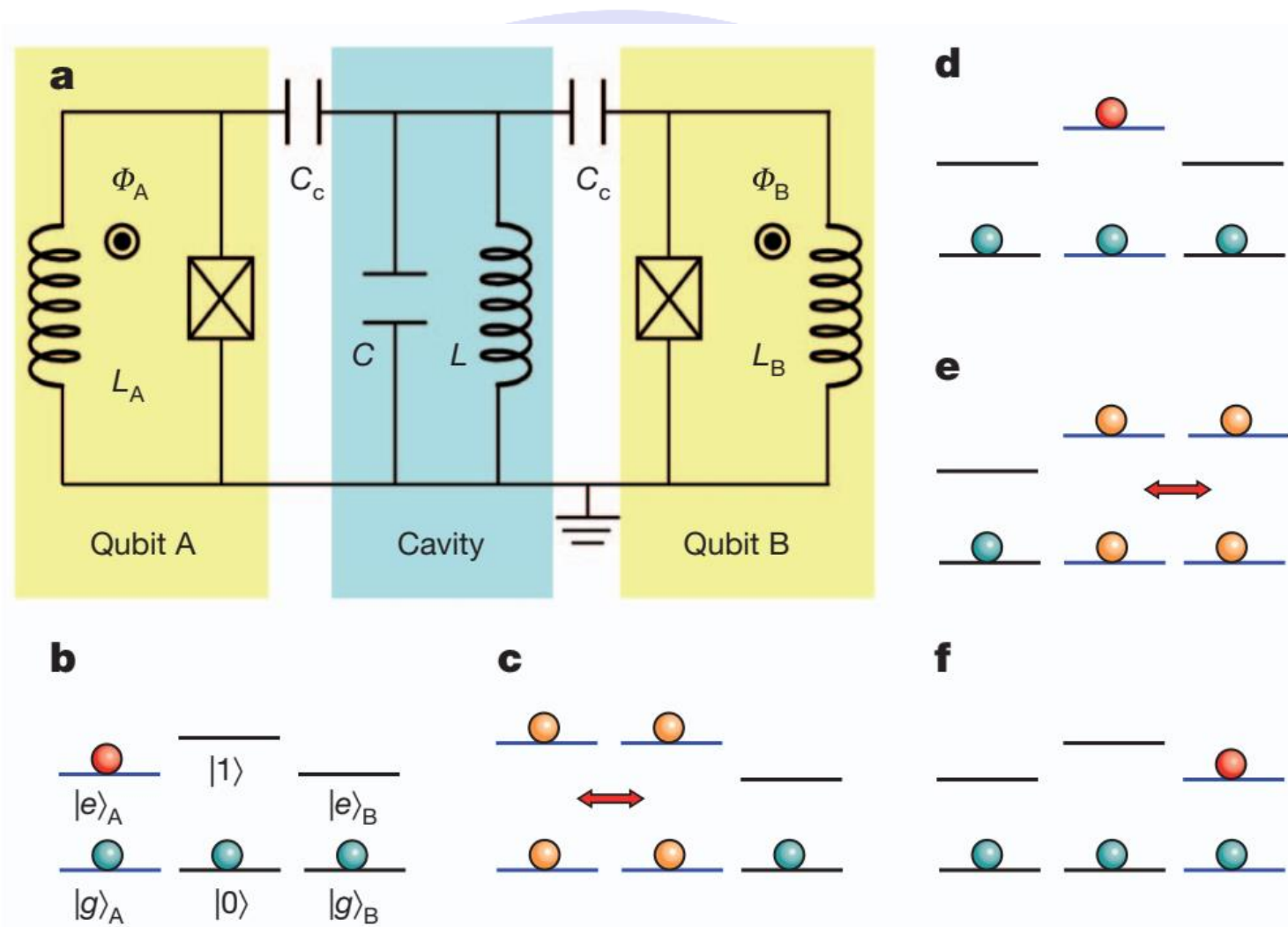
- چرا تولید تک-فوتون؟ به علت برقراری ارتباط کوانتومی بین دو یا چند رایانه کوانتومی به طوری که حالت کوانتومی در این ارتباط حفظ گردد.
- هنگامی که یک اتم یا کیوبیت با قدرت با یک کاواک جفت می شود، نرخ گسیل خود به خودی مد خروجی کاواک افزایش می یابد، فرآیندی که به عنوان **اثر پورسل** شناخته می شود. از این اثر برای ساخت یک منبع تک فوتون استفاده می شود.
- با انجام توموگرافی هم کیوبیت و هم فوتون های ساطع شده، مشاهده شده که فاز کوانتومی و دامنه در طی گسیل منتقل می شوند.

$$\gamma = \gamma_{\perp} + \left(\frac{g}{\Delta}\right)^2 K$$

Intrinsic non-radiative decay rate

Cavity enhanced decay rate

# Transferring quantum information between two stationary qubits via a cavity

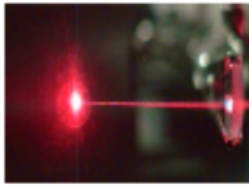
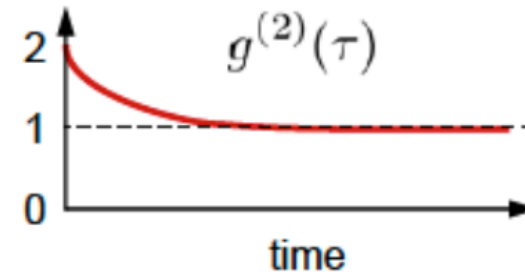
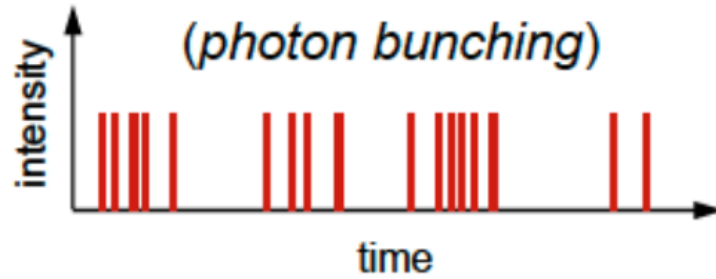


# Antibunching

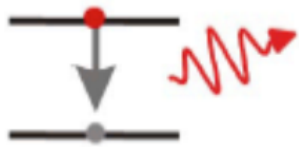
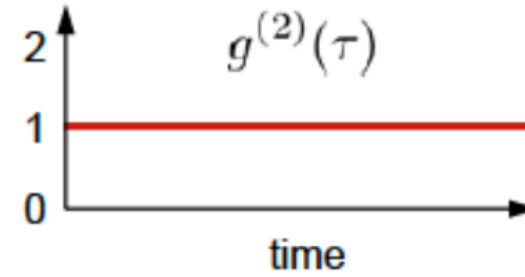
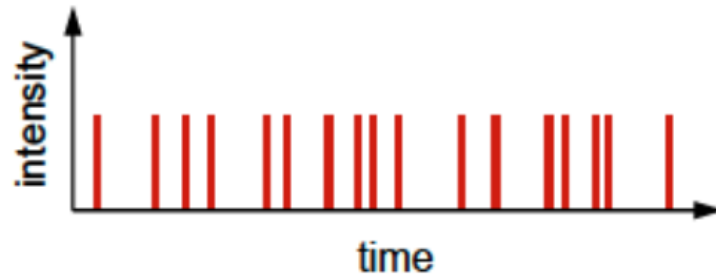
A comparison between different light sources:



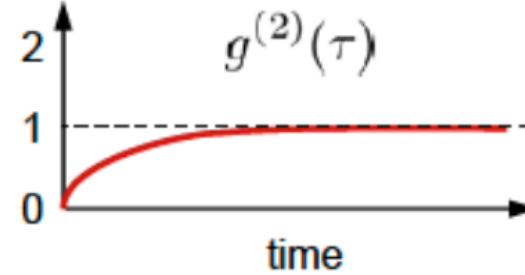
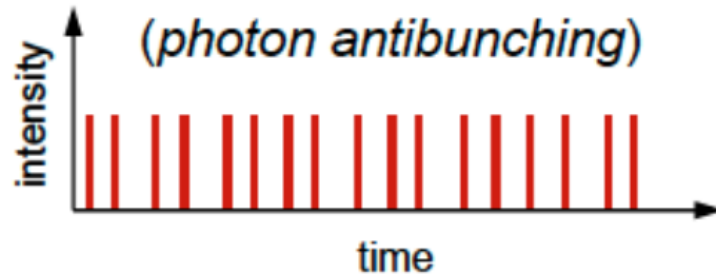
thermal light



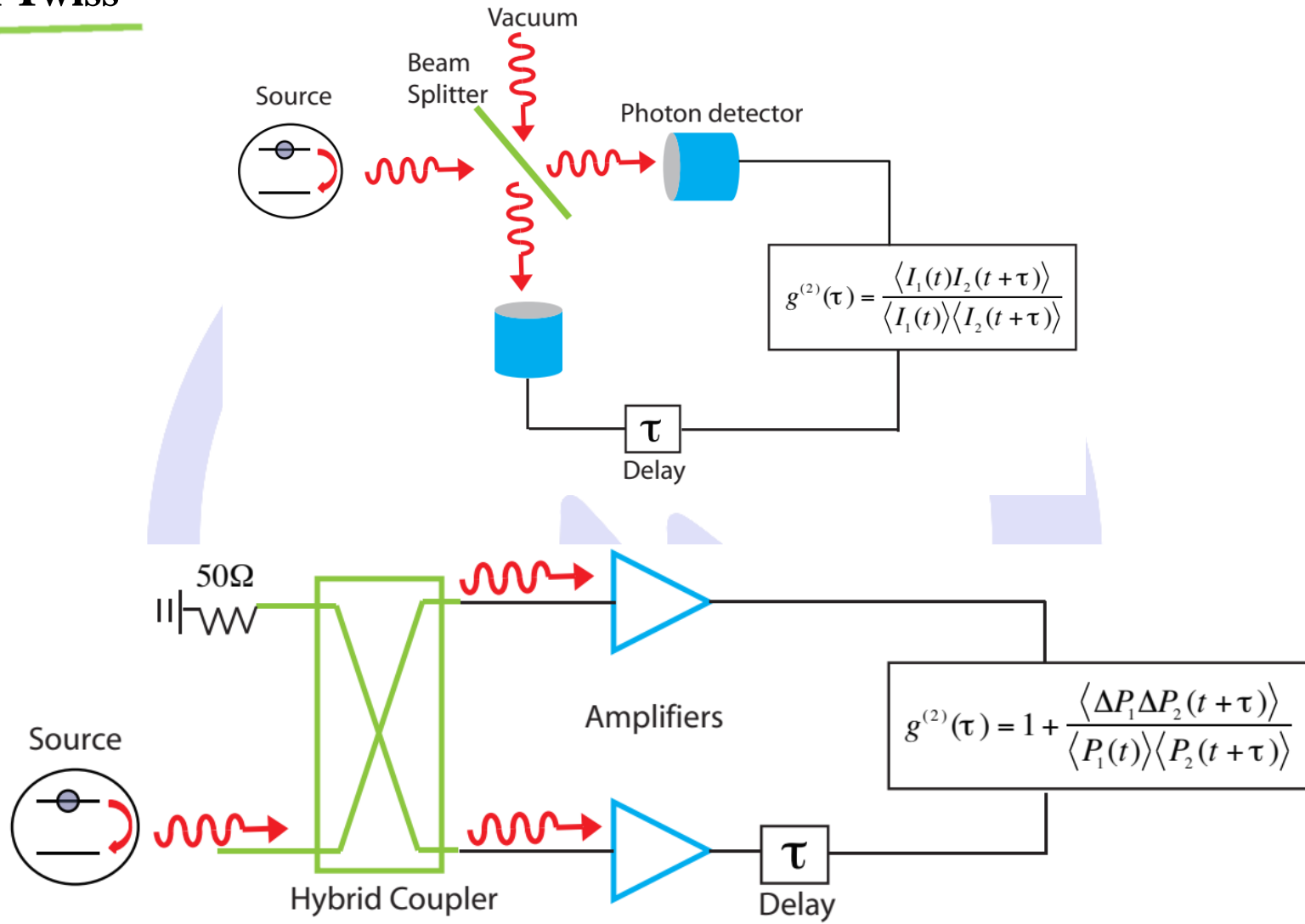
laser light



single photon source



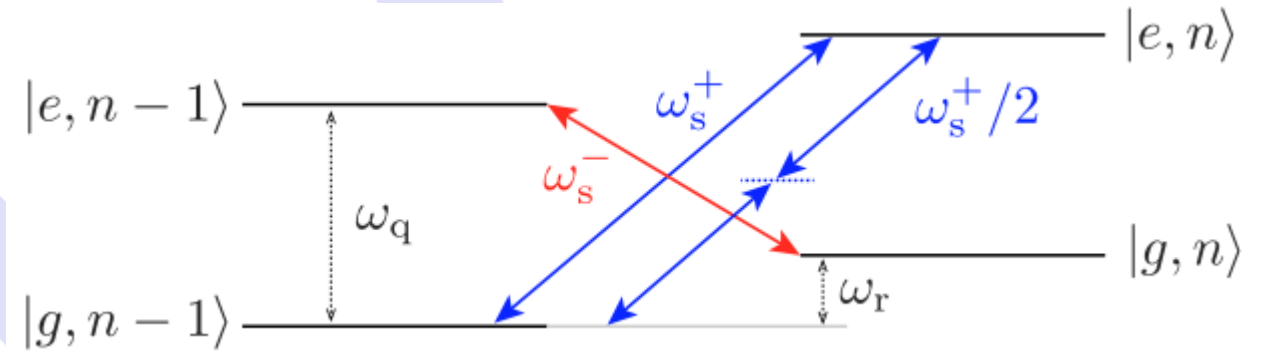
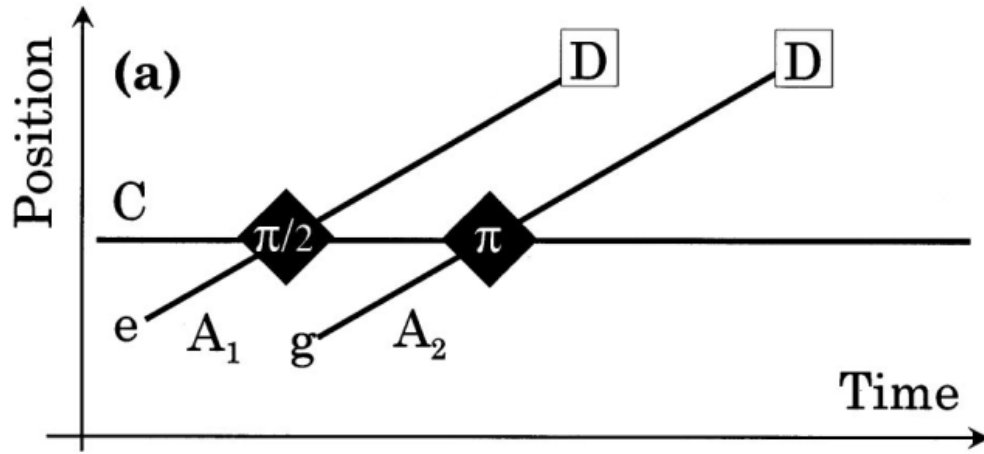
# Hanbury-Brown Twiss



Bozyigit, D., Lang, C., Steffen, L. *et al.* Antibunching of microwave-frequency photons observed in correlation measurements using linear detectors. *Nature Phys* **7**, 154–158 (2011).

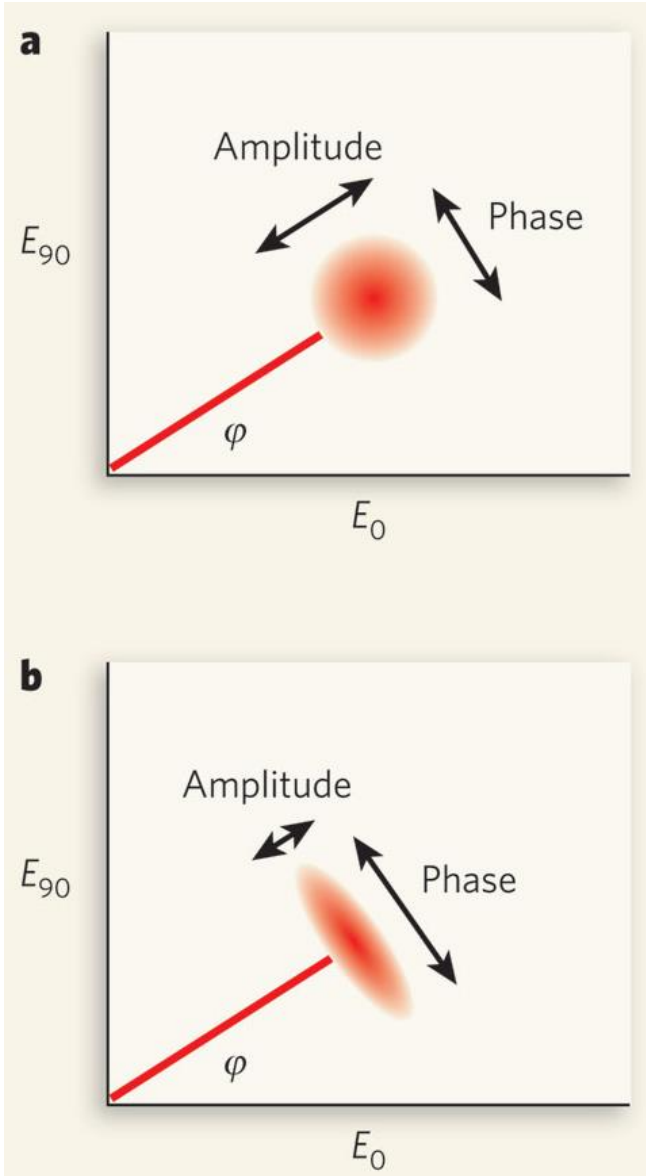
# Sideband Transition- Entanglement between a qubit and the resonator

گذار باند جانبی در تحقق درهم تنیدگی کیوبیت- فوتون و معماری الکترودینامیک کوانتومی مدار برای پردازش اطلاعات کوانتومی مهم است.  
گذار باند جانبی دو- فوتونی برای تحقق عملیات گیت‌های غیرموضعی در مجموعه‌ای از کیوبیت‌ها همراه با یک کاواک ضروری است.



J. Raimond, M. Brune, and S. Haroche, Rev. Mod. Phys, **73**, 565 (2001)

# Squeezed states



$$\Delta x \Delta p = \hbar/2, \quad \Delta x = \Delta p$$

همدوس

$$\Delta x \Delta p = \hbar/2, \quad \Delta x \neq \Delta p$$

چلانده

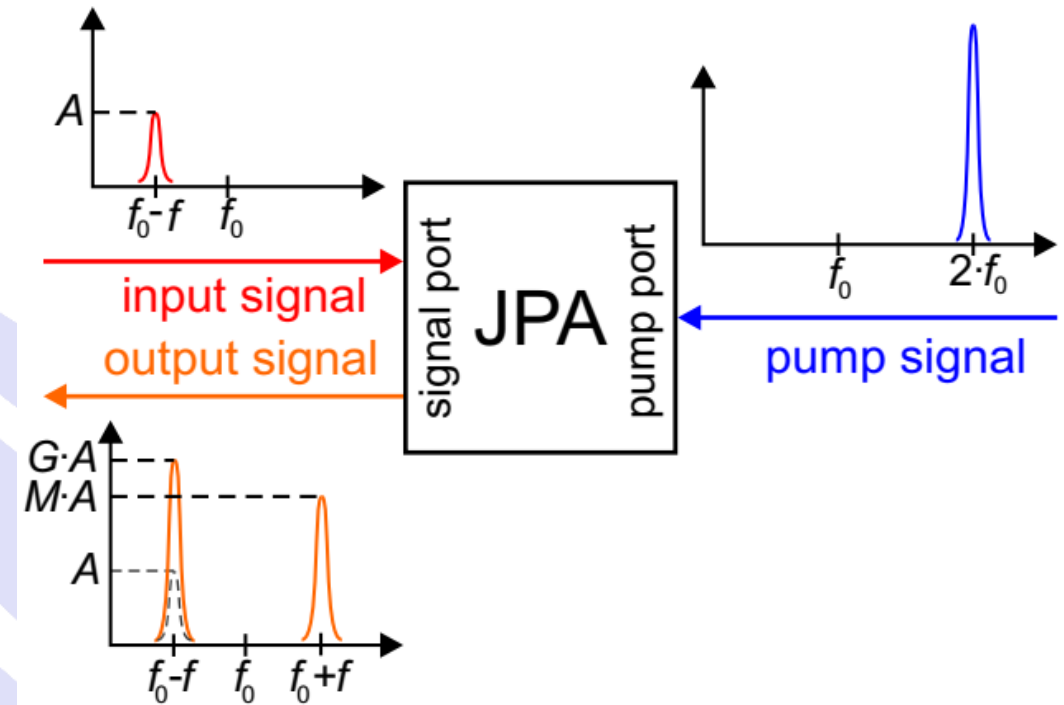
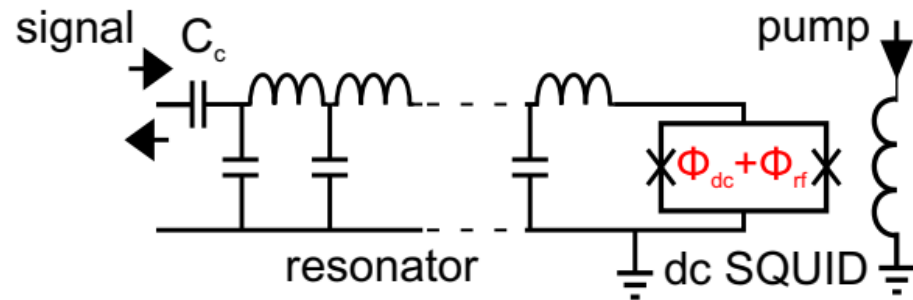
کاربردهای حالت چلانده:

- اندازه گیری با دقت بالا
- تولید درهم تنیدگی
- رایانش کوانتومی
- ارتباطات کوانتومی





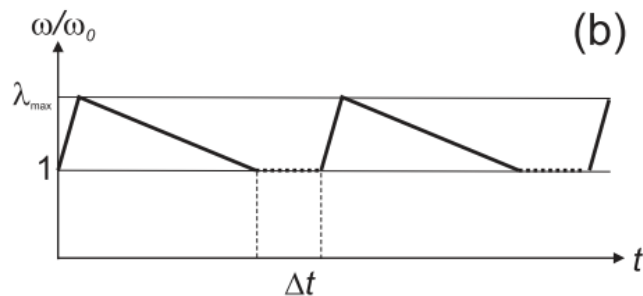
- مدارات ابررسانایی به این دو علت که غیر خطیت آنها قابل تنظیم است و همچنین میرایی کمی دارند، به عنوان منابع مطلوبی برای حالات چلانده هستند.
- مهمترین این منابع، تقویت کننده پارامتریک جوزفسون است.
- در مدارات ابررسانایی، حالات چلانده باعث کم شدن فروافت تابشی کیوبیت ها، افزایش صداقت در خوانش پاشنده کیوبیت و بهبود تولید درهم تنیدگی می شوند.



جابجایی‌های فرکانس آهسته و سریع به صورت مکرر می‌تواند حالت‌های چلانده را در یک نوسان‌گر ابررسانا غیرخطی ایجاد کند، در نتیجه نوسانات دامنه (فاز) نوسان‌گر را در جهات خاصی در فضای فاز، که با فرکانس نوسان‌گر پایه می‌چرخند، سرکوب می‌کند. با استفاده از این کاهش نویز، اندازه‌گیری دامنه (فاز) این نوسان‌سازها می‌تواند به حساسیتی کمتر از حد کوانتومی استاندارد یا حداقل زیر سطح حرارتی برسد.

$$H(0) = (\omega_0/2)(a_0^\dagger \bar{a}_0 + a_0 \bar{a}_0^\dagger) \quad \omega_0 \rightarrow \omega \quad H(t) = H_0 + \frac{\omega(t)^2 - \omega_0^2}{4\omega(t)} (a_0^\dagger a_0 + a_0 a_0^\dagger + a_0^{\dagger 2} + a_0^2) - i \frac{\dot{\omega}(t)}{\omega(t)} (a_0^{\dagger 2} - a_0^2).$$

**Liouville equation**



- *Quantum Zeno effect*
- *Lamb Shift*
- *Lasing without population inversion*
- *Superradiance*
- *Photon blockade*
- *Quantum jumps*
- *Sisyphus cooling*
- *Coherent population trapping*
- ...

# پایان

سپاس از توجه شما



مرکز تحقیقات  
فناوری‌های  
کوانتومی ایران



Kharazmi University