

Cesium-atomikellot

- Miksi käytetään?
 - taajuus on vakaa
 - ei tarvitse ulkopuolista kalibrointirefenssiä
 - sekunnin määritelmä
- Miten toimii?
 - perustuu atomin absorboiman/emittoiman fotonin taajuuden mittaukseen
 - rooli muihin atomikellotyyppeihin nähden

Sekunnin määritelmä

Sekunti on 9 192 631 770 kertaa sellaisen säteilyn jaksonaika, joka vastaa cesium 133-atomin siirtymää perustilan ylihienorakenteen kahden energiatason välillä. (1967, 13. CGPM)

- Elektronin liikeyhtälö atomytimen ympärillä voidaan kirjoittaa Schrödingerin yhtälönä

$$H\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \qquad H = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right]$$

- Hamiltonin operaattorin ominaisfunktioiden määrä on rajattu, kun energia on rajattu
=> siirtymät energiatilojen välillä on aina yhtä suuria
- Tässä siirtymässä muutos aiheutuu ytimen spinin muutoksesta
 - Ylihienorakenteessa ytimen spinillä on potentiaali elektroniverhon kokonaisimpulssimomentin aiheuttaman magneettikentän kanssa. (hienorakenteessa elektronin spinillä on potentiaali elektronien kokonaisimpulssimomentin aiheuttaman kentän kanssa)
=> potentiaali muuttuu kun ytimen spin muuttuu
=> eri energian ominaisarvo
 - Alkaliryhmän atomeilla vuorovaikutus tapahtuu uloimman elektronin kanssa, koska muut elektronit ovat "suljetulla kuorella", jonka kokonaisimpulssimomentti on 0
 - "suljetulla kuorella" vakaa rakenne

Sekunnin määritelmä

Sekunti on 9 192 631 770 kertaa sellaisen säteilyn jaksonaika, joka vastaa cesium 133-atomin siirtymää perustilan ylihienorakenteen kahden energiatason välillä. (1967, 13. CGPM)

- Elektronin liikeyhtälö atomytimen ympärillä voidaan kirjoittaa Schrödingerin yhtälönä

$$H\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \qquad H = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right]$$

- Hamiltonin operaattorin ominaisfunktioiden määrä on rajattu, kun energia on rajattu
=> siirtymät energiatilojen välillä on aina yhtä suuria
- Tässä siirtymässä muutos aiheutuu ytimen spinin muutoksesta
 - Ylihienorakenteessa ytimen spinillä on potentiaali elektroniverhon kokonaisimpulssimomentin aiheuttaman magneettikentän kanssa. (hienorakenteessa elektronin spinillä on potentiaali elektronien kokonaisimpulssimomentin aiheuttaman kentän kanssa)
=> potentiaali muuttuu kun ytimen spin muuttuu
=> eri energian ominaisarvo
 - Alkaliryhmän atomeilla vuorovaikutus tapahtuu uloimman elektronin kanssa, koska muut elektronit ovat "suljetulla kuorella", jonka kokonaisimpulssimomentti on 0
 - "suljetulla kuorella" vakaa rakenne

Sekunnin määritelmä

S tarkoittaa että $l = 0$, (orbitaalin impulssimomentti)

$\frac{1}{2}$ tarkoittaa, että $s = \frac{1}{2}$, (valenssielektronin spin)

joten $J = l + s = \frac{1}{2}$. (elektroniverhon kokonaisimpulssimomentti)

$l = 3 \frac{1}{2}$ (ytimen spin)

$F_3 = J + l = 3$,

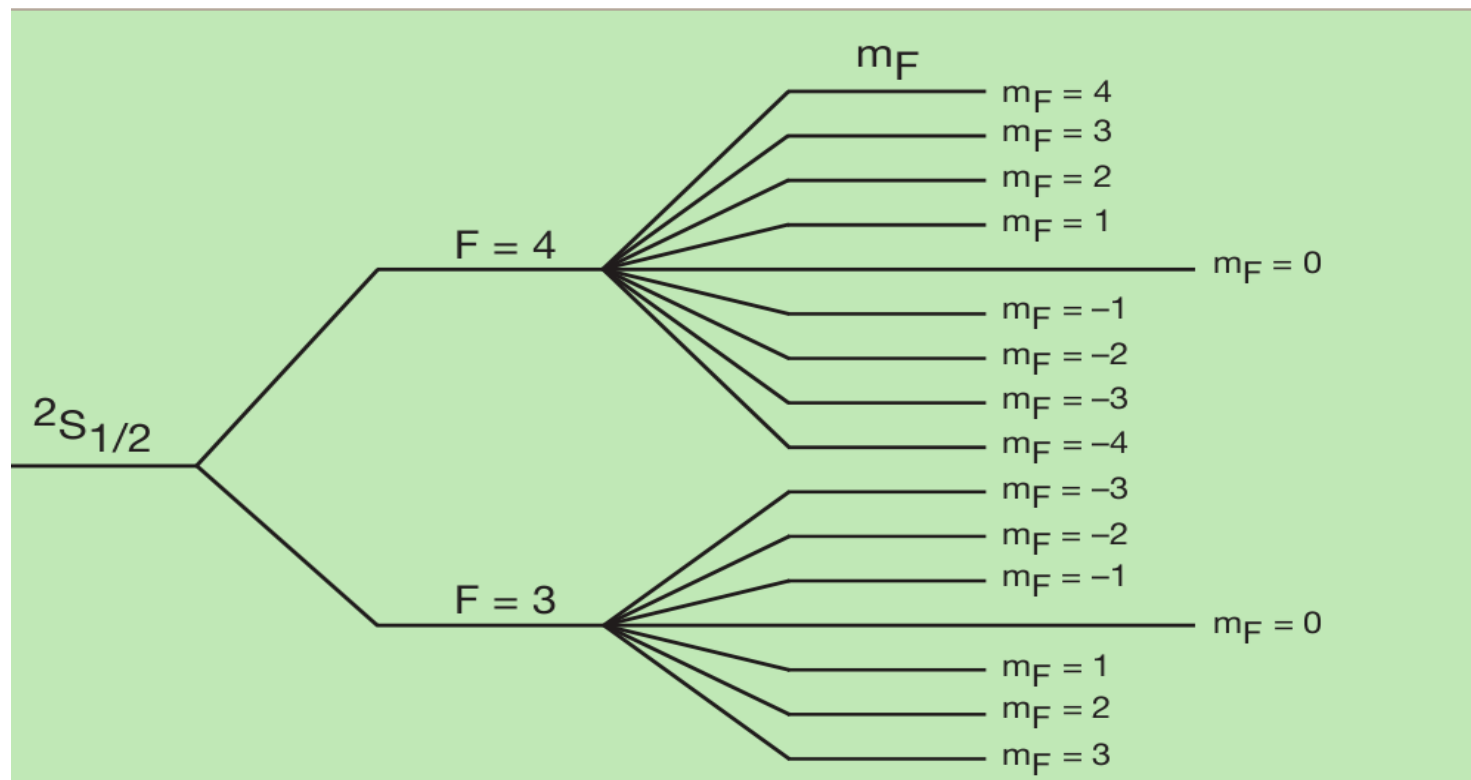
$F_4 = J - l = 4$

m_F syntyy spinin

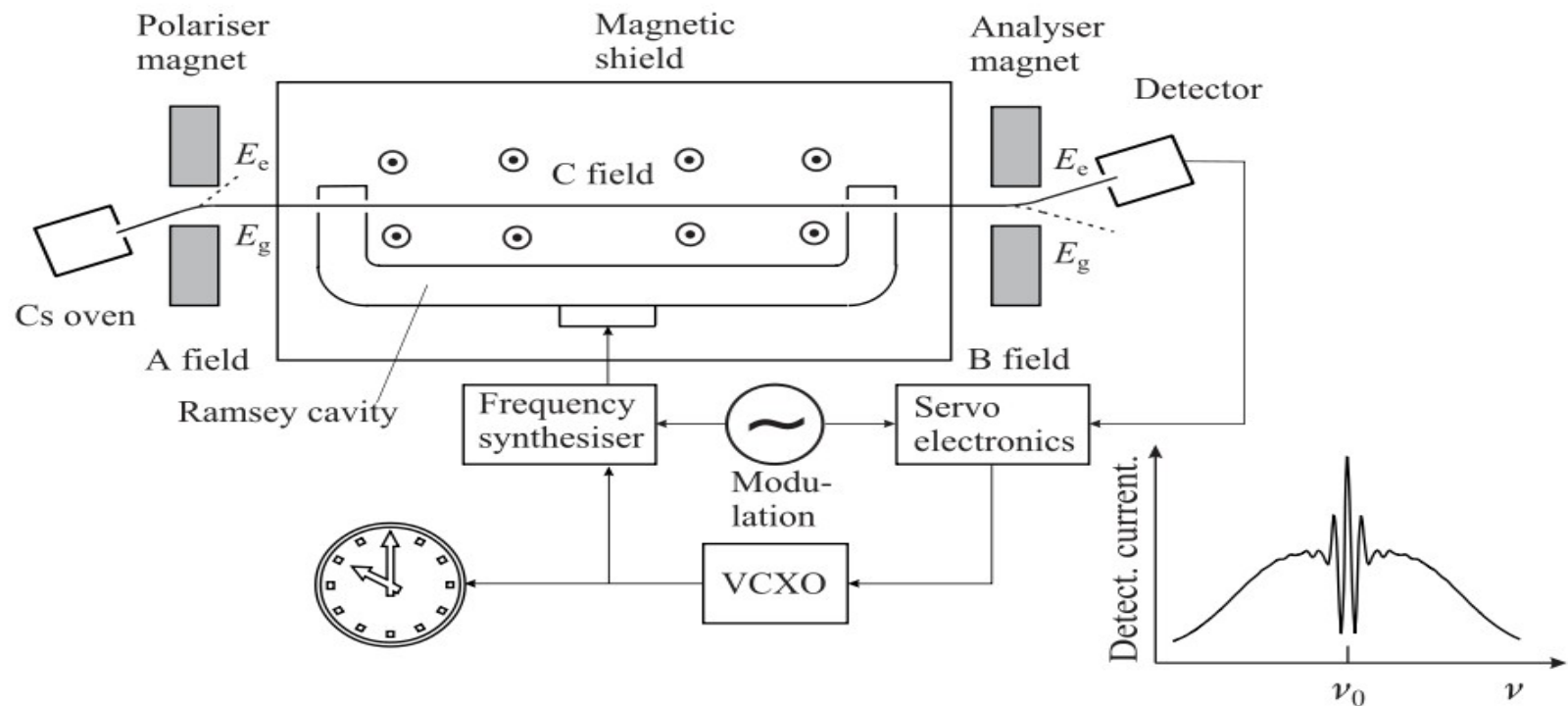
vuorovaikutuksesta

ulkoisen kentän

kanssa.

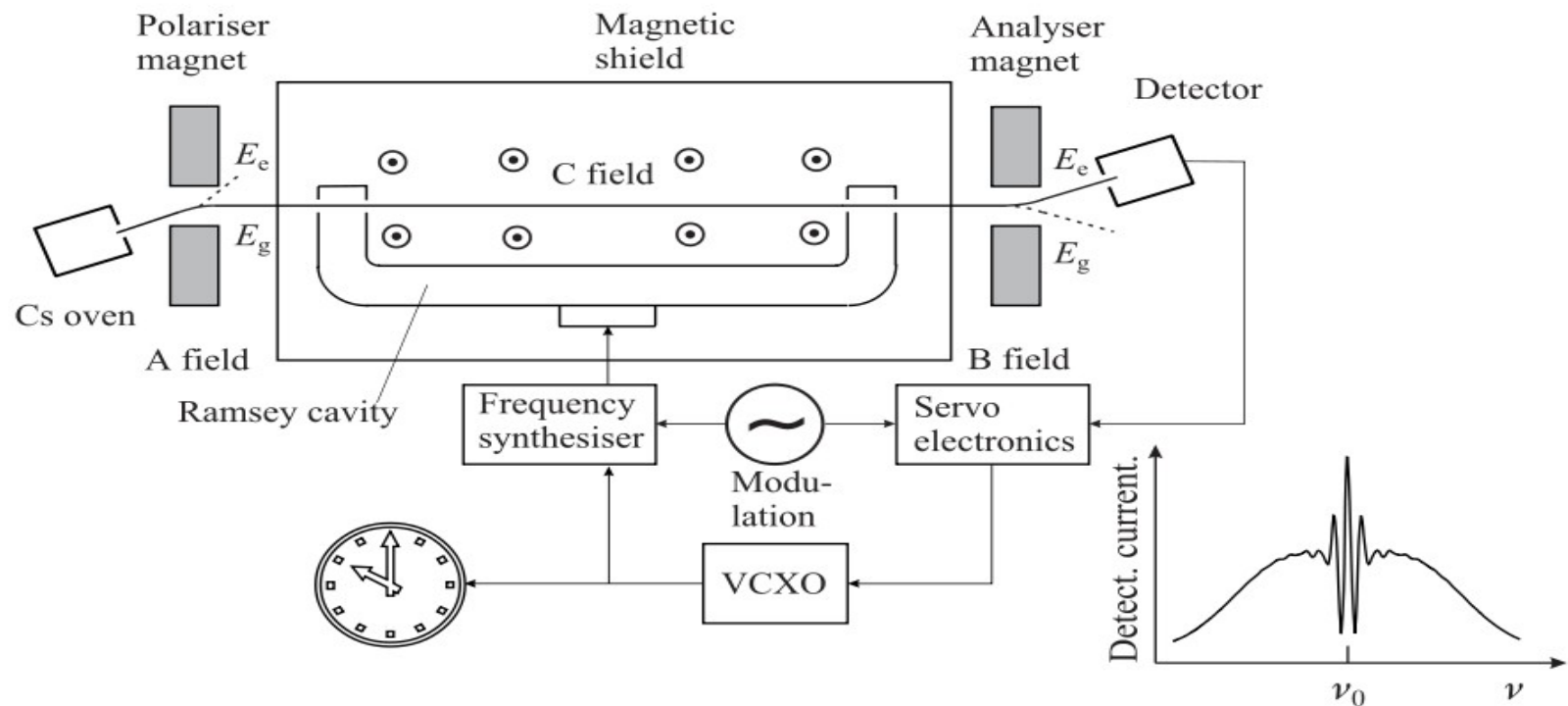


Atomikellon rakenne



- Uunissa Cs lämmitetään kaasuksi, josta se vapautuu suihkuna kapean reiän kautta (~ 100 m/s)
- A-kentällä erotellaan kavitettiin vain oikeassa energiatilassa $F = 3$ olevat atomit
(tuttu myös Stern-Gerlach kokeesta)
- Jos kavitteen taajuus on riittävän lähellä oikeaa, atomit muuttavat tilaansa $F = 4$:ksi
- B-kentällä erotellaan atomien virrasta tilaa muuttamattomat atomit pois
- Tilan muutoksen todennäköisyys riippuu jyrkästi kavitteen taajuudesta, ja detektorivirtaa käytetään vasteena kvartsikellon taajuuden säätöön

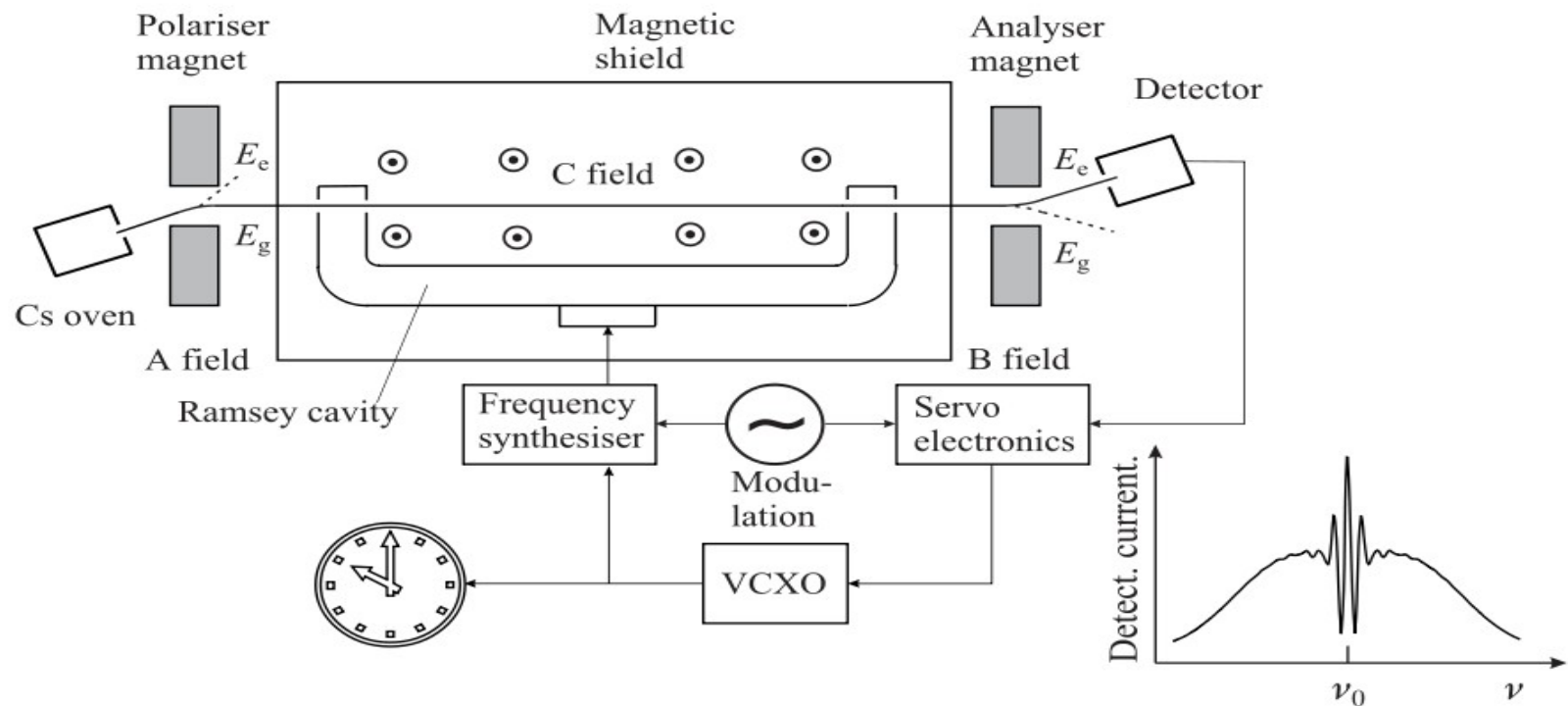
Atomikellon rakenne



- Uunissa Cs lämmitetään kaasuksi, josta se vapautuu suihkuna kapean reiän kautta (~100 m/s)
- A-kentällä erotellaan kaviteettiin vain oikeassa energiatilassa $F = 3$ olevat atomit

$$F = \nabla(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}), \quad F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (\text{tuttu myös Stern-Gerlach kokeesta})$$
- Jos kaviteetin taajuus on riittävän lähellä oikeaa, atomit muuttavat tilaansa $F = 4$:ksi
- B-kentällä erotellaan atomien virrasta tilaa muuttamattomat atomit pois
- Tilan muutoksen todennäköisyys riippuu jyrkästi kaviteetin taajuudesta, ja detektorivirtaa käytetään vasteena kvartsikellon taajuuden säätöön

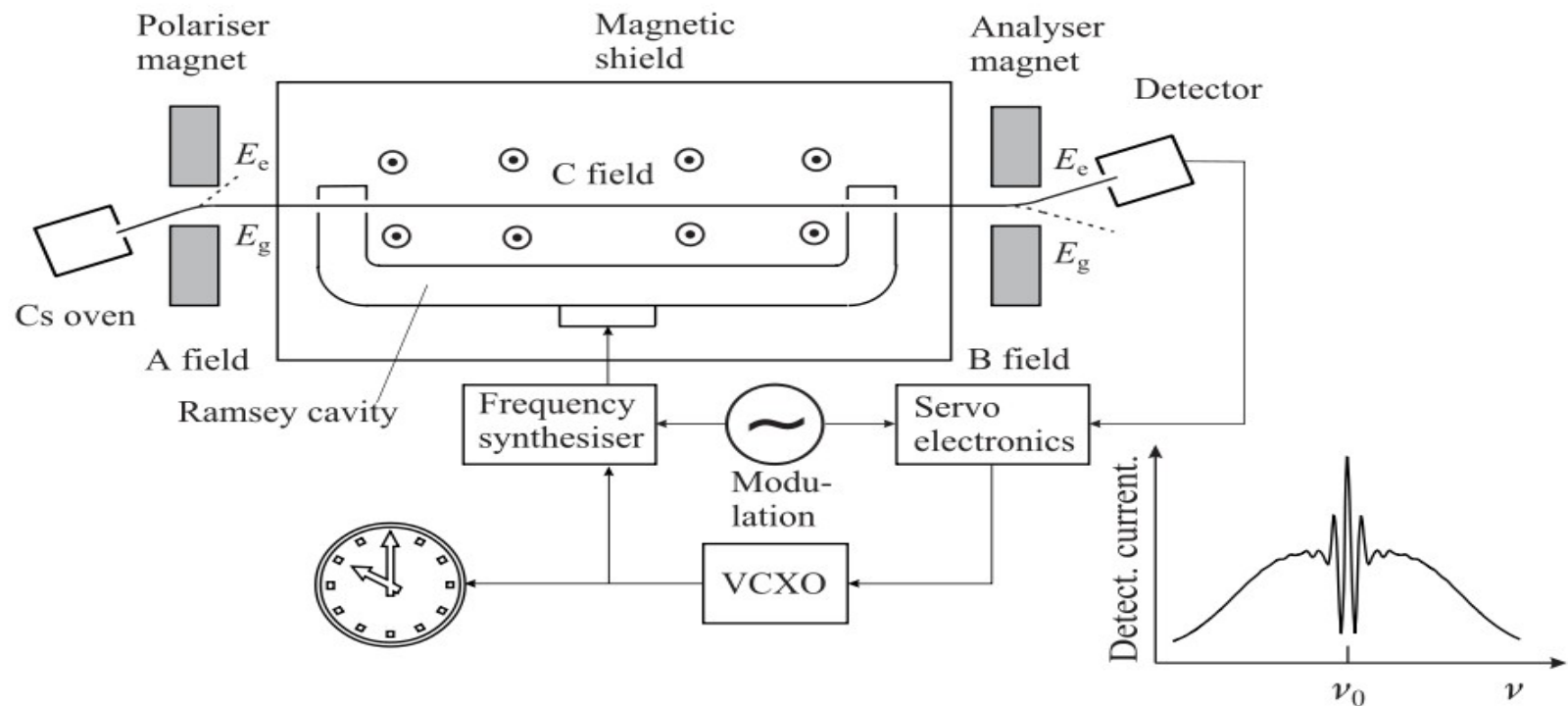
Atomikellon rakenne



- Uunissa Cs lämmitetään kaasuksi, josta se vapautuu suihkuna kapean reiän kautta (~100 m/s)
- A-kentällä erotellaan kaviteettiin vain oikeassa energiatilassa $F = 3$ olevat atomit

$$\mathbf{F} = \nabla(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}), \quad F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (\text{tuttu myös Stern-Gerlach kokeesta})$$
- Jos kaviteetin taajuus on riittävän lähellä oikeaa, atomit muuttavat tilaansa $F = 4$:ksi
- B-kentällä erotellaan atomien virrasta tilaa muuttamattomat atomit pois
- Tilan muutoksen todennäköisyys riippuu jyrkästi kaviteetin taajuudesta, ja detektorivirtaa käytetään vasteena kvartsikellon taajuuden säätöön

Atomikellon rakenne



- Uunissa Cs lämmitetään kaasuksi, josta se vapautuu suihkuna kapean reiän kautta (~ 100 m/s)
- A-kentällä erotellaan kaviteettiin vain oikeassa energiatilassa $F = 3$ olevat atomit

$$\mathbf{F} = \nabla(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}), \quad F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (\text{tuttu myös Stern-Gerlach kokeesta})$$
- Jos kaviteetin taajuus on riittävän lähellä oikeaa, atomit muuttavat tilaansa $F = 4$:ksi
- B-kentällä erotellaan atomien virrasta tilaa muuttamattomat atomit pois
- Tilan muutoksen todennäköisyys riippuu jyrkästi kaviteetin taajuudesta, ja detektorivirtaa käytetään vasteena kvartsikellon taajuuden säätöön

Ramseyn kaviteetti

- Vuorovaikutuskuvassa (Diracin kuva) liikeyhtälö muuttuu muotoon

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\alpha, t_0; t\rangle = V_I |\alpha, t_0; t\rangle, \quad \text{jossa } |\alpha, t_0; t\rangle = \sum_n c_n(t) |n\rangle = c_1(t) |1\rangle + c_2(t) |2\rangle$$

- Potentiaalin matriisielementit voidaan kirjoittaa muodossa:
 - johon kaviteetin sinikäyrän mukaisesti oskilloiva potentiaali voidaan kirjoittaa:
- Näistä saadaan differentiaaliyhtälöpari sijoittamalla Diracin yhtälöön:

Ramseyn kaviteetti

- Vuorovaikutuskuvassa (Diracin kuva) liikeyhtälö muuttuu muotoon

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\alpha, t_0; t\rangle = V_I |\alpha, t_0; t\rangle, \quad \text{jossa } |\alpha, t_0; t\rangle = \sum_n c_n(t) |n\rangle = c_1(t) |1\rangle + c_2(t) |2\rangle$$

- Potentiaalin matriisielementit voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\langle n | V_I | m \rangle = V_{nm}(t) e^{i\omega_{nm}t}, \quad \text{jossa } \omega_{nm} = \frac{E_n - E_m}{\hbar}$$

- johon kaviteetin sinikäyrän mukaisesti oskilloiva potentiaali voidaan kirjoittaa:

$$V(t) = V_{12} |1\rangle\langle 2| + V_{21} |2\rangle\langle 1| = \gamma e^{i\omega t} |1\rangle\langle 2| + \gamma e^{-i\omega t} |2\rangle\langle 1|$$

- Näistä saadaan differentiaaliyhtälöpari sijoittamalla Diracin yhtälöön:

Ramseyn kaviteetti

- Vuorovaikutuskuvassa (Diracin kuva) liikeyhtälö muuttuu muotoon

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\alpha, t_0; t\rangle = V_I |\alpha, t_0; t\rangle, \quad \text{jossa } |\alpha, t_0; t\rangle = \sum_n c_n(t) |n\rangle = c_1(t) |1\rangle + c_2(t) |2\rangle$$

- Potentiaalın matriisielementit voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\langle n | V_I | m \rangle = V_{nm}(t) e^{i\omega_{nm}t}, \quad \text{jossa } \omega_{nm} = \frac{E_n - E_m}{\hbar}$$

- johon kaviteetin sinikäyrän mukaisesti oskilloiva potentiaali voidaan kirjoittaa:

$$V(t) = V_{12} |1\rangle\langle 2| + V_{21} |2\rangle\langle 1| = \gamma e^{i\omega t} |1\rangle\langle 2| + \gamma e^{-i\omega t} |2\rangle\langle 1|$$

- Näistä saadaan differentiaaliyhtälöpari sijoittamalla Diracin yhtälöön:

$$i\hbar \frac{d}{dt} c_1(t) = V_{12} e^{i\omega_{12}t} c_2(t), \quad i\hbar \frac{d}{dt} c_2(t) = V_{21} e^{i\omega_{21}t} c_1(t)$$

Ramseyyn kaviteetti

- Ratkaisut ovat:

$$c_1(t_1+t_2) = \left\{ \left[\frac{i\delta\omega}{2\Omega} \sin(\Omega t_2) + \cos(\Omega t_2) \right] c_1(t_1) + \left[\frac{-i\gamma}{\hbar\Omega} \sin(\Omega t_2) e^{i\delta\omega t_1} \right] c_2(t_1) \right\} e^{i\frac{\delta\omega}{2}t_2}$$

$$c_2(t_1+t_2) = \left\{ \left[\frac{-i\gamma}{\hbar\Omega} \sin(\Omega t_2) e^{-i\delta\omega t_1} \right] c_1(t_1) + \left[\frac{-i\delta\omega}{2\Omega} \sin(\Omega t_2) + \cos(\Omega t_2) \right] c_2(t_1) \right\} e^{-i\frac{\delta\omega}{2}t_2}$$

jossa

$$\Omega = \sqrt{\frac{\gamma}{\hbar} + \frac{(\omega - \omega_{21})^2}{4}} \quad \text{ja} \quad \omega - \omega_{21} = \delta\omega$$

Atomit viettävät ajan τ kaviteetissa ja ajan T niiden välissä

Sijoittamalla ja käyttämällä $c_2(\tau+T) = c_2(\tau)$ saadaan (jonkinlaisella tuskalla)

Ramseyn kaviteetti

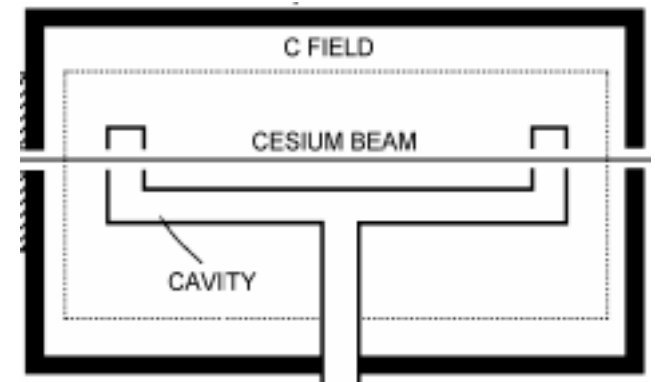
- Ratkaisut ovat:

$$c_1(t_1+t_2) = \left\{ \left[\frac{i\delta\omega}{2\Omega} \sin(\Omega t_2) + \cos(\Omega t_2) \right] c_1(t_1) + \left[\frac{-i\gamma}{\hbar\Omega} \sin(\Omega t_2) e^{i\delta\omega t_1} \right] c_2(t_1) \right\} e^{i\frac{\delta\omega}{2}t_2}$$

$$c_2(t_1+t_2) = \left\{ \left[\frac{-i\gamma}{\hbar\Omega} \sin(\Omega t_2) e^{-i\delta\omega t_1} \right] c_1(t_1) + \left[\frac{-i\delta\omega}{2\Omega} \sin(\Omega t_2) + \cos(\Omega t_2) \right] c_2(t_1) \right\} e^{-i\frac{\delta\omega}{2}t_2}$$

jossa

$$\Omega = \sqrt{\frac{\gamma}{\hbar} + \frac{(\omega - \omega_{21})^2}{4}} \quad \text{ja} \quad \omega - \omega_{21} = \delta\omega$$



Atomit viettävät ajan τ kaviteetissa ja ajan T niiden välissä

Sijoittamalla ja käyttämällä $c_2(\tau+T) = c_2(\tau)$ saadaan (jonkinlaisella tuskalla)

$$c_2(2\tau+T) = \frac{-i2\gamma}{\hbar\Omega} \sin(\Omega\tau) \left[\cos(\Omega\tau) \cos\left(\frac{\delta\omega}{2}T\right) - \frac{\delta\omega}{2\Omega} \sin(\Omega\tau) \sin\left(\frac{\delta\omega}{2}T\right) \right] e^{-i\delta\omega\left(\tau+\frac{T}{2}\right)}$$

Ramseyyn kaviteetti

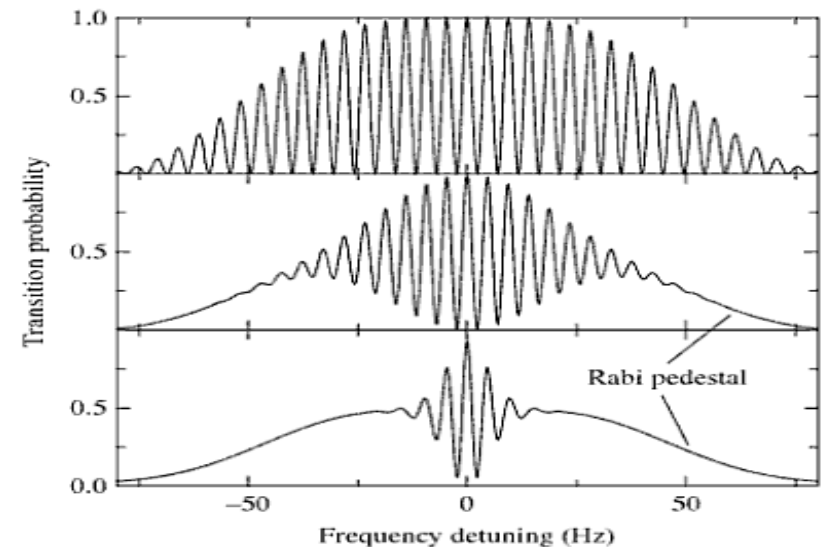
- Nyt kun atomin tila kaviteetin jälkeen on ratkaistu, voidaan laskea tilan siirtymistodennäköisyys:

$$P(F=3 \rightarrow F=4) = |\langle F=4 | \alpha, 2\tau + T \rangle|^2 = |c_2(2\tau + T)|^2$$

$$|c_2(2\tau + T)|^2 = \frac{4\gamma^2}{\hbar^2 \Omega^2} \sin^2(\Omega \tau) \left[\cos(\Omega \tau) \cos\left[\frac{\delta \omega}{2} T\right] - \frac{\delta \omega}{2\Omega} \sin(\Omega \tau) \sin\left[\frac{\delta \omega}{2} T\right] \right]^2$$

- Keskimmäisen piikin leveys ratkaisee teoreettisen tarkkuuden:

josta nähdään että puoliaallonleveys on kääntäen verrannollinen T:hen



Ramseyyn kaviteetti

- Nyt kun atomin tila kaviteetin jälkeen on ratkaistu, voidaan laskea tilan siirtymistodennäköisyys:

$$P(F=3 \rightarrow F=4) = |\langle F=4 | \alpha, 2\tau + T \rangle|^2 = |c_2(2\tau + T)|^2$$

$$|c_2(2\tau + T)|^2 = \frac{4\gamma^2}{\hbar^2 \Omega^2} \sin^2(\Omega \tau) \left[\cos(\Omega \tau) \cos\left[\frac{\delta \omega}{2} T\right] - \frac{\delta \omega}{2\Omega} \sin(\Omega \tau) \sin\left[\frac{\delta \omega}{2} T\right] \right]^2$$

- Keskimmäisen piikin leveys ratkaisee

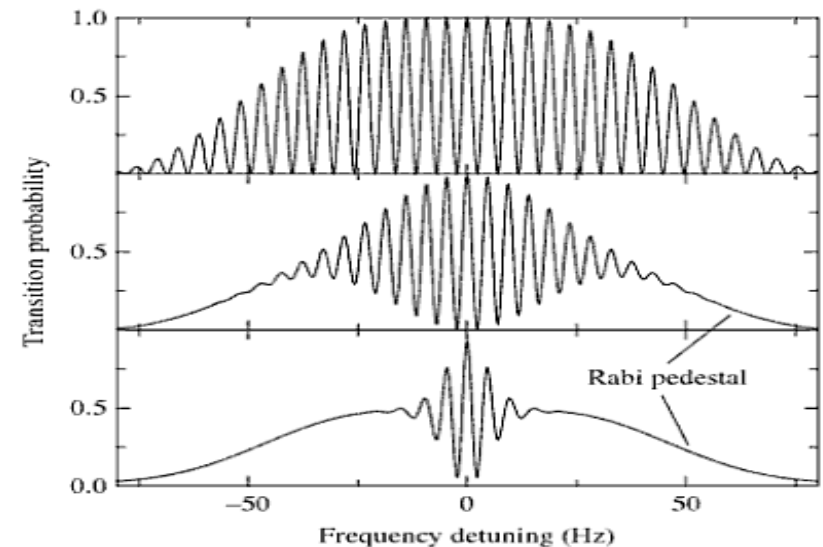
teoreettisen tarkkuuden:

$$P(F3 \rightarrow F4) \approx \frac{1}{2} \sin^2(2\Omega \tau) [1 + \cos[\delta \omega T]]^2$$

josta nähdään että puoliaallonleveys

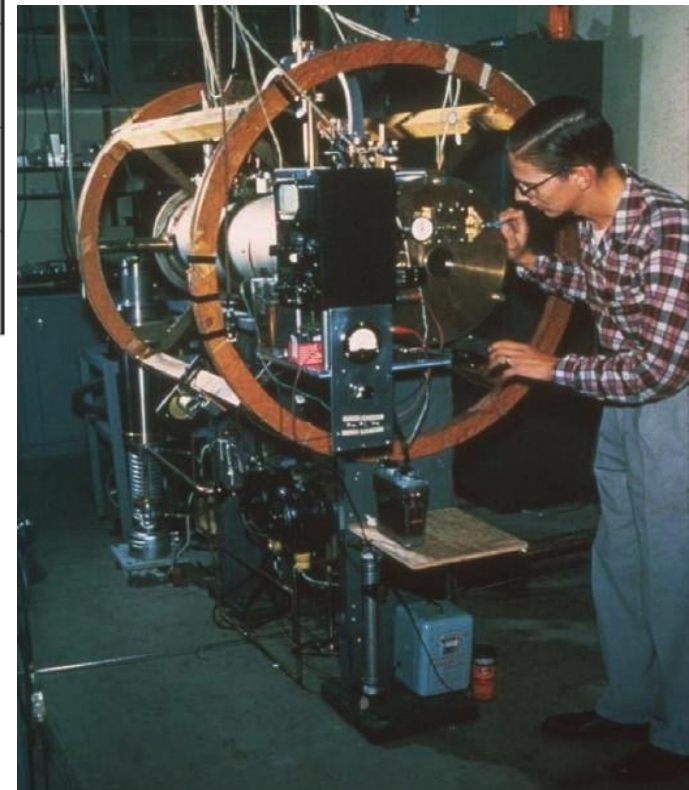
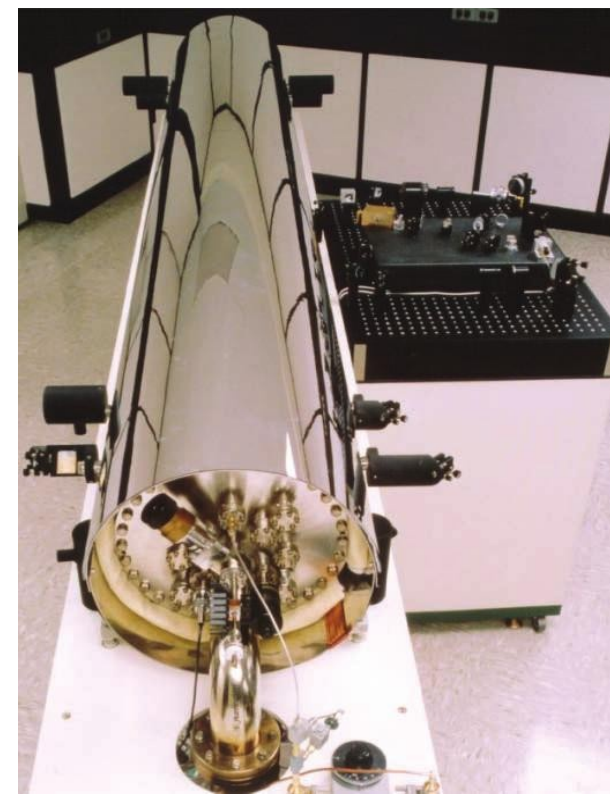
on kääntäen verrannollinen T:hen

$$\Delta \omega = \frac{\pi}{T}, \quad \Delta f = \frac{1}{2T}$$



Muutama esimerkki

Cesium Frequency Standard	Lifetime as Experimental or Operational Device	Years of Operation as NPFS	Linewidth	Length of Ramsey Cavity	Best Published Accuracy
NBS-1	1952-1962	1959-1960	300 Hz	55 cm	1×10^{-11} [44]
NBS-2	1959-1965	1960-1963	110 Hz	164 cm	8×10^{-12} [44]
NBS-3	1959-1970	1963-1970	48 Hz	366 cm	5×10^{-13} [45]
NBS-4	1965-1990s	NA *	130 Hz	52.4 cm	3×10^{-13} [46]
NBS-5	1966-1974	1972-1974	45 Hz	374 cm	2×10^{-13} [46]
NBS-6	1974-1993	1975-1993	26 Hz	374 cm	8×10^{-14} [48]
NIST-7	1988-2001	1993-1998	62 Hz	155 cm	5×10^{-15} [51]



HP 5071A
(Agilent)

Parannuksia

- Edellä esitetty rakenne pätee vielä suurelta osin kaupallisiin Cesium-atomikelloihin
- NIST-7 on parantanut tarkkuutta oleellisesti korvaamalla valintamagneetit optisella pumppauksella, jossa valinnan sijaan muutetaan kaikki atomit haluttuun tilaan

Lisäksi tila luetaan optisesti kaviteetin jälkeen (vaste eri tilojen atomeilta)

- suurempi virta ilmaisimelle
 - mittaustuloksesta eliminoidaan muiden siirtymien vaikutus
-
- Uudenlainen Cesiumlähde-atomikello: (1998->)
 - laserjäähdytyksellä pienennetään lämpötilan aiheuttamaa mustan kappaleen siirtymää (blackbody shift)
 - hallitumpi "Cesiumvirta" (pienempi tiheyden vaihtelu ja siitä aiheutuva virhe (density shift))
 - kummassakin lopputilassa olevat atomit voidaan mitata erikseen
 - dramaattisesti pidempi vuorovaikutusaika T (yli 50 kertainen, n. 1 s !)
 - tilan valinta ja luenta optinen

Parannuksia

- Edellä esitetty rakenne pätee vielä suurelta osin kaupallisiin Cesium-atomikelloihin
- NIST-7 on parantanut tarkkuutta oleellisesti korvaamalla valintamagneetit optisella pumppauksella, jossa valinnan sijaan muutetaan kaikki atomit haluttuun tilaan

Lisäksi tila luetaan optisesti kaviteetin jälkeen (vaste eri tilojen atomeilta)

- suurempi virta ilmaisimelle
- mittaustuloksesta eliminoidaan muiden siirtymien vaikutus

$$(|F, m_F\rangle = |3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle \text{ tai } |3, -1\rangle \rightarrow |4, -1\rangle)$$

- Uudenlainen Cesiumlähde-atomikello: (1998->)
 - laserjäähdytyksellä pienennetään lämpötilan aiheuttamaa mustan kappaleen siirtymää (blackbody shift)
 - hallitumpi "Cesiumvirta" (pienempi tiheyden vaihtelu ja siitä aiheutuva virhe (density shift))
 - kummassakin lopputilassa olevat atomit voidaan mitata erikseen
 - dramaattisesti pidempi vuorovaikutusaika T (yli 50 kertainen, n. 1 s !)
 - tilan valinta ja luenta optinen

Parannuksia

- Edellä esitetty rakenne pätee vielä suurelta osin kaupallisiin Cesium-atomikelloihin
- NIST-7 on parantanut tarkkuutta oleellisesti korvaamalla valintamagneetit optisella pumppauksella, jossa valinnan sijaan muutetaan kaikki atomit haluttuun tilaan

Lisäksi tila luetaan optisesti kaviteetin jälkeen (vaste eri tilojen atomeilta)

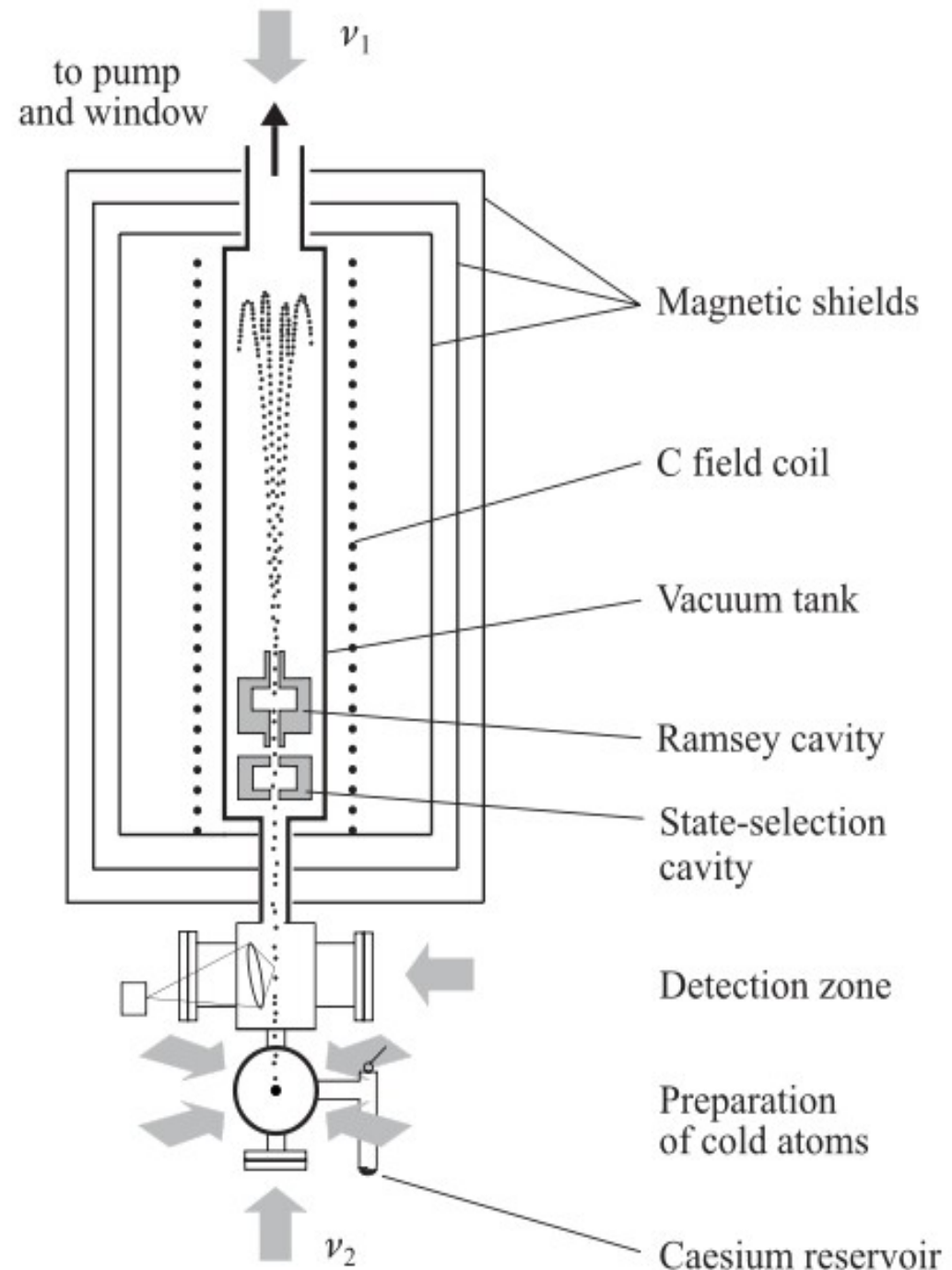
- suurempi virta ilmaisimelle
- mittaustuloksesta eliminoidaan muiden siirtymien vaikutus

$$(|F, m_F\rangle = |3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle \text{ tai } |3, -1\rangle \rightarrow |4, -1\rangle)$$

- Uudenlainen Cesiumlähde-atomikello: (1998->)
 - laserjäähdytyksellä pienennetään lämpötilan aiheuttamaa mustan kappaleen siirtymää (blackbody shift)
 - hallitumpi "Cesiumvirta" (pienempi tiheyden vaihtelu ja siitä aiheutuva virhe (density shift))
 - kummassakin lopputilassa olevat atomit voidaan mitata erikseen
 - dramaattisesti pidempi vuorovaikutusaika T (yli 50 kertainen, n. 1 s !)
 - tilan valinta ja luenta optinen

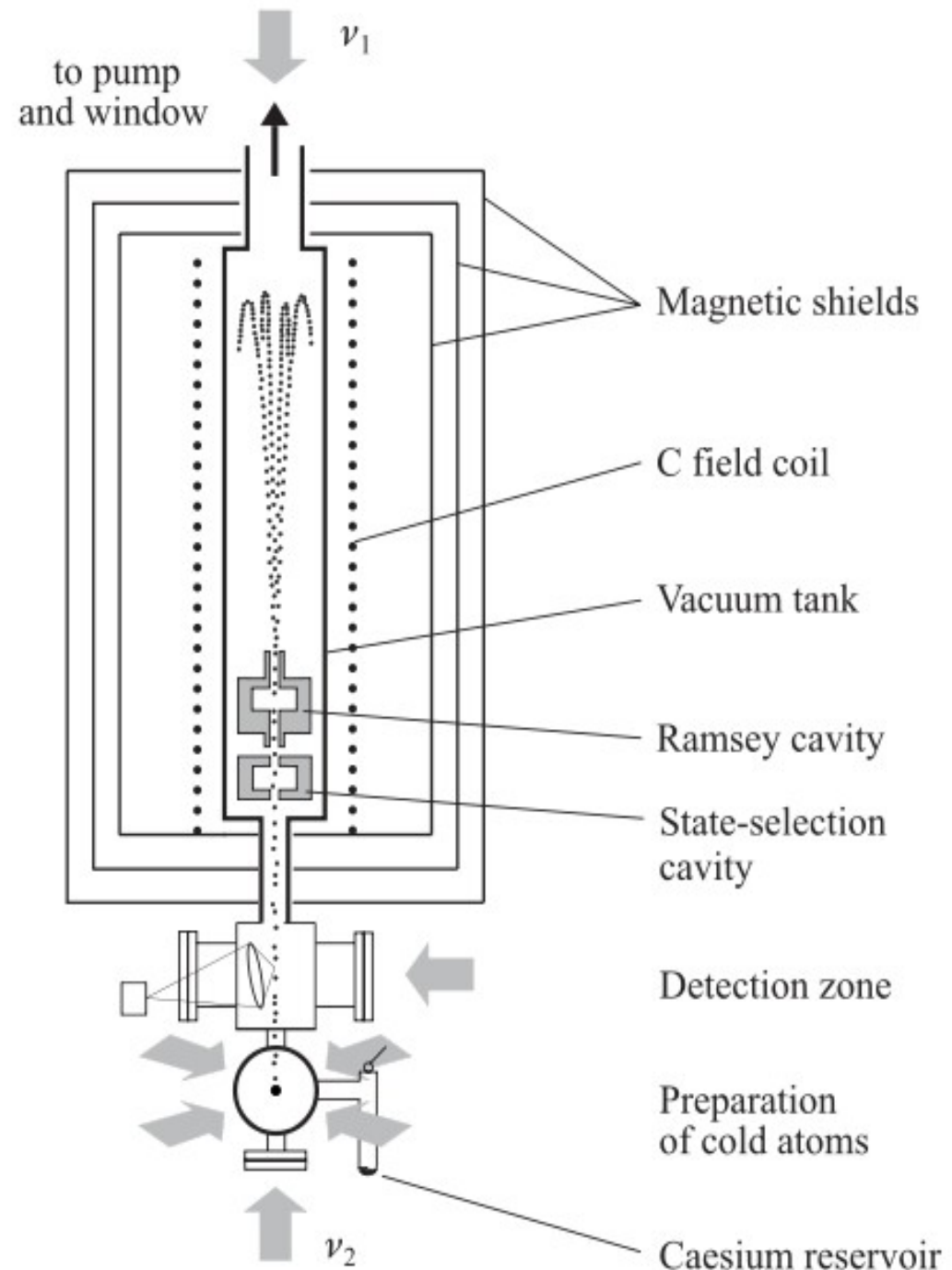
Cesiumlähde-atomikello

- Cesiumpilvi jäähdytetään optisessa siirapissa
- Tilanvalinta-kaviteetissa π -pulssilla $F_4 \rightarrow F_3$ ja loput pyyhkäistään laserilla
- Sinisiirtämällä taajuutta ν_1 ja punasiirtämällä taajuutta ν_2 hetkeksi ennen sammuttamista, saadaan jäähdytetty Cs-pilvi ballistiselle radalle n. sekunnin ajaksi.
- Cs-pilvi kulkee meno ja paluumatkalla kaviteetin läpi
 - interferenssi suurella T:llä
- Atomien tila luetaan optisia siirtymiä käyttäen



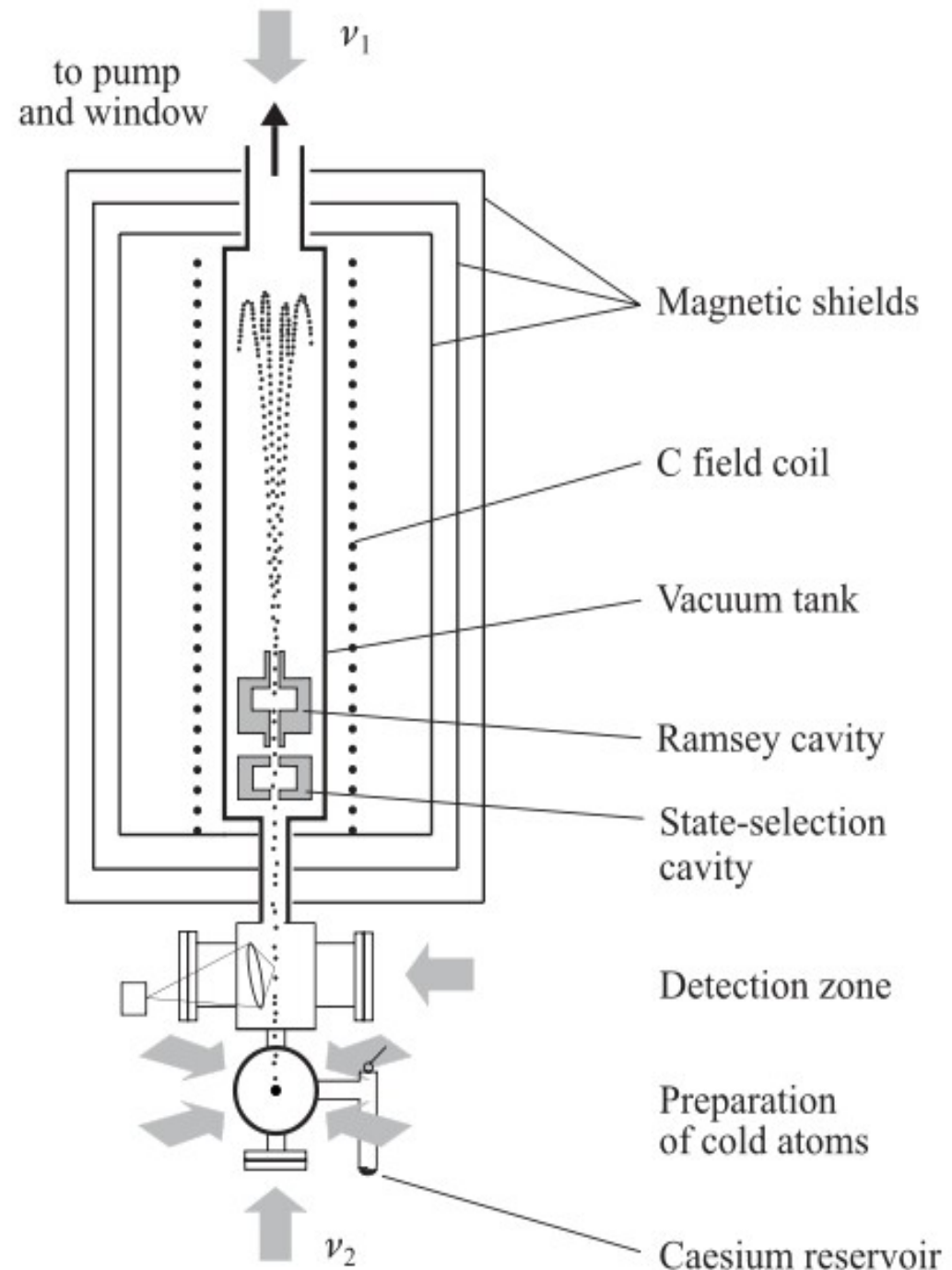
Cesiumlähde-atomikello

- Cesiumpilvi jäähdytetään optisessa siirapissa
- Tilanvalinta-kaviteetissa π -pulssilla $F_4 \rightarrow F_3$ ja loput pyyhkäistään laserilla
- Sinisiirtämällä taajuutta ν_1 ja punasiirtämällä taajuutta ν_2 hetkeksi ennen sammuttamista, saadaan jäähdytetty Cs-pilvi ballistiselle radalle n. sekunnin ajaksi.
- Cs-pilvi kulkee meno ja paluumatkalla kaviteetin läpi
 - interferenssi suurella T:llä
- Atomien tila luetaan optisia siirtymiä käyttäen



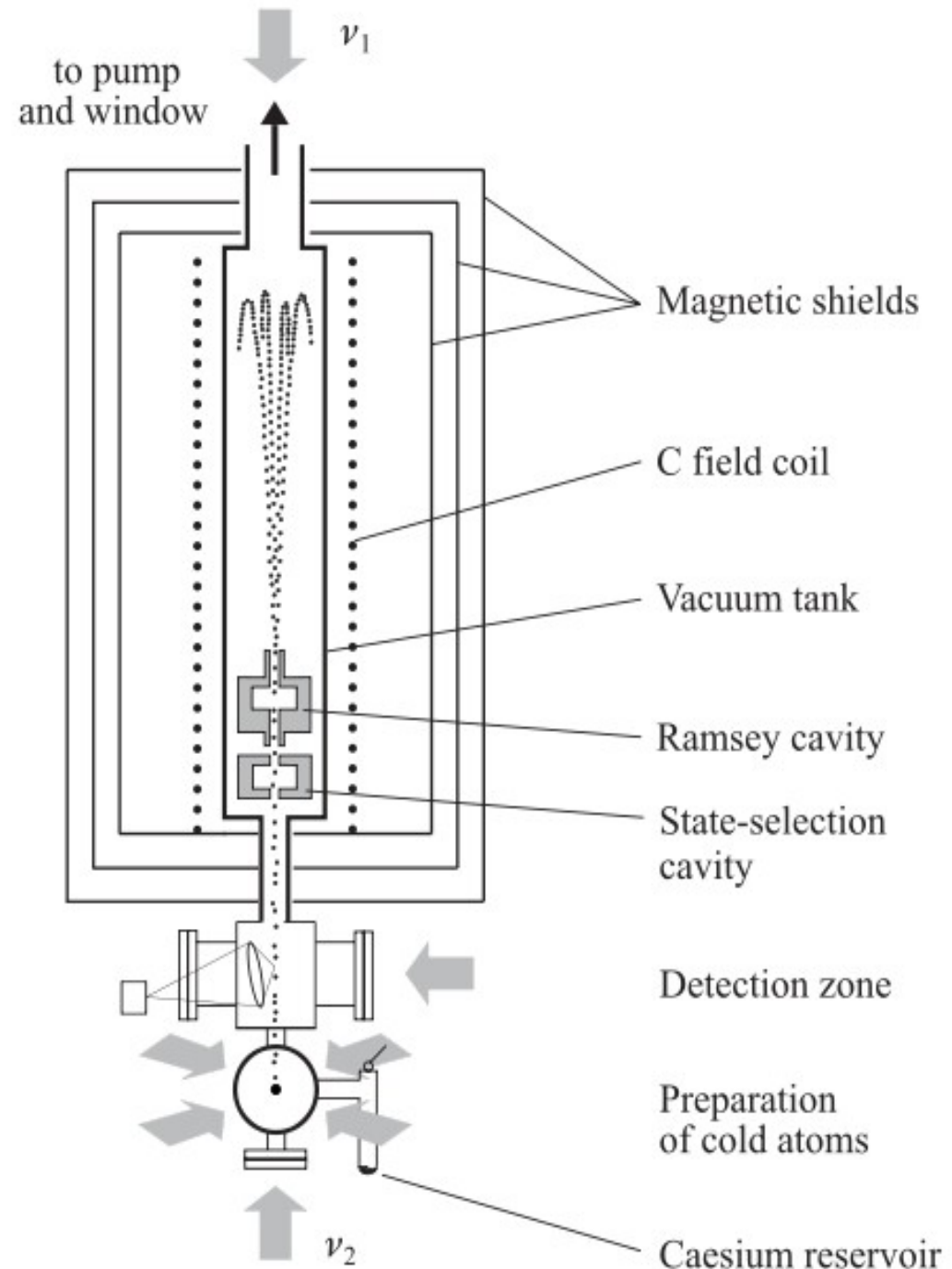
Cesiumlähde-atomikello

- Cesiumpilvi jäädytetään optisessa siirapissa
- Tilanvalinta-kaviteetissa π -pulssilla $F_4 \rightarrow F_3$ ja loput pyyhkäistään laserilla
- Sinisiirtämällä taajuutta ν_1 ja punasiirtämällä taajuutta ν_2 hetkeksi ennen sammuttamista, saadaan jäädytetty Cs-pilvi ballistiselle radalle n. sekunnin ajaksi.
- Cs-pilvi kulkee meno ja paluumatkalla kaviteetin läpi
 - interferenssi suurella T:llä
- Atomien tila luetaan optisia siirtymiä käyttäen



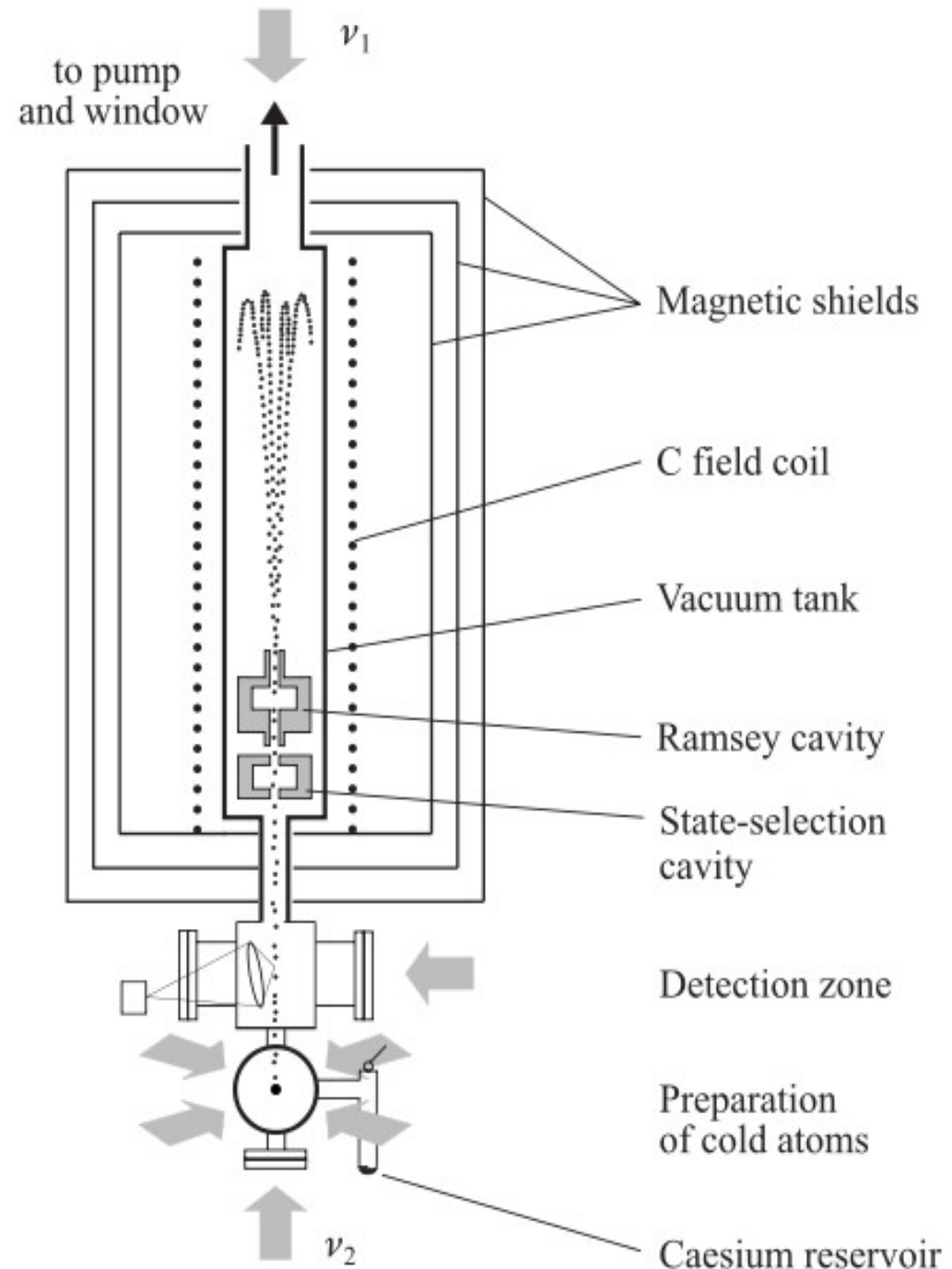
Cesiumlähde-atomikello

- Cesiumpilvi jäähdytetään optisessa siirapissa
- Tilanvalinta-kaviteetissa π -pulssilla $F_4 \rightarrow F_3$ ja loput pyyhkäistään laserilla
- Sinisiirtämällä taajuutta ν_1 ja punasiirtämällä taajuutta ν_2 hetkeksi ennen sammuttamista, saadaan jäähdytetty Cs-pilvi ballistiselle radalle n. sekunnin ajaksi.
- Cs-pilvi kulkee meno ja paluumatkalla kaviteetin läpi
 - interferenssi suurella T:llä
- Atomien tila luetaan optisia siirtymiä käyttäen



Cesiumlähde-atomikello

- Cesiumpilvi jäähdytetään optisessa siirapissa
- Tilanvalinta-kaviteetissa π -pulssilla $F_4 \rightarrow F_3$ ja loput pyyhkäistään laserilla
- Sinisiirtämällä taajuutta ν_1 ja punasiirtämällä taajuutta ν_2 hetkeksi ennen sammuttamista, saadaan jäähdytetty Cs-pilvi ballistiselle radalle n. sekunnin ajaksi.
- Cs-pilvi kulkee meno ja paluumatkalla kaviteetin läpi
 - interferenssi suurella T:llä
- Atomien tila luetaan optisia siirtymiä käyttäen



Cesium-kellojen rooli TAI:ssa ja UTC:ssa

- UT1 on aikajärjestelmä, joka määritetään mm. tähtien näennäisestä liikkeestä
- TAI (Temps Atomique International) on lukuisien erilaisten atomikellojen muodostama järjestelmä, jota koordinoi BIPM-organisaatio Ranskassa.
- UTC (Universal Time, Coordinated, tai universel, temps coordonné)
 - Seuraa TAI:ta, mutta kun aika poikkeaa yli sekunnilla UT1:stä, niin lisätään karkaussekunti
- Cesiumlähde-atomikelloja ei käytetä jatkuvasti, vaan niitä käytetään muiden atomikellojen muodostaman järjestelmän TAI:n kalibrointiin.
 - Tarkkuus saavutetaan n. 1 päivän käytön aikana.
 - Pidemmällä aikavälillä vakaampia ovat mm. vety-maserit ja niiden yhdistäminen Cs-atomikelloihin ja muihin atomikelloihin.
- Cesium-atomikelloja tarvitaan lähinnä nykyisen sekunnin määritelmän mukaisen taajuuden realisointiin!

Cesium-kellojen rooli TAI:ssa ja UTC:ssa

- UT1 on aikajärjestelmä, joka määritetään mm. tähtien näennäisestä liikkeestä
- TAI (Temps Atomique International) on lukuisien erilaisten atomikellojen muodostama järjestelmä, jota koordinoi BIPM-organisaatio Ranskassa.
- UTC (Universal Time, Coordinated, tai universel, temps coordonné)
 - Seuraa TAI:ta, mutta kun aika poikkeaa yli sekunnilla UT1:stä, niin lisätään karkaussekunti
- Cesiumlähde-atomikelloja ei käytetä jatkuvasti, vaan niitä käytetään muiden atomikellojen muodostaman järjestelmän TAI:n kalibrointiin.
 - Tarkkuus saavutetaan n. 1 päivän käytön aikana.
 - Pidemmällä aikavälillä vakaampia ovat mm. vety-maserit ja niiden yhdistäminen Cs-atomikelloihin ja muihin atomikelloihin.
- Cesium-atomikelloja tarvitaan lähinnä nykyisen sekunnin määritelmän mukaisen taajuuden realisointiin!

Cesium-kellojen rooli TAI:ssa ja UTC:ssa

- UT1 on aikajärjestelmä, joka määritetään mm. tähtien näennäisestä liikkeestä
- TAI (Temps Atomique International) on lukuisien erilaisten atomikellojen muodostama järjestelmä, jota koordinoi BIPM-organisaatio Ranskassa.
- UTC (Universal Time, Coordinated, tai universel, temps coordonné)
 - Seuraa TAI:ta, mutta kun aika poikkeaa yli sekunnilla UT1:stä, niin lisätään karkaussekunti
- Cesiumlähde-atomikelloja ei käytetä jatkuvasti, vaan niitä käytetään muiden atomikellojen muodostaman järjestelmän TAI:n kalibrointiin.
 - Tarkkuus saavutetaan n. 1 päivän käytön aikana.
 - Pidemmällä aikavälillä vakaampia ovat mm. vety-maserit ja niiden yhdistäminen Cs-atomikelloihin ja muihin atomikelloihin.
- Cesium-atomikelloja tarvitaan lähinnä nykyisen sekunnin määritelmän mukaisen taajuuden realisointiin!

Cesium-kellojen rooli TAI:ssa ja UTC:ssa

- UT1 on aikajärjestelmä, joka määritetään mm. tähtien näennäisestä liikkeestä
- TAI (Temps Atomique International) on lukuisien erilaisten atomikellojen muodostama järjestelmä, jota koordinoi BIPM-organisaatio Ranskassa.
- UTC (Universal Time, Coordinated, tai universel, temps coordonné)
 - Seuraa TAI:ta, mutta kun aika poikkeaa yli sekunnilla UT1:stä, niin lisätään karkaussekunti
- Cesiumlähde-atomikelloja ei käytetä jatkuvasti, vaan niitä käytetään muiden atomikellojen muodostaman järjestelmän TAI:n kalibrointiin.
 - Tarkkuus saavutetaan n. 1 päivän käytön aikana.
 - Pidemmällä aikavälillä vakaampia ovat mm. vety-maserit ja niiden yhdistäminen Cs-atomikelloihin ja muihin atomikelloihin.
- Cesium-atomikelloja tarvitaan lähinnä nykyisen sekunnin määritelmän mukaisen taajuuden realisointiin!

Muita atomikelloja

- Vety-maser
- Cesium-kelloja vastaavaan tekniikkaan perustuvia muita atomeja/molekyylejä käyttävät kellot
 - Rubidium, ammoniakki
- Optiset kellot potentiaalisesti tarkempia suuremman taajuuden vuoksi
 - Voidaan käyttää magneto-optiseen loukkuun vangittua ionia
 - magneettinen pullo + laserjäähdytys
 - optiset siirtymätaajuudet mitataan säädettävillä lasereilla
 - Tällä hetkellä tarkkuus samaa kertaluokkaa kuin cesiumlähde-kellolla
 - Tekniikka käytännöllisempää jatkuvaan käyttöön
 - Hiljattain mitattu mm. n. 30 cm korkeuserolla gravitaatiopotentiaalin vaikutusta ajan kulkuun ja tarkkuus riittää siihen
 - Mitattu myös aikadilataatiota polkupyörän nopeutta vastaavilla nopeuksilla.
 - ioni sähkökentällä liikkeeseen magneettisessa pullossa
- Muitakin tekniikoita löytyy

Muita atomikelloja

- Vety-maser
- Cesium-kelloja vastaavaan tekniikkaan perustuvia muita atomeja/molekyylejä käyttävät kellot
 - Rubidium, ammoniakki
- Optiset kellot potentiaalisesti tarkempia suuremman taajuuden vuoksi
 - Voidaan käyttää magneto-optiseen loukkuun vangittua ionia
 - magneettinen pullo + laserjäähdytys
 - optiset siirtymätaajuudet mitataan säädettävillä lasereilla
 - Tällä hetkellä tarkkuus samaa kertaluokkaa kuin cesiumlähde-kellolla
 - Tekniikka käytännöllisempää jatkuvaan käyttöön
 - Hiljattain mitattu mm. n. 30 cm korkeuserolla gravitaatiopotentiaalin vaikutusta ajan kulkuun ja tarkkuus riittää siihen
 - Mitattu myös aikadilataatiota polkupyörän nopeutta vastaavilla nopeuksilla.
 - ioni sähkökentällä liikkeeseen magneettisessa pullossa
- Muitakin tekniikoita löytyy

Muita atomikelloja

- Vety-maser
- Cesium-kelloja vastaavaan tekniikkaan perustuvia muita atomeja/molekyylejä käyttävät kellot
 - Rubidium, ammoniakki
- Optiset kellot potentiaalisesti tarkempia suuremman taajuuden vuoksi
 - Voidaan käyttää magneto-optiseen loukkuun vangittua ionia
 - magneettinen pullo + laserjäähdytys
 - optiset siirtymätaajuudet mitataan säädettävillä lasereilla
 - Tällä hetkellä tarkkuus samaa kertaluokkaa kuin cesiumlähde-kellolla
 - Tekniikka käytännöllisempää jatkuvaan käyttöön
 - Hiljattain mitattu mm. n. 30 cm korkeuserolla gravitaatiopotentiaalin vaikutusta ajan kulkuun ja tarkkuus riittää siihen
 - Mitattu myös aikadilataatiota polkupyörän nopeutta vastaavilla nopeuksilla.
 - ioni sähkökentällä liikkeeseen magneettisessa pullossa
- Muitakin tekniikoita löytyy

Oleellista oli

- Atomikellot perustuvat atomien emittoiman/absorboiman sähkömagneettisen säteilyn taajuuden mittaamiseen
- Cesium-atomikellot ovat tärkeitä lähinnä sekunnin määritelmän mukaisten aikayksikköjen mittaamiseen, mutta kelpaa vielä monissa sovelluksissa
- Mikroaaltotekniikka rajoittaa Cesium-atomikellon tarkkuutta
- Optiset atomikellot voidaan rakentaa tarkemmiksi kuin mikroaaltotekniikkaan perustuvat Cesium-atomikellot.