20200224 在线研讨

Q：光晶格钟里，是Lattice越深越好吗？实验中一般用的有多深？

A：光晶格钟系统中，光晶格的作用是为了把原子的运动与光钟频率解开耦合，两种等价的说法是，去除多普勒效应，或者去除热效应（温度的影响），等等。

光晶格并不是越深越好，够用就行，实验中一般是几十个Er，1Er = (hbar k)^2 / (2m)。

光晶格太深，会导致过大的密度和密度诱导的频移，而且也有可能导致非线性的a.c. Stark效应。足够深而又不太深的光晶格里，只需要考虑线性a.c. Stark 效应。

Q：然后实际被测的跃迁是，在锶87里，就是1S0到3P0的这个线宽很窄的跃迁。然后在光晶格里有线性的ac stark，分别使两个能级发生变化，魔术波长就是让他俩变化一样，从而使钟跃迁的频率是一样的。是这样吗？

A：是的。

Q：那么控制每个格点一个原子的难点是什么呢？比如Mott Insulator，如果On Site Interaction很大，就是单个格点单原子的。是因为Sr没有波相互作用所以很难有大的On Site Interaction吗？  
A：光晶格钟，首先你要有三维光晶格——还要满足magic-wavelength lattice 的要求；第二要有足够低的温度——以使得interaction够大；第三要调整好总的原子数，或者说化学势。Mott insulator相也有N = 2, 3, ...的相，不只是N=1的。

到2015年，锶的简并费米气体和锶钟是两个互相没有交集的实验群体。2017年，叶军老师实验组第一次实现3D光晶格中的简并锶87费米气体的原子光钟。

Q：上次课的结尾，给大家留了一道预习思考题。下面小小地测试一下：

如果我有一个手表，第一天的读数比国际标准快5秒，第二天的读数还是快5秒，第三天、第四天、第五天……每次看的时候，都比国际标准时间快5秒。这种测量结果应该用哪个术语来形容呢？  
A：有三个用得最多的词：

Stability 稳定性 = Precision 准确度；高稳定性（高准确度）代表每次测量都有一样的结果，但可能有offset/bias。

Accuracy 精确度。高精确度代表平均值没有bias，但是statistical error bar可能比较大。

大家还记得普物实验中讲误差时，一般是多次测量求平均值，然后用类似于root-mean-square的办法（如standard deviation, standard error）这些数学工具来估算随机误差。

在时间频率测量中，一个用得更广泛的误差测算工具叫做Allan Deviation。对于无长期漂移的白噪声来讲，Allan Deviation会给出与Standard deviation相同的结果。

对于其他的噪声类型，如1/f noise等，Standard deviation会直接给出发散的结果，也就是没有well defined 结果，而Allan Deviation会给出一个有意义的结果。

所以这个度量在文献中用的特别多。感兴趣的同学可以参考下面这篇文献，美国国家标准局（NIST）的文档。  
  
Q：老师，我们怎么知道一个钟精不精确啊？随机误差我们可以用各种方法估计，但要知道系统误差不就已经知道一个精确值了么？

A：是的，扣除系统误差这件事如果做得正确，就可以得到accurate clock frequency。

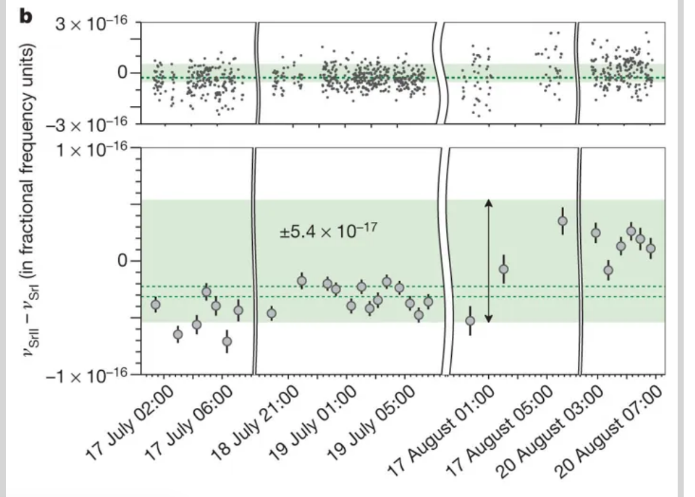
但是，系统误差估计得究竟对还是不对，还要两台分别估计并扣除了系统误差的钟进行比对，频率要在随机误差范围内完全吻合才算圆满。

Q：所以现在主要论文里说的负十几都是在讲precision，accuracy需要做自比对吗？

A：确切讲，Allan Deviation都是讲precision，或者是测量系统误差的precision——即error table每一项的statistical error bar。

测算系统误差的基本思想是微分测量（differential measurement），你说的自比对是其中的一种。

这幅图是2013年叶军老师组里的工作，图中的绿色带就是两台锶钟的比对：





因为光钟的频率受不同因素的影响，电场、磁场、lattice、原子数，我们每一次只能变化一个因素，而且要快！快到变化XXX时，其他所有的AAA、BBB、CCC都来不及变化，通过测量钟频率的变化找出它随XXX的变化斜率，从而在线性模型下推出工作条件下的系统误差。

这种“每次只变一个因素，而且要快！快到其他因素都来不及变化”的思想，推到极限就是所谓的lock-in技术，或者在射频领域叫 modulation-demodulation技术，非常有用。

大家钻研透一个，其他都容易通的。  
  
Q：请问光钟比微微波钟更准是因为什么原因呢？这个是原理上的必然还是说只是技术更好？

A：一个简单的回答是，光钟的频率与线宽之比（Quality factor）比微波钟更高，高出好几个数量级，所以可以在相同甚至更短的时间内达到更高的precision。这是原理上的必然。  
  
Q：为什么Q会更好呢？可以详细说下吗？  
A： 打个比方，你要把长度测到10微米，你可以拿米尺去测，也可以拿螺旋测微器去测，螺旋测微器有天然优势。

对于原子钟来讲，要达到2E-16的statistical error bar，铯喷泉钟（现在的国际秒定义）需要几个月的时间，百万秒量级的数据时间；而锶钟只需要秒量级的时间。相差非常之多。  
  
Q：但是我米尺可以测一百米 但是螺旋测微器只测几厘米 这样子Q感觉不太显然。可以用比较专业的语言来描述下这个事情吗？我理解optical的f远大与9.2G，但是感觉对Q来讲并不显然optical的大很多。  
A：但是我们说的频率精度相当于是小的时间尺度测得准。米尺，测小空间尺度测得不准，相当于铯钟所对应的微波波长为3 cm，它要测小尺度，当然不如光钟的微米尺度波长来得方便。这是类比的语言。

在严格说之前，我先纠正一个概念：我们说一个体系的稳定度，不是只引一个数字，如2E-16，3E-18就完毕了的。稳定度一定是，在某一个时间内达到一定的statistical error bar。在我上面提到的那篇Ben Bloom Nature 2014 paper里面，是3.1E-16 / Sqrt{tau}，意思是他们在秒量级能够达到3E-16。  


而对于铯原子钟：铯钟的频率9.1 GHz 远低于锶钟的 429 THz，低5个数量级。光钟的自然线宽是1 mHz，对应Q值是 4\*10^17。

也许我们会说，你把铯钟的频率测到10 nHz，不就能够达到相同的Q值了吗？

抛开频率的长期漂移不说，你要达到10 nHz 的statistical error bar，有两种办法：

一种，每几秒钟测一次，测它很多很多很多很多次。第二种，你用10^8秒测一次，测出来的线宽就应该是10 nHz。当然，这里我夸张了。为什么要说第二种呢？就是因为即使一个物理量是非常稳定的，要把这个稳定度测出来也非易事。

即使铯钟的频率绝对稳定，你测量的error bar取决于你的测量时间。也就是delta f = 1/ T，T是测量时间。换句话讲，如果你的测量时间是10秒，你的测量结果的error bar绝对不会优于0.1 Hz。所以要达到10 nHz，你要么花很多很多的次数去测量，要么在单次测量上花很多很多时间，或者两者的综合。总共要花的时间是逃不掉的。

所以你看，我为了达到某一个指标，如1E-16，用铯钟需要花非常长的时间，因为这个指标对应的线宽（1 uHz）很窄，无论你的测量条件如何，测量如何设计，都是如此；而对应线宽很窄的原因就是铯钟的绝对频率低，只有10^10 Hz。

而锶光钟呢？它本身就有10^15 Hz，所以要达到1E-16，只需要1~10 秒的测量时间也就够了。综上，光频标的stability（等价于precision）远优于微波钟这个结论是它们主频的差异导致的，与具体的测量方法没有直接关系。  
之前做的类比，说的Q值，之所以说是“简单而不完全严谨”，确实是因为我们一般说，铯钟的Q值~ 9GHz / 1Hz ~ 10^10时，这个1 Hz是喷泉钟抛一次原子做测量的时间为秒量级，不是它本身的hyperfine state lifetime。

Q: 所以说原因并不是微波钟的原子本身不行 而是我们没法去测它到底行不行？

A：这句话问得很好。我们要分清“内蕴稳定度”和“测量显示的稳定度”（测出来的稳定度结果）。

现在是重点：精密测量的前提是，你先要有一个非常稳定的东西摆在那里，让你去测。原子的一个钟跃迁频率的稳定度可以是10^(-21)，但是你测出来的稳定度可能只有10^(-17)，因为你用的激光器不行，或者你用的时间不够，等等不一而足，你测量的稳定度不可能比原子本身的内蕴稳定度更好，但可以逼近。简而言之，有的时候，一个东西很稳定，你不测，它也很稳定。

Q：嗯嗯 这个fundamental limit说的是quantum shot noise吗？  
A：quantum shot noise加上Fourier limit。

话又说回来，好多时候你测量出来的稳定度确实就是真的稳定度。我举一个例子：传统的微波钟确实受限于各种fundamental和technical的因素，它的有效Q值也就只有10^10，远低于光钟，所以它的稳定度也远不及光钟。但是AMO领域有两位先驱，Hansch和Hall，发明了一种叫光梳的东西，可以把微波钟频率和光钟频率联系起来。有了光钟“加持”后的微波钟那可就不一样了，通过光梳，可以让微波钟锁定到光钟频率上，让9.1 GHz的钟达到光钟的稳定性，而且不需要上面说的10^6~10^8秒，很短时间，即时锁定。这叫“光生微波”。它的线宽的确可以到 1 微赫兹或更小，无论你用不用微波技术去测量，它都在那里。

Q：我再确认下 fundamental limit也是optical clock比microwave 更低吗？

A：在一定的测量时间下，相同的原子数下，optical clock的fundamental limit 优于microwave clock。

Q：大概差几个量级呢？

A：2014年差三个数量级，而且随着光钟的改进，这个数字也在不断改进。现在可能差四个数量级以上了。我说的是“测出来的性能”的比较。  
  
Q：还有一个问题就是UV的和可见的原子测到的Q比IR的更好 这个是有什么原因吗？

A：测出来的性能，在逼近fundamental limit。从我们之前的主频差异看，五个数量级的内蕴差别吧。UV和visible的原子Q更好，主要就是因为频率更高。其内蕴线宽（锶87：1mHz）与原子在clock excited state上的Lifetime有关，锶87是150 秒。主要是频率更高，一招鲜，吃遍天。

作为这个问题的结语，我再重复一遍，这也是叶老师当时教导他的实验组（包括我在内）的话：

1. 如果一个人对你讲Signal-to-noise ratio却不同时说明measurement bandwidth，他就不懂他在说什么。
2. 如果一个人对你讲Allan deviation / stability /precision 却不同时说明测量时间，他就不懂他在说什么。
3. 如果一个人对你讲Quantum projection noise / shot noise 却不同时说明原子数（当然还有测量时间），他就不知道他在说什么。

请大家把这段话拿回家去，这会是你们真正的收获，真正的学术素养。

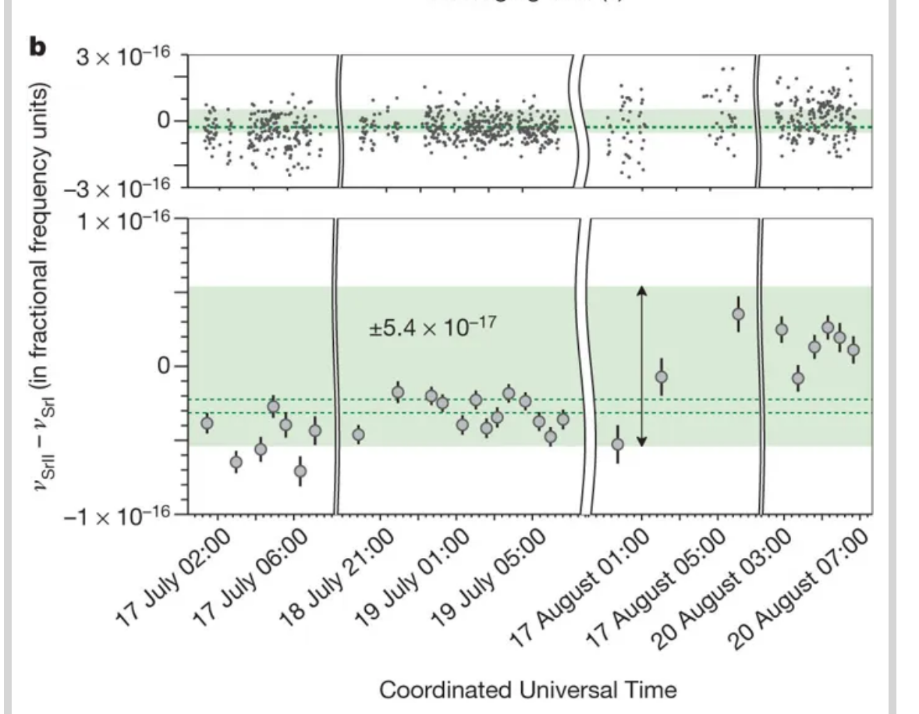
Q：最后一个问题 我见到的adev一般都是拐点在小时到一天的量级这是什么原因呢。为什么不能一直往下走 是什么东西不可避免地会drift走吗?

A: 拐点的出现，是因为系统有一些变量有长漂，没有被反馈或前馈控制得很好。

Q:这个是纯粹的technical问题吗 为什么难以解决或者说解决这个问题有没有意义呢?

A: 比如光钟有density shift，而density与原子的温度有关，如果你早晨的温度是5.0 uK，而到了晚上变成6.0 uK的话，这不会引起多普勒频移（因为有lattice），但是会有微弱的效应，影响你的density shift——虽然很小，比如在10^(-18)~10^(-19)量级，但是你的day-scale的Allan deviation也是这个量级。

Day scale 拐点是纯粹的技术原因。你看这幅图，两台光钟的对比，其实际实验的时间就超过一天了：



我们的实验控制得好，拐点出现的时间尺度就长。但我们的实验不可能控制得绝对无暇，所以拐点一定会在Allan deviation达到某个量级的时候出现，也许是10^(-18)，也许是10^(-19)，也许是10^(-21)，但它一定会出现，因为任何实验都有不完美的地方，而测量一定有误差。

Q：老师，我还想问一下，红蓝MOT是否仅关心其线宽，与是红失谐还是蓝失谐关系不大？以及为什么需要两级MOT？是因为Sr的什么特殊性质吗？我看很多组做铷/铯原子冷却都只有一级MOT。是所有的Sr组都在用这种红蓝二级的时序吗？  
A: Alkaline metal （Rb, Cs等）实验中，存在sub-Doppler cooling，可以通过Doppler cooling聚集大量原子，再通过sub-Doppler cooling降低其温度到 uK温区，所谓的MOT，末尾是有一个低磁场梯度，变化了光强的molasses阶段的。这相当于原子经历了两种laser cooling，两个阶段。Alkaline earth metal (AEA)如 Sr，它的外层有两个电子。

Q: 那锶是不能做PG cooling 和蒸发的吗？

A：锶可以做蒸发冷却，锶87有10个自旋态；但是Polarization Gradient cooling，确实没有见谁去做。我没有调查过，也许不是完全不能做，但是通过两级蓝、红MOT也能实现大量原子的微开温度，人们也就满意了，毕竟，只是微开温度。是一个实验的起点，能达到，也就没有想那么多了。

Q：哦哦，锶原子没有做PG，就用两个MOT来实现一样的效果。如果只有一个MOT，要么温度下不来，要么原子太少。那红蓝MOT和它是不是红失谐或蓝失谐的关系大么？

A：关系很大，失谐很重要。经典的Doppler冷却是基于红失谐的。

Q: 我看您在课上强调蓝MOT主要是使用的跃迁线宽较大，冷却快。蓝失谐的和红失谐的在原理上有什么其他不同么?

A：你是不是混淆了什么，蓝MOT是461蓝光的MOT，红MOT是689 nm红光的MOT，两个波长不一样的。是两套独立的激光器。蓝MOT和红MOT都是基于红失谐的MOT，f\_laser小于f\_atom。