



Más allá del descubrimiento

Bienvenido. **Beyond Discovery®: The Path from Research to Human Benefit** [Más allá del descubrimiento: El camino desde la investigación hasta el beneficio humano] es una serie de artículos que analiza los orígenes de importantes avances técnicos y médicos recientes. En cada una de las historias se revela el papel fundamental que ha desempeñado la ciencia básica, cuyas aplicaciones no se podían prever en el tiempo en que se realizó la investigación original.

El proyecto Beyond Discovery está dirigido por la Academia Nacional de las Ciencias de EE.UU. Si desea obtener más información sobre otros trabajos realizados por la Academia Nacional de las Ciencias de EE.UU., visite el sitio Web www.nationalacademies.org.



Este artículo es una adaptación realizada por Gary Taubes de un artículo escrito por el científico del MIT Daniel Kleppner para Beyond Discovery®: The Path from Research to Human Benefit, [Más allá del descubrimiento: El camino desde la investigación hasta el beneficio humano], un proyecto de la National Academy of Sciences (Academia Nacional de las Ciencias) de Estados Unidos.

La academia, con sede en Washington, es una sociedad de distinguidos eruditos comprometidos con la investigación científica y de ingeniería, dedicada al uso de la ciencia y tecnología para el bienestar común. Durante más de un siglo, la Academia ha proporcionado asesoramiento científico objetivo e independiente a la nación.

© 1997, National Academy of Sciences

Sistemas de posicionamiento global: el papel de los relojes atómicos

¿Dónde estoy? La pregunta parece simple; la historia ha demostrado que la respuesta no lo es. Durante siglos, navegantes y exploradores han buscado en el cielo un sistema que les permitiera conocer su posición en el globo con la precisión necesaria para llegar a su destino sanos y salvos. Sin embargo, el 26 de junio de 1993 la respuesta se hizo tan simple como la pregunta. En esa fecha, la fuerza aérea de Estados Unidos puso en órbita el satélite Navstar número 24, con lo que se completó una red formada por 24 satélites conocida como GPS (Global Positioning System, Sistema de posicionamiento global). Con ayuda de un asequible receptor GPS puede averiguar de forma instantánea su posición en el planeta (latitud, longitud e incluso la altitud) con un margen de error de pocos metros.

Esta increíble tecnología ha sido posible gracias a la combinación de progresos de ingeniería y científicos, en particular gracias al desarrollo de los relojes más precisos del mundo: los relojes atómicos que tienen

una precisión de hasta un nanosegundo. Estos relojes fueron creados por físicos que pretendían obtener respuestas a preguntas sobre la naturaleza del universo, sin saber que llegaría el día en que su tecnología haría posible un sistema global de navegación. Hoy en día, el GPS permite salvar vidas, sirve de ayuda a la sociedad de muchísimas otras maneras y genera 100.000 puestos de trabajo en una industria que mueve varios miles de millones de dólares. El siguiente artículo, una adaptación parcial del artículo escrito por el físico Daniel Kleppner, describe cómo las investigaciones básicas sobre la naturaleza del tiempo y los métodos para medir el tiempo con precisión contribuyeron al desarrollo del GPS. Constituye un maravilloso ejemplo de cómo los trabajos científicos y las investigaciones básicas conducen al desarrollo de tecnologías prácticamente inimaginables cuando se llevaron a cabo las investigaciones.

Tiempo y posición, con precisión

Gracias al GPS se puede contestar una pregunta tan simple como "¿Dónde estoy?" de forma casi inmediata y con una precisión sorprendente. La novedosa tecnología utiliza relojes atómicos que marcan el tiempo con una precisión de un nanosegundo. Estos relojes fueron creados por científicos que no podían imaginar que en el futuro formarían parte de un sistema global de navegación. El sistema se utilizó por primera vez durante la Guerra del Golfo de 1991 y obtuvo críticas muy favorables. Las tropas estadounidenses lo utilizaron para orientarse en tierra, mar y aire, localizar el objetivo de las bombas y orientar los misiles de a bordo. El GPS permitió a las tropas terrestres estadounidenses moverse con rapidez y precisión a través del vasto y monótono desierto de la Península Arábiga.

Desde entonces, la tecnología GPS se ha trasladado al sector civil. Hoy en día, el GPS permite salvar vidas, sirve de ayuda a la sociedad de muchísimas otras maneras y genera puestos de trabajo en una nueva industria que mueve miles de millones de dólares. Los avances conseguidos en la tecnología de circuitos integrados (la tecnología que se utiliza para crear los chips informáticos) muy pronto permitirá construir transmisores y receptores GPS del tamaño de una tarjeta de crédito, tan pequeños y asequibles que prácticamente todos los vehículos y personas podrán disponer de uno.

En tan sólo unos pocos años, las aplicaciones del GPS son prácticamente ilimitadas:

- Los vehículos de emergencia utilizan el GPS para ubicar con exactitud los destinos y trazar rutas.
 - El GPS se utiliza para localizar embarcaciones perdidas en el mar.
 - Los servicios de transporte utilizan GPS para realizar un seguimiento de su flota y acelerar las entregas.
 - Las compañías de transporte equipan los buques cisterna y cargueros con GPS para su navegación, así como para registrar y controlar los movimientos de las embarcaciones.
 - Los propietarios de embarcaciones de recreo y pequeños vehículos comerciales confían en el GPS para la navegación.
 - Los pilotos civiles utilizan GPS para la navegación, fumigación aérea, topografía y fotografía aérea.
 - Al utilizar la tecnología GPS para elaborar los planes de vuelo, las líneas aéreas ahorran millones de dólares. Los GPS se pueden utilizar para el aterrizaje instrumental, tanto en aeropuertos grandes como pequeños, y hacen posible la creación de nuevos sistemas de elusión aérea.
 - La tecnología GPS se usa habitualmente para realizar mapas, mediciones de tierra y en topografía. El GPS se ha utilizado para realizar mapas de carreteras, seguimiento de incendios forestales y para guiar las hojas de los bulldozers en los procesos de construcción, consiguiendo un grado de precisión de centímetros.
 - Los científicos que estudian la Tierra utilizan la tecnología GPS para monitorizar los terremotos y los movimientos de las placas tectónicas terrestres.
-

- Las compañías de telecomunicaciones confían cada vez más en el uso de GPS para sincronizar sus redes digitales terrestres mediante la comparación directa de sus relojes de referencia con la hora del GPS.
- Los fabricantes de satélites utilizan receptores GPS para realizar un seguimiento de las posiciones de los satélites.
- En los automóviles se están instalando GPS para que los conductores puedan saber dónde están y a la vez recibir indicaciones de dirección. En Japón, 500.000 automóviles ya incorporan un sistema de navegación basado en GPS.

Esto es sólo el principio. El mercado mundial actual de la tecnología y receptores GPS se estima en más de 2.000 millones de dólares, y se espera un crecimiento hasta más de 30.000 millones de dólares durante los próximos 10 años.



Aunque originalmente se concibió como una herramienta de navegación para uso militar, el sistema de posicionamiento global se ha trasladado a muchas otras aplicaciones comerciales creando una industria que se prevé alcance 30.000 millones de dólares en ingresos anuales durante la próxima década: en la fotografía, un dispositivo de localización incorporado para automóviles. (Trimble Navigation, Ltd.)

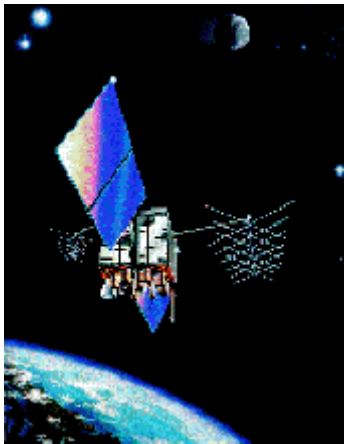
Comenzó con una investigación básica...

La historia del GPS demuestra cómo una investigación básica hizo posible en primer lugar el desarrollo de una tecnología de defensa vital y posteriormente una gran variedad de aplicaciones comerciales. Existen muchos otros avances tecnológicos que han contribuido al desarrollo del GPS, entre los que podemos mencionar las tecnologías de control y lanzamiento de satélites, los dispositivos de estado sólido, los microchips, los circuitos de correlación, la tecnología de diferencia de tiempo de llegada, la tecnología de microondas y la radionavegación. Este relato se centra en cómo la búsqueda del conocimiento de la naturaleza del mundo atómico, concretamente, en la creación de relojes atómicos para estudiar las teorías de Einstein y la relatividad, condujo a la creación de relojes de gran precisión, y cómo dichos relojes se pusieron en funcionamiento posteriormente junto con la tecnología de seguimiento de satélites para satisfacer el deseo humano básico de saber dónde estamos y adónde vamos.

Durante siglos, la única forma de orientarse era observar la posición del sol y las estrellas y realizar una estimación. Incluso después del desarrollo de los relojes modernos, que permitían averiguar la longitud, los instrumentos más precisos podían obtener una posición con una exactitud de varias millas solamente. Sin embargo, en el momento en que la Unión Soviética lanzó el Sputnik el 4 de octubre de 1957, se supo que era posible utilizar esta "estrella artificial" como una herramienta de navegación. La noche siguiente, los investigadores del laboratorio Lincoln del Instituto tecnológico de Massachusetts (MIT) pudieron determinar con precisión la órbita del satélite, al observar cómo la frecuencia aparente de la señal de radio aumentaba al acercarse y disminuía al alejarse, efecto que se conoce como efecto Doppler. Al probar que es posible determinar con precisión la órbita de un satélite desde la tierra, se dio el primer paso para establecer la posibilidad de determinar las posiciones en la tierra mediante la localización de señales emitidas por satélites.

Durante los años siguientes, la marina estadounidense realizó experimentos con una serie de sistemas de navegación por satélite, que comenzó en 1965 con el sistema Transit, desarrollado para satisfacer las

necesidades de navegación de los submarinos que transportaban misiles nucleares Polaris. Estos submarinos debían permanecer ocultos y sumergidos durante varios meses, pero el sistema de navegación basada en giroscopio, conocido como navegación inercial, no podría mantener su precisión durante períodos tan largos. El sistema Transit estaba formado por media docena de satélites que girarían alrededor de la tierra continuamente en órbitas polares. Al analizar las señales de radio transmitidas por los satélites; es decir, al medir el efecto Doppler de las señales, un submarino podía determinar su ubicación con precisión en un período de 10 ó 15 minutos. En 1973, el Departamento de defensa intentaba descubrir un método infalible para la navegación por satélite. Durante una reunión para poner ideas en común realizada el fin de semana del día del Trabajo en el Pentágono, se desarrolló el concepto de GPS, basado en la experiencia del departamento con todos los satélites anteriores. Los componentes esenciales del GPS son los 24 satélites Navstar fabricados por Rockwell International. Cada uno de estos satélites tiene el tamaño de un vehículo de gran tamaño y pesa alrededor de 1.900 libras (900 kilogramos). Todos los satélites giran alrededor de la tierra cada 12 horas en una formación tal que cada punto del planeta siempre se encontrará en contacto por radio con 4 satélites como mínimo. El primer satélite GPS en funcionamiento se lanzó en 1978 y el sistema alcanzó su capacidad completa de 24 satélites en 1993.



Veinticuatro satélites Navstar, del tamaño de un automóvil y unas 1.900 libras (900 kilos) de peso, giran alrededor de la tierra en órbitas de 18.000 kilómetros de altura. El sistema de satélites, construido por Rockwell International y operado por la Fuerza Aérea estadounidense, se completó en 1993, 20 años después de ser concebido en el Pentágono. (Lockheed Martin Astro Space)

Si consideramos lo extremadamente sofisticada que es la tecnología, el principio de funcionamiento del GPS resulta extraordinariamente simple. Cada uno de los satélites transmite de forma continua una señal de radio digital que incluye su propia posición y la hora, con una precisión de un nanosegundos. Un receptor de GPS capta esta información, procedente de cuatro satélites, y la utiliza para calcular su posición en el planeta con una precisión de metros. El receptor compara su hora y la hora que ha enviado el satélite y utiliza la diferencia entre ambas horas para calcular su distancia con respecto al satélite. (La luz viaja a una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo: si, por ejemplo, la hora del satélite es una centésima de segundo anterior a la hora del receptor GPS, los cálculos del receptor indicarán que se encuentra a 300 kilómetros del satélite.) Al contrastar su hora con la de tres satélites de posiciones conocidas, el receptor podrá ubicar con exactitud su longitud, latitud y altitud.

Para emplear el método descrito anteriormente es necesario que tanto los satélites como el receptor dispongan de relojes de gran precisión. Sin embargo, el hecho de que el receptor capte la señal de un cuarto satélite, le permite conseguirlo con un reloj de cuarzo relativamente simple, como el que se utiliza en la mayoría de los relojes de pulsera. Una vez que el receptor ha contactado con cuatro satélites, el sistema toma el control y computa su posición de forma casi instantánea.

Para que el sistema funcione, es necesario que el receptor sepa la posición exacta de los satélites y que éstos puedan mantener la hora con una precisión extraordinaria y fiable. Dicha precisión se consigue mediante la incorporación de cuatro relojes atómicos en cada satélite, estos relojes constituyen los dispositivos para medir el tiempo más precisos jamás construidos. La fiabilidad se consigue mediante las órbitas de 18.000 kilómetros de altura de los satélites, que los aleja de la atmósfera y los mantiene en movimiento a lo largo de trayectorias muy previsibles. El Departamento de defensa realiza un seguimiento de los satélites según sobrevuelan dos veces al día y realiza una medición precisa de su velocidad, posición y altitud. Esta información se vuelve a enviar a los satélites y éstos la transmiten junto con sus señales de tiempo.

Una herramienta para estudiar la naturaleza

El GPS se concibió como una herramienta militar, pero los relojes atómicos que lo hicieron posible se originaron en una investigación básica realizada poco antes de la Segunda Guerra Mundial. En aquel tiempo, los científicos descubrieron que las técnicas de gran precisión desarrolladas para estudiar la estructura atómica fundamental podían utilizarse para construir un reloj atómico. Esta genial idea no estaba relacionada lo más mínimo con la navegación ultraprecisa, si no con el sueño de crear un reloj lo suficientemente bueno para estudiar la naturaleza del tiempo en sí mismo y, en particular, el efecto de la gravedad sobre el tiempo que Einstein había predicho en su teoría de la gravedad, conocido como corrimiento al rojo gravitacional.

Hasta finales de la década de 1920, los relojes de mayor precisión se basaban en la oscilación regular de un péndulo. Fueron desbancados por unos relojes de mayor precisión basados en las vibraciones regulares de un cristal de cuarzo, que tenían un margen de error inferior a una milésima de segundo al día. Pero esta gran precisión tampoco era suficiente para los científicos que deseaban estudiar la teoría de la gravedad de Einstein. Según Einstein, un campo gravitacional podía deformar el espacio y el tiempo. Por lo tanto, si, por ejemplo, se situase un reloj en la cima del Everest, éste avanzaría al día 30 millonésimas de segundo más rápido que un reloj idéntico situado al nivel del mar. La única forma posible de realizar mediciones con este grado de precisión consistía en controlar el reloj mediante las oscilaciones infinitesimales del propio átomo.

El reloj de Rabi

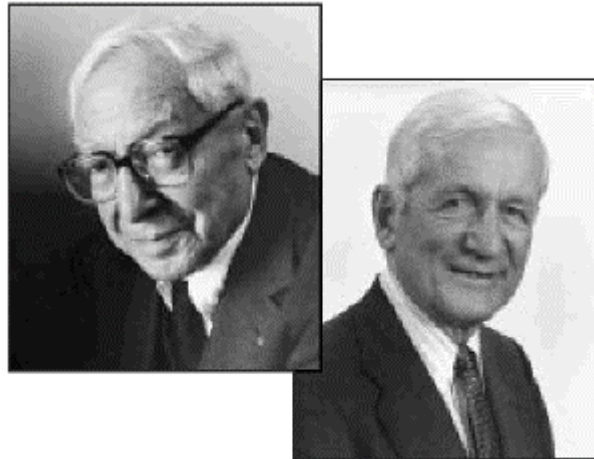
De acuerdo con las leyes de la física cuántica, los átomos absorben o emiten energía electromagnética en cantidades diferenciadas que se corresponden con las diferencias de energía entre las distintas configuraciones de electrones de los átomos, es decir, las distintas configuraciones de electrones que rodean sus núcleos. Cuando un átomo sufre una transición de un "estado de energía" a otro más bajo, emite una onda electromagnética con una frecuencia característica discreta, conocida como frecuencia de resonancia. Esta frecuencia de resonancia es idéntica en todos los átomos de un tipo determinado; por ejemplo, todos los átomos de cesio 133 tienen una frecuencia de resonancia de exactamente 9.192.631.770 ciclos por segundo. Por esta razón, es posible utilizar un átomo de cesio como metrónomo que proporcione la hora con extraordinaria precisión.

El primer progreso sustancial en el desarrollo de un reloj basado en dicho cronómetro atómico se consiguió durante la década de 1930 en un laboratorio de la Universidad de Columbia, en el que I.I. Rabi y sus alumnos estudiaban las propiedades fundamentales de átomos y núcleos. Durante el transcurso de esta investigación, Rabi inventó la técnica conocida como resonancia magnética, que permitía medir las frecuencias de resonancia naturales de los átomos. Rabi recibió por su trabajo el premio Nobel en 1944. En ese mismo año, Rabi sugirió (o, como dijeron sus estudiantes, "dejó caer la idea") por primera vez que la precisión de estas resonancias era tal que podrían utilizarse para crear un reloj de extrema fiabilidad. Concretamente, propuso el uso de las frecuencias del tipo conocido como "transiciones hiperfinas" de los átomos, que son transiciones entre dos estados de energías ligeramente diferentes que se corresponden a distintas interacciones magnéticas entre el núcleo de un átomo y sus electrones.

En este tipo de reloj, un haz de átomos con un estado hiperfino determinado atraviesa un campo electromagnético oscilante. Cuanto más próxima esté la frecuencia de oscilación del campo a la frecuencia de la transición hiperfina del átomo, habrá mayor cantidad de átomos que absorban la energía del campo y, por lo tanto, sufrirán una transición del estado hiperfino original al otro. Un bucle de retroalimentación ajusta la frecuencia del campo oscilante hasta que prácticamente todos los átomos realicen la transición. El reloj atómico emplea la frecuencia del campo oscilante, que ahora se encuentra perfectamente sincronizada con la frecuencia de resonancia exacta de los átomos, como metrónomo para generar impulsos de tiempo.

Rabi no perseguía el desarrollo de un reloj de este tipo, pero hubo otros investigadores que continuaron el estudio para mejorar la idea y perfeccionar la tecnología necesaria. En 1949, por ejemplo, la investigación llevada a cabo por Norman Ramsey, alumno de Rabi, sugirió que si se hacía que los átomos atravesaran el

campo magnético oscilante dos veces, se podría obtener un reloj mucho más preciso. Ramsey recibió el premio Nobel por su trabajo en 1989.



Dos científicos pioneros cuyo trabajo contribuyó al desarrollo del sistema de posicionamiento global GPS: la investigación de I.I. Rabi, a la izquierda, sobre las propiedades fundamentales de los átomos y núcleos, condujo a la invención de una técnica denominada resonancia magnética en la que se basó el primer reloj atómico; a la derecha, Norman Ramsey, antiguo alumno de Rabi, que estableció la base para el desarrollo del reloj atómico de haz de cesio e inventó el máser de hidrógeno, dispositivos que redefinieron la medición del tiempo.

Aplicaciones prácticas

Después de la guerra, el National Bureau of Standards (oficina nacional de normalización) de EE.UU. y el British National Physical Laboratory (laboratorio nacional de física británico) intentaron crear los estándares de la hora atómica basándose en el trabajo sobre la resonancia atómica realizado por Rabi y sus alumnos. El primer reloj atómico fue creado por Louis Essen y John V.L Parry en el National Physical Laboratory, pero para albergar este reloj era necesaria una habitación llena de equipos. Otro de los antiguos colaboradores de Rabi, Jerrold Zacharias, del MIT, consiguió convertir los relojes atómicos en dispositivos prácticos. Zacharias planeaba construir lo que denominaría una fuente atómica, un tipo visionario de reloj atómico que sería lo suficientemente fiable para estudiar el efecto de la gravedad sobre el tiempo que había predicho Einstein. Durante el proceso desarrolló un reloj atómico lo suficientemente pequeño como para transportarse de un laboratorio a otro. En 1954, Zacharias se unió a la National Company de Malden, Massachusetts, para construir un reloj atómico comercial basado en su dispositivo portátil. La compañía fabricó el Atomichron, el primer reloj atómico comercial, 2 años después y vendió 50 en 4 años. Todos los relojes atómicos de cesio que se utilizan actualmente en sistemas GPS descienden del Atomichron.

Los físicos continúan experimentando con nuevas variaciones de las ideas sobre la resonancia atómica de Rabi y sus alumnos, y las ponen en práctica en los relojes atómicos. Existe una técnica que, en vez de utilizar imanes, hace uso de un fenómeno conocido como bombeo óptico para seleccionar los niveles de energía de los átomos encargados de registrar la hora y emplea un haz de luz para conseguir que todos los átomos del haz alcancen el estado deseado. Alfred Kastler, del Ecole Normal Supérieure de París, obtuvo por este trabajo el premio Nobel. Hoy en día, existen muchos relojes atómicos que utilizan átomos de rubidio bombeados de forma óptima en lugar de cesio. Los relojes de rubidio resultan bastante más baratos y pequeños que los relojes de cesio, aunque no son tan precisos.

Otro tipo de reloj atómico es el conocido como máser de hidrógeno. El máser se originó durante la investigación que Charles Townes y sus colegas de la Universidad de Colombia realizaron sobre la estructura de las moléculas en 1954, trabajo por el que Townes compartió el premio Nobel de física en 1964. El máser, precursor del láser, es un dispositivo de microondas que genera su señal mediante la emisión directa de la radiación procedente de átomos o moléculas. Mientras que el máser original de Townes empleaba amoníaco, Ramsey y sus colegas de Harvard desarrollaron un máser en 1960 que funcionaba con hidrógeno y podía utilizarse como un reloj atómico de extremada precisión.

En 1967, las investigaciones realizadas sobre los relojes atómicos ya habían resultado tan fructíferas que el segundo se volvió a definir en función de las oscilaciones de un átomo de cesio. Hoy en día, los relojes atómicos suelen tener un margen de error inferior a 1 segundo cada 100.000 años. El principal estándar horario de nuestro país es el recién inaugurado reloj atómico que se encuentra en el National Institute of Standards and Technology (Instituto nacional de normalización y tecnología), denominado NIST-7. Tiene un margen de error estimado inferior a 1 segundo en 3 millones de años.

Durante años, estos tres tipos de relojes (el reloj de haz de cesio, el de máser de hidrógeno y el de rubidio) se han utilizado en el espacio, ya sea en satélites o en sistemas de control terrestres. En última instancia, los satélites GPS se basan en relojes de cesio semejantes a aquéllos que Rabi ideó hace 60 años.

En 1993, 2 décadas después de su concepción en el Pentágono, el GPS pasó a ser completamente funcional con la puesta en órbita de su vigesimocuarto satélite. La Fuerza aérea estadounidense se encarga de dirigir y controlar estos satélites desde 5 estaciones terrestres repartidas por todo el mundo. Los datos obtenidos se analizan en el Air Force Consolidated Space Operations Center (Centro de operaciones espaciales de la Fuerza aérea) de Colorado, que se encarga de transmitir diariamente actualizaciones a cada uno de los satélites para corregir sus relojes y datos orbitales.

GPS y el futuro

En ocasiones, nos olvidamos de que el GPS sigue siendo un dispositivo militar construido por el Departamento de defensa que costó 12.000 millones de dólares y fue diseñado para uso militar principalmente. Este hecho ha desencadenado varias polémicas respecto al exitoso sistema. Al igual que sucede con cualquier otra tecnología, el progreso conlleva riesgos y el GPS podría beneficiar a contrabandistas, terroristas y fuerzas enemigas. El Pentágono sólo accedió a poner a disposición el sistema GPS para uso comercial tras ser presionado por las compañías que construyeron los equipos y vieron el enorme potencial de mercado. Sin embargo, se acordó que el Pentágono desarrollara una política conocida como disponibilidad selectiva, por la que las señales de mayor precisión emitidas por los satélites del GPS quedan estrictamente reservadas para militares y otros usuarios autorizados. En la actualidad, los satélites GPS emiten dos tipos de señales: una señal civil, con una precisión de hasta 30 metros, y una segunda señal que únicamente pueden decodificar los militares y que tiene una precisión de 18 metros. Además, el Pentágono se reserva el derecho a introducir errores en cualquier momento en la señal civil para reducir su precisión a unos 90 metros.

En marzo de 1996, la Casa Blanca anunció que se pondría a disposición de todo el mundo un nivel mayor de precisión GPS y que la degradación de las señales GPS civiles dejaría de llevarse a cabo dentro de una década. Además, la Casa Blanca reafirmó el compromiso del gobierno federal de proporcionar servicios de GPS para uso civil, comercial y científico en todo el mundo y de forma gratuita.

El futuro del GPS parece no tener límites y abundan las fantasías tecnológicas. El sistema proporciona una dirección disponible nueva, única e instantánea para cada metro cuadrado de la superficie del planeta: un nuevo estándar internacional que permite determinar ubicaciones y distancias. Al menos para las computadoras de todo el mundo, nuestras direcciones pueden no estar determinadas por una calle, una ciudad y un estado, si no

mediante una longitud y latitud. Con la ubicación GPS de servicios almacenados con números de teléfonos en las "páginas amarillas" informatizadas, será posible buscar en un instante un restaurante local o la estación de servicio más cercana en cualquier población. Gracias al sistema GPS, el mundo dispone de una tecnología sin límites, nacida en los laboratorios de científicos motivados por su propia curiosidad para comprender la naturaleza del universo y de nuestro mundo, basada en los resultados de investigaciones básicas realizadas con apoyo público.



Cronología

Este esquema cronológico de eventos seleccionados enfatiza las primeras investigaciones realizadas en física, especialmente los relojes atómicos, que contribuyeron al desarrollo del sistema de posicionamiento global GPS e ilustra el gran valor de este tipo de tales investigaciones básicas a largo plazo en la consecución última de importantes beneficios para la sociedad. No constituye un retrato completo del desarrollo del GPS.

1938-1940

I.I. Rabi inventa la resonancia magnética de haz molecular en la Universidad de Columbia en 1938. Él sus colegas aplican la resonancia magnética a los estudios fundamentales de átomos y moléculas. Se plantea la posibilidad de construir un reloj atómico para medir el corrimiento al rojo gravitacional. Rabi recibe el premio Nobel en 1944 por este trabajo.

1949

Norman Ramsey inventa el método de resonancia del campo oscilante separado en la Universidad de Harvard, por el que se le concedió el Premio Nobel en 1989. Jerrold Zacharias proponer utilizar el método de Ramsey para crear un reloj atómico de "fuente" de haz de cesio con la precisión suficiente para medir el corrimiento al rojo gravitacional.

1949

La oficina National Bureau of Standards pone en funcionamiento un reloj atómico basado en la absorción de microondas del gas amoníaco. Comienzan los trabajos sobre el reloj atómico de haz de cesio.

1954

Charles Townes, en la Universidad de Columbia, demuestra el funcionamiento del primer máser basado en la emisión de la radiación procedente de las moléculas de amoníaco. Townes compartió el premio Nobel de física en 1964.

1954-1956

Zacharias y la empresa National Company desarrollan el primer reloj atómico portátil independiente: el Atomichron.

1957

La Unión Soviética pone en órbita en octubre el Sputnik. Se inaugura el seguimiento Doppler por satélite en el laboratorio Lincoln del MIT y en diciembre se pone en marcha el programa Navy Transit en el laboratorio de física aplicada de la Universidad Johns Hopkins

1959

Albert Kastler y Jean Brossel, que se encontraban trabajando en París y en el MIT, desarrollan métodos de bombeo óptico. Kastler recibió el premio Nobel por este trabajo.

1960

Ramsey y los estudiantes Kleppner y Goldenberg ponen en funcionamiento un máser de hidrógeno en la universidad de Harvard.

1960-1965

Se presenta un reloj de rubidio bombeado ópticamente. Se instalan los estándares de frecuencia del cesio en la mayoría de los laboratorios de estandarización del tiempo.

1964-1965

Se computa la primera posición fija desde un satélite Transit a bordo de un submarino Polaris.

1967

El sistema Transit se pone a disposición de la comunidad civil.

1968

Se definen los estándares de un sistema de navegación por satélite de defensa.

1973

El Departamento de defensa aprueba el desarrollo del GPS Navstar.

1974

Se lanza el primer satélite de prueba de GPS, que pertenece al programa Timation, para probar los relojes de rubidio y las técnicas de diseminación del tiempo.

1977

Se lanza un satélite de prueba que incorpora las principales características de los satélites GPS más recientes, entre las que se incluyen los primeros relojes de cesio en el espacio.

1978-1985

Se ponen en órbita diez prototipos de satélites GPS, fabricados por Rockwell International.

1989-1993

Se realiza el lanzamiento de la serie de 24 satélites, con una media de 6 al año. El lanzamiento del último satélite se realiza el 26 de junio de 1993.

1996

La Casa Blanca anuncia un mayor nivel de precisión del GPS disponible para todo el mundo.